



Dr hab. inż. Adam Bolt prof. nadzw. PG

Gdańsk dnia 28. 08. 2014

Recenzja rozprawy doktorskiej

pt.: „ Analiza doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej gruntu na otoczenie ”

Autor: mgr inż. Piotr Kanty

1. PODSTAWA OPRACOWANIA OPINII

Podstawą niniejszej recenzji jest z decyzja Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej z dnia 25 czerwca 2014 r i pismo Pana Dziekana Prof. dr hab. inż. Jana Ślusarka z dnia 14 lipca 2014 roku.

Do oceny otrzymałem rozprawę doktorską p.t.: „ ***Analiza doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej gruntu na otoczenie***” w formie maszynopisu opracowaną w Katedrze Geotechniki i Dróg na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach w roku 2014, wykonaną pod kierunkiem dr hab. inż. Jerzego Sękowskiego Prof. Pol. Śląskiej promotora pracy.

Praca zawiera 142 strony tekstu pracy w tym 5 str. spisu treści i sterszczenia w języku polskim i angielskim oraz 11 stron bibliografii zawierających 176 pozycji literatury. W tekście zawarto 106 rysunków, wykresów i fotografii.

Praca powstała przy wsparciu projektu nr 1989/B/T02/2011/40, finansowanego ze źródeł Narodowego Centrum Nauki.

2. PRZEDMIOT I METODA PRACY

Recenzowana rozprawa mgr inż. Piotra Kantego wynika z potrzeby uściślenia dotychczasowych metod projektowania wzmocnienia podłoża gruntowego metodą wymiany dynamicznej z zastosowaniem kolumn kamiennych z uwzględnieniem mechanizmu współpracy zagęszczanego ośrodka gruntowego na skutek interakcji tego ośrodka z kolumną kamienną wywołującą określone pole deformacji poprzez dane ilościowe pośrednio opisujące efekty zjawisk zachodzących w obrębie formującego się pola deformacji wokół kolumny dla typowego układu: platforma robocza (1), grunt słaby (2) oraz warstwa nośna (3) przedmiotem analiz są zmiany parametrów mechanicznych gruntu w otoczeniu kolumny (4), jego przemieszczenia poziome (5), wypiętrzenie (6) oraz korespondujący z nimi kształt kolumny kamiennej (7).

Wyniki badań jakościowych i ilościowych opisane w pracy dają podstawowe informacje dotyczące występujących procesów, ich złożoności i zależności między nimi. Dzięki uwzględnieniu przestrzennej pracy ośrodka gruntowego w trakcie wbijania materiału kolumny Autor tworzy podstawy dokładniejszego ustalania wzrastającej sztywności ośrodka gruntowego wokół kolumny. Dotyczy to w szczególności projektowania uzdatnienia podłoża z zastosowaniem wymiany dynamicznej polegającej na formowaniu bardzo sztywnych kolumn formowanych z gruntów gruboziarnistych do zagęszczenia których stosuje się sprzęt o dużej energii udaru i dużym zasięgu. Należy zauważyć, że w pracy nie mówi się o przebiegu zjawisk związanych z zagęszczaniem ośrodka gruntowego otaczającego kolumnę. Praca jest poświęcona wyłącznie metodyce oceny skutków tych oddziaływań i uzyskiwanych efektach wzmocnienia tego oddziaływania poprzez nakładanie się

wpływów przekazywanych cyklicznie podczas formowania trzonu kolumny poprzez ubijanie kolejnych warstw. Odróżnia to w znacznym stopniu pole zainteresowań Autora od wielu wcześniej wykonywanych prac w tym zakresie.

Rozprawa doktorska dotyczy wpływu wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe. Specyfika i złożoność tematu, ukierunkowała autora na analizy doświadczalne jako najbardziej adekwatne narzędzie do poszerzenia wiedzy o przedmiocie rozprawy. Badania opisane w pracy pozwalają uzyskać podstawowe informacje na temat tych procesów, ich złożoności i zależności między nimi.

Przedmiotem pracy jest wpływ technologii wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe. Specyfika i złożoność tematu, ukierunkowała Autora na analizy doświadczalne jako najbardziej odpowiednie narzędzie do poszerzenia wiedzy o przedmiocie rozprawy. Specyfika wymiany dynamicznej skutkuje dużymi deformacjami podłoża w otoczeniu kolumny oraz zmianami jego właściwości. Zmian zachodzących w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej nie uwzględnia żadna z istniejących metod ich wymiarowania. Jest to związane z trudnością opisu skomplikowanych procesów mających miejsce w czasie wykonywania kolumny jak i po jego zakończeniu. Przedmiotem analiz są zmiany parametrów mechanicznych gruntu w otoczeniu kolumny, jego przemieszczenia poziome, wypiętrzenie oraz korespondujący z nimi kształt kolumny kamiennej w procesie formowania kolumny DR w układzie: platforma robocza(1) - grunt słaby(2) - warstwa nośna(3).

Celem pracy jest ocena wpływu kolumny formowanej w technologii wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe, poprzez:

- analizę literatury przedmiotu badań z określeniem problemów zasadniczych oraz wyborem i ukierunkowaniem badań własnych na najmniej rozpoznane czynniki wpływu wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe.
- badania własne deformacji ośrodka gruntowego oraz zmiany parametrów geotechnicznych w sąsiedztwie wbijanej kolumny kamiennej, kształtu wykonanych kolumn oraz procesu ich formowania.
- analizy jakościowe i ilościowe występujących zależności istotne dla projektowania parametrów geotechnicznych ośrodka gruntowego w otoczeniu kolumn oraz ustalania zależności określających ten wpływ.

Tezą rozprawy jest istnienie zmian możliwych do określenia na drodze empirycznej identyfikacji zjawisk i parametrów wpływu procesu formowania kolumny na otoczenie gruntowe niezbędnych dla przyjęcia właściwych założeń i zasad projektowania uzdatniania podłoża gruntowego w technologii wymiany dynamicznej.

Należy podkreślić, że istniejące metody wymiarowania kolumn kamiennych opracowano dla innych procesów ich formowania. W szczególności nie ujęto w nich rzeczywistego kształtu kolumny oraz zmian stanu i przepuszczalności otaczającego ośrodka gruntowego.

Zakres pracy obejmuje:

- przedstawienie zasadniczych problemów geotechnicznych dotyczących wymiany dynamicznej oraz ustalenie programu badań eksperymentalnych i analitycznych na podstawie analizy literatury dotyczącej przedmiotu badań,
- przedstawienie parametrów brzegowych z zakresu zastosowanych metod badawczych, technologii formowania kolumn i doboru materiału zasypowego,
- przedstawienie założeń do tzw. próby geotechnicznej technologii i weryfikacji założeń do wykonania wymiany dynamicznej,
- opis modelowego stanowiska doświadczalnego do testowania sposobu realizacji oraz metodyki pomiarowej,
- opis poligonów doświadczalnych do testowania metod realizacji i metodyk szczegółowych,
- omówienie wybranych badań *in-situ* identyfikujących zasadnicze parametry geotechniczne ośrodka gruntowego w otoczeniu kolumny oraz materiału zasypowego,
- badania parametrów pośrednich i bezpośrednich miar stanu ośrodka gruntowego w otoczeniu kolumny,

- analizę wyników badań zmian stanu ośrodka gruntowego oraz wilgotności warstw słabych na skutek wbudowywania kolejnych objętości materiału zasypowego,
- analizę oraz przedstawienie wniosków geotechnicznych z przeprowadzonych badań i analizy matematycznej,
- podsumowanie i przedstawienie możliwości praktycznego wykorzystania uzyskanych wniosków w praktyce projektowej i wykonawczej.

W pracy nie podjęto tematu zmian strukturalnych zachodzących w ośrodku gruntowym w stanach poprzedzających stan graniczny. Zakres badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych Autor ograniczył do rozpoznania wpływu obciążenia działającego dynamicznie w procesie formowania kolumny z określeniem rzeczywistych wartości parametrów określających stan ośrodka gruntowego otaczającego kolumnę. Do rozważań przyjęto standardowe parametry geotechniczne ośrodka gruntowego ustalone w badaniach polowych i laboratoryjnych.

Przyjęta metoda pracy polega na analizie dostępnej literatury dotyczącej metody wymiany dynamicznej oraz technologii z których się ona wywodzi, tj. konsolidację dynamiczną oraz kolumny kamienne formowane metodą wibrowymiany wraz z określeniem obszarów wymagających szczegółowego rozpoznania na drodze eksperymentalnej. Studia literaturowe pozwoliły Autorowi ukształtować metodykę pracy oraz program badań eksperymentalnych. Przyjęty sposób prowadzenia pomiarów pozwala na ocenę zmian zachodzących w otoczeniu kolumny zarówno w procesie jej formowania jak i w czasie co pozwala formułować wnioski dotyczące metodyki badań odbiorczych niezmiernie istotne dla praktyki projektowej i wykonawczej. Formuluje programy własnych **badania modelowych** w zmniejszonej skali (laboratoryjnych) obejmujący uformowanie kolumny kamiennej w przestrzeni skrzyni badawczej, wypełnionej warstwą średnio zagęszczonego piasku, a następnie warstwą gliny pylastej, dla układu nieobciążonego oraz jedno w którym kolumna była zwieńczona geomateracem a następnie obciążona gruntem modelującym nasyp. W tym procedury:

