

MARIAN ŁUPIEŻOWIEC

Katedra Geotechniki
Politechnika Śląska w Gliwicach

WPLYW WSTRZĄSÓW WYWOŁANYCH KONSOLIDACJĄ DYNAMICZNĄ NA SĄSIEDZTWO

INFLUENCE OF VIBRATIONS CAUSED BY DYNAMIC CONSOLIDATION
ON THE NEIGHBOURHOOD

Streszczenie. W pracy rozważano oddziaływanie wstrząsów wywołanych konsolidacją dynamiczną na sąsiedztwo i obiekty budowlane znajdujące się w pobliżu. Opisano mechanizm rozchodzenia się drgań, które powodują zagęszczenie i wzmocnienie podłoża gruntowego w zależności od materiału, z jakiego jest zbudowane, oraz energii ubijania. Omówiono również oddziaływanie wstrząsów na otoczenie ze szczególnym uwzględnieniem osiadań terenu. W części analitycznej, w odniesieniu do wyników pomiarów drgań wzbudzanych na konstrukcjach, podano przybliżony sposób prognozy oddziaływań, który może być szczególnie użyteczny w projektowaniu i realizacji wzmocnień podłoża wykonywanych z użyciem metod udarowych.

Słowa kluczowe: konsolidacja dynamiczna, wzmocnienie podłoża, wpływ wstrząsów na otoczenie

Wstęp

Realizacja znacznej liczby robót budowlanych, szczególnie w zakresie geoinżynierii, jest związana z generowaniem wstrząsów i drgań, które niekorzystnie oddziałują na otoczenie. Okazuje się, że ze względu na pobliską zabudowę lub istniejącą infrastrukturę nie jest możliwe wykorzystanie wielu technologii, które pozwalają na efektywne i tanie wzmocnienie słabego podłoża gruntowego oraz posadowienie konstrukcji w skomplikowanych warunkach terenowych. Bardzo ważnym zagadnieniem jest poznanie mechanizmu wzmocnienia stosowanego w danej metodzie, jego wpływu na sąsiedztwo oraz sposobów minimalizacji oddziaływania. Wiedza ta umożliwi bardziej dokładne i optymalne projektowanie wzmocnień, a przede wszystkim zapobiegnięcie ewentualnym zniszczeniom. Problemy te są niezwykle ważne, ponieważ coraz częściej zachodzi

potrzeba realizacji inwestycji na terenach odznaczających się trudnymi warunkami gruntowymi, przez co prawie zawsze należy wykonać wzmocnienie podłoża. Ponadto metody najbardziej efektywne i tanie, które są szczególnie chętnie wybierane przez projektantów, wykorzystują technologie dynamicznego oddziaływania na podłoże.

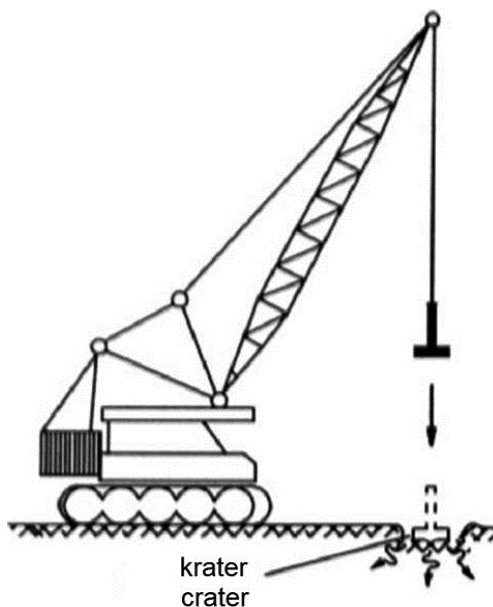
W pracy rozważany będzie wpływ technologii konsolidacji dynamicznej, zwanej też ciężkim ubijaniem, na budynki i elementy infrastruktury znajdujące się w pobliżu budowanych obiektów. Omówiony będzie mechanizm wzmocnienia podłoża, który jest wykorzystywany w omawianej technologii, sposób rozchodzenia się drgań w półprzestrzeni gruntowej oraz zasięg oddziaływania na bezpośrednie otoczenie. Przedstawiona będzie również próba prostego modelowania numerycznego tytułowego zagadnienia, na którego podstawie zostaną wyspecyfikowane parametry mające decydujący wpływ na zasięg oddziaływania drgań.

Mechanizm wzmocnienia konsolidacji dynamicznej

Wspomniana na wstępie metoda konsolidacji dynamicznej jest jedną z najtańszych i najbardziej efektywnych metod wzmocnienia podłoża. Jej szczególną zaletą jest bardzo niewielkie zużycie dodatkowego materiału, który jest potrzebny w zasadzie tylko na zasypywanie powstałych kraterów oraz sporadycznie na wykonanie platformy roboczej. Ponadto nie zachodzi potrzeba używania skomplikowanego i kosztownego sprzętu.

