

Tomasz Godlewski

Metody badań odbiorczych podłoża gruntowego wzmocnionego kolumnami wymiany dynamicznej

Acceptance tests methods the ground subbase reinforcement by dynamic replacement columns

Streszczenie: Referat przedstawia badania i obserwacje związane z wykonywaniem badań odbiorczych podłoża gruntowego wzmocnionego kolumnami wymiany dynamicznej. Opisuje technologię formowania kolumn, obliczenia projektowe, sposoby odbioru kolumn wraz z opisem różnych metod badań.

Przedstawiono różnorodną metodykę badań odbiorczych tak, aby sprawdzanie wykonanego wzmocnienia nie ograniczało się jedynie do ustalenia geometrii kolumn, ale aby była możliwa również pełna ocena jakości ich wykonania – sprawdzenie kryteriów odbiorczych (zagęszczenie, moduł).

Dobór odpowiedniej metody w zależności od warunków oraz poprawny sposób jej wykonania (po czasie niezbędnym do rozproszenia nadwyżek ciśnienia porowego) gwarantuje prawidłowe prowadzenie nadzoru geotechnicznego na budowie.

Słowa kluczowe: wzmocnienie, kolumna DR, sondowania dynamiczne i statyczne, próbne obciążenia

Abstract: Research and observations made during soil improvement are described. Technology of column formation, criteria of acceptance, and calculations compared with the settlement of the embankment, are presented. Rebounding effect at bearing layers at the column bottom and a distinct pore overpressure migration caused by pounder energy where detected at the acceptance tests.

Key words: reinforcement, Dynamic Replacement columns, dynamic and static test's, load test

Wstęp

Ekonomiczne aspekty poszukiwania nowych terenów pod inwestycje oraz uwarunkowania wynikające z określonych lokalizacji np. nowych tras komunikacyjnych powodują, że coraz częściej projektanci i wykonawcy są postawieni przed sytuacją realizacji obiektów w trudnych warunkach gruntowych (miększe warstwy gruntów słabych i organicznych). Sprawia to, że sięgają do metod wzmacniania podłoża gruntowego. Jedną z nich jest dynamiczna wymiana gruntu wg Menarda, która polega na wykonaniu kolumn (oznaczanych skrótem DR – Dynamic Replacement) z gruntów gruboziarnistych, wbitych dużą energią w grunty podłoża. Dotyczy to miejsc, gdzie miąższość gruntów słabonośnych przekraczała 3–6 m. Wykonanie wzmocnienia dynamicznego ma na celu głównie przyspieszenie konsolidacji gruntów organicznych obciążonych np. nasypem drogowym tak, by jak najszybciej możliwe było spełnienie warunków nośności i osiadań przy obciążeniu użytkowym nasypem i drogą.

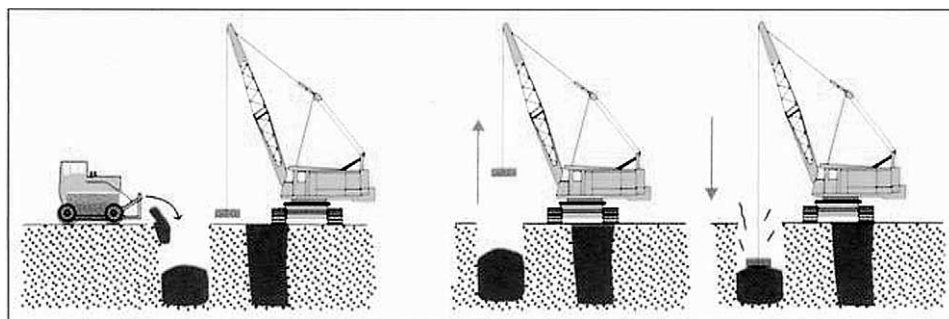
Wykonanie wzmocnienia powinno być objęte nadzorem geotechnicznym, którego zadaniem jest ocena poprawności zastosowania i wykonania, a służą temu odpowiednie badania odbiorcze. Stwierdzenie poprawności i skuteczności wykonania wzmocnienia nie powinno ograniczać się wyłącznie do określenia geometrii kolumn (długość i średnica), ale wymaga również podania parametrów świadczących o ich jakości. W zależności od warunków wykonywania kolumn oraz użytego materiału możliwa jest ocena jakościowa i ilościowa kolumn przy zastosowaniu odpowiedniej metodyki badań odbiorczych.