1. **pomiarów przemieszczeń** poziomych ośrodka gruntowego tuż przy kolumnie oraz w punktach pomiarowych stopniowo oddalających się, wypiętrzeń w rejonie wykonanej kolumny oraz ich stopniowe zanikanie.
2. **pomiarów zmian zachodzących w ośrodku gruntowym** z zastosowaniem pomiaru oporów (q_c) stożka sondy wciskanej.
3. **analiz zmiany oporów** stożka sondy wciskanej oraz zmiany wilgotności w różnych odległościach od kolumny po uformowaniu kolumny i w czasie 28 dni.
4. **oceny efektów procesu formowania kolumny**, jak i jej pracy jako drenu w tym zmian wilgotności gruntu słabego oraz procesów konsolidacji,

oraz badań polowych, w których wykonano pojedynczą kolumnę za pomocą 10 tonowego ubijaka w mieszanych gruntach pylasto-piaszczystych (poletko nr10) oraz za pomocą ubijaka swobodnie spadającego (wypinanego) o masie 9 t (poletko nr 2) w podłoże z platforma robocza oraz zalegającymi do głębokości 2,2 m warstwami torfu i gliny pylastej w stanie miękkoplastycznym, poniżej których zalegają piaski średnie z domieszką żwirów o $I_p=0,6$. W tym procedury:

5. **badania zmian parametrów gruntu** za pomocą testów CPTU i DMT
6. **pomiarów inklinometrycznych** przemieszczeń poziomych otoczenia gruntowego kolumny w czasie wykonywania kolumny oraz do 30 dni po tym fakcie. Wszystkie elementy badano w różnych odległościach od kolumny. Określono zasięg deformacji wokół pojedynczej kolumny kamiennej oraz potwierdzono fakt dużej zależności uzyskiwanych wyników od metodyki pomiarowej (CPTU lub DMT).
7. **analizy zmian parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych podłoża** z uwzględnieniem oceny procedury badań oraz anizotropii wynikającej z procesu uformowania kolumny.
8. **badania przestrzennego rozkładu wypiętrzeń** obok wbijanej kolumny kamiennej niezbędne do oceny uwarunkowań wynikających z rodzaju ośrodka gruntowego i procesów technologicznych.

Realizuje przyjęty program badań, a analiza uzyskanych wyników pozwala mu na sformułowanie udokumentowanego opisu zjawisk zachodzących w ośrodku gruntowym w otoczeniu kolumn formowanych w technologii wymiany dynamicznej i przedstawienie istotnych wniosków dla praktyki projektowej i wykonawczej.

3. PODZIAŁ TREŚCI PRACY.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie, cel i zakres pracy. Autor przedstawił tu na podstawie dostępnej literatury, metodę wymiany dynamicznej oraz technologie z których się ona wywodzi, tj. konsolidację dynamiczną oraz kolumny kamienne formowane metodą wibrowymiany.

W rozdziale 2 przedstawiono przegląd i ocenę stanu wiedzy w zakresie przedmiotu pracy. Rozdział ten traktuje o projektowaniu wzmocnienia podłoża kolumnami wymiany dynamicznej. Przytoczono w nim metody wymiarowania kolumn uwzględniające warunki nośności, osiadań i konsolidacji. W rozdziale tym przytoczono również przykłady wybranych analiz numerycznych dotyczących omawianych problemów. W literaturze przedmiotu badań, mimo realizacji w ostatnim okresie w Polsce szeregu dużych inwestycji, obejmujących wielkogabarytowe nasypy budowlane na słabym podłożu, nie znajduje się publikacji dotyczących analizy przestrzennego wpływu efektów zagęszczania kolumn rozporowych i ich roli w kształtowaniu wzrostu parametrów zagęszczenia podłoża jako konstrukcji budowlanej. W pracach tych nie analizowano wpływu dogęszczania warstwy gruntu w otoczeniu kolumny. Cytowane metody wymiarowania kolumn kamiennych zostały opracowane przy założeniu cylindrycznego kształtu kolumny. Nie ujęto w nich, ze względu na nieznaną mechanizm zmiany współczynnika filtracji otoczenia (spada podczas ubijania w następstwie zmniejszenia porowatości czy też powstające w naruszonym gruncie uprzywilejowane drogi przepływu powodują jego wzrost). Brak metody projektowej oddającej specyfikę wymiany dynamicznej skutkuje np. niedoszacowaniem nośności. Taki stan rzeczy jest jednym z powodów, dla którego badania wpływu procesu formowania kolumny na otoczenie gruntowe są istotne z teoretycznego i praktycznego punktu widzenia.

W podsumowaniu Autor wyraźnie stwierdza, że celem jego pracy jest rozpoznanie wpływu procesu formowania kolumny na otoczenie gruntowe. Celem niniejszej pracy nie jest analiza istniejących metod projektowania kolumn kamiennych, z tego względu zostały one tylko wymienione.

Na podstawie wniosków z przeglądu literatury Autor sformułował program własnych badań obejmujący przygotowanie badań doświadczalnych w zmniejszonej skali naturalnej oraz w skali półtechnicznej, który umożliwi ocenę wpływu wykonania kolumny na zagęszczenie otaczającej warstwy gruntu.

W rozdziale 3 zawarto dokładny opis badań modelowych wpływu procesu formowania wbijanej kolumny kamiennej na otoczenie gruntowe w skali geometrycznej 1:10 oraz analizę uzyskanych wyników.

Na uwagę zasługuje opracowana metodyka przygotowania ośrodka gruntowego, dbałość o eliminację wpływu efektu skali oraz wytłumienie drgań powstałych podczas formowania kolumny i przenoszonych przez grunt, tak aby nie występował ewentualny efekt odbicia fali.

Badania zrealizowano w dwóch seriach (układ obciążony oraz nieobciążony). Pierwsza dla układu nieobciążonego druga w którym kolumna była zwieńczona geomateracem a następnie obciążona gruntem modelującym nasyp. Badanymi parametrami były przemieszczenia poziome i pionowe otoczenia gruntowego kolumny (badania 1), zmiany oporów stożka sondy wciskanej oraz zmiany wilgotności (badania 1 i 2). Dodatkowo w badaniu 2 wykonano pomiar osiadań układu obciążonego.

- Przygotowany układ zabezpieczono przed wysychaniem i pozostawiono na 24 h celem wyrównania wilgotności. Po upływie tego czasu kontynuowano prace.
- Kolumny wykonywano z gresu 5 /25 o $\phi=47^\circ$, $c=20$ kPa, przez 36 zrzutów beczko podobnego ubijaka o masie 10,55 kg, średnicy podstawy 9 cm, średnicy maksymalnej 10 cm oraz wysokości 20 cm, zużywając 16,65 kg w badaniu nr 1 oraz 22,80 kg w badaniu nr 2.

- Zrzuty podzielono na trzy serie. Pierwsza z nich (formowanie krateru) składała się ze zrzutów z wysokości 30, 50, 70 cm i 3x85 cm. Druga (zrzuty nr 7-32) to seria zasadnicza, w której ubijak spadał z wysokości 85 cm. Seria ostatnia to dobijanie głowicy kolumny zrzutami z wysokości 85, 50, 30 i 15 cm. Zasypy krateru następowały po zrzutach nr 3, 4, 5, 6, 33, 34, 35, 36 oraz po każdej parze zrzutów w serii zasadniczej. Po poszczególnych zrzutach ubijaka mierzono głębokość krateru.

Występującą tendencję zmniejszania się głębokości krateru z postępowaniem wykonawstwa kolumny powiązano z narastającą sztywnością układu.

W badaniu nr 1:

- Umieszczono inklinometry w dwóch wzajemnie prostopadłych osiach odległych od osi kolumny: 1,00D_k, 1,50D_k, 2,00D_k oraz 1,33D_k, 1,83D_k, 2,33D_k. Wyznaczono punkty pomiaru wypiętrzenia w odległości 0,67D_k, 1,00D_k, 1,33D_k oraz 1,67D_k.
- Wytyczono punkty wykonania sondowań CPT i poboru próbek do badań wilgotności. w dniu formowania kolumny w miejscu jej przyszłej osi, a następnie po 1, 8 i 28 dniach w odległościach: (1,0D_k), (1,4D_k), (2,0D_k) i (2,67D_k) od osi kolumny. Każda kolejna seria sondowań była wykonywana w innej ćwiartce układu. Sondowania wykonywano w sposób ciągły odczytując uzyskany opór co 5 cm. W tak samo oddalonych od kolumny punktach pobierano próbki do badań wilgotności. Pomiar wilgotności wykonano wkręcając w grunt słaby rurę plastikową na głębokość ok. 5 cm a następnie wyciągając ją pobierano próbki materiału który w niej pozostawał. Kolejne próbki pobierano z głębokości o 5 cm większej.
- Wyznaczono miejsce na pobranie próbek do laboratoryjnych testów w edometrze. Grunt pobrano z czterech miejsc w różnych odległościach od kolumny.
- Obciążenie wywołano nadbudowując stanowisko o 50 cm, a następnie nadsypując grunt niespoisty do wnętrza wspomnianej nadbudowy. Zabieg ten miał modelować pracę podłoża wzmocnionego kolumną pod obciążeniem nasypem drogowym.
- Repery do pomiaru osiadań zainstalowano po uformowaniu kolumny umieszczając 5 płytek stalowych (12 x 12 cm) z przyspawanymi prętami. Jedną z nich umieszczono na kolumnie, pozostałe na gruncie słabym. Pręty zabezpieczono rurami z PCV, tak by nie tarły o grunt.
- Geomaterac modelowano przykrywając całość geotkaniną, na której ułożono grys o miąższości ok. 10 cm. W dalszej kolejności geomaterac zasypywano warstwą piasku tak długo aż średnie naprężenie wywołane nadkładem gruntu (geomaterac + piasek średni) wyniosło ok. 8,8 kPa.
- Badania CPT wykonano ręczną sondą wciskaną HANSON 5 z końcówką o powierzchni 10 cm² oraz kącie wierzchołkowym 60°.

Do przyjętej metodyki pomiarów nie zgłaszam zastrzeżeń.

