

Wpływ formowania wbijanej kolumny kamiennej na prekonsolidację otoczenia gruntowego

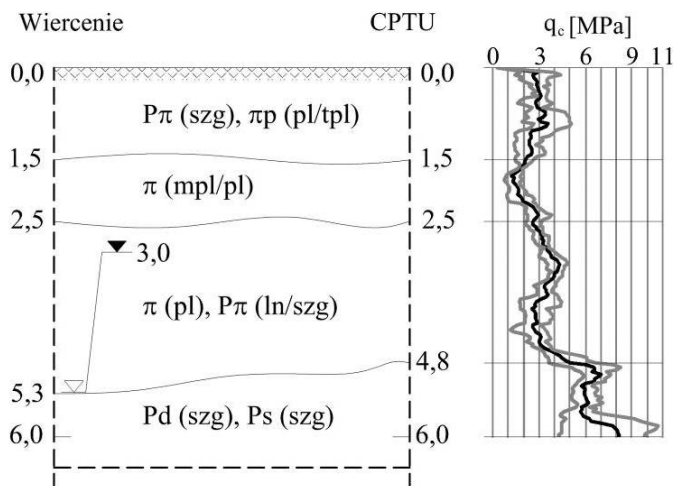
Dr inż. Piotr Kanty, dr inż. Sławomir Kwiecień, dr hab. inż. Jerzy Sękowski, prof. Pol. Śl.
Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa

Jedną z wiodących metod wzmocnienia słabego podłoża w ostatnich kilkunastu latach jest wymiana dynamiczna. W wyniku jej zastosowania uzyskuje się w podłożu siatkę sztywnych, nośnych kolumn, formowanych najczęściej z kruszywa o frakcji kamienistej. Pomimo tego, że większa część obciążeń jest przekazywana z obiektu na kolumny, to otoczenie gruntowe także bierze czynny udział w ich przenoszeniu. W trakcie swojej pracy obciążone kolumny pęcznieją, przez co rośnie opór poziomy otoczenia gruntowego, wpływając znacząco na ich nośność. W projektowaniu, ze względu na brak badań, nie uwzględnia się wpływu formowania kolumn na wzmocnienie otoczenia gruntowego. Te dwa aspekty zadecydowały o podjęciu przez autorów próby określenia wpływu formowania pojedynczej kolumny na otoczenie gruntowe.

W artykule, po krótkim przeglądzie literaturowym analizowanego zagadnienia, podjęto próbę uchwycenia wpływu formowania pojedynczej kolumny kamiennej na prekonsolidację otoczenia gruntowego. Na podstawie wyników przeprowadzonych sondowań statycznych i dylatometrycznych przedstawiono zmiany współczynnika prekonsolidacji OCR i parcia spoczynkowego K_0 w funkcji czasu i odległości od punktu wzmocnienia.

PRZEGLĄD STANU WIEDZY

Literatura dotycząca wpływu procesu formowania wbijanej kolumny kamiennej (DR) na otoczenie jest skromna. Można spotkać jedynie kilka opisów badań takich zmian [5]. Większość z nich zrealizowano w warunkach polowych. Są to między innymi badania: Batesa i Merifielda [2], Gunaratne'a i innych [3], Wonga [11] oraz Wonga i Lacazedieu [12]. Z perspektywy niniejszej pracy badania wpływu na prekonsolidację otoczenia przedstawili Wong i Lacazedieu [12]. Opisują oni przykład zastosowania kolumn kamiennych w gruncie bardzo słabym o miąższości do 9 m. Kolumny o średnicy 2,5 m były wykonywane w rozstawie 5,5 m z platformy roboczej o miąższości 1,7 m. Ze względu na to, że kolumny nie wzmocniły całej miąższości gruntu słabego zastosowano dodatkowo przeciążenie oraz dreny prefabrykowane. Osiedlenia konsolidacyjne wyniosły, w zależności od badanego punktu, od 0,8 do 1,0 m przy przewidywanych osiadaniach o wartości 0,8 m. Autorzy wskazują na korzystny wpływ technologii formowania kolumn na spadek zagrożenia związanego z wystąpieniem konsolidacji wtórnej oraz na efekt przekonso-