Twórcą metody jest Menard (MENARD i BROISE 1975), natomiast jej zastosowanie w Polsce zawdzięcza się prof. GRYCZMAŃSKIEMU (2003). Technologia wzmocnienia polega na swobodnym zrzucaaniu ciężkiego ubijaka z odpowiednio dużej wysokości na słabe i luźne podłoże (rys. 1). Spadający ubijak wywołuje propagację fal w warstwach gruntu, które to fale z kolei są przyczyną nieodwracalnych deformacji objętościowych ziaren tworzących materiał gruntowy. Deformacje te polegają na zmniejszaniu się objętości porów materiału ziarnistego. Zmiana porowatości gruntu powoduje zwiększenie zagęszczenia podłoża, bezpośrednio przekładające się na jego nośność i sztywność. W przypadku typowych nacisków, jakie wywołują zarówno fundamenty bezpośrednie, jak i podstawy większości budowli ziemnych (w tym nasypów komunikacyjnych), które nie przekraczają 400 kPa, tytułowa metoda gwarantuje wystarczające przygotowanie podłoża pod bezpieczne posadowienie fundamentu.

Stosowane do robót ubijaki są wykonane z pospawanych ze sobą płyt stalowych, a ich masa, w zależności od wykonawcy wzmocnienia, wynosi około 7-20 t. Wysokości ubiaków wynoszą około 0,5-1,5 m, natomiast wymiar boków to 1,0-2,0 m. Ubijaki te zrzucane są z wysokości 10-30 m (najczęściej 15 m). Powyższe parametry dotyczą inwestycji prowadzonych w Polsce. W świecie wykorzystuje się ubijaki dochodzące do 40 t zrzucane z wysokości 100 m (np. realizacja lotniska w Nicei – MENARD i BROISE 1975). Zwykle stosuje się rozstaw kraterów 3,0-5,0 m, w zależności od wymiarów ubijaka oraz stosowanej energii zrzucania (im większa energia – tym większe rozstawy). Ubijak najczęściej zrzucany jest około 5-20 razy w jedno miejsce. Najczęściej używa się maszyn dźwigowych, których konstrukcja umożliwia, po podniesieniu ubijaka na żądaną wysokość, wypięcie go i swobodne zrzucenie. Nowsza generacja maszyn umożliwia zrzucanie ubijaka bez konieczności odczepiania go od szczepek dźwigu, co zwiększa wydajność robót oraz skraca czas ich wykonywania.



Rys. 1. Schemat przebiegu procesu konsolidacji dynamicznej

Fig. 1. Scheme of the dynamic consolidation process

Dynamiczne zagęszczanie można podzielić na trzy etapy. Pierwszy – zasadniczy – to zrzuty ubijaka z pełnej, przewidzianej przez projektanta wysokości. Zapewnia on, poprzez opisany wcześniej mechanizm, wzmocnienie podłoża do przewidywanej głębokości. Druga faza polega na zrzucaniu ubijaka (może być ten sam lub mniejszy – w zależności od możliwości wykonawcy) z mniejszej wysokości, w miejsca pomiędzy kraterami. Faza ta, zwana „prasowaniem” (*ironing*), zapewnia zagęszczenie wierzchnich warstw podłoża (do około 1,0-2,0 m w głąb), które zostały rozluźnione w pierwszym etapie realizacji. Ważne jest tutaj stosowanie znacznie mniejszej energii zrzucania, tak aby nie powodować kolejnych przypowierzchniowych rozluźnień gruntu, jak ma to miejsce w pierwszym etapie robót. Wreszcie ostatnim elementem robót jest wyrównanie i zagęszczenie ciężkim walcem wibracyjnym całości terenu. Tutaj zasięg zagęszczenia to maksimum 0,5 m. Pozwala to na uzyskanie jednorodnego i zagęszczonego podłoża. Zakładaną skuteczność metody warunkuje prawidłowe wykonanie wszystkich trzech faz, które przewiduje omawiana technologia.

Ciężkie ubijanie stosuje się przede wszystkim w przypadku zalegania w podłożu luźnych gruntów niespoistych lub nasypów niebudowlanych zbudowanych przede wszystkim z materiałów grubookruchowych. Jeżeli chodzi o te ostatnie, to na Górnym Śląsku bardzo często ich budulcem jest łupek przywęglowy powstały wskutek działalności wydobywczej kopalń i innych zakładów przemysłowych. Metoda ta nie jest do końca skuteczna, gdy materiał gruntowy zawiera znaczne ilości części spoistych, a zwłaszcza organicznych. W takim przypadku należy stosować zasypywanie kraterów

