

**ZESZYTY  
NAUKOWE  
POLITECHNIKI  
ŚLĄSKIEJ**

**Krzysztof PARYLAK**

**CHARAKTERYSTYKA KSZTAŁTU CZĄSTEK  
DROBNOZIARNISTYCH GRUNTÓW NIESPOISTYCH  
I JEJ ZNACZENIE W OCENIE WYTRZYMAŁOŚCI**

**BUDOWNICTWO**

**Z. 90**



**GLIWICE 2000**

Krzysztof PARYLAK

**CHARAKTERYSTYKA KSZTAŁTU CZĄSTEK  
DROBNOZIARNISTYCH GRUNTÓW NIESPOISTYCH  
I JEJ ZNACZENIE W OCENIE WYTRZYMAŁOŚCI**

## OPINIODAWCY

Prof. dr hab. inż. Maciej Gryczmański

Prof. dr hab. inż. Wojciech Wolski

## KOLEGIUM REDAKCYJNE

REDAKTOR NACZELNY - Prof. dr hab. Zygmunt Kleszczewski

REDAKTOR DZIAŁU - Mgr inż. Bogusław Cieślak

SEKRETARZ REDAKCJI - Mgr Elżbieta Leško

## REDAKCJA

Mgr Roma Łoś

## REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą  
Rektora Politechniki Śląskiej

PL ISSN 0434-0779

Wydawnictwo Politechniki Śląskiej  
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice  
tel./fax 237-13-81, [www.wydawnictwo.polsl.gliwice.pl](http://www.wydawnictwo.polsl.gliwice.pl),  
[wydawnictwo@polsl.gliwice.pl](mailto:wydawnictwo@polsl.gliwice.pl)

---

Nakład 120+50 egz. Ark. wyd. 8,5. Ark. druk. 8,125. Papier offset. kl. III 70x100 80 g  
Oddano i podpisano do druku 12.12.2000 r. Druk ukończono w grudniu 2000 r.  
Zam. 47/2000

---

Fotokopie, druk i oprawę wykonano w UKiP sc, *J&D Gębka*,  
Gliwice, ul. Pszczyńska 44, tel./fax 231-87-09

## SPIS TREŚCI

	Str.
<b>OZNACZENIA</b> .....	7
<b>1. WPROWADZENIE</b> .....	14
1.1. Cel i zakres pracy .....	15
<b>2. POCHODZENIE I MINERALOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI BADANYCH GRUNTÓW</b> .....	18
2.1. Badania składu mineralnego i chemicznego .....	24
<b>3. WPLYW SKŁADU MINERALNEGO NA TARCIE</b> .....	28
<b>4. PODSTAWOWE CECHY FIZYCZNE</b> .....	32
4.1. Uziarnienie .....	32
4.2. Powierzchnia właściwa .....	33
4.3. Gęstości właściwe i porowatości wewnętrzne cząstek .....	35
4.3.1. Określenie objętości drożnych porów cząstek popiołowych .....	36
<b>5. GEOMETRYCZNA CHARAKTERYSTYKA KSZTAŁTÓW CZĄSTEK</b> .....	38
5.1. Definicje i sposoby badań nieregularności kształtów cząstek .....	38
5.2. Badania określające parametry geometryczne cząstek .....	42
5.3. Analiza statystyczna wyników badań .....	43
5.4. Badanie stopnia kulistości .....	44
5.5. Szorstkość powierzchni .....	46
5.5.1. Zagadnienia wymiaru fraktalnego .....	46
5.5.2. Badanie stopnia szorstkości powierzchni .....	48
5.6. Badanie stopnia zaokrąglenia naroży .....	51
5.7. Badanie stopnia ostrokrawędzistości cząstek .....	53
5.8. Obliczenie wartości względnych cech kształtu .....	54
<b>6. ZAGĘSZCZALNOŚĆ</b> .....	57
6.1. Badania maksymalnego i minimalnego wskaźnika porowatości .....	58
<b>7. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE</b> .....	60
7.1. Zarys rozwoju badań wytrzymałości na ścinanie .....	60
7.2. Rozwój aparatury i sposobów badań wytrzymałości na ścinanie .....	62
7.3. Wybór metody badania .....	65
7.4. Badanie w aparacie trójosiowego ściskania .....	66

7.4.1. Opis sposobu wykonania próbek o jednakowej porowatości .....	69
7.4.2. Sposób przygotowania próbek o stałym stopniu zagęszczenia .....	72
7.4.3. Opis sposobu przeprowadzenia badania .....	73
7.5. Przyjęty sposób przedstawienia i interpretacji wyników badań .....	76
<b>8. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE .....</b>	<b>80</b>
8.1. Badania przy jednakowym wskaźniku porowatości .....	80
8.1.1. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na przebieg procesu ścinania próbek o jednakowej porowatości początkowej .....	80
8.1.2. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na zmiany parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntów o jednakowej porowatości początkowej .....	85
8.1.3. Ocena wpływu cech kształtu na efekty zązębiania się cząstek w badaniach gruntów o jednokowej porowatości początkowej .....	89
8.1.4. Ocena wpływu cech kształtu cząstek na wartości kąta tarcia w badaniach o jednakowej porowatości początkowej .....	90
8.2. Analiza wyników badań przy jednakowym stopniu zagęszczenia .....	100
8.2.1. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na przebieg procesu ścinania próbek o jednakowym stopniu zagęszczenia .....	100
8.2.2. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na zmiany parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntów o jednakowym początkowym stopniu zagęszczenia .....	101
<b>9. PRAKTYCZNE ZNACZENIE BADAŃ .....</b>	<b>109</b>
<b>10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....</b>	<b>113</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>117</b>
<b>STRESZCZENIE .....</b>	<b>127</b>



## CONTENTS

	Page
<b>DENOTATIONS</b> .....	11
<b>1. INTRODUCTION</b> .....	14
1.1. Aim and range of study .....	15
<b>2. GENESIS AND MINERALOGICAL PROPERTIES OF TESTED SOILS</b> .....	18
2.1. Investigation of mineralogical and chemical composition .....	24
<b>3. INFLUENCE OF MINERALOGICAL COMPOSITION ON FRICTION</b> .....	28
<b>4. BASICS PHYSICAL PROPERTIES</b> .....	32
4.1. Grain size distribution .....	32
4.2. Specific surface .....	33
4.3. Specific gravity and internal porosity of particles .....	35
4.3.1. Investigation of volume of opened pores of ash particles .....	36
<b>5. GEOMETRICAL DESCRIPTION OF PARTICLES</b> .....	38
5.1. Definitions and means of shape particles tests .....	38
5.2. Investigation of geometrical parameters of particles .....	42
5.3. Microscopic tests .....	43
5.4. Tests of degree sphericity .....	44
5.5. Roughness of surface .....	46
5.5.1. Problems of the fractal dimension .....	46
5.5.2. Degree of roughness measurement .....	48
5.6. Degree of roundness of corners measurement .....	51
5.7. Measurement of degree of angularity .....	53
5.8. Calculation of relative parameters of shape .....	54
<b>6. COMPACTIBILITY</b> .....	57
6.1. Maximum and minimum void ratio test .....	58
<b>7. RESISTANCE ON SHEAR SOIL TESTS</b> .....	60
7.1. Review of resistance on shear tests development .....	60
7.2. Development of apparatus and manner of shear strength tests .....	62
7.3. Choice of investigation method .....	65
7.4. Test in triaxial apparatus .....	66

7.4.1. Description of means of performance samples about identical void ratio .	69
7.4.2. Description of means of performance samples about identical relative density .....	72
7.4.3. Description of means to test in triaxial apparatus .....	73
7.5. Applied means of produced and interpretation of tests results .....	76
<b>8. ANALYSE OF RESULTS OF TESTS ON SHEAR STRENGTH .....</b>	<b>80</b>
8.1. Tests on the same initial porosity .....	80
8.1.1. Analyse of influence of shape particles on development of shearing process of sample about the same initial porosity .....	80
8.1.2. Analyse of influence of of shape particles on change resistance on shear parameters of soil about the same initial porosity .....	85
8.1.3. Estimation of influence of shape particles on interlocking effects in soils tests about the same initial porosity .....	89
8.1.4. Estimation of influence of shape particles on shear angle values in tests about the same initial porosity .....	90
8.2. Tests on the same initial relative density .....	100
8.2.1. Analyse of influence of shape particles on development of shearing process of sample about the same relative density .....	100
8.2.2. Analyse of influence of shape particles on changes of shear resistance on parameters of soil about the same initial relative density ....	101
<b>9. PRACTICAL SENSE OF INVESTIGATION .....</b>	<b>109</b>
<b>10. CONCLUSIONS .....</b>	<b>113</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>117</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>129</b>

## OZNACZENIA

<b>A</b>	- powierzchnia przekroju poprzecznego próbki
<b>A</b>	- stopień ostrokrawędzistości cząstki
<b>c</b>	- kohezja
<b>c', <math>\bar{c}</math></b>	- kohezja efektywna
<b>c<sub>z</sub></b>	- „odcięta spójności”
<b>d<sub>10</sub>, d<sub>17</sub>, d<sub>50</sub>, d<sub>60</sub></b>	- średnice miarodajne
<b>d<sub>c</sub></b>	- średnica koła o powierzchni równej powierzchni pola przekroju poprzecznego cząstki
<b>D<sub>c</sub></b>	- średnica najmniejszego okręgu opisanego na przekroju poprzecznym cząstki
<b>d<sub>δ</sub></b>	- średnica kuli mająca taką samą objętość jak cząstka
<b>D<sub>δ</sub></b>	- średnica kuli opisanej na cząstce
<b>e</b>	- wskaźnik porowatości
<b>e<sub>e</sub></b>	- międzycząstkowy wskaźnik porowatości
<b>e<sub>max</sub></b>	- maksymalny wskaźnik porowatości
<b>e<sub>min</sub></b>	- minimalny wskaźnik porowatości
<b>F<sub>u</sub></b>	- powierzchnia wieloboku opisana na cząstce
<b>I<sub>a</sub></b>	- wskaźnik szorstkości
<b>I<sub>a max</sub></b>	- maksymalny wskaźnik szorstkości
<b>K<sub>o</sub></b>	- współczynnik parcia bocznego
<b>k</b>	- parametr obwiedni Mohra
<b>L, B, G</b>	- długość, szerokość i wysokość prostopadłościanu opisanego na okruchu
<b>(L+G) / 2B</b>	- współczynnik izomeryczny okruchu
<b>(L+B) / 2G</b>	- współczynnik spłaszczenia okruchu
<b>L / (B+G)</b>	- współczynnik wydłużenia okruchu
<b>m<sub>s</sub></b>	- masa szkieletu



$m_w$	- masa wody
$N$	- ilość okręgów
$n$	- parametr obwiedni Mohra
$n$	- porowatość
$n_e$	- porowatość międzycząstkowa
$n_p$	- porowatość stanowiąca przez drożne pory cząstek
$P$	- stopień zaokrąglenia naroży
$P$	- przyłożona siła
$P_{Tx}$	- naprężenie normalne, przy którym obwiednia Mohra przecina się z tworzącą kąta $\Phi_B$ powiększonego o połowę kąta $\Delta\Phi$
$r_i$	- promienie okręgów wpisanych w naroża cząstki
$r_o$	- promień największego okręgu wpisanego w cząstkę
$s$	- odchylenie standardowe
$s_e$	- błąd standardowy oszacowanej średniej
$Sr$	- stopień wilgotności
$u$	- ciśnienie porowe
$U$	- wskaźnik różnoziarnistości
$u_a$	- ciśnienie powietrza porowego w próbce
$U_u$	- długość obwodu wieloboku opisanego na cząstce
$U_{rz}$	- obwód rzeczywisty
$U_{opr}$	- obwód uproszczony
$w$	- wilgotność
$v$	- współczynnik zmienności
$V_o$	- objętość początkowa
$\alpha$	- kąt wyprowadzony z naroża cząstki
$\alpha_s$	- współczynnik nieregularności niekulistych cząstek
$\alpha_v$	- współczynnik nieregularności kształtu kulistego
$\Delta l$	- zmiana długości
$\Delta U$	- różnice długości obwodu cząstki i obwodu wieloboku opisanego
$\Delta\tau$	- przyrost wytrzymałości na ścinanie
$\Delta\Phi$	- różnica pomiędzy maksymalnym kątem wyprowadzonym stycznie do obwiedni przy $\sigma_n = 0$ a kątem $\Phi_B$
$\varepsilon$	- odkształcenie osiowe próbki

$\rho_d$	- gęstość objętościowa szkieletu gruntowego
$\rho_{d \max}$	- maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego
$\rho_{d \min}$	- minimalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego
$\rho_s$	- gęstość właściwa cząstek
$\rho_{se}$	- gęstość właściwa szkieletu pomniejszona o masę, jaką stanowiłyby pory, gdyby wypełnione były masą szkieletu
$\rho_w$	- gęstość wody
$\sigma$	- naprężenie normalne
$\sigma', \bar{\sigma}$	- naprężenia efektywne
$\sigma_n$	- składowa naprężenia normalnego
$\sigma_{ff}$	- naprężenie normalne w chwili ścięcia
$\sigma_1$	- największe naprężenie główne
$\sigma_2$	- pośrednie naprężenie główne
$\sigma_3$	- najmniejsze naprężenie główne
$\sigma_3''$	- efektywne naprężenie boczne
$\tau$	- wytrzymałość gruntu na ścinanie
$\tau_{ff}$	- wytrzymałość na ścinanie w chwili ścięcia
$\phi$	- kąt tarcia wewnętrznego
$\phi', \bar{\phi}$	- efektywne kąty tarcia wewnętrznego
$\Phi$	- stopień kulistości
$\Phi$	- styczny kąt tarcia wewnętrznego
$\Phi_B$	- wyjściowy (podstawowy) kąt tarcia wewnętrznego, odpowiadający w przybliżeniu wytrzymałości ustalonej
$\Phi_{cv}$	- kąt tarcia w warunkach stanu krytycznego
$\Phi_{\max}$	- kąt nachylenia stycznej do obwiedni Mohra wyprowadzony od zerowych naprężeń normalnych
$\Phi_{PT}$	- kąt tarcia z badań trójosiowego ściskania próbek w stanie luźnym
$\Phi_s$	- uśredniony kąt tarcia wewnętrznego
$\Phi_\mu$	- kąt tarcia fizycznego powierzchni minerałów
$\Sigma \Delta V$	- przyrost objętości
$\Sigma \Delta V / V_0$	- odkształcenie objętościowe

$\Psi$	- „kulistość operatywna”	47
$\zeta_{ocI}$ i $\zeta_{ocII}$	- całkowite ogólne wskaźniki cech kształtu i powierzchni cząstek	48
$\zeta_0$	- ogólny wskaźnik cechy kształtu i powierzchni cząstek	48
$\zeta_{\Phi}$	- wskaźnik kulistości	48
$\zeta_P$	- wskaźnik stopnia zaokrąglenia naroży	49
$\zeta_{(1-Ia)}$	- wskaźnik gładkości	49
$\zeta_{(1-A)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości.	49
$\zeta_{(1-B)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-C)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-D)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-E)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-F)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-G)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-H)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-I)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-J)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-K)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-L)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-M)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-N)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-O)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-P)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-Q)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-R)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-S)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-T)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-U)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-V)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-W)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-X)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-Y)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49
$\zeta_{(1-Z)}$	- wskaźnik niestrokrawędzistości	49

## DENOTATIONS

<b>A</b>	- area of cross – section of sample
<b>A</b>	- degree of angularity
<b>c</b>	- apparent cohesion
<b>c', <math>\bar{c}</math></b>	- cohesion effective
<b>c<sub>z</sub></b>	- „cohesion intercept”
<b>d<sub>10</sub>, d<sub>17</sub>, d<sub>50</sub>, d<sub>60</sub></b>	- projected diameter of particle
<b>D<sub>c</sub></b>	- diameter of the smallest circle circumscribing that projected area
<b>d<sub>δ</sub></b>	- volume of sphere about the same volume as volume of particle
<b>D<sub>δ</sub></b>	- diameter of sphere inscribed on particle
<b>e</b>	- voids ratio
<b>e<sub>e</sub></b>	- interparticle voids ratio
<b>e<sub>max</sub></b>	- maximum voids ratio
<b>e<sub>min</sub></b>	- minimum voids ratio
<b>Fu</b>	- surface of polygon circumscribed on particle
<b>I<sub>R</sub></b>	- index of aspericity
<b>I<sub>a max</sub></b>	- maximum index of aspericity
<b>K<sub>o</sub></b>	- coefficient of earth pressure at rest
<b>k</b>	- parameter of Mohr's envelope
<b>L, B, G</b>	- length, breadth, thickness of rectangular inscribed on particle
<b>(L+G) / 2B</b>	- isomeric coefficient of particle
<b>(L+B) / 2G</b>	- flaky coefficient of particle
<b>L / (B+G)</b>	- elongatoin coefficient of particle
<b>m<sub>s</sub></b>	- mass of solid particle
<b>m<sub>w</sub></b>	- mass of water
<b>N</b>	- number of circle
<b>n</b>	- parameters of Mohr's envelope
<b>n</b>	- porosity

$n_e$	- inerparticle porosity
$n_p$	- porosity, which consisted opened pores of particle
$P$	- roundness
$P$	- applied force
$P_{Tx}$	- median angle minor principal stress
$r_i$	- radius of circle described in corner of particle
$r_o$	- radius of maximal circle described in particle
$s$	- standard deviation
$s_e$	- standard error
$Sr$	- degree of saturation
$u$	- pore pressure
$U$	- uniformity coefficient
$u_a$	- pore air pressure
$U_{is}, U_{upr}$	- length of polygon circumscribed on particle
$U_{rz}$	- polygon of particle
$w$	- humidity
$v$	- coefficient of variation
$V_o$	- initial volume of sample
$\alpha$	- angle from corner of particle tangents to the maximum inscribed circle
$\alpha_s$	- coefficient of angularity of angular particles
$\alpha_v$	- coefficient of angularity of spherical shape
$\Delta l$	- change of length of sample
$\Delta U$	- difference between length of perimeter of particles and length of polygon circumscribed on particles
$\Delta \tau$	- changes of the shear strength
$\Delta \Phi$	- maximum difference between $\Phi_B$ and angle for $\sigma_n = 0$
$\varepsilon$	- axial strain
$\rho_d$	- dry density
$\rho_{d \max}$	- maximum dry density
$\rho_{d \min}$	- minimum dry density
$\rho_s$	- specific gravity
$\rho_{se}$	- specific gravity of soil reduced by mass, if opened pores will filled by mass of soil



$\rho_w$	- density of water
$\sigma$	- normal stress
$\sigma', \bar{\sigma}$	- effective normal stress
$\sigma_n$	- stress normal to surface of failure
$\sigma_{ff}$	- normal stress to surface of failure at failure
$\sigma_1$	- major principal stress
$\sigma_2$	- medial principal stress
$\sigma_3$	- minor principal stress
$\sigma_3''$	- effective confining pressure
$\tau$	- shear stress
$\tau_{ff}$	- shear stress at failure
$\phi$	- angle of shear resistance
$\phi', \bar{\phi}$	- angle of shear resistance on effective stress
$\Phi$	- degree of sphericity
$\Phi$	- tangent angle of shear resistance
$\Phi_B$	- basic angle of friction ( between $\Phi_{cv}$ and $\Phi_\mu$ )
$\Phi_{cv}$	- critical angle of shear resistance
$\Phi_{max}$	- maximum angle tangent to Mohr's envelopes at $\sigma_n = 0$
$\Phi_{PT}$	- angle of shear resistance obtained from undrained triaxial tests on loose state
$\Phi_s$	- median angle of friction
$\Phi_\mu$	- physical static frictional angle of particles or minerals
$\Sigma\Delta V$	- changing of volume
$\Sigma\Delta V/V_0$	- volumetric strain
$\Psi$	- „sphericity operatoinal“
$\zeta_{ocI}$ and $\zeta_{ocII}$	- total indexes of shape, and angularity of surface particles
$\zeta_0$	- total index of shape, and angularity of surface particles
$\zeta_\Phi$	- index of sphericity
$\zeta_P$	- index of degree roundness
$\zeta_{(1-Ia)}$	- index of smoothness
$\zeta_{(1-A)}$	- index of angularity.

## 1. WPROWADZENIE

W licznych problemach budownictwa, inżynierii środowiska, geologii inżynierskiej czy rolnictwa właściwości gruntów mają istotny wpływ na procesy wywoływane zarówno działaniem sił natury, jak i działalnością człowieka. W pierwszej grupie uwarunkowań zawierają się zagadnienia wynikające głównie z naturalnych obciążeń, efektów ruchu wód, działania wiatrów, zmian termicznych czy trzęsień ziemi. Druga grupa problemów to niezliczone przypadki różnorodnej działalności człowieka, wynikającej m.in. ze statycznego i dynamicznego obciążania i odciążania gruntu, formowania różnorodnych konstrukcji ziemnych, naruszania istniejącej struktury oraz zagęszczania i wzmacniania mas ziemnych. Zagadnienia te ujmowane są w różnym stopniu przez wiele dyscyplin rozpoznających i opisujących poszczególne właściwości pod kątem określonych potrzeb. W nieco innym ujęciu będą one analizowane przez inżyniera geotechnika rozwiązującego problemy inżynierii i budownictwa, pod innym kątem przez hydrogeologa prognozującego zjawiska ruchu wody, a jeszcze innego poznawczego ukierunkowania wymagają potrzeby gleboznawstwa. Tym niemniej we wszystkich tych problemach podstawową materią jest rozdrobniona skała ulegająca w wyniku procesów wietrzenia i przemieszczania siłami natury ciąglemu postępującemu rozdrabnianiu. Zróżnicowane właściwości mineralów budujących cząstki gruntowe oraz zmienność rozdrobnienia od frakcji kamienistej po łąwą powodują, że powiązany ze sobą układ fazy stałej, ciekłej i gazowej decyduje o dużej zmienności właściwości fizycznych. W tej grupie zagadnień, obok cech uziarnienia, składu mineralnego i stopnia wilgotności, duży wpływ na właściwości gruntów ma kształt i stopień skonfigurowania powierzchni cząstek, warunkujący zarówno wzajemne ich oddziaływanie w procesie przemieszczania, jak i możliwości utrzymywania oraz ruchu wody. Dużymi skonfigurowaniami powierzchni cechują się różnorodne poprodukcyjne odpady przemysłowe, a w szczególności składowane w ogromnych ilościach popioły lotne.

Geometryczna struktura cząstek opisywana jest czterema parametrami, tj. stopniem kulistości, nieregularnością kształtów – określaną również jako stopień nieregularności, stopniem zaokrąglenia naroży i szorstkością powierzchni (Herdan, 1953; Kolbuszewski, 1967; Lees,

1964; Frossard, 1981). Jednakże, prawdopodobnie ze względu na złożoność badań, w zastosowaniach nadal powszechnie stosowana jest uproszczona metoda oceny cech kształtu i stopnia zaokrąglenia naroży, polegająca na porównywaniu mikroskopowych obrazów zbiorowiska cząstek ze wzorcowymi tablicami opracowanymi w 1941 roku przez Krumbeina (Lee i inni, 1967; Koerner, 1970 a; Bora, 1984; Wroth, Houlby, 1985). Pomijana jest przy tym szorstkość powierzchni oraz również współlistnienie tych cech jako jednego czynnika współdziałającego na proces przemieszczania cząstek.

Po prześledzeniu przedmiotowej literatury można zatem mówić o braku dostępnych i dokładnych metod badawczych z tego zakresu, gdyż metody pomiarów z zastosowaniem mikroskopu skaningowego z analizatorem kształtów (Frossard, 1981; Matsoul i in., 1978) nie zostały dostatecznie opracowane i spopularyzowane. Najnowsze i nowe prace z zakresu badań właściwości gruntów niespoistych przy ocenie kształtu i powierzchni cząstek niekiedy pomijają to zagadnienie, lub nadal posługują się dość ogólnymi pojęciami podziału, jak np. zaokrąglony, nieregularny, bardzo nieregularny, cylindryczny, kulisty (Negussej i in. 1988, Novello, Johnston 1995, Hyodo i in. 1998). Znajduje to także potwierdzenie w jednym z najnowszych światowych podręczników (Bell i in., 1987), gdzie po przedstawieniu metody Krumbeina stwierdza się *„Kształt jest prawdopodobnie najbardziej podstawową właściwością cząstek , ale niestety jest on bardzo trudny do określenia”*. W innej pracy (Homand – Etienne i in., 1989) mówi się, że nadal nie ma uznanych sposobów badania stopnia szorstkości powierzchni.

W zakresie oceny współzależności pomiędzy geometrycznymi cechami powierzchni cząstek a wartościami kąta tarcia wewnętrznego nieliczni autorzy podają, że przy granicznych zmiennościach stopnia kulistości i stopnia zaokrąglenia naroży, a w niektórych przypadkach uwzględnianego stopnia ostrokrawędzistości cząstek, wartość kąta tarcia wewnętrznego zmienia się o  $6^{\circ}$  –  $9^{\circ}$  (Sowers, 1965; Hansen i Lundgrum, 1965; Barden, Khayatt, 1966; Koerner, 1970). W badaniach niniejszej pracy wykazano, że różnice te są większe.

## 1.1. Cel i zakres pracy

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań i analiz było określenie wpływu nieregularności kształtów i szorstkości powierzchni cząstek drobnodziarnistych gruntów niespoistych na wybrane właściwości fizyczne, w tym na parametry wytrzymałości na ścinanie, powierzchnię

właściwą, a także na cechy zagęszczalności. Do ich realizacji wybrano materiały gruntowe spełniające następujące wymagania:

- użyte w badaniach 4 grunty nie zawierały frakcji ilowej, były możliwie najbardziej drobnoziarniste i miały jednakowe uziarnienie,
- doboru gruntów do badań dokonywano w ten sposób, aby zróżnicowania kształtów i szorstkości powierzchni ich cząstek zmieniały się od ziaren kulistych i gładkich aż po możliwie najbardziej nieregularne agregaty o skonfigurowanych i szorstkich powierzchniach,
- pod względem składu mineralnego badane materiały stanowił głównie kwarc lub inne minerały o trójosiowej budowie siatki krystalicznej. Warunkowało to zachowanie takiej samej wartości kąta tarcia fizycznego minerałów  $\Phi_{\mu}$ ,
- w celu wyeliminowania roli wody użyte do badań grunty wysuszono w  $105^{\circ}\text{C}$ , a następnie schłodzono i przechowywano w ekssykatorze,
- próbki każdego z gruntów przeznaczone do badań wytrzymałości na ścinanie badano w dwóch wariantach. W pierwszym wariantcie serii badań próbki zagęszczano do jednakowej porowatości ( $e = 0,65$ ), a w drugim wariantcie badano je w stanie luźnym poddanym konsolidacji naprężeniem 100 kPa.

Dla każdego z materiałów opisano genezę, wykonano badania powierzchni właściwych, gęstości właściwych, w tym określenia objętości zamkniętych pęcherzyków powietrza w cząstkach popiołu i w cząstkach kulek szklanych. W przypadku popiołów wykonano badania objętości drożnych porów cząstek, co umożliwiło obliczenie porowatości międzycząstkowej tego gruntu. Badania zagęszczalności wykonano metodą wibrowania.

Z każdego z materiałów o nieregularnych cząstkach wydzielono frakcje 0,1 – 0,05 mm, dla których wykonano zdjęcia mikroskopowe, a następnie dla losowo wybranych 25 ziaren (Moore, Donaldson 1995) dokonano pomiarów stopnia kulistości, stopnia zaokrąglenia naroży, stopnia nieregularności kształtu i stopnia szorstkości powierzchni cząstek. Wyniki opracowano statystycznie. W celu połączenia tych cech w jeden parametr zaproponowano alternatywnie dwa ogólne wskaźniki cech kształtu i powierzchni  $\zeta_{oc1}$  i  $\zeta_{oc11}$ .

Badania wytrzymałości na ścinanie wykonano metodą UU w aparacie trójosiowego ściskania na 2 seriach suchych próbek o jednakowej porowatości i jednakowym stopniu zagęszczenia w 6 zakresach naprężeń bocznych  $\sigma_3$  od 0,1 kPa do 200 kPa z pomiarem ciśnienia powietrza w porach. Ścinania prowadzono do odkształceń osiowych  $8 \div 12\%$  mierząc zmiany obwodów próbek. Wyniki przeanalizowano, określając wpływ wskaźnika kształtów i



struktury cząstek ( $\zeta_{ocll}$ ) zarówno na zmienności maksymalnego i minimalnego wskaźnika porowatości, jak i na parametry wytrzymałości na ścinanie. Przeanalizowano również wpływ struktury cząstek na zmiany objętościowe zachodzące w procesie ścinania. Obwiednie kół Mohra wykreślono dla maksymalnych i dla ustalonych wartości dewiatorów naprężeń  $\tau$ . Wartości kątów tarcia zinterpretowano metodą stycznych do obwiedni i poprzez wyznaczenie kąta uśrednionego dla wybranego zakresu naprężeń  $\sigma$ . Pozwoliło to na ocenę wpływu wskaźnika cech kształtu na zmiany wytrzymałości na ścinanie oraz na wartości stycznego ( $\Phi$ ) i uśrednionego ( $\Phi_s$ ) kąta tarcia wewnętrznego. W tym celu określono za Maksimowiczem (1989) wartość kąta tarcia  $\Phi_B$  odpowiadającego w przybliżeniu wytrzymałości ustalonej. Zinterpretowano wpływ struktury cząstek na uzyskane krzywoliniowe kształty obwiedni Mohra oraz podjęto próbę opisu podstawowych mechanizmów i składowych oporu tarcia. Podjęto próbę uzasadnienia wartości spójności strukturalnych (cohesion intercept) uzyskanych dla popiołu i pyłu piaszczystego z Granicznej. Wyniki badań konfrontowano z wartościami i interpretacjami podawanymi w literaturze.



## 2. POCHODZENIE I MINERALOGICZNE WŁAŚCIWOŚCI BADANYCH GRUNTÓW

Do realizacji programu badań użyto gruntów drobnoziarnistych nie zawierających frakcji ilowej, które mocno różnią się stopniem skonfigurowania powierzchni zewnętrznej cząstek. Celem wyeliminowania niektórych czynników wpływających na wartości oporu ścinania jako kryterium doboru przyjęto, że będą to grunty suche, w miarę możliwości monomineralne i jednakowo uziarnione.

W wyniku poszukiwań i badań terenowych jako najbardziej odpowiednie materiały wybrano:

- kulki szklane,
- eoliczny pył piaszczysty z Krakowian,
- odpadowy pył piaszczysty z zakładu przeróbki granitu w Granicznej,
- popiół lotny z węgla kamiennego z mokrego składowiska w Łaziskach.

Założoną jednorodność uziarnienia uzyskano metodą odejmowania lub dodawania niektórych frakcji.

**Kulki szklane** używane są często w badaniach jako monomineralny grunt modelowy do wyjaśnienia wielu mechanizmów zjawiska tarcia (Horn i Deere, 1962; Kolbuszewski, 1965; Ovaldo Shelley, 1989). Wykorzystano je również w niniejszej pracy mając na uwadze ich dokładną kulistość oraz bardzo dużą gładkość powierzchni (rys. 1, 2). Materiał do badań otrzymano w wytwórni kulek produkowanych w celach przemysłowych przez przedsiębiorstwo „Interminglass Co. Ltd.” w Wałbrzychu. Powstają one w odpowiednim procesie technologicznym poprzez przetopienie słuczek niekwalifikowanego szkła okiennego wytwarzanego w Hucie Szkła w Szczakowej. Uzyskany produkt segregowany jest następnie na kilkanaście przedziałów frakcji o uziarnieniu od 0,004 mm do 1,0 mm (Interminglas, 1993). Mieszając ze sobą odpowiednie ilości wybranych frakcji lub ich części, złożono sztuczny grunt o uziarnieniu pyłu piaszczystego.

W procesie technologicznym wytapiania, podobnie jak w popiołach, powstają w cząstkach zamknięte pustki wypełnione gazami, powodujące wyraźne zmniejszenie ciężaru właściwego. Przyjmując gęstość właściwą kwarcu  $2,66 \text{ t/m}^3$  i oznaczoną gęstość właściwą kulek  $2,45 \text{ t/m}^3$  (tabl. 5) obliczono, że ich wewnętrzna porowatość wynosi  $7,8\%$ . Badania składu chemicznego szkła wykonywane przez Laboratorium Huty w Szczakowej (Interminglas, 1993) wskazują, że jest to szkło sodowe zbudowane głównie z  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Na}_2\text{O}$  (tabl. 2). Pierwotny surowiec produkcyjny stanowią czyste piaski kwarcowe, w tym również trzeciorzędowy piasek z Krzeszówka koło Kamiennej Góry (Dziedzic i in., 1979). Badania mineralogiczne wykazały w nim  $97\%$  zawartość krzemionki. Na podstawie obserwacji mikroskopowych zbiorowiska cząstek stwierdzono, że kulki niekształtne, w tym ziarna niekuliste, stanowią zaledwie kilka procent. Z tych powodów uznano je za bardzo dobry grunt modelowy do realizacji założeń niniejszej pracy.

**Pył piaszczysty z Krakowian.** W celu uzyskania kwarcowego pyłu piaszczystego o wymaganym uziarnieniu (rys. 6) i o średnim stopniu obtoczenia cząstek wykorzystano naturalny pył osadów eolicznych ze Wzgórz Trzebnickich. Stanowią go lessy powstałe w wyniku zwiewania z powierzchni lodowca i przenoszenia przez silne wiatry drobnych, piaszczystych i pyłowych cząstek, które w warunkach chłodnego klimatu peryglacialnego, jaki panował u schyłku zlodowacenia środkowopolskiego i w początkowym okresie zlodowacenia północnopolskiego, osadzały się na wcześniejszych utworach piaszczystych akumulacji wodno-lodowcowej, osiągając niekiedy miąższość kilkunastu metrów (Kościszewska - Musiał, 1988; Winnicki, 1990).

Lessy pobrane z odsłonięcia ściany wąwozu drogi w Krakowianach zawierały początkowo  $16\%$  frakcji piaskowej,  $80\%$  frakcji pyłowej i  $ok. 4\%$  frakcji ilowej. W celu pozbycia się frakcji ilowej próbę o masie  $ok. 10 \text{ kg}$  poddano gotowaniu w wodzie z dodatkiem węgla sodu, a następnie rozcieńczaniu w wysokim pojemniku z większą ilością wody. Po upływie  $4 - 6$  godzin spokojnej sedymentacji zlewano wodę nadosadową wraz z zawiesiną. Proces płukania, mieszania i sedymentacji powtarzano 2-krotnie, tj. aż do uzyskania po  $18$  godzinach klarownej wody nadosadowej. Tę samą próbę poddano jeszcze dwukrotnie procesowi gotowania i sedymentacji, przy czym ostatnia z nich była bez dodatku węgla sodu. Pozbyto się w ten sposób frakcji ilowej i częściowo drobniejszego przedziału frakcji pyłowej. Wykonując kontrolne badania uziarnienia, a następnie uzupełniając niedobór frakcji piaskowej odsianej z innej partii tego materiału uzyskano  $ok. 7 \text{ kg}$  próbę pyłu piaszczystego o uziarnieniu jak na rys. 6. Badania składu mineralnego (wykonane jeszcze przed oddzieleniem iltu) wykazały

3,7% obecność minerałów ilastych, które w procesie płukania zostały usunięte. Korygując w ten sposób procentową zawartość pozostałych minerałów w próbie można było przyjąć, że użyty do badań grunt zawierał ponad 95% kwarcu, ok. 0,7% skaleni i do 4,3 % innych nieilastych minerałów.

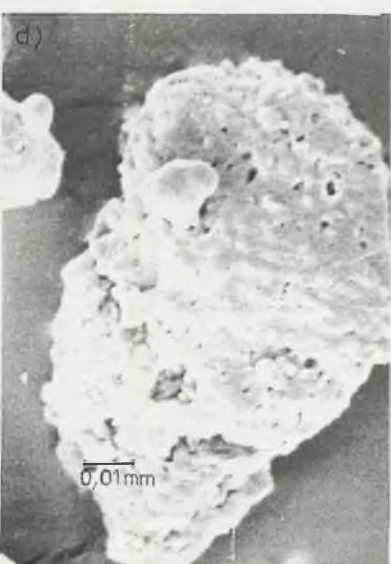
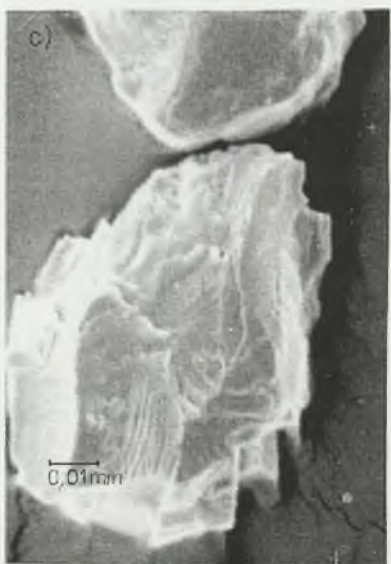
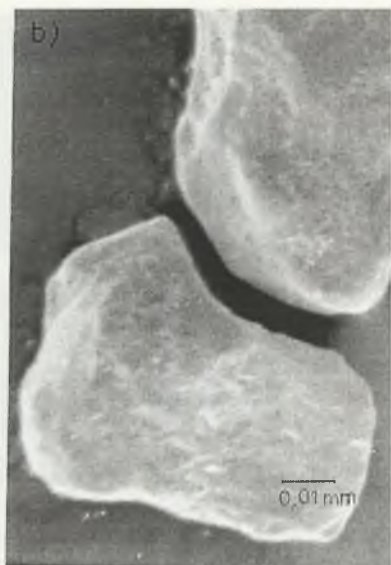
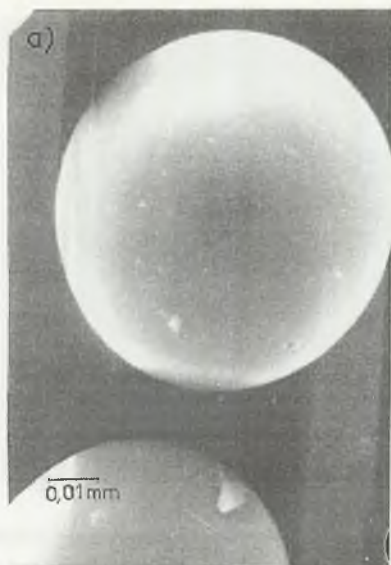
Struktura powierzchni cząstek analizowanych na podstawie mikroskopowych zdjęć o 250- i 700-krotnym powiększeniu wskazuje, że stanowią je zarówno ziarna o średnim, jak i o małym stopniu zaokrąglenia naroży. Powierzchnie cząstek pokryte mikrozagłębieniami i występami wynikającymi z postępujących naturalnych procesów wietrzenia. Ma to zarówno wpływ na powierzchnię właściwą, jak i na wartości oporu tarcia.

**Pył piaszczysty z Granicznej** stanowi poprodukcyjny odpad uzyskiwany w zakładzie przetwórczym Strzegomskich Zakładów Kamienia Budowlanego w Granicznej. Granity Masywu Strzegomia i Sobótki zaliczane są do grupy granitów biotytowych, magmowych skał głębinowych z okresu dolnego permu (Dziedzic i in., 1979).

Do badań pobrano próbę o masie ok. 50 kg, którą w celu uzyskania jednorodnego uziarnienia kilkakrotnie przemieszano. Ze względu na łatwość dostosowania uziarnienia pozostałych trzech pyłów piaszczystych skład granulometryczny tego gruntu nie został zmieniony. Kształt cząstek o składzie mineralnym i chemicznym podanym w tabl. 1 i 2 charakteryzuje się wyjątkowo dużą ostrością naroży i krawędzi (rys. 1 i 3). Powstałe w procesie łamania stosunkowo gładkie i w dużej części płaskie fragmenty powierzchni cząstek oddziela wiele stopniowanych występów o ostrych krawędziach. Na tych powierzchniach widoczne są zarysowania wynikające prawdopodobnie zarówno ze strukturalnej budowy skały, jak i z efektów jej kruszenia. Pył ten okazał się najbardziej ostrokrawędzistym materiałem spośród gruntów poszukiwanych do celów realizacji niniejszej pracy. Szczegółowe badania kształtów i powierzchni cząstek przedstawiono w p.5, a podstawowe własności fizyczne w p.4.

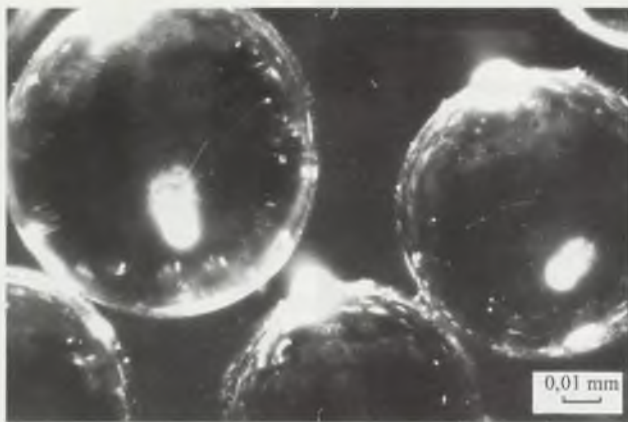
**Popiół lotny** wybrano ze względu na jego właściwości, tj. bogato rozwiniętą powierzchnię cząstek, skład chemiczny wskazujący na dużą zawartość krzemionki, stosunkowo małą ilość części organicznych oraz na uziarnienie zbliżone do pozostałych trzech materiałów. Stanowi on paleniskowy odpad z węgla kamiennego pobrany w strefie wieży przelewowej z mokrego składowiska elektrowni w Łaziskach (Duber, 1983). Spalanie w paleniskach tej elektrowni następuje w temperaturach rzędu 1300°C (Mosiejko, 1977; Paprocki, 1972).