W badaniu nr 2 zmodyfikowano program i zasadnicze różnice dotyczyły:

- rezygnacji z pomiarów wypiętrzeń i pomiarów inklinometrycznych.
- ograniczenia liczby sondowań CPT i próbek do badania wilgotności do jednej serii (nie licząc pomiaru wyjściowego) wykonanej po 28 dniach od uformowania kolumny.
- zwiększono liczbę próbek do badań edometrycznych oraz wprowadzono nowy element w postaci pomiaru osiadań układu, instalując odpowiednie repery.

Uzyskane wyniki przedstawiono na licznych schematach i wykresach dokumentujących występujące zależności. Na ich podstawie autor formułuje wnioski dotyczące:

- wartości pomierzonego największego przemieszczenia poziome tuż przy kolumnie oraz w miarę oddalania się od kolumny malejących wartości przemieszczeń punktów pomiarowych,
- niesymetrycznych wartości pomierzonych wypiętrzeń w rejonie wykonanej kolumny i ich małej wartości.
- uzyskanych wyników pomiaru oporów stożka sondy wciskanej wskazujących, że zasadnicze zmiany (wzrost q_c) będące efektem procesu formowania kolumny i jej pracy jako drenu dotyczą jedynie dwóch punktów pomiarowych leżących najbliżej kolumny.

- przyspieszenie konsolidacji podłoża w wyniku obciążenia. Analiza zmian wilgotności gruntu słabego wykazała, że niezależnie od czasu oraz tego czy obszar był obciążony czy nie, wilgotności w poszczególnych punktach pomiaru pozostawały na podobnym poziomie.
- obserwacji wartości wilgotności odczytanych w jednym dniu w punktach różnie oddalonych od kolumny. Najmniejsze wartości wilgotności pomierzono przy kolumnie, a wraz z oddalaniem się punktów pomiaru od niej mierzone wartości wzrastają. Prawdopodobnie ta była widoczna przy wszystkich wykonanych pomiarach.

Najistotniejsze są ustalenia dotyczące:

- zasięgu wpływu formowania kolumny wbijanej na otoczenie wynoszące nie więcej niż $2,4D_k$ (gdzie D_k - średnica głowicy kolumny).
- występowania największego przemieszczenia poziomego gruntu zalegającego na poziomie $0,71-0,75L_k$.
- rozkładu największych przemieszczeń poziomych, (tuż przy kolumnie max. , w miarę oddalania się od niej wartości malały).
- niesymetryczności wypiętrzenia w rejonie wykonanej kolumny,
- różnic w wartościach wypiętrzeń w dwóch badanych kierunkach, (najmniejsze występowały tuż przy kolumnie, największe w miarę oddalania się od niej).

Ustalenia te są bardzo istotne dla doboru rozstawu kolumn i konieczności powiązania planu rozmieszczenia kolumn z aktualnymi miąższościami warstwy słabej i warstwy przekrywającej (platforma lub warstwa gruntów niespoistych nad warstwą słabą).

Przedstawiono wyniki oporów stożka sondy oraz ich analizę z której wynika, że:

- zasadnicze zmiany przyrostu oporów q_c dotyczą punktów leżących najbliżej kolumny (odległości 15 i 21 cm), czyli $0,9-1,0D_k$ i $1,3-1,4D_k$, dla punktu oddalonego 15 cm w zakresie od 90 do 200 % w stosunku do wartości pierwotnej, w punkcie oddalonym 21 cm wynosił od 20 do 90%. Pomierzony opór stożka w dwóch omówionych punktach wzrasta liniowo wraz z głębokością. Część opisanych zmian wynikała z procesu formowania kolumny, część z jej pracy jako drenu
- poniżej poziomu największych przemieszczeń ($0,71-0,75L_k$) przyrost oporów stożka wynika w największej mierze z procesu formowania kolumny, natomiast powyżej tego poziomu z konsolidacji podłoża (pracy kolumny jako drenu).
- Wyniki badania nr 2 wykazały większe wartości oporu stożka przy powierzchni badanej gliny, czyli obszaru gdzie zmiany mogą wynikać głównie z procesu konsolidacji. Taki wynik wskazuje na fakt przyspieszenia konsolidacji podłoża w wyniku obciążenia.

Interpretacja ta wydaje się właściwa.

Przedstawiono zmiany wilgotności układu kolumna - grunt słaby wykazując, że:

- niezależnie od czasu, wilgotności w poszczególnych punktach pomiarowych pozostawały na podobnym poziomie.
- nie miało też wpływu obciążenie układu w badaniu nr 2. Jego wyniki są identyczne z wynikami testu nr 1, w którym układ konsolidował pod ciężarem własnym.
- różnice uwidaczniają się podczas obserwacji wartości wilgotności odczytanych w jednym dniu w punktach różnie oddalonych od kolumny. Najmniejsze wartości wilgotności pomierzono przy kolumnie, a wraz z oddalaniem się punktów pomiaru od niej mierzone wartości wzrastają. Prawdopodobnie ta jest widoczna przy pomiarach wykonywanych dzień po uformowaniu kolumny oraz w późniejszych testach.

Zdaniem Autora opisane prawidłowości są efektem przepływu wody w kierunku kolumny. Nawet jeżeli wilgotność tuż przy kolumnie spada, woda migrująca z obszarów dalej położonych z powrotem zwiększa jej wartości do poziomu wyjściowego. Interpretacja ta wydaje się właściwa.

Badanie osiadań słabego podłoża oraz kolumny kamiennej zwieńczonych geomateracem pozwoliło ustalić istnienie zmiennej w czasie relacji osiadań kolumny do osiadań jej otoczenia. Początkowo osiadania gruntu słabego są większe, po jego odkształceniu, następuje redystrybucja sił i

obciążeń na kolumnę oraz jej otoczenie. W badanym przypadku osiadania kolumny kamiennej były 2,5 razy mniejsze niż słabego gruntu w jej sąsiedztwie.

W ocenie recenzenta zarówno parametry stanowiska badawczego, zastosowanych modeli, zastosowanej technologii przygotowania podłoża jak i formowania kolumny oraz metodyka pomiarów i sposób przeprowadzenia badań modelowych są poprawne i pomiary te odzwierciedlają zjawiska występujące w technologii wymiany dynamicznej i mogą podstawą oceny jakościowej występujących zjawisk a uzyskane wyniki można traktować jako miarodajne.

W rozdziale 4 Autor omówił problemy zmiany parametrów ośrodka gruntowego wokół kolumny w warunkach badań polowych, w ramach których określano wypiętrzania oraz przemieszczenia poziome gruntu i kształt kolumny. Z wyjątkiem kształtu pozostałe aspekty były badane w różnym czasie od momentu uformowania kolumny oraz w różnych odległościach od niej. Wiele uwagi poświęcił opisom metodyki pomiarowej i interpretacji wyników, w tym metodom do ocen jakościowych i ilościowych zmian parametrów podłoża takim jak badania CPTU i DMT. W rozdziale tym Autor zawiera metodykę i program badań, opis poligonu doświadczalnego. Prace rozpoczęto od wykonania badań geotechnicznych podłoża gruntowego, na podstawie których opracował założenia brzegowe. Na poligonie doświadczalnym rozpoznano dokładnie podłoże gruntowe pobrano reprezentatywne próbki gruntu, które poddano badaniu w laboratorium Katedry Geotechniki i Drogownictwa w Gliwicach. Rozpoznane warunki gruntowo-wodne pozwoliły Autorowi określić zakres programu badań. W rozdziale tym omówił zastosowany materiał oraz badania laboratoryjne materiałów, wybór materiału zasypowego, założenia techniczne i technologię budowy stanowiska badawczego oraz wymagania projektowe, badania in-situ podłoża gruntowego, testy wpływu technologii wymiany dynamicznej na poletku doświadczalnym. Na poziomie zasadniczych badań polowych wykonywano pojedynczą kolumnę za pomocą 10 tonowego ubijaka w mieszanych gruntach pylasto-piaszczystych. W czasie wykonywania kolumny oraz do 30 dni po tym fakcie wykonywano badania zmian parametrów gruntu za pomocą testów CPTU i DMT oraz pomiary inklinometryczne przemieszczeń poziomych otoczenia gruntowego kolumny. Wszystkie elementy badano w różnych odległościach od kolumny.

Poletko nr 1 o wymiarach 14 x 14 m. Głębokość rozpoznania ok. ok. 7,5 m p.p.t. (wiercenie w osi przyszłej kolumny) i 6 m (sondowania CPTU i DMT zlokalizowane 2, 3, 4 i 6 m od tej osi). Podłoże stanowią: do głębokości ok. 1,5 m średnio zagęszczone piaski pylaste i pyły piaszczyste w stanie na pograniczu twaroplastycznego i plastycznego ($q_c=1,5-5,0$ kPa), od 1,5 do 2,5 m p.p.t., to plastyczne i miękkoplastyczne osady pylaste. ($q_c=0,8-4,0$ kPa), do głębokości 4,8m, to plastyczne osady pylaste z większym udziałem luźnych i średnio zagęszczonych gruntów piaszczystych ($q_c=1,1-5,0$ kPa), warstwa podścielająca, to średnio zagęszczone piaski średnie i drobne stanowiące warstwę nośną. ($q_c=4,0-10,7$ kPa). Nawiercone zwierciadło 5,3 m, a ustabilizowane 3,0 m p.p.t. Warstwa I stanowiła platformę roboczą.

Formowanie kolumny: z użyciem sprzętu pozwalającego na zrzut z wysokości do 15 m stalowego ubijaka o masie ok. 10 t i kształcie zbliżonym do „beczki” o wysokości 1,65 m, średnicy w środkowej części 1,0 m i podstawie 0,8 m i mieszaniny (w proporcji 1/1) pospółki i tłucznia 0/200 mm. Orientacyjna objętość zasypów kraterów wynosiła 1,1 lub 2,2 m³ luźnej mieszaniny materiałów. Sumarycznie do ukształtowania kolumny zużyto 20,9 m³ kruszywa. Po każdym zrzucie ubijaka mierzono głębokość powstałego krateru.

