

WPŁYW FORMOWANIA WBIJANEJ KOLUMNY KAMIENNEJ NA PARAMETRY WYTRZYMAŁOŚCIOWE SŁABEGO OTOCZENIA GRUNTOWEGO

Jerzy SĘKOWSKI, Sławomir KWIECIEŃ*, Piotr KANTY

Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań polowych dotyczących wpływu formowania wbijanej kolumny kamiennej na jej otoczenie gruntowe. Wpływ ten wyrażony został zmianą efektywnego kąta tarcia wewnętrznego i spójności określonych w sondowaniu statycznym CPTU w trakcie, jak i po uformowaniu kolumny kamiennej.

Słowa kluczowe: wymiana dynamiczna, kolumny kamienne, sondowania statyczne CPTU.

1. Wprowadzenie

Lokalizacja obiektów budowlanych i inżynierskich na gruncie o małej nośności i/lub dużej ściśliwości wymaga posadowienia pośredniego bądź wzmocnienia podłoża. Jedną z wiodących metod drugiego podejścia jest wymiana dynamiczna, potocznie nazywana wbijanymi kolumnami kamiennymi (Gryczmański, 2003). Polega ona na formowaniu w gruncie słabym kolumn z kruszywa grubookruchowego, z użyciem uderów o dużej energii.

Projektowanie tak wzmocnionego podłoża napotyka na pewne problemy. Istniejące analityczne metody wymiarowania, ze względu na ich założenia, nie uwzględniają specyfiki wymiany dynamicznej. W obliczeniach przyjmowane są kolumny o stałym cylindrycznym kształcie a podłoże gruntowe charakteryzuje się parametrami fizyczno-mechanicznymi przed jego wzmocnieniem (Brauns, 1978; Priebe, 1976). Jak wykazały wcześniejsze badania autorów, kształty uzyskiwanych kolumn mogą różnić się od cylindrycznych (Kwiecień i Sękowski, 2012; Sękowski i Kwiecień, 2012), a parametry wzmocnianego podłoża mogą ulec zmianie (Kwiecień, 2009). Może to z kolei prowadzić to do błędnego określenia nośności, jak i osiadań tak wzmocnionego podłoża zarówno w analizach analitycznych, jak również numerycznych (na przykład metodą elementów skończonych).

Badania dotyczące kształtów wbijanych kolumn kamiennych prowadzone są przez autorów od kilku lat. Pozwoliły one na określenie wpływu warunków gruntowo-wodnych na kształt uformowanych kolumn (Kwiecień i Sękowski, 2012).

Dotychczasowe badania autorów nad wpływem formowania kolumn na słabe otoczenie gruntowe były skromne (Kwiecień, 2009) i nie pozwalały na wyciągnięcie szerszych wniosków. Stąd też powstała koncepcja przeprowadzenia szerszych badań, obejmujących określenie wpływu formowania pojedynczej wbijanej kolumny kamiennej na parametry wytrzymałościowo-odkształceniowe otoczenia gruntowego. Wpływ ten wyrażony został zmianą parametrów uzyskanych w sondowaniach statycznych CPTU oraz w badaniach dylatometrycznych DMT, przeprowadzonych w trakcie formowania kolumny, jak i po jej wykonaniu, w różnych odstępach czasowych, oraz w różnych odległościach od kolumny. Ze względu na szeroki charakter przeprowadzonych badań, w artykule zaprezentowano wyniki i analizę parametrów wytrzymałościowych uzyskanych w badaniach CPTU.

2. Badania polowe

2.1. Poletko badawcze

Badania polowe zostały prowadzone na poletku zlokalizowanym w południowo-wschodniej części kraju, w bezpośrednim sąsiedztwie budowanej arterii komunikacyjnej. O wyborze jego lokalizacji zadecydowały warunki gruntowo-wodne określone na podstawie sondowań statycznych CPT, zrealizowanych dla potrzeb projektowanej inwestycji.

Po wytyczeniu poletka badawczego o wymiarach 14×14 m przeprowadzono badania uszczegóławiające

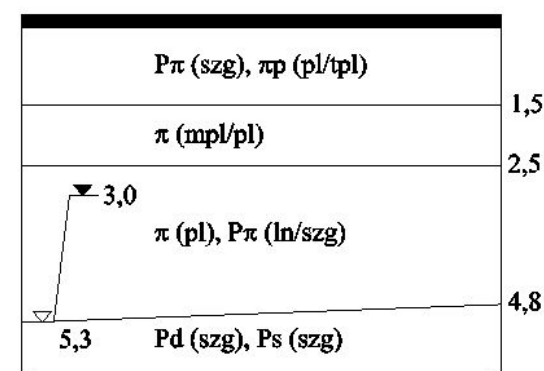
* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: Sławomir.Kwiecien@polsl.pl

w postaci sondowań CPTU, DMT oraz wierceń mechanicznych. Głębokość przeprowadzonych badań wyniosła od 6 m (sondowania CPTU) do 7,5 m poniżej poziomu terenu (wiercenia badawcze).

Jak wynika z przeprowadzonych badań (Tschuschke i Kroll, 2012) podłoże budują cztery charakterystyczne strefy gruntów (rys. 1):

- średnio zagęszczone piaski pylaste i pyły piaszczyste w stanie na pograniczu twaroplastycznego i plastycznego do głębokości około 1,5 m;
- plastyczne i miękkoplastyczne osady pylaste, zalegające na głębokości od 1,5-2,5 m;
- plastyczne warstwy pylaste z większym udziałem luźnych i średnio zagęszczonych gruntów piaszczystych, występujących do około 4,8 m;
- średnio zagęszczone piaski średnie, drobne i pylaste stanowiące warstwę nośną.

