ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2007
Seria: BUDOWNICTWO z. 111 Nr kol. 1756

Eugeniusz DEMBICKI

Katedra Geotechniki i Geologii Stosowanej
Politechnika Gdańska

ANALIZA TEORETYCZNA ZAGĘSZCZANIA NAWODNIONYCH GRUNTÓW ZIARNISTYCH METODĄ MIKROWYBUCHÓW

Streszczenie. W pracy przedstawiono opis zjawiska fizycznego w nawodnionym gruncie ziarnistym wywołanego kulistym ładunkiem wybuchowym. Opisano mechanizmy zagęszczania, przytoczono przykłady zastosowania zagęszczania gruntów metodą mikrowybuchów i podano wnioski, wynikające z badań laboratoryjnych i terenowych zagęszczania, służące do opracowania analizy teoretycznej. Analiza teoretyczna oparta jest na propagacji fali uderzeniowej wywołanej kulistym ładunkiem wybuchowym umieszczonym w nieograniczonej półprzestrzeni. Podstawowe równania do opisu rozpatrywanego zagadnienia oparte są na mechanice continuum i równaniach konstytutywnych ośrodka trójfazowego (grunt ziarnisty + woda + gaz) zaproponowanych przez G. M. Lachowa. Sformułowano podstawowe równania wyjściowe i warunki brzegowo-początkowe przyjęte do rozwiązania. Rozwiązanie numeryczne obejmuje określenie: promienia kulowego otworu zagęszczającego, promienia obszaru zagęszczenia oraz średniego stopnia zagęszczenia zagęszczonego obszaru. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci nomogramów. Ponadto, przedstawiono oszacowanie skuteczności zagęszczenia gruntu metodą mikrowybuchu.

THEORETICAL ANALYSIS OF THE SATURATED GRANULAR SOIL BY BLASTING METHOD

Summary. The paper contains a description of the physical phenomena which occur in a saturated granular soil as a result of underground explosions which this process entails. The mechanisms of compaction, the examples of application and the conclusions from the laboratory and field tests are presented. A theoretical analysis of a saturated granular soil compaction by means of the blasting method is presented. Investigations are based on propagation of a high-impact shock wave produced by a spherical charge placed in an unconfined half-space. Basic equations describing the problem are derived from physical continuum mechanics methods and from constitutive equations for a three-phase medium (granular soil + water + gas) as proposed by G. M. Lachow. Non – compressive soil medium is assumed in the solution. Basic equations are deduced and the initial – boundary problem is formulated. The numerical calculations carried out allow: the spherical soil radius, the radius of the compacted

area and the mean compaction degree of the affected zone to be determined. Calculation results are presented in nomograms. In addition, an estimate of the efficiency of soil compaction using the blasting method is provided.

1. Wstęp

Lokalizacja obiektów budowlanych coraz rzadziej może być dostosowana do korzystnych warunków posadowienia. Budownictwo, w tym komunikacyjne, nie może zagarniać terenów rolniczych, leśnych oraz atrakcyjnych pod względem krajobrazowym.

Często jednak brak odpowiednich terenów zmusza do posadowienia obiektów na gruntach dotychczas omijanych, uznawanych za nieprzydatne do działalności budowlanej, jak na przykład na nawodnionych luźnych gruntach piaszczystych, terenach rekultywowanych, gruntach nasypowych i innych.

W zależności od wartości obciążenia jednostkowego, przekazywanego przez fundament na podłoże i warunków wodnych oraz warunków pracy budowli, w gruntach słabych zachodzi potrzeba ulepszania parametrów geotechnicznych (wytrzymałościowych, odkształceniowych) podłoża.

Wzmocnienie lub ulepszanie gruntów twardych lub miękkich stanowi jeden z elementów badań naukowych i wdrożeń do praktyki inżynierskiej Profesora dr. hab. inż. Macieja Gryczmańskiego.

Profesor Maciej Gryczmański poświęcił i nadal poświęca temu zagadnieniu wiele uwagi w swoich opracowaniach teoretycznych i stosowanych, osiągając znaczące własne wyniki badawcze. Na szczególne podkreślenie zasługuje tu opracowanie i wdrożenie do praktyki inżynierskiej metody zagęszczania gruntu słabego za pomocą kolumn żwirowo – piaskowych. Stąd też interesujące wydaje się przedstawienie, z okazji Jubileuszu 70-lecia Profesora Macieja Gryczmańskiego, innej, uzupełniającej metody wzmocnienia ziarnistego podłoża gruntowego za pomocą mikrowybuchów.

Ulepszanie właściwości gruntów obejmuje nie tylko przypowierzchniową warstwę podłoża, lecz sięga głębiej do kilku i kilkudziesięciu metrów zależnie od charakteru i ważności wznoszonego obiektu.

Istnieje duża liczba metod ulepszania lub wzmocnienia gruntu. Ogólnie, można wyróżnić dwie grupy metod ulepszania podłoża gruntowego:

1. Metody, w których grunt ulega modyfikacji poprzez zastosowanie różnego rodzaju zastrzyków, w celu uzyskania podłoża bardziej zagęszczonego lub zwartego oraz polepszanie kontaktów między ziarnami gruntu poprzez zmniejszenie jego porowatości. Są to tzw. metody ulepszania gruntu.
2. Metody polegające na wprowadzeniu doń elementu konstrukcyjnego w celu zwiększenia wytrzymałości mechanicznej gruntu. Są to tzw. metody wzmocnienia gruntu.

2. Zagęszczanie gruntów ziarnistych

2.1. Mechanizmy zagęszczania

Trudne lub niemożliwe jest zagęszczenie luźnego piasku bez spójności pozornej na skutek działania jedynie obciążenia monotonicznego i statycznego. Z tego względu w większości metod zagęszczania gruntów ziarnistych stosuje się techniki wibracyjne lub udarowe.

W celu znacznego zmniejszenia początkowego wskaźnika porowatości konieczne jest zniszczenie zbyt luźnego ułożenia ziarn w celu uzyskania bardziej zagęszczonej struktury zbioru tych ziarn. Zniszczenie początkowej struktury ziarn następuje na skutek działania sił ścinających. Wśród wielu różnych czynników, wpływających na zagęszczenie gruntów ziarnistych pod wpływem obciążenia cyklicznego, głównym parametrem jest amplituda odkształcenia postaciowego (dystorsja) γ. Istnieje wartość minimalna odkształcenia postaciowego γ rzędu 10^{-5}, poniżej tej wartości nie następuje żadne zagęszczenie. Można to wyjaśnić tym, że przy małych odkształceniach nie może nastąpić zniszczenie kontaktów między ziarnami na skutek ich poślizgu lub obrotu, a zatem przy zmianach strukturalnych. W tym przypadku, jeśli nawet odkształcenia kontaktowe między ziarnami nie są całkowicie odwracalne przy działaniu składowych stycznych sił międzycząsteczkowych, grunt ziarnisty zachowuje się jak materiał quasi-sprężysty, szczególnie jeśli chodzi o rozchodzenie się fal w tym ośrodku.

W nawodnionym piasku luźnym, którego zachowanie się pod obciążeniem cyklicznym może być rozpatrywane jako zachowanie ośrodka nieodwodnionego, zniszczenie struktury ziarnistej ułatwione jest przez rozwój zjawiska upłynnienia gruntu.

W piasku luźnym w naturze zniszczenie struktury gruntu, któremu towarzyszy upłynnienie, wywołuje pod działaniem ciężaru własnego gruntu i dysypacji ciśnienie wody w porach; zagęszczenie następuje na skutek ponownego przegrupowania ziaren.

W czasie drgań lub wstrząsów wywołanych wewnątrz ośrodka gruntowego następuje emisja i propagacja fal (fale ściskania P, fale ścinania S i fale Rayleigha lub powierzchniowe).

Fale ściskania są najszybsze, lecz jedynie fale ścinania powodują zagęszczenie luźnych gruntów ziarnistych, pod warunkiem że odkształcenie postaciowe wywołane tymi falami jest wyższe od 10^{-5}.

W nawodnionych luźnych gruntach ziarnistych wpływ fal ściskania jest pomijalny.

Promień oddziaływania zagęszczenia, wywołany w gruntach ziarnistych na skutek drgań lub uderzeń, jest funkcją wyemitowanej energii i tłumienia fal rozchodzących się w gruncie.