Technologia wykonania kolumn DR

Problematyka wykonywania badań odbiorczych podłoża wzmocnionego technologią wymiany dynamicznej wymaga krótkiego przybliżenia tej metody.

Metoda dynamicznej wymiany jest konsekwentnym rozwinięciem techniki dynamicznej konsolidacji w wariantcie zaproponowanym przez Menarda. Przy użyciu identycznego sprzętu i podobnej technologii możliwe jest wzmacnianie gruntów, w przypadku których dynamiczna konsolidacja okazuje się w pełni nieefektywna. Z powodzeniem technologię dynamicznej wymiany stosuje się od lat w gruntach organicznych, w namulach i torfach. Technologia ta polega na wykonaniu w spoistym gruncie wielkośrednicowych słupów z materiału okruszowego (ryc.1).

Słupy formowane są poprzez wbijanie kruszywa ubijakiem o dużej masie upuszczanym ze znanej wysokości. Masa ubijaka i wysokość jego zrzucania zależy od tego, jaką wartość energii należy uzyskać, aby uformować kolumnę na żadaną głębokość (najczęściej ubijak dobiera się do zakładanej średnicy kolumn, a wysokość i ilość uderzeń ustala się na budowie na poletku próbnym). Do podnoszenia i opuszczania ubijaka stosuje się dźwigi kratowe wyposażone w urządzenie wolnospadowe. Przedstawione w artykule wyniki badań dotyczą inwestycji, na których wzmocnienie wykonywano urządzeniem o masie 70 T, ubijakiem o masie 12 T (fot. 1).



Ryc. 1. Technologia wykonywania kolumn metodą wymiany dynamicznej (materiały firmy Freyssinet)

Fig. 1. Technology of making column's by dynamic replacement metod



Fot. 1. Od lewej: urządzenia do formowania kolumn, ubijak sześcienny (bok ok. 1,2 m, masa 12 T), moment uderzenia ubijaka zrzuconego z wysokości ok. 20 m

Fot. 1. From left: the machine for formation of column, cubic hamer (side 1.2 m, weight 12 T), moment of impact of hamer brought down from 20 m

Do formowania kolumn używane są materiały dostępne na miejscu o granulacji ustalonej w projekcie. Może to być kruszywo betonowe, kamienne, mieszanki kruszyw z piaskiem, żwiru i pospółki, a nawet materiał z hałd pokopalnianych. Materiał przed użyciem powinien być przebadany pod względem uziarnienia i możliwości zagęszczenia.

Projektowanie wzmocnienia

Przed wykonaniem wzmocnienia wykonuje się obliczenia mające na celu ustalenie optymalnego rozstawu kolumn przy określonej średnicy (wielkość ubijaka) i wysokości zrztu. Należy podać wartości osiadań podłoża po obciążeniu oraz wyznaczyć minimalną wartość parametrów dla zaplanowanych kolumn. Do obliczeń przyjmu-

je się wartości obciążeń oraz parametry podłoża uzyskane z dokumentacji (najlepiej opartej na badaniach polowych). Następnie zakłada się parametry kolumn (moduł odkształcenia) oraz ich rozstaw, średnicę i głębokość. Na tej podstawie wylicza się powierzchnię przekroju kolumny A_{kol} oraz powierzchnię wzmacnianego przez kolumnę pola A_{gr} . Otrzymany stopień wymiany podłoża τ (1), przemnożony przez średni moduł podłoża E_{gr} i moduł kolumny E_{col} , po zsumowaniu daje moduł odkształcenia E_{sr} (2) całego kompozytu wzmocnionego podłoża (kolumny+podłoże) (Menard, 1965; Kłosiński, 1992).

$$\tau = \frac{A_{kol}}{A_{gr}} \quad (1)$$

$$E_{sr} = E_{gr} \cdot (1 - \tau) + E_{col} \cdot \tau \quad (2)$$

Na tej podstawie po uwzględnieniu obciążeń obliczamy osiadania całej konstrukcji (po wykonaniu wzmocnienia i nasypu) i sprawdzamy, czy wartości te nie przekraczają osiadań dopuszczalnych.

