

Zmiany objętościowe w podłożu wzmocnianym metodą wymiany dynamicznej

Jerzy Sękowski, Sławomir Kwiecień, Piotr Kanty

Na początku artykułu scharakteryzowano kolumny kamienne formowane metodą wymiany dynamicznej. Następnie opisano warunki gruntowe na poletkach badawczych, metodykę wykonanych badań i proces formowania kolumny kamiennej. W artykule podano wysokości zrzutu ubijaka, jego zagłębienia po każdym zrzucie oraz objętości wprowadzanego kruszywa. Pokazano kształty kolumn określone na podstawie odkrywki. Kształty w obu przypadkach pozwoliły oszacować objętość kruszywa w kolumnach. Wartości te odniesione do objętości wtłoczonego kruszywa stanowią podstawę do analizy porównawczej wykonanej w ostatniej części artykułu. W analizie tej uwzględniono, pomierzone podczas testów, wyniesienie gruntu w promieniu do 6 m od osi kolumny kamiennej. Całość wieńczę spostrzeżenia autorów na analizowany temat. Badania wykonano w ramach projektu badawczego nr 1989/B/T02/2011/40 sfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki. „Piotr Kanty jest Stypendystą w Projekcie „SWIFT (Stypendia Wspomagające Innowacyjne Forum Technologii)” POKL.08.02.01-24-005/10 współfinansowanym ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Artykuł recenzowany zgodnie z wytycznymi MNiSW

data zgłoszenia do redakcji: 02.01.2013

data akceptacji do druku: 22.02.2013



dr hab. inż. Jerzy Sękowski,
prof. nzw. Pol. Śl.
Katedra Geotechniki,
Wydział Budownictwa,
Politechnika Śląska
Jerzy.Sekowski@polsl.pl



dr inż. Sławomir Kwiecień
Katedra Geotechniki,
Wydział Budownictwa,
Politechnika Śląska
Slawomir.Kwiecien@polsl.pl



mgr inż. Piotr Kanty
Katedra Geotechniki,
Wydział Budownictwa,
Politechnika Śląska
Piotr.Kanty@polsl.pl

Kolumny kamienne formowane metodą wymiany dynamicznej to jedna z wielu metod geoinżynierii, szeroko stosowana do wzmocniania gruntów spoistych i/lub organicznych, pod obiektami liniowymi i kubaturowymi.

Technologia wykonania polega na wbijaniu kruszywa w słabe podłoże z użyciem uderzeń o dużej energii, w określonej siatce punktów. Masy stosowanych w Polsce ubijaków wahają się w przedziale 10-12 t, a standardowe wysokości zrzutu należą do przedziału 10-25 m [4]. Proces formowania kolumny rozpoczyna się od zrzutu ubijaka na słabe podłoże. W ten sposób formuje się krater, który w kolejnym etapie zostaje wypełniony kruszywem o frakcji 30-300 mm [3]. W dalszych etapach następują kolejne zrzuty ubijaka w wypełniony krater i uzupełnianie materiału według potrzeb. W zależności od zastosowanej energii uderzenia [2] uzyskuje się kolumny o różnych kształtach [3]. Wyniki badań [6] sugerują iż formowanie kolumny powinno być podzielone na trzy etapy. Etap pierwszy, w którym ubijak zrzucany jest z niewielkiej wysokości, to formowanie krateru, drugi to formowanie kolumny przy

zrzucie ubijaka z maksymalnej wysokości, natomiast w etapie trzecim wysokość zrzutu powinna być zmniejszana.