Pod względem geologicznym opisane grunty są czwartorzędowymi osadami rzecznyymi.



Rys.1 Warunki gruntowo-wodne w miejscu formowania kolumny

W wyniku badań ustalono również poziomy występowania wody gruntowej. Jej nawiercone zwierciadło znajdowało się na głębokości 5,3 m poniżej poziomu terenu, a ustabilizowane – na głębokości 3,0 m poniżej poziomu terenu.

2.2. Program badań

Przedstawione w artykule badania są fragmentem szerszych analiz zespołu autorskiego. Ich celem było określenie wpływu formowania kolumny kamiennej na parametry wytrzymałościowo-odkształceniowe otoczenia gruntowego, jak również na jego odkształcalność. Przeprowadzono to wykonując testy CPTU, DMT oraz badania inklinometryczne w różnych odległościach od formowanej kolumny jak i w różnym czasie.

W przypadku badań CPTU, ich pierwsza seria („a”), przeprowadzona została przed rozpoczęciem formowania kolumny i obejmowała wykonanie pięciu testów zlokalizowanych kolejno: w punktach numer 1, 2, 3, 4 i 5 usytuowanych odpowiednio w miejscu przewidzianej kolumny oraz 2, 3, 4 i 6 m od jej osi.

Kolejne serie badań obejmowały wykonanie

każdorazowo czterech testów penetracyjnych zlokalizowanych jak w serii pierwszej, za wyjątkiem badania w osi wzmocnienia. Aby uniknąć efektu wpływu testów na wyniki badań, lokalizację kolejnych badań przesuwano po obwodzie okręgów przechodzących przez poprzednie punkty badawcze. Wspomniane badania przeprowadzono po uformowaniu: 1/3 kolumny, 2/3 kolumny, pełnej kolumny oraz po 1, 8 i 30 dniach od momentu wykonania kolumny (kolejno serie „b”, „c”, „d”, „e”, „f” i „g”).

2.3. Kształtowanie kolumny

Kolumna kamienna formowana była z użyciem sprzętu pozwalającego na zrzut 12-tonowego ubijaka, o kształcie zbliżonym do „beczki” z wysokości do 15 m (rys. 2).



Rys. 2. Formowanie wbijanej kolumny kamiennej

Proces formowania kolumny podzielony został na trzy etapy (w przybliżeniu do 1/3, 2/3 i 3/3 jej wysokości), po których każdorazowo przeprowadzane były sondowania statyczne CPTU.

Materiałem kolumn była mieszanka pospółki i tłuczni, o frakcji 0-200 mm, w proporcji 1/1.

W procesie formowania kolumny wybity został krater przez swobodny zrzut ubijaka, a następnie był n zasypywany. Kolejne zrzuty pograżały uzupełniany na bieżąco materiał w podłoże. Łącznie w etapie pierwszym (1/3 kolumny) wykonano sześć zasypów materiału a ubijak zrzucany był z wysokości od 5 do 15 m.

Etap drugi to zrzuty ubijaka z pełnej wysokości – 15 m, przy czterech zasypach krateru.

W kończącym kolumnę etapie trzecim ubijak zrzucany był z coraz mniejszej wysokości, mieszczącej się w przedziale od 15 do 2 m a kruszywo w kraterze uzupełniane było pięć razy.

Do ukształtowania kolumny zużyto 20,9 m³ luźnego kruszywa. Średnica głowicy kolumny, zinwentaryzowana po jej wbiciu, wynosiła 1,9 m.

2.4. Sondowania statyczne CPTU

Sondowania CPTU (Tschuschke i Kroll, 2012) przeprowadzono stożkiem o powierzchni 10 cm² o kącie wierzchołkowym 60°, zagłębianym w grunt z prędkości 2 cm/s. Powierzchnia tulei ciernej wynosiła 150 cm², a filtr pomiaru ciśnienia wody w porach gruntu zlokalizowany był bezpośrednio za ostrzem stożka. Sondowania prowadzono do głębokości 6 m.

Wydzielone poletko badawcze, sondę statyczną oraz wytyczoną część punktów sondowań przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Badania CPTU na poletku badawczym

W trakcie badań rejestrowano i zapisywano w formie elektronicznej: opór stożka q_c , tarcie na tulei ciernej f_s oraz nadwyżkę ciśnienia wody w porach u_2 . Wielkości te poddano standaryzacji uzyskując w ten sposób odpowiednio: skorygowany opór stożka q_t , współczynnik tarcia R_f , parametr ciśnienia porowego B_q oraz znormalizowany, efektywny opór stożka Q_t .

Określenie rodzaju gruntu przeprowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie zastosowano procedurę Hardera-Bloha, która pozwoliła rozdzielić warstwy i zlokalizować je w systemie klasyfikacyjnym Katedry Geotechniki Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. W drugim etapie grupowanie przeprowadzono procedurą Heghaziego-Mayne'a a rodzaj gruntu określono z diagramu Robertsona. Pozwoliło to na zweryfikowanie zgodności wcześniejszych ustaleń.