Dokonane obliczenia projektowe ustalają kryteria odbiorcze dla wykonywanych kolumn.

Badania odbiorcze kolumn

Wyniki obliczeń projektowych powinny być potwierdzone poprzez obserwację na założonych reperach po wykonaniu obiektu, a w trakcie jego realizacji w ramach nadzoru geotechnicznego należy sprawdzać, czy przyjęte do projektu założenia co do jakości wykonywanych kolumn są spełnione. Ocenę jakości wykonanego wzmocnienia można uzyskać na podstawie przedstawionych poniżej metod badań.

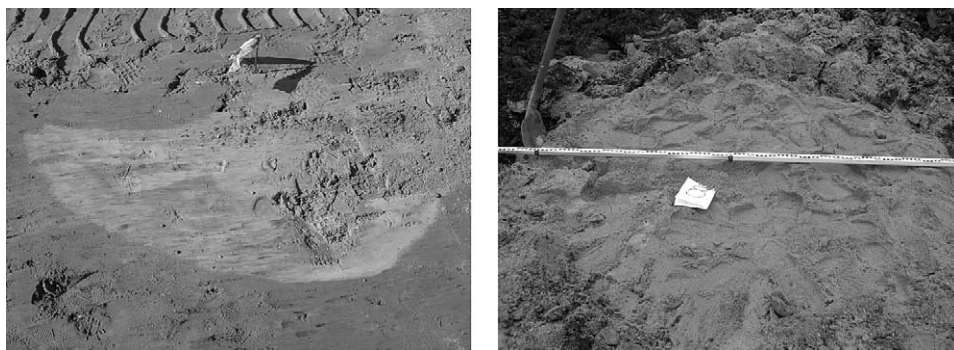
Wiercenia i odkrywki

Badania odbiorcze dotyczące określenia geometrii kolumn wykonywane są (najczęściej) jako odkrywki – w celu ustalenia średnicy (fot. 2) – oraz wiercenia małośrednicowe, mechaniczne, na podstawie których ustalany jest zasięg wykonanej kolumny.

Pozwala to na szybką ocenę pozycji kolumn w podłożu – czy kolumny oparły się o warstwę nośną, czy pracują jako kolumny wiszące (ryc. 2). Metody te niestety nie mówią nic albo prawie nic o parametrach kolumn i zagęszczeniu w kolumnie.

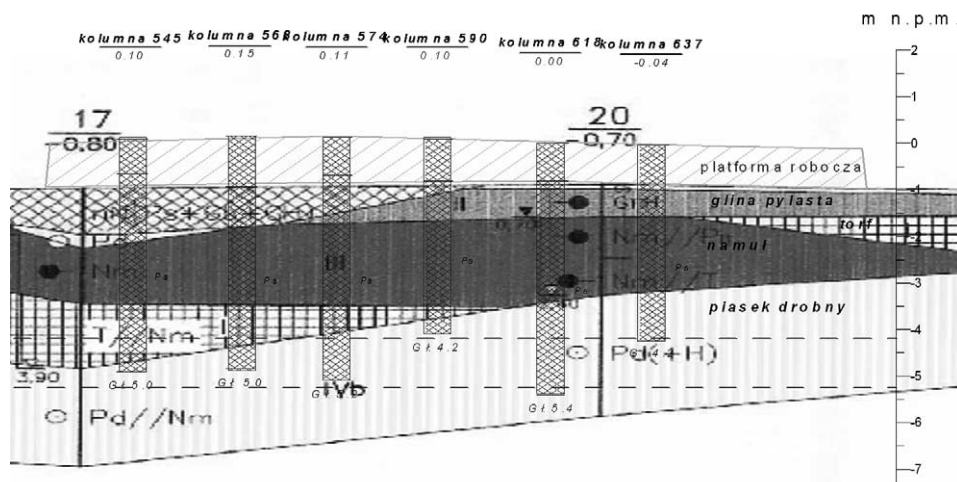
Sondowania dynamiczne

Badania w kolumnach za pomocą sond dynamicznych pozwalają oprócz sprawdzenia zasięgu kolumny na ocenę stanu zagęszczenia. Do wykonania badań odbiorczych w zależności od długości i rodzaju materiału w kolumnie można używać