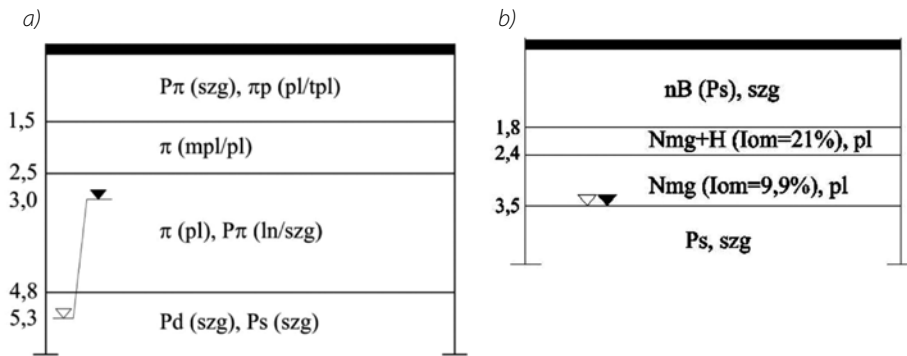
Procesy zachodzące podczas stosowania tej z pozoru prostej technologii nie są, jak się jednak okazuje, w pełni rozpoznane. Obserwacje terenowe oraz intuicja wskazują m.in., że podczas formowania kolumny kamiennej następują zmiany w objętości gruntu wykorzystanego do samej kolumny, jak i gruntu w jej sąsiedztwie. Zmiany powyższe są istotne z punktu widzenia pracy całego układu. Zagęszczenie materiału kolumny jak również gruntów w jej sąsiedztwie przekłada się na sztywność i nośność wzmocnionego podłoża. Istotny może być również aspekt praktyczny i ekonomiczny.

Powyższe przesłanki skłoniły autorów referatu do wykonania badań polowych, których celem było określenie wpływu procesu formowania kolumny na jej najbliższe otoczenie. Testy, których fragment opisano w artykule, wykonano na dwóch poletkach badawczych.

Charakterystyka poletek badawczych

Badania polowe wykonano na dwóch poletkach o zróżnicowanych warunkach geologicznych oraz odrębnej lokalizacji. Poletko pierwsze wykonano w miejscowości Przeworsk, natomiast poletko drugie w Czerwiesku niedaleko Zielonej Góry. Warunki gruntowe dla analizowanych przypadków przedstawiono na rys. 1.

Badanie w Przeworsku były wykonane na terenie po ściągnięciu warstwy humusu. Warunki gruntowe były określone na podstawie serii badań CPTU i DMT oraz jednego otworu wierconego. Zasadniczym celem badań było określenie wpływu formowania kolumny kamiennej na jej otoczenie. W ramach tych badań sprawdzono, za pomocą inklinometrów, przemieszczenia poziome gruntu do głębokości 7 m [1], [5] oraz określono za pomocą badań CPTU i DMT zmianę parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych gruntu obok kolumny w czasie 30 dni od jej uformowania. Wykonano również próbne obciążenie, odkrywkę kolumny oraz opisane poniżej pomiary wypiętrzeń gruntu w jej sąsiedztwie. Na rys. 2a pokazano po-



1. Warunki gruntowe: a) na poletku nr 1, b) na poletku nr 2

letko tuż przed pierwszym zrzutem ubijaka. Kolumny kamienne w tym rejonie były wykonywane jako wzmocnienie podstawy nasypu autostrady A4.

Kształtowane kolumny w Czerwieńsku były wykonane na wcześniej uformowanej z piasku platformie roboczej. Warunki gruntowe były określone na podstawie wiercenia ręcznego, oceny makroskopowej oraz badań laboratoryjnych. Zasadniczym celem testów było określenie kształtu kolumny kamiennej na podstawie badań geofizycznych i porównanie go z kształtem z odkrywki oraz pomiary wypiętrzeń gruntu w jej sąsiedztwie. Kolumny na terenie budowy w Czerwieńsku stanowiły wzmocnienie podłoża pod budowaną łącznicę kolejową. Na rys. 2b przedstawiono platformę, na której był wykonywany pomiar geofizyczny oraz ist-

niejący tor kolejowy, na którym w trakcie robót odbywał się ruch pociągów.

