ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 97 Nr kol. 1573

Andrzej SAWICKI, Waldemar ŚWIDZIŃSKI
Instytut Budownictwa Wodnego PAN

# CHARAKTERYSTYKI NAPRĘŻENIE-ODKSZTAŁCENIE ZAGĘSZCZONEGO PIASKU PRZED OSIĄGNIĘCIEM STANU GRANICZNEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono wyznaczone doświadczalnie charakterystyki naprężenie-odkształcenie dla zagęszczonego piasku, badanego w stanie suchym, w zakresie poprzedzającym stan graniczny. Próbki badano w nowoczesnym aparacie trójosiowym umożliwiającym lokalny pomiar odkształceń pionowych i poziomych. Zastosowano różne ścieżki naprężenia, między innymi takie, w których wyizolowano wpływ naprężenia średniego oraz dewiatora naprężenia na deformację próbki, jak też ścieżki na których te obie wielkości oddziaływały jednocześnie. Wyniki doświadczeń aproksymowano prostymi wzorami obrazującymi uśrednione zachowanie się gruntu. Podano również średnie odchyłki od tych trendów. Przedstawione wyniki są fragmentem obszerniejszego katalogu danych doświadczalnych dotyczących deformacji ośrodków sypkich przed osiągnięciem stanu granicznego. Dane te mogą służyć kalibracji i weryfikacji istniejących modeli gruntów oraz mogą być pomocne w pracach nad budową nowych modeli, dokładniej przybliżających rzeczywiste zachowanie się tych materiałów.

# PRE-FAILURE STRESS-STRAINS CHARACTERISTICS OF DENSE SAND

**Summary.** Pre-failure stress-strain characteristics of dry dense sand are presented. The specimens were tested in a triaxial apparatus enabling local measurement of lateral and vertical deformations. The experiments were performed for various stress paths which also enable studying the influence of either mean stress or the stress deviator on soil's deformations. The experimental results were approximated by simple formulae reflecting the average trends of the soil behaviour. The standard deviations from these trends are also presented. The results shown are part of more extensive catalogue of experimental data concerning the pre-failure deformation of non-cohesive soils. The database can serve for calibration and verification of existing soils models, as well as can be helpful for the development of new ones which will better predict the real soil behaviour.

## 1. Wstęp

W niniejszym komunikacie przedstawiono empiryczne charakterystyki naprężenie-odkształcenie wstępnie zagęszczonego piasku „Skarpa", w zakresie przed osiągnięciem stanu granicznego. Zaprezentowane wyniki są uzupełnieniem danych empirycznych uzyskanych dla tego samego piasku, ale o początkowym stanie luźnym [1]. Wszystkie wyniki uzyskano z badań trójosiowych, przeprowadzonych w nowoczesnym aparacie firmy GDS Instruments Ltd., który między innymi umożliwia lokalny pomiar odkształceń pionowych i poziomych. Szczegóły dotyczące pomiarów opisane są szczegółowo w innych publikacjach, np. Świdziński i Mierczyński [3]. Piasek „Skarpa" zbudowany jest ze średnio obtoczonych ziaren i jest scharakteryzowany następującymi wskaźnikami: $D_{50}$ = 0.42 mm; $e_{min}$ = 0.432; $e_{max}$ = 0.677; $C_u$ = 2.5; $G_s$ = 2.65. Przedstawia się wyniki łącznie 16 testów na próbkach o średnim początkowym stopniu zagęszczenia $I_D$ = 0.778, przy czym minimalna oraz maksymalna wartość tego wskaźnika wyniosły odpowiednio 0.72 i 0.826. Średnia odchyłka od wartości średniej wyniosła $\Delta I_D$ = 0.025, tj. jest nieco powyżej 3%.

Przeprowadzone badania są fragmentem znacznie obszerniejszego programu, którego celem jest zbudowanie empirycznej bazy danych ilustrującej odkształcalność ośrodków sypkich, w zakresie przed osiągnięciem stanu granicznego. Taka baza danych (katalog) ma służyć do weryfikacji lub kalibracji istniejących modeli gruntów, jak też ma być pomocna w pracy nad nowymi modelami, które w lepszy sposób niż modele dotąd zaproponowane będą opisywać odkształcalność gruntów. Zamierzeniem autorów jest przedstawienie odkształceń dla kilku charakterystycznych ścieżek naprężenia, tak aby część danych mogła służyć kalibracji modeli, a pozostałe ich weryfikacji.