Fot. 2. Kolumna po ścięciu na tle platformy roboczej, obok odkopana kolumna do pomiaru średnicy (ok. 2 m)

Fot. 2. Column after cutting off on background of working platform, next excavate column for measurement the diameter (about 2 m)



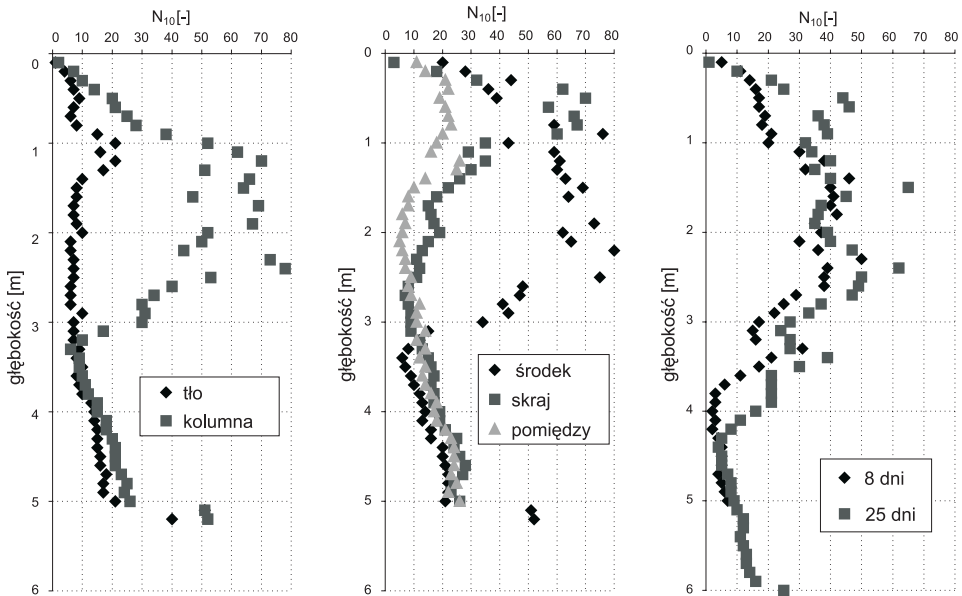
Ryc. 2. Położenie i zasięg kolumn ustalony na podstawie wierceń na tle budowy geologicznej podłoża

Fig. 2. Site and coverage of column on background of geological structure of basis establish by drilling

sond dynamicznych DPL, DPH, DPSH. Sondę lekką DPL można stosować dla kolumny o długości nie przekraczającej 7 m, wykonanej z piasku różnoziarnistego lub mieszanin piaszczystych z niewielką domieszką kruszywa, dla kolumn dłuższych oraz wykonanych z grubszego materiału zaleca się stosowanie sond DPH lub DPSH, ze względu na większą energię uderzeń w tych sondach. Autor spotkał się z odbiorami kolumn wykonanych z materiału z dużą zawartością kruszywa wapienno-dolomitowego sondowanych z powodzeniem za pomocą sondy DPSH do głębokości ok. 12–15 m.