Rozpatruje się dwa rodzaje tłumienia:

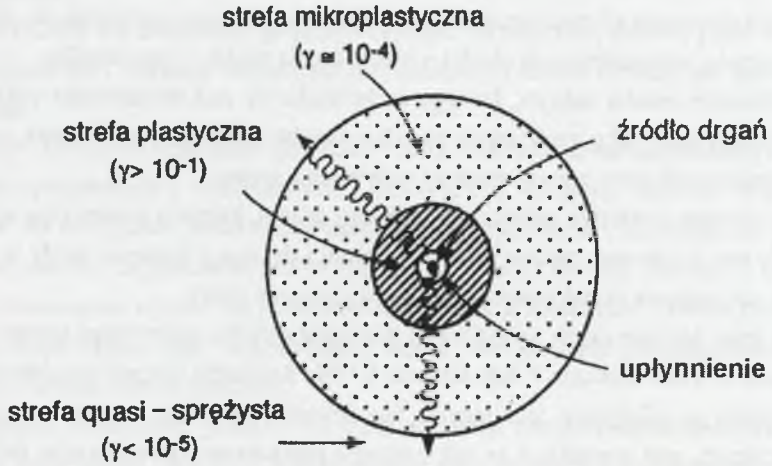
1. Tłumienie histeretyczne wynikające z dysypacji w czasie działania cykli obciążeń.
2. Tłumienie geometryczne wynikające z rozchodzenia się fal i dążące do zmniejszenia energii na jednostkę objętości gruntu, a zatem amplitudy drgań.

Czynnik zmniejszający amplitudę drgań w gruncie na skutek wywołanych drgań pionowych w odległości r od źródła drgań opisany jest wzorem:

$$\frac{e^{-ar}}{r^{-1/2}} \tag{1}$$

gdzie a jest współczynnikiem zmniejszającym, zależnym od wartości tłumienia danego gruntu, a czynnik $r^{-1/2}$ wynika z tłumienia geometrycznego.

Rozchodzenie się fal ścinania, mających wpływ na zagęszczenie luźnych gruntów ziarnistych, zależy również od poziomu przyspieszenia cząstek gruntu wywołanych drganiami. Przyspieszenie to, malejące w funkcji odległości od źródła drgań, zależy od przemieszczeń ziarn gruntu. Greenwood (1983) wprowadził pojęcie upłynnienia (przekształcenia w płyn) gruntu. Upłynnienie charakteryzuje się wyraźnym zmniejszeniem wytrzymałości na ścinanie gruntu, a w wyniku tego utratą zdolności do przekazywania drgań. Powstaje ona poza przyspieszeniem od 1,0 do 1,5 przyspieszenia ziemskiego (g). Jeżeli źródło drgań lub wstrząsów otoczone jest szeroką strefą gruntu upłynnionego, traci ono bardzo dużo ze swego oddziaływania na zagęszczenie gruntu znajdującego się poza strefą upłynnienia.



Rys. 1. Strefy odkształceń postaciowych gruntu ziarnistego wywołane drganiami
Fig. 1. Zone of nondiagonal strain in a granular soil produced by vibrations

Zgodnie z rys. 1 wokół obszaru drgań w gruncie ziarnistym można wyróżnić:

- strefę gruntu ewentualnie upłynnionego w gruntach nienawodnionych, strefę w fazie plastycznej poddaną dużym odkształceniom postaciowym ($\gamma > 10^{-4}$),
- strefę mikroplastyczną ($\gamma = 10^{-4}$) wywołującą przemiany strukturalne ziarn,
- strefę o właściwościach sprężystych gruntu ($\gamma < 10^{-5}$), w której struktura gruntu nie ulega zmianom.

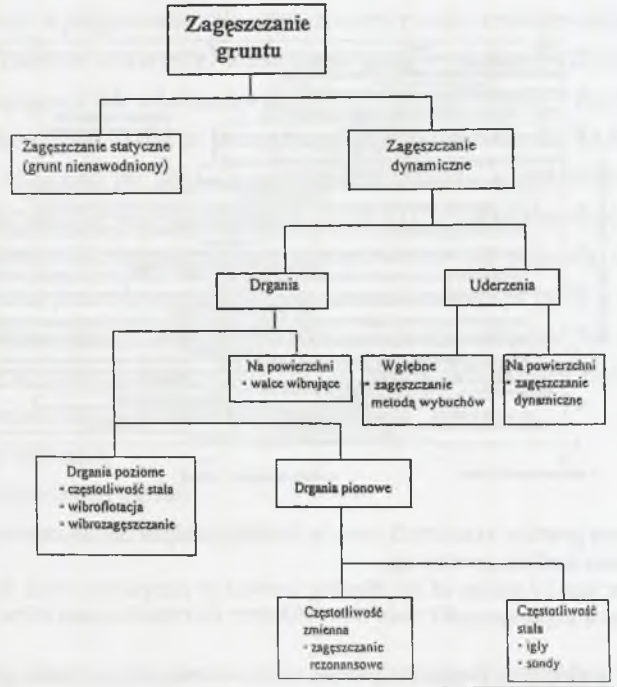
2.2. Metody zagęszczania

W większości metod stosuje się efekt oddziaływań dynamicznych na grunt (drgania, uderzenia). W tablicy 1 podano ogólne zestawienie tych metod. Przy zagęszczeniu dynamicznym gruntu stosuje się często jego uzupełnienie za pomocą nowego materiału ziarnistego. Ma to miejsce przy zastosowaniu metody wibroflotacji i zagęszczania dynamicznego.

Przy zagęszczaniu wgłębnym drgania rozchodzą się radialnie od zapuszczonego pionowego urządzenia drgającego lub umieszczonego ładunku wybuchowego. Z drugiej strony, drgania przekazywane na grunt mogą być poziome.

Tablica 1

Metody zagęszczania gruntu

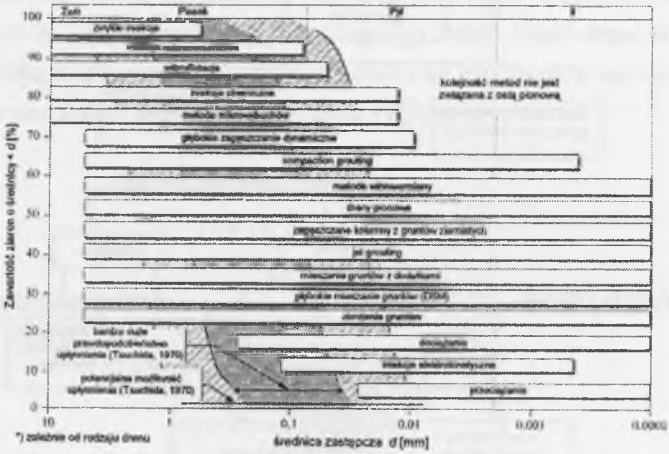


3. Zagęszczanie nawodnionych gruntów za pomocą mikrowybuchów

3.1. Ważniejsze przykłady zastosowania zagęszczania gruntów metodą mikrowybuchów

Pierwsze prace nad zagęszczaniem gruntów ziarnistych za pomocą ładunków wgłębnych były prowadzone w 1936 r. na zaporze ziemnej „Wysoki Swir" na terenie dawnego ZSRR. W latach 1939 - 1940 prowadzono prace nad zagęszczeniem korpusu zapory ziemnej Franklin Falls, New Hamphire w USA. Dalsze skutecznie wykonane zagęszczenia gruntu ziarnistego były w następujących latach:

- 1954/62: Zagęszczenie korpusu zapory ziemnej na rzece Karnafuli, Kaptai, Bangladesh,
- 1973-74: Zagęszczenie narefulowanego piaszczystego podłoża morskiego pod posadowienie falochronu w Porcie Północnym w Gdańsku,
- 1983: Zagęszczenie korpusu zapory ziemnej na rzece Niger, Jebba, Nigeria,
- 1984: Zagęszczenie wgłębnego podłoża pod budowę elektrowni jądrowej w Żarnowcu,
- 1987: Zagęszczenie korpusu falochronu narzutowego mariny, Ićići, Chorwacja,
- 1992: Zagęszczenie podłoża przy budowie autostrady nr 504 oraz pod przyczółki mostu nad rzeką Cold Water, Creek, Washington, USA,
- 1994: Zagęszczenie bardzo luźnych nawodnionych piasków w rejonie wydobycia węgla brunatnego, Lausitz, Niemcy,
- 2000/04: Zagęszczenie podłoża ziarnistego na trasie autostrady A-4 i A-2 w Polsce.



Rys. 2. Zagęszczanie gruntów ziarnistych metodą mikrowybuchów na tle innych metod wzmacniania lub ulepszania podłoża gruntowego
Fig. 2. Soil compaction by means of the blasting method in comparison with the other methods of compaction or improvement

Na rysunku 2 podano porównanie zakresu zastosowania zagęszczania gruntów ziarnistych metodą mikrowybuchów z innymi metodami zagęszczania lub ulepszania wg Greena (2001) i Mitchella & Gallaghera (1998).