Rys. 1. Charakterystyka warunków gruntowych w miejscu badań

lidowania gruntów. Osiągnięte po wykonaniu kolumn wartości OCR ($2,1 \div 3,4$) były znacznie wyższe od wartości określonej na podstawie badań wykonanych przed kolumnami kamiennymi ($OCR = 1,0$). Zdaniem autorów jest to efekt dynamicznego procesu formowania kolumn przy udziale dużej energii. Wartości OCR obliczono na podstawie mierzonej wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez drenażu za pomocą „field vane test”.

BADANIA POLOWE

Opis warunków gruntowych na poletku badawczym

Badania polowe przeprowadzono na poletku o wymiarach 14×14 m, zlokalizowanym w miejscowości Przeworsk.

Rozpoznanie warunków gruntowych w miejscu badań doświadczalnych przeprowadzono z wykorzystaniem sondowań CPTU, DMT oraz wierceń mechanicznych.

Jak wynika z przeprowadzonych analiz [9], podłoże jest zbudowane z czterech charakterystycznych stref gruntów (rys. 1):

- I. warstwa pierwsza, zalegająca do głębokości około 1,5 m p.p.t., to średnio zagęszczone piaski pylaste przewarstwione pyłami piaszczystymi na pograniczu stanu twaroplastycznego i plastycznego,
- II. warstwa druga, rozpoznana od 1,5 do 2,5 m p.p.t., to plastyczne i miękkoplastyczne osady pylaste,
- III. warstwa trzecia, występująca do głębokości 4,8 m, to plastyczne osady pylaste z większym udziałem luźnych i średnio zagęszczonych gruntów piaszczystych,
- IV. warstwa czwarta to średnio zagęszczone piaski średnie i drobne stanowiące warstwę nośną; głębokość zalegania stropu tej warstwy określona z wierceń geotechnicznych była większa niż wynikało to z badań CPTU i wynosiła 5,3 m.

W trakcie wierceń ustalono również poziomy występowanie wody gruntowej. Jej nawiercone zwierciadło znajdowało się na głębokości 5,3 m, a ustabilizowane na głębokości 3,0 m p.p.t. (rys. 1).

Wpływ wbijania kolumny na prekonsolidację otoczenia gruntowego przeanalizowano w drugiej (II) i trzeciej (III) warstwie podłoża. Wyniki uzyskane w warstwie pierwszej (I) mogą być zaburzone wpływem poruszającego się sprzętu i zmiennych warunków atmosferycznych, a warstwa czwarta (IV) to grunty nośne.

Formowanie kolumny kamiennej i jej kształt

Kolumna DR była formowana przy użyciu sprzętu pozwalającego na zrzut ubijaka o masie około 10 t i kształcie zbliżonym do „beczki”, z wysokości do 15 m. Wysokość stosowanego w badaniach stalowego ubijaka wynosiła 1,65 m, jego średnica w środkowej części 1,0 m, natomiast w podstawie 0,8 m. Do zasypu kraterów zastosowano mieszaninę (w proporcji 1/1) pospółki i tłucznia, o frakcji $0 \div 200$ mm.

Kolumnę uformowano przez 36 zrzutów ubijaka z różnych wysokości. Zgodnie z zaleceniami ujętymi w pracy Stinnette i innych [8] kolumnę formowano trój etapowo. Pierwsze dziewięć zrzutów stanowiło etap pierwszy, w którym zasypy wykonywano po jednym lub dwóch zrzutach ubijaka. Kolejne 14 zrzutów stanowiło etap drugi, w którym między zasypami następowały trzy lub cztery zrzuty. Etap ostatni stanowiły zrzuty nr 24 \div 36, w którym stopniowo zmniejszano wysokości spadania ubijaka. Podział na etapy był istotnym elementem przyjętej metodologii badań.