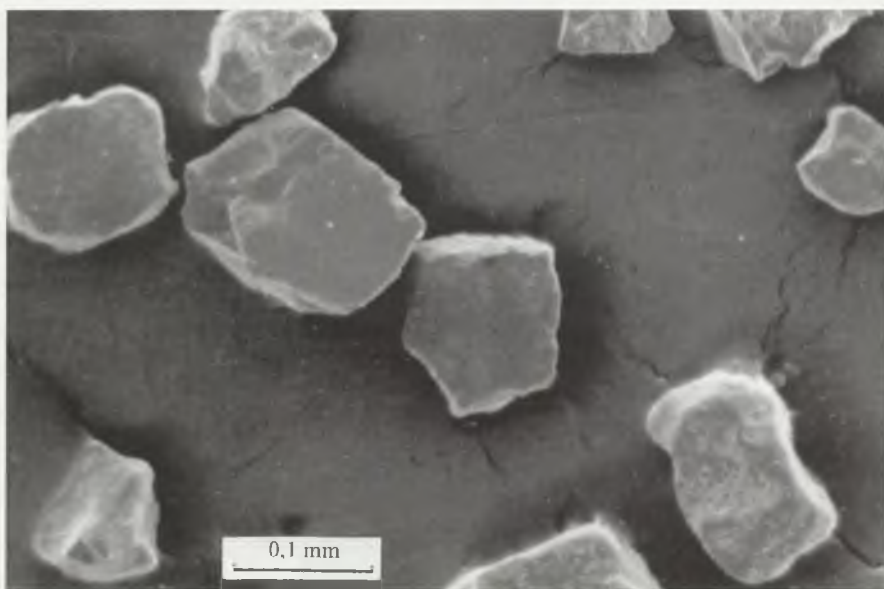
Rys.1. Zdjęcia struktury cząstek frakcji 0,05 – 0,1 mm wykonane w elektronowym mikroskopie skaningowym. Powiększenie ok. x 700: a) kulki szklane, b) pył piaszczysty z Krakowian, c) pył piaszczysty z Granicznej, d) popiół lotny

Fig.1. Photos of particles structures for fraction 0,05 – 0,1 mm made on electronic scanning microscope. Magnification about x 700: a) glass ballotini, b) silty-sand mixture from Krakowiany, c) silty-sand mixture from Graniczna, d) fly ash



Rys.2. Zdjęcia cząstek frakcji 0,05 – 0,1 mm kulek szklanych wykonane w elektronowym mikroskopie skaningowym. Powiększenie ok. 400-krotne

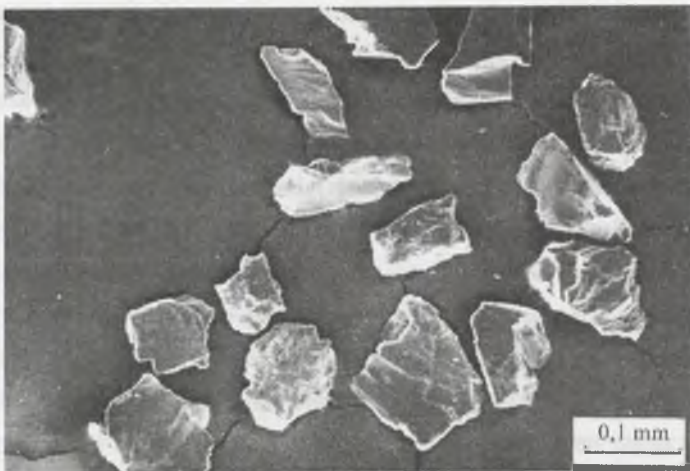
Fig.2. Photos of glass ballotini particles fraction 0,05 – 0,1 mm, made on electronic scanning microscope. Magnification about x 400



Rys.3. Zdjęcia cząstek frakcji 0,05 – 0,1 mm pyłu piaszczystego z Krakowian wykonane w elektronowym mikroskopie skaningowym. Powiększenie ok. 100- krotne

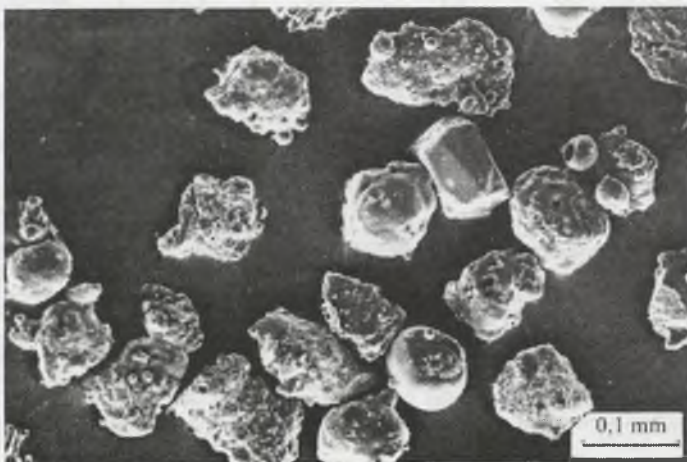
Fig.3. Photos of fraction 0,05 – 0,1 mm particles of silty-sand mixture from Krakowiany made on electronic scanning microscope. Magnification about x 100





Rys.4. Zdjęcia cząstek frakcji 0,05 – 0,1 mm pyłu piaszczystego z Granicznej wykonane w elektronowym mikroskopie skaningowym. Powiększenie ok. 100- krotne

Fig.4. Photos of fraction 0,05 – 0,1 mm particles of silty-sand mixture from Graniczna made on electronic scanning microscope. Magnification about x 100



Rys.5. Zdjęcia cząstek frakcji 0,05 – 0,1 mm popiołu lotnego wykonane w elektronowym mikroskopie skaningowym. Powiększenie ok. 100- krotne

Fig.5. Photos of fraction 0,05 – 0,1 mm particles of fly ash made on electronic scanning microscope. Magnification about x 100

Opisu cząstek dokonano na podstawie obserwacji mikroskopowych przy 100-krotnym powiększeniu i na podstawie zdjęć wykonanych w mikroskopie elektronowym (rys.1 i 4). Skorzystano przy tym z propozycji klasyfikacji okruchów popiołowych wyróżniającej

6 rodzajów cząstek (Chlebowski i inni, 1973). Stwierdzono, że ok. 60% składu uziarnienia stanowią cząstki białe, prawdopodobnie przetopione ziarna kwarcu. W wyniku oddziaływań termicznych powierzchnia ich jest bardzo nieregularna, z wieloma wnękami lub wtopionymi innymi cząstkami, szklista, lub lekko matowa. Do większości z nich przylegają wielokrotnie mniejsze białe i czarne na ogół kuliste drobiny, których charakter przylegania może być termiczny, elektrostatyczny lub krystalizacyjny (Szymański, 1973).

Drugi rodzaj, stanowiący ok. 10% składu, to cząstki jasnoszare i jasnobrązowe, o nieregularnej budowie, stanowiące prawdopodobnie produkty przetopienia mineralów ilastych. Skonfigurowana ich powierzchnia ma lokalne wtopienia nieregularnych grudek masy węglistej. Około 25% uziarnienia stanowią okruchy ciemne lub czarne, stosunkowo jednorodne, niekiedy z zaznaczającą się strukturą równoległą budowy. Przylegają do nich w dużych ilościach zarówno przezroczyste, jak i białe kuleczki oraz czarne maleńkie, częściowo nieregularne drobiny. Ich obecność mocno konfiguruje zewnętrzne powierzchnie cząstki. Inne czarne agregaty charakteryzuje zewnętrzna porowatość z dużą ilością mikrozagłębień i natopionych termicznie jasnych cząstek. Najdrobniejsze frakcje uziarnienia stanowią maleńkie luźne drobiny czarne, białe i przezroczyste kuleczki często zdeformowane. Ich ilość można ocenić na około 3% masy zbiorowiska cząstek.

## **2.1. Badania składu mineralnego i chemicznego**

W świetle zagadnień poruszonych w rozdziale „Badania składu mineralnego pyłów piaszczystych z Krakowian i z Granicznej” wykonano metodą analizy krystalooptycznej i metodą analizy dyfraktometrycznej w Zakładzie Mineralogii i Petrografii Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego. Metodą tą oznaczono również skład mineralny piasku z Krzeszówka, będącego surowcem do produkcji szkła okiennego, z którego wytworzono kulki szklane. Wykonano je na 600 ziarnach każdego z pyłów o uziarnieniu wybranej frakcji 0,05-0,1 mm. Cząstki zatopione w balsamie kanadyjskim poddano analitycznym obserwacjom w mikroskopie polaryzacyjnym o 150-krotnym powiększeniu. Oznaczenia jakościowe analizowanych materiałów zostały uzupełnione metodą dyfraktometryczną przy użyciu aparatu rentgenowskiego DRON-2 (Bietienehtin, 1955; Grabowska - Olszewska i inni, 1980). Uzyskane wyniki przedstawiono w tabl. 1.

W świetle zagadnień poruszonych w rozdziale 3 skład mineralny popiołów może mieć znaczący wpływ na wartości tarcia fizycznego mineralów, wynikający z dwuosiowej lub przestrzennej budowy struktury siatki krystalicznej mineralów (Horn, Deere, 1962). Nieznane są i można przypuszczać, że dotychczas nie prowadzono badań współczynnika tarcia fizycznego substancji mineralnych budujących popioły. Pewną próbę oceny tego parametru można przeprowadzić jedynie na podstawie składu mineralnego popiołów i analogię do wyników badań mineralów naturalnych.

Tablica 1  
Table 1

Skład mineralny gruntów  
Mineralogical composition of soils

Pochodzenie gruntu Origin of soil	Procentowe zawartości mineralów Percents contents of minerals			
	Kwarc Quartz	Skalenie Feldspars	Ilaste, Clays minerals	Inne Other minerales
Graniczna	80,0	10,1	0,5	9,4 (biotyt, chloryt, min. rudne)
Krakowiany	92,2	0,6	3,7*	3,5 (biotyt, turmalin, plagioklasy, minerały rudne)
Krzeszówek	97,4	0,5	1,4	0,8 (plagioklasy, min. rudne)

\* zawartość mineralów oznaczono przed odplukaniem frakcji ilowej

Zagadnienia tego nie można przeanalizować bezpośrednio, gdyż dotychczas nie publikowano wyników badań składu mineralnego krajowych popiołów z węgla kamiennego, a jedyne znane, również zdaniem ich autorki (Stebnicka – Kalicka, 1974), nasuwają zbyt wiele wątpliwości. Skarżyńska i inni (1987) podają, że w składzie petrograficznym przywęglowych skał z kopalń górnośląskich ilowce stanowią przeważnie od 60% do 77%, łupki węglowe 8-15%, pyły i piaski 12-22%, a czysty węgiel 3-5%. Na podstawie badań mineralogicznych serii 20 popiołów z byłych elektrowni radzieckich stwierdzono, że zasadniczymi minerałami popiołów z węgla kamiennych są: krzemionka i jej odmiany, a także glinokrzemiany, piryty, spinele i przeobrażone termicznie minerały ilaste (Mielentiew, 1978). Występują one w 3 grupach substancji: przezroczystych, krystalicznych i organicznych. Zasadniczymi składnikami substancji przezroczystych stanowiących bezpostaciowe szkliwo są:  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  i  $CaO$ . W zależności od zawartości  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  i  $CaO$  jest ono bezbarwne, żółte, szare lub czarne. Prowadzone obserwacje mikroskopowe popiołu z Łazisk przy 100-krotnym powiększeniu wykazały, że obecność szkliwa przezroczystego nie przekracza 10%, a żółtego 5% składu ilościowego cząstek. Szkliwo powstaje głównie w wyniku przetopienia mineralów ilastych.



Przykładowo. powyżej 900°C kaolinit przechodzi w mulit i krystobolit (SiO<sub>2</sub>), z ilitu powyżej 850°C powstają spinele, a po przekroczeniu temperatury 1000°C również krzemionka i alkalia przechodzą w bezpostaciowe szkliwo. Substancje krystaliczne (dominujące w popiołach z węgla kamiennych) zawierają minerały pierwotne: głównie kwarc, hematyt, magnetyt, mulit (Mielentiew, 1978; Paprocki, 1972). W badanym popiele 70% stanowią cząstki o barwie białej lub jasnoszarej, natomiast części organiczne, w tym nie spalony węgiel, wchodzi w skład okruczków czarnych, lub są to drobne cząstki przylegające do substancji krystalicznej. Ustalenie składu mineralnego badanych popiołów jest zatem kłopotliwe. W sposób przybliżony można jedynie kierować się powyższymi spostrzeżeniami jako analogią pomiędzy ich składem chemicznym i mineralnym a składem badanych gruntów (tabl. 1, 2).

Badania składu chemicznego kulek szklanych zostały wykonane w Laboratorium Huty Szkła w Szczakowej (Interminglass, 1993), a skład chemiczny popiołu z Łazisk oznaczono w Laboratorium Instytutu „Energopomiar” w Gliwicach (Duber, 1983). Wyniki badań przedstawiono w tablicy 2, przy czym pokazany w niej skład chemiczny granitu z Granicznej podano za Dziedzicem i innymi (1979).

Tablica 2  
Table 2

Procentowy skład chemiczny badanych materiałów  
Percent chemical composition of tested materials

Rodzaj materiału Sort of materiale	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Straty prażenia Ignition looes	Inne Others
Popiół lotny Fly ash	59,3	18,1	6,2	5,4	0,2	0,4	0,1	5,9	4,4
Kulki szklane Glass ballotini	73,0	1,3	0,1	8,0	3,8	-	13,7	-	0,10
Granit z Granicznej Granite from Graniczna	74,0	12,9	3,2	2,4	-	-	3,5	-	4,0

Pewną odmiennością składu mineralnego popiołów jest jednak występująca w utworach karbońskich znaczna zawartość minerałów ilastych przechodzących w procesie spalania w szkliwo. W popiele zawartość krzemionki jest tylko o 14% mniejsza niż w kulkach szklanych i granicie, w których kwarc stanowi 97% i 80% (tabl. 1, 2). Tlenki Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i CaO w granitach wchodzi głównie w budowę siatki krystalicznej skaleni, biotyту i chlorytu (Chlebowski i inni, 1973). Ich ilość w popiele jest niewiele wyższa i stanowią one skład bezpostaciowego szkliwa. W kulkach szklanych tworzyły one prawdopodobnie struktury minerałów ilastych użytego do produkcji szkła piasku. Na podstawie powyższych analogii i rozważań przyjęto,

że właściwości tarciove suchych powierzchni i minerałów cząstek popiołowych będą podobne do właściwości kulek szklanych lub granitu. Jedyne 5,9-procentowa zawartość nie spalonego węgla mogłaby powodować tarciove właściwości popiołów zbliżone do minerałów o dwuosiowej budowie struktury siatki krystalicznej.



### 3. WPŁYW SKŁADU MINERALNEGO NA TARCIE

Jedną ze składowych oporu tarcia wewnętrznego gruntów niespoistych jest tzw. tarcie czyste, określane w literaturze przez kąt tarcia fizycznego powierzchni minerałów -  $\Phi_{\mu}$  (Koerner, 1970). Pomimo niewielkiej zmienności składu mineralnego badanych gruntów zagadnienie to przedstawiono celem uzasadnienia przyjętej wilgotności próbek w badaniach wytrzymałości na ścinanie.

Pierwszy prawa tarcia, wyjaśniające to zjawisko, dla powierzchni twardych ciał odkrył w początkach XV wieku Leonardo da Vinci, które zapomniane, zostały ponownie odkryte w 1699 r. przez Amontonsa (Horn i Deere, 1962). Określały one proporcjonalność pomiędzy tarcieniem a obciążeniem normalnym oraz niezależność jednostkowego oporu na ścinanie między dwoma ciałami od wymiarów tych ciał. Zagadnienie to następnie rozwijali Coulomb w roku 1781, Reynolds w roku 1886, Kingsburg w roku 1903, zajmując się m.in. próbami wyjaśnienia smarującego i antysmarującego działania wody w procesie tarcia.

W 1925 roku Terzaghi opublikował adhezyjną teorię tarcia (Lambe, Whitman, 1977). Przyjmuje ona, że:

- nawet najbardziej wygładzone powierzchnie mają mikroszorstkości stanowiące znikomą część pozornej powierzchni styku,
- naprężenia w miejscach styków są niezwykle duże i osiągają wartości równe granicy plastyczności materiału,
- duże naprężenia powodują, że powierzchnie trących ciał łączą się w miejscach styków przez wiązania chemiczne, a wytrzymałość na ścinanie jest wynikiem przyczepności w tych punktach.

Wykazał on ponadto, że wprowadzenie wody pomiędzy dwie wcześniej suche powierzchnie kwarcu powodowało wzrost statycznego współczynnika tarcia.

Rozwój badań doświadczalnych w tym kierunku prowadzonych m.in. przez Bowdena, More'a i Tabora (Horn, Deere, 1962), na szlifowanych i czyszczonych powierzchniach minerałów pozwolił na określenie wpływu czynników składających się na smarujące i niesmarujące działanie wody.

Tschebotarioff i Welch (1948) na podstawie badań bezpośredniego ścinania wykazali, że gładkie i suche powierzchnie kwarcu i kalcytu mają jednakowe współczynniki tarcia, które po zawilgoceniu zwiększają się w różnym stopniu, przy czym wzrost ten jest jednakowy zarówno wówczas, gdy powierzchnie były tylko zawilgocone, jak i wówczas, gdy strefa poślizgu była zatopiona wodą. W innych badaniach, obok wpływu wód występujących pomiędzy trącymi powierzchniami, analizowano tarcie statyczne i kinetyczne, a także wpływ oszlifowania powierzchni, prędkości ścinania i biegunowości molekuł wodnych. Obszerną pracę z tego zakresu, zaliczaną obecnie do klasyki zagadnień tarcia, opublikowali Horn i Deere (1962). Wykazano w niej m.in., że współczynniki tarcia statycznego i kinetycznego suchych gładkich powierzchni minerałów są takie same oraz że woda działa antysmarująco wówczas, kiedy jej dipole adsorbowane są na powierzchniach minerałów mających trójosiową strukturę budowy siatki krystalicznej (kwarc, skałen, kalcyt). Natomiast oddziaływanie filmów wodnych jest smarujące, jeśli powierzchnie minerałów mają dwuosiową strukturę budowy siatki krystalicznej, jak np. muskowit, biotyt, plogopit, chloryt. Antysmarujące działanie wody zwiększa współczynnik tarcia statycznego w przypadku: kwarcu ok. 3,6-krotnie, skałenia ok. 6-krotnie, a kalcytu ok. 5-krotnie. Ustalono również, że współczynniki tarcia tych minerałów w stanie wysuszonym, jak i wysuszonym, a następnie pozostawionym w otoczeniu powietrza są niemal takie same oraz że współczynniki tarcia minerałów o budowie krystalicznej nie różnią się w stanie suchym. Uzyskiwane w badaniach kąty tarcia  $\Phi_{\mu}$  są rzędu  $5^{\circ}$  -  $10^{\circ}$  (tabl. 3). Odmiennie zachowują się minerały o dwuwarstwowej strukturze budowy siatki krystalicznej. W wyniku zawilgocenia powierzchni współczynnik tarcia zmniejszył się w przypadku chlorytu o połowę, a w przypadku miki o ok. 30%.

Zupełnie odmienną tezę w zakresie oceny wpływu obecności wody na opory tarcia powierzchni kwarcu przedstawili Bromwell i Dickey, prowadzący badania nad wpływem różnych sposobów czyszczenia powierzchni o zróżnicowanych stopniach ich szorstkości (Lambe, Whitman, 1977). Dowodzą, że woda w procesie tarcia pozostaje obojętna, a wzrost wytrzymałości przy obecności wody jest następstwem niszczenia warstw zanieczyszczeń (np. cienkie błonki organiczne), które w stanie suchym działają na powierzchniach tarcia jak smar. W badaniach nieczyszczonych suchych gładkich powierzchni uzyskano kąt tarcia  $\Phi_{\mu} = 11^{\circ}$ , który po nasyceniu wodą wzrósł do  $22^{\circ}$ . Następnie w wyniku czyszczenia określanego jako „normalne” kąt  $\Phi_{\mu}$  wyniósł  $26^{\circ}$ , a po czyszczeniu chemicznym otrzymano zarówno dla powierzchni suchych, jak i mokrych  $\Phi_{\mu} = 42^{\circ}$ . Wartość ta zmniejszała się wraz ze wzrostem

szorstkości powierzchni, stabilizując się dla powierzchni bardzo szorstkich na poziomie  $\Phi_{\mu} = 26^{\circ}$  niezależnie od stopnia wyczyszczenia powierzchni i niezależnie od stopnia ich wilgotności.

Tablica 3  
Table 3

Wartości statycznego kąta tarcia  $\Phi_{\mu}$  różnych minerałów  
Values of static frictional coefficient  $\Phi_{\mu}$  differents minerals

Minerały Minerals	Wilgotność powierzchni Humidity of surface	$\Phi_{\mu}$	Autorzy badań Authors of tests	
O trójosiowej budowie siatki krystalicznej About tree – dimensional structures	Sucha (105°C), lub powietrznie sucha Oven or air dried	6° 6° 5° – 10° 5° – 8°	Tschebotarioff, Welch (1948) Horn, Deere (1962) Procter, Barton (1974) Nascimento (1985)	
	Wilgotna lub mokra Humidity or saturated	24° 25° 18° 34° 22° – 31°	Tschebotarioff, Welch (1948) Horn, Deere (1962) Procter, Barton (1974) Nascimento (1985) Rowe, rok 1962	
	Skaleń Feldspar	Sucha (105°C) i powietrznie sucha	6°	Horn, Deere (1962)
Wilgotna lub mokra		37° 37	Horn, Deere (1962) Lee, rok 1966	
Kalcyt Calcite	Sucha	8°	Horn, Deere (1962)	
	Wilgotna	34°		
O dwuosiowej budowie siatki krystalicznej About two – dimensional crystal structure	Chloryt Chlorite	Sucha	28°	Horn, Deere (1962)
		Wilgotna	13°	
	Mika Mica	Sucha (105°C)	17° 15°	Horn, Deere (1962) Nascimento (1985)
Wilgotna		11° 12°	Horn, Deere (1962) Nascimento (1985)	

Hipotezą tą trudno byłoby jednak wyjaśnić rolę zanieczyszczeń w tarcu minerałów o budowie dwuosiowej, gdzie wraz ze wzrostem wilgotności wytrzymałość maleje (tabl. 3).

Również w niezgodności z tą opinią pozostają badania tarcia przeprowadzone przez Graya (Procter, Barton, 1974) na kulkach stalowych, w których zarówno dla suchych, jak i mokrych powierzchni uzyskano niemal jednakowe kąty tarcia  $\Phi_{\mu}$  równe 7° i 9°. Analizujący również te właściwości Koerner (1970) przyjmuje wyniki i hipotezy podane przez Horna i Deere, podkreślając, że zjawisko wpływu wody na tarcie minerałów jest trudne do wyjaśnienia. Późniejsze badania (Procter i Barton, 1974) prowadzone na seriach cząstek mocowanych i badanych



w specjalnie skonstruowanym aparacie umożliwiającym uwzględnienie również wpływu kształtu płaszczyzny powierzchni prowadzone były na powierzchniach poddanych pięciokrotnemu cyklowi czyszczenia (w tym moczenie w acetonie, wycieranie powierzchni, gotowanie w destylowanej wodzie). Nie potwierdziły one wniosków Bromwella i Dickego (tabl. 3). Kąt tarcia mokrych powierzchni kulek szklanych wynosił  $18^\circ$ , a nie  $42^\circ$ . Tym niemniej w podsumowaniu oceny wpływu wilgotności na tarciowe własności powierzchni minerałów stwierdzono, że zanieczyszczenia chemiczne mają wpływ na wartości  $\Phi_\mu$ , szczególnie w przypadku występowania nierówności trących powierzchni.

Zagadnienie to próbuje wyjaśnić w najnowszych publikowanych badaniach Nascimento (1985), wskazując, że w przypadku minerałów o trójosiowej strukturze budowy krystalicznej dipole wodne adsorbowane są na ich powierzchniach w kierunku prostopadłym do powierzchni minerałów. Powoduje to, że w procesie tarcia zwiększanie oporu następuje w wyniku zazębiana się wystających krawędzi mocno wiązanych z powierzchnią dipoli wodnych, co zwiększa opory ruchu, powodując antysmarujące działanie wody. W przypadku minerałów o dwuosiowej strukturze budowy siatki krystalicznej (chloryt, mika) powierzchnie dipoli wodnych adsorbowane są równoległe do płaszczyzn powierzchni minerałów. Wywołuje to nie tylko brak obecności zazębienia, ale również częściowe smarowanie powierzchni trących, co w efekcie zmniejsza wartości kąta tarcia  $\Phi_\mu$ .

Podsumowując przedstawione zagadnienie w aspekcie badań wytrzymałości na ścinanie, mających na celu ustalenie wpływu nierówności powierzchni cząstek na wartości kąta tarcia wewnętrznego, należy przyjąć, że:

- grunty zawierające minerały o budowie krystalicznej w stanie całkowitego wysuszenia będą miały (niezależnie od zawartości kwarcu, kalcytu czy skalenia) taki sam kąt tarcia fizycznego naturalnie gładkich powierzchni minerałów  $\Phi_\mu$  (rzędu  $26^\circ$ ),
- badania wykonywane na próbkach całkowicie suchych zapewnią eliminację działania wody, którego efekt dla każdego z minerałów byłby inny, uniemożliwiając tym samym ocenę wpływu nieregularności kształtów i szorstkości powierzchni cząstek na wielkości oporu ścinania.

## 4. PODSTAWOWE WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE

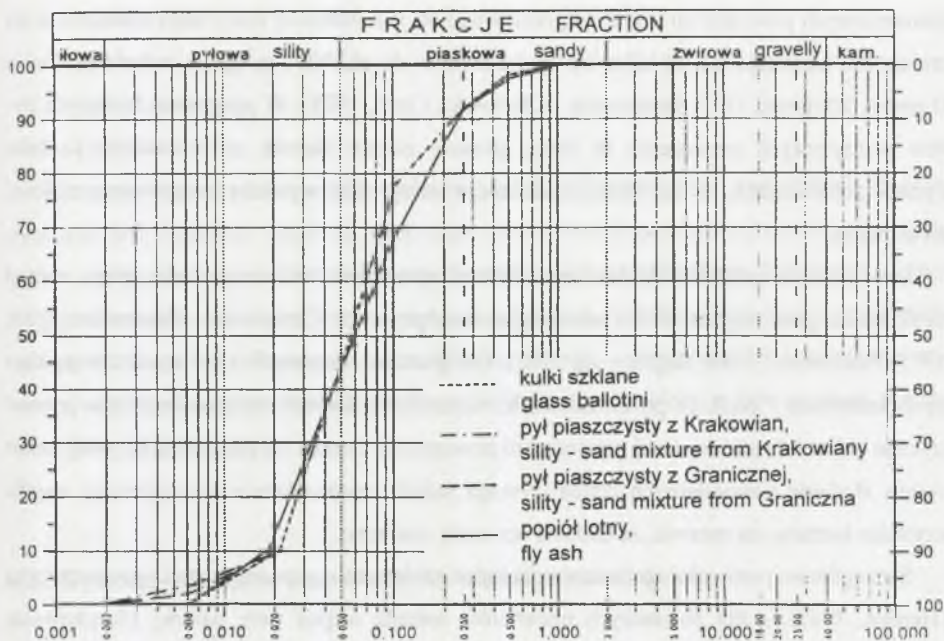
### 4.1. Uziarnienie

Do realizacji założeń badań niniejszej pracy użyte grunty powinny mieć zróżnicowaną strukturę powierzchni i jednakowy, pozbawiony frakcji ilowej, skład granulometryczny. Zarówno sondażowe, jak i końcowe sprawdzające badania uziarnienia gruntów dobieranych wg kryteriów opisanych w p. 2 wykonywano metodą sitowo-areometryczną, zgodnie z wymogami normy (PN-88/B-02480). W analizach areometrycznych obliczeniową średnicę zastępczą cząstek obliczano, uwzględniając różne gęstości właściwe badanych gruntów. W wyniku odpowiedniego korygowania zawartości poszczególnych frakcji w uziarnieniu każdego z wybranych materiałów uzyskano ostatecznie uziarnienie każdego z nich zbliżone do pyłu piaszczystego z Granicznej.

Wykresy uziarnienia uzyskanych w ten sposób pyłów piaszczystych (PN/88/B-04481) przedstawiono na rys. 6, a w tabl. 4 podano średnicę miarodajną  $d_{60}$ , średnicę  $d_{10}$  zwaną krytyczną (Koerner, 1970) i wskaźnik różnoziarnistości  $U = d_{60}/d_{10}$ .

Znikome różnice wartości  $d_{10}$  i  $U$  poszczególnych pyłów piaszczystych nie powinny mieć znaczącego wpływu na zmianę wartości kąta tarcia wewnętrznego. Wykonane w tym kierunku przez Koenera (1980) badania piasków o stałej różnoziarnistości, jednakowej kulistości i ostrokrawędzistości wykazały, że wraz ze zmniejszaniem się średnicy  $d_{10}$  wartość kąta tarcia wewnętrznego zwiększała się wyraźnie, gdy średnica  $d_{10}$  była mniejsza od 0,1 mm. W badaniach tych cechy kształtu określano jedynie szacunkowo na podstawie wzorcowych tablic (Kolbuszewski, 1967), co może być powodem pewnych niedokładności. Odnosząc jednak uzyskane różnice  $d_{10}$  do zależności podanych przez Koenera, można ocenić, że nie powinny one powodować zmian kąta tarcia wewnętrznego większych od pół stopnia. W tym świetle uzyskaną jednorodność uziarnienia uznano za zadowalającą, a otrzymanie uziarnień bardziej zbliżonych było praktycznie bardzo trudne.





Rys.6. Krzywe uziarnienia badanych gruntów  
 Fig.6. Grain size distributions of tested soils

Tablica 4  
 Table 4

Cechy uziarnienia skomponowanych gruntów  
 Characteristics of grain size distribution

Rodzaj pyłu piaszczystego Sand - silt mixtures	$d_{60}$	$d_{10}$	U
Kulki szklane Glass ballotini	0,071	0,021	3,4
Pył z Krakowian Silt from Krakowian	0,080	0,021	4,0
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	0,080	0,021	4,0
Popiół lotny Fly ash	0,080	0,019	4,2

## 4.2. Powierzchnia właściwa

Jednym z parametrów służących ocenie stopnia zróżnicowania zewnętrznych powierzchni cząstek gruntów jest powierzchnia właściwa. Określa się ją stosunkiem sumy wszystkich

elementarnych powierzchni szkieletu gruntowego do jednostkowej masy tego szkieletu, a jej zmienność kształtuje się od kilku  $\text{cm}^2/\text{g}$  dla żwirów do ok.  $1000 \text{ m}^2/\text{g}$  dla montmorylonitu (Lambe, Whitman, 1977; Grabowska - Olszewska i inni, 1977). W przypadku badanych pyłów piaszczystych oznaczenia te służą głównie ocenie stopnia zróżnicowania kształtu i powierzchni cząstek, co ma istotne znaczenie w interpretacji wyników badań wytrzymałości na ścinanie.

Powierzchnie właściwe badane są wieloma sposobami zaliczanymi do grupy metod strukturalno-geometrycznych lub adsorpcyjno-desorpcyjnych (Grabowska - Olszewska, 1980; 1977; Piaskowski, 1984; Stępkowska 1972). Dla gruntów ziarnistych o kulistych lub regularnych kształtach i gładkich powierzchniach stosunkowo dokładnym sposobem jest geometryczne obliczenie sumarycznej powierzchni zewnętrznej cząstek na podstawie krzywej uziarnienia. Badanie nieregularnych ziaren wymaga jednak wprowadzenia empirycznego współczynnika kształtu, co sprawia, że badanie jest mało dokładne.

Szczegółowe porównawcze badania dla kulek szklanych wykonano metodą geometryczną (Herdan, 1953), a dla pozostałych materiałów metodą sorpcji pary wodnej (Stępkowska, 1977; Stępkowska, Wala, 1977) były analizowane w pracy Paryłaka (1996). Powierzchnie właściwe badanych pyłów piaszczystych wynoszą:

kulki szklane	-	$0,268 \text{ m}^2/\text{g} = 2680 \text{ cm}^2/\text{g}$
pył z Krakowian	-	$0,395 \text{ m}^2/\text{g} = 3950 \text{ cm}^2/\text{g}$
pył z Granicznej	-	$0,448 \text{ m}^2/\text{g} = 4480 \text{ cm}^2/\text{g}$
popiół lotny	-	$1,340 \text{ m}^2/\text{g} = 13400 \text{ cm}^2/\text{g}$

Wyniki skonfrontowano z wynikami badań powierzchni metodą Blaina podobnie uziarnionych pyłów i popiołów (Bastian, 1980; Duber, 1983; Mielentiew, 1978; Thijas de Henau, 1985). Mielentiew (1978) zestawia wyniki badań powierzchni właściwych wielu popiołów o zróżnicowanym uziarnieniu ze średnicą miarodajną  $d_{17}$ . Odnosząc na ustalonej przez niego krzywej średnicę  $0,025 \text{ mm}$ , stanowiącą  $d_{17}$  badanego popiołu (rys. 6), uzyskano by powierzchnię rzędu  $1,4 \text{ m}^2/\text{g}$ . Wartość ta jest zatem zbliżona do otrzymanej z badań autora -  $1,34 \text{ m}^2/\text{g}$ .

Wykorzystując relacje uzyskanych powierzchni właściwych, obliczono także wynikający z nich stopień nieregularności powierzchni cząstek określanej jako stosunek współczynników  $\alpha_S/\alpha_V$ , gdzie  $\alpha_V$  jest współczynnikiem nieregularności kształtu kulistego ( $\alpha_V = 1.0$ ), a  $\alpha_S$  jest współczynnikiem nieregularności niekulistych cząstek (Herdan, 1953). Uzyskano by zatem wartości  $\alpha_S$ :

kulki szklane	- 1.00
pył z Krakowian	- 1.47
pył z Granicznej	- 1.67
popiół lotny	- 5.00

Wyraźnie wyższa powierzchnia właściwa popiołu od powierzchni pozostałych piasków pylastych jest wynikiem zarówno większego zróżnicowania zewnętrznej powierzchni agregatów popiołowych, jak i obecności drożnych porów wiążących określone ilości wody. Z tego względu bardziej właściwymi kryteriami do oceny stopnia zróżnicowania powierzchni badanych gruntów są badania stopnia kulistości oraz stopnia nieregularności i szorstkości powierzchni cząstek opisane w rozdziale 5, a niniejsze badania należy w tym aspekcie potraktować jako uzupełniające.

### 4.3. Gęstości właściwe i porowatości wewnętrzne cząstek

Badania gęstości właściwych wykonano metodą gotowania w kolbie piknometrycznej, zgodnie z wymogami normy (PN-88/B-04481). Dla każdego z gruntów wykonano 4-6 oznaczeń, na podstawie których obliczono wartość średnią i odchylenie standardowe „s”. Uśrednione wyniki pomiarów podano w tabl. 5.

Tablica 5  
Table 5

Wyniki badań gęstości właściwych  
Specific gravity results tests

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand – silt mixture	$\rho_s \text{ t/m}^3$	Odchylenie standardowe - s Standard deviation - s
Kulki szklane    Glass ballotini	2,453	0,010
Pył z Krakowian    Silt from Krakowia- ny	2,677	0,047
Pył z Granicznej    Silt from Graniczna	2,644	0,002
Popiół lotny        Fly ash	2,100	0,015

Gęstości właściwe naturalnych gruntów mineralnych wynikają z gęstości budujących je minerałów. Natomiast gęstości przeobrażonych termicznie kulek szklanych i popiołów są niższe, co wynika z przebiegu procesów termicznych. W różnych miejscach palenisk elektrycznych panują temperatury od 600°C do 1600°C. W tych warunkach najdrobniejsze ziarenka



(15  $\mu\text{m}$ ) uległy szybkiemu stopieniu już w temperaturze 880°C, natomiast większe mineralne cząstki zmielonych skał przywęglowych topiły się dopiero w temperaturze rzędu 1100°C. Z najdrobniejszych przetopionych cząstek w wyniku gwałtownego schładzania powstają częściowo puste wewnątrz kuleczki o zeszkliwionej powierzchni, a z większych okruchów tworzą się agregaty o strukturze gąbczastej (Bastian, 1980; Domagała i inni, 1981). Jak wykazał Jarrige, w popiele o gęstości właściwej 1,98 t/m<sup>3</sup> występowały ziarna o gęstościach od 0,5 do 3,0 t/m<sup>3</sup>, co wynikało głównie z obecności zamkniętych porów, których uwolnienie możliwe było dopiero w wyniku 4-godzinnej mielenia. Uzyskana w wyniku tego gęstość właściwa wzrosła do 2,67 t/m<sup>3</sup>, a obliczona objętość zamkniętych porów wyniosła 26%. Porowatości te, określane dla krajowych popiołów kształtowały się w granicach 19-25% (Bastian, 1980).

Zagadnienie obecności zamkniętych porów cząstek popiołów, istotne w ocenie ich aktywności jako mielonych dodatków do cementów i betonów nie ma praktycznego znaczenia w procesie tarcia, podobnie jak 8-procentowa objętość zamkniętych porów badanych kulek szklanych. Istotna natomiast jest objętość drożnych porów cząstek popiołów wpływająca na obliczenie porowatości międzycząstkowej.

#### 4.3.1. Określenie objętości drożnych porów cząstek popiołowych

Określenie porowatości międzycząstkowej popiołów na podstawie badania gęstości właściwej metodą gotowania, powszechnie stosowaną w gruntach naturalnych, uwzględnia także objętość drożnych porów, sięgających wnętrza agregatów. Dlatego oznaczenie ich objętości w celu obliczenia rzeczywistej porowatości międzycząstkowej zagęszczonych próbek jest bardzo istotne. W warunkach naturalnych pory te wypełnia częściowo woda, zamykająca uwięzione głębiej pęcherzyki powietrza, które w procesach sedymentacji w mokrych składowiskach współdecydują o miejscu osadzania się cząstek wzdłuż drogi ich pływnięcia. Natomiast w badaniach trójosiowego ściskania całkowicie nasyconych próbek, ścieśniające się zamknięte powietrze zmniejsza wartości ciśnienia w porach. Zagadnienia te analizowane były we wcześniejszych pracach autora (Parylak, 1979, 1984, 1987, 1988). W przypadku suchych popiołów drożne pory agregatów wypełnione są tylko powietrzem. Uwzględnione są one zatem przy określaniu porowatości na podstawie badań gęstości objętościowych, co pozornie zwiększa rzeczywistą międzycząstkową porowatość zagęszczonych próbek.

W celu wyznaczenia porowatości międzycząstkowej próby popiołu poddano gotowaniu w wodzie destylowanej, usuwając w ten sposób pęcherzyki powietrza z drożnych porów cząstek. Następnie wydzielono 3 próbki o masie 30 g i umieszczono je na tkaninie w celu odsą-



czenia wolnej wody międzycząstkowej. Odsączone popioły poddano długotrwałemu rozcieraniu na sztywnej bibule do czasu, aż ta przestała być zwilżana, po czym pozostawiono je na kilka godzin w celu powietrznego przesuszenia. Pomocniczą obserwacją pozwalającą określić czas trwania procesu przesuszenia był obserwowany pod mikroskopem przebieg wysychania zwilżonej powierzchni gładkiej płytki szklanej. W ten sposób w miarę skutecznie pozbyto się wody przylegającej do zewnętrznych powierzchni cząstek uznając, że uzyskaną średnią wilgotność 5,8% stanowią wody wewnątrzcząstkowe (Parylak, 1979, 1988). Przyjmując następnie, że wilgotność ( $w$ ) jest stosunkiem masy wody ( $m_w$ ) do masy szkieletu ( $m_s$ ) i że suma tych mas w przypadku nasyconych cząstek stanowi 100%, obliczono porowatość ( $n_p$ ) stanowiącą przez drożne pory cząstek:

$$w = \frac{m_w}{m_s} = \frac{\rho_w \times n_p}{\rho_s (1 - n_p)} \quad (1)$$

$$n_p = \frac{w \times \rho_s}{\rho_w + w\rho_s} = \frac{0,058 \times 2,100}{1 + 0,058 \times 2,100} = 0,074 \quad (2)$$

Natomiast obliczeniową gęstość właściwą cząstek ( $\rho_{sc}$ ), przyjętą do obliczania porowatości międzycząstkowych, określono jako gęstość właściwą szkieletu ( $\rho_s$ ) pomniejszoną o masę, jaką stanowiłyby pory ( $n_p$ ), gdyby wypełnione były masą szkieletu

$$\rho_{sc} = \rho_s - n_p \times \rho_s \quad \rho_{sc} = 2,100 \text{ t/m}^3 - 0,074 \times 2,100 \text{ t/m}^3 = 1,945 \text{ t/m}^3 \quad (3)$$

Odnosząc do tej wartości dowolnie zagęszczone próbki suchego popiołu, można w przybliżeniu określić porowatość międzycząstkową ( $n_c$ ), która pozwala na porównanie porowatości próbek popiołów z porowatościami międzycząstkowymi pozostałych trzech gruntów.

$$n_c = \frac{\rho_{sc} - \rho_d}{\rho_{sc}} \quad (4)$$

Wyniki badań przedstawiono w tablicy 15.

## 5. GEOMETRYCZNA CHARAKTERYSTYKA KSZTAŁTÓW CZĄSTEK

W wielu zagadnieniach inżynierii lądowej i wodnej geometryczne parametry cząstek w wysokim stopniu decydują o właściwościach gruntów. Wpływają one m.in. na gęstość objętościową, porowatość, wodoprzepuszczalność, ściśliwość, przydatność do betonów i bitumów, podatność na unoszenie przez wiatr, a także na sedymentację, zagęszczalność i wytrzymałość na ścinanie. W poznawczych badaniach mechanizmów procesu ścinania ich oddziaływania powinny być analizowane również oddzielnie. Z tego względu w przeprowadzonych badaniach określono każdą z tych cech dla każdego gruntu. Kształty cząstek opisywane są przez: kulistość -  $\Phi$ , nieregularność kształtu -  $A$ , stopień zaokrąglenia naroży -  $P$  i szorstkość powierzchni -  $I_a$ . Mają one szczególnie duże znaczenie w procesie ścinania i zagęszczania gruntów niespoistych, gdzie współoddziaływania powierzchni cząstek znacząco wpływają na wartości oporów tarcia (Homand - Etienne i inni, 1989; Whalley, 1980).