Formowanie kolumny kamiennej – poletko nr 1

Kolumny na poletku nr 1 formowane były z mieszaniny pospółki i tłucznia, o frakcji 0-200 mm, w proporcji jeden do jeden. Formowanie kolumny zrealizowano w trzech etapach, używając ubijaka o masie 12 t. Ubijak charakteryzował się wysokością 1,65 m, maksymalną średnicą 1,0 m i średnicą podstawy 0,8 m.

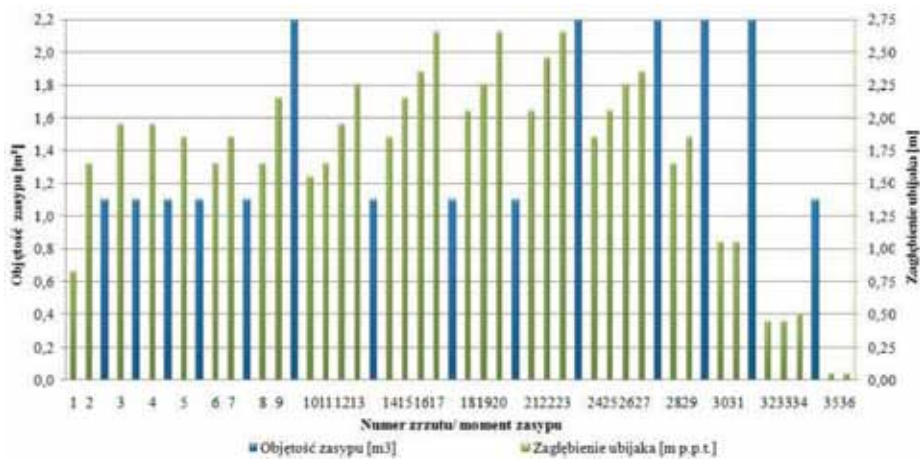
Etap pierwszy to ukształtowanie krateru (jeden zrzut z 5 m oraz jeden z 15 m), następnie jeden zrzut z wysokości 7,5 m, sześć zrzutów z 15 m i sześć zasypów. W etapie drugim czternaście zrzutów z wysokości 15 m oraz

cztery zasypy. Etap trzeci to sześć zrzutów z wysokości 15 m, jeden zrzut z wysokości 10 m, jeden z 7,5 m, dwa z wysokości 5 m oraz trzy z 2 m. Momenty w których wykonano zasypy o określonej objętości kruszywa oraz zagłębienia ubijaka po poszczególnych zrzutach pokazano na rys.3. Podane objętości odnoszą się do luźnego materiału. Wiadomo, że podczas wbijania materiał zagęszcza się i zmniejsza swoją objętość. Do ukształtowania kolumny zużyto 20,9 m³ luźnego kruszywa. Zaobserwowano spadki zagłębienia ubijaka od zrzutu oznaczonego na rys.3 jako nr 24.

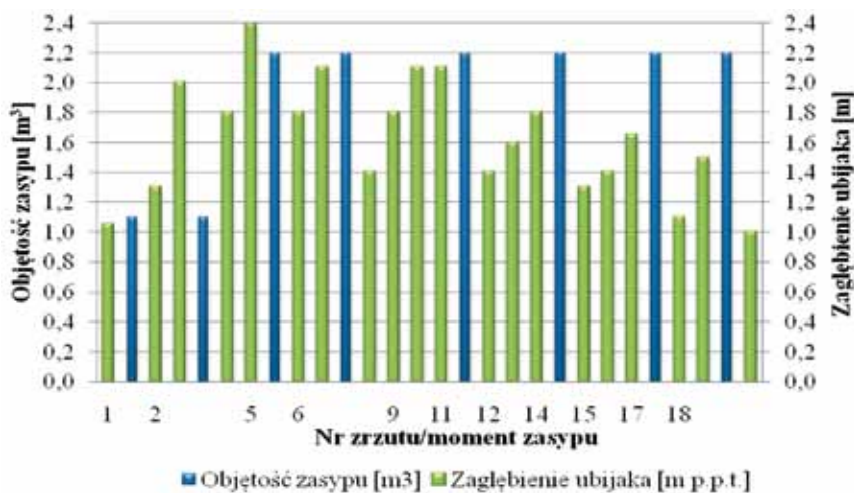
W trakcie formowania kolumny prowadzono m.in. pomiary wypiętrzeń gruntu w jej sąsiedztwie. Pomiar był wykonywany po każdym z etapów formowania kolumny w siedmiu punktach (na jednej prostej) oddalonych o 2, 3, 4 i 6 m od osi kolumny kamiennej, po obu jej stronach. Maksymalne pomierzone wypiętrzenie gruntu odnotowano 2 m od osi kolumny po zakończeniu jej formowania – wyniosło ono 32 cm. Pomiary wypiętrzeń charakteryzowały się brakiem symetrii względem osi kolumny. Na podstawie wyników pomiarów i obserwacji terenowych oszacowano objętość wypiętrzonego gruntu na 7,6 m³.