Parametry stanu gruntów niespoistych i spoistych określono na podstawie diagramów opracowanych w Katedrze Geotechniki Uniwersytetu Przyrodniczego

w Poznaniu oraz procedur Jamiołkowskiego i Mayne'a. W przypadku parametrów wytrzymałościowych wykorzystano procedury Janbu-Senneseta oraz Lunne'a i Mayne'a.

2.5. Wyniki i analiza badań

Sondowania statyczne CPTU pozwoliły na określenie parametrów wytrzymałościowych przed wzmocnieniem podłoża (seria a), w czasie wbijania kolumny (serie: b, c, d), oraz po jej uformowaniu (serie: e, f, g).

Przedstawiając uzyskane wyniki autorzy zawężili ich obszar do gruntów o najmniejszej nośności i sztywności. Są to grunty drugiej i trzeciej strefy, zalegające od około 1,5 m do około 4,8 m poniżej poziomu terenu. Powodem pominięcia pierwszej warstwy był również fakt, że na jej parametry oprócz wbijania kolumny miało wpływ: poruszenie się sprzętu formującego kolumnę, dowożącego materiał i wykonującego badania. Nie bez znaczenia są również zmiany wilgotności warstwy przypowierzchniowej na skutek zmieniających się w czasie warunków atmosferycznych.

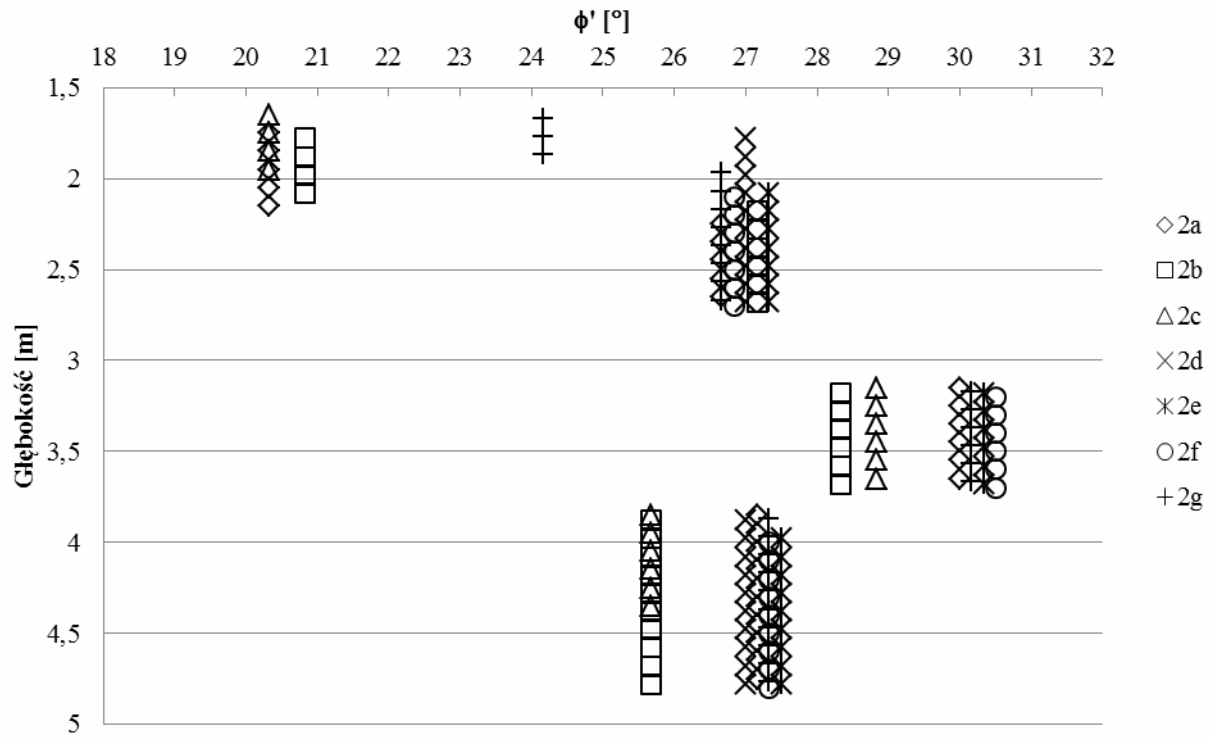
Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności dla wybranych warstw i poszczególnych serii badań przeprowadzonych w punkcie numer 2, oddalonym od osi wzmocnienia o 2 m.

Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, że zarówno kąt tarcia wewnętrznego, jak i spójność gruntu ulegają zmianie. Różny jest jednak charakter tych zmian.