### 5.1. Definicje i sposoby badań nieregularności kształtów cząstek

Rozwój badań z zakresu pomiaru kształtu cząstek zasadniczo datuje się od początku lat trzydziestych wraz z wprowadzeniem przez Wadella w 1932 r. kryteriów stopnia kulistości i stopnia zaokrąglenia naroży. Pozwoliły one wówczas na stosunkowo dokładne określanie kształtów ziaren (Herdan, 1953; i Lees, 1964). Stopniem kulistości określony został stosunek pola powierzchni kuli o takiej samej objętości jak cząstka do całkowitego pola powierzchni cząstki. W praktyce formuła ta okazała się być kłopotliwa, gdyż dokładny pomiar powierzchni zewnętrznej ziaren mógł być prowadzony tylko na regularnych geometrycznych kształtach. Z tego względu została ona zastąpiona innym, bardziej uproszczonym kryterium, określającym stosunek średnicy  $d_c$  koła o powierzchni równej powierzchni pola przekroju poprzecznego cząstki do średnicy  $D_c$  najmniejszego okręgu opisanego na tym przekroju.

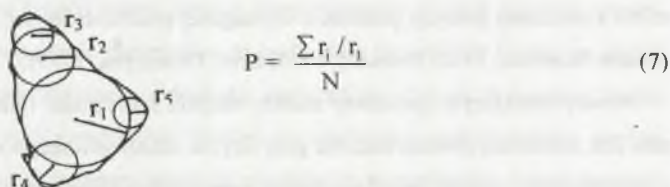
$$\Phi = \frac{d_s}{D_c} \quad (5)$$

Dla kamieni i grubych żwirów zaproponowano alternatywne pojęcie „kulistości operatywnej”, będącej stosunkiem średnicy kuli  $d_s$  mającej taką samą objętość jak ziarno średnicy kuli opisanej  $D_s$  na tym ziarnie (Herdan, 1953; Kolbuszewski, 1967).

$$\Psi = \frac{d_s}{D_s} \quad (6)$$

Ponieważ, jak wykazano, kulistość określana tymi zależnościami może mieć takie same wartości dla ziaren wydłużonych lub płaskich jak dla ziaren kubicznych, Zingg opublikował pomocne w klasyfikacji wzorce kształtu cząstek z podaniem współczynników (Lees, 1964; Pieczyrak, 1981), a Rithenhouse (Kolbuszewski, 1967) opracował tablice do wizualnej oceny stopnia kulistości w układzie płaskim.

Parametrem charakteryzującym nieregularność kształtów cząstek jest *stopień zaokrąglenia naroży*. Wadell określił nim sumę stosunków promieni  $r_i$  okręgów wpisanych w naroża cząstki do promienia  $r_1$  największego okręgu wpisanego w cząstkę, którą to sumę podzielono przez liczbę okręgów (rys. 7).

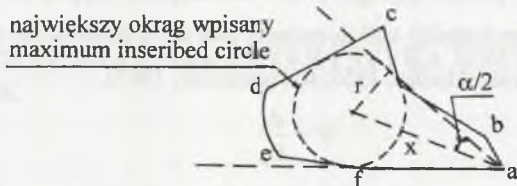


Rys. 7. Schemat ilustrujący sposób określania stopnia zaokrąglenia naroży cząstek  
 Fig. 7. Diagram which illustrate the method of determination of the roundness of corners particles

Na tej podstawie Krumbein opracował tablice wzorcowych kształtów cząstek ułatwiające wizualną ocenę stopnia zaokrąglenia naroży (Kolbuszewski, 1967; Haar, 1977). Pomimo powszechnego ich stosowania wyniki nie są uznawane za jednoznaczne. Lees (1964), podając przykłady nietypowych kształtów, wykazuje, że powierzchnie przekroju cząstek z promieniami okręgów naroży większymi niż centralnie wpisane koło mogą dać różne stopnie zaokrąglenia dla różnie wydłużonych cząstek owalnych. Ponadto okręgi o identycznych promieniach mogą być dopasowane w dość szerokim zakresie do naroży, co umożliwia uzyskanie identycznych stopni zaokrąglenia dla cząstek o różnych nieregularnościach. Z tego względu zaproponował on dokładniejszy sposób oceny stopnia ostrości naroży, określanej *stopniem ostrokrawędzistości cząstek A*, zalecany szczególnie do opisu cząstek ostrokrawędzistych. Ocena polega na obliczaniu sumy ostrości kątów wyprowadzonych



z wierzchołków naroży przekroju cząstki w ten sposób, że tworzące kąta są styczne do największego okręgu wpisanego w cząstkę (rys. 8).



Rys. 8. Schemat ilustrujący sposób określania stopnia nieregularności kształtów cząstek  
 Fig. 8. Diagram which illustrate the method of determination of the degree of angularity particles

$$A = \frac{\sum(180 - \alpha_i)}{x_i / r} \quad (8)$$

Na podstawie obliczeń wykonanych dla różnych grup cząstek o kształtach kubicznych, płaskich, dyskowatych i wydłużonych opracował on również wzorcowe tablice kształtów z podaniem stopni nieregularności w skali od 0 dla kul do 1600 dla cząstek bardzo nieregularnych. Przedstawione powyżej metody, należące obecnie do klasyki badań z tego zakresu pomimo koniecznej precyzji pomiaru i wymaganej pracowitości, są nadal powszechnie stosowane (Koerner, 1970; Frossard, 1979; Broś, Orzeszyna, 1979).

Nowocześniejszym sposobem analizy stopnia szorstkości i nieregularności kształtu cząstek jest zautomatyzowane badanie przy użyciu skanowanego mikroskopu elektronowego z analizatorem stopnia skonfigurowania powierzchni (Matsoul i in., 1978; Frossard, 1979; Whalley, 1980). Stosując tę metodę, Frossard zaproponował również wprowadzenie wskaźnika chropowatości z uwzględnieniem stopnia nieregularności cząstek. Jednakże w dyskusyjnej ocenie Walleya (1978) badania tak określonego wskaźnika szorstkości powierzchni nie są wystarczająco dokładne. Inne badania o zbliżonym charakterze określające stopień wzajemnych kontaktów międzycząstkowych, analizujące rolę filmów wodnych w procesie ścinania gruntów spoistych były wykonywane na mikroskopie elektronowym (Matsoul i in., 1978).

Do opisu większych okruchów skalnych, badanych m.in. na potrzeby klasyfikacji kruszyw drogowych (Bobolewski, Parachomiak, 1974; Rolla, 1979), używane są zaproponowane przez Heywodda (Haar, 1977) współczynniki kształtu określone proporcjami prostopadłościanu, w którym można by ograniczyć stycznie kontury ziarna. Opisują je: współczynnik izometryczny  $(L+G) / 2B$ , współczynnik spłaszczenia  $(L+B) / 2G$  i współczynnik wydłużenia  $L/(B+G)$ , gdzie L, B, G są długością, szerokością i wysokością prostopadłościanu opisanego



na okruchu. Na ich podstawie Pieczyrak (1981), badając okruchy przywęglowej skały płonnej, zaproponował wprowadzenie identyfikatora kształtu szacunkowo kwalifikującego je do 5 umownych kategorii nieregularności i ostrokrawędzistości. Kryteria te ze względu na małą dokładność pomiaru nie mogą być stosowane do badań stopnia nieregularności powierzchni gruntów drobnopiękistych. Niewątpliwą niedoskonałością opisanych sposobów analizy kształtów jest ograniczona liczba badanych ziaren. Wymagają one ponadto specjalistycznych i odpowiednio przygotowanych pracowni.

Niemal równolegle z rozwojem metod strukturalno - analitycznych prowadzono badania nad uproszczonymi sposobami oceny wskaźnika kształtu i nieregularności cząstek. Polegały one zasadniczo na pomiarach prędkości grawitacyjnego przesypywania się piasków przez zwężenia odpowiednio profilowanych lejków pomiarowych. Prace zapoczątkowane z tego zakresu w 1928 r. przez Deminga i Mechringa rozwijane były następnie przez wielu badaczy, w tym przez Sutherlanda i Neale'a, (1968). Wyniki z tych badań uwarunkowane są jednakże kilkoma ubocznymi czynnikami (np. kształtem zastosowanego lejka) i z tego względu traktowane są jedynie jako porównawcze, mało dokładne, służące głównie inżynierskim zastosowaniom aplikacyjnym.

Prowadzone ostatnio we Francji oceny stopnia nieregularności cząstek gruntów niespoistych jako statecznych wewnętrznie materiałów do podbudów drogowych oparto na dwóch nowo wprowadzonych identyfikatorach: wskaźniku skruszenia i stopniu skruszenia ziaren. Wyniki uzyskane na bazie tych parametrów również nie wydzielają cech kształtów cząstek. Porównane z metodą prędkości przesypywania się piasków były rozbieżne, a brak korelacji wyników tych metod zwiększał się wraz ze wzrostem rozdrobnienia cząstek oraz ze wzrostem nieregularności ich kształtu (Homand – Etienne i in., 1989). Uzyskiwany brak korelacji wyników tych metod zwiększał się wraz ze wzrostem rozdrobnienia cząstek oraz ze wzrostem nieregularności ich kształtu. Przybliżonym sposobem pomiaru szorstkości, uwzględniającym także większe nieregularności jest zaproponowany w 1977 roku przez Madelborda sposób określania wymiaru fraktalnego ( p. 5.5.1). W świetle omówionych prac można uznać, że istnieją wystarczająco dokładne metody określania cech kształtu cząstek, natomiast nadal nie ma uznanych sposobów badania szorstkości ich powierzchni, co potwierdzają również autorzy pracy (Homand - Etienne i in., 1989).

Dokładnym i stosunkowo prostym sposobem pomiaru szorstkości cząstek jest zaproponowany przez autora wskaźnik szorstkości powierzchni  $I_a$  ( Parylak 1990, 1992). Określa on stosunek różnicy długości obwodu przekroju cząstki i obwodu uproszczonego opisującego jej kontury wielobokiem do długości obwodu uproszczonego (p.5.5.2. rys.11). W pomiarach tych

linie wieloboku uproszczonego powinny być poprowadzone w taki sposób, aby powierzchnia uzyskanej figury była równa powierzchni przekroju cząstki.

## 5.2. Badania określające parametry geometryczne cząstek

Z wymienionych w p. 5.1 cech charakteryzujących cząstki badania kulistości i stopnia zaokrąglenia naroży wykonano sposobami zaproponowanymi przez Wadella (Herdan, 1953; Lees, 1964), a badania ostrokrawędzistości metodą Leesa (1964). Natomiast szorstkości powierzchni określano sposobem opracowanym przez autora (Parylak 1990, 1992).

Badania kształtów cząstek wykonano na podstawie wizualnej analizy mikroskopowych powiększeń ich powierzchni, otrzymanych w stereoskopowym mikroskopie optycznym w świetle odbitym dla całej zbiorowości cząstek każdego z gruntów oraz w skaningowym mikroskopie elektronowym, gdzie zrobiono zdjęcia cząstek wytypowanych frakcji 0,1-0,05 mm. Do pierwszych badań pobrano losowo 3-5 próbek każdego z gruntów, rozkładając je na płycie mikroskopu tak, aby w miarę możliwości poszczególne ziarna były od siebie oddzielone. Na tej podstawie stwierdzono, że jednorodność kształtów cząstek w poszczególnych próbkach danego gruntu była zbliżona. Podobnej oceny dokonano porównując kształty cząstek stanowiących odsiane frakcje. Na tej podstawie do zdjęć powierzchni cząstek, wykonanych w elektronowym mikroskopie skaningowym przy 360- i 700-krotnym powiększeniu wybrano frakcje z przedziału 0,05 - 0,1 mm, w której zawiera się średnica miarodajna  $d_{50}$ . Sugerowano się przy tym także wynikami z analizy badań stopnia kulistości i ostrokrawędzistości cząstek mniejszych od 1 mm, wykonanymi na różnorodnie obtoczonych odpadach powęglowych (Gonzales Moradas i inni, 1990). Ustalono w nich m.in., że wraz ze wzrostem uziarnienia od 0,1 do 0,25 mm kulistość cząstek kwarcowych zmniejszała się, a stopień zaokrąglenia naroży wzrastał. Podobne tendencje zaobserwowano w łupkach, w węglu i kalcycie. Zatem również z tego względu badania kształtów wykonano na cząstkach o wymiarach zbliżonych do  $d_{50}$ .

Wykonane mikroskopowe zdjęcia (rys.1-5), ilustrujące m.in. różnice skonfigurowania powierzchni ziaren, posłużyły do analiz i pomiarów geometrycznych. Na płaskich obrazach cząstek o 360- krotnym powiększeniu dokonano geometrycznych pomiarów ich powierzchni i obrysów kształtu. Badania wykonano przy użyciu geodezyjnego kartometru KAR-2 wyposażonego w powiększający obraz wizjer wodzika i w system elektroniczny sprzężony z reje-

strującym wyniki pomiarów komputerem. W ten sposób z dużą dokładnością zmierzono długość linii obrysu konturu cząstki i powierzchnię jej przekroju.

Analizę przeprowadzono dla 25 losowo wybranych ziaren każdego z badanych gruntów. Mając na uwadze niemal dokładną kulistość kulek szklanych i widoczną gładkość ich powierzchni, jak również jedynie śladową zawartość cząstek częściowo zdeformowanych uznano, że planimetryczny pomiar ich powierzchni i analizy badań kształtu są zbędne (rys.1). Podobne założenia przyjmowano także w pracach innych autorów (Ovando-Shelley, 1989; Moore, Donaldson, 1995). Sutharland i Neale (1968), badający zmienność stopnia kulistości kulek szklanych w zakresie 8 frakcji, wykazali, że stopień kulistości frakcji 0,18 – 0,07 wynosi 0,99, a stopień zaokrąglenia kształtów 1,0. Przyjęto zatem, że kulistość, ostrokrawędzistość i stopień zaokrąglenia naroży kulek wyniosą 1,0, a ostrokrawędzistość i szorstkość powierzchni równe są zero.

W celu pomiaru stopnia szorstkości cząstek pozostałych gruntów dokonano także obrysu ich powierzchni wielobokiem tak, aby powierzchnia wieloboku poprowadzonych odcinków wzdłuż skonfigurowanych obrzeży przekroju cząstki była równa powierzchni splanimetrowanej wcześniej cząstki. Komputerowy wydruk pomierzonej powierzchni wieloboku umożliwiał natychmiastową korektę położenia linii wieloboku tak, aby powierzchnia wieloboku i cząstki były sobie równe (rys. 11). W ten sposób dla 25 cząstek każdego z gruntów dokonano pomiarów powierzchni, długości obwodu cząstek i długości obwodów uproszczonych. Liczba ścian wieloboku była na tyle duża, aby każda większa nieforemność cząstki mogła być obrysowana linią prostą. Przykładowe wyniki pomiarów pojedynczych cząstek i sposób obliczenia wyników podano w tabl. 6.

### 5.3. Analiza statystyczna wyników badań

Do oceny reprezentatywności wartości średnich obliczono odchylenie standardowe -  $s$  i błąd standardowy oszacowania średniej -  $s_e$ . Na tej podstawie obliczono przedziały ufności na poziomie ufności  $1 - \alpha = 0,95$  wskazującym, że prawdopodobieństwo wystąpienia teoretycznej wartości średniej w uzyskanym przedziale wynosi 0,95. W celu oszacowania wielkości rozproszenia wyników w stosunku do wartości średniej obliczono współczynnik zmienności  $v$  (%). W analizach statystycznych przyjmuje się na ogół, że jeśli współczynnik zmienności przekracza 25%, wówczas średnia niedostatecznie dokładnie opisuje reprezentowane dane



i świadczy o dużym rozproszeniu wyników. W takich przypadkach dokonuje się selekcji wyników poprzez odrzucenie wartości skrajnych, a następnie skorygowanie wartości średniej (Krysiecki i inni, 1986).

Obliczenia wykonano za pomocą pakietu statystycznego „stratgraphics - wersja 5.0” (Dąbrowski i inni, 1993). W przypadku wszystkich badanych cech kształtu cząstek wartości współczynnika zmienności nie przekroczyły 25%, natomiast w przypadku stopnia szorstkości powierzchni maksymalna wartość „v” wyniosła 96%.

W celu skorygowania średniej tej cechy odrzucono z każdej serii pomiarów po 6 najbardziej odstających wyników, traktując je jako „błędy grube”. Obliczone współczynniki zmienności zmniejszyły się prawie o połowę i korektę tę uznano za zadowalającą. W wyniku tego średnia wartość wskaźnika szorstkości w przypadku popiołu zmniejszyła się o 0,03, w przypadku pyłu piaszczystego z Krakowian 0,01, a w przypadku pyłu piaszczystego z Granicznej nie uległa zmianie. Charakterystyki statystyczne obliczonych cech podano w tablicach 7, 8, 10, 12, a ich ilustracje przedstawiono na tzw. wykresie pudełkowym stanowiącym graficzny obraz ich zmienności (rys.9). Wysokość pudełka obejmuje przedział wartości gromadzący 50% wszystkich wyników badanej cechy, a dzieląca go poprzecznie linia wyznacza wartość mediany. Wyprowadzone poza obrysy pudełka odcinki linii prostych określają przedziały wartości obejmujących po 25% pozostałych wyników.

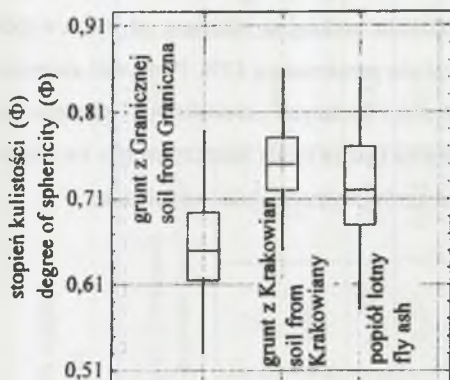
W celu określenia, czy wartości średnie danej cechy kształtu w poszczególnych gruntach różnią się statystycznie, zastosowano model jednokierunkowej wariancji (Dąbrowski i inni, 1993). Obliczone statystyki dla wszystkich badanych cech kształtu wskazują na istotne różnice poszczególnych gruntów na poziomie istotności  $\alpha = 10^{-4}$ . Oznacza to, że różnice cech kształtu w pojęciu statystycznym są bardzo zmienne, co było zresztą założeniem przy doborze gruntów do badań.

#### **5.4. Badanie stopnia kulistości**

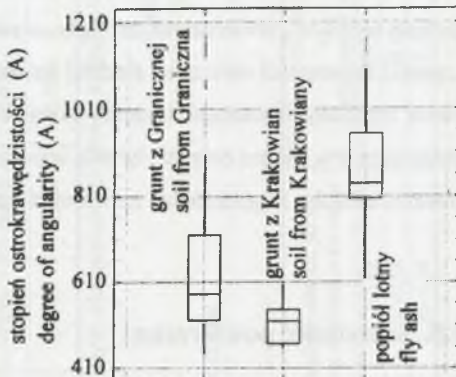
Stopień kulistości  $\Phi$  określono jako stosunek średnicy koła o powierzchni równej powierzchni pola przekroju poprzecznego cząstki –  $d_c$  do średnicy –  $D_c$  najmniejszego okręgu opisanego na tym przekroju (p. 5.1). Sposób obliczenia przedstawiono na przykładzie 4 wybranych cząstek o jednakowej powierzchni pola przekroju poprzecznego wykazując przy tym różnice długości ich obwodów, stopnia kulistości oraz „wskaźnika szorstkości powierzchni”



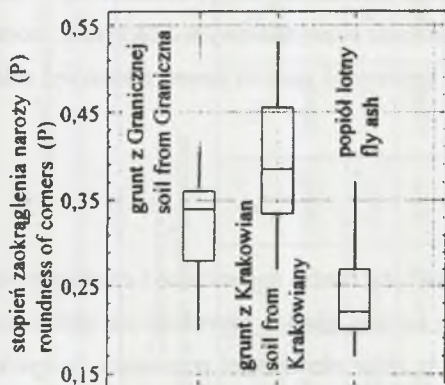
a) Wykresy typu Box i Whisker  
Diagram Box and Whisker type



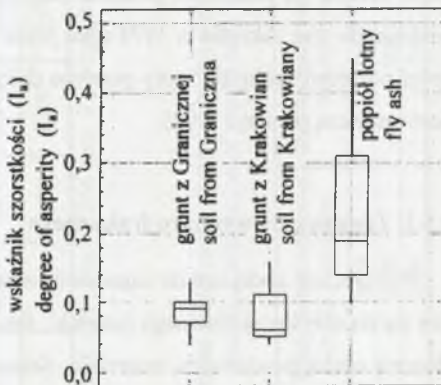
b) Wykresy typu Box i Whisker  
Diagram Box and Whisker type



c) Wykresy typu Box i Whisker  
Diagram Box and Whisker type



d) Wykresy typu Box i Whisker  
Diagram Box and Whisker type



Rys. 9. Schemat ilustrujący wyniki badań statystycznej zmienności cech kształtu i powierzchni cząstek: a) stopień kulistości, b) stopień ostrokrawędzistości, c) stopień zaokrąglenia naroży, d) wskaźnik szorstkości

Fig. 9. Diagram, which illustrate results of statistical tests analyses of shape changeability and surface of particles properties: a) degree of sphericity, b) degree of angularity, c) roundness of corners, d) index of asperity

(tabl. 7). Średnie wartości tych parametrów, podane w tabeli 8, opracowano statystycznie na podstawie pomiarów 25 losowo wybranych cząstek każdego z 3 gruntów. Opierając się na analizie wyników, stwierdzono, że błędy wyznaczenia średniej są mniejsze od 2%, a współczynniki zmienności obliczanej średniej kulistości nie przekraczają 12%. Ponieważ zróżnicowanie uzyskanych wartości średnich stopni kulistości badanych „niekulistych” gruntów nie przekracza 9%, można oceniać, że rola tego czynnika będzie miała nieduży wpływ na zróżnicowanie efektów zagęszczania i na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie.

## 5.5. Szorstkość powierzchni

Pomiary cech geometrycznych powierzchni cząstek gruntów są rzadkie w praktyce geotechnicznej i głównie związane są z badaniami naukowymi w dziedzinach mechaniki skał, gdzie określa się szorstkość połączeń skalnych oraz mechaniki warstwy kontaktowej. Wprowadzony w tym zakresie w 1978 roku przez Bamforda bezwymiarowy współczynnik szorstkości połączeń skalnych, który pomimo dużych uproszczeń stanowi pewną praktyczną skalę porównawczą (Cudny, 1998).

### 5.5.1. Zagadnienia wymiaru fraktalnego

Powszechne podejście do zagadnień szorstkości jest bardzo uproszczone i często sprowadza się do określenia słownego (szorstki, średnio szorstki, gładki). Szorstkość jest najbardziej złożoną cechą powierzchni materialu. Stanowi ją zbiór nierówności powstający w wyniku różnorodnych procesów obrabiania powierzchni, których wysokość może wynosić od mikrometrów do milimetrów. Gradację tych zmian można zobrazować kolejnymi powiększeniami profilogramu (rys. 10a – d). Ukazują one nierówności wyższych rzędów położonych na odcinku szorstkiej powierzchni. Pierwsze badania z tego zakresu wykonane za pomocą profilometru przeprowadzili Yoshimi i Kishid (1981), wyznaczając jednak tylko maksymalną wysokość profilu szorstkości R (rys. 10).

W analizie profilów szorstkich używanych w geotechnice został przeniesiony z dziedzin mechaniki ośrodków sproszkowanych, fraktografii metali, geofizyki, a także z mechaniki skał znajduje zastosowanie wymiar fraktalny, będący porównawczą miarą odniesienia nierówności profilu szorstkiego do profilu o powierzchni gładkiej. Ideę wymiaru fraktalnego w mechanice gruntów jako pierwszy wprowadził w 1977 r. Madelbord, porównując długości obwodów na

Przykładowe obliczenia kulistości i wskaźnika szorstkości wybranych cząstek  
Examples of calculation of sphericity and roughness of particles

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand - silt mixture	Nr cząstki No of particle	Cząstka rzeczywista Particle with natural line contour						Cząstka uproszczona Particle with straight line of contour			$\Delta U$ [mm]	$I_s$ $\frac{U_{re} - U_{upr}}{U_{upr}}$
		Powierzchnia Area $F$ [mm <sup>2</sup> ]	Obwód $U_{rz}$ Perimeter [mm]	$\frac{F}{U}$	$d_c$ [mm]	$D_c$ [mm]	$\Phi$ $d_c/D_c$	$F_u$ [mm]	$U_u$ [mm]	$\frac{F_u}{U_u}$		
Kulki szklane Glass ballotini	Cząstka Teoretyczna	0,0038	0,220	0,017	0,035	0,035	1,00	0,0038	0,220*	0,017	0,000	0,000
Pył z Krakowian Silt from Krakowian	74	0,0038	0,271	0,014	0,035	0,053	0,65	0,0037	0,255	0,015	0,016	0,06
Pył z Granicznej Sild from Graniczna	86	0,0038	0,290	0,013	0,035	0,054	0,64	0,0033	0,255	0,013	0,035	0,14
Popiół lotny Fly ash	139	0,0038	0,332	0,012	0,035	0,052	0,67	0,0033	0,230	0,014	0,102	0,44

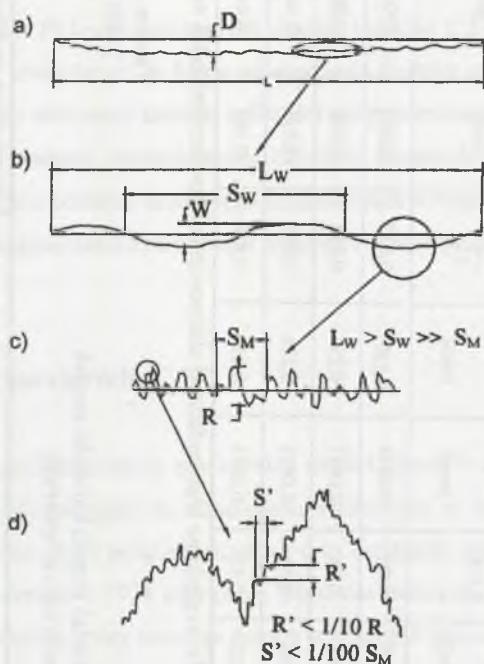
wartości pomiarów kulki szklanej obliczono dla kuli o średnicy 0,056 mm. Ze względu na brak widocznej chropowatości powierzchni kulek nie obrysowywano na ich obwodzie wieloboku.

Tablica 7  
Table 7

Opracowanie statystyczne wyników badań stopnia kulistości cząstek  
Statistical estimation of results tests of sphericity

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand - silt mixture	$\Phi$ (średnie) $\Phi$ (average)	Odchylenie standardowe Standard deviation	Błąd wyznaczenia średniej Standard error	Przedział ufności, 95% Percent confidence for mean	Współczynnik zmienności $v$ Coefficient of variation
Pył z Krakowian Silt from Krakowian	0,740	0,074	0,015	0,72-0,80	0,10
Pył z Granicznej Sild from Graniczna	0,647	0,076	0,015	0,62-0,68	0,12
Popiół lotny Fly ash	0,699	0,084	0,017	0,68-0,74	0,12





Rys. 10. Elementy powierzchni rzeczywistej: a) błąd kształtu, b) falistość, c) szorstkość, d) nierówności wyższych rzędów. (Cudny, 1998)

Fig.10. Elements of profil of area real: a) element of shape, b) corrugation, c) roughness, d) unevenness of highers degrees (Cudny, 1998)

dwóch cząstkach o takiej samej powierzchni przekroju poprzecznego, lecz różniących się kształtem. Wyściowym modelem do analizy był przekrój elipsy i zbliżony do niego przekrój cząstki o rozwiniętym obwodzie. Na parach takich przekrojów wprowadzał wariantowo linie prostoliniowych obrysów kształtu, obliczając fraktalny wymiar profilu szorstkości (Vallejo, 1995; Cudny, 1998). Ostatnio zagadnienia te rozwinięto także na potrzeby opisu cech powierzchni materiałów budowlanych współpracujących w bezpośrednim kontakcie z gruntem, a w tym potrzeby nowego podejścia do pomiaru szorstkości geosyntetyków (Dembicki i inni, 1998).

### 5.5.2. Badanie stopnia szorstkości powierzchni

Nie znając rozwiązań Madelborda, autor niniejszej pracy opublikował w 1990 roku zbliżony sposób określania szorstkości cząstek. Wykorzystując znane powierzchnie przekroju



poprzecznego oraz długość obwodu cząstki pomierzoną na powiększonym 360- krotnie zdjęciu, poprowadzono wzdłuż jej obrzeży wielobok w ten sposób, aby boki każdej większej nieregularności kształtu cząstki zastąpić odcinkiem linii prostej (rys. 11). Trasowanie linii prostych wieloboku korygowano tak długo, aż jego powierzchnia równa była powierzchni rzeczywistej cząstki. W ten sposób równomiernie rozdzielano linią sieczną widoczne na krawędziach cząstek mikrozagłębienia i mikrowystępy. Duże powiększenie wizjera wodzika kartometru pozwoliło uniknąć znaczących niedokładności. Przykładowy sposób obliczenia wykonanego za pomocą programu komputerowego podano w tabl. 6, gdzie:

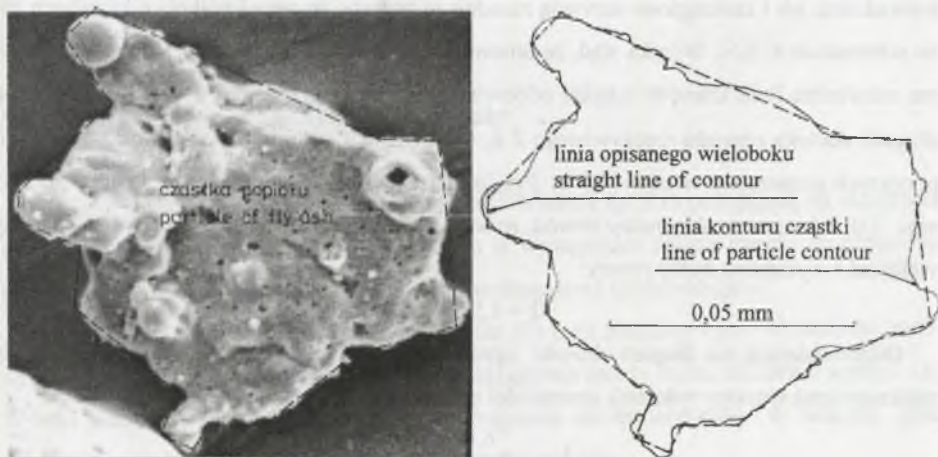
$F_u$  - powierzchnia wieloboku opisanego na cząstce,

$U_u$  - długość obwodu wieloboku opisanego na cząstce,

$\Delta U$  - różnice długości obwodu cząstki i obwodu wieloboku opisanego.

Na tej podstawie obliczono wskaźnik szorstkości powierzchni cząstki (Parylak, 1990). W wyniku przeprowadzonej analizy kształtu 25 cząstek dla każdego z gruntów i wykonanych obliczeń ustalono średnie wartości wskaźników szorstkości powierzchni (tabl. 8).

$$I_a = \frac{U_{\text{rzeczywisty}} - U_{\text{uproszczony}}}{U_{\text{uproszczony}}} \cdot 100\% \quad (9)$$



Rys.11. Schemat ilustrujący sposób określania stopnia szorstkości powierzchni cząstek

Fig.11. Diagram, which illustrate the method of determination of asperity index degree of particles

Opracowanie statystyczne wyników badań wskaźnika szorstkości powierzchni  
Statistical estimation of results tests of asperity index

Rodzaj pyłu piaszczystego Sand – silt mixture Type	Wartość średnia Average $I_a$	Odchylenie standardowe Standard deviation $s$	Błąd średniej Standard error se	Przedział ufności przy $1 - \alpha = 0.95$ 95 percent confi dence for mean	Współczynnik zmienności Coefficient of variation $v$
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	0,08	0,04	0,009	0,05-0,15	52
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	0,08	0,03	0,006	0,04-0,14	32
Popiół lotny Fly ash	0,23	0,11	0,025	0,21-0,32	47

W ocenie wyników należy podkreślić, że zdecydowanie najwyższą szorstkość powierzchni ma popiół, natomiast jednakowe wartości uzyskano dla pyłu piaszczystego z Krakowian i z Granicznej.

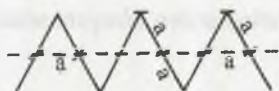
Istotne w tym zagadnieniu jest również ustalenie możliwej maksymalnej szorstkości powierzchni, do której można by porównawczo odnosić mierzone wartości. W uproszczeniu przyjęto, że widoczne na zdjęciach mikroskopowych wgłębienia i występy zarówno ostrokrawędziste, jak i zaokrąglone stanowią zasadniczo trójkąty, trapezy i półkola o kształtach jak na schematach a, b, c. Wynika stąd, że umownemu odcinkowi o długości „a” upraszczającemu rozwiniętą linię krawędzi cząstki odpowiadać będzie w przypadku trójkąta maksymalna długość odcinka obwodu rzeczywistego  $2a$ , w przypadku półkoli -  $\pi a / 2$ , a dla trapezu o przyjętych proporcjach boków -  $2,5a$ . Przyjmując, że jednostkowa długość odcinka „a” wynosi 1,0, wówczas maksymalny obwód, na którym występowałyby trzy pojedyncze kształty wgłębień i występow, byłby równy:

$$2 + 1,57 + 2,5 = 6,07$$

Odpowiadająca mu długość obwodu uproszczonego będzie równa 3,5. Na tej podstawie obliczono maksymalny wskaźnik szorstkości cząstek:

$$I_{a \max} = \frac{6,07 - 3,5}{3,5} = 0,73$$

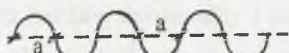
- dla przypadku występow trójkątnych i półkolistych  $I_{a \max}$  wyniosłoby - 0,78
- dla przypadku występow trójkątnych i trapezowych - 0,80
- dla przypadku występow półkolistych i trapezowych - 0,63



$$U_{\text{upr}} = a = 1.0 a$$

$$U_{\text{rzecz}} = 2a = 2.0 a$$

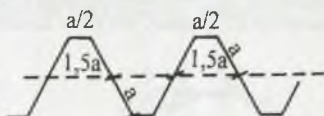
a)



$$U_{\text{upr}} = a = 1.0$$

$$U_{\text{rzecz}} = \pi a/2 = 1,57 a$$

b)



$$U_{\text{upr}} = 1,5 a = 1.0$$

$$U_{\text{rzecz}} = 2a + a/2 = 2.5a$$

c)

Rys. 12. Hipotetyczne schematy szorstkości powierzchni cząstek przy założeniu występowania nierówności wyłącznie trójkątnych albo półkolistych, albo trapezowych

Fig. 12. Hypothetical diagrams of asperity surface of particles in assumption, that roughness are triangles only, semicirculars only or trapezoids only

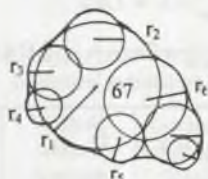
Niniejsze rozważania stanowią pewne uzasadnienie w pomiarach wykonanych na 150 cząstkach 6 pyłów piaszczystych i piasków, wśród których najwyższe wartości  $I_a$  uzyskane dla agregatu popiołowego wyniosły 0,89.

## 5.6. Badanie stopnia zaokrąglenia naroży

Badanie wykonano metodą opracowaną przez Wadella (p. 5.1) polegającą na określaniu sumy stosunków promieni okręgów wpisanych w występujące naroża cząstki do promienia największego okręgu wpisane w cząstkę podzieloną przez liczbę okręgów.

Przykładowy sposób obliczenia dla cząstki (nr 67) pyłu piaszczystego z Krakowian podano na rys. 13 i w tabl. 9. Przyjęto, że stopień zaokrąglenia naroży kulek szklanych wynosi 1,0. Wyniki wskazują, że najwyższy stopień zaokrąglenia naroży uzyskano w badaniu pyłu piaszczystego z Krakowian, a najniższy w przypadku popiołu.

Wzajemne różnice tego parametru pomiędzy pyłem z Krakowian a pyłem z Granicznej wynoszą 8% oraz pyłem z Granicznej i popiołem również 8%.



$$P = \frac{\sum r_i / r_1}{N}$$

Rys. 13. Przykład badania stopnia zaokrąglenia naroży cząstki nr 67 pyłu piaszczystego z Krakowian  
 Fig.13. Example of the corners roundness testing for particle no 67 of sandy silt from Krakowian

Tablica 9  
 Table 9

Przykład badania stopnia zaokrąglenia naroży cząstek  
 Example of estimation of roundness particles

Nr cząstki No of Particle	Promień okręgów dopasowanych do naroży (cm) Radius of circle fitted into a corners (cm)								Σ	P
	1	2	3	4	5	6	7	8		
67	1,09	0,51	0,48	0,31	0,41	0,70	0,50	0,25	4,57	0,51

Uśrednione wyniki z pomiarów 25 cząstek każdego z gruntów wraz z ich analizą statystyczną podano w tabl. 10.

Tablica 10  
 Table 10

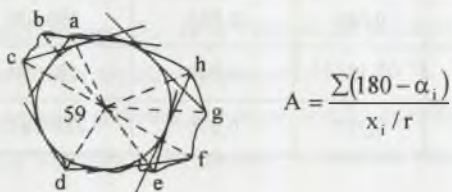
Opracowanie statystyczne badań stopnia zaokrąglenia naroży  
 Statistical estimation of results tests of roundness

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand – silt mixture	Wartość średnia Average $I_a$	Odchylenie standardowe Standard deviation $s$	Błąd wyznaczenia średniej Standard error $se$	Przedział ufności przy $1 - \alpha = 0,95$ 95 percent confidence for mean	Współczynnik zmienności Coefficient of variation $v$
Pył z Krakowian Silt from Krakowian	0,40	0,09	0,018	0,37-0,43	22
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	0,32	0,06	0,012	0,30-0,35	18
Popiół lotny Fly ash	0,24	0,05	0,012	0,12-0,27	23



## 5.7. Badanie stopnia ostrokrawędzistości cząstek

Określenie stopnia ostrokrawędzistości polega na obliczeniu sumy ostrości kątów wyprowadzonych z wierzchołków naroży przekroju cząstki. Jak wykazał Lees (1964) (p. 5.1), jest to parametr bardziej uniwersalny i dokładniej opisujący stopień nieregularności kształtów cząstki niż stopnia zaokrąglenia naroży. Sposób obliczania 25 cząstek każdego z gruntów zilustrowano na przykładzie ziarna (nr 59) pyłu z Krakowian (tabl. 11, rys. 14) wg wzoru 8:



Rys. 14. Przykład badania stopnia ostrokrawędzistości kształtu cząstki nr 59 pyłu piaszczystego z Krakowian

Fig. 14. Example of the angularity degree testing for particle no 59 of sandy-silt mixture from Krakowian

Tablica 11

Table 11

Przykład badania stopnia ostrokrawędzistości kształtu cząstek  
Example of degree of angularity estimation

Nr cząstki No of particle	Naroże Corner	Kąt $\alpha^\circ$ angle $\alpha^\circ$	$180^\circ - \alpha_i$	x ( cm )	$x_i/r$	$A_i$
59	A	114	66	1,35	1,19	55
	B	90	90	1,61	1,42	70
	C	94	84	1,58	1,40	60
	D	125	55	1,30	1,15	48
	E	113	67	1,36	1,20	56
	F	84	96	1,70	1,50	64
	G	79	101	1,64	1,45	70
	H	97	93	1,71	1,34	69
						$\Sigma 478$

Uśrednione wyniki badań wraz z analizą statystyczną podano w tabl. 12.

Opracowanie statystyczne badań stopnia ostrokrawędzistości kształtów cząstek  
Statistical estimation of results tests of degree of angularity

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand - silt mixture	Wartość średnia Average $I_a$	Odchylenie standardowe Standard deviation S	Błąd Wyznaczenia średniej Standard error Se	Przedział ufności przy $1 - \alpha = 0,95$ 95 percent confidence for mean	Współczynnik zmienności Coefficient of variation - v %
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	514	0,049	0,010	400-636	13
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	638	0,156	0,049	522-746	25
Popiół lotny Fly ash	930	0,237	0,075	817-1042	25

## 5.8. Obliczenie wartości względnych cech kształtu

Średnie wartości badanych cech kształtu zamieszczono w tablicach 6, 8, 10, 12 i zestawiono w tablicy 13, gdzie podano również ekstremalne wartości danej cechy. W celu łatwiejszego porównania poszczególnych cech kształtu, stopień ostrokrawędzistości  $A$ , zmieniający się od 0 dla kul do 1600 dla cząstek bardzo nieregularnych przeliczono na wartości dziesiętne mieszczące się w przedziale od 0 do 1,0. Jednocześnie zastąpiono umownie ten stopień pojęciem nieostrokrawędzistości w ten sposób, że obliczone wskaźniki odejmowano od jedności.

Tablica 13

Table 13

Średnie i ekstremalne cechy kształtu cząstek  
Average and extremal values characteristics of shape particles received from tests

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand - silt mixture	Kulistość Sphericity			Zaokrąglenia narozy Roundness			Nieostrokrawędzistość Angularity			Wskaźnik gładkości powierzchni 1- Roughness		
	$\Phi$	max	min	$\bar{P}$	max	min	$\bar{A}$	max	min	$1-I_a$	Max	min
Kulki szklane Glass ballotini	1,00	<u>1,00</u>	1,00	1,00	<u>1,00</u>	1,00	1,00	<u>1,00</u>	1,00	1,00	<u>1,00</u>	1,00
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	0,74	0,89	0,62	0,40	0,63	0,27	0,68	0,71	0,62	0,90	0,98	0,83
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	0,65	0,79	<u>0,53</u>	0,32	0,41	0,20	0,60	0,73	0,44	0,91	0,98	0,84
Popiół lotny Fly ash	0,70	0,79	0,63	0,24	0,36	<u>0,17</u>	0,42	0,62	<u>0,07</u>	0,73	0,94	<u>0,11</u>

Również wskaźnik szorstkości powierzchni zastąpiono umownym pojęciem wskaźnika gładkości, odejmując obliczone wartości  $I_a$  od jedności. Zachowując w ten sposób wzajemną niezmienną proporcję tych cech w badanych gruntach, uzyskano możliwość bezpośredniego ich porównywania odnosząc wyniki do kulek, dla których wszystkie wartości są równe 1,0.