Odbiory podłoża wzmocnianego wykonuje się, wybierając kolumnę otoczoną gotowymi już kolumnami. Przykład poniżej przedstawia sprawdzenie polegające na wykonaniu sondowań dynamicznych sondą lekką, mechaniczną w środku kolumny, na skraju (ok. 1 m od środka) i pomiędzy kolumnami. Analizując wykresy przedstawionych sondowań (ryc. 3), można wyraźnie zobaczyć różnicę w wartościach uzyskanych w gruntach organicznych (tło) i w samej kolumnie (pierwszy wykres). Drugi wykres przedstawia geometrię kolumny – rozkład wartości zagęszczenia zarówno w obrębie samej kolumny, jak i poza nią. Wykonując szereg badań tą metodą, zauważono, że następuje wyraźne zmniejszenie ilości uderzeń sondy w dnie kolumny (ostatnie 0,5 m). Trzeci wykres ilustruje to zjawisko zaobserwowane podczas wykonywania wymiany dynamicznej. Jeśli odbiór kolumny następował bezpośrednio po jej wykonaniu, tj. do 3 dni, w dnie kolumny za każdym razem niezależnie od lokalizacji (różne poziomy wydzielonych warstw) odnotowywano nagły spadek ilości uderzeń, np.: z 20–30 do 5–10 N_{10} . Również miąższość warstwy wykazującej zmniejszone ilości uderzeń była stała – ok. 0,4–0,6 m. Po czym liczone wartości uderzeń sondy „wracały” do wartości charakterystycznych dla wartości „tła” dla danej głębokości. Dla tych samych kolumn przesondowanych po upływie ok. 3 tygodni nie obserwowano już niskich wartości w rejonie dna kolumny, lecz wyraźną poprawę uzyskiwanych wyników.

Zjawisko to należy tłumaczyć tym, że w gruncie podczas procesu formowania kolumny występują znaczne nadwyżki ciśnienia porowego, które osłabiają kolum-



Ryc. 3. Wykresy sondowań dynamicznych, z lewej – porównanie wyników uzyskanych przed wykonaniem kolumny i w kolumnie, z prawej – przykładowe sondowanie odbiorcze dla kolumny

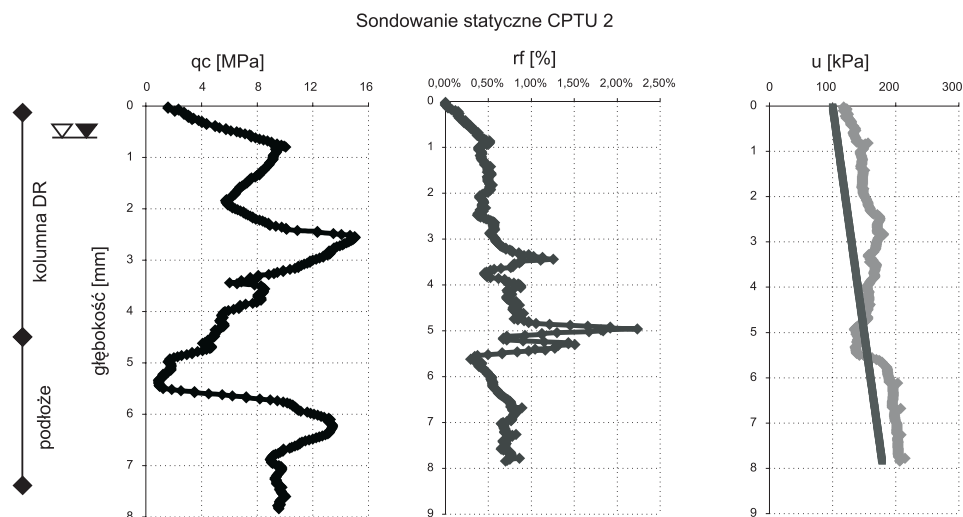
Fig. 3. Diagrams of dynamic sounding, from left – comparison of result gotten before execution of column and in column, from right – exemplary acceptance sounding test for column

nę w strefie dna, gdzie skupia się największa energia związana z dobijaniem i odbijaniem kolumny od podłoża nośnego. Obserwowany „efekt osłabienia dna” związany jest z mechanizmem rozpraszania ciśnienia porowego. Przemawiają za tą tezę dwa fakty. Po pierwsze, próby zwiększenia ilości uderzeń i kruszywa do uformowania kolumny dawały jedynie efekty wypiętrzania gruntu na boki, a po drugie, następowała poprawa wartości uzyskiwanych w dnie kolumny po pewnym czasie.