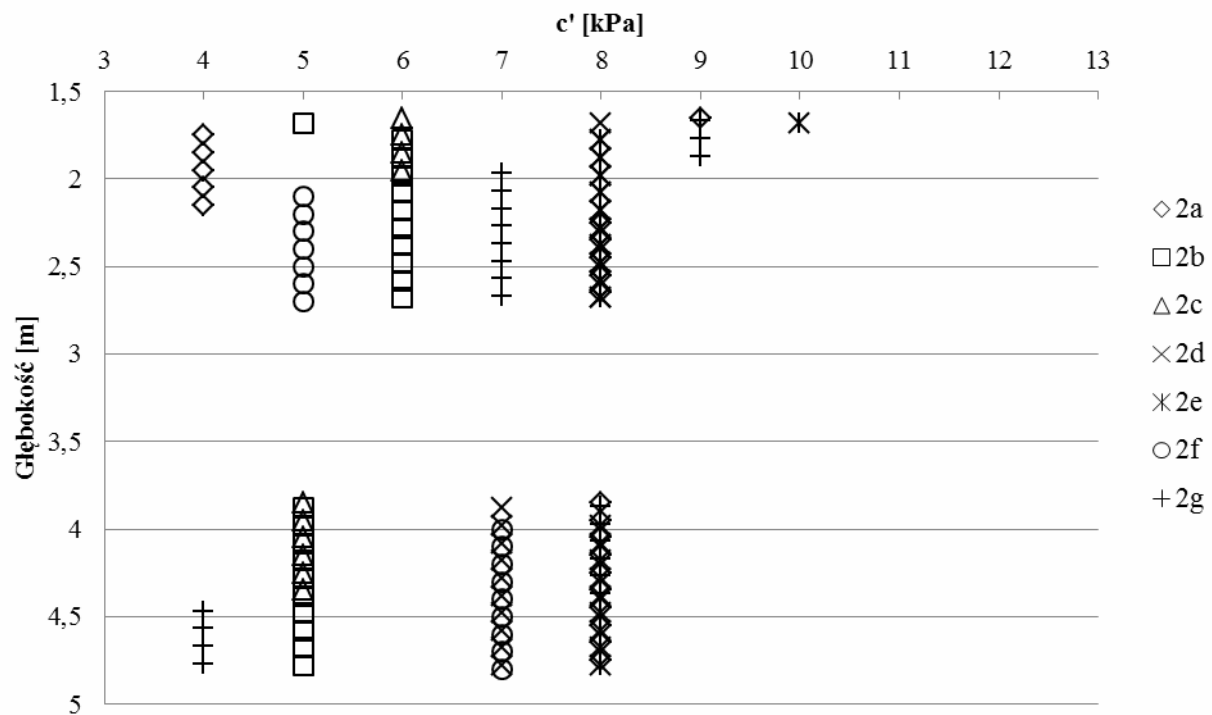
Wartości kąta tarcia wewnętrznego rosną już od momentu formowania kolumny (dla gruntów na głębokości od 1,5-3 m) lub po jej uformowaniu (dla głębokości poniżej 3 m) i są one wyższe w końcowej fazie od wartości przed wzmocnieniem (do kilku procent). Natomiast wartości spójności na przeważającej części podłoża (na głębokości od 2-5 m) podczas formowania kolumny maleją by po jej uformowaniu wzrosnąć, nie przekraczając jednak w badanym czasie wartości pierwotnej. Spostrzeżenia te korespondują z wynikami wcześniejszych badań autorów (Kwiecień, 2009), przeprowadzonych dla gruntów znajdujących się bezpośrednio przy kolumnie.

Wyniki badań zmienności efektywnego kąta tarcia wewnętrznego i efektywnej spójności w punkcie numer 3, oddalonym od osi wzmocnienia o 3 m, przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Charakter zmian wartości rozważanych parametrów, w punkcie numer 3, jest podobny do punktu numer 2. Na głębokości 2 m wartości kąta tarcia wewnętrznego zwiększają się od razu, poniżej – wartości kąta – w pierwszej kolejności maleją by później wraz z czasem wzrosnąć do wartości większych od wyjściowych (do kilku procent). W przypadku spójności jej wartość jest wyższa od wyjściowej tylko do głębokości 2 m.

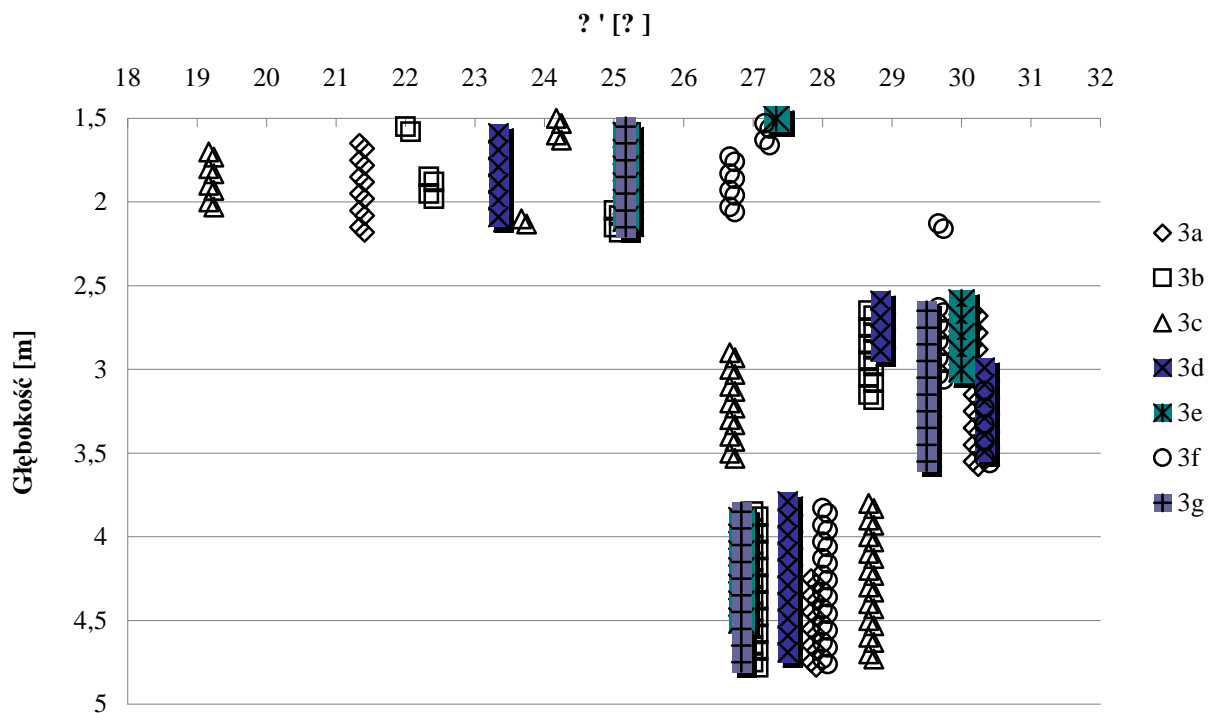
Podobne spostrzeżenia zauważono w wynikach badań w punkcie oddalonym od osi kolumny o 4 m (rys. 8 i 9).