## 2. Program badań

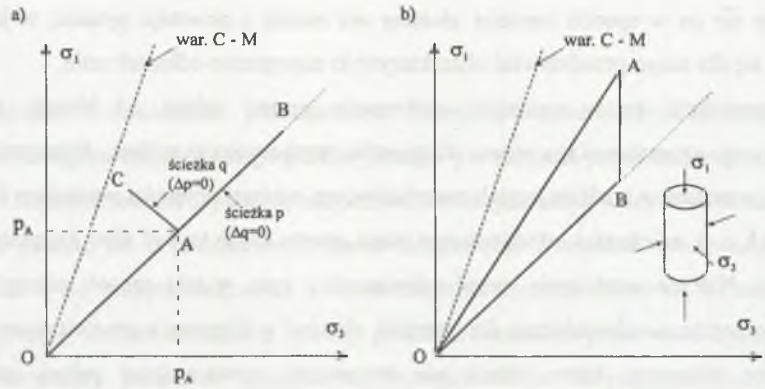
W podręcznikach mechaniki stosuje się zazwyczaj uproszczony sposób prezentacji charakterystyk naprężenie-odkształcenie, gdzie jedna oś układu współrzędnych odpowiada jednowymiarowemu naprężeniu, a druga jednowymiarowemu odkształceniu. W przypadku metali wykres taki ilustruje reakcję próbki przy jednoosiowym rozciąganiu i może być, w miarę przejrzysty sposób, zinterpretowany. Dla materiałów izotropowych taki wykres zwykle wystarcza do budowania różnych teorii (trójwymiarowych) opisujących relacje pomiędzy naprężeniem i odkształceniem. W przypadku gruntu sytuacja nie jest taka prosta, gdyż

deformuje się on w sposób bardziej złożony niż metale i powstaje pytanie, w jaki sposób powinno się dla niego przedstawiać charakterystyki naprężenie-odkształcenie.

Przypomnijmy, że w ogólności deformacja gruntu zależy od historii naprężenia, początkowego zagęszczenia, a nawet od sposobu przygotowania próbek. Występujące w nim efekty są pomijane w analizie innych materiałów, np. zmiany objętości wywołane dewiatorem naprężenia, a w zależności od aktualnego stanu gruntu może to być albo zagęszczenie, albo dylatancja. Nie ma ustalonych reguł mówiących o tym, w jaki sposób należy ilustrować związki naprężenia-odkształcenie dla gruntów, chociaż w literaturze geotechnicznej utrwaliły się pewne schematy, które jednak nie dostarczają wystarczająco pełnej informacji o deformacji gruntu.

Zresztą bardzo ważnym pytaniem jest to, jaki zestaw danych dostarcza wyczerpującej informacji o zachowaniu się gruntu przed osiągnięciem stanu granicznego? Kolejne ważne pytanie dotyczy dokładności uzyskanych danych empirycznych. Wiadomo przecież, że z tego samego zbioru ziaren praktycznie nigdy nie zbuduje się dwóch jednakowych próbek gruntu, a zatem wyniki doświadczeń nie będą idealnie powtarzalne. Będzie to miało, oczywiście, wpływ na modele teoretyczne, zbudowane na podstawie empirycznych obserwacji dotyczących zachowania się gruntów. Wiele tego typu pytań oraz podobnych nie doczekało się jeszcze wyczerpującej odpowiedzi i być może stąd również bierze się pozorne bogactwo różnych modeli gruntów.

W zapoczątkowanym przez nas programie badań zdecydowaliśmy się na systematyczne budowanie bazy danych doświadczalnych, rozpoczynając od badania próbek o początkowym stanie albo wyraźnie luźnym, albo wyraźnie zagęszczonym. Zastosowaliśmy w miarę proste ścieżki naprężenia, które jednak powinny dostarczać dosyć wyczerpującej informacji o zachowaniu się gruntów przed osiągnięciem stanu granicznego. Ta baza danych będzie systematycznie uzupełniania i weryfikowana, w zależności od postępów w pracy doświadczalnej i teoretycznej. Na rys. 1 przedstawiono podstawowe ścieżki naprężenia zastosowane w badaniach doświadczalnych. $\sigma_1$ oznacza naprężenie pionowe, zaś $\sigma_3$ jest naprężeniem bocznym. Wyszczególnienie tych podstawowych ścieżek jest zestawione w tablicy 1.