Inwentaryzację kształtu kolumny wykonano tuż po zakończeniu całego zakresu innych badań przewidzianych do realizacji. Średnica głowicy kolumny wynosiła $1,9 \div 2,0$ m. W celu ułatwienia interpretacji wyników w dalszej części pracy będzie używana średnica kolumny $D_k = 2,0$ m. Średnica maksymalna kolumny pomierzona podczas odkrywki wynosiła 2,8 m, a jej długość określono na $L_k = 3,8$ m. Kolumna charakteryzowała się największą średnicą dokładnie w środku najsłabszej warstwy pylastej.

Sumaryczny stosunek objętości wypiętrzonego gruntu do objętości kolumny określonej z odkrywki wynosił 0,47.

Metodyka badań zmian parametrów otoczenia kolumny

Celem badań było określenie wpływu procesu formowania kolumny kamiennej na podstawowe parametry mechaniczne jej otoczenia. Przeprowadzono to, wykonując badania CPTU oraz DMT w różnych odległościach od kolumny, jak i w różnym czasie. Pierwszą serię badań („a”) przeprowadzono przed rozpoczęciem wbijania kolumny i obejmowała ona wykonanie czterech badań CPTU zlokalizowanych: 2, 3, 4 i 6 m oraz trzech badań dylatometrem Marchettiego (DMT) w punktach oddalonych o 2, 3 i 6 m od osi kolumny. Kolejne serie badań, wykonywane w identycznych odległościach od wzmocnienia, przeprowadzono, przesuując się po obwodzie okręgów przechodzących przez poprzednie punkty, z zachowaniem minimalnego rozstawu między nimi równego 0,5 m. Badania przeprowadzono po uformowaniu: 1/3 (seria „b”), 2/3 („c”) oraz całej kolumny („d”), a następnie po 1 („e”), 8 („f”) i 30 dniach („g”) od momentu wykonania wzmocnienia. Głębokość badań wyniosła 6 m.

Do przeprowadzenia wszystkich badań CPTU oraz DMT wykorzystano sondę statyczną Hyson 200 kN produkcji holenderskiej firmy A.P. van den Berg Machinefabriek. Sonda ta kwalifikuje się

do 1. kategorii penetrometrów według instrukcji „International Test Procedure for Cone Penetration Test CPT, CPTU” [9].

Dokonano estymacji dwóch parametrów geotechnicznych mających związek z efektem prekonsolidacji podłoża, a mianowicie współczynnika prekonsolidacji OCR oraz współczynnika parcia spoczynkowego K_0 . Dla warunków gruntowych przed wykonaniem kolumny sprawdzono kilka procedur interpretacyjnych zawartych w pracy Wierzbickiego [10], a następnie wybrano po jednej dla każdego z parametrów.

Ostatecznie, estymacji współczynnika parcia spoczynkowego na podstawie sondowań CPTU oraz DMT dokonano za pomocą formuły Baldiego i innych [1]:

$$K_0 = 0,376 + 0,095K_D - a(q_c/\sigma'_{vo}) \quad (1)$$

gdzie:

$a = 0,0046$ dla gruntów w środowisku naturalnym.

Do powyższego wzoru wprowadzono korektę współczynnika a dla rodzimych gruntów spoistych zaproponowaną w pracach Jamiołkowskiego [4] i Marchettiego [6], równą 0,002 w osadach młodych.