- Kolumnę formowano trój etapowo, łącznie 36 zrzutów z różnych wysokości. 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 - 36, w którym stopniowo zmniejszano wysokości spadania ubijaka.

Pomiary

- Podczas formowania kolumny obserwowano spękania oraz wypiętrzania gruntu w sąsiedztwie krateru kolumny.

- Inklinometry na poletku badawczym zainstalowano dwa tygodnie przed datą formowania kolumny, rury inklinometryczne z plastiku ABS o wewnętrznej średnicy 71 mm. Zainstalowano 6 inklinometrów o długości 7,5 m. Inklinometry rozmieszczono w dwóch wzajemnie do siebie prostopadłych osiach w odległościach $0,75, 1,25, 1,75D_k$ oraz $1,0, 1,5, 3,0 D_k$ od osi formowanej kolumny kamiennej. Wykonano pięć serii pomiarów: pierwsza seria przed rozpoczęciem ubijania (jako odniesienie dla pozostałych pomiarów), kolejne po każdym z trzech etapów formowania kolumny oraz ostatnia po 30 dniach od chwili zakończenia ubijania.
- Pomiaru wykonano sondą inklinometryczną pionową S242HV30 Sisgeo z dwuosiowym przetwornikiem akcelerometrycznym i urządzeniem pomiarowym Archimedes Sisgeo. Do ilustracji zmian w gruncie zachodzących w trakcie formowania kolumny przyjęto wyniki obliczeń dla poszczególnych etapów ubijania w formie procentowych przyrostów przemieszczeń inklinometrów na danym etapie formowania w stosunku do wartości końcowych przemieszczeń. Pozwoliło to stwierdzić na jakim etapie występują największe przemieszczenia w danym punkcie. niezależnie od etapu formowania maksymalne przemieszczenia gruntu pomierzono na głębokości $0,55L_k$ (czyli na poziomie największej średnicy kolumny).
- Pomiaru wypiętrzeń dokonywano za pomocą niwelatora po każdym z etapów formowania kolumny po obu stronach kolumny odpowiednio w odległości $1,0, 1,5, 2,0$ i $3,0D_k$. Zaobserwowano wypiętrzanie się terenu wokół kolumny, narastające w kolejnych etapach jej formowania, przy wyraźnej asymetrii samego wypiętrzenia.

Obserwowana asymetria wypiętrzeń na poletku 1 zainspirowała Autora do rozszerzenia badań wypiętrzeń gruntu w większej liczbie osi pomiarowych w celu określenia przebiegu i rozkładu deformacji w otoczeniu pojedynczej kolumny oraz badania dodatkowe uzupełnione analizą zmian w podłożu sąsiadującym z kolumną kamienną za pomocą metody elektrooporowej.

Poletko nr 2 Podłoże do głębokości 2,2 m budują warstwy torfu i gliny pylastej w stanie miękkoplastycznym, natomiast poniżej zalegają piaski średnie z domieszką żwirów o $I_D=0,6$. Wykonane badania trójosiowe (CD) namułu pobranego z głębokości ok. 2,5 m p.p.t. i odległości ok. 2,5 m od osi kolumny wykazały jego wysokie parametry wytrzymałościowe, a mianowicie: $\phi'=13^\circ$, $c'=44\text{kPa}$ oraz S_u w zakresie 85-125 kPa (dla $\tau_c=100-250$ kPa). Wartości edometrycznych modułów ścisłości pierwotnej były natomiast niskie i wynosiły w standardowym badaniu edometrycznym (obc.12,5-400 kPa) od 0,9 do 3,0 MPa.

Formowanie kolumny kamiennej nastąpiło w trzech etapach, wyróżnionych w celu przeprowadzenia pomiarów wypiętrzeń. Podział na etapy był istotnym elementem przyjętej metodologii badań. Ubijak swobodnie spadający (wypinanego) o masie 9 t, w kształcie „beczki” o wysokości 1,8 m, maksymalnej średnicy 1,0 m i średnicy podstawy 0,7 m wykonano z zespawanych płyt stalowych grubości kilku centymetrów. Ubijak składał się ze zespawanych kręgów stalowych o różnej średnicy. Taka budowa ubijaka może powodować, że jego środek ciężkości nie znajduje się idealnie w środku podstawy. Pierwszy zrzut ubijaka wykonano z wysokości 5 m, pozostałe dziewiętnaście z wysokości 10 m. Większa wysokość zrzutu była niedopuszczalna ze względu na bliskość linii kolejowej. Na serię pierwszą i drugą składało się po 7 zrzutów ubijaka, natomiast na serię trzecią 6. Kolumna formowano z mieszaniny piasku i destruktu betonowego o frakcji 0 – 150 mm. W celu uformowania kolumny zużyto $15,4 \text{ m}^3$ luźnego kruszywa. Zakładając, że w trakcie ubijania gęstość kruszywa zmienia się z $\rho_{d \text{ min}}$ na $\rho_{d \text{ max}}$ objętość zagęszczonego kruszywa wprowadzonego w podłoże wyniosła ok. $12,7 \text{ m}^3$.

Pomiary obejmowały:

- Zagłębienia ubijaka po każdym zrzucie oraz oszacowano objętości wykonywanych zasypów. Dokumentacja fotograficzna z badań oraz obserwacje autora wykazują, że jeżeli następował przechył ubijaka, to miał on zawsze ten sam kierunek. Ubijak przechylał się w stronę przeciwną niż pozycja urządzenia dźwigowego. Autor sugeruje że jest to wynik uwarunkowań technologicznych i przedstawia dokumentację potwierdzającą taką tezę wskazując sposób wypinania ze zblocza po naciągnięciu liny z nim związanej lub niesymetryczne położenia środka ciężkości. Takie zblocze było stosowane na poletku nr 2, na

poletku nr 1 ubijak nie był wypinany. Po wykonaniu kolumny pomierzono średnicę jej głowicy, która wyniosła $D_k=2,4$ m.

- Przemieszczeń pionowych i poziomych wykonywano po każdej z trzech serii formowania kolumny. Bazując na wynikach przemieszczeń poziomych (d_H) oraz pionowych (d_V) dokonano ich porównania. Wyniki uzyskane dla punktów charakterystycznych przedstawiono w formie zależności d_V do d_H . Całość badania dokumentowano fotograficznie oraz za pomocą wideo. Pomiar przemieszczeń poziomych wykonano taśmą stalową domierzając się do punktów stałych przygotowanych na początku badania.
- Wypiętrzeń, za pomocą standardowego niwelatora pomierzono poziomy specjalnie przygotowanych znaczników w punktach określonych w programie badań. Punkty pomiarowe rozmieszczono w odległościach od 2 do 6 m od osi kolumny kamiennej w pięciu osiach (21 punktów) oraz między nimi (4 punkty) na połowie poletka, druga połowa była przeznaczona na dojazd ładowarki oraz miejsce odkładania ubijaka między zrzutami..
- Kształtu kolumny kamiennej – pomierzona długość 3,4 m, średnica głowicy 2,4 m, na głębokości 1,3 m wynosiła 1,8 m i malała z głębokością. Jej podstawa sięgała piasków warstwy nośnej. Na podstawie pomiaru kształtu kolumny oszacowano jej objętość na $9,3$ m³.

Bardzo interesująca jest próba zastosowania metoda tomografii elektrooporowej do określenia kształtu kolumny kamiennej. Zmiany w mapach oporności mogą wskazywać na zmiany gęstości gruntów w otoczeniu kolumny.

Kolor czerwony obejmował warstwę platformy roboczej (suchy piasek charakteryzujący się opornością w zakresie 400-950 Ω m). Warstwę gruntów organicznych (oporność ok. 30 Ω m) charakteryzował kolor niebieski, natomiast kolor zielony odzwierciedla nawodnione piaski warstwy nośnej (oporność 100 Ω m). Układ warstw na mapie obrazującej podłoże przed wykonaniem kolumny jest wyraźny, praktycznie poziomy. Oprócz wypiętrzeń terenu mierzono również przemieszczenia poziome punktów charakterystycznych oraz wykonano badanie zmian oporności podłoża po wykonaniu kolumny. Uzyskane rezultaty wskazują na możliwość dalszego rozwoju tej metody w badaniach odbiorczych.

Badania zmian parametrów otoczenia kolumny miały dotyczyć wpływu procesu formowania kolumny kamiennej na podstawowe parametry mechaniczne jej otoczenia. Do testów CPTU oraz DMT wykorzystano sondę statyczną Hyson 200 kN, wykonując do głębokości 6 m testy CPTU oraz DMT w różnych odległościach od kolumny jak i w różnym czasie, tak aby sąsiadujące z nimi punkty nie znajdowały się bliżej niż 0,5 m od siebie. Seria pierwsza obejmowała trzy testy (DMT) w punktach oddalonych o 2, 3 i 6 m od osi kolumny. Kolejne serie obejmowały każdorazowo cztery testy penetracyjne. Lokalizację kolejnych serii badań przesuwno po obwodzie okręgów przechodzących przez poprzednie punkty. Badania przeprowadzono po uformowaniu: 1/3, 2/3 oraz całej kolumny, a następnie po 1, 8 i 30 dniach od momentu wykonania wzmocnienia. Ostatnią serię badań zrealizowano po 34 dniach od dnia uformowania kolumny, po tym jak wykonano jej próbne obciążenie lecz przed odkrywką kolumny. W czasie wykonywania testu DMT co 20 cm rejestrowano dwie charakterystyki ciśnień związane z odkształceniem membrany łopatki dylatometru P0 i P1. W celu identyfikacji parametrów geotechnicznych wykonano normalizację rejestrowanych parametrów do bezwymiarowych wskaźników I_D , K_D oraz E_D . Są to odpowiednio: bezwymiarowy wskaźnik materiałowy, bezwymiarowy wskaźnik naprężenia poziomego oraz moduł dylatometryczny. Zidentyfikowano uziarnienie gruntu oraz wyznaczono następujące parametry geotechniczne: efektywny kąt tarcia wewnętrznego (ϕ'), wytrzymałość na ścinanie w warunkach bez drenażu (S_u), moduł odkształcenia odpowiadający edometrycznemu modułowi ściśliwości (M_0) oraz po zastosowaniu odpowiednich procedur określono wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego (ϕ'), efektywnej spójności (c'), wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez drenażu (S_u), edometrycznego modułu ściśliwości pierwotnej (M_0). Autor dokonał także estymacji współczynnika prekonsolidacji OCR oraz współczynnika parcia spoczynkowego K_0 .