ostrokrzewdzistym materiałem grubookruchowym, co upodabnia opisywaną technologię do technologii kolumn kamiennych. Należy tutaj zwrócić uwagę, że konsolidację dynamiczną można zaliczyć do tzw. metod „samosprawdzających się”. Określenie to oznacza, że dobór zużycia materiału, ilości zrzutów, a nawet opisane wcześniej „płynne przejście” z czystej konsolidacji dynamicznej do dynamicznej wymiany (inaczej – kolumn kamiennych wbijanych), zależy bezpośrednio od samych warunków gruntowych. Na etapie realizacji robót możliwa jest korekta ewentualnych błędów projektanta, a także niezgodności rzeczywistych warunków gruntowych z tym, co zostało rozpoznane na etapie projektowania. Metoda ta, pod warunkiem prawidłowego zastosowania, umożliwia więc uzyskanie w miarę jednorodnego podłoża pod fundament lub budowlę ziemną, co jest – zdaniem autora – jedną z jej najważniejszych zalet.

Projektując opisywane wzmocnienie, należy przede wszystkim w taki sposób dobrać jego parametry, aby zapewnić wystarczającą głębokość wzmocnienia podłoża. Może ona być oszacowana (por. MENARD i BROISE 1975 oraz PAN i SELBY 2002) na podstawie poniższej empirycznej zależności:

$$h_z = (0,5-1,0) \cdot \sqrt{M \cdot H} \quad (1)$$

gdzie:

h_z – głębokość do jakiej sięga wzmocnienie (m),

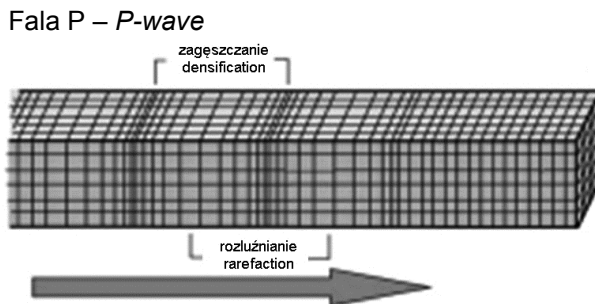
M – masa ubijaka (t),

H – wysokość jego zrzucania (m).

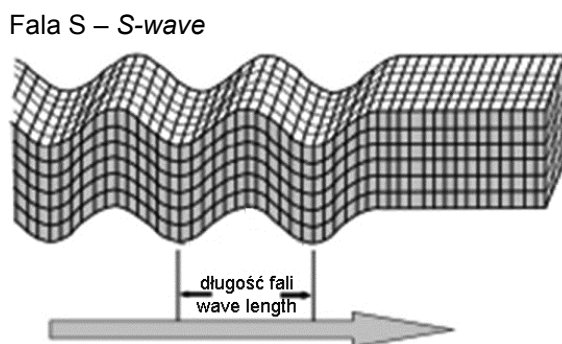
Z powyższej zależności wynika, że czynnikiem decydującym jest energia wzmocnienia wyrażana iloczynem $M \cdot H$. Niewiadomą jest dobór współczynnika przed pierwiastkiem w prawej stronie równania (1). Współczynnik ten zależy od warunków gruntowych i jedyną możliwością jego oszacowania jest sprawdzenie głębokości wzmocnienia na poletku doświadczalnym wykonanym przed rozpoczęciem robót. Najczęściej przyjmuje on wartości z przedziału 0,8-1,0 dla sypkich materiałów grubookruchowych oraz 0,5-0,7 dla gruntów drobniejszych z zawartością części spoistych. Szczególnie dla pierwszego rodzaju gruntów technologia ta jest najbardziej efektywna. W przypadku próby stosowania metody w gruntach organicznych wartość współczynnika może spaść nawet do 0,2, co powoduje, że sposób wzmocnienia może być nieuzasadniony.

Wpływ wstrząsów na otoczenie

Opisane wzmocnianie i zagęszczanie podłoża jest możliwe poprzez generację drgań wskutek gwałtownego dostarczenia ogromnej energii. Wywoływane w podłożu drgania można podzielić na trzy główne rodzaje fal propagujące się po wywołaniu uderu. Pierwsze z nich – fale podłużne (*P-waves*) – to rozchodzenie się deformacji (okresowych zagęszczeń i rozrzedzeń ośrodka) w kierunku wzdłużnym (rys. 2). Są to drgania rozchodzące się najszybciej – ich prędkość znacznie rośnie w przypadku materiałów mało ściśliwych. Drugie z generowanych fal – poprzeczne (*S-waves*) – polegają na okresowym wywoływaniu ruchu cząstek gruntu w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji (rys. 3). Prędkość rozchodzenia się fal poprzecznych zależy od sztywności



Rys. 2. Schemat rozchodzenia się fali podłużnej
Fig. 2. Scheme of the propagation of the longitudinal wave