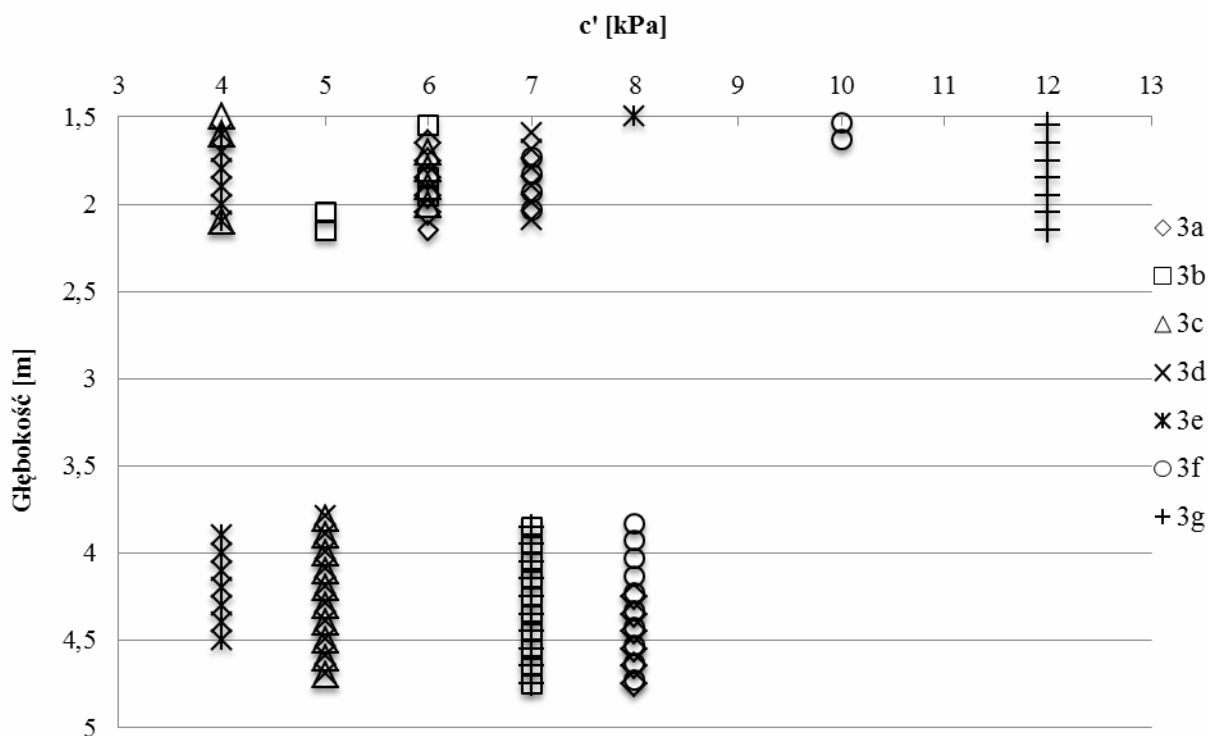
Rys. 4. Efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego w punkcie numer 2, dla serii badań: a-g