- Statyczne sondowania (CPTU) realizowano piezo-stożkami o następującej geometrii: powierzchnia podstawy stożka 10 cm², powierzchnia tulei ciernej 150 cm², kąt wierzchołkowy stożka

60°, i filtr wbudowany bezpośrednio za ostrzem stożka (wg standardu lokalizacja pomiaru u_2), ze stałą prędkością penetracji, równą 2 cm/s, w sposób ciągły rejestrowano trzy charakterystyki penetracji: opór stożka (q_c), tarcie na tulei ciernej (f_c) oraz nadwyżki ciśnienia wody w porach (u_2). Po standaryzacji charakterystyk penetracji określono skorygowany opór stożka q_t , współczynnik tarcia R_t , parametr ciśnienia porowego B_q oraz znormalizowany, efektywny opór stożka Q_t . Do określenia rodzaju i parametrów stanu gruntów zastosował odpowiednie procedury i systemy klasyfikacyjne szeroko opisane w pracy wykorzystując dorobek Katedry Geotechniki Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

W ocenie recenzenta zarówno przyjęte parametry stanowisk badawczych, zastosowanych ubijaków, metodyka formowania kolumn jak i zastosowana metodyka określenia parametrów geotechnicznych podłoża, technologii przygotowania stanowiska jak i metodyka pomiarów oraz badań kontrolnych są poprawne i odzwierciedlają zjawiska występujące w technologii wymiany dynamicznej. Uzyskane wyniki mogą być podstawą oceny jakościowej i ilościowej występujących zjawisk i zależności, a formułowane wnioski można traktować jako uzasadnione. Opracowany i zrealizowany program badań oceniam bardzo wysoko.

Rozdział 5 to podsumowanie zawierające analizę końcową, wnioski geotechniczne dotyczące zmian stanu gruntów w otoczeniu kolumny, zalecenia praktyczne i kierunki dalszych badań, nowe zagadnienia przedstawione w pracy i propozycje dalszych badań.

Niezależnie od szeregu wniosków szczegółowych, przytoczonych w podsumowaniu badań laboratoryjnych i polowych Autor formułuje wnioski natury ogólniejszej dotyczące efektu formowania kolumny w technologii wymiany dynamicznej (DR) którymi są przemieszczenia poziome i pionowe otaczającego gruntu, zmiany jego parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych a także wilgotności, wodoprzepuszczalności i współczynnika K_0 oraz OCR.

Eksponuje ustalenia dotyczące zasięgu zmian w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej formowanej w warunkach in situ oraz w warunkach laboratoryjnych jako mniejszy niż $2,5D_k$, oraz przyczyny losowych oraz technologicznych asymetrii pola deformacji otoczenia kolumny DR oraz zjawisk występujących w czasie formowania kolumny wymiany dynamicznej w otaczającym ją gruncie gdy następuje zniszczenie struktury, w następstwie czego ma miejsce spadek parametrów mechanicznych gruntu, a po uformowaniu kolumny DR odbudowie struktury gruntu w jej sąsiedztwie i zwiększeniu parametrów gruntu.

Podkreśla także, że zmiany w otoczeniu kolumny mają charakter kierunkowy oraz że badania dylatometryczne lepiej niż sondowania statyczne oddają kierunkową specyfikę wzmocnienia podłoża kolumnami kamiennymi.

Na końcu pracy zamieszczono wykaz wykorzystanej literatury norm i instrukcji oraz streszczenia.

4. ANALIZA TREŚCI ROZPRAWY

Recenzowana praca mgr inż. Piotra Kantego dotyczy oceny deformacji w ośrodku uwarstwionym składającym się w części górnej z warstwy gruntów niespoistych oraz w części środkowej warstwy słabego gruntu niespoistego (badania modelowe i poletko nr 1 lub spoistego (poletko nr 2) podścielonego warstwą gruntu niespoistego nośnego. Podłoże to charakteryzuje się określoną wilgotnością co dodatkowo komplikuje model pracy ośrodka gruntowego. Stanowi to typowy układ platforma robocza (1), grunt słaby (2) oraz warstwa nośna (3) dla podłoża słabego poddawanego zabiegom uzdatniającym podłoże do celów posadwienia obiektów drogowych, placów składowych, wielkowymiarowych fundamentów powierzchniowych metodą wymiany dynamicznej. Układ ten w przypadku występowania wystarczająco grubej niespoistej warstwy nośnej przy powierzchni terenu oraz poziomu ZWG poniżej - 0,5 m ppt. może nie wymagać tworzenia dodatkowej warstwy platformy roboczej (1). Badania te pozwoliły zgromadzić Autorowi wysokiej jakości materiał badawczy. Do badań i symulacji modelowych wybrał grunty uwarstwione z warstwą słabą. Zakres pracy obejmuje badania laboratoryjne wykonane w laboratorium Katedry Geotechniki i

Drogownictwa Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej i badania terenowe na poletkach badawczych. Zebrane informacje posłużyły do ustalenia głównych parametrów zbadanego prototypu podłoża oraz typowej technologii wykonania robót.

Zakres badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych ograniczono do rozpoznania wpływu pracy kolumny wbijanej. Uzyskane wyniki badań polowych wskazują na bardzo dużą złożoność procesów zachodzących w podłożu w trakcie i po uformowaniu kolumny. Określono, że zasięg deformacji wokół pojedynczej kolumny kamiennej jest większy niż ich standardowo używany w projektowaniu rozstaw. Wyniki badań zmian parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych podłoża są różne w zależności od zastosowanej metody (CPTU lub DMT).

Różnice w wynikach mogą mieć związek z procedurą badań lub wskazywać na anizotropię wynikającą z uformowania kolumny. Na bazie otrzymanych wyników można domniemywać, że w projektowaniu kolumn kamiennych występuje duże niedoszacowanie nośności układu kolumna - grunt słaby. Wynika ono z nie uwzględnienia deformacji podłoża oraz anizotropowych zmian w otoczeniu kolumny.

Wyniki badań polowych wykazują na spadek parametrów mechanicznych otoczenia wbijanej kolumny kamiennej w czasie jej formowania, a następnie ich wzrost w czasie. Sugeruje to przeprowadzanie badań odbiorczych kolumn DR w możliwie długim czasie od ich uformowania.

Dodatkowe badania polowe wykonano aby określić przestrzenny rozkład wypiętrzeń obok wbijanej kolumny kamiennej. Wyniki tych badań i ich analiza pozwoliły określić uwarunkowania technologiczne mogące wpływać na obserwowane zmiany poziomu ośrodka gruntowego. Obserwowane zmiany w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej były inne w warunkach laboratoryjnych i warunkach polowych. Pomimo stosowania w laboratorium energii ubijania 10000 razy mniejszej niż w warunkach polowych odnotowano obok uformowanej kolumny znaczący wzrost parametrów sondowania CPT, który nie był dostrzegalny in situ. Autor wiąże to z różną charakterystyką podłoża w badaniach modelowych (makroporowate, nawodnione gliny) oraz polowych (pyły w stanie niepełnego nasycenia przewarstwione piaskami). Na poziomie zasadniczych badań polowych wykonywano pojedynczą kolumnę za pomocą 10 tonowego ubijaka w mieszanych gruntach pylasto-piaszczystych. W czasie wykonywania kolumny oraz do 30 dni po tym fakcie wykonywano badania zmian parametrów gruntu za pomocą testów CPTU i DMT oraz pomiary inklinometryczne przemieszczeń poziomych otoczenia gruntowego kolumny. Wszystkie elementy badano w różnych odległościach od kolumny.

Uzyskane wyniki badań polowych wskazują na bardzo dużą złożoność procesów zachodzących w podłożu w trakcie i po uformowaniu kolumny. Określono, że zasięg deformacji wokół pojedynczej kolumny kamiennej jest większy niż ich standardowo używany w projektowaniu rozstaw.

Wyniki badań zmian parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych podłoża są różne w zależności od zastosowanej metody (CPTU lub DMT). Różnice w wynikach mogą mieć związek z procedurą badań lub wskazywać na anizotropię wynikającą z uformowania kolumny. Na bazie otrzymanych wyników można domniemywać, że w projektowaniu kolumn kamiennych występuje duże niedoszacowanie nośności układu kolumna - grunt słaby. Wynika ono z nie uwzględnienia deformacji podłoża oraz anizotropowych zmian w otoczeniu kolumny. Wyniki badań polowych wykazują na spadek parametrów mechanicznych otoczenia wbijanej kolumny kamiennej w czasie jej formowania, a następnie ich wzrost w czasie. Sugeruje to przeprowadzanie badań odbiorczych kolumn DR w możliwie długim czasie od ich uformowania. Dodatkowe badania przestrzennego rozkładu wypiętrzeń obok wbijanej kolumny kamiennej pozwoliły określić uwarunkowania technologiczne mogące wpływać na obserwowane zmiany poziomu powierzchni podłoża. Wyniki badań na poletku nr 1 odzwierciedlają zmiany zachodzące w uwarstwowionym podłożu pylasto-piaszczystym po wykonaniu kolumny kamiennej o średnicy głowicy (D_k) równej 2 m. Deformacje poziome i pionowe gruntu w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej świadczą o asymetrii zmian zachodzących w otoczeniu kolumny. Maksymalne wielkości deformacji wynosiły dla przemieszczeń poziomych 17 cm ($1,25D_k$ od osi kolumny) a dla wypiętrzeń 30 cm ($1,0D_k$ od osi kolumny).