Rys. 3. Schemat rozchodzenia się fali poprzecznej
Fig. 3. Scheme of the propagation of the transverse wave

gruntów przy ścinaniu, a dla typowych gruntów mieści się w przedziale 200-500 m/s. Prędkości te, zarówno dla fal podłużnych, jak i poprzecznych, opisują zależności:

$$v_p = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}}, \quad v_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho}} \quad (2)$$

gdzie:

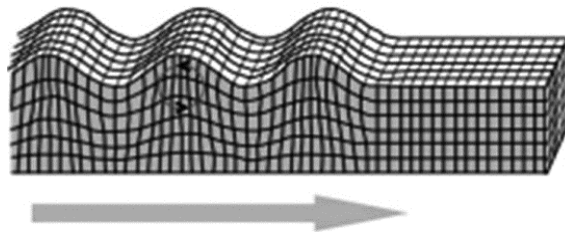
v_p i v_s – prędkości rozchodzenia się fal (odpowiednio: podłużnej i poprzecznej),
 E_0 i G_0 – moduły (odpowiednio: sprężystości Younga i ścinania),
 ρ – gęstość ośrodka gruntowego.

W powyższych zależnościach należy zwrócić uwagę, że obecne w nich parametry deformacyjne powinny odpowiadać wielkościom odkształceń, które występują podczas rozchodzenia się drgań. Ich wartości mieszczą się w przedziale 10^{-4} do $10^{-3}\%$. Według BURLANDA (1989) wartości parametrów odkształceniowych dla małych wartości deformacji są nawet kilkadziesiąt razy większe niż odpowiadające odkształceniom obserwowanym przy realizowaniu posadowień budynków (ŁUPIEŻOWIEC 2009). Z tego powodu do ich oszacowania należy użyć metod badawczych, których próbka jest podda-

wana odkształceniom mieszczącym się w powyższym przedziale (elementy typu „bender”, kolumny rezonansowe, badania dylatometrem sejsmicznym SDMT, stożkiem sejsmicznym SCPTU itp.), stąd indeks „0” występujący przy modułach E i G w zależności (2), który oznacza, że przyjęte wartości odpowiadają bardzo małym odkształceniom (tzw. moduły początkowe).

Oprócz opisanych wyżej fal rozchodzących się w podłożu gruntowym, których dotarcie na powierzchnię i związane z tym działania destrukcyjne są warunkowane odbiciem od ośrodka o znacznie większej sztywności (np. zalegającej skały), o negatywnym oddziaływaniu na pobliskie konstrukcje decyduje propagacja fal powierzchniowych. Do tego typu oddziaływań można zaliczyć fale Rayleigha (rys. 4) oraz Love’a. Te pierwsze są typu grawitacyjnego, tzn. ich drgania mają charakter zbliżony do drgań wzburzonej pionową siłą powierzchni cieczy. Cząstki gruntu drgają po elipsie pionowej ustawionej w kierunku biegu fali. Głębokość, do której propagacja wywołuje ruch cząstek, jest odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości. Najbardziej groźne dla konstrukcji budowlanych są częstości 5-25 Hz. Tego typu oddziaływania są obserwowane podczas realizacji konsolidacji dynamicznej. Prędkość fal Rayleigha jest zbliżona do prędkości fal poprzecznych. Rozchodzenie się fal Love’a polega na drganiach poziomych prostopadłych do kierunku rozchodzenia się. Drgania te są szczególnie niebezpieczne podczas trzęsień ziemi. Ze względu na znacznie mniejszą propagację w stosunku do wcześniej wymienionych fal, wskutek właściwości tłumiących ośrodka gruntowego, fale Love’a nie powodują zagrożeń podczas wstrząsów wywołanych konsolidacją dynamiczną.

Fala Rayleigha – Rayleigh wave



Rys. 4. Schemat rozchodzenia się fali Rayleigha

Fig. 4. Scheme of the propagation of the Rayleigh wave

Stosując omawianą metodę w praktyce, należy w taki sposób dobrać jej parametry, aby wynikły wpływ na otoczenie nie powodował zagrożeń dla konstrukcji istniejących budynków. Najlepszym sposobem jest pomiar drgań wywoływanych bezpośrednio na analizowanej konstrukcji, a następnie porównanie uzyskanych rezultatów z wartościami dopuszczalnymi. Pomocna jest tutaj norma PN-85/B-02170, która zawiera ocenę wpływów dynamicznych na konstrukcję obiektu na podstawie pomierzonych wartości przyspieszeń, jakim poddawana jest konstrukcja budynku, oraz częstości wstrząsów. Jak wspomniano wcześniej, najbardziej niekorzystnym przedziałem częstotliwości dla typowych budynków jest przedział 5-25 Hz, dlatego też dla tego pasma ustalone są najmniejsze wartości dopuszczalnych przyspieszeń dla konstrukcji budynków. W cytowanej normie wpływy oddziaływań podzielone są na strefy – w zależności od szkodliwości oddziaływania. Zamieszczone w dokumencie nomogramy, zwane skalami SWD-I oraz

SWD-II, zawierają granice poszczególnych stref w odniesieniu do częstotliwości wywoływanych drgań. Ze względu na brak odpowiedniej liczby badań doświadczalnych zakres stosowania nomogramów jest ograniczony tylko do budynków o konstrukcji muryrowanej oraz z wielkiej płyty.