Uzyskane wartości wskazują, że poszczególne cechy kształtów cząstek gruntów niekuli-  
stych są wyraźnie zróżnicowane. Najniższa zmienność wystąpiła w przypadku stopnia kulistości, gdzie wartości średnie różnią się tylko o 9%. W przypadku stopnia zaokrąglenia różnica ta wyniosła 16%, w przypadku stopnia nieostrokrzewdzistości kształtu - 26%, a w przypadku stopnia gładkości powierzchni 18%. Porównując je natomiast do cech przyjętych dla kulek szklanych maksymalne różnice wynoszą od 35 do 76 %. Podane w tabeli 13 maksymalne i minimalne wartości stanowią graniczne wyniki otrzymane z bezpośrednich badań cząstek po odrzuceniu wyników traktowanych w analizie statystycznej jako błędy grube (p. 5.5).

W celu przeprowadzenia całościowej oceny wpływu wszystkich cech kształtu jako jednego ogólnego wskaźnika na parametry wytrzymałości na ścinanie, wprowadzono tzw. ogólny wskaźnik cechy kształtu uwzględniający zmienność badanych gruntów ( $\zeta_o$ ). Określono nim umownie liczbę uzyskaną z różnicy wartości średniej badanej cechy danego gruntu i wartości minimalnej tej cechy uzyskanej ze wszystkich badań 4 gruntów. Podzielono ją przez różnicę wartości maksymalnej i minimalnej badanej cechy, jaka wystąpiła w 4 badanych gruntach (tabl. 13).

$$\zeta_o = \frac{\zeta_{sr} - \zeta_{min}}{\zeta_{max} - \zeta_{min}} \quad (10)$$

Obliczone w ten sposób wskaźniki zestawiono w 4 pierwszych kolumnach w tabeli 14. Ponieważ jednak stopień zaokrąglenia naroży P i stopień nieostrokrzewdzistości cząstek A w różnym ujęciu opisują tę samą cechę, to sumaryczną wartość wskaźnika cechy kształtu ( $\zeta_{oc}$ ) obliczono w dwóch wariantach, uwzględniając w każdym z nich tylko jeden z tych parametrów (tabl. 14).

$$\zeta_{oc I} = \frac{\zeta_{\phi} + \zeta_P + \zeta_{(1-I_s)}}{3} \quad (11)$$

$$\zeta_{oc II} = \frac{\zeta_{\phi} + \zeta_{(1-A)} + \zeta_{(1-I_a)}}{3} \quad (12)$$

Obliczenie zsumowanych wskaźników cech kształtu cząstek  $\zeta_{oc I}$  i  $\zeta_{oc II}$ Estimation of totals characteristics of shape particles  $\zeta_{oc I}$  i  $\zeta_{oc II}$ 

Rodzaj pyłu piaszczystego Ort sand – silt mixture	$\zeta_{\Phi}$	$\zeta_p$	$\zeta_{(1-A)}$	$\zeta_{(1-I_s)}$	$\zeta_{oc I}$	$\zeta_{oc II}$
Kulki szklane Glass balotini	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	0,45	0,28	0,66	0,89	0,54	0,67
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	0,26	0,18	0,57	0,90	0,45	0,58
Popiół Fly ash	0,70	0,24	0,39	0,70	0,38	0,48

Uzyskane wartości  $\zeta_{oc I}$  i  $\zeta_{oc II}$  stosowano wariantowo w interpretacji wyników badań zagęszczalności i wytrzymałości na ścinanie.



## 6. ZAGĘSZCZALNOŚĆ

Grunty o uziarnieniu drobnych piasków i pyłów określane są w literaturze jako grunty przejściowe (transition soils) pomiędzy spoistymi i niespoistymi (Kezdi, 1979). Z tego względu badania maksymalnej gęstości objętościowej szkieletu mogłyby być prowadzone różnymi metodami. Przy małych wilgotnościach drobne cząstki gruntu wykazują duże zdolności do utrzymywania bądź wiązania wody poprzez fizyczne i chemiczne oddziaływania powierzchni. Wywołują to różne siły powodujące zarówno przyciąganie, jak i odpychanie cząstek, a ich sumaryczne oddziaływanie zmienia się wraz z odległością powierzchni styku.

Z badań Kolbuszewskiego (1948), analizującego wpływ kilkunastu sposobów zagęszczenia piasków w różnych warunkach wilgotnościowych, wynika, że najwyższe gęstości objętościowe szkieletu uzyskano metodą wibrowania w cylindrze przy jednoczesnym ubijaniu zagęszczanej powierzchni w 3 warstwach w warunkach pełnego nasycenia. Były one o ok. 1/3 wyższe od gęstości piasków suchych poddanych tylko wibracji. Z kolei te były o ponad 1/3 wyższe od maksymalnych gęstości szkieletu otrzymanych w aparacie Proctora. Późniejsze badania dowiodły, że najkorzystniejsze efekty wibrowania suchych piasków uzyskiwano przy częstotliwościach drgań rzędu 26-30 cykli na sekundę po czasie wibrowania nie mniejszym niż 10 min. Niezwykle istotne w tym zakresie okazało się maksymalne przyspieszenie, którego optymalna wartość  $1200 \text{ cm/s}^2$  nie powinna być przekraczana. Jeśli intensywność wibracji była większa, to ziarna były poddawane procesowi wzajemnych przemieszczeń tak intensywnie, że nie miały możliwości najkorzystniejszego trwałego ułożenia (Kolbuszewski, 1965).

Odrębną rolę odgrywa również wielkość ziaren i różnoziarnistość (Kabai, 1969; Korfiatis i Manicopoulos, 1982), a także cechy kształtu cząstek. Najniższe porowatości uzyskuje się w przypadku piasków o cząstkach kulistych i gładkich, a wyższe dla piasków o ziarnach nieforemnych i szorstkich. Potwierdza to również Kabai (1968), zauważając, że porowatości uzyskiwane w wyniku wibracji gruntów o dominacji cząstek mniejszych od 0,1 mm są także wynikiem składu mineralnego i sił wynikających z oddziaływania filmów adsorbowanego powietrza i pary wodnej. Rolę pary wodnej opisują m.in. Neema i inni (1990).

## 6.1. Badania maksymalnego i minimalnego wskaźnika porowatości

Naprężenia wynikające z przyciągania przylegających do cząstek filmów wodnych, określone na podstawie ich średnicy  $d_{50} = 0,06$  mm (rys. 6) i odniesionej do zależności podanej przez Kędzigo (1979), dla badanych pyłów piaszczystych mogą wynosić do 5 kPa. Między innymi z tego względu badania zagęszczalności wykonano metodą wibracji na próbach suchonych w  $105^{\circ}\text{C}$ , a następnie schładzanych w eksykatorze. W ten sposób wyeliminowano nie tylko wpływ wody higroskopowej, ale również potencjalny wpływ pary wodnej na przebieg procesu zagęszczania (Neema i inni, 1990).

Badania wskaźnika maksymalnej i minimalnej zagęszczalności przeprowadzono metodą wibrowania w znormalizowanym cylindrze, zgodnie z wymogami normy (PN-88/B-04481). Dla każdego gruntu wykonano po 3 oznaczenia  $\rho_{d \max}$  i  $\rho_{d \min}$ , a uzyskane średnie wyniki podano w tabl. 15.

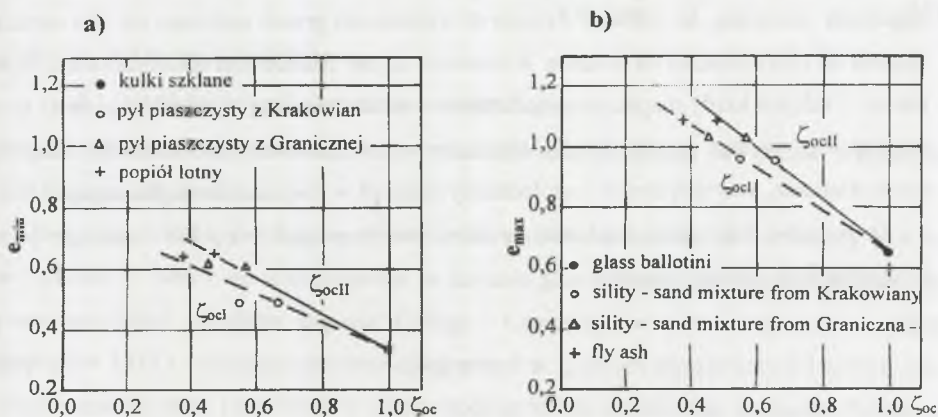
Tablica 15  
Table 15

Wyniki badań gęstości objętościowych szkieletu i wskaźników porowatości  
Results of bulk density and void ratio tests

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand - silt mixture	$\rho_{d \max}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_{d \min}$ t/m <sup>3</sup>	$\rho_s, \rho_{se}$ t/m <sup>3</sup>	$n_{\max}$ $n_{e \max}$	$n_{\min}$ $n_{e \min}$	$e_{\max}$ $e_{e \max}$	$e_{\min}$ $e_{e \min}$
Kulki szklane Glass balotini	1,829	1,485	2,453	0,398	0,254	0,657	0,340
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	1,794	1,388	2,677	0,481	0,330	0,964	0,492
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	1,628	1,298	2,645	0,509	0,384	1,039	0,625
Popiół lotny Fly ash	1,189	0,933	(2,100) 1,945	(0,556) 0,520	(0,436) 0,391	(1,251) 1,085	(0,772) 0,643
1. Wartości $n_e$ i $e_e$ dotyczą tylko popiołu i uwzględniają tylko pory międzycząstkowe. 2. Wartości w nawiasach dotyczą porowatości i wskaźników porowatości liczonych łącznie z drożnymi porami cząstek popiołu. 1. Values $n_e$ and $e_e$ to apply to only of interparticle pores of fly ash. 2. Values in parenthesis to apply to parameters to take into consideration also open pores of fly ash particles.							

Uzyskane zmienności przedziałów maksymalnych i minimalnych wskaźników porowatości spowodowane są przede wszystkim stopniem ostrokrawędzistości i nieregularności kształtów cząstek, czego dowodem są zbliżone porowatości luźno usypanych kulek oraz porowatości maksymalnie zagęszczonego popiołu i pyłu piaszczystego z Granicznej. Dla ilustracji przebiegu tych zmian na rys.15a, b przedstawiono wpływ sumarycznych wskaźników

kształtu  $\zeta_{ocI}$  i  $\zeta_{ocII}$  na zmiany minimalnego i maksymalnego wskaźnika porowatości. (p. 5.8). Sumaryczny wskaźnik cech kształtu  $\zeta_{ocII}$  zmieniał się pomiędzy kulkami a popiołem o 0,52, powodując wzrost  $e_{max}$  o 0,30, a  $e_{min}$  o 0,43. Nieco mniejsze zmiany uzyskano by w interpretacji wpływu wskaźnika  $\zeta_{ocI}$  uwzględniającego zamiast nieregularności (A) stopień zaokrąglenia naroży (P). Wydzielenie wpływu każdej pojedynczej cechy kształtu na uzyskiwane wskaźniki porowatości w tych badaniach było niemożliwe, gdyż na występujące różnice wskaźników porowatości wpływają jednocześnie pozostałe cechy. Z tego względu podawane niekiedy w literaturze zależności (np. Kolbuszewski, 1965) pomiędzy stopniem zaokrąglenia naroży i wskaźnikami porowatości należy traktować jako niepełne, ponieważ udział pozostałych cech kształtu nie był uwzględniany, a stopień zaokrąglenia naroży oceniano jedynie wizualnie na podstawie wzorcowych tablic Krumbeina.



Rys.15. Zależność minimalnego i maksymalnego wskaźnika porowatości od wskaźników cech kształtu cząstek  $\zeta_{ocI}$  i  $\zeta_{ocII}$

Fig. 15. Dependence of minimum and maximum void ratio on coefficients of shape particles  $\zeta_{ocI}$  and  $\zeta_{ocII}$

## 7. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

### 7.1. Zarys rozwoju badań wytrzymałości na ścinanie

Wytrzymałość gruntu na ścinanie można rozpatrywać jako maksymalne naprężenie ścinające, które, przyłożone do gruntu, pokonuje jego opór. Gdy ta maksymalna wartość zostanie osiągnięta, grunt można uważać za zniszczony, a jego wytrzymałość na ścinanie można określić jako w pełni zmobilizowaną. Taylor (1956) omawiając znaczenie i złożoność tych zagadnień stwierdza, że „żadna z fizycznych właściwości gruntu spoistego nie jest bardziej złożona od wytrzymałości na ścinanie. Właściwość ta jest uzależniona od bardzo wielu czynników, z których każdy rozpatrywany oddzielnie jest złożony, lecz w dodatku czynniki te są wzajemnie powiązane ze sobą do tego stopnia, że jest niezmiernie trudno zrozumieć ich połączone działanie, a wynika ono ze współoddziaływania sił w miejscach kontaktu cząstek”.

Za początek klasycznej mechaniki gruntów można przyjąć rok 1773 i podanie przez Coulomba m.in. znanej formuły

$$s = c + \sigma \operatorname{tg} \phi, \quad (13)$$

która w praktyce trafnie określała liniową zależność pomiędzy wytrzymałością na ścinanie a naprężeniem normalnym. Od 1925 roku, wraz z opublikowaniem słynnej pracy Terzagiego, datuje się początek rozwoju nowoczesnej mechaniki gruntów (Broś, 1998; Wilun, 1987). Zaczęto wówczas częściej stosować dokładnie kontrolowane badania wytrzymałości gruntów na ścinanie. Ustalono m.in., że kąt tarcia przy ścinaniu w dużym stopniu uzależniony jest od warunków odpływu wody z próbki. Pierwszy doświadczalnie wykazał to Terzaghi, który w badaniu tego samego iltu w warunkach bez odpływu uzyskał kąt tarcia  $0,5^\circ$ , a w warunkach z odpływem  $23^\circ$ . Omawiający te zagadnienia Bishop i Bjerrum (1960) wskazują, że głównym powodem późnego rozwoju mechaniki gruntów jako systematycznej gałęzi inżynierii była trudność w powszechnym uznaniu i zrozumieniu roli wodoprzepuszczalności gruntów. Różnica w charakterystyce wytrzymałości piasku oraz iltu leży nie tyle w różnicy tarcia cząstek



wchodzących w skład tych gruntów, ile w około milionkrotnej różnicy ich wodoprzepuszczalności. W 1924 r. Terzaghi wprowadził zasadę naprężeń efektywnych użytą do wyjaśnienia teorii konsolidacji. Pierwszym ustaleniem wynikającym z tej zasady jest stwierdzenie, że zmiana objętości oraz odkształcenie w gruntach nie zależą od naprężeń całkowitych przyłożonych do gruntu, lecz od różnicy między naprężeniem całkowitym a ciśnieniem wytworzonym w cieczy wypełniającej przestrzeń porową.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (14)$$

Rozwijana wiedza o wytrzymałości gruntów na ścinanie z uwzględnieniem teorii naprężeń efektywnych doprowadziła do modyfikacji w 1937 r. przez Hvorsleva równania Coulomba do postaci

$$s = \bar{c} + \sigma \operatorname{tg} \bar{\phi}, \quad (15)$$

gdzie:  $\bar{c}$  jest spójnością efektywną,

$\bar{\phi}$  jest efektywnym kątem tarcia wewnętrznego.

Ponadto jako pierwszy stwierdził on wyraźnie, że spójność gruntu jest przede wszystkim funkcją jego wilgotności.

Drugi etap rozwoju nowoczesnej mechaniki gruntów datuje się od konferencji ASCE w Colorado w 1960 r. nt. wytrzymałości na ścinanie gruntów spoistych. Zapoczątkowały go prace brytyjskich ośrodków Imperial College i Cambridge, w tym zaproponowana przez Bishopa w 1955 r. koncepcja naprężeń efektywnych w gruntach nienasyconych i metody pomiarów ciśnień wody i powietrza w porach podczas badań trójosiowego ściskania. Podstawą wielu koncepcji mechaniki gruntów stała się przedstawiona przez Roscoe'a (1968) teoria stanu krytycznego wiążąca w jeden system naprężenia, odkształcenia i zniszczenie gruntu. Rozszerzyła ona w istotny sposób możliwości interpretacji wyników badań trójosiowych i posłużyła do opracowania wielu modeli pomocnych w matematycznym modelowaniu zachowania się gruntów (Wolski, 1985; Wroth, Houlsby, 1985). Wreszcie ostatnie trzydziestolecie postępu w tej dziedzinie to rozwój teorii i nowoczesnych analiz, w tym m.in. powiązanie analiz parametrów stateczności ( $\phi'$ ,  $c'$ ,  $\rho$ ) i parametrów odkształceń ( $E$ ,  $\mu$ ,  $m_v$ ,  $c_c$ ,  $c_v$ ) (Gryczmański, 1995). Następuje dalszy rozwój badań laboratoryjnych, a przede wszystkim nowych technik w badaniach terenowych. Zmieniły one wiele wcześniejszych koncepcji, dały dużo doświadczeń i nowych praktycznych zastosowań. Można by tu wymienić zaproponowaną przez Ladda i Footta metodę badania SHANSEP, zagadnienia wytrzymałości na ścinanie

w warunkach bez odpływu, czy też badania modułów ściśliwości w warunkach z odpływem i bez odpływu (Wroth, Houlsby, 1985).

W podsumowaniu dotychczasowego rozwoju badań właściwości gruntów mogą być badane generalnie na trzech różnych poziomach rozważań określonych umownie w skali zagadnień mikro, makro i mega (Jamiołkowski i in., 1985). Rozważania na poziomie mikro dotyczą analiz oddziaływań pomiędzy pojedynczymi cząstkami bądź ich zbiorowiskami. Uwzględniają one głównie efekty uwarunkowane stopniem złożoności kształtów cząstek i ich układu strukturalnego z uwzględnieniem zmian zachodzących w wyniku przykładania do gruntu naprężeń. Poziom makro stanowią badania i analizy z zakresu wielkości i współzależności naprężeń i odkształceń określanych m.in. w badaniach trójosiowego ściskania, w aparacie płaskiego odkształcenia lub bezpośredniego ścinania. W analizach tych przyjmowane są określone liczne rozwiązania i opisujące je równania. W większości problemów dotyczą one gruntów spoistych, których właściwości są dalece bardziej skomplikowane od gruntów niespoistych. Rozważania na tzw. poziomie mega obejmują problemy nienaruszonej struktury gruntów, uwzględniające zarówno środowiskowe otoczenie badanej strefy gruntowej, jak i właściwości, które mogą być analizowane poprzez rozwiązania stanów granicznych.

Rozważania w niniejszej pracy można umiejscowić na pograniczu zagadnień mikro i makro. Podstawowe współzależności w tej tematyce rozwijane były szczególnie intensywnie w latach pięćdziesiątych i sześćdziesiątych tego stulecia (Jamiołkowski i in., 1985). Pojawiające się obecnie z tego zakresu stosunkowo nieliczne prace są wynikiem ich dalszego rozwoju.

## 7.2. Rozwój aparatury i sposobów badań wytrzymałości na ścinanie

Rozwój laboratoryjnych badań wytrzymałości na ścinanie datuje się od skonstruowania w 1846 r. przez Collina dwupłaszczyznowego **aparatu bezpośredniego ścinania** (Broś, 1975). Aparat ten, przeznaczony do badań ilów, nie przewidywał możliwości zmiany składowej naprężenia normalnego, a modyfikacja została dokonana dopiero w 1965 r. przez Sowersa. Powszechnie obecnie stosowana konstrukcja tego aparatu w pierwszej wersji została skonstruowana w nieznanym okresie przez Coulomba, a następnie modyfikowana była przez Kraya, Terzaghiego i Casagrande'a (Saada, Townsend, 1980; Broś, 1998). O powszechności jego stosowania zdecydowała prostota badań, prostota elementarnej teorii i łatwość zastosowania wyników badań do rozwiązywania niektórych problemów. Z drugiej strony podkreśla-

nymi mankamentami tej konstrukcji jest narzucana płaszczyzna ścinania, duże zróżnicowanie naprężeń w próbce oraz zmiany kierunków naprężeń głównych w czasie ścinania, których położenie w chwili zniszczenia jest bliżej nieokreślone. Również warunki odsączania wody są trudne do skontrolowania, z tego względu badania w tym aparacie ograniczone są głównie do gruntów niespoistych.

Propozycję modyfikacji konstrukcji umożliwiającą zmianę wszystkich trzech naprężeń głównych przedstawił w 1957 r. Pelfier, jednakże prawdopodobnie złożoność konstrukcji spowodowała, że nie znalazła ona powszechnego zastosowania. Ideę tę wykorzystano do konstrukcji aparatu rzeczywistego trójosiowego ściskania nazwanego **aparatem kierunkowego ścinania** (true triaxial device) Jakobsen w roku 1953; Hambley i Roscoe w roku 1969 oraz Ko i Scott (1967). W celu wyeliminowania mankamentów procesu bezpośredniego ścinania Kiellman skonstruował w 1951 roku **aparat płaskiego ścinania**, w którym cylindryczną próbkę gruntu umieszczoną w gumowej osłonie i zaciśniętą na końcach gumowymi pierścieniami poddawano ścinaniu następującemu w wyniku przeciwnie skierowanych sił poziomych przyłożonych do górnego i dolnego końca próbki. W ten sposób uzyskano w pionowym przekroju próbki symetrycznie jednorodny rozkład naprężeń ścinających. Modyfikując to rozwiązanie Roscoe (1953) zastąpił cylindryczną próbkę prostokątną umieszczoną w skrzynce o przegubowych końcach. Jednakże ze względu na złożoność konstrukcji i techniki badania aparaty te nie zostały wprowadzone do powszechnego stosowania. Obecnie uważa się, że badania te nie wnoszą znaczących wartości poznawczych. W praktyce mogą być użyte jako badanie porównawcze, ale nie stanowią kryterium oceny właściwości gruntów (Saada, Townsend, 1986). W pewnych przypadkach odwzorowują one jednak lepiej rozkłady naprężeń niż badania trójosiowe.

Znacznie wcześniej, bo od początku obecnego stulecia datuje się rozwój aparatów rotacyjnych i aparatów trójosiowego ściskania. Zasadniczą zaletą **aparatów rotacyjnych** jest możliwość dużych odkształceń przy niezmienniej powierzchni ścinania. Pozwala to uzyskać wytrzymałość rezydualną zwaną również trwałą. Od czasu skonstruowania w 1917 r. przez „American Society of Civil Engineers” pierwszego aparatu datuje się rozwój jego konstrukcji udoskonalanej w różnych ośrodkach. Powstały rozwiązania konstrukcyjne o cylindrycznej próbce (hollow cylinder triaxial), jak i aparaty pierścieniowe (torsional shear), w których próbka wycinana jest w postaci pierścienia skreconego<sup>1</sup> w płaszczyźnie prostopadłej do osi. Spośród badaczy zajmujących się w latach 1928 – 1939 konstruowaniem i badaniami wytrzymałości w aparatach rotacyjnych wymienić można Strecka, Tiedemanna, Hvorsleva, czy Scarletta i Todda w roku 1968. Do najnowszych rozwiązań należy w tej dziedzinie zaliczyć



pierścieniowy aparat rotacyjny, jaki powstał w wyniku współpracy Imperial College i Norweskiego Instytutu Geotechnicznego (Bishop i in., 1971). Niewątpliwie badania wykonane w tych aparatach mogłyby wnieść znaczące informacje o roli cech kształtu cząstek drobnoziarnistych gruntów niespoistych w procesie ścinania. Jednakże ich konstrukcja jest złożona, a dostępność gotowych aparatów nadal ograniczona.

**Aparaty trójosiowego ściskania** należą do najpowszechniejszej stosowanych w określaniu wytrzymałości gruntów na ścinanie. Połączenie ściskania osiowego próbek w warunkach jednoczesnego poziomego ciśnienia hydraulicznego zostało po raz pierwszy zastosowane w 1911 r. przez Karmana. Jürgenson (1934) dał jeden z pierwszych szczegółowych opisów aparatu trójosiowego skonstruowanego w MIT, a jedno z pierwszych obszerniejszych badań zostały przeprowadzone przez Rendulica. W rok później zrobił on pierwsze badanie z pomiarem ciśnienia pionowego, a Casagrande w 1939 przeprowadził pierwsze próby interpretacji wyników badań bez odpływu przy stałej objętości próbki iltu w terminach naprężeń efektywnych (Bjerrum, 1954). Po drugiej wojnie światowej następuje dynamiczny rozwój konstrukcji tego aparatu w wielu ośrodkach, w tym głównie w Imperial College i w Norweskim Instytucie Geotechnicznym. Jedną z pierwszych fundamentalnych prac z tego zakresu jest dzieło Bishopa i Henkela (1957, 1962). Ostatnie lata to dalsze udoskonalenia konstrukcyjne i dodatkowe możliwości wielu specjalistycznych badań umożliwiających równoczesne określanie współzależności naprężeń, odkształceń zmian objętościowych i ciśnień w porach. Są one prezentowane w setkach prac, w tym m.in. przez Andersena i Simonsa (1969), Berre (1982) i w najnowszych obszernych podręcznikach Heada (1983 i 1994).

W klasyfikacji sposobów badań wprowadzono podział na trzy klasy (Gryczmański, 1995):

- statyczne badania ściskania (badanie w edometrze, jednoosiowe ściskanie, dwuosiowe ściskanie, konwencjonalne ściskanie trójosiowe oraz prawdziwe badanie trójosiowe),
- statyczne badania ścinania (bezpośrednie ścinanie, proste ścinanie, skręcanie w aparacie pierścieniowym, ścinanie wewnątrz wydrążonego cylindra),
- badania dynamiczne (kolumny rezonansowe, aparaty z piezoceramicznymi transducerami).



### 7.3. Wybór metody badania

Szczegółowe charakterystyki typów i rodzajów badań w aparatach trójosiowych z odniesieniem do konkretnych rozwiązań zostały podane w wielu pracach (Bishop, Henkel, 1962; Bishop, Bjerrum, 1960; Head, 1986). W zależności od potrzeb podział badań dokonywany jest najczęściej ze względu na: zmianę naprężeń głównych, warunki odpływu wody z próbki i z uwzględnieniem zmian ciśnień w porach. W zakresie rozwiązywania zagadnień praktycznych z wymienionych wyżej możliwości najczęściej stosowane są badania przy ścisaniu osiowym metodami:

- bez konsolidacji i bez odpływu (UU),
- z konsolidacją, bez odpływu (CU),
- z konsolidacją, z odpływem (CD).

Na potrzeby analizy wytrzymałościowej nienasyconych lub suchych gruntów niespoistych właściwe jest badanie w warunkach bez odpływu i na ogół bez konsolidacji. Ścieśniające się w porach powietrze umożliwia szybkie i całkowite przejmowanie naprężeń wyłącznie przez cząstki gruntu przekazujące je w miejscach styków. Wówczas naprężenie całkowite  $\sigma$  równe jest naprężeniu efektywnemu. W celu wyeliminowania komplikującego zagadnienie wpływu wody w porach na przebieg procesu ścinania i na wartości kąta tarcia wewnętrznego ( $p. 3$ ) oraz na wartości spójności pozornej badania prowadzono na gruntach zupełnie suchych.

W zależności od rodzaju prowadzonych analiz badania w aparacie trójosiowego ścisania mogą być realizowane przy stałej i zmiennej średnicy próbki. W pierwszym przypadku, wraz ze wzrostem naprężenia  $\sigma_1$ , zwiększa się  $\sigma_3$  tak, aby średnica próbki nie uległa zmianie. Ten rodzaj badania ma duże znaczenie, np. przy szybkim ścinaniu gruntów nasyconych lub w badaniach współczynnika  $K_o$ . W tym przypadku przemieszczenie cząstek ogranicza rozszerzalność boczną, co wymusza zniszczenie wzajemnego zazębienia ziaren (Lambe, Whitman, 1977).

W drugim rodzaju badań, przy stałych i stosunkowo niskich naprężeniach  $\sigma_3$  w zagęszczonych gruntach, przyrost naprężenia  $\sigma_1$  powoduje w strefie ścicia wzrost objętości, co ułatwia przezwycięzenie zazębianego układu cząstek. Obejmuje on większość przypadków praktycznych, w których ze względu na relatywnie niskie naprężenia  $\sigma_3$  znaczące zmiany objętościowe w strefie ścicia są możliwe. Zastosowanie tej metody pozwala zatem zarówno na określenie wpływu kształtu cząstek na wartości parametrów wytrzymałości na ścinanie, jak i ocenę zmian objętościowych próbek w przedziale stosunkowo niskich wartości

naprężeń  $\sigma_3$ . Uwzględniając również i te uwarunkowania, badania prowadzono przy ciśnieniach wody w komorze  $\sigma_3 = 1, 10, 25, 50, 100$  i  $200$  kPa.

#### 7.4. Badania w aparacie trójosiowego ściskania

Zgodnie z założeniami programu pracy badania trójosiowego ściskania 4 pyłów piaszczystych wykonano pod kątem określenia wpływu struktury cząstek na kształtowanie się parametrów wytrzymałości na ścinanie. W celu dokonania pełnej analizy wpływu cech kształtu i powierzchni cząstek na kształtowanie się parametrów wytrzymałości na ścinanie badane serie próbek zagęszczono alternatywnie w dwóch wariantach - do jednakowej porowatości i do jednakowego stopnia zagęszczenia.

**Badania wytrzymałości na ścinanie próbek o jednakowej porowatości** w powszechnej ocenie wielu prac stanowią podstawowe uwarunkowanie jednakowego międzycząstkowego układu (Lee, Seed, 1967; Konrad, 1990). Wynika to z samej definicji wskaźnika porowatości, określającej to jako stosunek objętości porów do objętości szkieletu. Przy jednakowym wskaźniku „e” w próbce o określonej objętości jej część zajęta przez pory niezależnie od gęstości właściwej będzie taka sama. Jednakże ze zmianą kształtu cząstek zmienia się struktura porów. W omawiających te zagadnienia pracach (Oda 1977; Oda i in., 1980) przytaczających także zbliżone opinie innych autorów dowodzi się, że wskaźnik porowatości, którego zmienność bez wątpienia warunkuje współzależności wiążące się z deformacją gruntu, jest najbardziej znaczącym parametrem określającym właściwości materiałów ziarnistych. Jednakże w procesach deformacji uzyskanie docelowej porowatości współwarunkowane jest liczbą kontaktów międzycząstkowych (co – ordination number). Zależność ustalona w badaniach 29 prób kulek szklanych wykazała, że ze wzrostem wskaźnika „e” od 0,49 do 0,52 ilość kontaktów międzycząstkowych zmniejsza się z 9 do 6. W przypadku wzrostu nieregularności kształtów cząstek ilość kontaktów międzycząstkowych będzie odpowiednio mniejsza, co ma zarówno wpływ na zagęszczalność gruntów (p. 6, rys. 15), jak i na parametry wytrzymałości na ścinanie (p. 8.2.2).

**Badania wytrzymałości na ścinanie próbek o jednakowym stopniu zagęszczenia** określa porowatość wynikającą z zagęszczenia cząstek, obliczona z gęstości odniesionej relatywnie do ekstremalnych  $\rho_{d \max}$  i  $\rho_{d \min}$ , określonych do każdego z gruntów (tabl. 15).

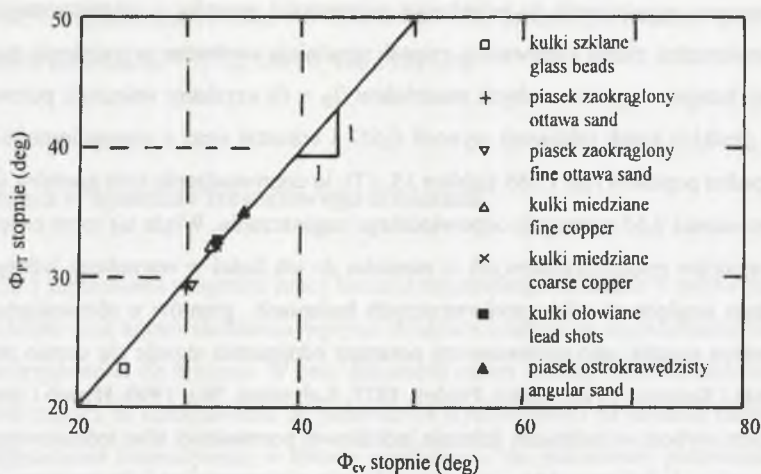
W procesie zagęszczania do jednakowej porowatości gruntów o zróżnicowanych kształtach i powierzchni ziaren nierówności cząstek utrudniają swobodne wypełnianie przestrzeni. Jeśli przy luźnym usypaniu suchych materiałów ( $I_D = 0$ ) uzyskany wskaźnik porowatości w badaniu gładkich kulek szklanych wynosił 0,657 i wzrastał wraz z nieregularnością cząstek (w przypadku popiołów) do 1,085 (tablice 15, 17), to doprowadzenie tych gruntów do wskaźnika porowatości 0,65 wymagało odpowiedniego zagęszczania. Wiąże się to ze zwiększaniem ilości kontaktów międzycząstkowych w stosunku do ich ilości w warunkach luźnego usypania. Z tego względu w wielu porównawczych badaniach gruntów o różnicujących je powierzchniach cząstek jako porównawczy parametr odniesienia stosuje się często stopień zagęszczenia (Koerner, 1970; Castro, Poulos, 1977; Kolymbus, Wu, 1990; Hyodo i inni, 1998).

Problem wyboru w badaniach ścinania jednakowej porowatości albo jednakowego stopnia zagęszczenia w świetle przedstawionego zagadnienia nie zawsze jest jednoznaczny, gdyż przy określonym wskaźniku porowatości w gruntach o nieregularnych kształtach cząstek ilość kontaktów międzycząstkowych jest mniejsza niż w przypadku kulek szklanych. Wpływa to na przekazywanie większych naprężeń w miejscach styków, czego wynikiem są większe współczynniki tarcia (Bora, 1984). Przyjmując, że w przypadku regularnych kulek szklanych o wskaźniku porowatości 0,65 ilość styków pojedynczej cząstki z sąsiadującymi wynosi 6, to przy nieregularnych cząstkach ilość ta powinna być mniejsza, gdyż częścią porowatości są przestrzenie istniejące pomiędzy obszarami występowania na powierzchni cząstek. Wprowadzenie w te miejsca mniejszych ziaren ze względu na zahaczanie nierówności powierzchni jest utrudnione.

Uwzględniając powyższe zależności w wariacie badań o jednakowym stopniu zagęszczenia, wykonano serie próbek każdego z materiałów w stanie luźnym. W tych warunkach uzyskuje się wytrzymałości na ścinanie odpowiadające w dużym przybliżeniu wytrzymałości krytycznej i wartości kątów tarcia wewnętrznego  $\Phi_{cv}$ . Jak wykazano w wielu pracach, a w tym Negussey i inni (1988), wartość kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_{cv}$  określa wartość wytrzymałości na ścinanie, przy której nie występują już zmiany objętościowe. Dokładne wartości tego parametru uzyskuje się w aparatach rotacyjnych, jednakże z dużym przybliżeniem można je określić także w badaniach trójosiowego ściskania na próbkach badanych w stanie luźnym, przy długiej drodze ścinania. Porównawcze wyniki badań z tego zakresu przedstawiono na rys. 16.

Warunkiem poprawnej realizacji badań było przyjęcie właściwej metody badania (p. 7.3), określenie wymaganych wymiarów próbki, dobór prędkości ścinania oraz odpowiednia interpretacja wyników. Wymiary próbek ściskanych trójosiowo określają kryteria wynikające





Rys.16. Zależność kąta tarcia wewnętrznego z badań trójosiowego ściskania i z aparatu pierścieniowego (wg Negussy'ego i innych, 1988)

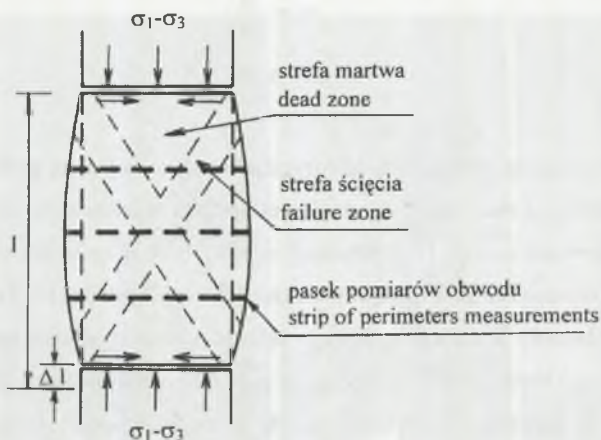
Fig. 16. Dependence of friction angle in triaxial tests versus constant volume friction angle in ring shear, (after Negussey and all, 1988)

z uwarunkowań wymiarów ziaren badanego gruntu w stosunku do najmniejszego wymiaru próbki. Przyjmuje się, że rozkład naprężeń w procesie ścinania próbek o niesmarowanych końcówkach nie zostanie zakłócony, jeśli stosunek średnicy próbki do wymiarów największego ziarna będzie większy od 4 - 5 (Head, 1986). Inni autorzy określają, że proporcja ta powinna wynosić co najmniej 6 (Berre, 1981). W niniejszych badaniach stosunek ten przy największym wymiarze cząstek 1 mm wynosi 38.

W procesie trójosiowego ściskania w płaszczyźnie kontaktu próbki z powierzchniami kamienia porowego występują duże naprężenia styczne uniemożliwiające poziome przemieszczanie się gruntu wzdłuż tej płaszczyzny (Bishop, Henkel, 1962; Sarsby i in., 1980; Head, 1986). Powoduje to, że w czasie procesu ściskania na obu końcach walcowej próbki powstają strefy sztywnych stożków o nachyleniach tworzących od  $45^\circ \div 65^\circ$  w stosunku do tej płaszczyzny (Head, 1986) (rys. 17).

Podczas badania należy wykluczyć możliwość zachodzenia się tych stref na siebie. Z tego względu przyjmuje się, że początkowa wysokość próbki winna wynosić od 1,8- do 2,2-krotności jej średnicy (Bishop, Henkel, 1962; Berre, 1981).





Rys.17. Strefy naprężeń i ścięcia próbki o niesmarowanych końcach w badaniu trójosiowego ściskania  
 Fig.17. Zones of stress and shear area of sample on antylubricated ends in triaxial compression test

Z występowaniem klinów związane jest rozszerzanie się środkowej strefy próbki i powstawanie zjawiska dylatacji. Zmiana charakteru tych deformacji możliwa jest poprzez stosowanie warstw smarowanych podkładek niwelujących wartość tarcia stykowego pomiędzy powierzchniami próbki a końcówkami przekazującymi na nią obciążenie, co umożliwiła badanie na próbkach o stosunku wysokości do średnicy 1:1 (Sarsby i in., 1980; Head, 1986). Użytkuje się ponadto większą jednorodność rozkładu naprężeń, a przy dużych odkształceniach wyższą wiarygodność wyników. Nie ma to jednak znaczącego wpływu na uzyskiwane wartości maksymalnych naprężeń (Head, 1986). Z tego względu zrezygnowano z tego trudnego sposobu badania próbek.

#### 7.4.1. Opis sposobu wykonywania próbek o jednakowej porowatości

Jak opisano we wcześniejszych rozdziałach, w wariacie badań stałej porowatości początkowej grunty przeznaczone do badań powinny być absolutnie suche, mieć takie samo uziarnienie, jednakowy wskaźnik porowatości międzycząstkowej, identyczne wymiary oraz powinny być badane w jednakowy sposób. Uwzględniając założony jednakowy wskaźnik porowatości każdego z gruntów  $e = 0,65$  przy przyjętej wysokości próbki  $h = 80$  mm i jej średnicy  $d = 38$  mm, na podstawie gęstości właściwej każdego z gruntów  $\rho_s$  (tabl. 6) obliczono gęstości objętościowe szkieletu ( $\rho_d$ ), a następnie masę ( $m$ ) potrzebną do wykonania próbki.

$$\rho_d = \frac{P}{e + 1} \quad (16)$$

$$m = \rho_d \cdot V_0 \quad (17)$$

Uzyskanie takiej samej porowatości międzycząstkowej w badanych gruntach wymagało zagęszczenia każdego z materiałów do określonej gęstości objętościowej szkieletu. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabl. 17. Zakładając zupełny brak wilgotności próbek, zastosowano procedurę ich wykonywania opisaną w pracach Bishopa i Henkela (1962) oraz Heada (1976). Na podstawie komory aparatu trójosiowego ułożono nasycony wodą kamień porowy, a prowadzący do niego kanał pomiaru ciśnienia w porach wypełniono wodą destylowaną. Na gumowy pierścień naciśnięty na występie podstawy nasunięto dolny koniec gumowej osłony próbki, a następnie oparto na nim dwudzielny metalowy cylinder zaciśnięty obejmą (rys. 18). Podstawę cylindra podparto tak, aby w procesie zagęszczania próbka nie ulegała przesunięciom. Od górnej krawędzi dwudzielnego cylindra odmierzone poziomo, do którego próbka o złożonej wysokości 80 mm powinna być wykonana.

Przeznaczony do zagęszczania materiał został uprzednio wysuszony w temperaturze 105°C, a następnie był przechowywany w ekssykatorze. Gwarantowało to usunięcie z powierzchni cząstek wody higroskopijnej (Neema i in., 1980). Przygotowany materiał wysypywano przez lejek, a następnie po ułożeniu na powierzchni próbki górnego kamienia porowego dociskano go wibrując jednocześnie grunt poprzez uderzenia metalowym prętem o ściany cylindra (Bishop, Henkel, 1962). Okresowo domierzono suwmiarką docelowo poziom wysokości próbki (rys. 18). Na zagęszczonej powierzchni ustawiono górną nasadkę i rozformowano cylinder dwudzielny. Ponownie sprawdzono długość próbki, a następnie na 3 poziomach jej obwodu umiejscowiono paski taśmy magnetofonowej, której stykające się zakończenia położono na papierowej podziałce. Opięto je następnie cienkimi paskami przezroczystej gumki o bardzo małej sile docisku. Umożliwiały one w czasie badania kontrolę zmian obwodów i przekroju poprzecznego (rys. 19). Sposób ten zaproponowany przez autora w pracy (Parylak 1979) pozwala odczytywać zmiany obwodu próbki z dokładnością rzędu 0,2 – 0,3 mm. Umożliwia to powiększenie skali milimetrowej, spowodowane krzywizną ścian pleksiglasowej komory napełnionej wodą, co stanowi rodzaj soczewki. Pomysł ten uzupełnia inne dotychczasowe metody pomiaru opisane w pracach (Wolski i in., 1978; Felix, 1982; Campanum de Carvalho i in., 1987).