3.2. Wpływ mikrowybuchów na nawodnione grunty ziarniste

Mikrowybuch jest chemiczną reakcją w materiale wybuchowym, który ma na celu przekształcenie tego materiału w krótkim czasie w gaz o dużym ciśnieniu i temperaturze. Reakcja, która wyzwala się w dowolnym punkcie jego masy, przekazuje się na otaczające warstwy

gruntu i rozprzestrzenia się z bardzo dużą prędkością, osiągając 7000 m/s w normalnie stosowanych mikrowybuchach. W ten sposób w masie materiału wybuchowego powstające ciśnienie gazu osiąga wartość od 5000 do 15000 MPa, a jego temperatura przekracza 3000°C. Gazy powstające w wyniku wybuchu rozprężają się i zajmują bardzo dużą objętość. Na przykład, objętość zajęta przez gaz wynikający z wybuchu 1 cm^3 TNT w normalnych warunkach temperatury i ciśnienia osiąga wartość 1180 cm^3. Ciepło wyzwolonego gazu wynosi od 0,9 do 1,8 kcal na jeden gram materiału wybuchowego.

Mikrowybuch ma jako efekt wytworzyć falę uderzeniową w otaczającym ośrodku gruntowym. Fale detonacyjne wychodzące z powierzchni materiału wybuchowego wywołują intensywne ciśnienie i rozprzestrzeniają się w gruncie.

Fala wybuchu ma strome czoło, które tworzy się w miejscu mikrowybuchu, i jest falą uderzeniową. W obszarze występowania fali uderzeniowej można zaobserwować odkształcenie sprężyste ośrodka, któremu towarzyszy zniszczenie struktury i nieodwracalne odkształcenie gruntu. Podczas propagacji fali uderzeniowej jej intensywność maleje i profil fali rozszerza się, a czoło fali zaokrągla się. Oznacza to ciągły proces transformacji fali aż do chwili jej wygaszenia. W miarę oddalania się fali od miejsca mikrowybuchu transformuje się ona w falę sejsmiczną. W strefie oddziaływania fali sejsmicznej większe odkształcenia występują w strefie sprężystej. W końcu fala sejsmiczna transformuje się w falę głosową. Całkowite naruszenie struktury gruntu, prowadzące do jego zagęszczenia, następuje tylko w strefach zbliżonych do miejsca mikrowybuchu. Stąd główne zainteresowanie skupione jest na badaniu zjawisk występujących w strefie oddziaływania fali mikrowybuchu jako fali uderzeniowej. Podstawowymi parametrami fali uderzeniowej są:

- maksymalne ciśnienie,
- prędkość rozchodzenia się fali,
- czas działania detonacji i impulsy fali.

3.3. Proces upłynnienia nawodnionych gruntów ziarnistych

Zagęszczeniu nawodnionych gruntów ziarnistych towarzyszy wyparcie wody z porów gruntu. Zniszczenie struktury gruntu i dążenie do jego zagęszczenia przebiega poprzez całkowity lub częściowy transfer ciężaru własnego gruntu i przekazanie obciążenia zewnętrznego na wodę w porach gruntu. Pociąga to zwiększenie ciśnienia wody w porach, które dzięki wyparciu wody i zagęszczeniu gruntu ziarnistego zmniejsza się i stopniowo wraca do swej wartości początkowej.

W przypadku bardzo dużego wzrostu ciśnienia wody w porach grunty ziarniste nabierają możliwości rozluźnienia. Grunt znajduje się w stanie upłynnienia.

W rzeczywistych gruntach ziarnistych proces jego upłynnienia zawiera następujące etapy:

- zniszczenie struktury gruntu,

- upłynnienie właściwe gruntu,
- tworzenie się stanu cząstek bardziej zagęszczonych oraz zmniejszenie porowatości.

Przy istnieniu działania dynamicznego, w rodzaju pojedynczego mikrowybuchu, proces ponownego „składowania" cząstek, ich wzajemnego ułożenia może być dłuższy niż czas trwania mikrowybuchu. Bezpośrednim powodem zniszczenia struktury gruntu ziarnistego spowodowanym mikrowybuchem może być:

- przejście fali uderzeniowej przez układ cząstek mineralnych i wodę w porach,
- wzajemne przemieszczenie cząstek gruntu na skutek tworzenia się pulsacji kawern gazowych,
- siła filtracyjna powstała w wyniku działania ciśnienia gazu na wodę w porach od mikrowybuchu.

Istnieje wiele hipotez, dotyczących zniszczenia struktury i następnie zagęszczenia gruntów ziarnistych w wyniku działania mikrowybuchów.

Według hipotezy Lachowa [5], zniszczenie struktury gruntu i jego upłynnienia (fluidyzacja) wywołane jest przez wzajemne przemieszczenie cząstek gruntu i wody w porach podczas trwania okresu przejścia fali uderzeniowej. Na czole fali uderzeniowej cząstki stałe i faza płynna przyjmują różne prędkości i w wyniku tego mają nierówne gęstości i ściśliwości. Woda będzie przemieszczać się szybciej niż cząstki stałe i dzięki wywołanym siłom filtracji zniszczy strukturę gruntu.

Inni autorzy formułują hipotezę zniszczenia struktury gruntu ziarnistego opartą również na współdziałaniu składników ciała stałego i płynu. W czasie przejścia fali uderzeniowej ciśnienie wody i gazu może być rozpatrywane jako sprężyste, a ściskanie szkieletu gruntowego będzie plastyczne z dużymi odkształceniami rezydualnymi.

Jeżeli zatem woda w porach nie może uwolnić się w czasie trwania okresu obciążenia ośrodka gruntowego, woda i pęcherzyki gazowe rozprzestrzeniają się, wywołując zmniejszenie naprężenia w deformowanym szkielecie gruntu, co w pewnych przypadkach może nawet powodować zniszczenie kontaktów między cząsteczkami. Takie rozszerzenie strefy gazowej i wody w porach rozpatruje się jako przyczynę zniszczenia struktury i upłynnienie gruntu ziarnistego.

Główną przyczyną, powodującą zniszczenie struktury i zagęszczenie gruntu, jest działanie fali uderzeniowej powstałej w wyniku mikrowybuchu, na wartości względnie dużego wzajemnego przemieszczenia cząstek mineralnych gruntu ziarnistego. W większości gruntów ziarnistych czas potrzebny do wyparcia wody z porów zmienia się od kilku dziesiętnych sekund do końca minut, a nawet godzin.

Po zniszczeniu struktury i upłynnieniu gruntu pozostaje pod wpływem działania ciężaru własnego cząstek i obciążenia zewnętrznego, następuje proces ponownego osadzania cząstek gruntu. Zagęszczenie nowo powstałej struktury zależeć będzie głównie od początkowej poro-

watości i początkowych warunków naprężenia. Nowo otrzymane zagęszczenie nie zależy od intensywności działania mikrowybuchu.

3.4. Wpływ mikrowybuchów na nawodnione grunty ziarniste

Z przedstawionej analizy procesu działania mikrowybuchów na nawodnione grunty ziarniste można wyciągnąć następujące wnioski ogólne:

1. W przypadku całkowitego upłynnienia (fluidyzacji) zlokalizowanej strefy gruntu ziarnistego wzrost intensywności działania dynamicznego prowadzi tylko do powiększenia tej strefy, lecz nie zwiększa jej zagęszczenia po powtórnej sedementacji cząstek.
2. Zwiększając intensywność działań dynamicznych, nie powoduje się wzrostu zagęszczenia gruntu ziarnistego. Można zwiększyć jego zagęszczenie jedynie przez powtarzanie zniszczenia struktury, tzn. stosując serię kolejnych mikrowybuchów w tej samej strefie.
3. Mikrowybuch działa na strukturę gruntu ziarnistego w sposób preferencyjny, wywołując duży stopień zniszczenia struktury cząstek bardziej luźnych i mniej wytrzymałych warstw. W tego rodzaju gruntach mikrowybuch prowadzi jedynie do zniszczenia ich struktury bez bezpośredniego zagęszczenia. Powtarzany proces mikrowybuchów prowadzi do dużego wzrostu zagęszczenia stref luźnych i w wyniku tego tworzy się struktura bardzo jednorodna pod względem zagęszczenia. Niejednorodność rozkładu działania mikrowybuchu w ośrodku gruntowym ma mały wpływ na zmianę ich zagęszczenia. We wszystkich odległościach mikrowybuchu, w granicach całkowitego zniszczenia struktury i całkowitego upłynnienia gruntu ziarnistego uprzednio jednorodnego pod względem zagęszczenia, dochodzi się do równomiernej zmiany jego zagęszczenia we wszystkich jego punktach.
4. Działanie mikrowybuchów w masie gruntów ziarnistych powoduje, że silniejsze zagęszczenie tworzy się pod działaniem ciężaru własnego gruntu w strefach luźniejszych. Zatem zagęszczenie za pomocą mikrowybuchów tworzy grunt jednorodny pod względem zagęszczenia.
5. Działanie mikrowybuchów w gruntach ziarnistych nie może prowadzić do ich rozluźnienia. Tak samo jak w bardzo krótkim działaniu mikrowybuchu nie zachodzi zagęszczenie gruntu, tak samo nie zachodzi jego rozluźnienie, dla którego byłby niezbędny dopływ wody z zewnątrz. Podczas działania fali uderzeniowej obserwuje się raczej słabe wzajemne przegrupowanie cząstek gruntu ziarnistego.
6. Działanie mikrowybuchów w gruntach bardzo przepuszczalnych, takich jak narzut kamienny, wywołują dużą deformację objętościową i wypływ wody z porów może nastąpić bezpośrednio pod działaniem fali uderzeniowej. W tym przypadku proces za-

gęszczenia zależeć będzie w mniejszym stopniu od ciężaru własnego cząstek, a głównie od działania mikrowybuchu na szkielet kamienny. Duże ciśnienie fali uderzeniowej może spowodować osiadanie warstwy narzutu kamiennego do 10% jej miąższości. Ważne jest spostrzeżenie, że w gruntach bardzo przepuszczalnych nie wystąpi stan upłynnienia.

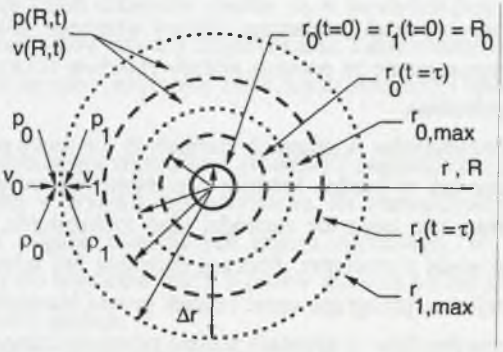
4. Rozwiązanie teoretyczne pojedynczego mikrowybuchu w nawodnionym gruncie ziarnistym [3]

4.1. Wstęp i założenia wyjściowe

W matematycznym opisie procesu zagęszczania gruntu ziarnistego metodą mikrowybuchu jest uwzględnienie nieliniowości właściwości gruntu i nieliniowości geometrycznej tego procesu. Do ustalenia podstawowych równań, opisujących przebieg procesu, zastosowane będą metody mechaniki kontinuum i równania konstytutywne G.M. Lachowa [5], odniesione do trójfazowego ośrodka ziarnistego (szkielet gruntowy + woda + gaz).

Założenia wyjściowe:

1. **Zachowanie kulistego otworu (przestrzeni) z gazem powybuchowym**. Przyjmuje się, że materiał wybuchowy w czasie $t = 0$ znajduje się w kulistym otworze o początkowym promieniu r_0 $(t = 0) = R_0$ i po wybuchu przekształca się w kulisty pęcherz gazowy o początkowym ciśnieniu gazu p_0 (rys. 3). Rozszerzanie się kulistego pęcherza gazu wybuchowego opisuje się funkcją r_0 (t), która na końcu jego ruchu osiąga wartość graniczną $r_{0,max}$. Stan termodynamiczny gazu wybuchowego w czasie eksplozji przebiega izotropowo (brak wymiany ciepła). Zmiana ciśnienia gazu wybuchowego opisana jest funkcją $p(t)$.



Rys. 3. Opis teoretycznych wielkości wywołanych mikrowybuchami w gruncie ziarnistym
Fig. 3. Description of the theoretical values produced by blasting method in a granular soil

2. **Model mechaniczny.** Fala uderzeniowa od mikrowybuchu rozchodząca się od utworzonego kulistego otworu będzie opisana funkcja $r_1(t)$. Położenie czoła fali w punkcie wyjściowym spełnia warunek: $r_1\ (t = 0) = r_0\ (t = 0) = R_0$ i funkcja $r_1\ (t)$ osiąga na końcu procesu ruchu kulistego otworu wartość graniczną $r_{1,\max}$. Będący pod wpływem mikrowybuchu obszar gruntu ziarnistego Δr rozciąga się w tym momencie o:

$$\Delta r = r_{1.\max} - r_{0.\max}$$

3. **Ściskanie objętościowe gruntu ziarnistego.** Mechaniczne właściwości gruntu ziarnistego opisuje się quasi -liniowym modelem trójfazowym mieszaniny składającej się ze ściśliwego gazu, z nieściśliwej wody i z nieściśliwego ciała stałego. Przyjmuje się, że w wyniku działania obciążenia od mikrowybuchu gęstość gruntu ziarnistego zmienia się w sposób skokowy od gęstości początkowej ρ_0 do zwiększonej wartości gęstości ρ przy adiabatycznym procesie ściskania fazy gazowej. W czasie ruchu ściskania mieszanina jest nieściśliwa.
4. **Model opisu ruchu mieszaniny.** Podczas pierwszego rozszerzania się kulistego otworu gazowego wszystkie fazy mieszaniny poruszają się jednowymiarowo z tą samą prędkością $v\ (R, t)$. Pomija się prędkość $v = 0$ rozpadu mieszaniny. Prędkość cząstek gruntu ziarnistego na czole fali uderzeniowej zmienia się od stanu spokoju ($v_0 = 0$) do wartości v_1 wynikającej z dynamicznych warunków zgodności (kompatybilności) na czole fali uderzeniowej. Ruch gruntu między przemieszczaniem się otworu gazu wybuchowego $r_0\ (t)$ i czoła fali uderzeniowej $r_1\ (t)$ będzie opisany polem przemieszczeń $u\ (R, t)$.
5. Stan naprężenia gruntu ziarnistego między przesuwającym się otworem z gazem wybuchowym $r_0\ (t)$ i czołem fali $r_1\ (t)$ opisuje się polem ciśnienia $p\ (R, t)$.W przyjętym prawie konstytucyjnym nie uwzględnia się dysypacji w opisie teoretycznym. Stąd w opisie uwzględnia się jedynie tłumienie geometryczne.

4.2. Sformułowanie zagadnienia, równania wyjściowe [3, 7]

Rozpatruje się kulowy otwór w nieograniczonej półprzestrzeni poddany na jego obwodzie nagłemu ciśnieniu monotonicznemu. Wprowadza się walcowy układ współrzędnych Lagrange'a:

$$x^1 = R\ ;\ x^2 = B\ ;\ x^3 = \phi \tag{1}$$

oraz opis współrzędnych Eulera:

$x^1 = r\ ;\ x^2 = \vartheta\ ;\ x^3 = \varphi$ służący do opisu położenia cząstek w czasie t.

Początkowy promień kulistego otworu będzie oznaczony jako R_0 (lub r_0).

Ruch cząstek gruntu ziarnistego można opisać równaniem:

$$r = r(R, t), \ \vartheta = \Theta; \ \varphi = \phi \tag{2}$$

Zależność początkowej gęstości ośrodka gruntowego ρ od gęstości w danej chwili określona jest następująco:

$$\rho_o / \rho = \left[\det(F^T, F)\right]^{1/2} = \frac{r^2}{R^2} r, \ R \qquad (r, R > 0) \tag{3}$$

gdzie: F – gradient odkształcenia.

Przyjmując, że ruch ośrodka gruntowego od pewnego znanego czasu $t = t_s$ jest ruchem nieściśliwym, stąd:

$$\rho(R, t) = \overline{\rho}_u(R) \qquad \text{dla } t > t_s \tag{4}$$

gdzie u oznacza wartość na czole fali uderzeniowej. Całkując równanie (3), otrzymuje się konkretny kształt funkcji $r = r(R, t)$:

$$r^3 = 3 \int_{R_o}^{R} \xi^2 \frac{\rho_o}{\rho_u(\xi)} d\xi + A^3(t) \qquad \text{dla } t > t_s \tag{5}$$

Przy nieściśliwym ruchu $r(R, t)$ ważna jest zależność:

$$r^3 = A^3(t) + B^3(R)$$

Pole prędkości w opisie Eulera opisane jest równaniem:

$$\vartheta_r = \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{A^2(t)}{r^2} \dot{A}(t); \qquad \vartheta_\theta = \vartheta_\varphi = 0 \tag{6}$$

Przyspieszenie w ruchu nieściśliwym będzie określone przez:

$$\alpha_r = \frac{\partial \vartheta r}{\partial t} + \vartheta_r \frac{\partial_r}{\partial r} = \frac{\overline{\ddot{A}^2(t)}}{3r^2} - \frac{2}{9} \frac{\overline{(\dot{A}^3)^2}}{r^3}, \qquad \alpha_\varphi = \alpha_\vartheta = 0 \tag{7}$$

Rozpatruje się tylko przypadek rozchodzenia się kulistej fali uderzeniowej w obszarze plastycznym.