Z powyższych obserwacji wynika, że wykonując badania odbiorcze, należy zwracać szczególną uwagę na okres, po jakim wykonuje się badanie od momentu uformowania kolumny. Doświadczenie wskazuje, że najlepiej tego dokonać po 2–3 tygodniach, co niestety często jest trudne ze względu na tempo prac na budowie.

Sondowanie statyczne CPTU

Sondowanie statyczne pozwala na bardzo dokładne ustalenie zasięgu kolumny oraz w sposób pośredni na wyznaczenie jej parametrów wytrzymałościowych. Sondowanie wykonuje się siłownikiem o nacisku 5–40 ton, najczęściej z powierzchni terenu. Sonda obecnie wyposażona jest w coraz bardziej skomplikowane końcówki z różnymi możliwościami pomiaru. Sonda standardowa CPTU z tzw. „stożkiem elektrycznym” wyposażona jest w znormalizowany stożek o średnicy 35,7 mm, z możliwością pomiaru ciśnienia wody w porach gruntu i cylindrycznej pobocznic. Podczas wciskania sondy, ze stałą prędkością równą 2 cm/s, dokonuje się pomiaru oporu na stożku q_c (MPa), tarcia na pobocznic f_s (MPa) i ciśnienia wody w porach u (MPa). Odczyty dokonywane są automatycznie, co 2 cm. Istnieje bogata literatura dotycząca interpretacji wyników sondowań. Na podstawie współczynnika tarcia $R_f = q_c/f_s$ określa się rodzaj gruntu. Mankamentem stosowania tej metody w badaniach odbiorczych jest ograniczenie wynikające z materiału użytego do wykonania



Ryc. 4. Przykładowe sondowanie CPTU w środku kolumny uformowanej z piasku grubego
Fig. 4. Exemplary CPTU test in center of column from coarse sand formed

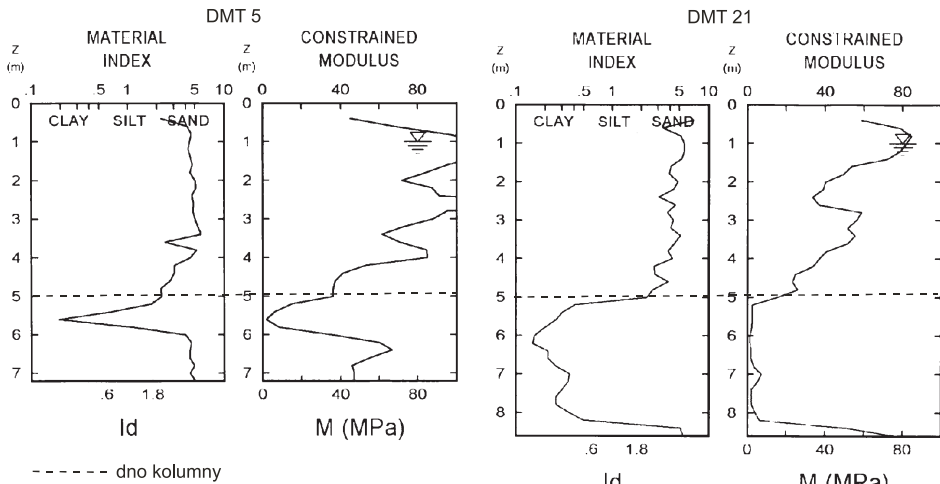
kolumny – sondowanie w kolumnie o dużej ilości kruszywa może uszkodzić drogą końcówkę sondy, w takich wypadkach lepiej użyć stożka mechanicznego.

Dylatometr płaski DMT

Dylatometr jest rodzajem sondy o płaskim ostrzu umożliwiającej rozpoznanie i pomiar parametrów gruntu bezpośrednio w podłożu. W ITB jest używany dylatometr płaski, typu Marchetti (DMT – standaryzowany w Eurokodzie 7), produkcji włoskiej. Wymiary ostrza: 95 mm szerokości i 15 mm grubości. Okrągła stalowa membrana, zamontowana płasko na ostrzu, ma średnicę 60 mm.