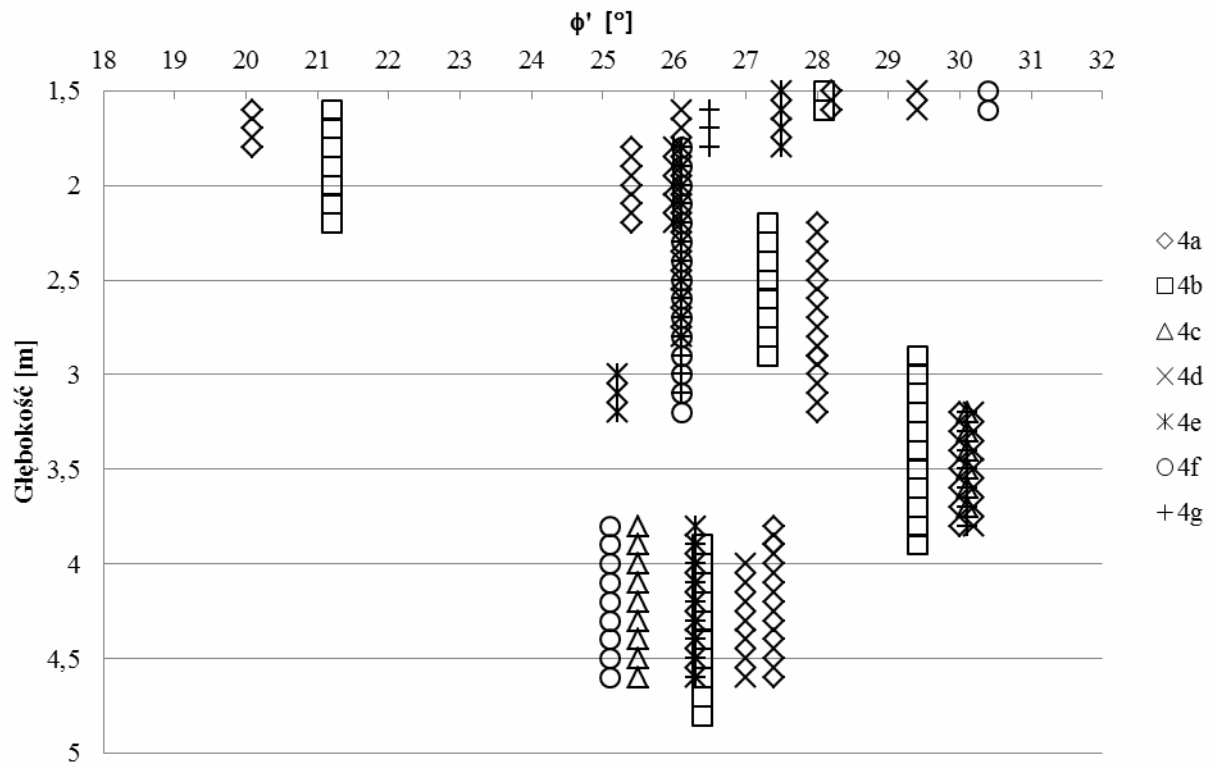
Rys. 5. Efektywne wartości spójności w punkcie numer 2, dla serii badań: a-g



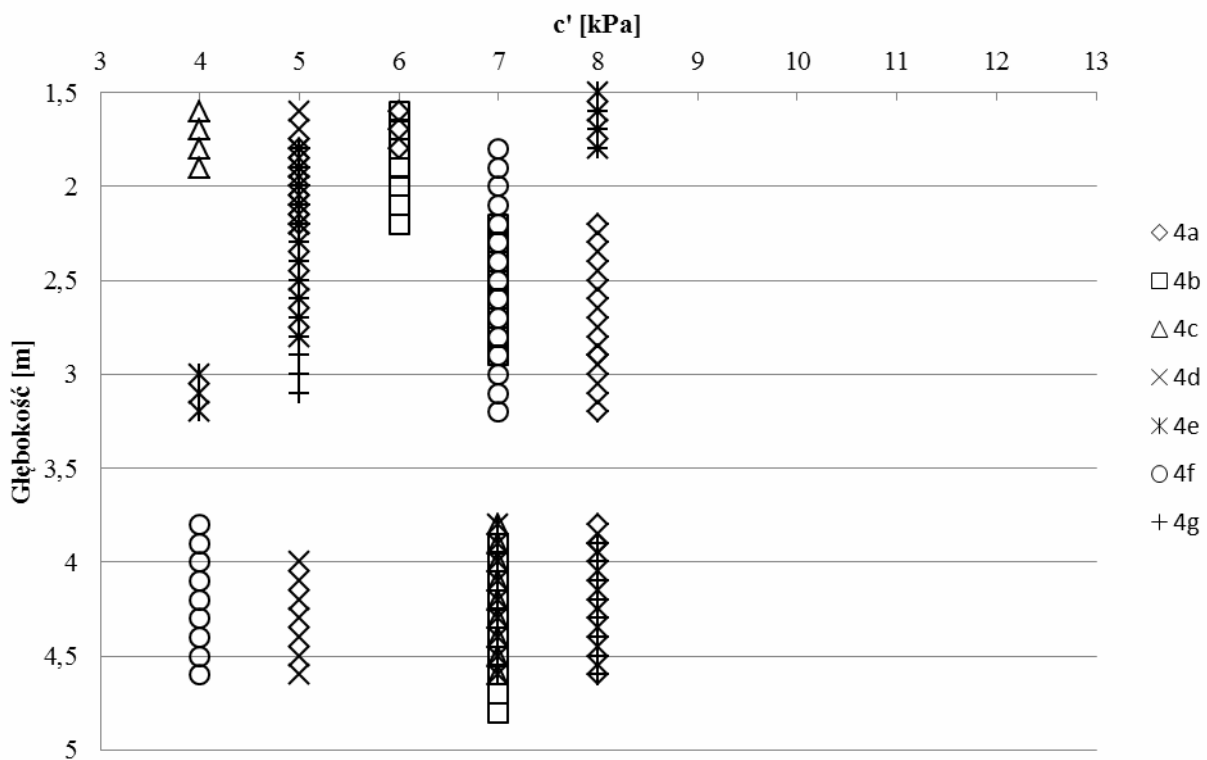
Rys. 6. Efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego w punkcie numer 3, dla serii badań: a-g