W obszarze dużego ciśnienia rzędu $10^7 \div 10^9$ N/m^2 naprężenie ścinające nie odgrywa większej roli w procesie globalnego zagęszczenia gruntu. W tych warunkach ośrodek gruntowy zachowuje się w procesie obciążenia jak ciecz idealna.

Równania stanu nawodnionych gruntów ziarnistych w obszarze wysokiego ciśnienia opracował jako pierwszy G.M. Lachow [5]. Wiążą one wielkości gęstości $\rho(t)$ i ciśnienia $p(t)$ w gruntowym ośrodku trójfazowym (szkielet, woda i gaz) w następującym związku:

$$\frac{\rho_d}{\rho(t)} = \sum_{k=1}^{3} \left[\beta_k \left(\frac{p}{p^{(o)}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1/\gamma_k} \cdot V^o_{(k)} \tag{8}$$

gdzie:

γ_k $(k = 1,2,3)$ – współczynnik politropy pojedynczych cząstek gruntu,

$\beta_k = \gamma_k \cdot p^{(o)} / \rho_k^{(o)} \cdot C_k^2$,

C_k – prędkość dźwięku (żadnych przeszkód przy początkowym ciśnieniu $p^{(o)}$).

W gazie zachodzi związek:

$C_3^2 = \gamma_3 \, p^{(o)} / \rho_3^{(o)}$ i $\beta_3 = 1$

$V^o_{(k)}$ – część objętościowa pojedynczych cząstek gruntu w chwili początkowej mikrowybuchu.

Początkową wartość gęstości gruntu ρ_o określa się z równania

$$\rho_o = \sum_{k=1}^{3} \rho^o_{(k)} \cdot V^o_{(k)} \tag{9}$$

W celu identyfikacji równania (8) przyjęto następujące parametry wyjściowe ρ, C i γ

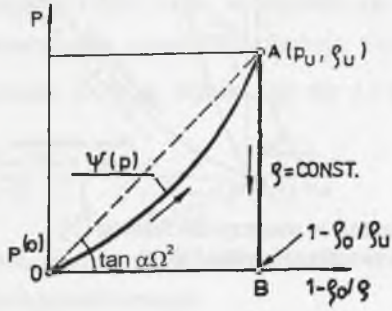
$\rho^o_{(1)} = 2{,}65 \cdot 10^{-6}$ (kgs^2/cm^4); $C_1 = 4500$ (m/s); $\gamma_{(1)} = 5$

$\rho^o_{(2)} = 1 \cdot 10^{-6}$ (kgs^2/cm^4); $C_2 = 1500$ (m/s); $\gamma_{(2)} = 7$

$\rho^o_{(3)} = 0{,}00125 \cdot 10^{-6}$ (kgs^2/cm^4); $C_3 = 300$ (m/s); $\gamma_{(3)} = 1{,}4$

W modelu, którym opisuje się właściwości nawodnionego gruntu ziarnistego, przyjęto, że zarówno proces mikrowybuchu, jak i przebieg naprężenia będzie opisany równaniem (8). Można również przyjąć, że ważna jest w równaniu (8) też dolna granica ciśnienia $p = p_{gr}$. Poniżej tej granicy ściśliwość gruntu zależy głównie od szkieletu gruntowego.

Mechanizm tego odkształcenia różni się od mechanizmu opisanego równaniem (8). Przy ciśnieniach mniejszych od ciśnienia p_{gr} przyjęto w modelu Lachowa w miejsce równania (8) zależność $p(\rho)$ ustaloną doświadczalnie. Analizując przedstawiony model nawodnionego gruntu ziarnistego, można stwierdzić, że zależność $p(\rho)$ jest wrażliwa na każdą zmianę parametru $Y_{(3)}$. Nieznaczna zawartość gazu w gruncie prowadzić może do znaczących zmian jakościowych zależności $p(\rho)$. Ma to znaczący wpływ na zanik czoła fali uderzeniowej powstałej w materiale wybuchowym.



Rys. 4. Zmiana ciśnienia p jako funkcja $1 - \rho_0/\rho$ [3]
Fig. 4. Change of a pressure p a function of $1 - \rho_0/\rho$ [3]

Na rys. 4 podano zmianę ciśnienia p w funkcji $\psi = 1 - \rho_o / \rho$. Proces obciążenia przebiega wzdłuż krzywej OA określonej równaniem (10):

$$\psi(p) = 1 - \rho_o / \rho \tag{10}$$

lub równaniem $\overline{\psi}(\rho) = p$

Ciśnienie p zmienia się skokowo od $p^{(o)}$ do $p_u = p_u(r,t)$.

To samo podejście ważne jest dla gęstości, która zmienia się z ρ_o do $\rho_u = \rho_u(r,t)$, tzn. do wartości gęstości gruntu na czole fali uderzeniowej.

Z przyjętych równań stanu gruntu wynika, że:

$$\frac{\rho_o}{\rho^2}\dot{\rho} = \frac{\partial \psi}{\partial p}\dot{p}, \quad \text{jeżeli} \quad p - \overline{\psi}(p) = 0; \quad \dot{p} > 0 \tag{11}$$

$$\frac{\rho_o}{\rho^2}\dot{\rho} = 0, \text{ jeżeli } p - \overline{\psi}(p) < 0 \text{ lub } p = \overline{\psi}(\rho) \text{ i } \dot{p} \le 0$$

Funkcję ψ lub $\overline{\psi}$ określa się na podstawie wyników doświadczalnych danego gruntu.

Równanie ruchu we współrzędnych Eulera ma następującą postać:

$$-\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \alpha_r \tag{12}$$

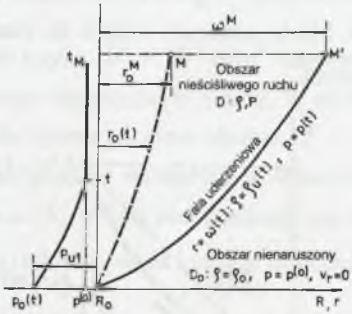
Przyjęto następujące warunki początkowe:

$$p = p^{(o)}, \quad \rho = \rho_o, \quad \vartheta_r = 0, \quad r = R \quad \text{dla } t = 0 \tag{13}$$

i brzegowe:

$$p(r,t)\Big|_{r=r_o(t)} = p_o(t) \tag{14}$$

gdzie funkcją $r = r_o(t)$ opisuje się ruch kulistego otworu przestrzennego.



Rys. 5. Obszar wartości rozwiązania w płaszczyźnie fazowej [3]
Fig. 5. Zone of solution values in a phasing plane [3]

Na rys. 5 podano zbiór wartości rozwiązania w płaszczyźnie stanu. Przy przyjętej zmianie $p = p_o(t)$ na brzegu kulistego otworu umiejscawia się natychmiast fala uderzeniowa w wolny od wybuchów obszar D_o, w którym:

$$\rho = \rho_o, \quad p = p^{(o)} \quad i \quad V = 0$$

Na czole fali są przemieszczenia radialne równe zeru, stąd $r = R$.

Ruch fali uderzeniowej w czasie t określa się funkcją:

$$r = R = \omega(t) \quad \text{lub} \quad t = \omega^{-1}(R)$$

Dynamiczne i kinematyczne warunki ciągłości dla czoła fali uderzeniowej mają postać:

$$p_u - p^{(o)} = \rho(\Omega - \vartheta_u)\vartheta_u; \qquad \rho(\Omega - \vartheta_u) = p_o \Omega \tag{15}$$

gdzie:

$$\Omega = \frac{d\omega}{dt} \text{ - prędkość propagacji fali uderzeniowej.}$$

Równanie (15) łącznie z równaniem konstytutywnym (10) $\rho_u = \overline{\psi}(\rho_u)$ tworzą układ trzech równań, służący do określenia czterech niewiadomych wielkości na czole fali uderzeniowej: $p_u, \rho_u, \vartheta_u, \Omega$.

