

Agnieszka KUZORA^{*}
Politechnika Gdańska

BADANIA MODELOWE POJEDYNCZEJ KOLUMNY ŻWIROWEJ

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób dogęszczania podłoża gruntowego wykorzystywany do renowacji istniejących nawierzchni placów składowych i dróg. Proponowany sposób polega na formowaniu w gruncie kolumny o niewielkiej średnicy. Kolumnę tę formuje się poprzez wbijanie w rozluźnione podłoże trzpienia stalowego, z jednoczesnym dosypywaniem kruszywa.

Ponieważ praktyka wyprzedza rozwiązania teoretyczne, w Laboratorium Katedry Geotechniki Politechniki Gdańskiej prowadzone są badania nad zachowaniem się gruntu dogęszczanego tą metodą. Dla proponowanej metody zaprezentowano wstępne badania modelowe w małej skali oraz numeryczne odwzorowanie procesu formowania pojedynczej kolumny w układzie osiowo symetrycznym za pomocą MES.

MODEL EXPERIMENTS OF SINGLE STONE COLUMN

Summary. This paper presents a method used for the renovation or improvement of subsoil under existing road pavements, parking lots or storage site surfaces. The principle of the method is the lateral densification of loosened subsoil by small diameter stone columns. A stone column is formed by steel mandrel driven into the soil and simultaneous addition of gravel with cobbles.

The behaviour of fully saturated soils subject to the above method is being studied in the Geotechnical Laboratory at the Gdansk University of Technology. The initial results of small scale model tests for a stone column developed in soils with different moisture are presented here, as well as the numerical formulation of the process of single column formation in symmetric axial structure with assistance of the Finite Elements Method.

1. Wstęp

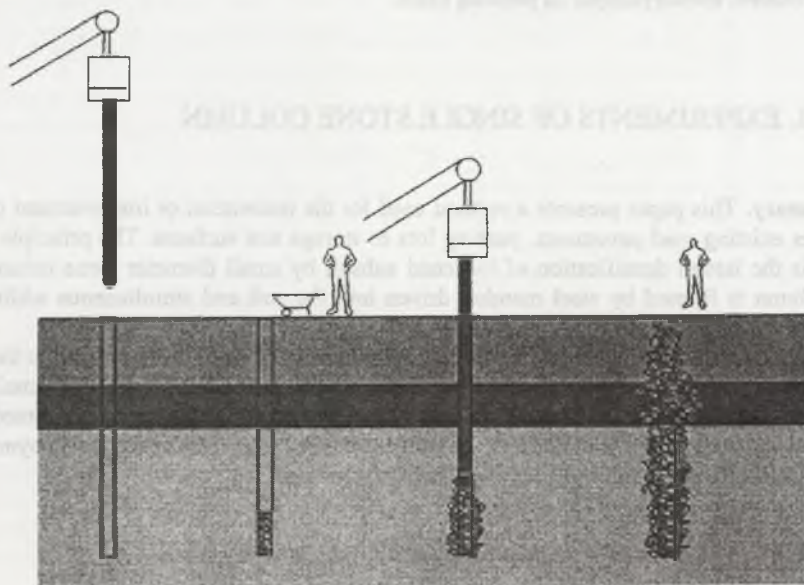
Stała rozbudowa miast oraz wzrastające natężenie w ruchu drogowym i portowym powodują poszukiwanie nowych terenów inwestycyjnych oraz zmuszają do szybkiej renowacji istniejących podbudów pod drogi i nawierzchnie. Prowadzi to także do pozyskiwania tere-

^{*} Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Adam Bolt, prof. Pol. Gdańskiej

nów, które wcześniej zostały zdyskwalifikowane ze względu na złe warunki geotechniczne. Ich zabudowa wymaga stosowania technologii wzmocnienia pozwalających szybko i efektywnie poprawić stan podłoża. Jedną z takich technologii jest wykorzystanie zagęszczających kolumn żwirowych, wykonywanych techniką udarową. Jest to prosta technologia, dająca zadowalające efekty poprawy parametrów ośrodka gruntowego.