*Rys.18. Zdjęcie sposobu zagęszczania próbki w cylindrze dwudzielnym mocowanym na podstawie komory aparatu trójosiowego*

*Fig. 18. Photo of sample compaction manner in divided cylinder installed on pedestal of celle triaxial apparatus*



*Rys.19. Zdjęcie próbki zagęszczonej w osłonce gumowej po rozformowaniu cylindra dwudzielnego*

*Fig.19. Photo of sample compacted in membrane rubber after divided cylinder remove*

Obliczenie masy badanych próbek badanych przy jednakowej porowatości początkowej  
Calculation of mass of tested samples tested on constant porosity

Rodzaj pyłu piaszczystego	$\rho_s$ ( $\rho_s$ )	e	$\rho_d$	W	V	M
Sort sand - silt mixture	t/m <sup>3</sup>	-	t/m <sup>3</sup>	%	cm <sup>3</sup>	G
Kulki szklane Glass ballotini	2,453	0,65	1,487	0	91,7	136,3
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	2,677	0,65	1,562	0	91,7	143,2
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	2,645	0,65	1,603	0	91,7	147,0
Popiół lotny Fly ash	(1,945) (tab. 6)	0,65	1,179	0	91,7	108,1

Po odnotowaniu wymiarów ponownie sprawdzono poprawność wykonania i zagęszczenia próby, a następnie po zmontowaniu komory umiejscowiono ją na podstawie aparatu trójosiowego.

#### 7.4.2. Sposób przygotowania próbek o stałym stopniu zagęszczenia

Jak wykazali Nagussey i inni (1988), w trójosiowych badaniach jednorodnie zagęszczonych próbek różnych piasków w stanie luźnym uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego odpowiadające kątom  $\Phi_{ev}$  otrzymanym w aparacie rotacyjnym (rys. 16). W wariacie badań o stałym stopniu zagęszczenia przedstawionym w p. 8.2 przyjęto założenie, że badane próbki zostaną uformowane w stanie luźnego usypania w sposób opisany w p. 7.4.1, a następnie będą poddane konsolidacji przy naprężeniu 100 kPa bez możliwości odprowadzenia nadciśnienia powietrza. Po zakończeniu tego procesu obliczone na podstawie zmian czujnika odkształceń próbki i zmian obwodów próbek wartości stopnia zagęszczenia zwiększyły się od zera do 0,02 – 0,05. Początkowe parametry przygotowanych próbek każdego z gruntów podano w tabl. 17. Uznano te stany za jednorodne i umożliwiające określenie wartości krytycznej kąta tarcia wewnętrznego.



Obliczenie masy badanych próbek o jednakowym stopniu zagęszczenia  
Calculation of mass of tested samples tested in this same relative density

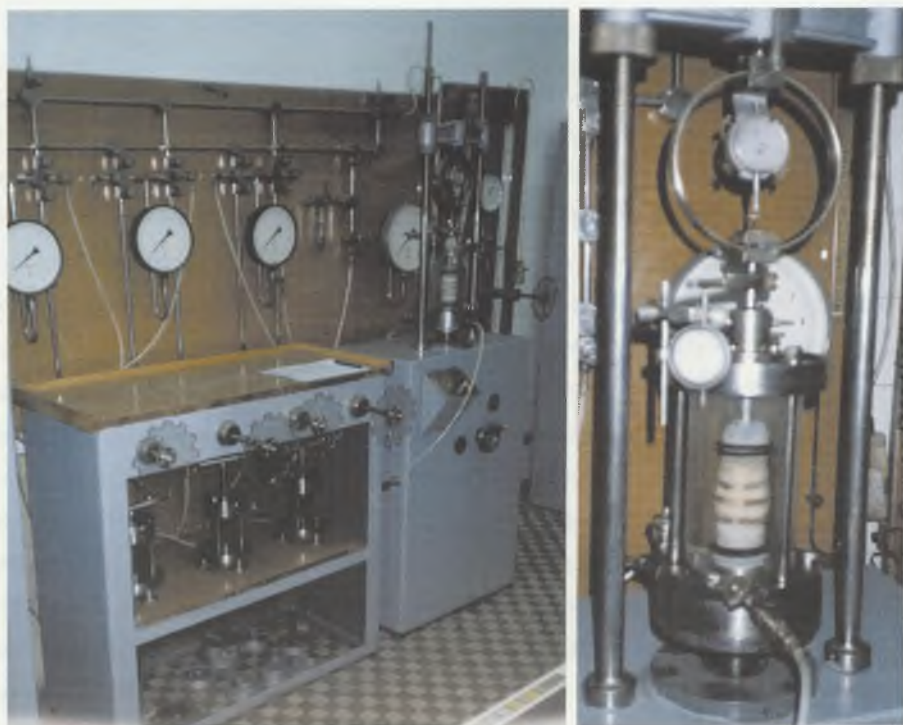
Rodzaj pyłu piaszczystego	$\rho_s$ ( $\rho_s$ )	$I_D$	e	$\rho_d$	w	V	M
Sort sand - silt mixture	t/m <sup>3</sup>	-		t/m <sup>3</sup>	%	cm <sup>3</sup>	G
Kulki szklane Glass ballotini	2,453	0	0657	1,485	0	91,7	136,2
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	2,677	0	0964	1,388	0	91,7	127,3
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	2,645	0	1,039	1,298	0	91,7	119,0
Popiół lotny Fly ash	(1,945) (tab. 6)	0	1,085	0,933	0	91,7	85,5

### 7.4.3. Opis sposobu przeprowadzenia badania

Badania każdego z materiałów wykonano w aparacie trójosiowego ściskania typu norweskiego (rys. 20) metodą: bez konsolidacji, bez odpływu, z pomiarem zmian ciśnienia powietrza w próbce. Sposób badania realizowano zgodnie z zasadami podanymi w licznej literaturze, w tym głównie (Bishopa i Henkela, 1962; Heada, 1986, 1994). Komorę aparatu trójosiowego ściskania podłączono do wyzerowanego układu pomiaru ciśnienia w porach z manometrem rtęciowym oraz do układu ciśnienia komorowego zapewniającego stałe wartości naprężeń  $\sigma_3$ . Czujnik pomiaru siły ustawiono na wartości zerowej, korygując każdorazowo ciężar lub siłę wyporu trzpienia oraz wyzerowano czujnik odkształceń. Szybkość przyrostu składowej dewiatora naprężeń w przypadku nienasyconych gruntów niespoistych ze względu na przebieg zjawiska procesu ścinania nie ma górnych ograniczeń. Przykładowo, Begerman i inni stosowali w piaskach prędkości nawet rzędu 60 mm/godz. Stwierdzono również, że zbyt długi czas badania powoduje postępującą konsolidację próbki. Z tego względu za racjonalną uznano prędkość przyrostu odkształceń pionowych 8 mm/godz., co umożliwiło prowadzenie starannej rejestracji wskazań czujników. Wszystkie badania przeprowadzono tylko w 2 tych samych komorach aparatu trójosiowego i przy wykorzystaniu tego samego układu regulacji ciśnienia komorowego, co umożliwiło eliminację ewentualnych błędów, jakie mogłyby wynikać z cech aparatu. Odczyty prowadzono co 0,5% odkształcenia rejestrując wartości siły z dokładnością do 2,61 kN. Wielkości zmian ciśnienia w porach odczytywano na manometrze

ręciowym z dokładnością do 1 kPa, a zmiany obwodów próbki z dokładnością do 0,2 mm. Każdy z gruntów poddano serii 6 badań przy naprężeniach  $\sigma_3 = 1, 10, 25, 50, 100$  i 200 kPa.

Badanie kontynuowano do zakresu odkształceń rzędu 8 - 10%. W procesie ścinania odnotowywano pojawienie się ukośnej płaszczyzny ścinania. Wówczas w obliczeniach naprężeń uwzględniono eliptyczny kształt powierzchni ścicia (Head, 1986). W badaniach nie wzięto pod uwagę korekty przyrostu naprężeń wynikającej ze sprężystości osłonki gumowej. Ich wartość przy grubości osłonki 0,2 mm i przy zwiększającym się odkształceniu do 10% wg Sandrini wzrasta od zera do 1,2 kPa (Head, 1986). Naprężenie to w stosunku do uzyskiwanych wytrzymałości nie było istotne. Ponadto wpływ ten był taki sam w porównywanych ze sobą badaniach poszczególnych serii. W przypadku próbek badanych przy zerowym ciśnieniu komorowym przyjmowano z tego względu naprężenie  $\sigma_3 = 1$  kPa. Wyniki rejestrowano i obliczano w sposób podany w tabl. 18.



Rys. 20. Badanie w aparacie trójosiowego ściskania  
Fig. 20. Test in triaxial apparatus

Badanie trojosiowego ściskania gruntu  
Triaxial compression test of soil

σ <sub>1</sub>	ε Δl/l	C/l	Wysokość próbki 80,0 mm		Powierzchnia A <sub>0</sub> = 11,30 cm <sup>2</sup>				Area A <sub>0</sub>				Data Date 10.12.1998 r.				
			Sample no		Sample length		Prędkość ścinania 8 mm/h		Rate of strain		V <sub>0</sub> = 90,48 cm <sup>3</sup>						
(kPa)	(%)	(mm)	Obwody (O) (mm)	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	ΔAV	ΔAV	ΔAV	ΔAV	ΔAV	ΔAV	U <sub>s</sub>	σ <sub>1</sub> - σ <sub>3</sub>	σ <sub>1</sub> / σ <sub>3</sub>	
		Δl	Perimeters (mm)	(ΣO/5)	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(cm <sup>2</sup> )	(mm)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	
			I	III	1-ε	-	-	-	-	-	-	(mm)	(kN)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	
10	0,00	0,00	119,0	119,5	119,5	11,30	11,30	0,00	0,00	0,648	0	0	0	0	10	10	1,0
10	0,25	0,20	119,3	119,8	119,7	11,34		+0,01	+0,23	0,648	5	130	12	-1	11	22	2,0
10	0,50	0,40	119,8	120,2	120,2	11,37		+0,25	+0,27	0,652	25	625	57	-2	12	68	5,6
10	1,00	0,80	120,1	120,3	120,2	11,40	11,41	-	+0,19	+0,21	36	9,40	82	-3	13	94	7,2
10	1,50	1,20	120,8	121,5	121,0	11,50		+0,14	+0,15	0,650	39	10,18	93	-3	13	105	8,0
10	2,00	1,60	121,5	122,0	121,0	11,55	11,53	-	+0,07	+0,07	46	12,06	104	-4	14	117	8,3
10	2,50	2,00	122,2	123,0	121,5	11,63		+0,23	+0,25	0,652	52	13,57	121	-5	15	136	9,0
10	3,00	2,40	122,5	124,0	121,7	11,69	11,70	-	+0,23	+0,26	55	14,35	123	-6	16	138	8,6
10	3,50	2,80	123,3	125,4	122,0	11,78		+0,46	+0,51	0,653	57	14,88	126	-7	17	142	8,3
10	4,00	3,20	123,8	126,0	122,1	11,83	11,77	-	+0,37	+0,41	65	15,40	130	-8	18	147	8,1
10	4,50	3,60	125,0	127,2	122,1	11,82		+0,58	+0,65	0,659	61	15,91	133	-8,5	18,5	151	8,2
10	5,00	4,00	125,5	128,1	122,2	11,98	11,89	-	+0,57	+0,63	61	15,91	133	-9	19	151	7,9
10	5,50	4,400	126,5	128,7	122,2	12,04		+0,54	+0,60	0,659	60	15,66	132	-10	19	152	8,0
10	6,00	4,80	127,0	129,9	122,3	12,11	12,02	-	+0,58	+0,65	58	15,13	129	-11	21	150	7,1
10	6,50	5,20	127,3	131,0	122,4	12,17		12,53	+0,55	+0,61	58	15,13	121	-11	21	142	6,8
10	7,00	5,60	127,8	131,9	122,5	12,23	12,15	-	12,84	+0,51	58	15,13	122	-11	21	143	6,8
10	7,50	6,00	128,4	132,3	122,6	12,28		13,14	+0,39	+0,43	57	14,88	122	-11	21	143	6,8
10	8,00	6,40	128,7	133,0	122,6	12,32	12,28	-	13,43	+0,19	56	14,62	111	-11	21	132	6,6
10	8,50	6,80	129,5	133,8	122,7	12,39		14,06	+0,21	+0,24	56	14,62	106	-12	22	128	5,8
10	9,00	7,20	130,1	134,5	122,8	12,44	12,41	-	14,35	-0,08	56	14,62	105	-12	22	127	5,7
10	9,50	7,60	131,0	135,4	122,8	12,48		14,70	+0,12	+0,14	56	14,62	105	-12	22	127	5,7

Uwagi: badany grunt to pyl piaszczysty z Głazami  
Comments: tested soil, sandy-silt mixture from Graniczna



W porównaniu ze sposobami prowadzenia rejestracji wyników badań podawanymi w literaturze (Head, 1986; Stępkowska, 1969) wprowadzono dodatkowo pomiar zmian obwodu próbki. Na tej podstawie obliczono zmieniającą się w czasie badania powierzchnię jej przekroju poprzecznego –  $A$ , wynikającą z pomiaru obwodów na końcach i w 1/3, 1/2 i 2/3 wysokości. Obliczano także powierzchnię przekroju –  $A_1$  przyjmowaną przy założeniu teoretycznego przyrostu jej deformacji (Bishop, Henkel, 1962; Head, 1986). Na podstawie rzeczywistej powierzchni –  $A$ , objętości początkowej –  $V_0$  i zmian długości –  $\Delta l$  obliczono zmieniające się w trakcie badania przyrosty objętości –  $\Sigma \Delta V$  oraz zmianę odkształcenia objętościowego –  $\Sigma \Delta V / V_0$ . Znając początkową masę próbki i gęstość właściwą badanego gruntu, obliczono ponadto zachodzące w czasie badania zmiany wskaźnika porowatości –  $e$ . Wartości siły wyznaczono mnożąc odczytaną ilość działek czujnika dynamometrycznego przez jednostkową siłę 2,61 kN. Obliczoną siłę –  $P$  dzielono przez powierzchnię –  $A$ , wyznaczając dewiator naprężeń ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ). Do niekonwencjonalnego elementu badania należy także pomiar zmian ciśnienia powietrza w porach próbki –  $u_a$  (Head, 1986). Uwzględniając jego ujemne wartości, obliczono naprężenia efektywne  $\sigma_1'$  i  $\sigma_3'$  oraz ich stosunek  $\sigma_1' / \sigma_3'$ . Wyniki badań przeanalizowano w p. 8.

## 7.5. Przyjęty sposób przedstawienia i interpretacji wyników badań

Wyniki badań wytrzymałości na ścinanie analizowano pod kątem oceny wpływu nieregularności kształtu cząstek na wartości naprężeń i odkształceń.

Stan graniczny w gruntach jest pojęciem umownym określającym taki stan naprężenia i odkształcenia, który początkuje niezdolność gruntu do przenoszenia dodatkowych obciążeń. Opisujące go warunki traktowane są jedynie jako hipotezy, gdyż najczęściej stanowią uogólnienie wyników badań uzyskanych przy ograniczonej liczbie przypadków wytrzymałościowych. Wybór odpowiedniej hipotezy w celu interpretacji badań wytrzymałości na ścinanie, jako funkcji naprężeń głównych, był i jest przedmiotem wielu dociekań (Kirpartrick, 1957; Bishop, 1966; Green, Bishop, 1966; Griffith, 1990; Gryczmański, 1995). Można je ogólnie podzielić na analizy opisujące statyczne i dynamiczne warunki badania. Warunki statyczne analizowane przez teorie klasyczne dotyczą przypadków, kiedy stan graniczny gruntu nie zależy od przyrostu naprężeń niszczących. Do tej grupy należą m.in. hipotezy Mohra, Tresca i Misesa. Dynamiczne warunki badania formułowane są natomiast dla materiałów o właści-



wościach, w których zniszczenie zależy od prędkości przyrostu naprężeń (Kisiel i inni, 1982; Suchnicka, 1997). Trudności w doborze odpowiedniej teorii wynikają z braku ścisłej definicji zniszczenia, ponieważ stanem tym można określić zarówno niesprężyste zachowanie się gruntu, jak też jego rzeczywiste pęknięcie. Problemy te dotyczą wielu innych materiałów, jak np. beton czy stal, jednakże w przypadku gruntów, ze względu na duże zróżnicowanie ich właściwości, trudności te są znacznie większe.

Od wielu lat powszechnie stosowana w mechanice gruntów jest mająca wiele ograniczeń teoria Mohra. Nie uwzględnia się w niej pośredniego naprężenia głównego  $\sigma_2$ , pomija się zależności pomiędzy naprężeniem a odkształceniem i stałe materiałowe. Nie bierze ona również pod uwagę zależności pomiędzy wytrzymałościami na ściskanie i rozciąganie. Występuje także niezgodność położenia zdefiniowanej w niej płaszczyzny ścięcia z rzeczywistą płaszczyzną, w której w procesie ścinania występuje koncentracja sił. W piaskach różnica pochylenia tych dwóch płaszczyzn jest niewielka i w większości przypadków bywa pomijana (Griffiths, 1990; Green, Bishop, 1969). Dopóki teoria Mohra nie została w pełni potwierdzona przez doświadczenia, stosowano także inne hipotezy, jak rozszerzoną teorię Misesa zależną od trzech zmieniających się naprężeń głównych, warunek Misesa-Schleichera ograniczający wartość naprężeń rozciągających, bądź też warunek maksymalnego naprężenia stycznego Tresca. Nie znalazły one jednak szerszego zastosowania w interpretacjach zagadnień mechaniki gruntów (Stilger-Szydło, 1993). Przegląd hipotez wytrzymałościowych stosowanych w mechanice technicznej, a także ocenę ich przydatności do rozwiązania konkretnych zagadnień przedstawiono w wielu pracach (m.in. Kisiel i inni, 1969; Izbiński, Mróz, 1976; Derski i inni, 1982; Gryczmański, 1995).

W typowych badaniach trójosiowego ściskania teoria Mohra w wystarczającym stopniu opisuje warunki zniszczenia, a do zastosowań praktycznych stanowi wystarczające przybliżenie oceny rzeczywistych właściwości gruntów (Newmark, 1960; Griffiths, 1990). Określa ją zależność:

$$\tau_f = f(\sigma_f) \quad (18)$$

W przypadku gruntów niespoistych badanych w szerokim zakresie naprężeń bocznych jest ona linią zakrzywioną (Lambe, Whitman 1977; Bishop 1966), a w przypadku wysokich zagęszczeń przy dużych naprężeniach bocznych opisuje ją równanie paraboli (Izbiński, Mróz, 1976).

Na potrzeby analiz stateczności mas ziemnych najczęściej przyjmowana jest zależność liniowa, stąd często wytrzymałość na ścinanie wyrażona jest jako kryterium Mohra-Coulomba w postaci

$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (19)$$

gdzie:  $c$  - spójność lub rzędna spójności,

$\varphi$  - kąt tarcia wewnętrznego lub kąta oporu przy ścinaniu.

W przypadku gdy przy zwiększeniu naprężenia  $\sigma_1$  graniczne koło Mohra staje się styczne do prostej Coulomba, pewien odcinek obwiedni Mohra w stanie granicznym spełnia równanie warunku Coulomba. W większości przypadków kształt obwiedni otrzymanej dla wielu gruntów niespoistych nie jest linią prostą, a wielkość krzywizny wzrasta wraz z zagęszczeniem gruntu (Bishop, 1966; Lambe, Whitman, 1977). Z tego powodu krzywizna obwiedni wymaga wyznaczenia oporu kąta tarcia i odciętej wartości spójności albo przedstawienia jego zróżnicowania w zależności od naprężeń bocznych. Zagadnienia te były analizowane w licznych pracach, m.in. (Berezantzew, 1967; Bishop, 1966; Blight, 1976; Bora, 1984; Maksimowicz, 1989). Wielkość tej krzywizny jest szczególnie wyraźna przy niskich wartościach składowej naprężeń normalnych w zakresie od 0 do 100 kPa (Berezantzew, 1967). Jaroszenko (Blight, 1976) proponuje wyrażenie tej zależności równaniem:

$$\tau = (k \cdot \sigma)^{1/n}, \quad (20)$$

gdzie  $k$  i  $n$  są stałymi obwiedni Mohra.

Inną propozycję określania uśrednionej wartości kąta tarcia przy krzywoliniowej obwiedni wykorzystaną w interpretacji wyników niniejszej pracy przedstawił Maksimowicz (1989) (p. 8.1.4). Fizyczny sens zjawiska dużej krzywizny obwiedni Mohra przy niskich naprężeniach omówiono w p. 8.1.2. Wzrostowi porowatości w strefie ścięcia wynikającemu głównie z potoczystego przemieszczania się ziaren towarzyszy tarcie posuwiste. Składają się na nie deformacje sprężyste do czasu, gdy siły kontaktowe nie przekroczą granicznej wartości oporu poślizgu. Kiedy wartość ta zostanie przekroczona, następują przemieszczenia plastyczne (Chang, 1985; Lambe, Witham, 1977).

Umożliwienie ruchu cząstek wymaga zmian objętości w strefie ścięcia. Zjawisku temu, zwanemu dylatacją, towarzyszą duże wartości stosunku naprężeń  $\sigma_1/\sigma_3$  i zakrzywienie obwiedni Mohra. Przy naprężeniach  $\sigma_3$  większych od 400 kPa w zagęszczonych gruntach naci-

ski w kontaktach ziaren przekraczają wytrzymałość kwarcu, a proces przemieszczania jest wynikiem kruszenia cząstek (Lee, Seed, 1967). Obserwowane w procesach ścinania wzrosty objętości są następstwem rozwoju zjawiska dylatacji, a spadki zmian objętości do wartości ujemnych są efektem zjawiska kruszenia ziaren. Dynamikę rozwoju przyrostu dylatacji określa się na ogół przyrostem zmian objętościowych w stosunku do odkształceń osiowych próbki (Harden, 1989). Przy niskich naprężeniach  $\sigma_3$ , gdzie próbka po początkowym dogęszczeniu wyraźnie zwiększa swoją objętość, udział składowej wytrzymałości wynikającej z rozrzedzania układu cząstek jest duży. Przy dużych przemieszczeniach wartość ta spada do zera. W przypadku wysokich naprężeń  $\sigma_3$ , gdy w czasie ścinania próbka ulega dogęszczeniu, wartość dylatacji jest ujemna, a przemieszczaniu ziaren towarzyszy zjawisko kruszenia.

W przypadku cząstek o bardzo nieregularnych kształtach i szorstkich powierzchniach proces ten dodatkowo komplikuje postępujące zazębianie się nierówności, co częściowo powoduje dalszy rozwój dylatacji, a częściowo zniszczenie tych zazębien (Rothenburg i inni, 1989). Pojawiające się tu kruszenie ziaren w zakresie naprężeń normalnych mniejszych od 100 kPa jest nieznaczne (Vesić, Clough, 1968). Dokładne poznanie współistnienia tych zjawisk jest trudne, gdyż przykładowo w 1 cm<sup>3</sup> piasku drobnego liczba styków pomiędzy ziarnami sięga 5 000 000, a początkowa powierzchnia tych kontaktów stanowi zaledwie 0,03 % powierzchni przekroju poprzecznego próbki (Lambe, Whitman, 1977). Powoduje to bardzo duże naprężenia w miejscach styków. Przykładowo, w wyniku przyłożenia do powierzchni gruntu nacisku 0,4 MPa powstają w miejscach kontaktów naprężenia rzędu 13,3 MPa, co przekracza wytrzymałość na ściskanie wielu odmian kwarcu.



## 8. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ WYTRZYMAŁOŚCI NA ŚCINANIE

### 8.1. Badania przy jednakowym wskaźniku porowatości

#### 8.1.1. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na przebieg procesu ścinania próbek o jednakowej porowatości początkowej

Zastosowana metoda badania przy stałym naprężeniu  $\sigma_3$  i wzrastającym naprężeniu  $\sigma_1$  powoduje zmiany objętościowe próbek. W średnio zagęszczonych niespoistych gruntach w czasie badania początkowo następuje niewielkie dogęszczanie, a następnie wzrost objętości rozpoczyna w wytwarzającej się strefie ścicia rozwój dylatacji. Jest ona wynikiem procesu oddalania się cząstek powodowanym głównie mechanizmami tarcia potoczystego i poślizgowego przy częściowym kruszeniu nierówności ich powierzchni (Seed, Lee, 1967; Lambe, Witham, 1977) (p. 7.5). Wielkości tych zmian zależą od zagęszczenia gruntu. Przy maksymalnym zagęszczeniu odpowiadającym  $e_{min}$  te dodatkowe przyrosty oporów ścinania wywołane są głównie zjawiskiem dylatacji, a przy porowatości krytycznej i mniejszej dylatacja nie występuje.

W niniejszych badaniach oceniano wpływ struktury cząstek na przebieg zmian objętościowych próbek o jednakowej porowatości i na wartości maksymalnych naprężeń. Zagadnienia te zilustrowano i przeanalizowano na przykładzie porównania wyników badań otrzymanych przy niskich i wyższych naprężeniach  $\sigma_3 = 10$  i  $50$  kPa. Przy naprężeniu  $\sigma_3 = 10$  kPa różnice wartości maksymalnych dewiatorów naprężeń ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) pomiędzy badanymi gruntami są duże (rys. 21). W badaniu kulek szklanych brak wyraźnego maksimum wytrzymałości dowodzi, że początkowa porowatość ( $e = 0,65$ ) jest na pograniczu porowatości krytycznej tego materiału. W przypadku pyłów piaszczystych z Krakowian i z Granicznej porowatości te były mniejsze od wartości porowatości krytycznych tych gruntów, gdyż wyraźne ekstrema naprężeń wystąpiły przy odkształceniach rzędu 6% i 5%. Przy tej samej porowatości w badaniu popiołu maksimum wytrzymałości na ścinanie wystąpiło już przy  $\epsilon = 2,5\%$ , a różnica naprężeń spowodowana zjawiskiem dylatacji dwukrotnie przewyższała wartość wytrzymałości



rezydualnej, która, jak wiadomo, jest wynikiem głównie poślizgowego tarcia cząstek. Ze zmianami tymi korespondują pomiary ciśnienia powietrza w porach. W badaniach kulek szklanych ciśnienia powietrza porowego nie wykazywały zauważalnych zmian, utrzymując się na poziomie wartości zerowej (rys. 21b). W przypadku pyłów piaszczystych z Krakowian niezmiennie wartości ciśnień utrzymały się aż do  $\epsilon = 2,5\%$ , a przy dalszych odkształceniach sukcesywnie spadały stabilizując się po odkształceniach próbek rzędu 7% na poziomie – 6 kPa i – 8 kPa. Największe wzrosty podciśnienia uzyskano w badaniu pyłu piaszczystego z Granicznej, gdzie w przedziale  $\epsilon = 1 + 6\%$  nastąpił spadek ciśnienia w porach o 12 kPa, po czym utrzymywało się ono na stałym poziomie.

Otrzymane zależności przebiegiem odbiegały nieco od współzależności uzyskiwanych w trójosiowych badaniach piasków, w których najczęściej po początkowym dogęszczeniu następował wzrost objętości próbki (Bishop, 1966; Herdan, 1986; Homand – Etienne, 1989). Zmiany objętości mierzono przez pomiar objętości wody wypływającej z próbki lub przez pomiar wody wypływającej z komory (Bishop, Henkel 1962; Head 1986). Zastosowane w pracy pomiary zmian objętości mierzonych w 3 przekrojach metodą pasków (p. 7.4.2) były mniej dokładne, gdyż przyjęto, że końcowe przekroje próbek nie rozszerzają się. Na ogół początkowo występowały przyrosty objętości próbek, które po osiągnięciu maksymalnego dewiatora naprężenia ulegały stabilizacji, a następnie spadkowi.

Przebieg wzrostu objętości w badaniach poszczególnych gruntów był różny (rys. 21c). Po wystąpieniu strefy ścicia aż do końca badania we wszystkich gruntach rejestrowano pewne spadki objętości, co na tym etapie ścinania powodowane było bardziej efektem geometrycznego przemieszczania się oddzielonych strefą ścicia dwóch części próbek niż zmianami gęstości. Przy wyższych naprężeniach bocznych  $\sigma_3 = 50$  kPa oddziaływanie zmian nieregularności kształtów cząstek na przebieg procesu ścinania okazał się nieco inny (rys. 22). Maksymalne różnice naprężeń ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) wystąpiły przy odkształceniach wyższych o 0,5% niż w przypadku  $\sigma_3 = 10$  kPa. Odmienne zmieniały się także ciśnienia powietrza porowego. W początkowym stadium badania od 0,5 do 1,5% rejestrowano jego wzrost, po czym w badaniach pyłów z Krakowian i Granicznej następowały spadki aż do wartości rzędu – 10 kPa. W badaniu popiołu i kulek szklanych spadek ten był szybszy i trwał aż do zaniknięcia zjawiska dylatacji (rys. 22b). Zmiany te pokrywały się z wynikami pomiarów zmian objętości próbek. W zakresie odkształceń od zera do  $\epsilon = 2\%$  po krótkotrwałym początkowym wzroście objętości (w przedziale odkształceń do 1,5 %) w przypadku popiołu i 2.5 % w przypadku gruntu z Krakowian obserwowano dogęszczanie próbek aż do zapoczątkowania zjawiska

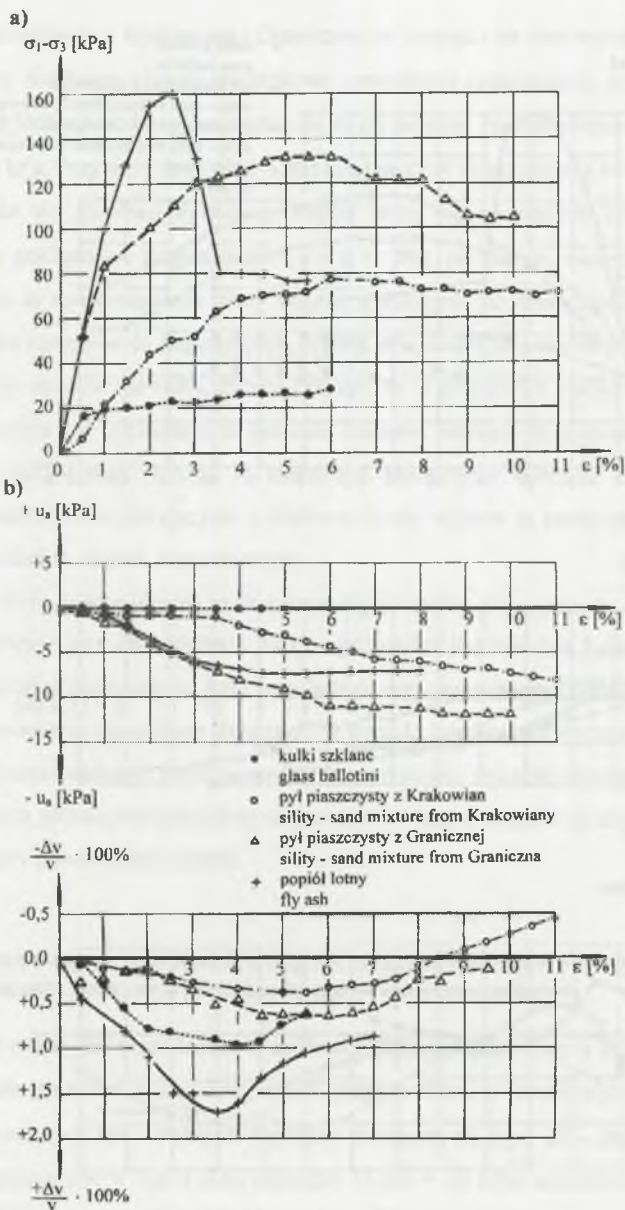
dylatacji. Po nim obserwowano wzrost objętości aż do wystąpienia strefy ścięcia (rys. 22c). Następnie przyrastające naprężenia  $\sigma_1$  powodowały rozwój zjawiska dylatacji zanikającego przy  $\varepsilon = 4\%$  w popiele,  $8\%$  w pyłe z Krakowian i  $10\%$  w pyłe z Granicznej.

Po pojawieniu się strefy ścięcia, w której nastąpiło oddalenie się cząstek, w dalszym etapie badania dominowało tarcie poślizgowe. Obserwowane przy tym zmniejszanie się objętości próbki było wynikiem ponownego jej dogęszczania. Proces dogęszczania po krótkotrwałej dylatacji rejestrowano także w badaniu kulek szklanych. Można przypuszczać, że niższe opory tarcia potoczystego okrągłych cząstek i brak zazębień powodowały, że przy tych naprężeniach  $\sigma_3$  w procesie ścinania wystąpiły zmiany sprzyjające dogęszczaniu się kulek. Zjawisko to dodatkowo obrazowało się wielokrotnymi gwałtownymi spadkami wytrzymałości do określonej wartości, po czym postępowała mobilizacja oporów aż do powrotu do wytrzymałości poprzedniej. Omawiający podobne zjawisko Skinner (1969) i Ovando-Shelley (1989) wyjaśniają, że z wpływem odkształceń w procesie ścinania wytwarzają się zgrupowania układów kulistych cząstek, na granicach których początkowo następuje gwałtowne przemieszczenie tych zgrupowań. W przypadkach kontaktów okrągłych i gładkich powierzchni kulek w chwili utraty wytrzymałości następuje zjawisko lepko-poślizgowych przemieszczeń wytworzonych układów ziaren. W przypadku gruntów o nieregularnych powierzchniach ziaren zahaczanie się nierówności cząstek uniemożliwiała podobnie gwałtowne spadki wytrzymałości.

W badaniach przy jeszcze wyższych naprężeniach ( $\sigma_3 = 100$  kPa) zmiany omówione dla niższych naprężeń były większe. Etapy początkowego dogęszczania próbek trwały od  $\varepsilon = 2\%$  w przypadku popiołu do  $3,5\%$  w ścinaniu pyłu z Krakowian i kulek szklanych. Dowodzą tego zarówno pomiary zmian objętości próbek, jak również zmiany ciśnienia powietrza w porach (rys. 22). Tendencje te znajdują potwierdzenie w badaniach Vesića i Clougha (1969), w których przy zmienności naprężeń  $\sigma_3$  od  $1$  MPa do  $35$  MPa następował zupełnie odmienny przebieg zmian objętościowych.

Analizując na tle tych porównań zachowanie się poszczególnych gruntów, można wnioskować, że:

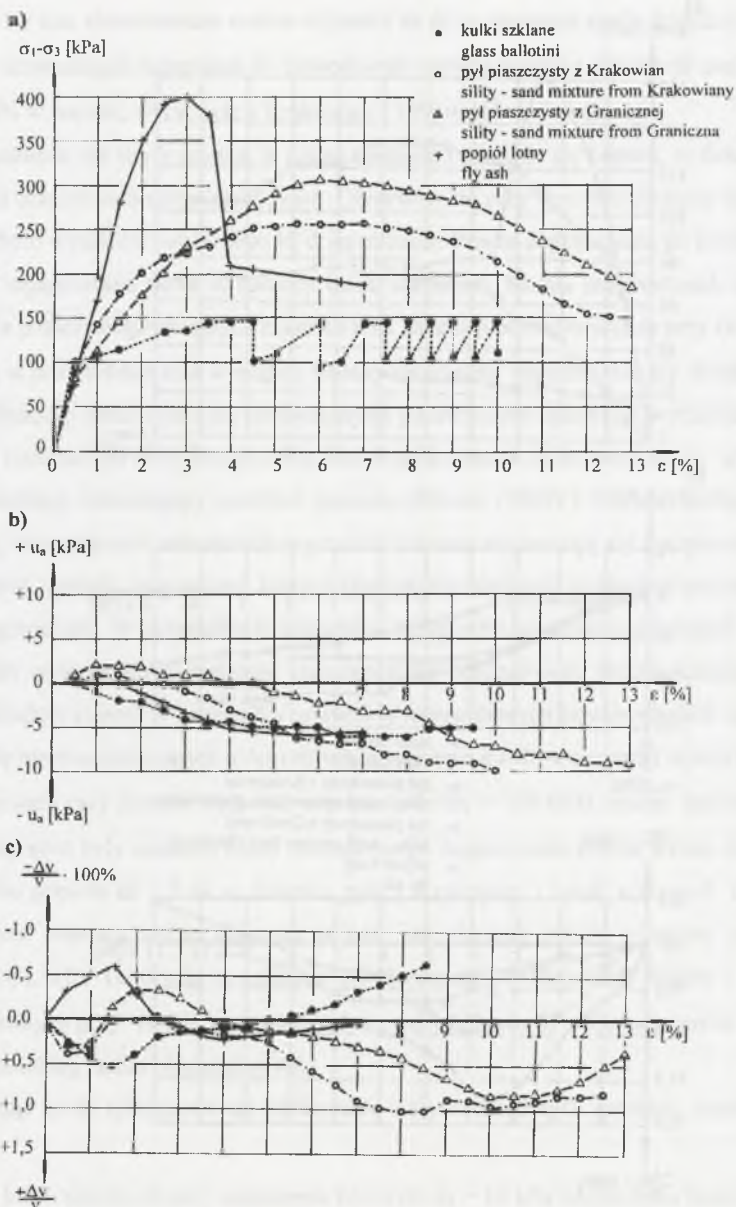
- próbki kulek szklanych przy naprężeniu bocznym  $\sigma_3 = 10$  kPa od początku badania aż do  $\varepsilon = 4\%$  ulegały ciągłemu rozluźnianiu. Naprężenie  $\sigma_3 = 50$  kPa umożliwiało rozluźnienie tylko w początkowym okresie, po czym w dalszym etapie zmniejszenie objętości postępowało aż do końca badania. Przy naprężeniu  $100$  kPa i  $200$  kPa próbki początkowo ulegały dogęszczaniu, a niewielkie wzrosty objętości wystąpiły dopiero w przedziale odkształceń  $\varepsilon = 3\% - 5\%$ ,



Rys.21. Zależność zmienności dewiatorów naprężenia, ciśnienia powietrza w porach i objętości próbek o jednakowej porowatości początkowej od ich odkształceń osiowych w badaniach trójosiowego ściskania przy  $\sigma_3 = 10$  kPa

Fig. 21. Dependence of changing of stress deviators, air pore pressure and volumes of samples in the same initial porosity from their axial displacement in triaxial compression tests in  $\sigma_3 = 10$  kPa





Rys.22. Zależność zmienności dewiatorów naprężeń, ciśnień powietrza w porach i objętości próbek o jednakowej porowatości początkowej od odkształceń osiowych próbki w badaniach trójosiowego ściskania przy  $\sigma_3 = 50$  kPa

Fig. 22. Dependence of changing of stress deviators, air pore pressure and volumes of samples in the same initial porosity from axial displacement in triaxial compression tests in  $\sigma_3 = 50$  kPa



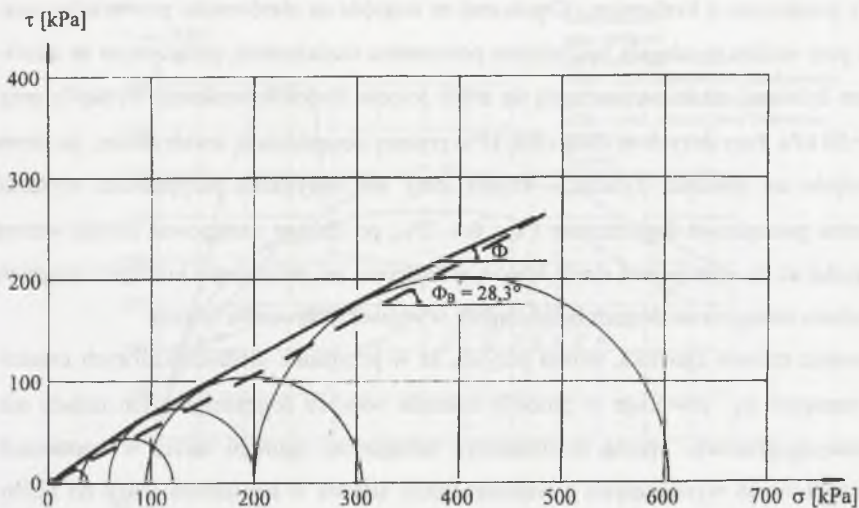
- pyły piaszczyste z Krakowian i Granicznej ze względu na nierówności powierzchni cząstek przy niskim  $\sigma_3$  ulegały początkowo powolnemu rozluźnianiu, połączonym ze zjawiskiem dylatacji aż do wytworzenia się strefy ścięcia. Podobne tendencje wystąpiły przy  $\sigma_3 = 50$  kPa. Przy dużych  $\sigma_3$  (100 ÷ 200 kPa) procesy dogęszczania trwały dłużej, po czym rozwijało się zjawisko dylatacji. Popiół lotny we wszystkich przypadkach wykazał znaczne początkowe dogęszczenie ( $\epsilon = 0 \div 2\%$ ), po którym następował szybki wzrost objętości aż do wystąpienia strefy ścięcia, a następnie po zniszczeniu kruchych zążeń ponownie następowało dogęszczanie cząstek w wytworzonej strefie ścięcia.

Oceniając opisane zjawiska, można przyjąć, że w przypadku gładkich kulistych cząstek wzrost naprężeń  $\sigma_3$  powoduje w procesie ścinania większe dogęszczenie ich układu niż w pozostałych gruntach. Można to tłumaczyć mniejszymi oporami tarcia w kontaktach międzycząstkowych wynikającymi z większej liczby styków w kontaktach kulek od liczby styków w układzie cząstek niekształtnych.