4.3. Równania w obszarze nieściśliwego ruchu

Do wyprowadzenia równań w obszarze nieściśliwego ruchu (obszar D na rys. 5) służą równania (5). Do określenia jest funkcja $A(t)$, przy uwzględnieniu że dla $r = r_o(t)$ mamy $R = R_o$,, stąd otrzymujemy:

$$r^3 = 3\int_{Ro}^{R} \xi^3 \frac{\rho_o}{\rho_u(\xi)} d\xi + r_o^3(t) \tag{16}$$

tzn.

$$A(t) = r_o.$$

Wzorem (16) opisuje się ogólny kształt ruchu w nieściśliwym obszarze D. Zarówno gęstość ρ_u, jak i r stanowią tymczasowo niewiadome funkcje. Ponieważ równanie (16) jest ważne w każdym punkcie obszaru D, więc wynika, że dla $r = Rw(t)$ (fala uderzeniowa) mamy:

$$\omega^3(t) = 3\int_{Ro}^{\omega(t)} \xi^2 \frac{\rho}{\rho_u(\xi)} d\xi \; r_o^3(t) \tag{17}$$

Jest to dodatkowe równanie, służące do określenia nowo wprowadzonej zmiennej $r_o(t)$ opisującej ruch kulowego otworu przestrzennego.

Różniczkując równanie (17) względem czasu, otrzymuje się:

$$r_o^2 \dot{r}_o = \omega\, \Omega (1 - \frac{\rho_o}{\rho_u(t)}) \tag{18}$$

Równania (10), (15) i (18) tworzą układ czterech równań z pięcioma niewiadomymi funkcjami: p_u, ρ_u, Y_n, $\omega(t)$ i $r_o(t)$. Wobec czego piątym równaniem jest równanie ruchu strefy nieściśliwej. Na podstawie równań (12) i uwzględniając, że A = r_o (t), otrzymuje się następujące równanie w zapisie eulerowskim:

$$-\frac{\partial p(r,t)}{\partial r} = \rho\,(r,t) \left[\frac{\ddot{\overline{r_o^3}}}{3r^2} - \frac{2}{9} \frac{\dot{\overline{(r_o^3)^2}}}{r^5} \right] \tag{19}$$

Z równania (16) wynika, że występująca w równaniu (19) gęstość ρ w obszarze ruchu nieściśliwego jest funkcją jednej zmiennej $\bar{z} = r^3 - r_o^3(t)$, a mianowicie: $\rho(r, t) = \bar{\bar{\rho}}\,(\bar{z})$.

4.4. Sformułowanie początkowego zagadnienia brzegowego

Przedstawione uprzednio podstawowe równania rozpatrywanego zagadnienia opierają się na rozważaniach fizycznych. Uzyskane równania zawierają całki, których rozwiązanie matematyczne nie jest łatwe w konkretnych zagadnieniach początkowych i brzegowych.

Zagadnienie matematyczne w obszarze D sformułowano następująco:

a) Do ustalenia są funkcje ρ i p dwóch zmiennych (r, t):

$$\rho = \rho\,(r,t), \qquad p = p(r,t) \tag{20}$$

określone w obszarze $r_o(t) \le r \le \omega\,(t)$.

b) Do ustalenia pozostają dwie funkcje r_o (t) i $\omega\,(t)$ jednej zmiennej t:

$$r_o(t) \;\text{ i }\; \omega\,(t), \tag{21}$$

określone w obszarze zdefiniowanym równaniem (20).

Funkcje p i ρ muszą w obszarze D $r_o(t) \le r \le \omega\,(t)$ spełniać dwa następujące cząstkowe równania różniczkowe: dynamiczne równania równowagi i warunki nieściśliwości. Ponadto, funkcje r_o(t) i $\omega(t)$ muszą spełniać zwyczajne równania różniczkowe (18) (zależność między prędkością na brzegu otworu przestrzennego i prędkością fali uderzeniowej).

Funkcje $\rho(r,t)$ i $p(r,t)$ muszą spełniać następujące warunki brzegowe wzdłuż krzywych $r = r_o(t)$ i $r = \omega(t)$:

$$p(r,t)\big|_{r=r_o} = p_o(t) \tag{22}$$

$$p_u - p^{(o)} = \rho_o (\dot{\omega})^2 \left(1 - \rho_o / \rho_u\right), \qquad p_u = \psi\,(\rho_u)$$

gdzie:

$$\rho_u = \rho\,\big|_{r=\omega(t)}, \qquad p_u = p\big|_{r=\omega(t)}$$

Funkcje $r_o(t)$ i $\omega(t)$ spełniać muszą następujące warunki początkowe:

$$r_o\big|_{t=0} = \omega\big|_{t=0} = R_o \quad \dot{r}_o\big|_{t=0} = \vartheta_1 \tag{23}$$

Poprzednio sformułowane zagadnienie początkowe i brzegowe jest dla układów nieliniowych cząstkowych równań różniczkowych zwyczajnych zagadnieniem nietypowym.

Brak jednego równania zwyczajnego będzie zastąpiony przez nadmiar warunków brzegowych (22). Jeżeli istnieje tego rodzaju równanie do jednoznacznego określenia funkcji $\rho(r,t)$ i $p(r,t)$, wystarczą dwa z trzech warunków brzegowych (22).

Zatem zagadnienie początkowe i brzegowe jest postawione poprawnie.

Szczegółowe przedyskutowanie przybliżonej metody rozwiązania przedstawionego zagadnienia można znaleźć w [7].

5. Wyniki obliczeń numerycznych

W wyniku wykonanych obliczeń możliwe jest:

1. Ustalenie promienia kulowego otworu przestrzennego po uderzeniu fali od mikrowybuchu.
2. Określenie promienia zagęszczonego obszaru. W obliczeniach przyjęto, że za obszar zagęszczony uważa się taki, w którym gęstość gruntu po zakończeniu mikrowybuchu jest o 1% większa od gęstości początkowej

$$\rho \geq 1{,}01\,\rho_o = \rho^*$$

5.1. Określenie średniego stopnia zagęszczenia gruntu w strefie zagęszczanej

Wyniki wykonanych obliczeń przedstawiono w formie nomogramów. Wprowadzono następujące zmienne bezwymiarowe:

$$x = \frac{r}{R_o}, \quad \tau = a\frac{t}{R_o} \quad \text{gdzie} \quad a = \left(\frac{p_{u1}}{\rho_{u1}}\right)^{1/2}, \quad y(\tau) = r_o(\tau)\big|R_o$$

$$\overline{\rho}(x,\tau) = \rho/\rho_{u1}, \quad \overline{p}(x,\tau) = p/p_{u1}, \quad \overline{p}^{(o)} = p^{(o)}/p_{u1}$$

$$\overline{\rho}_o = \rho_o/\rho_{u1}, \quad \overline{\omega}(\tau) = \omega/R_o$$

gdzie: p_{u1} i ρ_{u1} oznaczają ciśnienie i gęstość w gruncie od fali uderzeniowej w punkcie wyjścia.

A. Nomogram 1

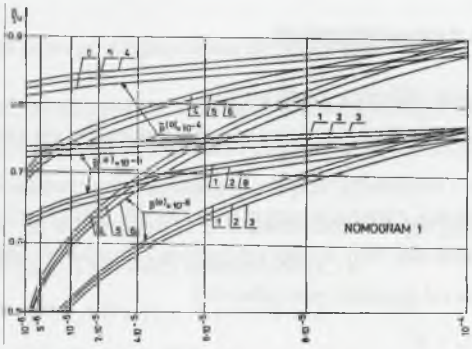
Gęstość gruntu w dowolnym punkcie fali uderzeniowej związana jest z ciśnieniem prawem konstytutywnym materiału gruntowego.

Zależność między bezwymiarową gęstością $\overline{\rho}_u$ i bezwymiarowym ciśnieniem $\overline{p}$ otrzymuje się z równania (8):

$$\rho = \rho_o \left\{ \sum_{k=1}^{3} V_{(k)}^{o} \left[\beta_k \left(\frac{\overline{p}}{\overline{p}^{(o)}} - 1 \right) + 1 \right]^{-1/\gamma_k} \right\}^{-1} = \psi_1^{-1}(\overline{p}) \tag{24}$$

Zależność (24) zależy tylko od bezwymiarowego parametru $\overline{p}^{(o)}$ i stałych $Y_{(k)}^{o}$, β_k, γ_k.

Na rys. 6 podano część tej zależności odpowiadającej małym wartościom $\overline{\rho}_o$.