Rys. 1. Podstawowe ścieżki naprężenia zastosowane w badaniach doświadczalnych
Fig. 1. Basic stress paths applied in the experiments

Tablica 1

Wyszczególnienie podstawowych ścieżek naprężenia

| Nr | Ścieżka | Rysunek | Komentarz |
|---|---|---|---|
| 1 | OABAO | 1a | hydrostatyczne obciążenie i odciążenie |
| 2 | OAO | 1a | jak wyżej |
| 3 | OABA | 1a | hydrostatyczne obciążenie i częściowe odciążenie |
| 4 | OACAO | 1a | hydrostatyczna prekonsolidacja (OA), następnie czyste ścianie (AC), po czym odciążenie w odwrotnej kolejności |
| 5 | OACABAO | 1a | hydrostatyczna prekonsolidacja (OA), czyste ścianie z odciążeniem (ACA), obciążenie i odciążenie hydrostatyczne (ABAO) |
| 6 | OABACAO | 1a | hydrostatyczne przekonsolidowanie z odciążeniem (OABA), czyste ścianie z odciążeniem (ACA), hydrostatyczne odciążenie (AO) |
| 7 | OBABO | 1b | hydrostatyczna prekonsolidacja (OB), Zwiększanie $\sigma_1$ przy $\sigma_3$ = const (BA), odciążenie (ABO) |
| 8 | OABO | 1b | anizotropowa prekonsolidacja (OA), złożone odciążenie (ABO) |

Ścieżkom naprężenia opisanym w tablicy 1 i przedstawionym na rys. 1 odpowiadają mierzone lokalnie odkształcenia próbek gruntu, odpowiednio $\varepsilon_1$ i $\varepsilon_3$. Lokalny pomiar odkształceń uważany jest za bardziej dokładny od rozpowszechnionych w geotechnice metod pomiaru pośredniego [3]. Wyniki badań analizowano dla innego zestawu zmiennych, mianowicie dla średniego ciśnienia $p$, dewiatora naprężenia $q$, odkształcenia objętościowego $\varepsilon_v$ i dewiatora odkształcenia $\varepsilon_q$. Te niezmiennicze wielkości dane są następującymi wzorami:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3), \tag{1}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3, \tag{2}$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3, \tag{3}$$

$$\varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3). \tag{4}$$

Pewne ścieżki naprężenia umożliwiają badanie wyizolowanego wpływu niezmienników naprężenia $p$ i $q$ na deformację gruntu, zaś inne ścieżki odpowiadają jednoczesnemu oddziaływaniu tych wielkości. Przykładowo, ścieżki nr 1, 2, 3 odpowiadają zmianom p przy $q$ = 0, zaś ścieżka AC odpowiada zmianie $q$ przy $p$ = const. Ścieżki BA, BAO czy CA (rys. 1a) odpowiadają odciążeniu próbki. W czasie anizotropowej prekonsolidacji (ścieżka OA na rys, 1b) zmieniają się zarówno dewiator, jak i aksjator naprężenia, podobnie podczas obciążenia na ścieżce BA z rys. 1b. W dalszym ciągu tego komunikatu omówimy uzyskane wyniki doświadczeń.

## 3. Izotropowa prekonsolidacja

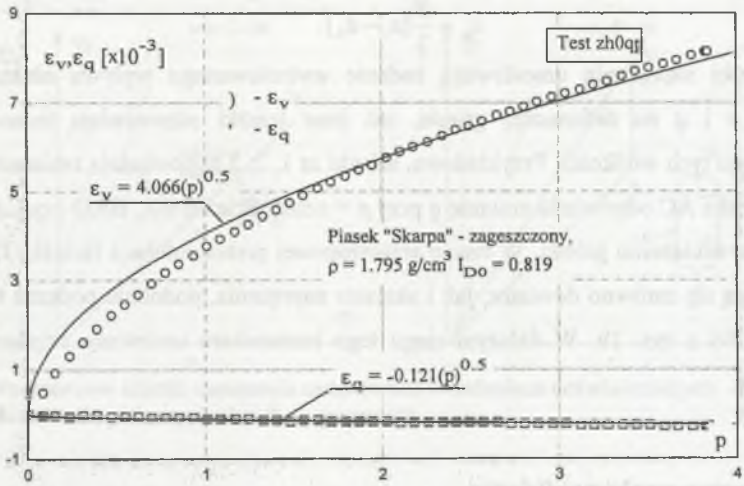
Izotropowa prekonsolidacja była realizowana w większości opisanych powyżej ścieżek naprężenia, oprócz anizotropowej prekonsolidacji (ścieżka nr 8), w zakresie naprężeń od zera do max $\sigma_1 = \sigma_3 = 8\text{x}10^5$ N/m$^2$. Wyniki badań doświadczalnych można aproksymować za pomocą następujących funkcji:

$$\varepsilon_v = A_v\sqrt{p}, \tag{5}$$

$$\varepsilon_q = A_q\sqrt{p}, \tag{6}$$

gdzie $A_v$ i $A_q$ są współczynnikami, których średnie wartości, obliczone z 16 doświadczeń, wynoszą odpowiednio: $A_v$ = 3.93, $A_q$ = -0.41. Zastosowano tutaj jednostkę naprężenia $10^5$ N/m$^2$ oraz jednostkę odkształcenia $10^{-3}$. Przykładowo, dla $p = 4\text{x}10^5$ N/m$^2$, do powyższych wzorów podstawiamy 4, w wyniku otrzymując $\varepsilon_v$ = 7.86 i $\varepsilon_q$ = -0.82. Oznacza to, że rzeczywiste odkształcenia wynoszą odpowiednio $7.86\text{x}10^{-3}$ oraz $-0.82\text{x}10^{-3}$. Średnie odchylenia od wartości średnich wynosiły odpowiednio $\bar{D}_v$ = 0.387 (= 9.8%) oraz $\bar{D}_q$ = 0.142 (=34.7%). Dla luźnego piasku „Skarpa" otrzymano $A_v$ = 5.24, $A_q$ = -0.847 [1].

Deformacja wszystkich próbek miała charakter anizotropowy, gdyż $\varepsilon_q \neq 0$. Średni stosunek odkształcenia bocznego do pionowego wyniósł $\varepsilon_3/\varepsilon_1$ = 1.644. W przypadku próbek luźnych liczba ta wynosiła 1.97. Typowy przebieg izotropowej prekonsolidacji zilustrowano na rys. 2.




Rys. 2. Izotropowa prekonsolidacja
Fig. 2. Isotropic preconsolidation

## 4. Izotropowe odciążenie

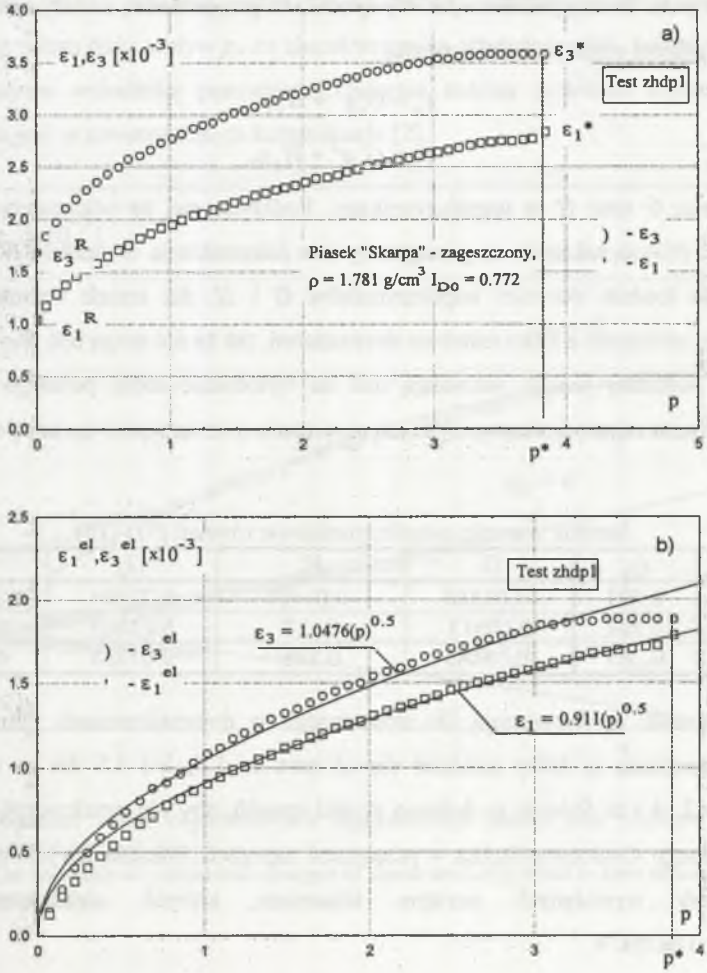
Izotropowe odciążenie było realizowane dla wszystkich ścieżek naprężenia wyszczególnionych w tablicy 1, z tym że poszczególne próbki poddane były przedtem różnym historiom naprężenia. Typowy przebieg krzywych odciążenia przedstawiono na rys. 3. Na próbkę działa początkowe średnie naprężenie $p = p^*$, któremu odpowiadają odkształcenia $\varepsilon_1 = \varepsilon_1^*$ i $\varepsilon_3 = \varepsilon_3^*$. Następnie średnie naprężenie jest stopniowo zmniejszane do zera. Po całkowitym odciążeniu, w próbce pozostają odkształcenia rezydualne $\varepsilon_1^R$ i $\varepsilon_3^R$, które mogą zostać zinterpretowane jako odkształcenia plastyczne wywołane obciążeniem. Krzywe z rys. 3a można sprowadzić do wspólnego punktu odniesienia, interpretując je jako krzywe odpowiadające sprężystej reakcji gruntu (rys. 3b). Tak skonstruowane krzywe następnie przybliżono prostymi równaniami analitycznymi oraz obliczono odpowiadające im krzywe obrazujące odkształcenia objętościowe i postaciowe:

$$\varepsilon_v^{el} = B_v \sqrt{p}, \tag{7}$$

$$\varepsilon_q^{el} = B_q \sqrt{p}, \tag{8}$$

gdzie $B_v$ i $B_q$ są obliczonymi empirycznie współczynnikami. Ich średnie wartości, obliczone z 16 doświadczeń, wynoszą odpowiednio: $B_v$ = 2.828, $B_q$ = -0.108. Średnie odchylenia od wartości średnich wynosiły odpowiednio $\overline{D}_v$= 0.1855 (= 6.6%) oraz $\overline{D}_q$= 0.077 (=71%).

Należy odnotować stosunkowo niewielki rozrzut wyników odpowiadających zmianom objętościowym i raczej duży rozrzut przy odkształceniach postaciowych. Ale też średnie odkształcenie postaciowe jest mniejsze niż 4% średniego odkształcenia objętościowego.




Rys. 3. Typowe krzywe odciążenia izotropowego (a). Interpretacja krzywych z rys. 3a jako sprężystego odciążenia (b)

Fig. 3. Typical curves of isotropic unloading (a). Interpretation of the curves from Fig. 3a as an elastic unloading (b)

## 5. Czyste ścinanie

Czyste ścinanie realizowane jest na ścieżce AC z rys. 1a, na której rośnie dewiator naprężenia przy stałym naprężeniu średnim $p = p_A$ = const. Badania przeprowadzono dla

trzech wartości tego ciśnienia, mianowicie przy $p_A$ = 2, 4 i 6. Celem tych badań było między innymi wykrycie wpływu $p$ na deformację gruntu przy czystym ścinaniu. Badano próbki naturalnie skonsolidowane (ścieżka OA, a następnie AC), jak też próbki przekonsolidowane (OABAC). Wyniki badań, podobnie jak w poprzednich przypadkach, zostały aproksymowane prostymi związkami empirycznymi o postaci:

$$\varepsilon_v = G_v q^2 + H_v q, \tag{9}$$

$$\varepsilon_q = G_q q^2 + H_q q, \tag{10}$$

gdzie wielkości $G$ oraz $H$ są współczynnikami. Podkreśla się, że odkształcenia obliczone wzorami (9) i (10) są nałożone na początkowy stan odkształcenia w punkcie A. W tablicy 2 przedstawiono średnie wartości współczynników $G$ i $H$, dla trzech wartości średniego naprężenia $p_A$, obliczone z kilku zaledwie doświadczeń, tak że nie mogą być one statystycznie miarodajne. Niemniej jednak pozwalają one na wyrobienie sobie pewnego poglądu na deformację gruntu zagęszczonego przy czystym ścinaniu oraz na wpływ $p_A$ na tę deformację.