Strefa I, w której budynek w zasadzie nie doświadcza wpływów drgań, jest ograniczona dla najbardziej niekorzystnych częstotliwości wartością przyspieszenia 20 mm/s^2 . W II strefie, gdzie oddziaływania nie są niebezpieczne dla konstrukcji, lecz może zachodzić ryzyko uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych (tynki, płytki ceramiczne itp.), wartość przyspieszenia sięga 100 mm/s^2 . Powyżej tej wartości znajduje się III strefa, gdzie drgania są już odczuwalne przez konstrukcję i przy długotrwałym występowaniu mogą powodować ryzyko jej naruszenia. Strefy IV i V oznaczają już wpływy szkodliwe dla budynków i zagrażające przebywającym w nich osobom. Opisywana tutaj skala SWD jest jednym z najprostszych narzędzi oceny wpływu drgań na budynki, bardzo często wykorzystywanym w praktyce. Zwykle dopuszcza się drgania wywołujące wpływy dochodzące mniej więcej do połowy skali II strefy nomogramu SWD – w zależności od stanu technicznego budynku oraz długości oddziaływania. Istotne jest branie pod uwagę składowych poziomych generowanych przyspieszeń, które są głównie odczuwalne w typowych konstrukcjach budowlanych. Składowe pionowe, które w większości rzeczywistych przypadków osiągają większe wartości, nie są szczególnie niebezpieczne dla konstrukcji, natomiast są bardzo odczuwalne przez przebywających w budynkach ludzi.

Wpływ drgań na osoby znajdujące się w pobliżu miejsc realizacji robót jest przedmiotem normy PN-88/B-02171. Jak wspomniano, osiągające większe wartości pionowe składowe przyspieszeń często wywołują obawę o stan budynku. Dlatego też wykonawca jest zobowiązany do powstrzymania się od robót w nocy oraz w dni wolne od pracy, aby zminimalizować niekorzystne odczucia osób w nim przebywających. Najczęściej występujący zasięg negatywnego wpływu na budynki to około 30-100 m – w zależności od warunków gruntowych, natomiast ludzie odczuwają oddziaływania w odległości nawet do 500 m.

Przykładowe wyniki pomiarów terenowych (M. Właszczuk – por. ŁUPIEŻOWIEC i IN. 2009) zaprezentowano na rysunku 8, gdzie porównano je z wynikami symulacji numerycznych.

Modelowanie numeryczne rozchodzenia się drgań w podłożu

Modelując numerycznie omawiane zagadnienie, założono, że jest ono opisywane poniższym równaniem różniczkowym (ŁUPIEŻOWIEC i IN. 2009):

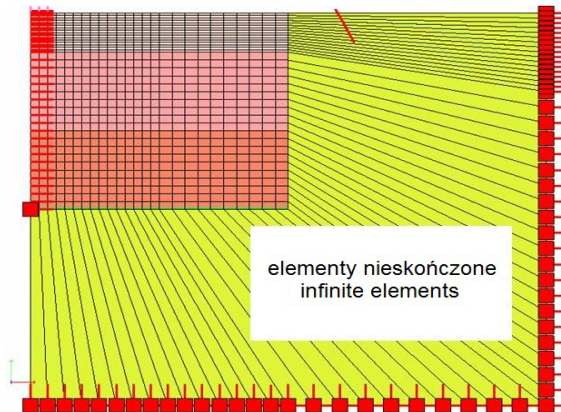
$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\kappa}, \dot{\boldsymbol{\kappa}}) \cdot \mathbf{u} = \mathbf{P}(t) \quad (3)$$

gdzie:

- \mathbf{M} – macierz mas,
- $\ddot{\mathbf{u}}$ – druga pochodna wektora przemieszczeń po czasie,
- \mathbf{K} – macierz sztywności, która w ogólności jest funkcją parametru wzmocnienia $\boldsymbol{\kappa}$ oraz jego prędkości $\dot{\boldsymbol{\kappa}}$,
- $\boldsymbol{\sigma}$ – wektor naprężenia,

- \mathbf{u} – wektor przemieszczeń,
- \mathbf{P} – oddziaływanie zewnętrzne,
- t – czas.