Rys. 7. Efektywne wartości spójności w punkcie numer 3, dla serii badań: a-g



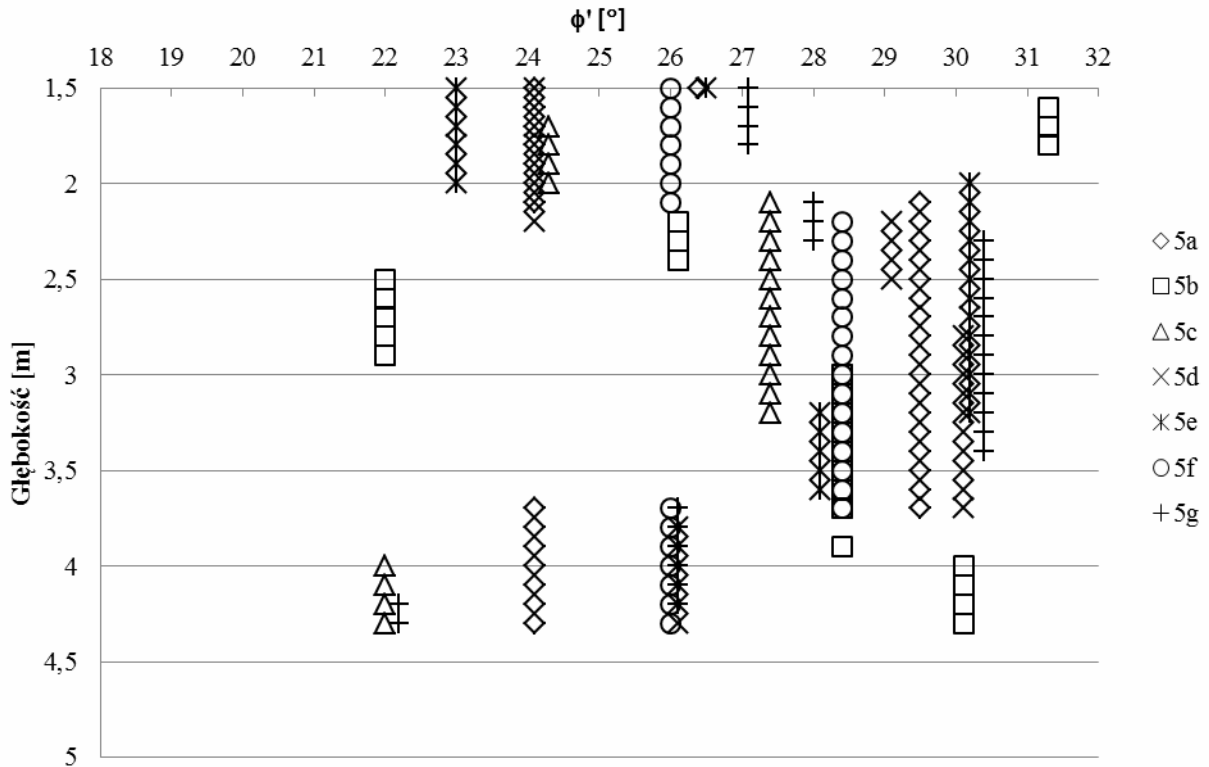
Rys. 8. Efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego w punkcie numer 4, dla serii badań: a-g



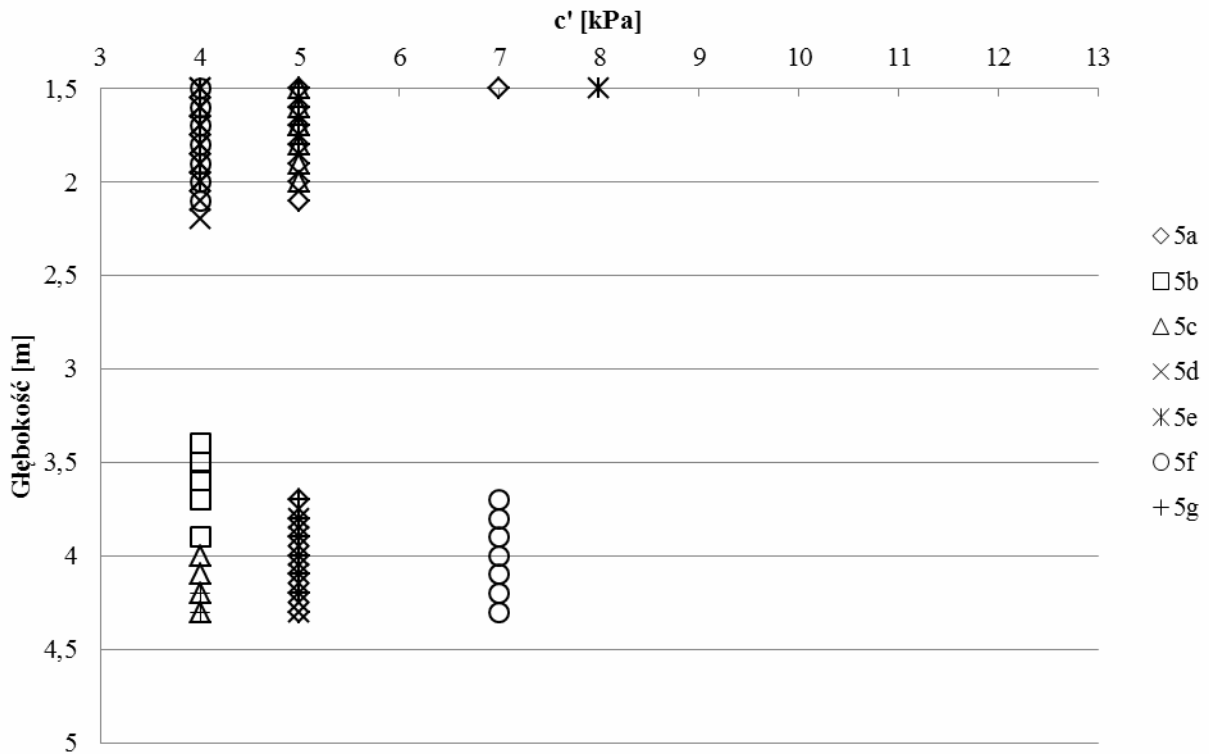
Rys. 9. Efektywne wartości spójności w punkcie numer 4, dla serii badań: a-g