Rys. 6. Gęstość gruntu jako funkcja p w zmiennych bezwymiarowych [3]
Fig. 6. Soil density as a function p in dimensionless variables [3]

Obliczenia przeprowadzono dla trzech wartości parametrów $\overline{p}^{(o)}$: $\overline{p}^{(o)} = 10^{-5}$ *i* 10^{-6} przy różnej zawartości wody i gazu w gruncie.

Przyjęto następujące dane wyjściowe:

- wskaźnik politropy rozprzestrzeniania się gazu wybuchowego $\gamma = 3$,
- początkowe części objętościowe wody i gazu:

(1) $Y_{(2)}^{o} = 0{,}099$, $Y_{(3)}^{o} = 0{,}01$ (4): $Y_{(2)}^{o} = 0{,}199$, $Y_{(3)}^{o} = 0{,}001$

(2) $Y_{(2)}^{o} = 0{,}095$, $Y_{(3)}^{o} = 0{,}005$, (5): $Y_{(2)}^{o} = 0{,}195$, $Y_{(3)}^{o} = 0{,}005$

(3) $Y_{(2)}^{o} = 0{,}09$, $Y_{(3)}^{o} = 0{,}001$, (6): $Y_{(2)}^{o} = 0{,}190$, $Y_{(3)}^{o} = 0{,}010$

Za pomocą nomogramu 1 można określić ciśnienie czoła fali uderzeniowej w obszarach małego zagęszczenia gruntu.

B. Nomogramy 2 i 3

Obliczenia zmian gęstości gruntu na czole fali uderzeniowej prowadzono do czasu $t = t_M\ (\tau = \tau_M)$, w którym gęstość $\overline{\rho}_u$ osiągnęła wartość ρ^*.

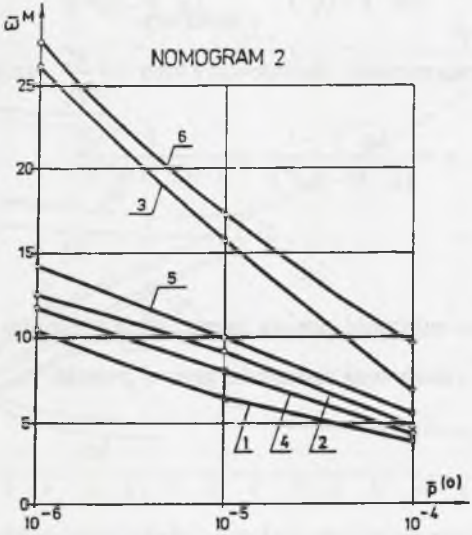
Na rys. 5 uwidoczniono obszar rozwiązania. Punktem M określa się położenie fali uderzeniowej w czasie $t_M\ (\tau_M)$, jeżeli $\overline{\rho}_u = \rho^*\ (\overline{\rho}_u = \rho^* / \rho_{u1})$.

Odległość punktu M od miejsca wybuchu określana jest promieniem ω^M (wartość bezwymiarowa $\overline{\omega}^M = \dfrac{\omega^M}{R_o}$).

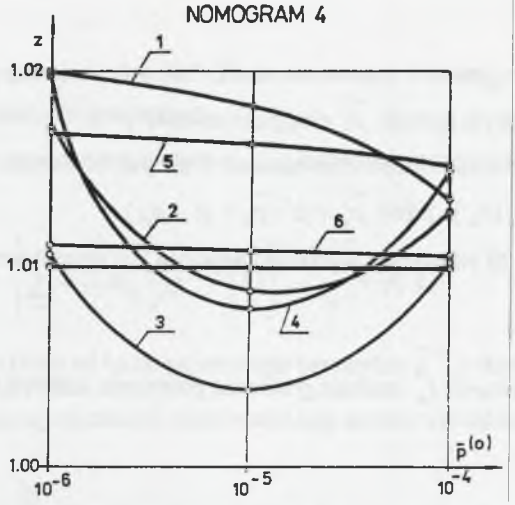
Odpowiadająca czasowi t_M wartość graniczną promienia kulistego otworu przestrzennego oznaczono $Y^M = \dfrac{r_o^M}{R_o}$.

Zgodnie z przyjętym teoretycznym modelem zagęszczenia można rozpatrywać kulisty pierścień r_o^M i $\omega^M > \dfrac{r_o}{y^M}$ i $\overline{\omega}^M > y^M$ jako obszar zagęszczony.

Analizując podstawowe wzory opisane bezwymiarowymi wielkościami zagęszczeń początkowego i brzegowego, dochodzi się do stwierdzenia, że zarówno y^M, jak i ω^M są funkcjami parametru $\overline{p}^{(o)}$ i stałych β_k, Y_k, γ_k i wykładnika politropy materiału wybuchowego. Na rys. 7 i 8 podano zależności $\overline{\omega}^M$ i y^M od $\overline{p}^{(o)}$ i $Y^o_{(k)}$.



Rys. 7. Nomogram do określania zasięgu strefy zagęszczonego gruntu [3]
Fig. 7. Nomogram of the radius of compacted area [3]



Rys. 8. Bezwymiarowy promień utworzonej kulistej przestrzeni [3]
Fig. 8. Dimensionless spherical soil radius [3]

Nomogramy 2 i 3 umożliwiają teoretyczną ocenę (oszacowanie) zasięgu zagęszczenia gruntu pod wpływem pojedynczego mikrowybuchu ładunku kulistego. Pośrednio za pomocą tych nomogramów określić można również średni stopień zagęszczenia.

Średnią gęstość ρ_m w obszarze $y^M \le y \le \omega^M$ ustalić można ze wzoru:

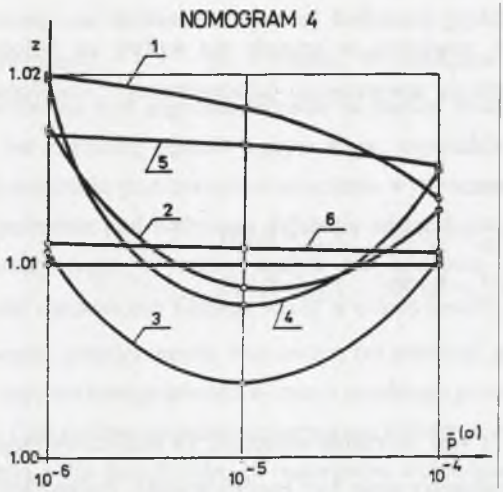
$$\rho_m = \frac{\rho_o\left[(\omega^M)^3 - R_o^3\right]}{(\omega^M)^3 - (r_o^M)^3} = \rho_o \frac{(\bar{\omega}^M)^3 - 1}{(\bar{\omega}^M)^3 - (y^M)^3}. \tag{25}$$

Stąd średni stopień zagęszczenia zdefiniowany jako $z = \frac{\rho_m}{\rho_o}$ wyznacza się ze wzoru:

$$z = \frac{(\bar{\omega}^M)^3 - 1}{(\bar{\omega}^M)^3 - (y_o^M)^3} \cong \frac{1}{1 - (y^M / \omega^M)^3} \tag{26}$$

C. Nomogram 4

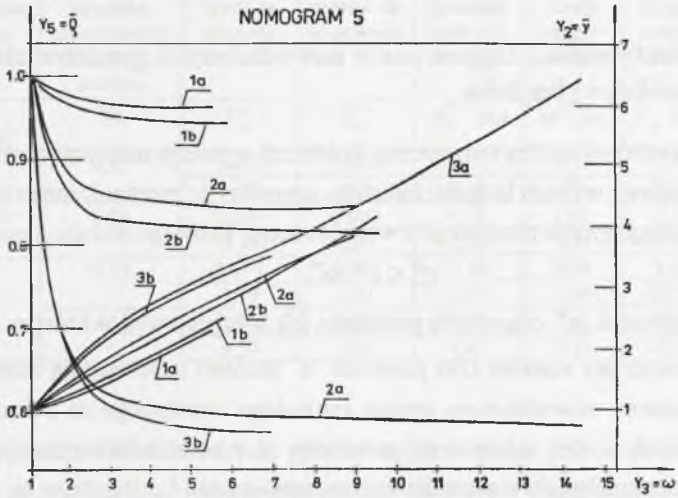
Na rysunku 9 podano zależność stopnia zagęszczenia w funkcji bezwymiarowego ciśnienia mikrowybuchu $\bar{p}^{(o)}$ i wody oraz zawartości gazu w gruncie.