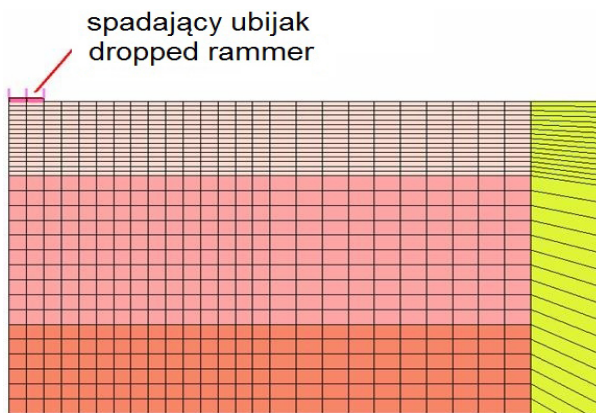
W powyższej zależności założono, że opór ośrodka gruntowego, powodujący tłumienie i zanik drgań generowanych przez wzbudzenie spadającym ubijakiem, jest ujęty silnie nieliniową funkcją sztywności materiału. Do powyższego równania należy dołączyć warunki początkowe i brzegowe, które razem stanowią kompletne sformułowanie problemu brzegowego. Warunki te najczęściej zakładają brak możliwości przemieszczeń we wszystkich kierunkach na dolnej krawędzi modelu oraz uniemożliwienie przemieszczeń w kierunku prostopadłym do płaszczyzn bocznych ograniczających model (rys. 5). W celu uniknięcia przekłamań w uzyskiwanych wynikach, poza rozważanym obszarem podłoża stosuje się elementy nieskończone, które symulują tzw. efekt pochłaniania fali na brzegach modelu. Warunki początkowe definiuje się poprzez określenie prędkości spadania ubijaka (rys. 6): $v_0 = \sqrt{2g \cdot H}$, gdzie H – wysokość zrzutu ubijaka. Przyjmuje się, że w pozostałych węzłach modelu zarówno prędkości, jak i przemieszczenia we wszystkich kierunkach są równe 0.



Rys. 5. Model zagadnienia brzegowego
Fig. 5. Model of the boundary problem

Ponieważ celem omawianych analiz jest tylko oszacowanie zasięgu wpływu konsolidacji na otoczenie, a nie dokładna symulacja zachowania się podłoża po wywołaniu impulsu, na potrzeby obliczeń uproszczono skomplikowaną postać macierzy \mathbf{K} we wzorze (3) do liniowej zależności naprężenie – odkształcenie, jednak z zachowaniem opisanych wcześniej bardzo dużych sztywności ośrodka dla małych wartości odkształceń.

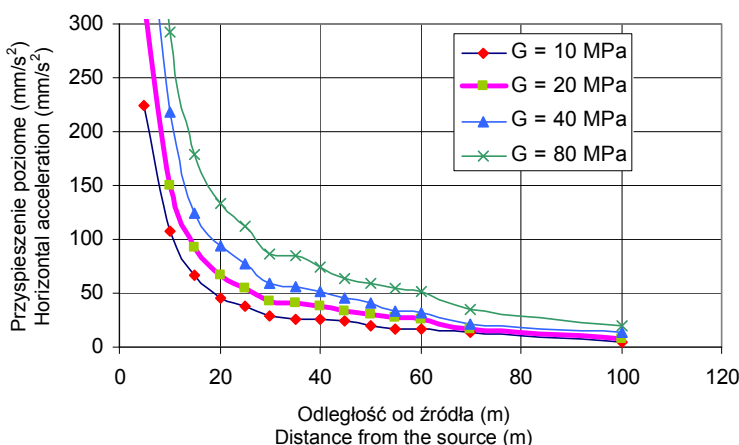
Do analizy numerycznej wykorzystano program metody elementów skończonych Z_Soil w wersji 2009 (ZIMMERMANN i IN. 2007). Analizowano przypadek osiowej symetrii, która umożliwia szacowanie zasięgu wpływów uderzeń w zależności od odległości od miejsca zrzutów. W modelu na rysunku 5 wyróżniono trzy strefy materiałowe. Pierwsza – wierzchnia – miała miąższość 10 m, a pozostałe – po 20 m, natomiast szerokość modelu to 100 m. Założono, że poza tymi elementami kontynualnymi znajdują się