W przypadku badań inklinometrycznych przemieszczenia poziome punktów oddalonych od kolumny o mniej niż $1,75D_k$ miały inny charakter niż punktów znajdujących się w większej odległości od osi układu. Inklinometry położone blisko kolumny wykazały największą deformację na głębokości $0,55L_k$, natomiast inklinometry zainstalowane dalej najbardziej przemieszczały się przy powierzchni terenu.

Zaobserwowano, że przemieszczenia poziome narastają w różnym stopniu w kolejnych etapach formowania kolumny na poszczególnych wysokościach badania. Po pierwszym etapie ubijania na poziomie górnej części kolumny wartości przemieszczeń stanowiły 50 % wartości całkowitych. W etapie drugim taki przyrost (50%) przemieszczeń pomierzono na poziomie dolnej części kolumny.

Zasięg oddziaływania kolumny oceniany na bazie przemieszczeń poziomych i pionowych oszacowano na $3,0D_k$. Pomierzone za pomocą inklinometrów przemieszczenia poziome korespondują z kształtem kolumny kamiennej oraz układem warstw podłoża. Największe przemieszczenia pomierzono w miejscu występowania najłagodniejszej warstwy gruntu (II), w której kolumna charakteryzowała się największą średnicą. Autor formułuje bardzo istotny wniosek, że te trzy elementy:

- największe przemieszczenia poziome,
- najłagodniejsza warstw,
- największa średnica kolumny

są ze sobą ściśle związane. Związek ten powinien być brany pod uwagę przy próbach predykcji kształtu wbijanej kolumny kamiennej lub przemieszczeń jej sąsiedztwa.

Obszerna analiza parametru sondowania CPTU w postaci oporu stożka q_c pozwoliła Autorowi na selekcję wyników i zawężenie rozważań do warstwy II i III podłoża. Zawężenie to dotyczy wyników z sondowań CPTU oraz badania DMT. Najistotniejszym spostrzeżeniem na poziomie analizy ogólnej jest obserwacja, że różnice w parametrach sondowania DMT w pierwszej i ostatniej serii są bardziej wyraźne niż w przypadku badań CPTU. Przekłada się na zmiany wartości parametrów geotechnicznych ϕ', c', S_u i M_0 . W badaniach CPTU stwierdzono, że formowanie kolumny powoduje wyrównanie parametrów podłoża. Parametry geotechniczne warstwy najłagodniejszej (II) wzrosły, natomiast warstwy mocniejszej (III) zmniejszyły się. Największe zmiany obserwowano w punktach blisko kolumny, najmniejsze w punktach najdalszych. W przypadku wyników z DMT w większości badanych punktów warstwy III uwidoczniło się jej wyraźne wzmocnienie. Największe co do wartości zmiany nastąpiły najdalej od kolumny, najmniejsze tuż przy niej.

W badaniu CPTU warstwy II wzrost kąta tarcia wewnętrznego wynosił do 35 % wartości początkowej, w warstwie III zmiany nie przekraczały 7%. W badaniu DMT największa zmiana kąta tarcia wewnętrznego warstwy III wyniosła 18% wartości początkowej ϕ' . Uzyskane z testu DMT wyniki są inne od otrzymanych z badania CPTU co do wartości. Dla DMT uzyskano większy wzrost ϕ' , co więcej należy podkreślić że wyjściowe wartości tego parametru określone z badania DMT (33°) były znacząco wyższe od uzyskanych z CPTU (27°).

Porównując wyniki analizy M_0 z DMT z wynikami analizy wartości M_0 określonych z CPTU Autor stwierdza, że rezultaty również się różnią. Wielkości edometrycznego modułu ścisłości określone na bazie testu DMT oraz CPTU wykazały brak zmian tego parametru w warstwie II w punktach oddalonych od kolumny o 4 i 6 m. Natomiast w punkcie najbliższym kolumnie wartości M_0 określone z CPTU wskazywały znaczący wzrost (160%) po 30 dniach od uformowania kolumny, który nie był zauważalny w wynikach badania DMT. Początkowa wartość $M_0=8$ MPa określona na bazie obu testów jest taka sama. Większe różnice zaobserwowano w warstwie III. W badaniu CPTU zaobserwowano złożone zmiany zarówno w postaci wzrostów (o 20%) jak i spadków (o 40%) wartości M_0 . W wynikach z badania DMT wzrost wartości modułów jest ewidentny i wynosi do 250%.

Przedstawione rezultaty mają bardzo duże znaczenie dla badań odbiorczych wzmocnienia podłoża metodą wymiany dynamicznej i mogą pomóc w wyjaśnianiu częste sporów i nieporozumień związanych z odbiorem jakościowym wykonanych robót.

Interesująca jest przeprowadzona przez Autora dyskusja uzyskanych rezultatów mająca duże znaczenie praktyczne dla wykonawców badań odbiorczych podłoża uzdatnianego w technologii

wymiany dynamicznej. Wiąże ona różnice w wynikach ze specyfiką wymiany dynamicznej oraz badań CPTU i DMT. Autor przyjmuje, że deformacje, a więc zmiana gęstości gruntu w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej są największe wzdłuż promieni kolumny. Podczas penetracji dylatometru w podłoże membrana łopatkki urządzenia była ustawiana w kierunku kolumny, tak aby badać grunt w kierunku największego wzmocnienia. Tak wykonane badanie daje możliwość określenia cech w wybranym kierunku anizotropowego ośrodka. Badanie CPTU nie jest badaniem kierunkowym, tak więc charakteryzuje grunt jako ośrodek izotropowy w badanym punkcie. Specyfiką badania CPTU jest to, że kierunek wprowadzania w podłoże stożka sondy wiąże rejestrowane parametry penetracji ze składową pionową stanu naprężenie. W przypadku badania DMT jest inaczej, kierunek mierzonych przez membranę łopatkki ciśnień związany jest z poziomą składową naprężenia geostatycznego. Na istnienie anizotropii w podłożu mogą wskazywać analizy zmian M_0 w czasie. Wyjściowo dla warstwy III edometryczny moduł ściśliwości pierwotnej określony na bazie CPTU była taki sam jak wyznaczony na bazie DMT. Po wykonaniu kolumny wartość M_0 z CPTU zmienił się o kilkanaście procent (in plus oraz in minus), natomiast M_0 określone na bazie testu DMT wykazywało ewidentny wzrost o max 250%.

Autor sugeruje, że wzrost parametrów warstwy II w badaniu CPTU jest związany ze stanem odkształcenia podłoża, natomiast znaczący wzrost parametrów w warstwie III badanej za pomocą DMT ma związek ze stanem naprężenia. Stwierdza związek zmian wartości OCR oraz K_0 z procesem formowania kolumny kamiennej. Proces formowania kolumny wpłynął na zmianę parametrów ujawniającą się na różnych etapach badań. Ogólnie zaobserwowano wzrost OCR oraz K_0 o kilkanaście procent, co z inżynierskiego punktu widzenia jest zmianą mało istotną.

Autor we wszystkich przeprowadzonych badaniach stwierdza, że w wyniku formowania kolumny w jej otoczeniu następuje zniszczenie struktury gruntu (a więc spadek jego parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych). Następnie struktura ulega przebudowie, a parametry wzrastają, osiągając z reguły wielkości zbliżone do początkowych. Lokalnie zanotowano ich wzrosty względem pierwotnych. Zmiany były niestabilne w analizowanym czasie badań i zależne od odległości od kolumny. Określony zasięg zmian ($3,0D_k$) jest większy od standardowo stosowanego w projektowaniu rozstawu kolumny wynoszącego $1,5 - 2,0D_k$. Należy podkreślić, że badanie było wykonane dla kolumny pojedynczej która po uformowaniu nie została obciążona nasypem ani fundamentem, a czas testów wynosił 30 dni.

Wyniki z poletka nr 1 pozwalają przyjąć tezę, że parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe gruntu otaczającego kolumnę w kierunku pionowym są zbliżone do pierwotnych (badanie CPTU), natomiast w kierunku poziomym są wyższe (badania DMT). Pomierzone wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu w otoczeniu wbijanej kolumny wykazują spadki na etapie formowania, a następnie wzrosty do wartości początkowej lub większej. Wynik ten może stanowić zalecenie do wykonywania badań odbiorczych metodą DR, które zdaniem Autora powinny być realizowane w możliwie odległym czasie od uformowania kolumny sugeruje tu minimalny czas 14 dni po uformowaniu kolumny.

Zdaniem recenzenta czas taki można stosować gdy w podłożu występują warstwy słabych gruntów mało spoiwych (piaski pylaste, pyły, gliny piaszczyste, namuły pylaste i piaszczyste z domieszkami części organicznych). Doświadczenia Autora recenzji z badaniami odbiorczymi kolumn formowanych metodami dynamicznymi w gruntach deltowych, spoiwych z dużą zawartością części organicznych (warunki Żuławskie) wskazuje, że badań takich sondami DMT i CPTU nie należy wykonywać prędzej niż 14 dni od wykonania ostatniej kolumny w bezpośrednim sąsiedztwie projektowanego badania przy przyjęciu bezpiecznej strefy oddziaływań tj. ok. 5 średnic D_k .