Rys. 9. Zależność średniego stopnia zagęszczenia od średniego ciśnienia wybuchowego [3]
Fig. 9. Relationship between the mean compaction degree and the mean pressure of explosion [3]

D. Nomogram 5

Na rys. 10 zamieszczono nomogram do określenia zmniejszenia gęstości gruntu na czole fali uderzeniowej w zależności od położenia fali (krzywe opadające). Na tym samym rysunku pokazano wzrost promienia y (utworzonego kulistego otworu przestrzennego) w funkcji wzrostu odległości $\overline{\omega}$ fali od tego otworu (krzywe wzrastające).



Rys. 10. Zmniejszenie gęstości gruntu w funkcji położenia fali oraz wzrostu promienia utworzonej kulistej przestrzeni w odległości fali od tej przestrzeni [3]
Fig. 10. Reduction of soil density as a function of a high-impact shock wave position and of the increase of the spherical soil radius in function of the distance from this space [3]

Zawartość wody i powietrza w gruncie ma wpływ na położenie punktu, w którym $\rho = \rho^{*}$. Zmiana promienia utworzonego (uformowanego) kulistego otworu uwarunkowana jest wielkościami $V^{o}_{(2)} + V^{o}_{(3)}$.

Na rys. 10 określono:

1. $\overline{\rho}^{(o)} = 10^{-4}$ a. $V^{o}_{(2)} = 0{,}099$; $V^{o}_{(3)} = 0{,}001$

   b. $V^{o}_{(2)} = 0{,}190$; $V^{o}_{(3)} = 0{,}010$

2. $\overline{\rho}^{(o)} = 10^{-5}$

3. $\overline{\rho}^{(o)} = 10^{-6}$

Kształt krzywych $\rho_u(\overline{\omega})$ wyraźnie wskazuje, że miejscowy stopień zagęszczenia gruntu w otoczeniu otworu kulistego może być bardzo wysoki. Podane krzywe pozwalają na oszacowanie zagęszczenia w otoczeniu $\overline{\omega} = 1$.

Jednakże należy podkreślić, że zachodzą w otoczeniu otworu zjawiska fizyczne, jak degradacja gruntu, filtracja wody w wyniku spadku ciśnienia występującego w końcowej fazie wybuchu gazu i inne, są bardzo złożone i nie zostały uwzględnione w modelu teoretycznym.

Dodatkowo należy uznać, że z podanych nomogramów największe praktyczne znaczenie mają nomogramy 2 do 4. Pozwalają one na oszacowanie słabych stref zagęszczonych i małego stopnia zagęszczenia przez jednorazowy wybuch ładunku kulistego.

6. Ocena efektywności zagęszczania nawodnionych gruntów ziarnistych metodą mikrowybuchów

Z przeprowadzonej analizy teoretycznej i obliczeń wynikają następujące wnioski:

1. Jednorazowy wybuch ładunku kulistego prowadzi do mechanicznego zagęszczenia nawodnionego gruntu ziarnistego z wytworzonego kulistego otworu o promieniu:

$$r_o^M \le r \le \omega^M \tag{27}$$

   gdzie promień ω^M odpowiada położeniu fali uderzeniowej, w którym $\rho = 1{,}01\rho_o$.

   Wyprowadzony wzorem (26) parametr z stanowi odpowiednią miarę efektywności zagęszczenia nawodnionego gruntu ziarnistego uzyskanego za pomocą metody mikrowybuchów. Nie należy mylić parametru z z powszechnie przyjmowanym w geotechnice określeniem wskaźnika zagęszczenia gruntu I_D. Parametr z oblicza się jako funkcję stopnia zagęszczenia po wybuchu I_u i przed wybuchem I_o według wzoru:

$$z = (I_u + 1)/(I_o + 1)$$

Nie można oszacować na drodze teoretycznej końcowej gęstości materiału gruntowego w kuli o promieniu $r < r_o^M$ po wybuchu. Występujące zjawiska w obszarze przebiegu mikrowybuchu i po jego zakończeniu są bardzo złożone i trudne do teoretycznego ujęcia. Na końcową gęstość wpływ mają, wywołane spadkiem ciśnienia, sposób degradacji materiału gruntowego w otoczeniu wytworzonego kulistego otworu i sposób jego wypełnienia pod wpływem działania sił ciężkości po zakończeniu eksplozji gazu wybuchowego. Wyraźny wpływ na końcową gęstość w obszarze $r < r_o^M$ może mieć dynamiczna filtracja wody w czasie spadku ciśnienia panującego w tworzonym otworze przestrzennym. Nie można też pominąć pojawienia się filtracji wody w kierunku wytworzonego otworu w czasie przebiegu procesu mikrowybuchu.

2. Za pomocą wzoru (26) podano promień utworzonego kulistego otworu i średni w nich stopień zagęszczenia z dla dwóch różnych materiałów wybuchowych: skalnego dynamitu 5G 5A i granulowanego trotylu (tablica 2) łatwo można określić średnie ciśnienie materiału wybuchowego p_{ul}, a nomogramy 2 do 4 pozwalają na wyznaczenie r_o^M i ω^M oraz objętości V_p zagęszczonego pierścieniowego obszaru. Przyjęto dwie różne wartości początkowego promienia utworzonego kulistego otworu: R_o = 0,15 m i R_o = 0,33 m.

Tablica 2

Zestawienie wyników obliczeń wg przedstawionej analizy teoretycznej

Materiał wybuchowy	Średnie ciśnienie wybuchowe	Początkowy promień utworzonego kulistego otworu	Zawartość wody w gruncie	Zawartość powietrza w gruncie	Końcowy promień kulistego otworu	Promień strefy zagęszczonej	Objętość zagęszczonej strefy	Sredni stopień zagęszczenia
	p^* [MPa]	R_0	$Y^0_{(2)}$	$Y^0_{(3)}$	r_0^M [m]	ω^M [m]	V_p [m^3]	z
Dynamit skalny 5G 5A	1100	0,15	0,099	0,001	0,32	0,72	1,50	1,086
			0,19	0,01	0,55	1,71	20,12	1,034
		0,33	0,099	0,001	0,71	1,61	15,90	1,089
			0,19	0,01	1,21	3,75	214,2	1,034
Trotyl granulowany	7111	0,15	0,099	0,001	0,38	0,98	3,66	1,058
			0,19	0,01	0,67	2,49	63,71	1,020
		0,33	0,099	0,001	0,83	2,15	38,99	1,057
			0,19	0,01	1,47	5,49	678,4	1,019

*) P_{ul}

Z tablicy 2 wynika, że średnia wartość gęstości zagęszczonego gruntu, po jednorazowym mikrowybuchu i gęstości gruntu przed wybuchem, zmienia się w zagęszczanej strefie w granicach 1,019 do 1,088.

Zawartość wody w gruncie (tablica 1) i obliczona wartość ciśnienia p_{ul} mają mały wpływ na zagęszczenie gruntu metodą mikrowybuchu. Obydwa czynniki wpływają znacząco na

promienie zagęszczonej strefy. Można przyjąć, że promień zagęszczanej strefy jest w granicach:

$$0{,}72m \leq \omega^M \leq 5{,}49m$$

Literatura

1. Damicio Ch.: La consolidation des sols sans cohésion par explosion. Construction: t. XXV, 1970, t. XXVI, 1971, t. XXVII, 1972.
2. Dembicki E., Kisielowa N., Nowacki W.K., Raniecki B.: Dynamische Boden verfestigung durch Tiefsprengungen. Bautechnik, 10, 1988.
3. Dembicki E., Kisielowa N., Nowacki W.K., Raniecki B.: Theoretische Analyse der dynamischen Bodenverdichtung durch Sprengung. Bautechnik, 2, 1989.
4. Ivanov R.L.: Upłotnenie małosvjaznych gruntov vzrivami. Isdatelstwo NEDRA, Moskva 1983.
5. Lachov G.M.: Fale uderzeniowe w ośrodkach wieloskładnikowych (po rosyjsku) AN SU, OTN Mechanika i Maszinostr., 1, 1959.
6. Mandel J.: Introduction à la mécanique des milieux continus déformables. PWN, Warszawa 1974.
7. Nowacki W.K., Raniecki B.: Theoretical analysis of dynamic compacting of a soil around a spherical source of an explosion. Arch. of Mechanics, 1987.
8. Tomaskovics N.: Beitrag zur Klärung der Mechanismen von Verdichtungssprengungen. Veröffentlichungen IFGT, Bergakademie – Technische Universität Freiberg, 2001, Heft 2001-3.
9. Raju V.R.: Spontane Verflüssing lockerer granularer Körper. Veröffentlichungen IBFM, Universität Karlsruhe, Helft Nr. 134, Karlsruhe 1994.