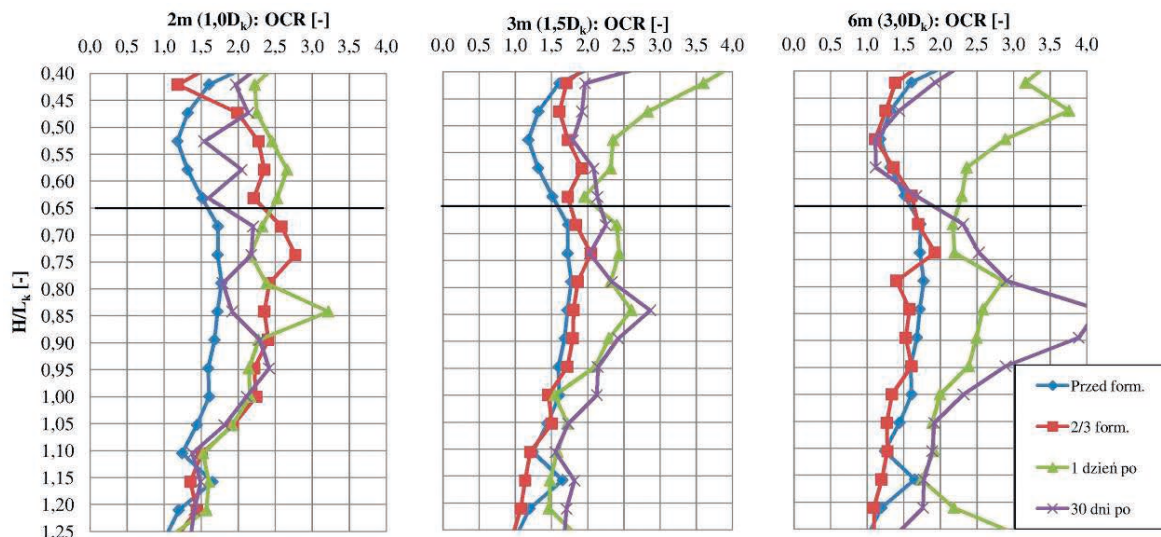
Wartość współczynnika prekonsolidacji OCR wyznaczono na podstawie badań DMT, posługując się formułą Simonini i innych [7]:

$$OCR = 0,66(K_D)^{1,05} \quad (2)$$

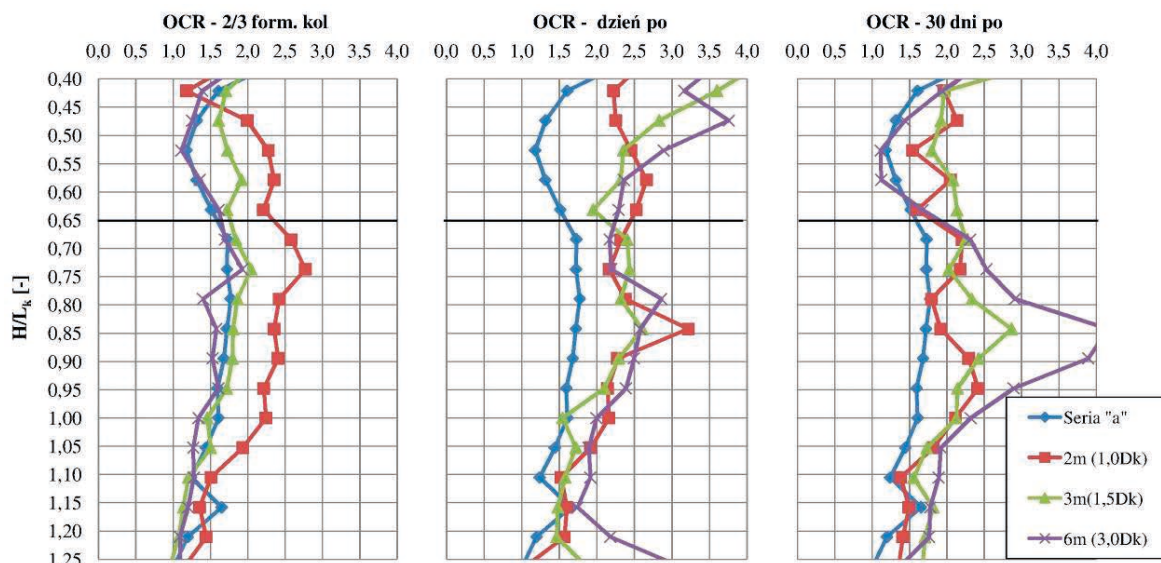
Formuła ta wykazuje dobrą zgodność wyników badań DMT z badaniami laboratoryjnymi, jeżeli bierze się pod uwagę młode grunty pylaste [10].