Wyjątkiem są wartości kąta tarcia wewnętrznego, na głębokości od 2,2-3,3 m oraz 3,7-4,6 m, które po spadku w wyniku formowania kolumny, w dalszej kolejności rosną nie uzyskując jednak wartości pierwotnej.

Wpływ formowania kolumny na wartości parametrów wytrzymałościowych uwidacznia się również w miejscu oddalonym od kolumny o 6 m (rys. 10 i 11).



Rys. 10. Efektywne wartości kąta tarcia wewnętrznego w punkcie numer 5, dla serii badań: a-g



Rys. 11. Efektywne wartości spójności w punkcie numer 5, dla serii badań: a-g

Po początkowym spadku wartości kąta tarcia wewnętrznego i spójności, wartości te rosną i dla obu parametrów są większe od wartości wyjściowych.

Analizując wszystkie z uzyskanych wyników (rys. 4-11) można zauważyć, że uformowanie kolumny kamiennej powoduje zmianę parametrów wytrzymałościowych jej otoczenia gruntowego. Zmiany te zależą od głębokości na jakiej dana warstwa występuje, w jakim jest ona stanie oraz od odległości od miejsca formowania kolumny. Praktycznie we wszystkich punktach badawczych wartości parametrów wytrzymałościowych, w procesie formowania kolumny spadają poniżej wartości pierwotnych przed wzmocnieniem. Powodem tego jest niszczenie struktury gruntu na skutek wprowadzenia w podłoże dużej energii, jak i wzrostu ciśnienia wody w porach. Po zakończeniu procesu formowania w gruncie zachodzą procesy odbudowy i konsolidacji podłoża, w wyniku czego wartości parametrów wytrzymałościowych rosną, w części warstw uzyskując wartości wyższe od pierwotnych (od kilku do kilkunastu procent). Największe wzmocnienie wystąpiło w najsłabszych warstwach (warstwa II). Ponieważ badania prowadzone były do 30 dnia od momentu wykonania kolumny, stąd nie można wykluczyć dalszego wzrostu wartości rozpatrywanych parametrów.

3. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań na polu doświadczalnym mających na celu określenie wpływu formowania kolumny wbijanej na zmiany wartości parametrów wytrzymałościowych jej otoczenia.

Wykazały one, że uformowanie wbijanej kolumny kamiennej powoduje w jej otoczeniu gruntowym zmianę parametrów wytrzymałościowych. Zmiany te mają charakter złożony i zależą od stanu gruntu, jego odległości od uformowanej kolumny oraz czasu.

Ponieważ na zachowanie się podłoża na skutek jego obciążenia, oprócz parametrów wytrzymałościowych, mają również wpływ parametry odkształceniowe, będzie to przedmiotem dalszej analizy autorów.

Literatura

- Brauns J. (1978). Initial bearing capacity of stone column and sand piles. W: *Proc. Symp. Soil Reinforcing and Stabilizing Techniques in Engineering Practise*, Sydney 1978.
- Gryczmański M. (2003). Wzmacnianie podłoża wbijanymi kolumnami kamiennymi. Przegląd doświadczeń śląskich. *Inżynieria i Budownictwo*, 3/2003, 123-126.
- Kwiecień S., Sękowski J. (2012). Kolumny kamienne formowane w technologii wymiany dynamicznej. Monografia. *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice.
- Kwiecień S. (2009). Próbné obciążenia wbijanych kolumn kamiennych i wpływ ich formowania na słabe otoczenie gruntowe. W: „*Problemy geotechniczne i środowiskowe z uwzględnieniem podłoża ekspansywnych*”. *Materiały XV Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Inżynierii Geotechnicznej*, Bydgoszcz 2009, 153-160.
- Priebe H. (1976) Abschätzung des Setzungsverhaltes eines durch Stopfverriichtung verbesserten Baugrundes. *Die Bautechnik*, Vol. 53, No. 5, 160-162.
- Sękowski J., Kwiecień S. (2012). Badania polowe kształtu kolumn formowanych metodą wymiany dynamicznej. *Inżynieria Morska i Geotechnika*, 4/2012, 426-432.
- Tschuschke W., Kroll M. (2012). Interpretacja wyników testów dylatometrycznych (DMT) i statyczne sondowania (CPTU) na potrzeby Grantu badawczego pt. Analiza teoretyczna i doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe. Poznań.

THE INFLUENCE OF THE RAMMED STONE COLUMN FORMATION ON STRENGTH PARAMETERS OF THE SURROUNDING SOIL

Abstract: This paper presents the results of field tests performed to examine the influence of the rammed stone column formation process on the surrounding soil. The influence is expressed by cohesion and internal friction angle changes. These parameters were determined in cone penetration test (CPTU) during and after the stone column formation process performed with the use of dynamic replacement method.