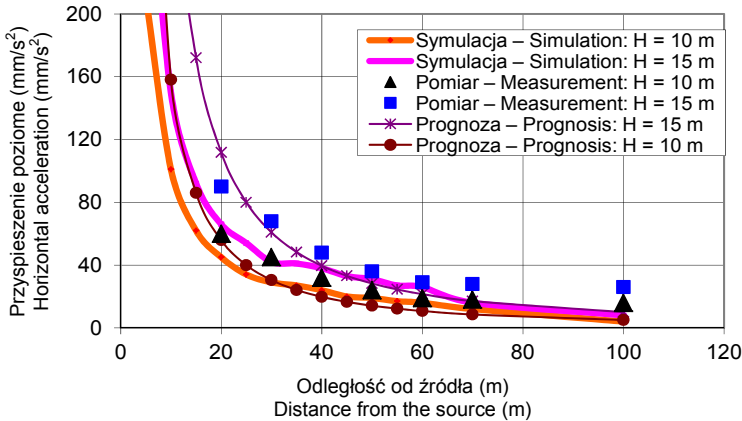
Rys. 6. Schemat przyjęcia warunków początkowo-brzegowych
Fig. 6. Scheme of the initial-boundary conditions

wspomniane wcześniej elementy nieskończone. Ciężar objętościowy elementów materiału gruntowego wynosił 19 kN/m^3 , natomiast współczynnik Poissona dla wszystkich elementów modelu $\nu = 0,30$. Moduł ścinania G dla pierwszej warstwy był zmienny i wynosił (w zależności od analizy) od 10 do 80 MPa. Sztywność przy ścinaniu drugiej warstwy to 60 MPa, natomiast trzeciej warstwy i elementów nieskończonych – 120 MPa. Przyjęte parametry odpowiadają średnionośnym gruntom niespoistym, czyli takim, dla których najczęściej wykorzystuje się do wzmocnienia metodę ciężkiego ubijania.

Z przeprowadzonego szeregu analiz wybrano do omówienia wyniki zaprezentowane na rysunkach 7 i 8. Na pierwszym z nich pokazano zależność zasięgu wpływu drgań



Rys. 7. Rozkład wartości przyspieszeń w zależności od sztywności materiału gruntowego
Fig. 7. Expansion of acceleration values depending on the stiffness of soil material



Rys. 8. Porównanie wyników analiz z badaniami terenowymi oraz prognozą wpływów
 Fig. 8. Comparison of the analyses results with *in situ* tests and prognosis of influences

(mierzonego wartością radialnej składowej maksymalnego przyspieszenia) od sztywności ośrodka. Nietrudno zauważyć, że gdyby za granicę przyjąć 50 mm/s^2 , to dla gruntu o sztywności 10 MPa zasięg oddziaływania wyniósłby niecałe 20 m, podczas gdy dla $G = 80 \text{ MPa}$ – ponad 60 m. Widoczna jest także eksponencjalna zależność zaniku obliczanych przyspieszeń od zmniejszania się odległości od miejsca wzbudzenia drgań. Spostrzeżenie to pozwala na zbudowanie prostego modelu umożliwiającego prognozę wpływu robót na otoczenie. Wyniki symulacji numerycznej rozchodzenia się drgań w podłożu w przypadku zrzutów z wysokości 10 m i 15 m, wraz z porównaniem z wynikami badań terenowych, oraz propozycje prognozy wpływów przedstawiono na rysunku 8.

Prognoza wpływu drgań na otoczenie

Na podstawie przedstawionych wyżej wyników można dla celów praktycznych zaproponować następującą empiryczną zależność opisującą zasięg wpływów wstrząsów na otoczenie:

$$a_x^{\max} = A \cdot x^{-n} \quad (4)$$

gdzie:

- a_x^{\max} – maksymalna pozioma wartość amplitudy przyspieszenia (mm/s^2),
- A – współczynnik proporcjonalności, przyjmujący dla typowych gruntów wartości w granicach $(5-50) \cdot 10^3$, przy założeniu, że spadek ubijaka o masie 15 t następuje z wysokości 15 m na podłoże o średnim module ścinania $G = 20 \text{ MPa}$ (tworząc rysunek 8, założono, że $A = 10 \cdot 10^3$),

- n – współczynnik przyjmujący wartość w granicach 1,0-2,0 (do oszacowań przyjęto 1,5),
 x – odległość od miejsca ubijania (m).

Zaproponowane powyżej wartości parametrów modelu A i n powinny zostać każdorazowo sprawdzone dla rzeczywistych warunków gruntowych w miejscu wykonywania robót. Powyższe oszacowania wykonano dla warunków, w których przeprowadzono symulację numeryczną. Bazując na jej wynikach, należy założyć, że wartość parametru A będzie zależała zarówno od energii spadającego ubijaka, jak i od sztywności podłoża. Pierwszą zależność należy uwzględnić jako prostą proporcjonalność, drugą zaś można szacować jak poniżej:

$$A^i = A_0 \cdot \sqrt{\frac{G^i}{G_0}} \quad (5)$$

gdzie:

- A^i oraz G^i – odnoszą się do rzeczywistego materiału gruntowego,
 A_0 i G_0 – wartości odniesienia.