Wyniki badań zmian parametrów związanych z efektem prekonsolidacji gruntów (OCR i K_0)

Analizę zmian współczynnika prekonsolidacji OCR w warstwie II i III przedstawiono poniżej, posługując się graficzną reprezentacją wyników zamieszczonych na rys. 2 i 3. Przeprowadzone badania wykazały, że współczynnik OCR przed formowaniem kolumny wahał się, w zależności od głębokości, między 1,25 a 1,75. Taka wartość wskazuje na lekką prekonsolidację podłoża. W wyniku formowania kolumny, a później w wyni-



Rys. 2. Wartości współczynnika prekonsolidacji w różnych odległościach od kolumny



Rys. 3. Wartości współczynnika prekonsolidacji w różnym czasie

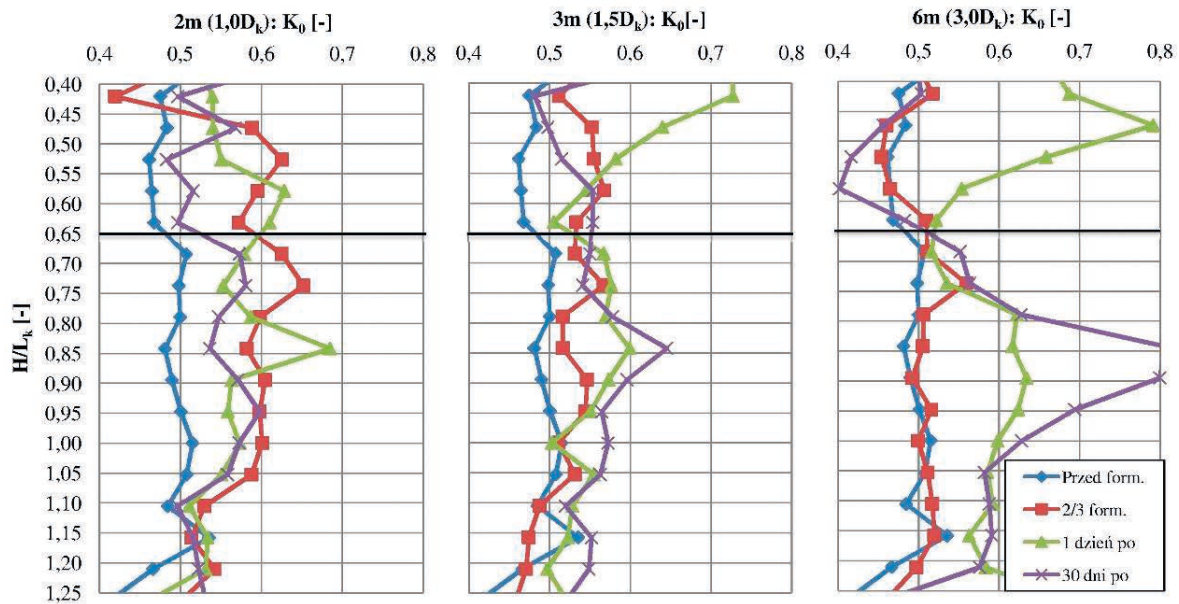
ku konsolidacji układu „kolumna – grunt słaby”, wartości OCR wzrosły we wszystkich badanych punktach (rys. 2).

W odległości 2 i 3 m od osi kolumny nastąpił maksymalny wzrost OCR do wartości około 2,5, w punkcie oddalonym 6 m od kolumny wartość OCR osiągnęła lokalnie 4,0. Zauważono również, że wzrost wartości OCR w punkcie oddalonym od osi układu o 2 m, zbadano tylko na głębokości kolumny, a także, że im dalej od kolumny znajdował się punkt badań, tym określone wartości OCR były lokalnie większe. Analizowane wartości były zmienne w czasie, co widać na przykładzie warstwy II ($0,4 \div 0,65 L_k$) – w jej obrębie wartości OCR uzyskane jeden dzień po uformowaniu kolumny były większe niż po 30 dniach od tego wydarzenia.