2. Urządzenia dźwigowe wraz z ubijakiem do formowania kolumn: a) na poletku nr 1, b) na poletku nr 2



3. Zagłębienia ubijaka i objętości zasypów na poletku 1



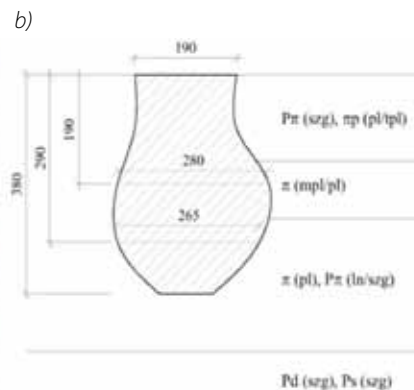
4. Zagłębienia ubijaka i objętości zasypów na poletku 2

Formowanie kolumny kamiennej – poletko nr 2

Kolumny na poletku nr 2 formowane były z mieszaniny piasku i destruktu betonowego, o frakcji 0-150 mm. Do kształtowania kolumn użyto ubijaka w kształcie „beczki” o masie 11 t, wysokości 1,8 m, maksymalnej średnicy 1,0 m i średnicy podstawy 0,7 m. Pierwszy zrzut ubijaka nastąpił z wysokości 5 m, w ten sposób uformowano krater, który zasypano kruszywem. Kolejne zrzuty ubijaka wykonywane były z wysokości 10 m. Dobór wysokości zrzutu był uwarunkowany bezpośrednim sąsiedztwem czynnej linii kolejowej. Zrzuty, między którymi wykonywano zasypy krateru, oznaczono na rys.4, podając też na nim objętości wsypanego do krateru kruszywa. Do ukształtowania kolumny zużyto 15,4 m³ luźnego kruszywa. Spadki zagłębienia ubijaka zaczęto obserwować od zrzutu oznaczonego na rys.4 jako nr 13.

Na poletku nr 2 prowadzono również pomiar wypiętrzeń terenu w sąsiedztwie wyko-

nywanej kolumny po każdym z etapów jej formowania. W tym przypadku notowano zachowania się 21 punktów oddalonych o 2, 3, 4, 5 i 6 m od osi kolumny kamiennej. Punkty te ulokowane były na 5 osiach, obróconych względem siebie o 45°. Dodatkowe pomiary wykonano w 4 punktach oddalonych o 2,5 m od osi kolumny między wspomnianymi osiami. Maksymalne pomierzone wypiętrzenie gruntu pomierzono 2 m od osi