Kształt wykonanej kolumny kamiennej na poletku nr 2 nie korespondował z przewidywanym. Kolumna charakteryzowała się maksymalną średnicą na poziomie głowicy (góry platformy roboczej), która zmniejszała się z głębokością. Średnica głowicy kolumny wynosiła $D_k=2,4$ m. Nie zaobserwowano wzrostu średnicy kolumny na poziomie gruntów organicznych, co może to mieć związek z wysokimi parametrami wytrzymałościowymi namułu lub/i sposobem formowania platformy (słabo dogęszczony suchy piasek).

Podczas wykonanych badań największe wypiętrzenia zaobserwowano w osi biegnącej tuż obok miejsca usytuowania urządzenia dźwigowego. Według autora może to być związane z faktem przechylania się ubijaka uderzającego o podłoże oraz miejscem postoju urządzenia dźwigowego. Pierwszy czynnik wydaje się być bardziej istotny. Przechylenie się ubijaka może być związane ze sposobem wypięcia ze zbocza bądź też jego asymetrycznym kształtem. Przechylony ubijak uderzając o podłoże powoduje większe wypiętrzenia w kierunku przeciwnym do kierunku jego przechylenia. W dodatku maszyna ważąca ponad 40 ton może blokować wypiętrzenia w miejscu w którym stoi, przez co wyraźniej występują one w rejonie obok niej. Pomierzone wypiętrzenia zmniejszają się stopniowo w kierunku przeciwnym do miejsca usytuowania maszyny. Asymetria wypiętrzenia jest widoczna od początku formowania kolumny aż do końca tego procesu. Najbardziej widoczne jest to w punktach położonych najbliżej kolumny. Podobne wartości wypiętrzeń w poszczególnych osiach występują dopiero w odległości większej niż $2,0D_k$ od kolumny. Oprócz czynników technologicznych warunkujących asymetrię wypiętrzeń można przypuszczać, że mniejszy wpływ na to zjawisko może też mieć czynnik losowy lub też nierównomierny sposób zasypu krateru.

Różnice w pomierzonych wartościach d_v między osią o największych i najmniejszych wypiętrzeniach są prawie trzykrotne. Zasięg wypiętrzeń oceniono na $(2,5D_k)$, co pokrywa się z obserwacjami poczynionymi na poletku nr 1. Przyrost wypiętrzeń dla punktów leżących blisko kolumny $0,83-1,25D_k$ jest największy w pierwszym etapie formowania, w etapach kolejnych jest co raz mniejszy. W punktach oddalonych o $1,67-2,08D_k$ od kolumny wypiętrzenia zaczynają się uwidaczniać później, tj. w drugim lub trzecim etapie formowania kolumny.

Autor sugeruje, że w pierwszej kolejności wzrasta sztywność bezpośredniego sąsiedztwa kolumny, a dopiero po osiągnięciu pewnego poziomu deformacje transferowane są na dalej odległe punkty.

Autor stwierdza, że mierzone wartości na poletku nr 2 wykazywały dużą asymetrię, co warunkuje czynnikami technologicznymi. Charakter zmian wraz z oddalaniem się od kolumny pozostaje taki sam, natomiast ich przestrzenny rozkład wokół kolumny jest złożony.

Zasięg przemieszczeń $(2,5D_k)$ jest większy od przyjmowanego w projektowaniu rozstawu kolumny $(1,5-2,0D_k)$. Oznacza to, że standardowo kolumna wykonywana w sąsiedztwie innej uformowanej wcześniej jest wtlaczana w zdeformowane podłoże o zupełnie innej charakterystyce niż pierwotnie. Spostrzeżenie to koresponduje z zaobserwowanym na poletku nr 1, gdzie zasięg przemieszczeń osiąga $(3,0D_k)$.

Odnośnie wyciągniętych wniosków dotyczących wpływu technologii dla warunków poletek próbnych, zastosowanych sposobów formowania kolumny i przeprowadzonych badań nie mam zastrzeżeń. Jednak sformułowanie wniosków ogólnych w tym przypadku jest znacznie bardziej złożone i przedstawione wnioski należy traktować informacyjnie. Zasięg wypiętrzeń w dużym stopniu zależy też od materiału i sztywności platformy roboczej. Wymaga to jednak dalszych badań.

Wyniki uzyskane po uformowaniu kolumny w osiach 1-4 pozwalają zauważyć, że wartości wypiętrzeń (d_v) pomierzonych w osiach 1 i 2 różnią się do wyników pomiarów w osiach 3 i 4. Różnica między maksymalnymi wypiętrzeniami w osi 1 i 2 oraz osi nr 4 jest prawie trzykrotna. Największą wartość wypiętrzenia zanotowano w osi 4 leżącej najbliżej urządzenia dźwigowego. Wyniosła ona 41,3 cm. Maksymalna wartość wypiętrzeń w osi nr 1 i nr 2 wyniosła 14,8 cm. Charakter wypiętrzeń był we wszystkich osiach podobny. Największe wypiętrzenia zanotowano najbliżej kolumny. W odległości 6 m od osi kolumny $(2,5D_k)$ pomierzone wartości d_v były bliskie zeru. Na bazie tego wyniku można określić zasięg wpływu formowania kolumny, wynosił ok. 6 m $(2,5D_k)$. Obserwacja ta jest zgodna z wynikami badań wypiętrzeń oraz badań inklinometrycznych przeprowadzonych na poletku nr 1.

Dla potrzeb przeprowadzenia ogólnej analizy zmian na poszczególnych etapach formowania kolumny pokazano średnie wyniki z pomiarów wszystkich punktów w zależności od odległości od kolumny, zauważono, że zanik wypiętrzeń wraz z odległością od osi kolumny ma taki sam charakter po każdym etapie jej formowania. Wypiętrzenia mają znaczące wartości tuż przy kraterze, następnie maleją wraz z oddalaniem się od osi kolumny. Największy spadek wypiętrzeń pomierzono między 3 a

4 metrem od osi krateru (1,25 i 1,67D_k). Zauważono, że w odległości ok. 3,5m od osi kolumny (1,45D_k) wypiętrzenia osiągają wartość ok. 50% wypiętrzeń w mających miejsce w odległości 2 m od osi kolumny (0,83D_k). Spozrzenie to dotyczy wszystkich etapów formowania kolumny. Średnia wartość wypiętrzenia w punktach pomiarowych oddalonych 2 m od osi kolumny (tj. 0,7 m od jej brzegu) wynosi po uformowaniu kolumny 24 cm. Stanowi to ponad 13 % miąższości platformy roboczej.

Obserwacja zmiany położenia punktów pomiarowych w czasie formowania kolumny obejmuje punkty pomiarowe leżące na osiach 1-4 oraz punkty leżące między nimi. Przedstawiono wyniki pomiarów dla każdej serii pomiarowej (1/3 i 2/3 formowania kolumny oraz po zakończeniu tego procesu). Taka prezentacja wyników pozwala potwierdzić słuszność spostrzeżenia przedstawionego wcześniej a mianowicie, że na każdym etapie ubijania charakter zmian jest podobny. Punkty leżące między osiami pomiarowymi wykazują wypiętrzenia o wartościach pośrednich względem wartości odczytanych z najbliższych osi. Wskazuje to na trend w zmianach pomierzonych wypiętrzeń w zależności od usytuowania punktu pomiarowego. Można zauważyć, że wypiętrzenia które są największe w osi 4 zmniejszają się kolejno w osiach 3, 2 i 1 oraz punktach między nimi. Zmniejszenie wartości wypiętrzeń zanotowano także po drugiej stronie osi nr 4. Mniejsze wypiętrzenia niż w osi 4 odnotowano w pkt. 22 oraz punktach osi nr 5 (pomiar niepełny). Wartości uzyskanych wypiętrzeń zwiększają się na kolejnych etapach formowania kolumny. W dalszej części pracy przedstawiono procentowe udziały wypiętrzeń z poszczególnych etapów formowania kolumny w wypiętrzeniach całkowitych. Wykonano to dla punktów leżących na osi o najmniejszych wypiętrzeniach (nr 1) oraz o wypiętrzeniach największych (nr 4). Wyniki uzyskane w punktach leżących na osi 1 wskazują, że po pierwszym etapie formowania kolumny wypiętrzenie następuje tylko w trzech punktach położonych najbliżej kolumny. Jego udział procentowy w wypiętrzeniach całkowitych wynosi od 41 do 31% z tendencją zmniejszającą w miarę oddalania się od kolumny. Etap drugi ubijania spowodował wypiętrzenia których udział w całkowitych wynosi od 44 do 20% (pomijając pkt. leżący 2,08D_k od osi kolumny). Charakter zmian wypiętrzeń na tych etapach formowania kolumny wskazuje na mniejszy ich udział w stosunku do całkowitych dla punktów leżących dalej od kolumny. Odwrotną zależność można zauważyć w wynikach uzyskanych po trzecim etapie ubijania kolumny. Udział wypiętrzeń z tego etapu w całkowitych jest tym większy im punkt leży dalej od kolumny. Wynosi on (patrzac od kolumny) od 16 do 80%. Interpretacja wyników może prowadzić do wniosku, że pierwsze dwa etapy formowania kolumny powodują największe zmiany tuż przy kolumnie, natomiast etap trzeci w punktach najbardziej od niej oddalonych. Wyniki uzyskane w punktach położonych na osi 4 wykazują podobny charakter zmian co przedstawiony powyżej dla 1/3 formowania kolumny oraz po zakończeniu tego procesu. Wartości udziału wypiętrzeń w całkowitych wynoszą po 1/3 formowania od 63 do 24%. Po zakończeniu formowania kolumny udział ten wynosi od 10 do 50%. Różnica dla wyników uzyskanych w obu osiach jest widoczna w drugim etapie ubijania. W osi nr 4 procentowe udziały wypiętrzeń z tego etapu w wypiętrzeniach całkowitych wzrastają w miarę oddalania się punktu pomiarowego od kolumny i wynoszą od 27 do 50% (pomijając pkt. 1,67D_k od kolumny). Analiza danych uwidacznia fakt, że w punktach położonych blisko kolumny (0,83 – 1,25D_k) spadek udziału wypiętrzeń z poszczególnych etapów w całkowitych zmniejsza się liniowo - od ok. 60% na etapie 1/3 przez 30% w etapie 2/3 do 10% po wykonaniu kolumny.