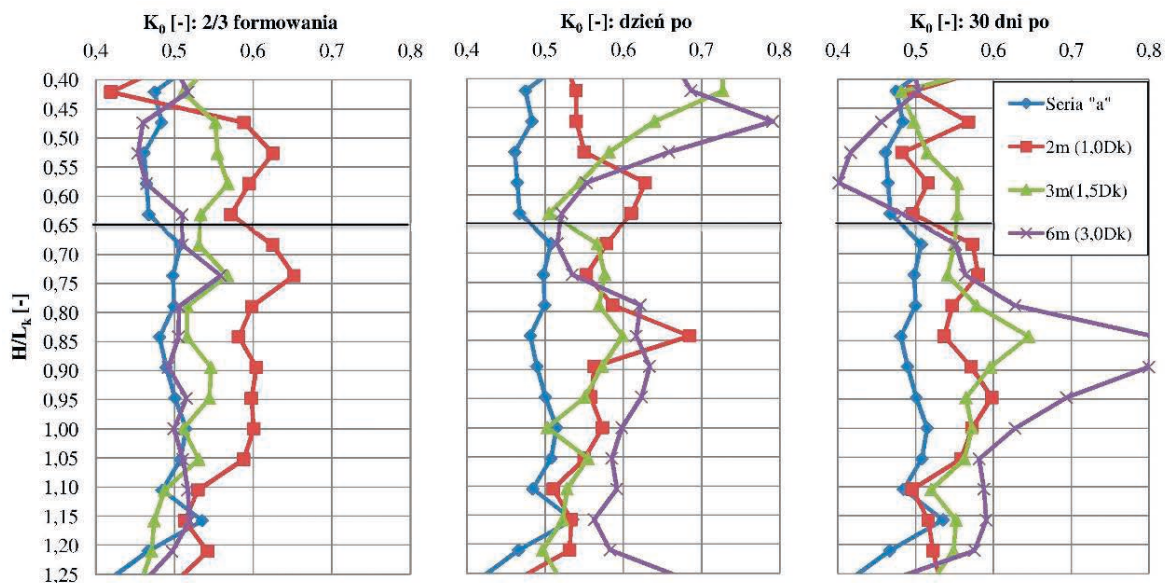
Analizując wyniki OCR uzyskane w jednym czasie lecz w różnych odległościach od kolumny (rys. 3), można zauważyć, że wzrost wartości tego parametru był procesem złożonym

i zależnym od czasu oraz odległości od kolumny. Po wykonaniu 2/3 kolumny nastąpił wzrost OCR w punkcie oddalonym od osi układu o 2 m na głębokości sięgającej $1,0 L_k$. W punkcie bardziej oddalonym (3 m) wzrost ten był widoczny tylko w obrębie warstwy II, a w punkcie najdalszym nie zanotowano go w ogóle. Dzień po uformowaniu kolumny niezależnie od punktu badań wartość omawianego parametru na długości kolumny wynosiła około 2,5. Po miesiącu od zakończenia wzmocnienia wartości OCR w punktach oddalonym 2 i 3 m od osi kolumny ustabilizowały się na poziomie około 2,0, natomiast w najdalszym punkcie wykazały dużą zmienność (w warstwie II spadły do wartości początkowych, a na głębokości $0,85 L_k$ wzrosły prawie trzykrotnie).

Takie wyniki sugerują, że układ „kolumna – grunt słaby” nabierający sztywności w procesie wbijania kolumny charakteryzował się coraz to większym zasięgiem oddziaływania. Wywo-



Rys. 4. Wartości współczynnika parcia spoczynkowego w różnych odległościach od kolumny



Rys. 5. Wartości współczynnika parcia spoczynkowego K_0 w różnym czasie

lane w gruncie naprężenie z upływem czasu zmalało (nastąpiło rozprężenie), przez co wartości *OCR* częściowo zmniejszyły się w stosunku do maksymalnych. Ujmując zmiany *OCR* w sposób ogólny, można stwierdzić, że średnio wartość tego parametru wzrosła o około 33% wartości wyjściowej (z 1,5 na 2,0). Użyte wartości końcowe współczynnika *OCR* były zbliżone do wartości uzyskanych przez Wonga i Lacazedieu [12].