2. Technologia formowania kolumn

Do formowania kolumn, w warunkach budowy, wykorzystuje się młot hydrauliczny zamocowany na urządzeniu jezdnym. Młot zakończony jest trzpieniem o średnicy 150 mm lub rurą z zamykanym dnem o średnicy od 200÷600 mm. Długość trzpienia dobiera się w zależności od długości wykonywanych kolumn oraz możliwości technicznych urządzenia jezdno-ego. Po wytyczeniu siatki kolumn ustawia się trzpień nad obranym punktem i wprowadza go w grunt. Powstały otwór wypełnia się kruszywem $\Sigma\#2/32$ mm (rys. 1).



Rys. 1. Schemat procesu realizacji krótkiej kolumny żwirowej
Fig. 1. Construction of a short stone column

W zależności od sposobu podawania kruszywa wyróżnia się dwie metody formowania kolumn. W metodzie pierwszej kruszywo formujące kolumnę podaje się z zewnątrz, a w meto-

dzie drugiej wykorzystuje się rdzeniowe podajniki kruszywa. W pierwszym przypadku stosuje się rozpychanie kruszywa poprzez dobijanie zamkniętym stalowym trzpieniem, z każdorazowym podniesieniem go ponad powierzchnię terenu. W metodzie drugiej – trzpień formujący kolumnę podciąga się jedynie kilkanaście centymetrów. Umożliwia to otwarcie się zaworu w podstawie trzpienia i wysypanie porcji kruszywa. Ruch w dół zamyka zapadnię, tworząc but do zagęszczania materiału w kolumnie. W obu metodach kruszywo zagęszczane jest podstawą trzpienia, którą wielokrotnie wciska się (lub wbija) w formowaną kolumnę.

Podczas podnoszenia trzpienia wykorzystywana jest tzw. stateczność chwilowa otworu. Doświadczenia prowadzone w różnych warunkach gruntowych pozwalają na stwierdzenie, że jedynie w przypadku występowania silnie nawodnionych gruntów organicznych stateczność ta jest niewystarczająca i następuje zasklepienie się otworu.

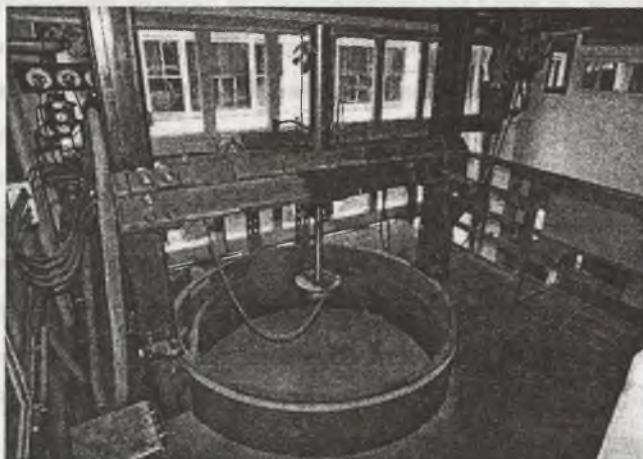
Podciąganie i opuszczanie trzpienia prowadzi do zagęszczenia kruszywa, a pokonanie oporu słabego gruntu pozwala na rozpychanie kruszywa wzdłuż pobocznic kolumny. Wprowadzenie dodatkowego materiału oraz wzajemne przemieszczanie się materiału kolumny oraz gruntu rodzimego daje efekt zgęszczenia ośrodka przylegającego do formowanych kolumn. Wykorzystanie dodatkowego efektu wzmocnienia ośrodka otaczającego kolumny jest jednym z tematów badawczych prowadzonym w Laboratorium Geotechniki Politechniki Gdańskiej.

3. Badania laboratoryjne efektu wzmocnienia gruntu wokół kolumn

Zmienne i dość trudne warunki geotechniczne na terenie Polski północnej oraz zapotrzebowanie na tego rodzaju technologię pociągnęły za sobą konieczność sprawdzenia najbardziej efektywnego rozstawu, średnic i sposobu wykonywania kolumn. Niezbędne okazało się również określenie zakresu stosowania zagęszczających kolumn żwirowych z uwzględnieniem współpracy podłoża, optymalizacji sposobu wykonawstwa kolumny żwirowej oraz wpływu jej formowania na otaczający ją ośrodek gruntowy. W tym celu opracowano technologię wykonywania kolumn w warunkach laboratoryjnych jak najbardziej zbliżoną do warunków rzeczywistych. Badania wykonano w skali 1:5, młot hydrauliczny zastąpiono lekkim urządzeniem udarowym, trzpień żerdzią o średnicy 2,2 cm, a kruszywo grube żwirem #2/8 mm.