Tablica 2

Średnie wartości współczynników z równań (9) i (10)

| $p_A$ | $I_{Do}$ | $G_v$ | $H_v$ | $G_q$ | $H_q$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 0.793 | -0.01585 | -0.01407 | 0.22104 | 0.0653 |
| 4 | 0.784 | 0.00613 | 0.117 | 0.05065 | 0.1194 |
| 6 | 0.765 | -0.05485 | 0.505 | 0.01381 | 0.2325 |

Współczynniki te obowiązują dla stosowanego w doświadczeniach zakresu wartości dewiatora naprężenia $q$, który zmieniał się od zera do 1.5, 3 i 4.5 dla $p_A$ wynoszącego odpowiednio 2, 4 i 6. Ścieżki te dobrano w taki sposób, aby nie przekroczyć powierzchni stanu granicznego Coulomba-Mohra w przestrzeni naprężeń. Interesująca jest analiza zmian objętościowych wywołanych czystym ścinaniem, których uśredniony charakter przedstawiono na rys. 4.

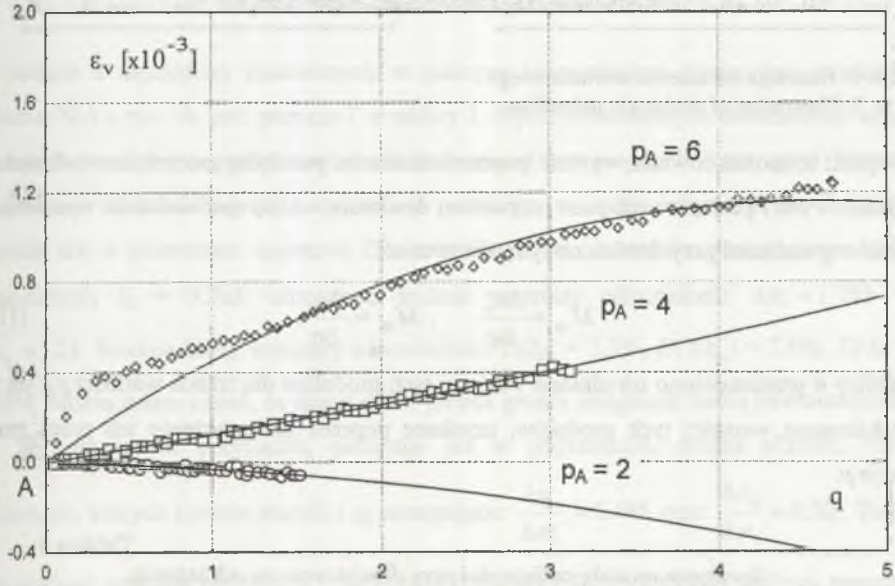
Tablica 3

Średnie wartości wskaźnika porowatości $e$ przed przyłożeniem czystego ścinania

| $p$ | 2 | 4 | 6 |
|---|---|---|---|
| $e_0$ (przed izotropową konsolidacją | 0.483 | 0.485 | 0.4896 |
| $e_A$ (przed ścinaniem) | 0.4756 | 0.4744 | 0.4752 |

Najpierw zauważmy, że przed przyłożeniem ścinania wartości wskaźnika porowatości były praktycznie jednakowe, co ilustruje tablica 3. Natomiast odkształcenia objętościowe wywołane ścinaniem wyraźnie zależą od wartości $p_A$. W przypadku większych wartości

średniego naprężenia ($p_A$ = 4 i 6) jakościowy charakter tych zmian jest podobny, gdyż od samego początku czyste ścinanie powoduje dalsze zagęszczanie już wstępnie zagęszczonego piasku oraz dodatkowo jeszcze skonsolidowanego. Natomiast w przypadku $p_A$ = 2 jakościowe zachowanie się próbki jest inne, gdyż już od samego początku pojawia się dylatancja. Widoczny jest zatem duży wpływ $p_A$ na charakter zmian objętościowych, natomiast nie widać w ogóle wpływu wskaźnika porowatości. Szersza analiza problemu czystego ścinania przedstawiona jest w towarzyszącym komunikacie [2].