5. Wyniki inwentaryzacji na poletku 1: a) widok w wykopie, b) szczegóły inwentaryzacji

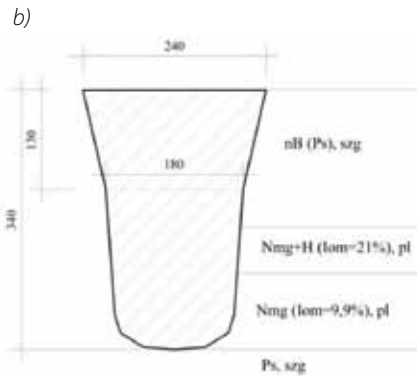
kolumny po zakończeniu jej formowania – wyniosło ono 41 cm. Wypiętrzenia, podobnie jak na poletku pierwszym, charakteryzowały się asymetrią względem osi kolumny. Maksymalne różnice wypiętrzeń punktów w tej samej odległości od osi kolumny wyniosły prawie 300%. Na podstawie wyników pomiarów i obserwacji terenowych oszacowano objętość wypiętrzonego gruntu na 9,7 m³. Szczegółowy opis wyników badań wypiętrzeń na poletku 2 zostanie opublikowany przez autorów w najbliższym czasie.

Odkrywa kolumny

W obu przypadkach odkrywa kolumn wykonano koparko-ładowarką, przez środek kolumny. Ze względów bezpieczeństwa pomiary inwentaryzacyjne oraz dokumentacja fotograficzna były wykonywane z poziomu terenu. Na rysunku 5 i 6 przedstawiono wyniki inwentaryzacji kolumn odpowiednio dla poletka 1 i poletka 2.

Na poletku nr 1 zinwentaryzowana kolumna miała kształt podobny do beczki, charakteryzujący się zmienną wzdłuż długości średnicą. Średnica głowicy była równa 1,9 m, na głębokości 1,9 m wynosiła 2,8 m, a na głębokości 2,9 m wynosiła 2,65 m. Kolumna miała długość 3,8 m i nie sięgała nośnych piasków. Charakteryzowała się również asymetrią widoczną w przekroju pionowym (rys.5b). Na podstawie kształtu kolumny oszacowano jej objętość na 16,1 m³.

Na poletku nr 2 zinwentaryzowana kolumna miała kształt charakteryzujący się zmienną wzdłuż długości średnicą. Średnica głowicy była równa 2,4 m, na głębokości 1,3 m wynosiła 1,8 m i malała z głębokością. Podstawa kolumny miała kształt „półksiężycą”. Kolumna charakteryzowała się długością 3,4 m, „dochodząc” do nośnych średnio zagęszczonych piasków średnich. Na podstawie kształtu kolumny oszacowano jej objętość na 9,3 m³.



6. Wyniki inwentaryzacji na poletku 2: a) widok w wykopie, b) szczegóły inwentaryzacji

Tab.1: Zestawienie analizowanych objętości

Objętość [m ³]	Poletko nr 1	Poletko nr 2
kruszywa kolumny na podstawie odkrywki	16,1	9,3
luźnego kruszywa przed wbiciem w podłoże	20,9	15,4
wypiętrzonego gruntu w sąsiedztwie kolumny	7,6	9,7

Analiza uzyskanych wyników

Zestawienia pomierzonych objętości kolumn, wypiętrzonego gruntu oraz kruszywa wprowadzonego w podłoże przedstawiono w tabeli 1.

W obu przypadkach zwraca uwagę fakt, iż objętość wprowadzonego w grunt kruszywa jest większa niż objętość kolumny kamiennej (ok. 30-65%). Wynika to z faktu dogęszczenia względnie luźnego materiału podczas wbijania w podłoże. Można przyjąć nawet, że wartość gęstości objętościowej kruszywa zmienia się w trakcie formowania kolumny z $\rho_{d \min}$ na $\rho_{d \max}$. Autorzy, dysponując wynikami badań własnych oraz udostępnionych przez wykonawcę, a także wykorzystując literaturę przedmiotu [7] oszacowali objętość materiału wbitego w podłoże, gdyby miał on gęstość $\rho_{d \max}$ na ok. 18,3 m³ i 12,7 m³, odpowiednio dla poletka nr 1 i nr 2. W obu przypadkach zmodyfikowana objętość kruszywa jest nadal większa niż objętość kolumny. Jak już wspomniano w pkt. 3 artykułu na obydwu poletkach zaobserwowano i pomierzono asymetrię w wypiętrzeniach, co zapewne przekłada się na asymetrię kolumny.