Cząstki nieregularne ulegają mniejszemu dogęszczeniu, przy czym do zaistnienia zjawiska ścięcia konieczne jest ich oddalenie. W tym przypadku jest ono tym bardziej trudniejsze, im ziarna są bardziej nieregularne. Stąd przy jednakowej porowatości początkowej zmiany objętościowe wywołane zjawiskiem dylatacji w popiele są znacznie wyższe niż w pozostałych gruntach. Przeprowadzone analizy uzyskanych wyników wskazały również, że porowatości krytyczne tych jednakowo uziarnionych gruntów w dużym stopniu są uzależnione od kształtów i struktury powierzchni cząstek.

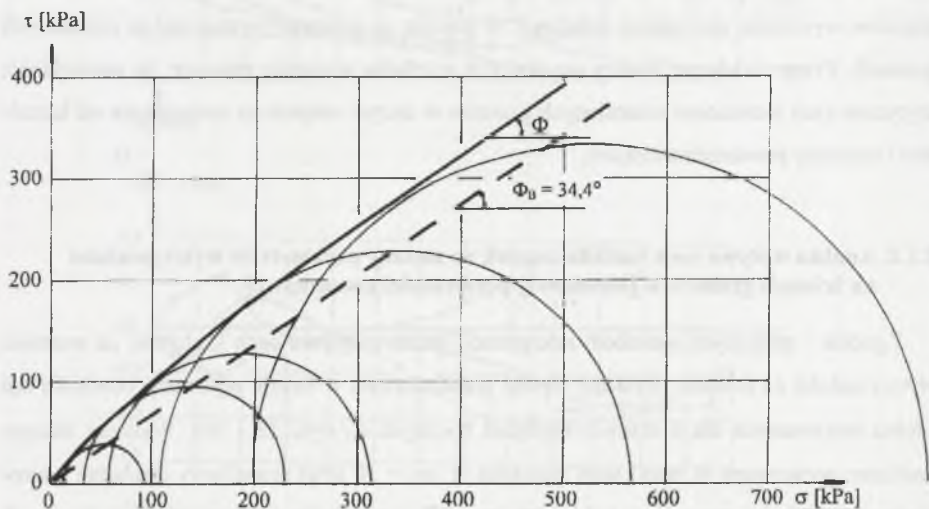
### **8.1.2. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na zmiany parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntów o jednakowej porowatości początkowej**

Zgodnie z przyjętym sposobem interpretacji badań wpływu cech kształtów na wartości wytrzymałości na ścinanie uzyskane wyniki przedstawiono w formie wykresów obwiedni kół Mohra otrzymanych dla 6 różnych naprężeń bocznych  $\sigma_3$  (rys. 23 - 26). Wykresy służące analizom opracowane w małej skali naprężeń (1 cm = 10 kPa) umożliwiły dokładne poprowadzenie obwiedni stycznej do kół Mohra (rys. 27), a następnie wyznaczenie linii stycznych do tej obwiedni dla przyjętych składowych naprężeń normalnych 1, 10, 50, 100 i 300 kPa (Bishop, Henkel, 1962; Lambe, Whitman, 1977). Wyznaczane w ten sposób wytrzymałości na ścinanie i wartości kąta tarcia podano w tabelach 19 i 20. Wyniki przeanalizowano w kilku zakresach naprężeń, w tym przy niemal zerowych naprężeniach normalnych. Ponieważ linie styczne do obwiedni Mohra odcinają na osiach  $\tau$  nierzeczywiste, duże wartości spójności, to



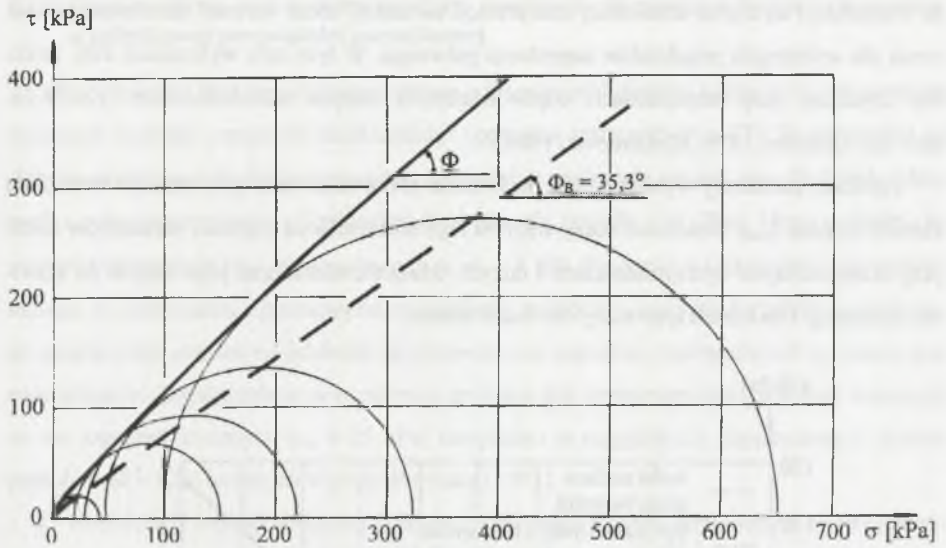
Rys.23. Wykres obwiedni kół Mohra z badań trójosiowego ściskania kulek szklanych o jednakowej porowatości początkowej próbek

Fig. 23. Graph of circles Mohr's envelope samples of glass ballotini in the same initial porosity from compression triaxial tests



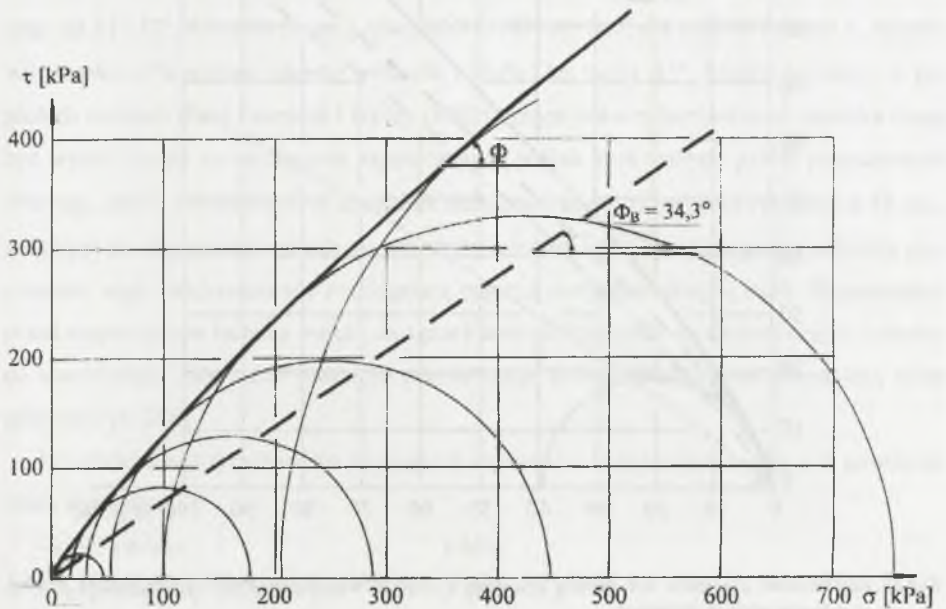
Rys.24. Wykres obwiedni kół Mohra z badań trójosiowego ściskania próbek pyłu piaszczystego z Krakowian o jednakowej porowatości początkowej próbek

Fig. 24. Graph of circles Mohr's envelope samples in the same initial porosity from compression triaxial tests of sand-silt mixture from Krakowian



Rys.25. Wykres obwiedni kół Mohra z badań trójosiowego ściskania próbek pyłu piaszczystego z Granicznej o jednakowej porowatości początkowej próbek

Fig.25. Graph of circles Mohr's envelope received from compression triaxial tests of samples in the same initial porosity of sandy-silt mixture from Graniczna

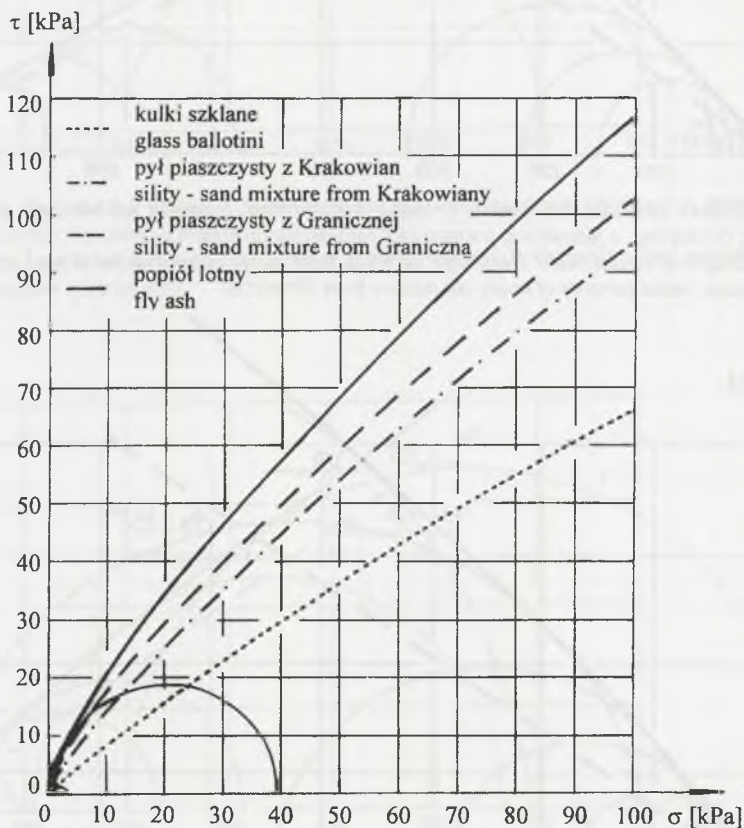


Rys.26. Wykres obwiedni kół Mohra z badań trójosiowego ściskania próbek popiołu lotnego jednakowej porowatości początkowej próbek

Fig. 26. Graph of circles Mohr's envelope received from compression triaxial tests of fly ash samples in the same initial porosity

do weryfikacji tej często stosowanej interpretacji określano także wartości uśrednionego kąta tarcia dla wybranych przedziałów naprężenia głównego. W tym celu wykreślono kąty tarcia  $\Phi_B$  uzyskane przy naprężeniach odpowiadających dużym odkształceniom (rys.23-26, tabl. 20), (Hansen, 1979; Maksimovic, 1989).

Uzyskane parametry wytrzymałości na ścinanie przeanalizowano jako funkcje wskaźnika kształtu cząstek  $\zeta_{ocell}$ . Dokonano oceny wpływu tego wskaźnika na wartości parametrów tarcia przy maksymalnych wytrzymałościach i dużych odkształceniach oraz jego wpływ na zjawisko dylatacji i na kształt krzywej obwiedni Mohra.



Rys.27. Zestawienie obwiedni kół Mohra gruntów o jednakowej porowatości początkowej próbek w zakresie niskich naprężeń

Fig.27. Comparison of Mohr's envelopes for tested soils in low range stresses, tested in the same initial porosity



### 8.1.3. Ocena wpływu cech kształtu na efekty zążeńbienia się cząstek w badaniach gruntów o jednakowej porowatości początkowej

Obwiednie kół Mohra pyłu piaszczystego z Granicznej i popiołu odcinają na osi naprężeń stycznych wartości „spójności strukturalnej” (cohesion intercept) (rys. 27). W zależności od stopnia zróżnicowania struktury cząstek spójności te zmieniają się od zera dla kulek szklanych i pyłu piaszczystego z Krakowian do 4 kPa dla popiołu (rys. 29a). Duże wartości de-wiatorów naprężenia ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) uzyskane przy  $\sigma_3 = 1$  kPa dla gruntu z Granicznej i dla popiołu lotnego, w porównaniu z pozostałymi materiałami, świadczą o wpływie kształtów i nierówności powierzchni cząstek na zdolność do przenoszenia naprężeń rozciągających w czasie procesu ścinania. Zagadnienie to w mechanice gruntów jest kontrowersyjne. Wartości odciętych na osi naprężeń stycznych ( $c_z = 15$  kPa) otrzymano w przypadkach zagęszczonych próbek popiołu o  $S_r = 0,80$  badanych w pracy Parylaka (1992).

O wartościach rzędnej spójności gruntów ostrokrawędzistych otrzymanych w swoich badaniach ścinania informuje Bora (1984). Homand – Etienne i inni (1989) uzyskali w badaniach trójosiowego ściskania gruboziarnistych gruntów o agregatowej strukturze cząstek zaskakująco wysokie rzędne spójności strukturalnej rzędu 45 kPa i duże kąty tarcia wewnętrznego od  $51^\circ$ - $53^\circ$ . Również Poran i Ahtchi-Ali (1989) uzyskali dla popiołu lotnego o stopniu wilgotności 67% wartość odciętej spójności 65 kPa i kąt tarcia  $43^\circ$ . Rzędne spójności w popiołach uzyskali także Leonards i Bailey (1982). Innym potwierdzeniem tego zjawiska mogą być wyniki badań na rozciąganie zagęszczonych próbek tych samych pyłów piaszczystych (Parylak, 2000). Wykonano je w specjalnie skonstruowanym w tym celu cylindrze  $\phi$  38 mm, w którym po zagęszczeniu gruntu do wskaźnika  $e = 0,65$  i zamocowaniu go w podstawie precyzyjnej wagi zwiększano siłę rozciągającą poprzez dociążanie drugiej szali. Bezpośrednio przed rozpoczęciem badania wyjęto dwa pierścieniowe fragmenty środkowej części cylindra, co umożliwiało rozerwanie przekroju poprzecznego próbki niezakłócone obecnością ścian cylindra (rys. 28).

Uśredniane wytrzymałości na rozciąganie uzyskane z badań wykonanych w 5 powtórzeniach wyniosły:

- |                                |   |           |
|--------------------------------|---|-----------|
| - kulki szklane                | - | 0 kPa,    |
| - pył piaszczysty z Krakowian  | - | 3 kPa,    |
| - pył piaszczysty z Granicznej | - | 6,7 kPa,  |
| - popiół lotny                 | - | 11,1 kPa. |

Wobec braku pełnej weryfikacji tego sposobu badania uzyskane wartości należy potraktować jako orientacyjne. Jednakże zróżnicowanie pomiędzy wynikami badań kulek szklanych i popiołu wyraźnie dowodzi roli nieregularności kształtów oraz szorstkości powierzchni cząstek w przenoszeniu naprężeń rozciągających. Wyniki te korespondują z dewiatorami naprężenia ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) w badaniach trójosiowego ściskania uzyskanymi przy  $\sigma_3 = 1$  kPa (rys.23-26). Wobec trudności wykonania suchych próbek, które bez osłonki gumowej można by poddać jednoosiowemu ściskaniu, nie przeprowadzono badań przy  $\sigma_3 = 0$ . Z tego względu dokładne określenie na tej podstawie „odciętej spójności strukturalnej” (cohesion intercept) z warunku  $c_z = R_c/2$  (Schlosser, 1984; Dec, 1975) było niemożliwe. Przedstawioną interpretację może również uzasadnić zaproponowana przez Borę (1984) zależność wytrzymałości na ścinanie od efektywnego naprężenia bocznego  $\sigma_3$ ”.

$$\sigma_3'' = \sigma_3 \times n, \quad (21)$$

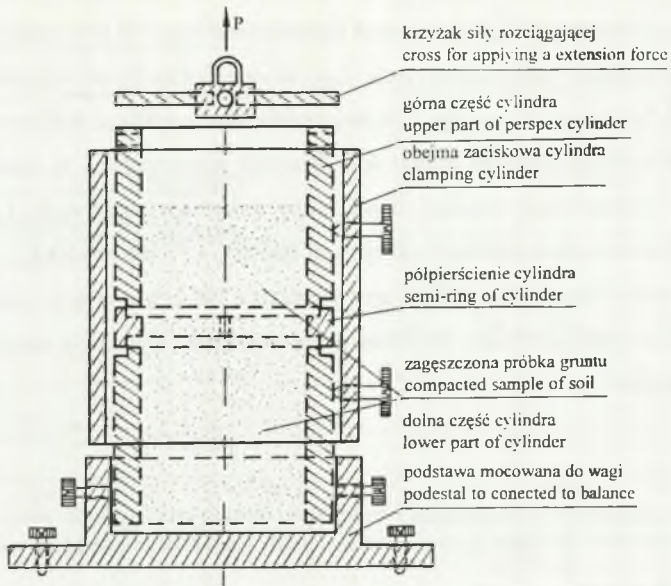
gdzie  $n$  stanowi porowatość próbki. W warunkach jednoosiowego ściskania przy  $\sigma_3 = 0$ , stąd  $\sigma_3''$  również wyniesie zero. W tym stanie składowa oporu tarcia  $\sigma_n \times \text{tg } \Phi$  pomiędzy cząstkami nie istnieje, a zatem zakładając, że przy zerowym naprężeniu  $\sigma_3$  uzyskano by wytrzymałość  $\tau$ , to uzyskana z zależności (19):

$$\tau = \sigma_n \times \text{tg } \Phi + c$$

wytrzymałość na ścinanie powinna stanowić „odciętą spójność”  $c_z$  wynikającą z zazębienia się cząstek.

#### **8.1.4. Ocena wpływu cech kształtu cząstek na wartości kąta tarcia w badaniach o jednakowej porowatości początkowej**

W analizowanym zakresie naprężeń  $\sigma_n$  w przedziale od 10 do 200 kPa w badaniach każdego z materiałów uzyskano dużą zgodność stycznych kół Mohra do poprowadzonej obwiedni (rys.23-26). W tablicy 19 zestawiono zinterpretowane wartości składowej naprężenia  $\sigma_n$ , wytrzymałości na ścinanie i przyrosty wartości kątów tarcia wewnętrznego zwiększające się z przyrostem stopnia nieregularności i szorstkości powierzchni cząstek. Podano także ekstremalne różnice  $\Delta\tau$  i  $\Delta\Phi$  uzyskane z porównania badań popiołów i kulek szklanych.



Rys.28. Przekrój i zdjęcie cylindra do badań wytrzymałości gruntu na rozrywanie  
 Fig.28. Section and photo of cylinder to extension strength test of soil

Zależność zmian wytrzymałości na ścinanie od ogólnego wskaźnika kształtu  $\zeta_{ocli}$  przedstawiono na rys. 29a. Różnice naprężeń pomiędzy  $\tau_{max}$  a  $\tau_B$  są efektem wpływu zróżnicowanej struktury cząstek na opory tarcia, wpływającej na rozwój zjawiska dylatacji i proces

potoczystego przemieszczania się cząstek. Zwiększają się one w zależności od wartości składowych naprężeń normalnych. Przy niższych naprężeniach ( $\sigma_n = 50$  kPa) zmniejszeniu  $\zeta_{ocII}$  z 1,0 do 0,48 odpowiada wzrost oporu tarcia  $\tau_{max}$  w stosunku do  $\tau_B$  od 34% dla kulek szklanych do ok. 56% dla popiołu, co daje 22% zwiększenie wytrzymałości. Przy wyższych naprężeniach ( $\sigma_n = 300$  kPa) przyrost ten wynosi 46%. Również wytrzymałości  $\tau_B$  wynikające głównie z tarcia poślizgowego, pomimo jednakowego wskaźnika porowatości i jednakowego uziarnienia, wykazują dużą zmienność. Przy naprężeniu  $\sigma_n = 50$  kPa spadek  $\zeta_{ocII}$  z 1,0 do 0,48 spowodował wzrost oporu  $\tau_B$  o 50%, a przy naprężeniu 300 kPa o 37%. Ze względu na użyte krzywizny obwiedni Mohra określono także zmienności kąta tarcia wewnętrznego dla przyjętych naprężeń  $\sigma$ .

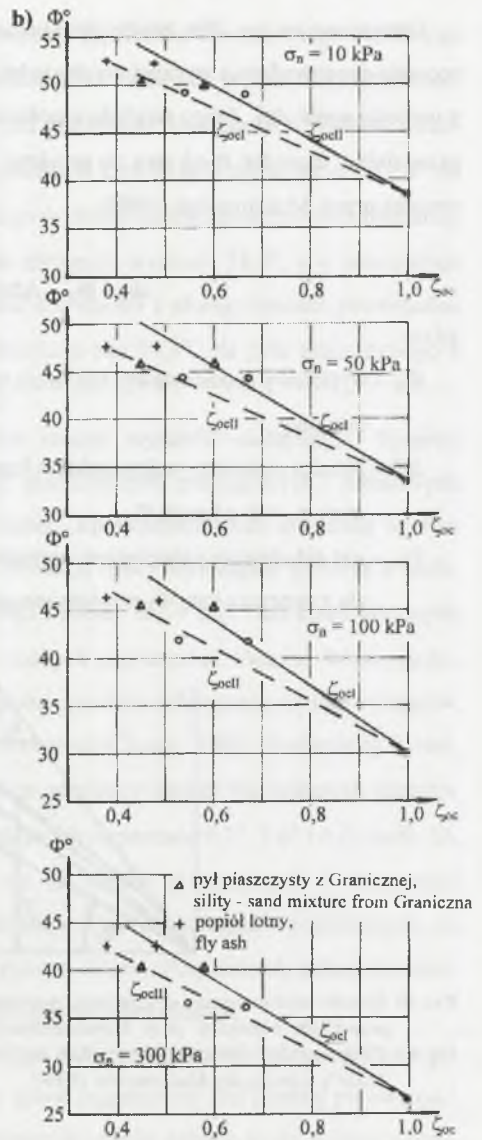
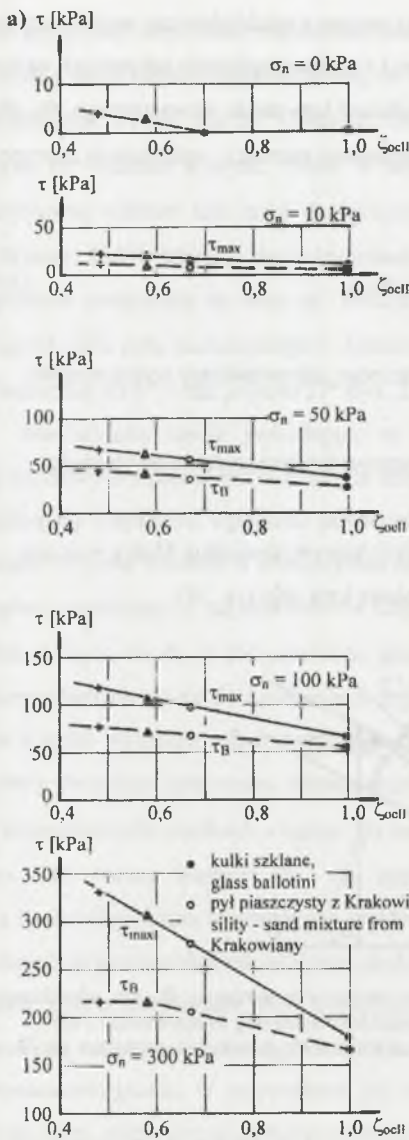
Tablica 19  
Table 19

Określenie parametrów wytrzymałości na ścinanie metodą stycznych do obwiedni Mohra  
Determination of the shear strength parameters by lines contacts to Mohr's envelope

Lp. No.	Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand - silt Mixture	$\zeta_{ocII}$	$\sigma_n = 0$ Kpa		$\sigma_n = 10$ kPa		$\sigma_n = 50$ kPa		$\sigma_n = 100$ kPa		$\sigma_n = 300$ kPa	
			$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$
1.	Kulki szklane	1,0	0	<b>42,6</b>	8	<b>38,6</b>	37	<b>33,2</b>	66	<b>30,0</b>	175	<b>26,6</b>
	$\Delta \tau_{2,1} \quad \Delta \Phi_{2,1}$	0,33	0	<b>8,8</b>	7	<b>10,5</b>	17	<b>11,4</b>	30	<b>10,2</b>	78	<b>9,3</b>
2.	Pył z Krakowian	0,67	0	<b>51,4</b>	15	<b>49,1</b>	54	<b>44,6</b>	96	<b>40,2</b>	253	<b>35,9</b>
	$\Delta \tau_{3,2} \quad \Delta \Phi_{3,2}$	0,09	3	<b>1,6</b>	3	<b>0,9</b>	5	<b>1,6</b>	7	<b>5,3</b>	52	<b>4,1</b>
3.	Pył z Granicznej	0,58	3	<b>53,0</b>	18	<b>50,0</b>	59	<b>46,2</b>	103	<b>45,5</b>	305	<b>40,0</b>
	$\Delta \tau_{4,3} \quad \Delta \Phi_{4,3}$	0,10	1	<b>3,4</b>	3	<b>2,8</b>	9	<b>1,5</b>	14	<b>0,7</b>	25	<b>2,2</b>
4.	Popiół lotny	0,48	4	<b>56,4</b>	21	<b>52,8</b>	68	<b>47,7</b>	117	<b>46,2</b>	330	<b>42,2</b>
	$\Sigma \Delta \tau, \Sigma \Delta \Phi$	0,52	4	<b>16,4</b>	13	<b>14,2</b>	31	<b>14,5</b>	51	<b>16,2</b>	155	<b>15,6</b>

Współzależności przedstawiono jako wpływ wskaźnika cech kształtu cząstek  $\zeta_{ocII}$  na wartości kąta tarcia  $\Phi$  wyznaczonego przez styczne do obwiedni Mohra (tabl. 19, rys. 27b). W zakresie niskich składowych naprężeń normalnych (10 kPa) wraz ze zmniejszeniem się wskaźnika cech kształtu  $\zeta_{ocII}$  od 1,0 do 0,48 wartość kąta tarcia zwiększyła się z 38,6° do 52,8°, tj. o 14,2°, a przy  $\sigma_n = 300$  kPa o 15,6°. Dla porównania podano również zmienności tych kątów w stosunku do nieuwzględnianego w interpretacjach wskaźnika cech kształtu  $\zeta_{ocI}$  (p. 5.10). W przypadku popiołu uzyskane różnice  $\Phi$  wynikające z uwzględnienia tych dwóch wskaźników nie przekraczają 3 stopni.





Rys.29. Zależność wytrzymałości na ścinanie  $\tau$  i wartości styycznego kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi$  z badań o jednakowej porowatości od wskaźników cech kształtu cząstek  $\zeta_{0cI}$  i  $\zeta_{0cII}$   
 Fig.29. Dependence of resistance on shear stress  $\tau$  and tangent angle's value internal friction  $\Phi$  from tests in the same initial porosity on coefficients of shape particles  $\zeta_{0cI}$  and  $\zeta_{0cII}$

Otrzymane na rys. 29b zależności obarczone są pewną niedokładnością wynikającą ze sposobu poprowadzenia stycznej do obwiedni Mohra i z nieuwzględniania odcinanych na osi  $\tau$  wartości spójności. Z tego względu określono uśrednione kąty tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$ , dla przedziałów naprężeń  $\sigma$  od zera do przyjętej w interpretacji wartości, zależnością zaproponowaną przez Maksimovica (1989).

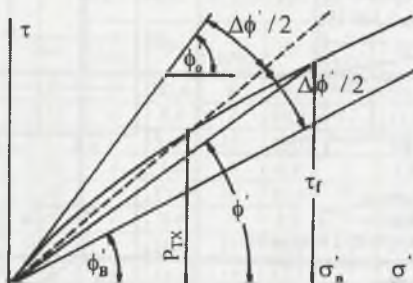
$$\Phi_s = \Phi_B + \Delta\Phi / (1 + \sigma_3 / P_{Tx}), \quad (22)$$

gdzie:

$\Phi_B$  – wyjściowy (podstawowy) kąt tarcia wewnętrznego odpowiadający wytrzymałości ustalonej,

$\Delta\Phi$  – różnica pomiędzy maksymalnym kątem wyprowadzonym stycznie do obwiedni przy  $\sigma_n = 0$  a kątem  $\Phi_B$ ,

$P_{Tx}$  – jest składowym naprężeniem normalnym, przy którym obwiednia Mohra przecina się z tworzącą kąta  $\Phi_B$  powiększonego o połowę kąta  $\Delta\Phi$  (rys. 30).



Rys.30. Sposób wyznaczania uśrednionej wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$  dla określonego przedziału naprężeń przy krzywoliniowej obwiedni kół Mohra (wg Maksimowica 1989)

Fig.30. Device of determination the median angle internal friction  $\Phi_s$  for nonlinear failure envelope Mohr's circles (by Maksimowic 1989)

Ustaloną wartość kąta tarcia  $\Phi_B$  określono wyznaczając koła Mohra dla dziewięciu naprężenia uzyskanych przy dużych odkształceniach (Maksimovic, 1989). Jednakże różne długości drogi ścinania nie dawały pewności, czy odczytane wartości  $\Phi_B$  można było uznać za ustalone. W pracach Maksimowica ocenia się, że ta przybliżona wartość mieści się w przedziale pomiędzy kątem  $\Phi_{cv}$  a  $\Phi_{\mu}$ . Na tym etapie badania nie następowały już przyrosty objętości próbki, ciśnienia powietrza w porach nie ulegały zmianom (rys. 21, 22), a na powierzchni próbki występowała wyraźna strefa ścięcia. Ustabilizowanej w tej strefie porowato-

ści krytycznej odpowiada najczęściej ustalona wartość kąta tarcia wewnętrznego zbliżonego do kąta tarcia międzycząstkowego  $\Phi_{\mu}$ . W badaniach kulek szklanych o naturalnej szorstkości przeważnie wynosi ona  $26^{\circ}$  (Skinner, 1969), a dla otoczonych kwarcowych piasków rzecznych  $28^{\circ}$  (Barden, Khayatt, 1966). W obu przypadkach kąty te były mniejsze o  $3^{\circ} - 6^{\circ}$  od krytycznej wartości kąta tarcia  $\Phi_{cv}$  otrzymywanego w chwili zakończenia zjawiska dylatacji (Skinner, 1969). Wartość  $\Phi_B$  w badaniach kulek szklanych wyniosła  $28,3^{\circ}$ , a w pozostałych gruntach zwiększała się wraz ze zmianą stopnia szorstkości i nieregularności powierzchni cząstek. Dla pyłu piaszczystego z Krakowian wyniosła ona  $34,3^{\circ}$ , dla pyłu piaszczystego z Granicznej  $35,5^{\circ}$ , a dla popiołu  $37^{\circ}$  (rys. 23 - 26).

Mechanizmy tarcia powodujące te różnice można wyjaśnić następująco: Spośród 5 składowych oporów tarcia w strefie ścięcia, tj. przemieszczeń poślizgowych i obrotowych pomiędzy cząstkami, ugięciami powierzchni cząstek, ich kruszenia oraz dylatacji na tym etapie procesu ścinania w płaszczyźnie ścięcia powstają opory wynikające głównie z poślizgów kontaktujących się powierzchni cząstek. Stąd wartość  $\Phi_B = 28,3^{\circ}$  dla kulek szklanych jest zbliżona do  $\Phi_{\mu} = 26^{\circ}$  naturalnie gładkich suchych powierzchni kwarcu. W przypadku nieregularnych ziaren do mechanizmu tego dochodzi zjawisko zahaczania się ich występow, co z kolei wymusza międzycząstkowe ruchy obrotowe (Chang, 1985; Rothenburg i inni, 1989). Procesem tym można wytłumaczyć różnice pomiędzy kątami  $\Phi_B$  badanych gruntów o nieregularnych cząstkach a kątem  $\Phi_B$  kulek szklanych wynoszące  $6,1^{\circ}$ ,  $7,0^{\circ}$  i  $6,0^{\circ}$  (tabl. 20, rys. 31). Niższe wartości  $\Phi_B$  dla popiołu niż dla pyłów piaszczystych z Granicznej i z Krakowian można wytłumaczyć efektem niszczenia struktury agregatów popiołowych, na których to powierzchniach wtopione są drobne pyłowe cząstki. Przy dużych odkształceniach połączenia te są kruszone, co zwiększa regularność powierzchni cząstek.

Piątą znaczącą składową mechanizmu tarcia jest zjawisko dylatacji zależne głównie od porowatości gruntu. W przypadkach gdy badany grunt zagęszczony jest poniżej porowatości krytycznej, część energii potrzebna do przemieszczenia układu cząstek strefy ścięcia zostaje przyjęta przez mechanizm oddalenia się cząstek (p. 7.5) (Lee, Seed, 1967; Whitman, Lambe, 1977; Harden, 1989). W niespoistych gruntach zagęszczonych do wskaźnika  $e_{min}$  występuje wyłącznie zjawisko dylatacji, a w stanie luźnym te dodatkowe opory tarcia wynikają tylko z potoczystego przemieszczania się cząstek. W przykładowej analizie Kézdi (1979) podaje, że dla piasku badanego przy wskaźniku porowatości  $e = 0,65$  otrzymano wartość kąta tarcia  $35^{\circ}$ , z której  $24^{\circ}$  stanowiły tarcie poślizgowe cząstek ( $\Phi_{\mu}$ ),  $5^{\circ}$  spowodowane było potoczystym przemieszczaniem się cząstek, a  $6^{\circ}$  zjawiskiem dylatacji. Dokładne wydzielenie kąta będą-



cego wynikiem dylatacji jest kłopotliwe, a określenie go jako różnicy pomiędzy  $\Phi_{\max}$  a  $\Phi_{cv}$  dyskusyjne. Po osiągnięciu wartości kąta  $\Phi_{cv}$  w przypadku gruntów o nieregularnych kształtach cząstek nadal zachodzą ruchy obrotowe, a tym samym pomimo braku rejestrowanych zmian objętości próbki następują jeszcze w tej strefie zmiany postaciowe układu ziaren (Head, 1986; Cornforth, 1964). Ilustracją tego procesu mogą być badania Bardena i Khayatta (1966), którzy podają, że wartość kąta  $\Phi_{\mu} = 28^{\circ}$  uzyskanego dla piasku była mniejsza od kąta  $\Phi_{cv}$  o 7 stopni.

Uwzględniając powyższe, dla określenia wpływu nieregularności kształtu cząstek na opory ścinania wynikające ze zjawiska dylatacji i potoczystych przemieszczeń ziaren jako wartość odniesienia przyjęto kąt  $\Phi_B$ , wyznaczony dla najniższych naprężeń  $\sigma_1$ , które uzyskiwano przy odkształceniach osiowych rzędu 8 – 12 %. Obliczone zależnościami Maksimovica uśrednione wartości kąta tarcia wewnętrznego dla danego przedziału naprężeń  $\sigma_3$  podano w tablicy 20 oraz na rysunku 31. Analiza zmienności wpływu struktury powierzchni i kształtów cząstek na wartości kąta  $\Phi_s$  (rys. 36) wykazuje, że wzrost oporów tarcia spowodowany spadkiem  $\zeta_{ocil}$  od 1,0 do 0,48 dla naprężenia  $\sigma_3 = 10$  kPa wynosi 21,8°, a dla  $\sigma_3 = 300$  kPa - 10,1°. Otrzymane dla określonego naprężenia  $\sigma_3$  przyrosty oporów tarcia są wynikiem zarówno zjawiska dylatacji, jak i pokonania oporów tarcia potoczystego, stawianych przez cząstki o nieregularnych kształtach w stosunku do oporów kulek szklanych.

Tablica 20  
Table 20

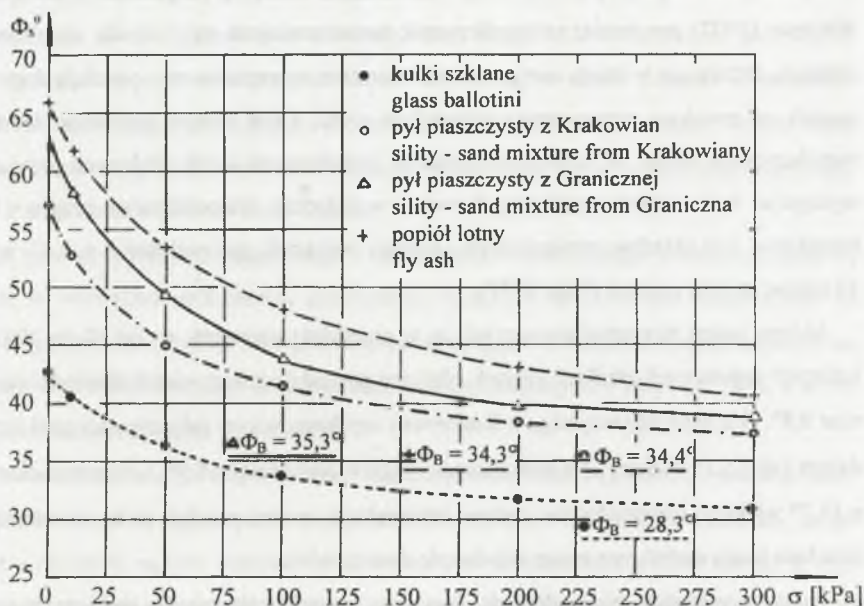
Obliczenie uśrednionych wartości kąta tarcia wewnętrznego uzyskanych przy stałej porowatości początkowej  
Calculation of median values of internal angle of friction in the same initial porosity

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand – silt mixture	$\Phi_{\max}$	$\Phi_B$	$\Delta\Phi$	$P_{Tx}$ KPa	$\sigma_3$ (kPa)				$\Phi_s^{\circ}$ przy $\sigma_3$ , $\Phi_s^{\circ}$ in $\sigma_3$ (kPa)			
									0÷10	0÷50	0÷100	0÷300
Kulki szklane Glass ballotini	42,6	28,3	14,3	60	10	50	100	300	40,5	36,1	33,7	30,7
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	57,0	34,4	22,6	59	10	50	100	300	52,7	44,8	41,9	37,2
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	64,0	35,3	28,7	39	10	50	100	300	58,1	48,1	43,3	38,8
Popiół lotny Fly ash	66,0	34,3	31,7	77	10	50	100	300	62,3	53,6	48,0	40,8



Znaczące różnice pomiędzy przyrostami wytrzymałości na ścinanie  $\tau$  (rys. 29a, tabl. 19) a stosunkowo niewielkimi przyrostami kąta tarcia  $\Phi_s$  przy naprężeniach głównych  $\sigma_3 = 300$  kPa (tabl. 20) można wytłumaczyć opisanymi w tym punkcie mechanizmami procesu tarcia oraz zakrzywieniem obwiedni Mohra. W przedziałach naprężenia  $\sigma_3$  od 0 +10 kPa i od 0 + 300 kPa wzrost uśrednionego kąta tarcia dla kulek szklanych wyniósł  $9,8^\circ$ , dla pozostałych pyłów piaszczystych  $15,5^\circ$ ,  $19,3^\circ$  i  $21,5^\circ$  (rys. 36).

Fizyczny sens zjawiska dużej krzywizny obwiedni Mohra przy niskich naprężeniach  $\sigma$  Bishop (1966) wyjaśnia następująco. Z dwóch składowych oporu tarcia wewnętrznego, tj. tarcia posuwistego przemieszczających się cząstek i oporu, jaki stawiają obracające się i zaklinowujące ziarna (interlocking), decydującą rolę przy niskich naprężeniach odgrywa drugi składnik. Im większe jest wzajemne zazębianie się i zaklinowywanie ziaren, tym większy jest opór ścinania, szczególnie w przypadku cząstek o nieregularnych kształtach.



Rys.31. Zależność uśrednionego kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$  od naprężeń  $\sigma_3$  przy stałej porowatości  
 Fig.31. Dependence of median internal friction angle  $\Phi_s$  tested in the same initial porosity from minor stress  $\sigma_3$

Jednakże interpretacja ta jest niepełna, gdyż, jak wykazał Bora (1984), zakrzywienie obwiedni uzyskano również w badaniach stalowych kulek, które, jak wiadomo, są kuliste, gład-

kie i nie ulegają kruszeniu. Podobnie w badaniach piasków Vesić i Clough (1969) wykazali, że pomimo kruszenia cząstek przy naprężeniach rzędu 10 MPa obwiednia nie wykazywała już krzywizny.

W tym świetle krzywiznę obwiedni Mohra uzyskaną w badaniach pozbawionych nieregularności kształtów kulek szklanych można tłumaczyć zmiennością efektywnych naprężeń bocznych działających pomiędzy powierzchniami stykających się cząstek. Podstawowym czynnikiem decydującym o wartości tarcia są działające pomiędzy cząstkami efektywne naprężenia kontaktowe oznaczone w tej pracy jako  $\sigma_3'$  (wzór 21 p. 8.1.2).

Jak wyjaśnia Bora (1984), zmniejszają się one wraz z zagęszczeniem, a więc wraz ze wzrostem powierzchni styku. W próbkach o jednakowej porowatości przy niskich wartościach  $\sigma_3$ , składowe naprężenia normalnego przekazywane są na określoną liczbę styków, czemu w przypadku przyłożenia sił ścinających odpowiada określony współczynnik tarcia. Interpretacja ta znajduje potwierdzenie w teorii styków Hertza, na podstawie której Lambe i Whitman (1977) przyjmują, że współczynnik tarcia zmniejsza się z chwilą zwiększenia obciążenia. Działające w takim samym układzie wyższe naprężenia  $\sigma_3$  wywołują dogęszczenie cząstek, co zwiększa sumaryczną powierzchnię styku, a tym samym powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia. W kubicznym układzie jednakowych kulek szklanych przy  $e = 0,91$  występuje 6 kontaktów międzycząstkowych, w układzie ortorombowym przy  $e = 0,65 - 8$  kontaktów, a w układzie tetragonalnym, którego wskaźnik porowatości  $e = 0,43$  występuje 10 miejsc styków cząstek (Oda, 1977).