Analizę współczynnika parcia spoczynkowego K_0 wykonano analogicznie do przedstawionej dla *OCR*. Wykresy wartości K_0 na badanych głębokościach przedstawiono na rys. 4 i 5. Początkowa wartość K_0 wynosi na całej długości profilu badania około 0,5.

Analizując zmienność K_0 w czasie oraz w zależności od odległości od kolumny, można zauważyć zbieżność z zależnościami przedstawionymi w analizie *OCR*. Wynika to z bezpośredniego związku tych dwóch parametrów oraz faktu, że były one wyznaczone m.in. na podstawie tego samego parametru sondowania DMT, tj. bezwymiarowego wskaźnika naprężenia poziomego K_D .

Ogólnie można stwierdzić, że zmiany wartości K_0 w czasie formowania kolumny i później są małe. Średnia wartość K_0 po 30 dniach od uformowania kolumny wynosi około 0,55. Oznacza to tylko około 10% wzrostu K_0 w stosunku do wartości początkowej (0,50).

WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań zaobserwowano wpływ procesu formowania pojedynczej kolumny kamiennej na prekonsolidację otoczenia gruntowego. Wpływ ten wyrażono zmianą współczynników: prekonsolidacji *OCR* oraz parcia spoczynkowego K_0 w funkcji czasu i odległości od osi wzmocnienia. Jakkolwiek zmiany miały charakter złożony, to proces wbijania kolumny spowodował wzrost tych parametrów. W przypadku *OCR* wynosił on średnio około 33%, natomiast w przypadku K_0 odpowiednio 10%. Są to, co prawda, nieznaczne wartości z inżynierskiego punktu widzenia, jednakże odnoszą się tylko do wpływu procesu formowania pojedynczej kolumny.

LITERATURA

1. Baldi G., Bellotti R., Ghionna V., Jamiolkowski M.: Flat dilatometer tests in calibration chamber. Proceedings of In Situ'86. Blackburg: ASCE Geotechn. Special Publ.6, 1986, 431-446.
2. Bates L., Merifield R.: Evaluation of the CPT for assessing ground improvement by dynamic replacement. 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, No. 2-52. Huntington Beach, 2010.
3. Gunaratne M., Mullins G., Stinnette P., Thilakasiri S.: Stabilization of Florida Organic Material by Dynamic Replacement. Tampa: National Technical Information Service, 1997.
4. Jamiolkowski M.: Opening address. International Symposium on Cone Penetration Testing CPT'95. Linköping: Swedish Geotechnical Society Vol. 3, 1995, 7-15.
5. Kanty P.: Analiza doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej na otoczenie. Praca doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 2014.
6. Marchetti S.: The Flat Dilatometer: Design applications. 3rd International Geotechnical Engineering Conference, Keynote lecture. Cairo University, 1997, 421-448.
7. Simonini P., Ricceri G., Cola S.: Geotechnical characterization and properties of Venice lagoon heterogeneous silts. [W:] T. Tan, K. Phoon, D. Hight, S. Leroueil, Characterisation and engineering properties of natural soils. London: Taylor & Francis Group, 2007, 2289-2327.
8. Stinnette P., Gunaratne M., Mullins G., Thilakasiri S.: A quality control programme for performance evaluation of dynamic replacement of organic soil deposits. Geotechnical and Geological Engineering (No. 15), 1997, 283-302.
9. Tschuschke W., Kroll M.: Analiza teoretyczna i doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe. Poznań 2011.
10. Wierzbicki J.: Ocena prekonsolidacji podłoża metodami in situ w aspekcie jego genezy. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań 2010.
11. Wong, P.: Ground Improvement Case Studies Chemical Lime Piles and Dynamic Replacement. Australian Geomechanics Society Jnl. (39(2)), 2004.
12. Wong, P., Lacazedieu M.: Dynamic Replacement Ground Improvement – Field performance Versus Design Prediction for the Alexandria City Centre Project in Egypt. The Skempton Conference, 4. Ground performance, 2004, 1193-1204.