Badania prowadzono w układzie przestrzennym na gruncie niespoistym w stanie wilgotnym lub nawodnionym. W technologii przygotowania ośrodka modelowego o powtarzalnych

parametrach wykorzystano stanowisko do badań w układzie w pełni nasyconym wodą, znajdujące się w Laboratorium Geotechniki Politechniki Gdańskiej – rys. 2.



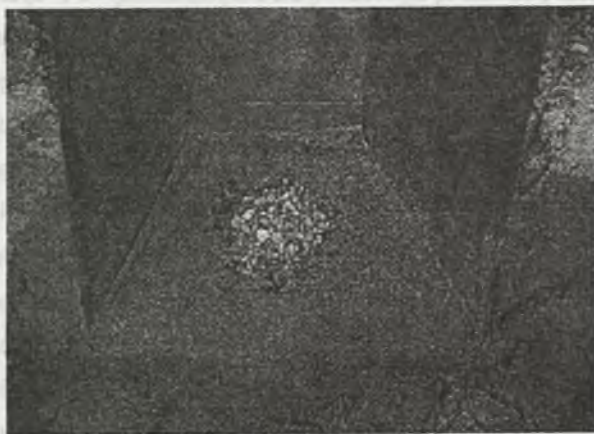
Rys. 2. Stanowisko do badań w układzie w pełni nasyconym wodą
Fig. 2. Set-up - fully saturated with water

Serie badań wstępnych, pozwoliły na opracowanie procedury badawczej. Sprawdzone czas, po jakim wilgotność w zbiorniku stabilizuje się i można wykonać badania w jednakowych warunkach. Każde badanie wykonano po upływie określonego czasu od chwili napełnienia zbiornika wodą. Kolumnę formowano w sposób możliwie bliski technologii stosowanej w warunkach rzeczywistych, wykorzystując specjalnie skonstruowany do tego celu stelaż. Ścisłe określono wszystkie warunki i parametry wykonywania kolumny, tzn. jednostkową objętość wprowadzanego kruszywa, czas działania lekkiego urządzenia udarowego, oraz kryterium zakończenia formowania kolumny. To ostatnie kryterium okazało się bardzo istotne, ponieważ ośrodek, w którym formowano kolumnę, był słabo zagęszczony $I_D = 0,14$ i dalsze wprowadzanie kruszywa prowadziło już tylko do silnego wypychania gruntu otaczającego kolumnę, a nie podnosiło efektywności wzmocnienia.

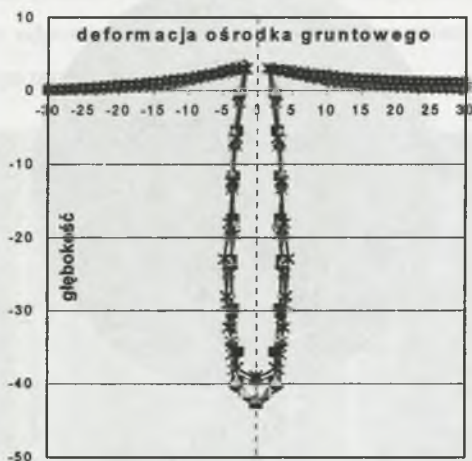
Wszelkie parametry zapisywano w dziennikach formowania kolumn. Obserwacje obejmowały proces formowania kolumny oraz pomiary wykonywane po zakończeniu formowania kolumn w celu sprawdzenia, czy kolumna rozpycha grunt na boki i zagęszcza otaczający ośrodek gruntowy.