Można zatem hipotetycznie przyjąć, że w przedziale naprężeń  $\sigma_3$  od 10 do 300 kPa dla kulistych regularnych gładkich cząstek efekt ten powoduje zakrzywienie obwiedni dając różnice  $9,8^\circ$ . Dla pyłu piaszczystego z Krakowian uzyskano w tym zakresie naprężeń krzywiznę dającą kąt o  $5,7^\circ$  większy, dla pyłu piaszczystego z Granicznej o  $9,9^\circ$ , a w przypadku popiołu o  $11,7^\circ$  większy. Uwzględniając podane interpretacje, można przyjąć, że na wymienione różnice kąta tarcia dodatkowo mogą składać się dwa zjawiska:

- wraz ze wzrostem nieregularności kształtów cząstek zwiększa się maksymalna porowatość gruntu (Kolbuszewski, 1967; Kézdi, 1979; Kowalski, 1998). Oznacza to, że przy określonym wskaźniku porowatości ( $e = 0,65$ ) liczba kontaktów międzycząstkowych gruntów o nieregularnych kształtach cząstek jest mniejsza niż w przypadku ziaren kulistych, a tym samym współczynnik tarcia jest większy,

– w zakresie niskich wartości naprężenia  $\sigma_3$  dominującym mechanizmem procesu ścinania jest zaklinowywanie się krawędzi obracających się cząstek. Przy dużej nieregularności kształtów i agregatowej budowie powierzchni (rys. 1) mechanizm ten wymusza częściowe kruszenie zazębiających się nieregularności. Mechanizmem tym w p. 8.1.3 wyjaśniono zdolność popiołu i pyłu piaszczystego z Granicznej do przenoszenia niewielkich sił rozciągających.

W podsumowaniu, dokonując oceny wpływu nieregularności kształtów cząstek na wartości kąta tarcia w warunkach jednakowej porowatości (rys. 31, 36a), należy generalnie stwierdzić, że:

- w wyniku zjawiska zahaczania i zaklinowywania się występow powierzchni agregatów popiołowych ( $\zeta_{ocII} = 0,48$ ) i pyłu piaszczystego z Granicznej ( $\zeta_{ocII} = 0,58$ ) stwierdzono zdolność tych suchych gruntów do przenoszenia niewielkiego naprężenia rozciągającego, dającego wartości rzędnej spójności strukturalnej ok. 4 i 3 kPa,
- wartości kąta tarcia uzyskane przy odkształceniach rzędu 8-12% i oznaczane jako  $\Phi_B$  zostały określone po ustaleniu się porowatości krytycznej w strefie ścięcia. W badaniach kulek szklanych przewyższają one o 2° wartości  $\Phi_\mu = 26^\circ$ . Wyższe wartości  $\Phi_B$  dla pozostałych gruntów są wynikiem niezakończenia mechanizmu tarcia potoczystego wynikającego z zahaczania się nierówności cząstek,
- udział zjawiska dylatacji połączonego z mechanizmem potoczystego przemieszczania się ziaren w warunkach jednakowej porowatości badanych gruntów jest uzależniony od przyjętego umownie stopnia nieregularności cząstek  $\zeta_{ocII}$ . W zakresie małych naprężeń  $\sigma_n$  przyrost wytrzymałości popiołu w stosunku do kulek szklanych wynosi ok. 50%, a w zakresie wysokich naprężeń  $\sigma_n$  ok. 16%.

Uzyskane wyraźne krzywizny obwiedni Mohra spowodowane są głównie wartością bocznych naprężeń  $\sigma_3$ . Największe uzyskano w zakresie naprężeń 0 - 100 kPa. Ustalono, że zakrzywienia obwiedni są tym większe, im mniejsza jest powierzchnia styków ziaren. Z tego powodu w warunkach jednakowej porowatości początkowej najmniejszą krzywiznę uzyskano dla kulek szklanych, gdzie regularność kształtów umożliwia większą liczbę styków ziaren, a największą krzywiznę dla popiołów, w których nieregularność powierzchni utrudnia występowanie większej liczby kontaktów międzycząstkowych.



Wpływ nieregularności kształtów i powierzchni cząstek na wzrost kąta tarcia jest duży i zmienny w zależności od naprężeń  $\sigma$ . W przedziale naprężenia  $\sigma_3$  (0 – 10 kPa) zmniejszaniu wskaźnika cech kształtu  $\zeta_{ocII}$  z 1,0 do 0,48 odpowiada wzrost  $\Phi_s$  o  $21,8^\circ$  w zakresie  $\sigma_3$  0 – 100 kPa o  $14,3^\circ$ , a w zakresie  $\sigma_3$  od 0 do 300 kPa o  $10,1$  stopnia.

## 8.2. Analiza wyników badań przy jednakowym stopniu zagęszczenia

### 8.2.1. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na przebieg procesu ścinania próbek o jednakowym stopniu zagęszczenia

Wyniki badań przeprowadzonych w sposób opisany w p. 7.4.2 podobnie jak dla serii próbek o stałej porowatości przeanalizowano pod kątem zmian dewiatorów naprężeń, porowych ciśnień powietrza i zmian objętości próbek w czasie procesu ścinania. W odróżnieniu od badań o stałej porowatości początkowej przyjęty stan luźnego uformowania próbki ( $I_D = 0$ ), a następnie poddane konsolidacji naprężeniem 100 kPa uzyskiwały stopnie zagęszczenia  $I_D = 0,03 - 0,06$ , a zatem można było przyjąć, że ich porowatości były w granicach porowatości krytycznej każdego z gruntów. Wyniki postępujących w procesie ścinania zmian przeanalizowano dla niskich i wyższych naprężeń  $\sigma_3$ , tj. 10 i 50 kPa.

Przy niższym naprężeniu  $\sigma_3 = 10$  kPa uzyskane dewiatory naprężeń wzrastały wraz z zagęszczeniem, a próbki nieznacznie powiększały swoją objętość od 0,5 do 1,5 %, czyli od 0,45 do 1,35 cm<sup>3</sup>. Ten najwyższy przyrost dotyczył badania popiołu, w którym pomimo tak luźnego stanu otrzymano nieznaczne ekstremum dewiatora naprężeń. Powodem tego może być duża nieregularność kształtu cząstek, powodująca dominację tarcia wynikającego z mechanizmu obracania się cząstek w stosunku do mechanizmu tarcia poślizgowego (Oda, Kazama, 1998). Pewien wyjątek stanowił przypadek pyłu piaszczystego z Granicznej, w badaniu którego próbka ulegała dogęszczaniu do odkształceń 5%, po czym także następowało powolne jej rozluźnianie - rys. 32, 33. Przyrosty objętości próbek w tym wariacie badań w stosunku do zmian zaobserwowanych w badaniach przy stałej porowatości (p. 8.1.1 rys. 21) są nieco mniejsze, co należy wyjaśnić wyższym zagęszczeniem próbek tamtej serii (tablice 17 i 18). Relacje te potwierdziły zmiany ciśnień powietrza w porach, które w badaniach o stałej porowatości przyrastały do podciśnienia rzędu 12 kPa, a w badaniach próbek luźno uformowanych początkowo były zerowe lub dodatnie, a w czasie ścinania zmniejszały się do – 6 kPa (rys 21 b i 32 b).



Nieco inaczej zmieniały się dewiatory naprężeń przy wyższym naprężeniu  $\sigma_3 = 50$  kPa. Niewielkie dogęszczenie, jakie nastąpiło w czasie konsolidacji i podczas badania, w przypadku 3 gruntów spowodowało nieznaczne ekstrema wartości naprężeń. Ciśnienia porowe w tych przypadkach były dodatnie i nie przewyższały 5 kPa. Korespondowały z tym zmiany objętości próbek, które ścieśniały się od 0 do 4% (rys. 33).

Porównując uzyskane zależności przy naprężeniu  $\sigma_3 = 10$  kPa z naprężeniem  $\sigma_3 = 50$  kPa (rys. 32, 33), należy zauważyć, że zmiany dewiatorów naprężeń przy wyższych  $\sigma_3$  wykazują nieznacznie wyraźniejsze ekstrema, ciśnienia porowe nie są ujemne, a próbki ulegają nieznacznie wyższemu dogęszczeniu. Jest to efektem większej wartości składowej naprężenia  $\sigma_3$ .

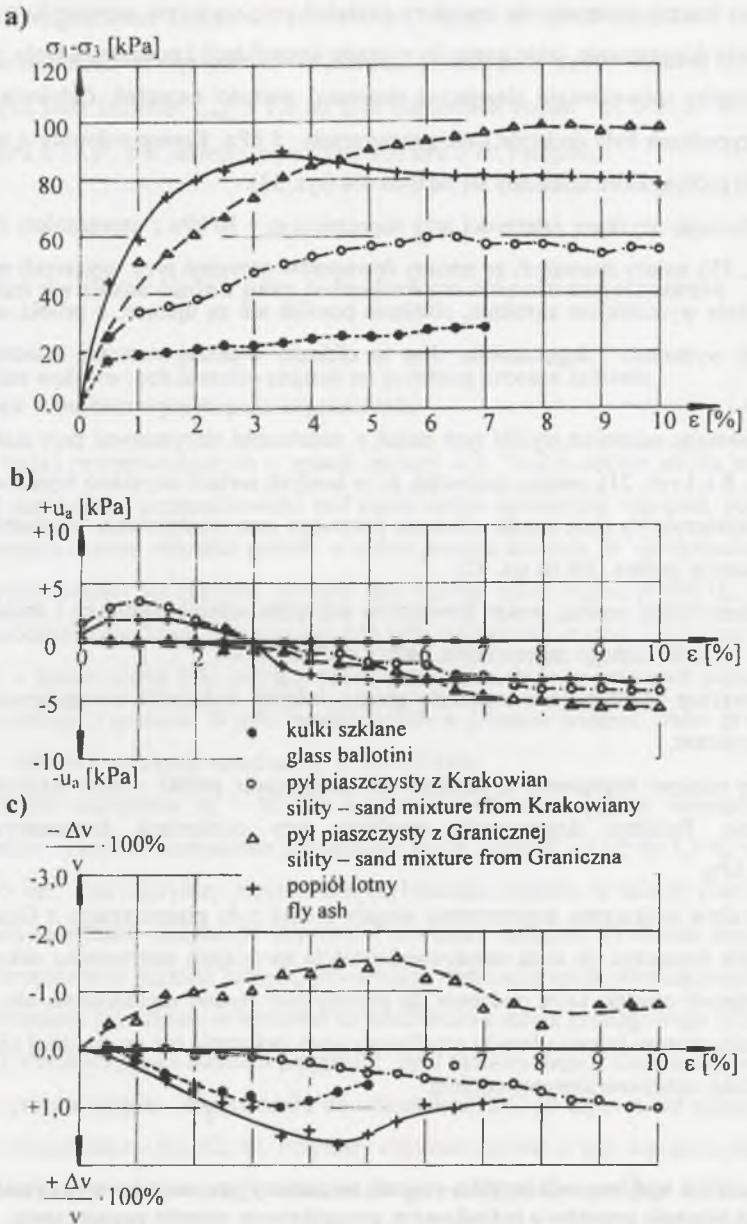
Porównując natomiast wyniki tych badań z rezultatami otrzymanymi przy stałej porowatości (p. 8.1.1 rys. 21), można zauważyć, że w tamtych seriach uzyskano wyraźne ekstrema, czemu towarzyszyły duże spadki ciśnienia porowego oraz występowały rozluźnienia, a nie dogęszczenia próbek (jak na rys. 32).

Podsumowując analizę zmian dewiatorów naprężeń, ciśnień porowych i zmian objętości próbek w stanie luźnego zagęszczenia, należy podkreślić, że:

- najwyższe wytrzymałości wykazały grunty, których wskaźniki nieregularności kształtu były niższe,
- przy niższym naprężeniu  $\sigma_3$  następowało rozluźnianie próbki, a przy wyższym dogęszczenie. Podobne dogęszczenia uzyskano przy ciśnieniach komorowych 100 i 200 kPa,
- wyraźnie większemu dogęszczeniu ulegały próbki pyłu piaszczystego z Granicznej, co można tłumaczyć ich dużą ostrokrawędzistością sprzyjającą nietrwałemu układowi luźno ułożonych cząstek, które podobnie jak popioły były trudno zagęszczalne, ale po uruchomieniu procesu ścinania łatwiej uzyskiwały nowe położenie niż np. bardziej niekształtne i bardziej zazębione agregaty popiołu.

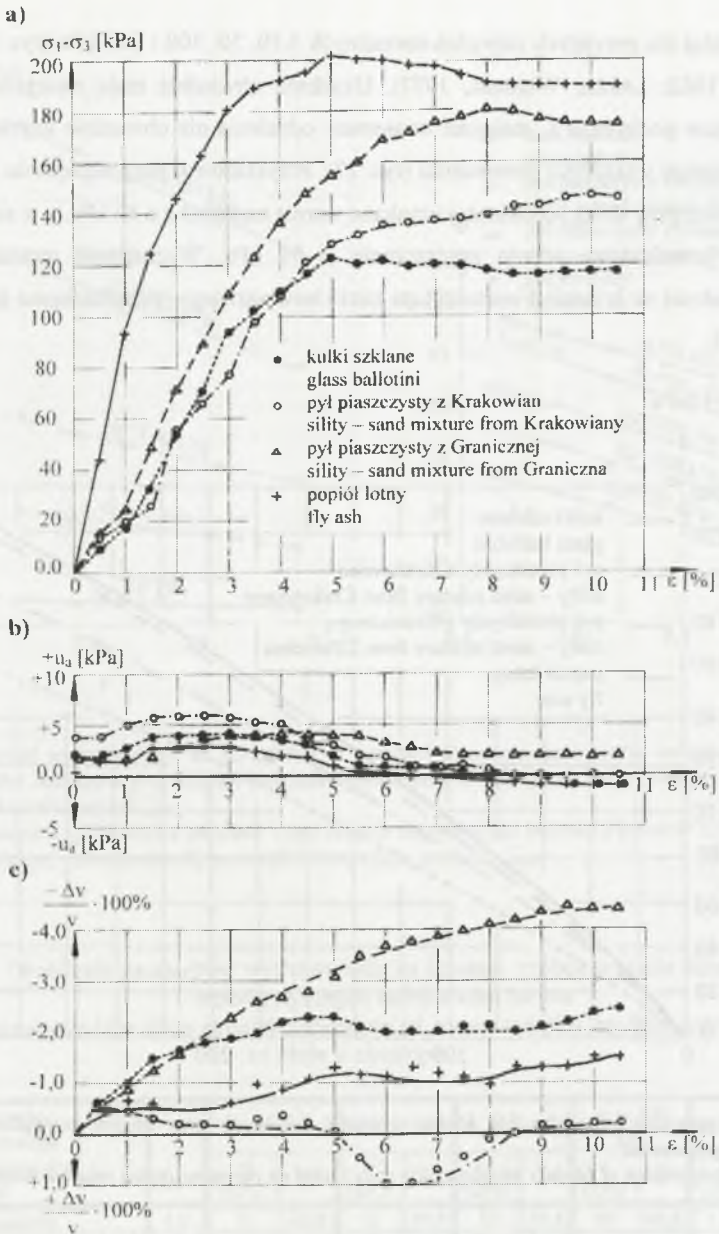
### **8.2.2. Analiza wpływu cech kształtu cząstek na zmiany parametrów wytrzymałości na ścinanie gruntów o jednakowym początkowym stopniu zagęszczenia**

Podobnie jak w wariacie badań omówionym w p. 8.1.2. wyniki opracowano i przedstawiono w formie obwiedni kół Mohra otrzymanych dla 6 różnych naprężeń  $\sigma_3$ . Wykresy służące analizom opracowane w małej skali naprężeń (1 cm = 10 kPa) umożliwiły dokładne poprowadzenie obwiedni stycznej do kół Mohra, a następnie wykreślenie linii stycznych do



Rys.32. Zależność zmienności dewiatorów naprężeń, ciśnień powietrza w porach i objętości próbek badanych o jednakowym początkowym stopniu zagęszczenia od ich odkształceń osiowych w badaniach trójosiowego ściskania przy  $\sigma_3 = 10$  kPa

Fig.32. Dependence of changing of stress deviators, air pore pressure and volumes of samples tested on the same relative density, versus their axial displacement in triaxial compression tests in  $\sigma_3 = 10$  kPa

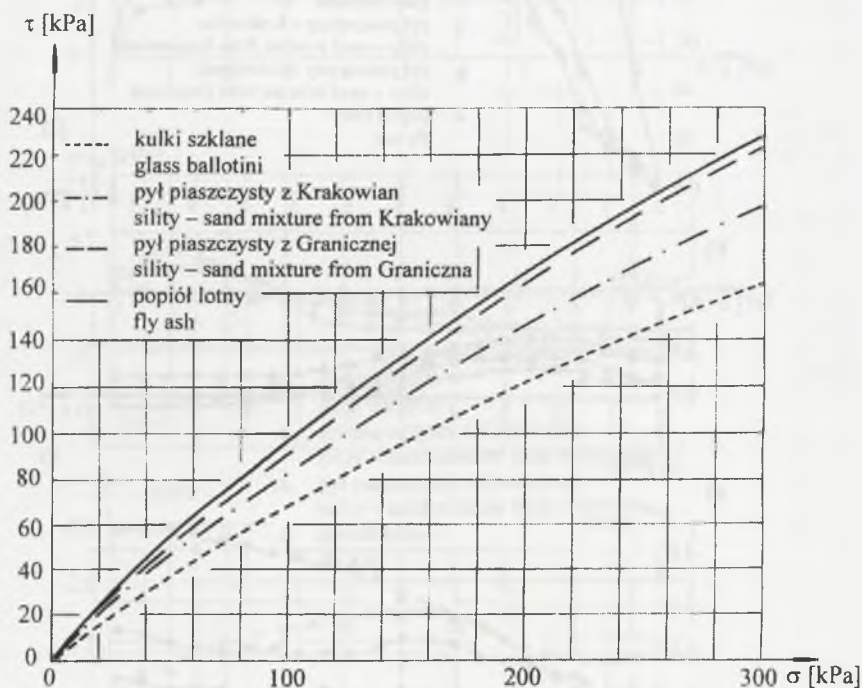


Rys.33. Zależność zmienności dewiatorów naprężeń, ciśnień powietrza w porach i objętości próbek badanych o jednakowym początkowym stopniu zagęszczenia od ich odkształceń osiowych w badaniach trójosiowego ściskania przy  $\sigma_3 = 50$  kPa

Fig.33. Dependence of changing of stress deviators, air pore pressure and volumes of samples tested on the same initial relative density, versus their axial displacement in triaxial compression tests in  $\sigma_3 = 50$  kPa



tej obwiedni dla przyjętych naprężeń normalnych 1, 10, 50, 100 i 300 kPa (rys. 34) (Bishop, Henkel, 1962; Lambe, Whitman, 1977). Uzyskane obwiednie mają mniejsze krzywizny, łagodniejsze pochylenia i mniejsze wzajemne oddalenia niż obwiednie uzyskane w badaniach o stałym wskaźniku porowatości (rys. 27). Przykładowo, przy naprężeniu  $\sigma = 100$  kPa w badaniach przy stałej porowatości uzyskano wzrost naprężeń  $\tau$  o 50 kPa, a w stanie luźnym, tj. przy jednakowym stopniu zagęszczenia, o 31 kPa. Wyznaczone metodą stycznych wytrzymałości na ścinanie i wartości kąta tarcia wewnętrznego przedstawiono na rys. 35 i w tablicy 21.

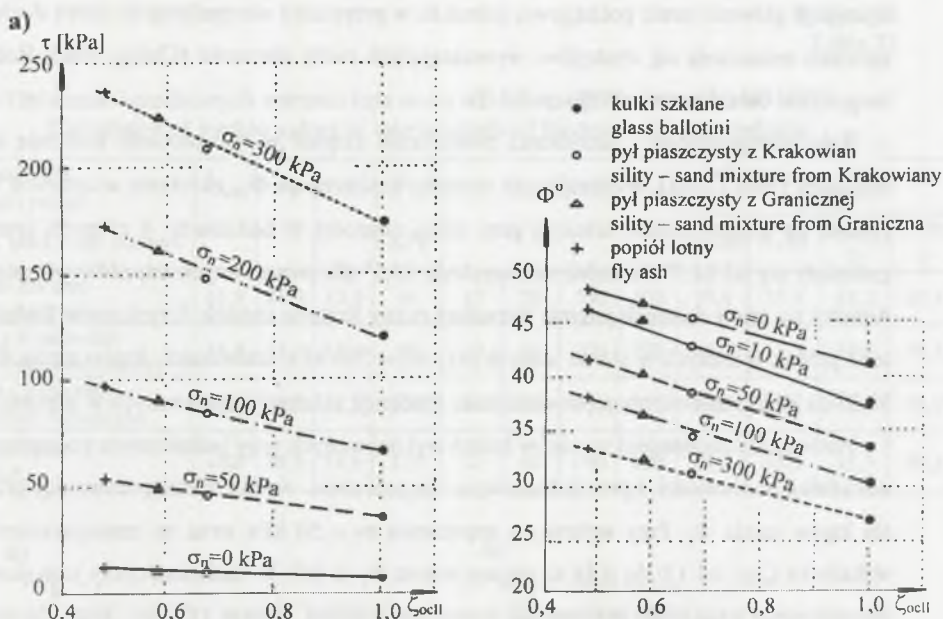


Rys.34. Zestawienie obwiedni kół Mohra gruntów badanych przy stałym początkowym stopniu zagęszczenia

Fig.34. Comparison of Mohr's envelopes for soils tested on the same initial relative density

Wskazują one, że w badaniach luźno uformowanych próbek w końcowym etapie procesu ich ścinania, gdy w strefie ścicia powstaje porowatość zbliżona do porowatości krytycznej (Bishop, 1966; Skinner, 1969; Kezdi, 1980), uzyskiwane wytrzymałości na ścinanie odpowiadają wytrzymałościom krytycznym każdego z gruntów, a kąty tarcia wewnętrznego określane są jako  $\Phi_{cv}$ . Wiadomo, że w warunkach stanu krytycznego w strefie ścicia





Rys.35. Zależność wytrzymałości na ścinanie  $\tau$  i wartości stycznego kąta tarcia wewnętrzznego  $\Phi$  gruntów badanych przy stałym początkowym stopniu zagęszczenia od ogólnego wskaźnika cech kształtu cząstek  $\zeta_{ocell}$

Fig.35. Dependence of resistance on shear  $\tau$  and tangent angle's value internal friction  $\Phi$  tested in this same initial relative density on coefficient of shape particles  $\zeta_{ocell}$

Tablica 21  
Table 21

Określenie parametrów wytrzymałości na ścinanie próbek w stanie luźnym metodą stycznych do obwiedni Mohra

Determination of the shear strength parameters of looses samples by lines contacts to Mohr's envelope

Lp. No.	Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand - silt mixture	$\zeta_{ocell}$	$\sigma_n = 0$ kPa		$\sigma_n = 10$ kPa		$\sigma_n = 50$ kPa		$\sigma_n = 100$ kPa		$\sigma_n = 300$ kPa	
			$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$	$\tau$ (kPa)	$\Phi^\circ$
1.	Kulki szklane	1,0	0	41,8	8	37,1	37	33,2	66	30,0	175	26,6
	$\Delta \tau_{2-1}$ $\Delta \Phi_{2-1}$	0,33	0	8,8	2	12,6	9	5,2	16	4,4	29	4,2
2.	Pył z Krakowian	0,67	0	45,5	10	49,7	46	38,4	82	34,4	204	30,8
	$\Delta \tau_{3-2}$ $\Delta \Phi_{3-2}$	0,09	0	1,6	1	4,2	3	2,1	9	2,4	24	1,6
3.	Pył z Granicznej	0,58	0	46,8	11	45,5	49	40,5	91	36,8	228	32,4
	$\Delta \tau_{4-3}$ $\Delta \Phi_{4-3}$	0,10	0	3,4	2	1,2	5	1,5	6	1,4	8	0,9
4.	Popiół lotny	0,48	0	49,0	13	46,7	54	42,0	97	38,2	236	33,3
	$\Sigma \Delta \tau$ , $\Sigma \Delta \Phi$	0,52	0	16,4	5	9,6	17	8,8	31	8,2	61	6,7

występuje głównie tarcie poślizgowe, jednakże w przypadku nieregularnych ziaren dochodzi zjawisko zahaczania się występow wymuszających ruchy obrotowe (Chang, 1985; Rothenburg, 1989; Oda, Kazama, 1998) (p. 8.1.2).

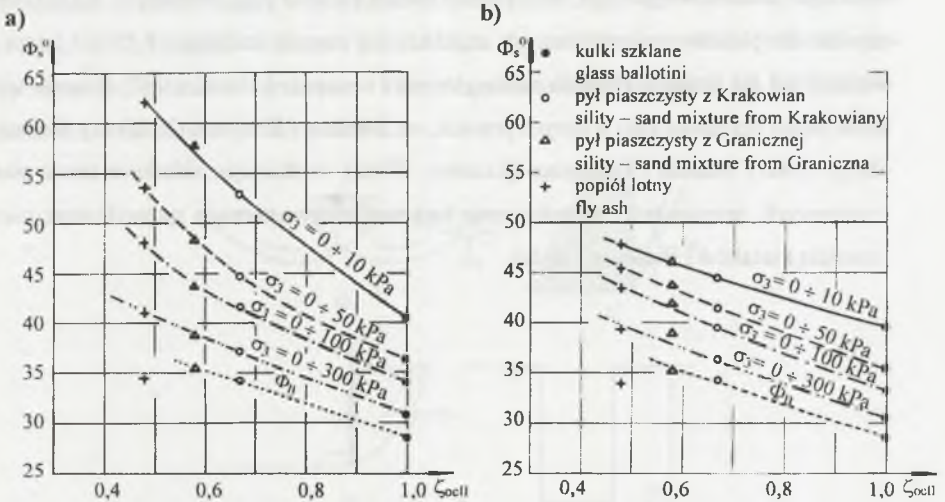
Rolę nieregularności i szorstkości powierzchni cząstek w tym procesie analizują także Negussey i inni (1985), wykazując, że wartości kątów tarcia  $\Phi_{cv}$  określone w aparacie rotacyjnym na długiej drodze ścinania przy stałej objętości w badaniach 8 różnych gruntów zmieniały się od  $24,3^\circ$  dla kulek szklanych do  $35,1^\circ$  dla piaszczystych odpadów górniczych. Autorzy tej pracy dokonali jedynie wizualnej oceny kształtu cząstek. Uzyskana w badaniach serii próbek ścinanych w stanie luźnym przy  $\sigma_n = 300$  kPa zmienności kątów tarcia  $\Phi_s$  od  $30,3^\circ$  do  $39,3^\circ$  stanowi zatem potwierdzenie tendencji zależności podawanych w literaturze.

Porównanie zmienności wyników badań wykonywanych przy jednakowym początkowym wskaźniku porowatości i przy jednakowym zagęszczeniu można ocenić porównując przyrosty kątów tarcia  $\Phi_s$ . Przy wybranym naprężeniu  $\sigma_3 = 50$  kPa wraz ze zmniejszaniem się wskaźnika  $\zeta_{cell}$  od 1,0 do 0,48 uzyskano wzrost  $\Phi_s$  o  $10^\circ$ . W badaniach przy jednakowym początkowym wskaźniku porowatości wzrost ten wyniósł prawie  $18^\circ$  (rys. 36a). Ta ośmiostopniowa różnica jest wynikiem zjawiska dylatacji powodowanej zwiększonym udziałem obrotowego przemieszczania i oddalania się cząstek w strefie ścięcia wymuszonego nieregularnością ich powierzchni. Natomiast 10-stopniowe zróżnicowanie wartości  $\Phi_s$ , która w tych badaniach odpowiada  $\Phi_{cv}$  (rys. 36b), jest wynikiem obrotowego przemieszczania się cząstek w strefie ścięcia. Duża nieregularność cząstek popiołu i pyłu piaszczystego z Granicznej powoduje, że również w warunkach stanu krytycznego nierówności cząstek wymuszają ich ruchy obrotowe, co z kolei powoduje nieznaczne zmiany objętości w tej strefie. Uzyskane wyniki potwierdzają rezultaty innych badań, w których m.in. Negussey i inni (1988) wykazują, że wartości kąta tarcia w stanie krytycznym  $\Phi_{cv}$  zależą od wartości bocznych  $\sigma_3$ , a także od początkowej gęstości próbki. Tłumaczą to uzyskiwane w niniejszych seriach badań niewielkie maksima dewiatorów naprężeń w gruntach o dużej nieregularności cząstek (rys. 32, 33). Wyjaśnia to również otrzymana nieduża krzywizna obwiedni kół Mohra (rys. 34). Zjawisko to omówiono w p. 8.1.2.

Końcowe wyniki badań zinterpretowano, określając uśrednione wartości tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$  w sposób zaproponowany przez Maksimovica (1989), i opisany w p. 8.1.4. Przedstawiono je w tabl. 22, a ich graficzną interpretację zestawioną z podobnymi wynikami serii próbek badanych przy jednakowym wskaźniku porowatości na rys. 36.

Obliczenie uśrednionych wartości kąta tarcia wewnętrznego próbek w stanie luźnym  
Calculation of median values of internal angle of friction in looses condition

Rodzaj pyłu piaszczystego Sort sand – silt mixture	$\Phi_{max}$	$\Phi_B$	$\Delta\Phi$	$P_{Tx}$ KPa	$\sigma_3$ (kPa)				$\Phi_s^\circ$ przy $\sigma_3$ , $\Phi_s^\circ$ in $\sigma_3$ (kPa)			
									0÷10	0÷50	0÷100	0÷300
Kulki szklane Glass ballotini	41,8	28,3	13,5	58	10	50	100	300	39,8	35,5	33,2	30,5
Pył z Krakowian Silt from Krakowiany	45,5	34,4	11,1	86	10	50	100	300	44,3	41,4	39,5	36,4
Pył z Granicznej Silt from Graniczna	46,8	35,3	11,5	140	10	50	100	300	46,0	43,8	42,0	38,9
Popiół lotny Fly ash	49,0	34,3	14,6	155	10	50	100	300	48,0	45,3	43,3	39,2



Rys.36. Zależność uśrednionego kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$  od wskaźnika cech kształtu  $\zeta_{ocell}$ : a) w badaniach gruntów o stałej porowatości, b) w badaniach gruntów o stałym stopniu zagęszczenia

Fig.36. Dependence of median internal friction angle  $\Phi_s$  on coefficient of shape particles  $\zeta_{ocell}$ : a) from tests on samples about the same initial porosity b) from tests about the same initial void ratio

Ustosunkowania i odniesienia do wartości  $\Phi_{cv}$  wymaga również wartość wprowadzonego w niniejszych rozważaniach kąta tarcia  $\Phi_B$  określonego na podstawie kół Mohra wykreślonych dla najniższych wytrzymałości końcowych obu serii badań. Ich wartość zwiększa się od  $28^\circ$  do  $35,5^\circ$  wraz ze zmniejszaniem się wskaźnika nieregularności cząstek, co koresponduje ze



zmiennością kąta  $\Phi_{cv} \sim \Phi_s$  w stanie luźnym. Przy  $\sigma_3 = 300$  kPa kąty  $\Phi_B$  są od  $2^\circ$  do  $5^\circ$  mniejsze od uśrednionych wartości  $\Phi_s$  wyznaczonych dla serii próbek badanych w stanie luźnym (rys. 36b) i od  $2^\circ$  do  $6^\circ$  mniejsze od  $\Phi_s$  uzyskanych w badaniach o jednakowej porowatości początkowej próbek (rys. 36a). Różnice te to także prawdopodobne efekty występowania zjawiska obrotowego przemieszczania się cząstek w strefach ścięcia próbek tych serii.

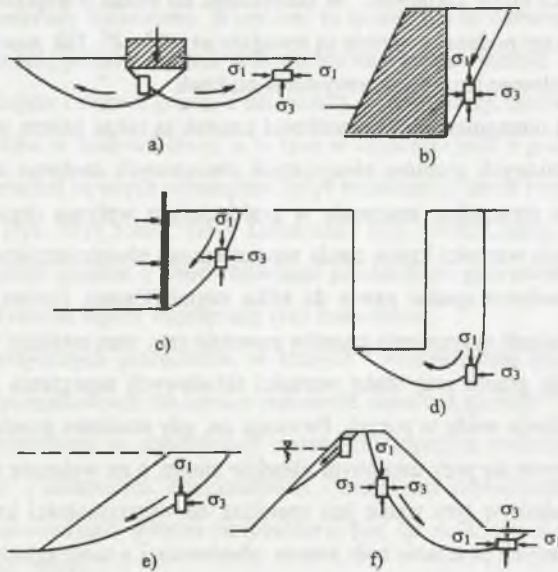
Końcowe porównanie uzyskanych wpływów nierówności i nieregularności powierzchni cząstek na wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$  z wynikami podawanymi w literaturze jest kłopotliwe, gdyż autorzy cytowanej literatury nie prowadzili dokładniejszej oceny pomiarów cech kształtów i powierzchni cząstek. Lambe i Whitman (1977) omawiający prace Sowersa podają, że wartości kąta tarcia wewnętrznego pomiędzy nierównomiernymi kanciastymi ziarnami a ziarnami obtoczonymi różniły się w stanie luźnym o  $9^\circ$ , a w stanie zagęszczonym o  $8^\circ$ . Podobnie Koerner (1970a), określając wpływ kulistości i nieregularności ziaren na wartości kąta tarcia wewnętrznego, w badaniach dwóch piasków przy zmiennych zagęszczeniach uzyskał dla piasków o nieregularnych cząstkach i o stopniu kulistości 0,45 kąt tarcia o  $6^\circ$  większy niż dla piasku o ziarnach zaokrąglonych i o stopniu kulistości 0,67. Równie szacunkowe oceny przedstawiono w innych pracach, np. Bardena i Khayotta (1966) czy Kolbuszewskiego (1967). Hansen i Lundgrum (Koerner, 1970a), wydzielając składowe tarcia piasków kwarcowych, proponują  $8^\circ$  zróżnicowanie kąta tarcia wewnętrznego spowodowane nieregularnością kształtów i struktury cząstek.



## 9. PRAKTYCZNE ZNACZENIE BADAŃ

Niemal we wszystkich przypadkach inżynierii lądowej i wodnej obejmujących zagadnienia geotechniczne o wytrzymałości na ścinanie gruntów niespoistych w dużym stopniu decyduje geometryczna struktura cząstek, co podkreślono w p.1 i 5 i wykazano w p. 8.1.2, 8.1.4 i 8.2.2. Zróżnicowanie niekształtności i szorstkości cząstek od gładkich kulek do nieregularnych popiołów powoduje różnice kątów tarcia wewnętrznych w stanie luźnym co najmniej o  $9^\circ$  (tabl. 22).

Znaczenie i potrzeby badań w tym kierunku nadal podkreślane są w najnowszych pracach (Bell i inni, 1987; Homand – Etienne i inni, 1989), a najistotniejsze przykłady reprezentujące grupy zagadnień stateczności gruntów, w których wytrzymałość na ścinanie ma fundamentalne znaczenie, przedstawiono na rys. 37a - f.



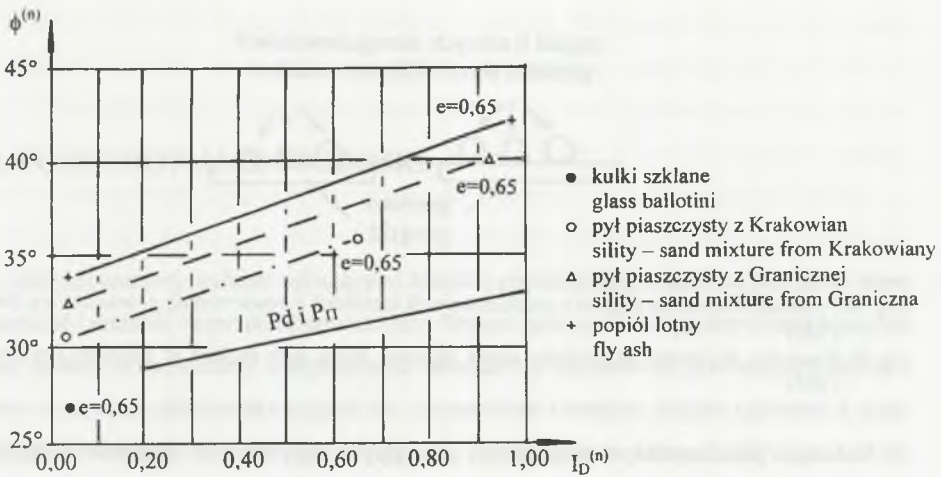
Rys.37. Przykłady mechanizmów ścinania gruntu: a) fundament, b) ściana oporowa, c) umocnienie ściany wykopu, d) wyparcie dna wykopu, e) utrata stateczności zbocza, f) utrata stateczności obwałowania zapory

Fig.37. Examples of mechanisms of failure in soils: a) foundation, b) retaining wall, c) deep excavation, d) cutting of slope, e) embankment or earth dam

Na każdej z potencjalnych linii poślizgu można rozpatrywać element gruntu, w którym w chwili utraty stateczności panują warunki granicznej równowagi stanu naprężeń. Waga tych zagadnień wymaga bezpiecznego i racjonalnego doboru parametrów geotechnicznych, co w praktyce nie zawsze spotyka się z właściwym podejściem.

Pomimo postępującego rozwoju mechaniki gruntów przyjmowane często w rozwiązaniach praktycznych wartości kąta tarcia wewnętrznego nadal nie są wystarczająco uzasadnione. Przykładem z tego zakresu może być norma (PN – 81/ B – 03020), na podstawie której, jak można oceniać, obecnie w Polsce wymiaruje się ok. 80% fundamentów i innych konstrukcji geotechnicznych. Podane w normie wartości kątów tarcia dla drobnoziarnistych gruntów niespoistych są mocno zaniżone. Zróżnicowanie nierówności powierzchni cząstek, jak wykazano w p. 6.1 niniejszej pracy, w pewnym stopniu zostaje uwzględnione w zmienności stopnia zagęszczenia. Nie znalazło to właściwego potwierdzenia w parametrach normowych. Różnice pomiędzy najniższymi wartościami kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$  (tablice 20 i 22) zestawionymi z kątami podawanymi w normie przedstawiono na rysunku 38. Przyjęte w normie kąty tarcia piasku pylastego zaniżone są w stosunku do najmniejszych wartości uzyskanych z badań naturalnego pyłu piaszczystego (tabl. 19) o  $3^\circ - 4^\circ$ , i wartości te odpowiadają kątom tarcia drobniej uziarnionych kulek szklanych. W odniesieniu do badań o większej nieregularności cząstek popiołów kąty podane w normie są mniejsze aż o  $7^\circ - 8^\circ$ . Tak znaczące zaniżenia prowadzą do niepotrzebnego przewymiarowywania budowli.

Zagadnienia nieregularności i szorstkości cząstek są także istotne w dynamicznej wytrzymałości nawodnionych gruntów niespoistych obciążonych zarówno statycznie, jak i dynamicznie. Ma to szczególne znaczenie w problematyce wpływu drgań i trzęsień ziemi na grunty, w których wartości kątów tarcia wewnętrznego równoziarnistych zaokrąglonych piasków mogą chwilowo spadać nawet do kilku stopni (Castro, Poulos, 1977; Hyodo i inni, 1998). W zjawiskach upłynniania gruntów powstaje tzw. stan ustalony wynikający z ciągłego odkształcania się gruntu przy stałej wartości składowych naprężeń stycznego, naprężeń średniego i ciśnienia wody w porach. Powstaje on, gdy struktura gruntu jest zniszczona, odkształcenie odbywa się przy ustalonym układzie ziaren, a na wykresie odkształcenie – naprężenie wytrzymałość w tym stanie jest mniejsza od wytrzymałości krytycznej. Przykładem zaistnienia opisanych procesów była awaria zbudowanej z zaokrąglonych drobnych piasków skarpy przy elektrowni w Dychowie w 1997 roku (Wolski i inni, 1999; 2000).

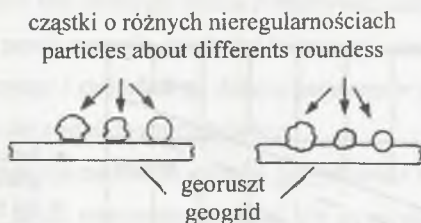


Rys.38. Porównanie wartości kąta tarcia wewnętrznego badanych pyłów piaszczystych z wartościami dla piasku pylastego podanymi przez normę PN – 81/ B – 03020

Fig.38. Comparison of internal angle shear of tested sandy – silts mixtures versus values in Polish Standard PN–81/B–03020

Właściwości powierzchni cząstek są niezwykle istotne w zagadnieniach tarcia zewnętrznego gruntu o różne materiały budowlane. Wymienić tu należy liczne doświadczenia współpracy gruntu z powierzchnią poboczniczy pali wskazujące na silne powiązanie między stanem powierzchni pała i rodzajem i stanem gruntu a zdolnością do mobilizacji tarcia. W przypadku stosowania geosyntetyków w budownictwie, a w tym w konstrukcjach z gruntu zbrojonego duże szorstkości powierzchni są wręcz wymogiem, gdyż mobilizacją tarcia rozpoczyna się ich współpraca z gruntem (rys. 39) ( Jones, 1985; Dembicki i inni, 1998; Cudny, 1998). Współoddziaływanie nierówności cząstek z nierównościami powierzchni geosyntetyków teksturowych niewątpliwie wpływa na lepszą współpracę tych materiałów.

Odrębną grupę praktycznych problemów, w których warunkowana kształtem cząstek struktura porów międzycząstkowych ma istotne znaczenie, stanowią procesy filtracji w gruntach niespoistych. Przyjmowana w obliczeniach warstw filtracyjnych średnica poru zależna jest od porowatości „n” i uziarnienia. Niekształtność i szorstkość powierzchni cząstek przy jednakowej porowatości znacząco wpływa na strukturę, por. (p. 6, 8.1.2), a tym samym na procesy filtracji (Wolski, 1987).



Rys.39. Przykłady kontaktów cząstek o zróżnicowanych kształtach z powierzchnią georusztu (wg Jones 1985)

Fig.39. Examples of contact of particles about different shaps with surface of geogrids (by Jones 1985)

W świetle przedstawionych przykładów, ukazujących najistotniejsze zagadnienia inżynierii geotechnicznej, jednoznacznie wynika, że zagadnienia wpływu kształtu cząstek na podstawowe właściwości gruntów niespoistych są ważne i powinny być nadal rozwijane. Od kilkunastu lat ten kierunek badań staje się jednym z nowych trendów w mechanice gruntów (Moore, Donaldson, 1995; Oda, Kazama, 1998; Rothenburg i inni, 1989).