Wartość parametru n w prognozach można przyjąć dla danego rodzaju warunków gruntowych jako stałą. Zależność powyższą zaproponowano po analizie wyników przedstawionych na rysunku 7. Zamieszczone tam wartości wywoływanych przyspieszeń zależą od sztywności materiału w sposób zbliżony do zależności (5).

Przyjmując prognozę według propozycji (4), uzyskano zadowalające wyniki w odniesieniu do wartości pomierzonych w terenie oraz otrzymanych z analiz numerycznych (rys. 8), co świadczy o w miarę poprawnej propozycji prognoz. W celu uzyskania bardziej wiarygodnej zależności, szczególnie w aspekcie doboru wartości parametrów, należy przeprowadzić serię badań w terenie dla różnego rodzaju warunków realizacji wzmocnienia.

Podsumowanie

Z przeprowadzonych w pracy rozważań wynika, że analizowany problem jest bardzo istotny podczas realizacji wielu inwestycji, gdy konieczne jest wykonanie wzmocnienia podłoża z zastosowaniem technologii udarowych. Możliwość realistycznego przewidywania oddziaływania na otoczenie na etapie projektowania da pewność przyjęcia efektywnej metody wzmocnienia, z jednoczesnym zapewnieniem bezpieczeństwa sąsiednim obiektom. Podana propozycja prognozy wpływów stanowi uproszczony sposób szacowania zasięgu oddziaływań. Aby móc traktować ją jako wiarygodną, uzyskiwane na jej podstawie wyniki muszą być potwierdzone przez wykonanie serii badań dla rzeczywistych obiektów. Celowe będzie również oszacowanie wpływów dla innego rodzaju metod wzmocnienia podłoża, które także generują niekorzystne dla otoczenia drgania.

Celem dalszych badań będzie stworzenie adekwatnego modelu numerycznego, który będzie w stanie realistycznie opisać zachowanie się ośrodka gruntowego poddanego oddziaływaniu dynamicznemu.

Literatura

- BURLAND J.B., 1989. Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains. 9th Bjerrum Memorial Lecture. *Can. Geotech. J.* 26: 499-516.
- GRYCZMAŃSKI M., 2003. Badania geotechniczne oraz wykonywanie nasypów na gruntach słabych i w terenach górniczych. W: Wykład konferencyjny. Seminarium na temat: „Wykopy i nasypy na trasach komunikacyjnych”. PRINŻ Holding S.A., IBDiM, Świerklaniec: 1-16.
- ŁUPIEŻOWIEC M., 2009. Analiza posadowienia obiektów wielkowymiarowych z uwzględnieniem silnej zmienności sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń. *Czas. Tech.* 14, Środ. 4-Ś: 93-106.
- ŁUPIEŻOWIEC M., GRYCZMAŃSKI M., JASTRZĘBSKA M., WŁASZCZUK M., ULINIARZ R., 2009. Modelowanie wpływu wstrząsów technologicznych na otoczenie. Projekt badawczy nr 4T07E01930. Politechnika Śląska, Gliwice.
- MENARD L., BROISE Y., 1975. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation. Ground treatment by deep compaction. ICE, London.
- PAN J.L., SELBY A.R., 2002. Simulation of dynamic compaction of loose granular soil. *Adv. Eng. Softw.* 33: 631-640.
- PN-85/B-02170: Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki. PKNMiJ, Warszawa.
- PN-88/B-02171: Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach. PKNMiJ, Warszawa.
- ZIMMERMANN TH., TRUTY A., URBANŃSKI A., PODLEŚ K., 2007. *Z_Soil.PC 2007 3D user manual*. Theory, tutorials and benchmarks, data preparation. Elmeppress & Zace Services, Switzerland.

INFLUENCE OF VIBRATIONS CAUSED BY DYNAMIC CONSOLIDATION ON THE NEIGHBOURHOOD

Summary. In this paper, the problem of the influence of vibrations caused by dynamic consolidation on the neighbourhood and surrounding buildings is analysed. The mechanism of the propagations, which cause thickening and loosening of subsoil depending on the kind of the material, and compaction energy is described. In the analytical part of the article, the approximate method of prognosis of impacts range in relation to measurement and numerical simulations results is presented.

Key words: dynamic consolidation, strengthening of subsoil, influence of vibrations on the neighbourhood

Łupieżowiec M., 2012. Wpływ wstrząsów wywołanych konsolidacją dynamiczną na sąsiedztwo. Nauka Przyr. Technol. 6, 1, #13.

Adres do korespondencji – Corresponding address:

Marian Łupieżowiec, Katedra Geotechniki, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, Poland, e-mail: marian.lupiezowiec@polsl.pl

Zaakceptowano do druku – Accepted for print:

7.10.2011

Do cytowania – For citation:

Łupieżowiec M., 2012. Wpływ wstrząsów wywołanych konsolidacją dynamiczną na sąsiedztwo. Nauka Przyr. Technol. 6, 1, #13.