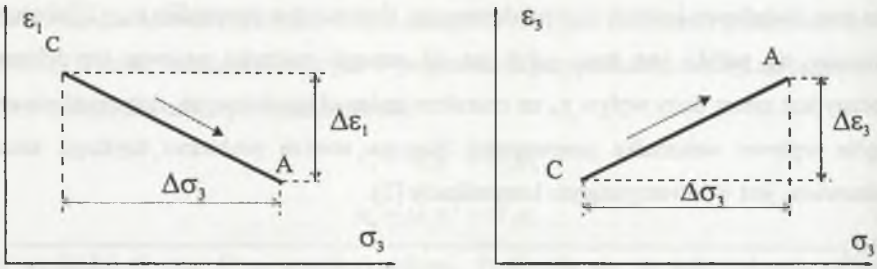

Rys. 4. Charakter zmian objętościowych zagęszczonego piasku przy czystym ścinaniu, dla różnych wartości $p_A$

Fig. 4. The tendency of volumetric changes of dense sand subjected to pure shearing for various values of $p_A$

## 6. Dewiatorowe odciążenie

Dewiatorowe odciążenie realizowane jest na ścieżce CA z rys. 1a, gdzie utrzymywane jest stałe naprężenie średnie $p_A$ = const, zaś dewiator naprężenia maleje od maksymalnej wartości w punkcie C do zera w punkcie A. Przeprowadzono również doświadczenia dla trzech cykli obciążenia i odciążenia dewiatorowego, które sugerują, że reakcja gruntu przy odciążeniu może być traktowana jako odwracalna, gdyż krzywe odciążenia dla kolejnych cykli są do siebie równoległe. Krzywe te, z wystarczającą z inżynierskiego punktu widzenia

dokładnością, mogą być aproksymowane odcinkami prostoliniowymi. Typowy przebieg reakcji gruntu przy dewiatorowym odciążeniu przedstawiono na rys. 5.




Rys. 5. Ilustracja odciążenia dewiatorowego
Fig. 5. Illustration of deviatoric unloading

Wyniki te można również wyrazić poprzez zależności pomiędzy przyrostami odkształceń objętościowych i postaciowych oraz przyrostem dewiatora, co się sprowadza do wyznaczenia modułów podatności przy dewiatorowym odciążeniu:

$$M_{vq} = \frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta q} \quad , \; M_{qq} = \frac{\Delta\varepsilon_q}{\Delta q}. \tag{11}$$

W tablicy 4 przedstawiono uśrednione wartości tych modułów dla trzech wartości $p_A$, jak też przeskalowane wartości tych modułów, uzyskane poprzez przemnożenie ich przez proste funkcje $p$.

Tablica 4

Sprężyste moduły podatności przy dewiatorowym odciążeniu

| p | $M_{vq}$ | $M_{qq}$ | $M_{vq}p$ | $M_{qq}\sqrt{p}$ |
|---|---|---|---|---|
| 2 | -0.274 | 0.251 | -0.548 | 0.335 |
| 4 | -0.1425 | 0.233 | -0.57 | 0.466 |
| 6 | -0.088 | 0.151 | -0.528 | 0.37 |

## 7. Anizotropowa prekonsolidacja

Anizotropowej prekonsolidacji odpowiada ścieżka OA na rys. 1b. W trakcie tego testu zmieniają się zarówno $p$ jak i $q$, tak więc całkowita deformacja jest wypadkowym rezultatem oddziaływania tych dwóch czynników. Nie jesteśmy w stanie określić udziału każdego z tych czynników w całkowitej deformacji. Dla szczególnej anizotropowej ścieżki naprężenia, na której $\sigma_3 = 0.5\sigma_1$, zaś $\sigma_1$ wzrastało monotonicznie od 0 do $8\text{x}10^5$ N/m$^2$, otrzymano następujące średnie wartości odkształceń:

$$\varepsilon_v = 2.74\sqrt{\sigma_1} \quad i \quad \varepsilon_q = 0.607\sqrt{\sigma_1}\,. \tag{12}$$

Zauważmy, że w rozpatrywanym przypadku mamy $p = \frac{2}{3}\sigma_1$ oraz $q = \frac{1}{2}\sigma_1$. Wartości współczynników we wzorach (12) odpowiadają średniemu zagęszczeniu próbek przed doświadczeniem $I_D = 0.75$.

## 8. Standardowe obciążenie

Jednym z najczęściej stosowanych w praktyce laboratoryjnej testów jest standardowa ścieżka OBA z rys. 1b, por. pozycję 7 w tablicy 1. Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że relacja pomiędzy naprężeniami a odkształceniami jest prawie liniowa, gdyż faktycznie stwierdzona mała nieliniowość może być pominięta w opisie inżynierskim. Dotyczy to odcinka BA w przestrzeni naprężeń. Dla czterech próbek, o średnim początkowym stopniu zagęszczenia $I_D$ = 0.765, otrzymano średnie przyrosty odkształceń: $\Delta\varepsilon_v = 1.785$ oraz $\Delta\varepsilon_q = 1.28$. Średnie błędy wynosiły odpowiednio: $D(I_D)$ = 3.3%, $D(\Delta\varepsilon_v)$ = 7.6%, $D(\Delta\varepsilon_q)$ = 12.9%. Można zatem uznać, że nawet dla 4 próbek gruntu osiągnięto dobrą powtarzalność.