## 10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Geometrycznymi cechami opisującymi kształt i powierzchnię cząstek są kulistość, nieregularność kształtów i szorstkość powierzchni. Wpływ tych cech nie był dotychczas kompleksowo badany, a na potrzeby interpretacyjne określano je szacunkowo, porównując mikroskopowe obserwacje zbiorowiska cząstek do wzorcowych kształtów stopnia kulistości i nieregularności. Szacunki te dawały jedynie pewne przybliżenia, w których realne granice najwyższej niekształtności i najwyższego stopnia szorstkości powierzchni ziaren nie były dotychczas liczbowo określane.

W interpretacjach uwzględniano najczęściej wpływy tylko jednej lub dwóch z tych cech traktowanych oddzielnie, przez co rola pozostałych była pominięta. Utrudniało to wyjaśnianie ich wpływu na mechanizm przemieszczenia się cząstek (p. 8.1.2, 8.2.2.).

Pomiary i obliczenia stopnia kulistości, nieregularności kształtów, ostrokrawędzistości naroży i szorstkości powierzchni cząstek umożliwiają kompleksowe określenie tych cech. W celu uwzględnienia połączonego ich oddziaływania zaproponowano alternatywne wprowadzenie sumarycznych wskaźników cech kształtu  $\zeta_{ocI}$  i  $\zeta_{ocII}$ . W przypadku wskaźnika  $\zeta_{ocI}$  nie uwzględniono stopnia ostrokrawędzistości cząstek, a w przypadku  $\zeta_{ocII}$  stopnia zaokrąglenia naroży (p. 5.8), gdyż parametry te charakteryzują zbliżoną właściwość. Przyjęto, że dla kulek szklanych wartości  $\zeta_{ocII}$  wynoszą 1,0, a dla najbardziej nieregularnych cząstek popiołów obliczono  $\zeta_{ocII} = 0,48$ .

W celu wydzielenia roli nieregularności kształtów i szorstkości powierzchni w procesach zagęszczania i ścinania badania wykonano na próbkach pozbawionych wody, mających takie same uziarnienia oraz bardzo zbliżony skład mineralny cząstek. Poddana analizie interpretacja zagadnień wpływu niekształtności i nierówności powierzchni cząstek na efekty ich przemieszczania podczas zagęszczania i ścinania umożliwiła ilościowe określenie wpływu ich niekształtności na zagęszczalność i wartości kąta tarcia. W badaniach serii próbek o jednokowej porowatości wykazano, że różnice wartości uśrednionych kątów tarcia wewnętrznego spowodowane zróżnicowaniem nieregularności kształtu dla przyjętego zakresu naprężeń bocznych  $0 + 300$  kPa wynoszą  $10,7^\circ$ , a dla zakresu naprężeń  $0 + 50$  kPa -  $17,5^\circ$ . W bada-

niach w stanie luźnym ( $I_D \sim 0.04$ ) różnice te wyniosły odpowiednio  $8,7^\circ$  i  $9,8^\circ$ . Poszerza to dotychczasowe rozpoznanie wpływu tak dużej i określonej liczbowo nieregularności kształtu na zmiany kąta tarcia. Przeprowadzone badania i analizy pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Warunkiem poprawnego określenia wpływu kształtu cząstek gruntów niespoistych na ich zagęszczalność są badania laboratoryjne, w których badane grunty będą suche, jednakowo uziarnione i zbudowane z mineralów o trójosiowej albo o dwuosiowej budowie siatki krystalicznej, a w przypadku określania parametrów wytrzymałości na ścinanie dodatkowo wymagane będzie zachowanie porowatości warunkującej jednakową ilość kontaktów międzycząstkowych, co odpowiada jednakowym stopniom zagęszczenia.
2. Nowym sposobem opisu szorstkość powierzchni cząstek jest zaproponowany w pracy wskaźnik szorstkości -  $I_a$ , otrzymany ze stosunku różnicy długości rzeczywistego obwodu przekroju cząstki i długości obwodu uzyskanego z obrysu jej konturów wielobokiem o powierzchni równej powierzchni przekroju, do długości obwodu wieloboku. Obliczona hipotetycznie realna najwyższa wartość tego wskaźnika wyniosła - 0,73, a najwyższa wartość pomierzona dla rzeczywistej cząstki popiołu - 0,89. Metoda pomiaru jest zbliżona do sposobu wyznaczania wymiaru fraktalnego.
3. Wprowadzony w pracy wskaźnik cech kształtu cząstek  $\zeta_{ocII}$ , uwzględniający stopień kulistości, stopień nieregularności kształtów i wskaźnik szorstkości powierzchni, znacznie dokładniej charakteryzuje ich kształty od powszechnie stosowanych wzorcowych tablic Krumbeina i uwzględnia pomijaną dotychczas szorstkość powierzchni. Wskaźnik  $\zeta_{ocII}$  jest bardziej reprezentatywny od wskaźnika  $\zeta_{ocI}$ , uwzględniającego, zamiast stopnia zaokrąglenia naroży, stopień nieregularności kształtu.
4. Wzrost nieregularności kształtów i powierzchni cząstek powoduje znaczące zmiany wartości maksymalnego, jak i minimalnego wskaźnika porowatości. Nierówności utrudniają przemieszczanie się ziaren i ograniczają liczbę ich wzajemnych miejsc styku. Zmniejszenie sumarycznego wskaźnika cech kształtu cząstek  $\zeta_{ocII}$  od jedności do 0,48 było powodem zwiększenia maksymalnej porowatości o 12% oraz zwiększenia minimalnej porowatości w warunkach maksymalnego zagęszczenia o 14%. Wykazana zmienność kształtów i powierzchni cząstek powoduje, że przy jednakowym wskaźniku porowatości - 0,65 największe różnicowanie stopnia zagęszczenia wynosi aż o 0,95.

5. Obliczenie uśrednionej wartości kąta tarcia wewnętrznego z krzywoliniowej obwiedni kół Mohra do określonego zakresu naprężenia  $\sigma_3$  wymaga wyznaczenia tzw. wyjściowej wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_B$ , która była nieco mniejsza od  $\Phi_{cv}$  i większa od kąta odpowiadającego wytrzymałości trwałej. Uzyskane wartości  $\Phi_B$  w badaniach kulek szklanych wyniosła  $28^\circ$  i była tylko o 2 stopnie większa od kąta tarcia wewnętrznego naturalnie gładkich powierzchni kwarcu. Kąt ten wzrastał wraz ze zmniejszaniem wskaźnika  $\zeta_{ocII}$ , uzyskując największą wartość  $35^\circ$  w badaniach pyłu piaszczystego z Granicznej. W badaniach popiołu pomimo mniejszego wskaźnika  $\zeta_{ocII}$  wartość kąta  $\Phi_B$  była mniejsza, co można wyjaśnić nietrwałością termicznie uformowanych nierówności powierzchni agregatów, które przy dużych przemieszczeniach w płaszczyźnie ścięcia ulegały częściowemu skruszeniu.
6. W badaniach przy jednakowym stopniu zagęszczenia warunkującym we wszystkich gruntach prawdopodobną jednakową ilość kontaktów międzycząstkowych uzyskano wartości kąta tarcia wewnętrznego zbliżone do wartości krytycznych. Ze spadkiem wartości  $\zeta_{ocII}$  od jedności do 0,48 następował wzrost  $\Phi_{cv}$  rzędu  $8^\circ - 9^\circ$ . Jest to efektem obrotowego przemieszczania się ziaren w stanie porowatości zbliżonej do krytycznej, gdyż występy i nierówności nieregularnych cząstek nadal wywołują ich wzajemne zahaczanie wymuszające ruchy obrotowe. Potwierdzono tym samym, że wartość  $\Phi_{cv}$  zależna jest także od naprężeń  $\sigma_3$  i początkowej porowatości próbek.
7. Krzywizny obwiedni kół Mohra spowodowane są głównie wielkością efektywnych naprężeń  $\sigma_3''$  działających w miejscach kontaktu cząstek i zależą od naprężeń  $\sigma_3$ . Przy niskich wartościach  $\sigma_3$  efektywne naprężenia normalne przekazywane są na stosunkowo niewielką liczbę styków, stąd współczynniki tarcia w kontaktach międzycząstkowych są duże. Przyłożenie większych naprężeń  $\sigma_3$  powoduje kruszenie nierówności cząstek w miejscach styku i nieznaczne dogęszczenie próbek, co w wyniku zwiększenia liczby kontaktów międzycząstkowych zmniejsza współczynnik tarcia. Z tego powodu najmniejszą krzywiznę obwiedni uzyskano w przypadku badań kulek szklanych, gdzie kulistość i gładkość cząstek umożliwia powstanie większej powierzchni styków, a największą z badań popiołu.
8. Krzywizny obwiedni Mohra uzyskiwane w warunkach badań porowatości krytycznej są głównie wynikiem działania efektywnych naprężeń bocznych. Wzrost  $\sigma_3''$  powoduje zmniejszenie porowatości krytycznej, co w następstwie wywołuje zwiększenie ilości styków, powodując obniżenie wartości kąta tarcia. W przedziale  $\sigma_3$  10 – 300 kPa różnica



efektów spowodowanych głównie tym zjawiskiem uzyskanym w badaniach kulek szklanych i popiołów wynosi  $4,6^\circ$ . W warunkach badań o stałej porowatości, gdy dochodzi efekt zagęszczenia, różnica ta wyniosła  $10,8^\circ$ .

9. Wraz ze zmniejszaniem się wskaźnika cech kształtu  $\zeta_{ocII}$  od 1,0 do 0,48 stwierdzono zwiększanie się wartości zarówno stycznego ( $\Phi$ ), jak również uśrednionego kąta tarcia wewnętrznego ( $\Phi_s$ ). W badaniach próbek w warunkach jednakowej porowatości, w zakresie małych naprężeń  $\sigma_3$  od zera do 10 kPa, wzrost wynosi  $21,8^\circ$ , a w szerszym przedziale od zera do 300 kPa - 10 stopni. W stanie luźnym różnice te wynoszą ok.  $8,5^\circ$ . Podawane w literaturze różnice dla szacowanych nieregularności kształtów i nierówności powierzchni powodują zmiany kąta nie przekraczające 9 stopni.
10. Nieregularność i szorstkość cząstek wpływa na przebieg zmian objętościowych próbek w badaniach trójosiowego ściskania. W warunkach jednakowej porowatości próbki z gruntów o regularnych i gładkich powierzchniach wykazały większe dogęszczenie niż próbki gruntów o powierzchniach nieregularnych i szorstkich. Mniejsze opory ruchu kulek umożliwiły uzyskanie  $e = 0,65$  już przy  $I_D = 0,03$ . W warunkach jednakowego stopnia zagęszczenia przyłożenie naprężeń w procesie konsolidacji i ścinania w większym stopniu powodowało proces dogęszczania w gruntach, w których niekształtności cząstek utrudniały wcześniejsze samozagęszczenie. Proces konsolidacji naprężeniem 100 kPa zwiększył stopień zagęszczenia od 0,03 w gruncie o  $\zeta_{ocII} = 1,0$  do 0,06 w przypadku  $\zeta_{ocII} = 0,48$ .
11. Zagęszczone grunty o nieregularnych kształtach i szorstkich powierzchniach cząstek, w których wartości wskaźnika nieregularności kształtów  $\zeta_{ocII}$  były mniejsze od 0,58, wykazały w badaniach trójosiowego ściskania i jednoosiowego rozciągania próbek zdolność do przenoszenia niewielkich wartości naprężenia rozciągającego. Obwiednie Mohra wyznaczały na osiach naprężeń stycznych wartości „spójności strukturalnej” wynikającej z postępującego ząębienia się cząstek, której wartość w przypadku pyłu piaszczystego z Granicznej wyniosła 3 kPa, a w przypadku popiołu 4 kPa.



## LITERATURA

- Acar Y., Durgunoglu H., Tumay M.: 1982, Interface properties of sand, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, no 4, p. 648-654.
- Andresen A., Simons N.: 1960, Norwegian triaxial equipment and technique, *Proceedings Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, ASCE, p. 685-709.
- Barański T., Garbulewski K., Lechowicz Z., Szymański A.: 1985, Badania laboratoryjne i dobór parametrów do obliczeń, *Konferencja Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN nt. Badanie i dobór parametrów geotechnicznych*, Jabłonna.
- Barden L., Khayatt A.: 1966, Incremental strain rate ratios and strength of sand in the triaxial test, *Geotechnique*, no 4, p. 338-357.
- Bastian S.: 1980, *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*, Arkady, Warszawa.
- Begemann H., Coning H., Lindenberg I.: 1989, Critical density of sand, *Proceedings XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, Vol., 1 p. 43-46.
- Bell F. and contributors: 1987, *Ground Engineer's Reference Book*, Butterwords, London, Boston, Durbon, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington.
- Berezantzew, V: 1967, Certain results of investigation on the shear strength of sands, *Proceedings Geotechnical Conference, Oslo 1967*, Vol. 1, p. 167-169.
- Berre T.: 1981, *International codes of soil engineering practice for triaxial compression Tests*, NGJ, Oslo.
- Bietienihtin A.G.: 1955, *Podstawy mineralogii*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Bishop A., Eldin G.: 1953, The effect of stress history on the relation between  $\phi$  and porosity in sand, *Proceedings 3-rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Zurich Vol. 1*, p. 100-105.
- Bishop A., Green G, Garga V, Andresen A, Brown J.: 1971, A new ring shear apparatus and its application at measurement of residual strength, *Geotechnique* 21. p. 273-328.

- Bishop A., Henkel D.: 1962, The measurement of soil properties in the triaxial tests, London.
- Bishop A.: 1966. The strength of soils as engineering materials, Sixth Rankine Lecture Geotechnique, Vol. 16, no 2, p. 91-130.
- Bishop A, Bjerrum L., 1960, The relevance of the triaxial tests to the solution of stability problems, Proc. Research Conference Shear Strength of Cohesive Soils, ASCE, p. 503 –532.
- Bjerrum L.: 1954, Theoretical and experimental investigations on the shear strength of soils, Academies Trykningsentral, no 5, Oslo.
- Blight M.: 1976, Cavity expansion in sands with curved envelopes, Journal of the Geotechnical Engineering Division, no 11, p. 1131-1147.
- Bobolewski A., Parachamiak W.: 1974, Petrografia, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Bora K.: 1984, Shear failure in granular media, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 110, no 5.
- Broś B., 1975, The early development of soil testing equipment and methods, Norwegian Geotechnical Institute, Terzaghi Library, - International Report, Oslo.
- Broś B., Orzeszyna H.: 1979, The influence of particles angularity and surface roughness on engineering properties of sands, Proceedings European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton, Vol. 2 p. 11-14.
- Broś B.: 1998, Wpływ mechaniki gruntów na rozwój inżynierii geotechnicznej, Inżynieria i Budownictwo, nr 11, s. 595-601.
- Campanum de Carvalho J., Crispel J., Mieussens C, Nardone A.: 1987, La reconstruction des éprouvettes en laboratory, Theory et pratique opératoire, Rapport de Recherché Laboratories Central des Ponts et Chaussées, no 145, Toulouse.
- Chang Cing S.:1985, Dilatancy modelling for granular sand in simple shear condition, XI ICSMFI, San Francisco, Vol. II, p. 419-422.
- Castro G., Poulos J.: 1977, Factors affecting liquefaction and cyclic mobility, Journal of the Geotechnical Engineering Division, No.6, p. 501 – 516.
- Chlebowski R., Pinińska J., Wysokiński L.: 1973, Budowa wewnętrzna popiołów i jej wpływ na własności popiołu jako materiału konstrukcyjnego, Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych, Sympozjum Częstochowa, s. 47-49.

- Cudny M.: 1998, Badanie kontaktu gruntu niespoistego z geomembranami teksturowymi przy obciążeniach monotonicznych i cyklicznych, maszynopis, praca doktorska, promotor E. Dembicki.
- Dembicki E., Cichy W., Cudny M.: 1998, Frictional reliability of textured geomembranes, Proc. 3 rd Internattional Congress on Enviromental Geotechnics, Vol.1, p. 341 – 346 Lisbona, Portugal.
- Dąbrowski A., Gnot S., Michalski A., Srzednicka J.: 1993, Statystyka, 15 godzin z pakietem statgraphics, Wydawnictwa Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- Dec T.: 1977, Mechanika gruntów. Część II. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa.
- Derski W., Izbicki R., Kisiel I., Mróz Z.: 1982, Mechanika gruntów i skał, PWN, Warszawa.
- Duber A.: 1983, Wpływ częściowego zastąpienia cementu popiołami lotnymi z węgla kamiennego na skurcz betonów hydrotechnicznych, (praca doktorska maszynopis), Instytut Budownictwa Wodnego i Ziarnego Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- Dziedzic K., Kozłowski S., Majerowicz A., Sawicki L.: 1979, Surowce mineralne Dolnego Śląska, PWN, Wrocław – Warszawa.
- Felix B.: 1982, Systeme de mesure de deformation radiales pour eprouvettes de sol, Bulletin Liaison des Laboratorie des Pont et Chaussées, no 121, p. 125 –127.
- Frossard A.: 1979, Effect of sand grain shape an interparticle friction, indirect measurements by Rowe's stress dilatancy theory, Geotechnique, no 3. p. 341-350.
- Gonzales Moradas M., Gonzales Canibana J., Torres Alanso M.: 1990, The effect of particle Morphology on coal waste behaviour, Conference on Reclamation treatment and utilisation of coal mining wastes, Balkema, Rotterdam, p. 445-457.
- Grabowska-Olszewska B.: 1980, Metody badań gruntów spoistych, praca zbiorowa, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Green G., Bishop A.: 1969, A note on the drained strength of sand under strain conditions, Geotechnique, p. 144-149.
- Griffiths D.: 1990, Failure criteria interpretation bases on Mohr-Coulomb friction, Journal of Geotechnical Engineering, no 6, p. 986-999.
- Gryczmański M.: 1995, Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów, Komitet Inżynierii Lądowej PAN, IPPT PAN, Warszawa.

- Gruntoznawstwo, 1977, Praca zbiorowa:, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.
- Haar M.: 1977, Mechanics of Particulate Media, Printed and Bound in the USA.
- Hambley E., Roscoe K.: 1969, Proceedings 7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, p. 173-181.
- Hansen B.: 1979. Definition and use of friction angles Proceedings ECSMFE, Brighton 1979, Vol. 1, p. 173-176.
- Harden B.: 1989, Love stress dilatation test, Journal of Geotechnical Engineering Vol. 115, no 6, p. 769-787.
- Head K.: 1986, Manual of soil laboratory testing, Vol. 3, Pentech Press, London.
- Head K.: 1994, Manual of soil laboratory testing, Vol. 2, Pentech Press, London.
- Herdan G.: 1953, Small particle statistics, Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
- Homand - Etienne F., Rapin H., Song Y.: 1989, Effect of aggregates angularity on granular material behaviour, Powders and Grains, Biarez and Gourvès(eds), Balkema, Rotterdam p. 135-141.
- Horn H, Deere M.: 1962, Frictional characteristics of minerals, Geotechnique 12, no 4, p. 319- 335.
- Hyodo M., Hyde A., Aramaki N.: 1998, Liquefaction of crushable soils, Geotechnique 48, no 4, p. 527 – 543.
- Intermingles Co. Ltd.: Prospect handlowo-technologiczny produkcji kulek szklanych, Wałbrzych, 1993.
- Izbicki R., Mróz Z.: 1976, Metody nośności granicznej w mechanice gruntów i skał, PWN, Warszawa.
- Jakobsen B.: 1957, Proceedings 4-th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering. London, Vol. 1, p 167-171.
- Jamiołkowski M., Ladd C., Germaine J., Lancollotta R.: 1985, New developments in field and laboratory testing of soils, Proceedings of the XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 1 p, 57-153.
- Jones C. : 1985 Earth reinforcement and soil structures, Butterworths, London.
- Jürgenson, L.: 1934, The shearing resistance of soils, J. Bastion, Society Civil. Engineers, 21, p. 242-275.
- Kabai: 1968, The Compatibility of sands and sandy gravel's, Proceedings of the 3-rd Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering p. 115-126.



- Kézdi A.: 1979, Soil Physics, Academia Kiadó, Budapest.
- Kirpartrick W.: 1957, The consolidation of failure for sands. Proceedings IV International Conference Soil Mechanics Foundation Engineering London, Vol. 1 p. 172-178.
- Kisiel I., Dmitruk S., Lysik B.: 1969, Zarys reologii gruntów, Arkady, Warszawa.
- Kisiel I., Lysik B.: 1966, Zarys reologii gruntów, Arkady, Warszawa.
- Ko, H., Scott R.: 1968, A new saff testing apparatus, Geotechnique, Vol. 17, p. 40-59.
- Koerner R.: 1970, Effect of particle characteristics on soil strength, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, no 4, p. 1221-1234.
- Koerner R.: 1970a, Behaviour of single mineral soils in triaxial shear, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, no 4 p. 1373-1390.
- Kolbuszewski J.: 1948, An experimental study of the maximum and minimum porosities of sands, Proceedings 2-nd International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, Rotterdam p. 158-165.
- Kolbuszewski J.: 1965, Sand particles and their density, Lecture given to the materials science, Club's Symposium on Densification of Particulate Materials, London.
- Kolbuszewski J.: 1967, Porowatość graniczna, Wykład SGGW w Warszawie.
- Konrad I.: 1990, Minimum underlined strength of two sands, Geotechnical Journal Engineering, no 6, p. 932-947.
- Korfantis G., Manikopoulos C.: 1982, Correlation of maksimum dry density and grain size, Journal of Geotechnical Division, no 9, p. 1171-1176.
- Kościszewska - Musiał G.: 1988, Surowce mineralne czwartorzędu, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Kowalski J.: 1998, Hydrogeologia z podstawami geologii, Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu.
- Krysiecki W. i inni.: 1986, Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach, część II. PWN, Warszawa.
- Lambe T., Whitman R.: 1977, Mechanika gruntów, t.1. Arkady, Warszawa.
- Lee J.: 1974, Soil Mechanics - New Horizons Newness Butterworths, London.
- Lee K., Seed B., Dunlop, P.: 1967, Effect of moisture on the strength of a clean sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, no 6, p. 17-40.
- Lee K., Seed H.: 1967, Drained strength characteristics of sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, no 6, p. 117 - 141.

- Lees G.:1964, New method for determining the angularity of particles, *Sedimentology* 3, p. 2-21.
- Leonards G.,Bailey B.: 1982,Pulverized coal ash as structural fill, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, no 4, p.517 – 531.
- Maksimovic M.: 1989, Nonlinear failure envelope for coarse grained soils. *Proceedings of the XII Conferse on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio do Janeiro*, vol. 1 p. 731-734.
- Maksimovic M. 1989a, Nonlinear failure envelope for soils, *Journal Geotechnical Engineering* no 4. p. 581-586.
- Matsoul T., Ito T., Mitchell J., Abe N.: 1978, Microscopic study of shear mechanisms in soils, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, no 2, p. 137-152.
- Mielentiew W.:1978, *Zołoszłakowyje materiały i zołootwały*, *Energia*, Moskwa.
- Moore C.,Donaldson C.:1995, Quantifying soil microstructure using fractals, *Géotechnique*, no 1, p. 105 – 116.
- Mosiejenko J.: 1977, *Praca nad wykorzystaniem popiołów lotnych do produkcji popiołoporytu, Kierunki i możliwości stosowania popiołów lotnych w Polsce*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa.
- Nascimento U.: 1985, Lubricant and antilubricant effects of water, *Proceedings International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco*, Vol. 4, p. 707-709.
- Nash N.: 1953, The shearing resistance of fine cloy graded sand, *Proceedings of the 3-rd Internarnational Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Zurich*, Vol. 1, p. 160-164.
- Neema D., Patel A, Sharade B.: 1990, Physical and statistical models for bulking of sand, *Geotechnical Testing Journal*, no 2, p. 115-124.
- Negussey W., Wijewickreme K., Vaid P.: 1988, Constant – volume friction angle of granular materials, *Canadian Geotechnical Journal*, no 25, p. 50 – 55.
- Newmark N.: 1960, Failure hypoteses for soil, *Proc. Research Conference Shear Strength of Cohesive Soils*, ASCE, p. 17 –32.
- Norma PN/86/B/02480.: *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.*
- Norma PN/88/B/04481.: *Grunty budowlane. Badania próbek gruntów.*
- Norma PN/81/B 03020 : *Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli.*

- Novello E., Johnston I.: 1995, Geotechnical materials and the critical state, *Geotechnique*, no 2, p. 223 – 235.
- Oda M.: 1977, Co – ordination number and its relation to shear strength of granular material, *Soil and Foundation*, no 2, p. 29-42.
- Oda M., Kazama H.: 1998, Microstructure of shear band and its relation to the mechanism of dilatancy and failure of dense granular soils, *Geotechnique* 48, no 4, p. 465 – 481.
- Oda M., Konishi J., Nemat – Nasser S.: 1980, Some experimentally based fundamental results on the mechanical behaviour of granular materials, *Geotechnique* 30, no 4, p. 479 – 495.
- Ovando - Shelley E.: 1989, Undrained triaxial tests on glass balloting, *Powders and Grains*, Balkema, Rotterdam, p. 163-168.
- Paprocki J.: 1972, Stosowanie popiołów lotnych do betonów, *Wytyczne Instytutu Techniki Budowlanej*, Warszawa.
- Parylak K.: 1979, Wytrzymałość na ścinanie niestabilizowanych i stabilizowanych wapnem popiołów z węgla kamiennego jako materiału do nasypów konstrukcyjnych, praca doktorska - maszynopis, Instytut Budownictwa Wodnego i Ziarnego Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław.
- Parylak K.: 1984, Wytrzymałość na ścinanie niestabilizowanych i stabilizowanych wapnem popiołów z węgla kamiennego jako materiałów do nasypów konstrukcyjnych. *Archiwum Hydrotechniki*, z. nr 1-2, s. 137-152.
- Parylak K.: 1987, Wpływ budowy popiołów z węgla kamiennego na kształtowanie się ciśnienia porowego w badaniach trójosiowego ściskania, *Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania*, t.1, Wrocław, s. 99-104.
- Parylak K.: 1988, Badanie zmienności gęstości właściwych popiołów osadzonych na drodze ich sedymentacji w mokrym składowisku, *Archiwum Hydrotechniki*, nr 3-4, s. 365-374.
- Parylak K.: 1996, Badania nad przydatnością metod adsorpcyjnych do pomiaru powierzchni właściwych gruntów niespoistych, *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu*, nr 306, *Inżynieria Środowiska*, s 183 – 190.
- Parylak K.: 1990, Wpływ struktury cząstek popiołu i piasku na ich zagęszczalność, *IX Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania*, t.1, Kraków, s. 213-218.

- Parylak K.: 1992, Influence of particle structure on properties of fly ash and sand, International Conference on Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, Vol. 2, New Orleans, p. 1031-1041.
- Parylak K.: 2000, Badania wytrzymałości gruntu na rozrywanie, Materiały Jubileuszowej Sesji Naukowej prof. E. Dembickiego, Geotechnika w Budownictwie i Inżynierii Środowiska Politechnika Gdańska, s. 269 – 275.
- Piaskowski A.: 1984, Właściwości sorpcyjne i powierzchnia właściwa polskich gruntów, Badania nad sorpcją błękitu metylowego, Archiwum Hydrotechniki, z. 3, s. 297-314.
- Pieczyrak J.: 1981, Propozycja klasyfikacji kształtu i stopnia obtoczenia okruchów skalnych, Archiwum Hydrotechniki, z. 4, s. 657-665.
- Poran C., Ahtchi-Ali F.: 1989, Properties of solid waste incinerator fly ash, Journal of Geotechnical Engineering no 8, p. 1118-1133.
- Procter D., Barton R.: 1974, Measurements of the angle of interparticle friction, Géotechnique 24, no 4, p. 581-604.
- Rolla S.: 1979, Badania materiałów i nawierzchni drogowych, WKŁ, Warszawa.
- Roscoe K., : 1953, An apparatus for the application of simple shear to soil samples, Proc. 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol 1, p.186 – 191.
- Roscoe P.: 1962. The stress – dilatancy relation for static equilibrium of assembly of particles in contact, Proc. Royal Society of London, p.500 – 527.
- Rothenburg R, Bathurst R, Matyas E.: 1989, Mechanism of fabric evolution in granular media, XII ICSMFI, Rio do Janeiro, Vol. 1 p. 753-756.
- Saada A., Townsend F.: 1980, State of the art.; laboratory strength testing of soils, Special Technical Publication 740, ASTM, Chicago.
- Schanz T., Vermer P.: 1966, Angles of friction and dilatancy of sand, Géotechnique, no 1, p.145 – 151.
- Schlosser F.: 1984, Elements de mécanique des sols, Paris.
- Seed B., Lee K.: 1967, Undrained strength characteristics of cohesionless soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, no 6, p. 333 – 359.
- Skarżyńska K., Burda H., Kozielska - Sroka E., Michalski P.: 1987, Laboratory and site investigations on weathering of coal mining wastes as fill material in earth structures, Reclamation Treatment and Utilization of Coal Mining Wastes, ed. by A. Rainbow, Elsevier Science Publishers, Amsterdam.



- Skinner A.: 1969, A note on the influence of the interpretation of friction on the shearing strength of a random assembly of spherical particles, *Geotechnique* 19, p. 150 – 157.
- Stebnicka - Kalicka I.: 1974, Rozmieszczenie składników w poszczególnych frakcjach popiołów lotnych, Z badań nad strukturą materiałów budowlanych, *Prace ITB*, Warszawa.
- Stępkowska E., Wala D.: 1977, Zastosowanie testu sorpcyjnego do oznaczania powierzchni właściwej i innych cech kaolinów, *Archiwum Hydrotechniki*, z. 1, s. 65-80.
- Stępkowska E.: 1972, Oznaczanie powierzchni właściwej minerałów ilowych, (Przegląd literatury), *Rozprawy Hydrotechniczne*, z. 30, s. 119-153.
- Stępkowska E.: 1977, Test sorpcyjny i możliwości jego stosowania w różnych badaniach, *Archiwum Hydrotechniki*, z. 3, s. 411-420.
- Stilger – Szydło E.: 1993, Stany graniczne skarp i zboczy, *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej* nr 64, Monografia.
- Suchnicka H.: 1997, Wytrzymałość gruntów – opis i badania, XI Krajowa Konferencja Mechaniki Gruntów i Fundamentowania, t. III, Gdańsk, s. 47-74.
- Sutherland H., Neal F.: 1968, Determination of the shape factor of sands, *Proceedings of the 3-rd Budapest Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, p. 288-304.
- Szymański M.: 1973, Struktura i właściwości fizyko-mechaniczne popiołów węglowych elektrociepłowni, Ostrołęka, Składowanie i zagospodarowanie odpadów energetycznych i hutniczych, *Symposium Częstochowa*, s. 59-71.
- Taylor D.: 1956, *Fundamentals of soil mechanics*, Willey, Ninth Print, New York.
- Thijas de Henau M.: 1985, Controle de compacite d'un remblai en cendre volantes, *Proceedings XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol. 2, p. 867-870.
- Tschebotarioff G.P., Welch J.D.: 1948, Lateral earth pressures and friction between soil minerals, II International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, Vol. Vb, p. 135-138.
- Whalley W.: 1980, Discussion on the effect of sand grain shape on interparticle friction indirect measurements by Rowe's stress dilatancy theory, Vol. 1, *Géotechnique*, p. 161-165.
- Wiłun Z.: 1987, *Zarys geotechniki*. WKiŁ, Warszawa.

- Winnicki J.: 1990, *Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski*, Arkusz Trzebnica, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Wolski W.: 1985, *Modele i charakterystyki gruntów*, Konferencja Komitetu Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN nt. *Badanie i dobór parametrów geotechnicznych*, Jabłonna.
- Wolski W.: 1987, *Filters. Raport general Proceedings of the IX European Conference of Soil Mechanics and Foundatoin Engineering*, Dublin, Vol. 3, p. 1351 – 1366.
- Wolski W., Furstenberg A. Lipiński M.: 1999, *Czy można było przewidzieć awarię skarpy przy elektrowni wodnej Dychów*, *Gospodarka Wodna*, nr 8, str. 284 – 290.
- Wolski W., Lipiński M., Fustemberg A. Barański T.: 2000, *Influence of internal erosion on safety of old dams, Filters and Drainage in Geotechnical and Enviromental Engineering*, Wolski & Młynarek (eds), Balkema, Rotterdam.
- Wroth C., Houlsby G.: 1985, *Soil Mechanics – Property characterization and analysis procedures*, *Proceedings XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol. 1, p. 1-55.
- Wu S., Gray D., Richard F.: *Capillary effects on dynamic modulus of sands and silts*, *Journal of Geotechnical Engineering* Vol. 110, no 9, p. 1188-1203.
- Vallejo L.: 1995, *Fractal analysis of granular materials*, *Géotechnique*, no 1, p.159 – 163.
- Vesić A, Clough A.: 1969, *Behaviour of granular materials under high stresses*, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, no 5, p. 661-687.
- Yoshimi Y., Kishida T.: 1981, *A ring torsion apparatus for ewaluting frictien between soil and metal surfaces*, *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 4, no 4.
- Zeller J., Wullimann R.: 1957, *The shear strength of the shell materials for the Goschenalp Dam, Switzerland*, *Proceedings 4-th International Conference on Soif Mechanics and Foundation Engineering*, London, Vol. II, p. 399-404.

# CHARAKTERYSTYKA KSZTAŁTU CZĄSTEK DROBNOZIARNISTYCH GRUNTÓW NIESPOISTYCH I JEJ ZNACZENIE W OCENIE WYTRZYMAŁOŚCI

## Streszczenie

W spotykanych w literaturze studiach i badaniach kształtu i nieregularności nie przedstawiono dotychczas propozycji liczbowego wyrażenia cech geometrycznej struktury cząstek jednoparametrowym wskaźnikiem. W opisach używane są ogólne i subiektywnie wprowadzane określenia, jak np. cząstki kuliste, wydłużone, płaskie lub zaokrąglone, dobrze zaokrąglone, nieregularne. W ocenach szorstkości powierzchni - gładkie lub chropowate. Trochę dokładniejszym sposobem są opracowane przez Krumbeina wzorcowe tablice kształtów i zaokrąglenia powierzchni. Stąd wielu autorów podkreśla potrzeby badań w tym kierunku (Bell i inni, 1987; Homand - Etienne i inni, 1989). Badania ostatniego dziesięciolecia to rozwój zagadnień wymiaru fraktalnego, który daje możliwości dokładnego, ale skomplikowanego sposobu pomiaru nierówności powierzchni.

W niniejszej pracy wykonano badania stopnia kulistości, stopnia zaokrąglenia naroży, ostrokrawędzistości cząstek i szorstkości. Pomiarów cech kształtu wykonano na mikroskopowych zdjęciach o 300- i 700- krotnym powiększeniu. Szorstkość powierzchni określono zaproponowanym przez autora sposobem pomiaru wskaźnikiem -  $I_a$  (wzór 9). Wprowadzono wskaźniki nieregularności kształtów cząstek  $\zeta_{ocI}$  i  $\zeta_{ocII}$  uzyskane z obliczonych średnich wartości wymienionych cech. Wykazano, że stosowane w dalszych interpretacjach wartości wskaźnika  $\zeta_{ocII}$  zmieniają się od 1,0 dla kulek szklanych do 0,58 dla nieregularnych cząstek popiołów.

Badania zagęszczalności i wytrzymałości na ścinanie wykonano na 4 suchych gruntach o jednakowym uziarnieniu, zbliżonym składzie mineralnym i zróżnicowanej powierzchni. Różnice  $e_{max}$  i  $e_{min}$  powodowane nieregularnością i szorstkością cząstek jednakowo uziarnionych gruntów wyniosły 12% i 14% (rys. 15). Wykazano także, że zmienność  $\zeta_{ocII}$  o 0,42 przy

wskaźniku zagęszczenia 0,65 powoduje zmianę stopnia zagęszczenia o 0,95. Różnice te powodowane były nierównościami powierzchni cząstek, utrudniającymi ich wzajemne przemieszczanie.

Badania wytrzymałości na ścinanie każdego gruntu wykonano w aparacie trójosiowego ściskania w zakresie naprężeń  $\sigma_3$  1 – 200 kPa w dwóch seriach. W pierwszej, wszystkie próbki zagęszczono do jednakowej porowatości początkowej. W drugiej serii badano je w stanie luźnym, tj. o jednakowym wskaźniku zagęszczenia  $I_D = 0,03 - 0,06$ . Kąty tarcia interpretowano metodą stycznych do obwiedni kół Mohra (tabl. 19) i metodą uśrednionej wartości kąta  $\Phi_s$  określonej wzorem Maksimovica (tabl. 20). Zmienność uśrednionej wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\Phi_s$  powodowana kształtem i nieregularnością powierzchni cząstek dla zakresu naprężeń  $\sigma_3 = 0 - 300$  kPa przy wskaźniku porowatości 0,65 wynosiła  $10,1^\circ$ , a w stanie luźnym  $8,7^\circ$ . W tym drugim przypadku uzyskane wyniki odpowiadają wytrzymałości na ścinanie w warunkach stanu krytycznego. Przyrosty wartości kąta tarcia są efektem obrotowego przemieszczania się cząstek, które w stanie krytycznym nie powinno mieć miejsca. Powoduje to zahaczanie się występow nierówności cząstek, co wymusza ruchy obrotowe. Krzywizny obwiedni Mohra są wynikiem efektu mniejszej ilości kontaktów międzycząstkowych, co powodowane jest zróżnicowaniem kształtów i nierówności powierzchni.

Podawane w literaturze różnice kątów tarcia dla szacowanych nieregularności cząstek nie przekraczają  $9^\circ$ . Badania wykazały, że różnica ta jest wyraźnie większa i zależna od wartości składowej naprężeń normalnych.

Próbki o jednakowej porowatości badano także na rozrywanie. Uzyskane wyniki potwierdziły małe wytrzymałości na rozrywanie, które w popiołach dały odciętą spójności 4 kPa, a w gruncie o niższej nieregularności cząstek (pył piaszczysty z Granicznej) – 3 kPa.

Przedstawione zagadnienia mają duże znaczenie praktyczne (p. 9), a liczbowe określenie stopnia nieregularności cząstek umożliwi kwalifikację przydatności gruntów w różnych zagadnieniach geotechniki.



## CHARAKTERISTIC OF PARTICLES SHAPE OF FINE - GRADED COHESIONLESS SOILS AND ITS SIGNIFICANCE IN STRENGTH ASSESSMENT

### Summary

In investigations of particles shapes, degree of angularity and roundness presented in many papers, there is no proposition of these parameters determination by single index. In practical tests only visuals and general qualification like: sphere, bulky, flakey and elongated are used to define these parameters. Surfaces of particles are also described by such visual names as: rounded, well rounded, angular, or subangular. More exact are standard charts, describing degree of sphericity and roundness of particles, which were introduced by Rittenhouse's and Krumbein's in 1941. The roughness of surfaces is also defined visually, and described as smooth or rough.

That is why many authors claim that there is necessity of making tests in this direction (Bell and all.,1989; Homand - Etienne and all., 1989). In last years fractal dimension problems were investigated, which has resulted in more exact, but complicated measurement methods of surfaces unevenness has allowed to develop.

Degrees of sphericities, roundness, angularity and roughness of particles were analyzed in this paper. Sphericity, roundness and angularity were tested with Wadell's and Lees'es methods (Lees 1964). Roughness of particles and aspheryity index were determined methods proposed by the author (formula 9). These parameters of particles were determined on the base of microscopy photographs made by 300 and 700 x magnification. Total index of shapes and angularity of particles surface  $\zeta_{ocI}$  and  $\zeta_{ocII}$  were introduced (formulas 11, and 12). These indexes were next used for interpretations of the tests.

Values  $\zeta_{ocII}$  obtained for tested materials varied from 1,0 for glass ballotini to 0,58 for irregular fly ash particles.

The compatibility and shear tests were carried out on four oven dry sandy – silt mixture materials which have very similar mineralogical composition, the same grain size distribution, and mostly different shapes and surfaces. Extreme differences between values for tested soils reached 12% for  $e_{\max}$  and 14 % by  $e_{\min}$  which was evoked by different smoothness of particles (fig.15). These have proved, that extrema difference between  $\zeta_{\text{ocll}}$  values is 0,42, caused much grater difference ( 0,95) between extreme  $D_r$  values. These differences were caused by smoothness of particles surfaces, which make difficult they rearrangement.

Shear strength tests in triaxial apparatus in stress range from 1 kPa to 200 kPa, were performed. They were carried out in two main series i.e. by the same initial porosity, and in the same initial relative density. The angles of internal friction were interpreted by lines tangent to Mohr's envelope. They were determined by formulas of median angels proposed by Maksimovic (tab. 19, 20). Variability of median angles of internal friction tested in stress range 0-300 kPa, is caused by changes of shapes and surfaces of particles described by  $\zeta_{\text{ocll}}$ , which varied from 1,0 to 0,58, and by constant void ratio 0,65 was 10,1°. The results obtained from tests in loose state (relative density  $D_r = 0,03$ ), gave  $\Phi_s$  different about 8,7°. In the second case results are near or equal of angles in critical state  $\Phi_{\text{cv}}$ . Increase of angle of internal friction in critical state versus decreasing  $\zeta_{\text{ocll}}$  index are caused by rotational rearrangement of particles, which theoretically should not be observed in this state. It is caused by grate hooking of particle projections, which caused volumetric changes in plane shearing. Obtained curvatures of Mohr's envelope are caused mainly by differences of confining pressure  $\sigma_3$ , which influenced compaction and number of interparticle contacts in samples.

The bigger curvatures were observed in soils, which index  $\zeta_{\text{ocll}}$  was smaller, and increasing number of interparticle contacts in sample was greater when angularity of particles was bigger. As we can see in geotechnical papers differences of internal shearing angle involved by angularity differences, roundness and roughness of particles are generally smaller than 9°. These tests have shown bigger influence of particles angularity on shear strength parameters.

Samples with the same initial porosity were also tested on tension in specially constructed cylinder (fig. 28). Obtained results have proved that in soils with angular particles, cohesion intercept can be observed caused mainly by phenomenon of angular particles interlocking. In tested fly ash cohesion intercept is 4 kPa, and in silty – sand mixture from Graniczna – 3kPa.

Analyzed problems have very important practical meaning in many geotechnical cases. Some of the most important are: stability of cohesionless soils, compactibility, compressibility, permeability, skid resistance of road surfaces, transportation of particles by wind and water etc.