Do oszacowania powierzchni wyparcia gruntu otaczającego ośrodek gruntowego wokół kolumny zastosowano specjalnie skonstruowany noniusz pomiarowy. Dzięki tym pomiarom oszacowano zakres powierzchniowej deformacji ośrodka gruntowego. Końcowym badaniem było zrobienie odkrywki wykonanej kolumny. Wykorzystano do tego specjalną ścinarkę, za

pomocą której dokonywano kolejnych warstwowych ścięć – rys. 3. Po każdym ścięciu mierzono poziom, na którym ścięto kolumnę oraz jej średnicę. Wszystkie zebrane parametry pozwoliły na oszacowanie kształtu kolumny i przedstawienie pionowego przekroju uformowanej kolumny – rys 4.



Rys. 3. Warstwowe ścięcie kolumny
Fig. 3. Layered cut of the column



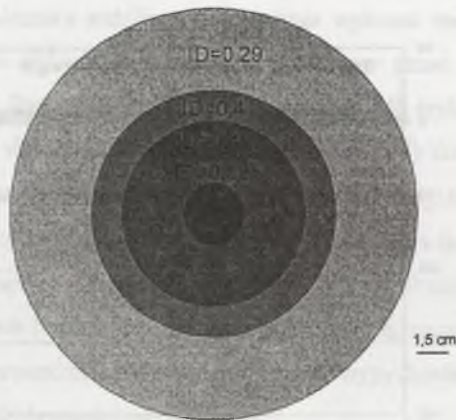
Rys. 4. Schemat pionowego przekroju pojedynczej kolumny wykonany na podstawie odkrywek
Fig. 4. Vertical profile of a single column

Ponieważ w warunkach naturalnych kolumny żwirowe winny opierać się na warstwie gruntu nośnego, to i w badaniach w jednorodnym ośrodku wprowadzono „warstwę nośną”. Warstwę wykonano poprzez wbudowanie siatki o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie, na określonym

poziomie. Zabieg ten pozwolił na uzyskanie tak zwanego efektu odbicia i lepsze formowanie kolumny w jej dolnej warstwie.

Przez cały proces badań analizowano zużycie kruszywa. Założenia projektowe mówią o zwiększeniu średnicy kolumny w stosunku do średnicy trzpienia od 1,5 do 2,0 razy, w zależności od warunków gruntowych. Pozwala to na oszacowane zużycia kruszywa w oparciu o dane geometryczne wykonanych kolumn. Na podstawie zebranych wyników w laboratorium stwierdzono, że zużycie kruszywa zwiększyło się trzykrotnie w stosunku do parametrów geometrycznych. Należy jednak uwzględnić znaczny stopień rozluźnienia ośrodka gruntowego, co ułatwiło wprowadzenie zwiększonej ilości kruszywa. Dane te zostały zweryfikowane przez badania terenowe, gdzie współczynnik zużycia kruszywa dla gruntów słabych i nawodnionych wyniósł 1,85.

Ponieważ w terenie bieżąca kontrola wykonanego wzmocnienia za pomocą krótkich kolumn zwirowych polega głównie na przeprowadzeniu sondowań dynamicznych bądź statycznych, więc także w procesie modelowania zachowano tę procedurę. Skonstruowano i wykalibrowano „minisonde statyczną” do badań modelowych. Urządzenie to pozwoliło na sprawdzenie strefy wpływu procesu formowania kolumny na otaczający ośrodek. Sondowania wykonano w odstępach 6 cm, 9 cm, 12 cm i 20 cm od osi kolumny o średnicy 6 cm – rys. 5.



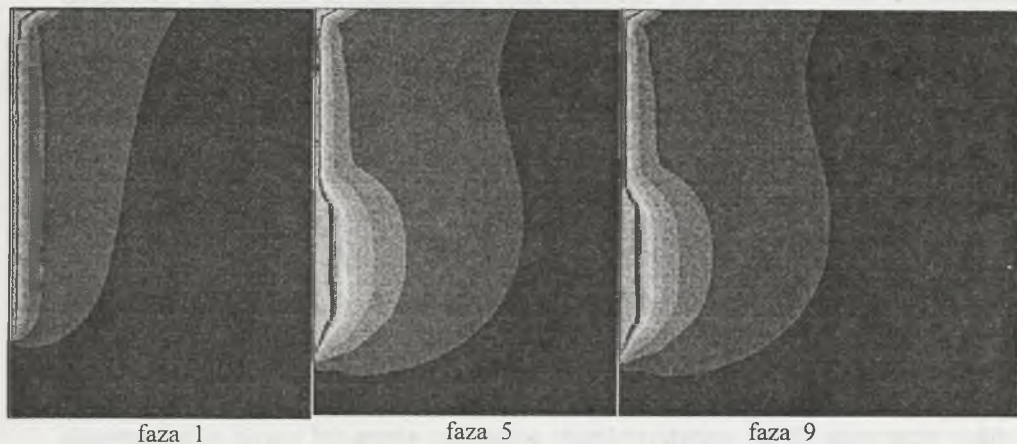
Rys. 5. Strefy wpływu pojedynczej kolumny na zmianę zagęszczenia ośrodka gruntowego
 Fig. 5. Zones of single column influence on the density of surrounding soil