W omawianym przypadku, podobnie jak w poprzednim, można określić moduły deformacji, których średnie wartości są następujące: $\frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma_1} = 0.446$ oraz $\frac{\Delta\varepsilon_q}{\Delta\sigma_1} = 0.32$. Tutaj $\sigma_1$ jest również zmienna niezależną i nie można doświadczalnie stwierdzić wpływu naprężenia średniego i dewiatora na deformację. Wielkości te są związane z naprężeniem pionowym następującymi wzorami: $p = 0.333\sigma_1+2.67$ oraz $q = \sigma_1-4$.

## 9. Standardowe odciążenie

Jest to odciążenie na odcinku AB z rys. 1b. Historia poprzedzająca to odciążenie może być różna. Przykładowo, można próbkę anizotropowo prekonsolidować wzdłuż ścieżki OA z rys. 1b, a następnie odciążyć. Można też ją obciążyć wzdłuż ścieżki OBA z rys. 1b i następnie odciążyć wzdłuż odcinka AB. W tym przypadku, podobnie jak poprzednio, zmieniają się zarówno naprężenie średnie, jak i dewiator naprężenia. Ta reakcja jest też prawie liniowa w przebadanym zakresie, to jest przy odciążeniu od wielkości $\sigma_1$ = 8 do 4. Zauważono, że historia poprzedzająca odciążenie może mieć wpływ na wartość modułów podatności przy

odciążeniu. Przykładowo, przy odciążeniu poprzedzonym ścieżką OBA otrzymano odpowiednio: $\frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma_1} = 0.185$ oraz $\frac{\Delta\varepsilon_q}{\Delta\sigma_1} = 0.148$. Przy odciążeniu poprzedzonym anizotropową prekonsolidacją otrzymano: $\frac{\Delta\varepsilon_v}{\Delta\sigma_1} = 0.036$ oraz $\frac{\Delta\varepsilon_q}{\Delta\sigma_1} = 0.19$.

## 10. Podsumowanie

W komunikacie przedstawiono empiryczne charakterystyki naprężenie-odkształcenie dla zagęszczonego piasku „Skarpa", badanego w zakresie poprzedzającym stan graniczny, dla kilku charakterystycznych ścieżek naprężenia. Wyniki doświadczeń przybliżono prostymi wzorami, w których podano średnie wartości występujących tam współczynników. Podano też odchylenia od tych średnich wartości. Przedstawione dane są uzupełnieniem wyników dotyczących tego samego piasku „Skarpa", ale badanego w początkowym stanie luźnym, por. [1]. Ten dosyć obszerny materiał doświadczalny może służyć kalibracji i weryfikacji istniejących modeli ośrodków sypkich, jak też wspomagać pracę nad nowymi modelami.

LITERATURA

1. A. Sawicki, W. Świdziński: sEmpirical pre-failure stress-strain characteristics of loose sand in triaxial compression. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXIV, No. 1-2, 2002, pp. 49-71.
2. A. Sawicki, W. Świdziński: Odkształcenia ośrodka sypkiego podczas ścinania w aparacie trójosiowym. XIII Krajowa Konf. Mech. Gruntów i Fund., Wisła 2003.
3. W. Świdziński, J. Mierczyński: On the measurement of strains in the triaxial test. Arch. of Hydro-Engineering and Environ. Mech, Vol. 49, No. 1, 2002, pp. 23 – 41.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard IZBICKI

**Abstract**

Pre-failure stress-strain characteristics of dry dense sand are presented. The specimens were tested in a triaxial apparatus enabling local measurement of lateral and vertical deformations. The experiments were performed for various stress paths which also enable studying the influence of either mean stress or the stress deviator on soil's deformations. The experimental results were approximated by simple formulae reflecting the average trends of the soil behaviour. The standard deviations from these trends are also presented. The results shown are part of more extensive catalogue of experimental data concerning the pre-failure deformation of non-cohesive soils. The database can serve for calibration and verification of existing soils models, as well as can be helpful for the development of new ones which will better predict the real soil behaviour.