Membrana, odkształcając się pod wpływem ciśnienia gazu, przekazuje naprężenie na grunt w kierunku poziomym. Dylatometr wciskany jest z powierzchni terenu, a pomiary mogą być wykonywane w różnych interwałach – min. 20 cm. Na każdej głębokości wykonuje się dwa odczyty: A – ciśnienia wymaganego do rozpoczęcia parcia membrany na grunt i B – ciśnienia wymaganego do takiego parcia, które wywoła przesunięcie środka membrany o 1,1 mm. Na podstawie tych wartości ciśnień uzyskiwane są podstawowe wskaźniki: I_{DMT} – służącego do określenia rodzaju gruntu, modułu dylatometrycznego E_{DMT} , współczynnika naprężenia poziomego K_{DMT} (służącego do obliczenia K_0 , OCR Cu, ϕ i M).

Użycie dylatometru jako metody badań odbiorczych w kolumnach jest alternatywą do wykonywania zalecanych przez specjalistów francuskich badań presjometrycznych. Z dylatometru w sposób bezpośredni otrzymujemy wartości modułów odkształcenia. Jest to znakomita metoda pozwalająca zarówno na dokładne ustalenie zasięgu kolumn jak i uzyskanie informacji ciągłej o jakości kolumny w sposób ilościowy – w wartościach modułu odkształcenia (ryc. 5), który w założeniach pro-



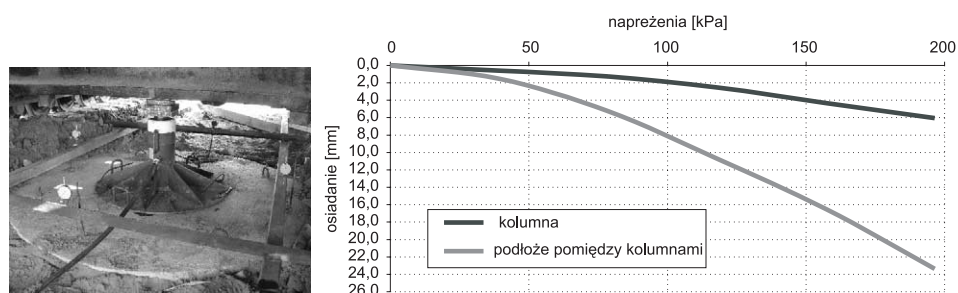
Ryc. 5. Wyniki badań dylatometrycznych wykonanych w kolumnach, z lewej kolumna oparta na podłożu nośnym, z prawej kolumna wisząca

Fig. 5. Result of DMT tests executed in columns, from left column on carrying basis based, from right hanging column

jektowych jest jednym z kryteriów odbiorczych. Także ze względu na technikę wykonywania i odporność łopaty na uszkodzenia metody tej można używać z powodzeniem w kolumnach z materiałów piaszczystych i mieszaninach, nawet ze znaczną ilością kruszywa.

Próbne obciążenia – LT

W większości przypadków podczas realizacji wzmocnienia podłoża kolumnami realizowane jest próbne obciążenie. Przedstawione wyniki (ryc. 6) dotyczą obciążeń wykonywanych płytą kołową o średnicy 2 m – co odpowiada w przybliżeniu średnicy samej kolumny. Niedopuszczalne jest zdaniem autora wykonywanie badań odbiorczych kolumn za pomocą płyty VSS (średnica 30 cm), co nieraz ma miejsce na budowach. Obciążenia przeprowadza się zarówno dla kolumn, jak i dla podłoża po-



Ryc. 6. Próbne obciążenie płytą kołową o średnicy 2 m oraz wyniki uzyskane z obciążenia kolumny i podłoża pomiędzy kolumnami po wykonaniu wymiany dynamicznej

Fig. 6. Loading test circled plate (plate diameter 2 m) and results gotten from load of column and bases among columns after dynamic exchange