4. Numeryczne odwzorowanie procesu formowania pojedynczej kolumny w układzie osiowo symetrycznym za pomocą MES

Przeprowadzono serię obliczeń symulacyjnych Programem PLAXIS wersji 8.2, polegającą na odwzorowaniu przemieszczeń ośrodka gruntowego podczas wykonywania kolumny żwirowej. Obliczenia dokonano w układzie osiowo symetrycznym, przyjmując jako oś obrotową os wykonanej kolumny. W pierwszej fazie obliczeń uwzględniono przemieszczenia powstałe tylko od trzpienia lekkiego urządzenia udarowego ($\varnothing 22$ mm), w następnych fazach dodawano kolejne, zaczynając od spodu kolumny żwirowej. Serię obliczeń kończy faza dziewiąta odwzorująca przemieszczenia ośrodka gruntowego dla wykonanej kolumny żwirowej – rys. 6 [2].

Obliczeń dokonano na modelu sprężysto-idealnie plastycznym (Mohr-Coulomb). Parametry ośrodka gruntowego przyjęto zgodnie z wynikami badań przeprowadzonych na ośrodku gruntowym stosowanym do badań modelowych.

Wykonanie kolumny w rozluźnionym gruncie niespoistym poprawia jego parametry wytrzymałościowe, a uformowana kolumna z zagęszczonego materiału żwirowego jest dodatkowym elementem nośnym o podwyższonej wytrzymałości. Przeprowadzone badania pozwalają na rozpatrywanie ośrodka i wprowadzonych w niego kolumn jako kompozytu o ulepszonych parametrach gruntowych. Rozważania takie mogą być prowadzone jedynie dla kolumn wykonanych w odpowiedniej technologii i z zachowaniem odpowiednich wytycznych odnośnie do samego procesu wykonawczego.



Rys. 6. Zakres pola przemieszczeń powstałego w ośrodku gruntowym podczas formowania pojedynczej kolumny żwirowej

Fig. 6. Displacement fields of a single stone column in the soil

5. Wnioski

Ciekawe spostrzeżenia, jakie zauważono w trakcie wykonywania realizacji projektowych oraz wnioski, jakie wyciągnęli autorzy projektów podczas ich wykonawstwa doprowadziły do sprawdzenia słuszności pewnych teorii i przemyśleń. W ten właśnie sposób rozpoczęto program badawczy, który ma na celu sprawdzenie słuszności teorii, iż kolumny żwirowe wykonywane w określonej technologii w ośrodku rozluźnionym mają zdolność do rozpychania kruszywa na boki, a co za tym idzie zmiany upakowania ziaren w pewnym obszarze przyległym do kolumny. Seria badań przeprowadzona na pojedynczych kolumnach pozwoliła na określenie kształtu kolumny, sposobu wypierania i oszacowania bryły gruntowej oraz określenie zasięgu wpływu procesu formowania wykonanej kolumny na otaczający ośrodek gruntowy. Odpowiednio dobrany rozstaw umożliwi stworzenie homogenicznego kompozytu grunt – kolumna w warunkach rzeczywistych.

LITERATURA

1. Kuzora A: Sprawozdanie z badań modelowych pojedynczej kolumny żwirowej. Maszynopis WBWiŚ PG, grudzień 2003.
2. Dulleck A.: Analiza zachowania się podłoża wzmocnionego krótkimi kolumnami żwirowymi – badania modelowe. Praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, styczeń 2004

Recenzent: Dr hab. inż. Antoni Florkiewicz, prof. Pol. Poznańskiej