W przekonaniu autorów istnieje prawdopodobieństwo, że kolumny miały większe rozmiary w kierunku prostym do odkrywki, a co za tym idzie, jej oszacowana objętość może być zaniżona.

Osobnym aspektem jest objętość wypiętrzonego gruntu w rejonie formowanej kolumny. Na poletku nr 1 wypiętrzeniu uległo

niecałe 50% objętości kolumny. Na poletku nr 2 objętość gruntu wypiętrzonego jest podobna do objętości kolumny. W obydwu przypadkach są to znaczne objętości, przy czym różnica w objętości materiału wypiętrzonego na poletku nr 1 i nr 2 może wynikać ze sztywności warstwy słabej (pyły zalegające na poletku w Przeworsku charakteryzowały się edometrycznym modułem ścisłości pierwotnej w zakresie obciążeń 12,5 - 25 kPa równym 3,5 MPa, a namuły w Czerwieńsku 1,3 MPa), a także faktu osiągnięcia lub nieosiągnięcia stropu warstwy sztywnej (rys.5b i 6b). Intuicyjnie sztywny grunt lepiej przeniesie odkształcenia, nie ulegając deformacji.

Spostrzeżenia

Podczas wykonywania badań oraz interpretacji uzyskanych wyników dokonano następujących spostrzeżeń:

- objętość wprowadzanego w grunt kruszywa jest większa niż objętość kolumny kamiennej. Jest to związane ze zmianą zagęszczenia kruszywa w trakcie formowania kolumny,
- wypiętrzenia gruntu w sąsiedztwie kolumny są asymetryczne, co może sugerować, że kształt kolumny będzie podobny,
- o zachowaniu się układu: kolumna - otaczający grunt mogą decydować parametry odkształceniowe warstw najsłabszych oraz sposób uformowania samej kolumny,
- asymetria wypiętrzeń i kształtu kolumny wymaga badań zachowania się układu

kolumna - otaczający grunt z uwzględnieniem wszystkich kierunków. Alternatywą dla trudnych technicznie badań polowych pozostają laboratoryjne badania modelowe. ◀

Materiały źródłowe

- [1] Kanty P.: Wykorzystanie inklinometrów do badań przemieszczeń otoczenia wbijanej kolumny kamiennej. XII Konferencja Naukowa Doktorantów Wydziałów Budownictwa, Szczyrk 10-11.05.2012 r. Monografia str.75-84.
- [2] Kanty P., Kwiecień S.: Wpływ energii formowania na kształt kolumn wykonywanych metodą wymiany dynamicznej. Górnictwo i geoinżynieria. Rok 35, zeszyt 2/2011, str.325-331.
- [3] Kwiecień S., Sękowski J.: Research on the shape of stone columns formed in the ground with the use of dynamic replacement method. ACEE, No.2/2008, str.65-72.
- [4] Kwiecień S., Sękowski J.: Wymiana dynamiczna – praktyczne aspekty zastosowania metody w budownictwie drogowym. Magazyn Autostrady 10, 2010, str. 124-128.
- [5] Sękowski J., Kwiecień S., Kanty P.: Wykorzystanie inklinometrów w ocenie zachowania się otoczenia wbijanej kolumny kamiennej. Artykuł po pozytywnej recenzji przeznaczony do druku w czasopiśmie Materiały Budowlane nr 3/2013
- [6] Stinnette P. i inni: A quality control programme for performance evaluation of dynamic replacement of organic soil deposits. Geotechnical and Geological Engineering, 1997, 15, p. 283-302.
- [7] Earth manual. Part 1. U.S. Department of interior bureau of reclamation. Earth Sciences of Research Laboratory. Geotechnical Research. Technical Service Center. Denver, Colorado 1998.