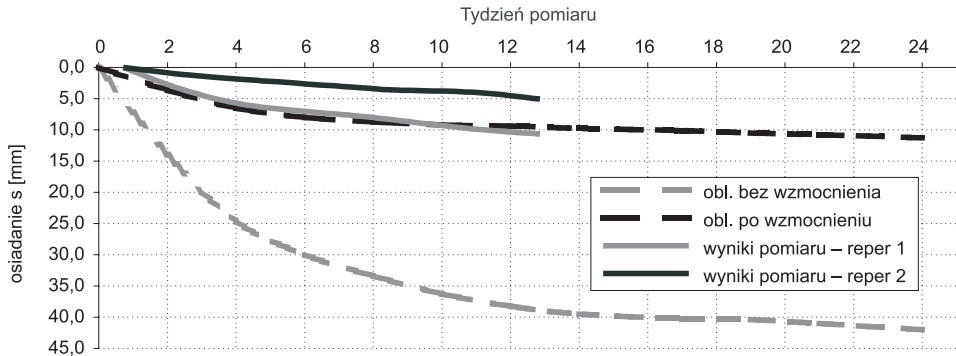
między kolumnami, wartości obciążenia powinny odpowiadać obciążeniom użytkowemu przyjętym w projekcie.

Taki sposób obciążania kolumny daje nam realny obraz (skala półnaturalna) pracy uformowanej kolumny i całego kompozytu. Z badania otrzymujemy wyniki osiadań i wartości modułów odkształcenia, które można odnieść do wartości zakładanych w obliczeniach projektowych.

Badanie to można wykonać zawsze, bez ograniczeń, zwłaszcza w przypadkach kolumn trudnych do skontrolowania innymi metodami (bo zbyt grube kruszywo).

Monitorowanie

Kończącą kontrolą jakości wykonanego wzmocnienia jest analiza osiadań obiektu na założonych reperach. Wykres (ryc. 7) przedstawia wyniki pomiaru osiadań konstrukcji nasypu drogowego wykonanego na podłożu wzmocnionym kolumnami na tle wartości prognozowanych obliczeniami projektowymi.



Ryc. 7. Wyniki osiadań konstrukcji nasypu o wysokości ok. 5 m wykonanego na podłożu wzmocnionym kolumnami DR

Fig. 7. Results of settlement 5 m height embankment construction execute on the ground subbase reinforcement by DR columns

Podsumowanie

Wykonane badania kontrolne wykazały możliwość efektywnego wzmocnienia podłoża do głębokości 5–7 m. Aby uzyskać wzmocnienie dobrej jakości, należy je na bieżąco kontrolować podczas budowy. Wykonywanie wzmocnienia gruntów słabonośnych metodą wymiany dynamicznej jest tańsze niż przy zastosowaniu innych metod wzmocnień. Redukując osiadania, przyspiesza konsolidację gruntów. Poprawność wykonania wzmocnienia wymaga kontroli za pomocą badań odbiorczych.

Badania odbiorcze kolumn nie powinny ograniczać się jedynie do ustalenia geometrii kolumn, ale powinny zapewniać również kontrolę jakości ich wykonania – sprawdzenie kryteriów odbiorczych (zagęszczenie, moduł). Dobór odpowiedniej metody oraz poprawny sposób jej wykonania (po czasie niezbędnym do rozproszenia nadwyżek ciśnienia porowego) gwarantuje prawidłowe prowadzenie nadzoru geotechnicznego na budowie.

Literatura

- Gryczmański M., 1993. Metody analizy nośności i osiadania podłoża wzmocnionego kolumnami kamiennymi. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 5.
- Godlewski T., Saloni J., 2006. Wzmocnienie podłoża gruntowego kolumnami DR na przykładzie odcinka Trasy Siekierkowskiej w Warszawie. *Mat. Konferencyjne XIV Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej*, Białystok–Augustów, 21–23 czerwca 2006.
- Kłosiński B., 1992. Wzmocnianie podłoża słupami tłuczniowymi formowanymi metodą wbijania. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 4: 171–173.
- Menard L., 1965. The dynamic consolidation of foundation soils.
- Menard L., 1965. Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation.

Metody wzmocniania podłoża gruntowego – materiały Freyssinet Polska.

Polska Norma PN-B-04452 Geotechnika – Badania polowe, maj 2002.

Werno M., Zadroga B., 2003. Osiadanie i konsolidacja gruntów organicznych obciążonych nasypami ziemnymi. Inżynieria Morska i Geotechnika 1.