W przypadku badania na poletku nr 2 sumaryczna objętość wypartego gruntu oszacowana na podstawie pomierzonych wypiętrzeń wyniosła 9,7 m³. Jest to wartość zbliżona to oszacowanej, na bazie odkrywki, objętości kolumny wynoszącej 9,3 m³ oraz niewiele mniejsza od objętości kruszywa wprowadzonego do krateru równej ok. 12,7 m³. Różnica w objętości kruszywa wsypanego do krateru oraz objętości kolumny może wynikać z asymetrii kształtu samej kolumny. Jej kształt był określany podczas odkrywki tylko w jednej płaszczyźnie. Niemniej jednak niezależnie którą wartość uznać za realną objętość kolumny, ilość gruntu wypiętrzonego jest do niej zbliżona. Według autora ma to związek z obecnością silnie odkształcalnych gruntów organicznych przykrytych niedostatecznie dogęszczoną platformą roboczą. Taki sposób przygotowania platformy skutkować mógł brakiem sztywności tej warstwy i zwiększonymi wypiętrzeniami.

Badania wykonane przez autora wyróżniają się na tle innych, znanych z literatury testów. Można uznać, że mają one charakter pionierski. Specyfika wymiany dynamicznej skutkuje dużymi deformacjami podłoża w otoczeniu kolumny oraz zmianami jego właściwości. Zmian zachodzących w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej nie uwzględnia żadna z istniejących metod ich wymiarowania. Jest to zapewne związane z trudnością opisu skomplikowanych procesów mających miejsce w czasie wykonywania kolumny jak i po jego zakończeniu.

Przeprowadzenie dowodu przyjętej tezy pracy, że w przypadku wykonawstwa kolumn kamiennych metodą wymiany dynamicznej występuje w jej otoczeniu strefa o określonej średnicy, zależna od rodzaju ośrodka i technologii wykonania oraz parametrów sprzętu zagęszczającego, wymagało:

- wykonania badań właściwości fizykomechanicznych ośrodka gruntowego,
- wybrania odpowiedniego kruszywa i zaprojektowania grubości pojedynczej warstwy formowanej kolumny,
- opracowania optymalnej technologii zagęszczania w zakresie technicznym i czasu realizacji prac ziemnych,
- przeprowadzenia badań kontrolnych i odbiorowych w warunkach *in situ* jakości oddziaływania metodami pośrednimi i bezpośrednimi.
- opracowania na podstawie wykonanych badań i analiz wniosków geotechnicznych dokumentujących stwierdzenia o istnieniu:
 - istotnego geotechnicznie wpływu wykonawstwa kolumny kamiennej ubijanej na zmiany stanu gruntu słabego w otoczeniu kolumny,
 - wyraźnego geotechnicznie wpływu dogęszczania kolejnymi kolumnami i zmiany parametrów mechanicznych warstwy otaczającej, przy czym efekty oddziaływania warstwy są bardziej złożone i pokrywają się z efektami kolumny pierwszej,
 - wystarczającej bazy danych z badań weryfikacyjnych stanu zagęszczenia podłoża, z których powinno wynikać, że przy omawianej technologii uzyskuje się prawidłowe i równomierne zmiany stanu ośrodka gruntowego.

Powyższe wnioski geotechniczne potwierdzają przyjętą w pracy tezę, że możliwe jest osiągnięcie docelowych zaprojektowanych parametrów mechanicznych wzmacnianego podłoża przy właściwie dokonanym rozpoznaniu parametrów gruntu i warunków brzegowych dokonywanego wzmocnienia. Służyć temu mogą odpowiednio przeprowadzone badania na poletku próbnym. W świetle przedstawionych w pracy wyników pomiarów oraz analiz przedstawione rekomendacje należy przyjąć jako zadawalające.

Zweryfikowaną w pracy doktorskiej technologię wymiany dynamicznej można zaliczyć do nowych technologii uzdatnienia podłoża wystarczająco rozpoznanych do celów budowlanych. Wyniki badań Autora upoważniają do rekomendowania tej technologii w następujących przypadkach:

- posadawiania nasypów w budownictwie przemysłowym, gdzie czas realizacji i tempo realizacji robót ziemnych jest głównym kryterium optymalizacji procesu inwestycyjnego,
- do wzmocnienia podłoża drogowych nasypów budowlanych

Nowymi zagadnieniami geotechnicznymi zbadanymi i przedstawionymi w pracy są:

- wyniki wpływu formowania kolumny na zmiany stanu gruntu otaczającego,
- zmiany wartości liczbowych parametrów mechanicznych modułów statycznych i wskaźnika odkształcenia warstwy słabej,
- wyznaczenie wartości liczbowych osiąganych modułów statycznych i ich zmiany z odległością od kolumny.

5. UWAGI KRYTYCZNE

Nie znalazłem w pracy mgr inż. **Piotra Kantego** uchybień o charakterze merytorycznym. Praca jest starannie wykonana i bardzo wyważona w prezentacji wyników w formie bardzo licznych wykresów, których jakość jest bardzo dobra. Podstawowe uwagi krytyczne są następujące:

- mało uwagi Autor poświęcił parametrom ośrodka gruntowego i jego charakterystykom mogącym mieć wpływ na uzyskiwane parametry dogęszczania się warstw podścielających, dopiero w rozdziale 5 są wymienione możliwe parametry mogące istotnie wpływać na uzyskiwane rezultaty bez analizy istotności ich wpływu. Jedynym pocieszeniem jest tu stwierdzenie, że powinny być przedmiotem przyszłych badań.
- W badaniach terenowych Autor poprzez przyjętą procedurę zakłada eliminację wpływu niejednorodności ośrodka gruntowego na uzyskiwane wyniki. Ostatecznie dla oceny skuteczności wpływu formowanej kolumny kamiennej na zagęszczenie otaczającego osrodka gruntowego przyjmuje jako miarę wyniki uzyskiwane z badań CPTU i DMT. Tak przyjęte założenie zawsze budzi kontrowersje nawet w warunkach modelowych.
- Brak mi szacunku możliwych błędów uzyskiwanych przy zastosowaniu badania DMT CPTU w badaniach kontrolnych. Brak w pracy próby opracowania statystycznego wyników przeprowadzonych badań i dyskusji tego problemu, obniża to wartość wyciągniętych wniosków oraz możliwość dokonywania dalszych uogólnień. Wyraźnie brak miary osiągniętych rezultatów, w tym dla poszczególnych grup pomiarów:
 - ustalenia minimalnej liczebności próby- n_{min} ,
 - zbadanie struktury zbiorowości (obliczenia wartości średniej, wariancji i odchylenia standardowego),
 - ustalenie przedziałów ufności dla wartości średnich,
 - przeprowadzenie testów istotności dla otrzymanych wartości średnich,
 - wykonanie testów dla współczynników korelacji – r.

Dotyczy to w szczególności wyników uzyskiwane z badania CPTU i DMT oraz badań wilgotności z odwiertów. Braki te w znacznym stopniu utrudniają wykorzystanie wyników tych badań do budowy ewentualnych zależności korelacyjnych mogących ułatwić projektowanie konsolidacji dynamicznej. Drobne usterki, pozwoliłem sobie zaznaczyć w tekście i przekażę bezpośrednio Autorowi, gdyż nie mają znaczenia merytorycznego dla ocenianej pracy.

6. OCENA DOROBKU PRZEDSTAWIONEGO W PRACY

Ocena zachowania się ośrodka w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia wywołanego oddziaływaniami o charakterze dynamicznym jest niezmiennie jednym podstawowym pytań mechaniki gruntów. Formułowane kryteria oceny dalekie są od jednoznaczności. Wkład Autora pracy w tym zakresie można uznać za znaczący. Osiągnięciem pracy mgr inż. **Piotra Kantego** jest zgromadzenie znaczącej populacji danych pomiarowych oraz zdefiniowanie i udokumentowanie pojęć wymiana dynamiczna, kolumna kamienna, strefa oddziaływań. Staranność wykonanych eksperymentów, wprowadzenie szeregu udoskonaleń metodyki badawczej i pomysły techniczne zapewniające odpowiednią jakość uzyskanych wyników podnoszą wartość poznawczą przedstawionego materiału.

Autor poświęca wiele uwagi definiowaniu parametrów ośrodka gruntowego oraz zagadnieniom formowania kolumny kamiennej w uwarstwowionym osrodku gruntowym. Recenzowana praca stanowi kontynuację wieloletnich badań doświadczalnych prowadzonych w Katedrze Geotechniki i Drogownictwa Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach nad parametrami geotechnicznymi zagęszczanego podłoża gruntowego. Autor tej pracy wniósł do nich własny wkład w postaci analiz zagadnień pracy uwarstwowionego, nawodnionego ośrodka gruntowego z warstwa słabą (niespoista lub spoistą), prowadzenia własnych badań empirycznych zakończonych podaniem wiarygodnych wyników jakościowych i ilościowych oraz rozwiązania szeregu problemów technologicznych i pomiarowych.

Przedstawione wyniki obszernych badań stanowią rozszerzenie zakresu poszukiwań prowadzonych przez innych badaczy nad zjawiskiem pracy ośrodka gruntowego w warunkach przestrzennego stanu odkształcenia poddanego oddziaływaniom dynamicznym przekazywanym przez warstwy materiału kamiennego zwiększającego swoją sztywność w trakcie procesu formowania kolumny metoda udarową.

Tematyka jest aktualna, gdyż rosną wymagania odnośnie skutecznej metodyki prognozowania i następnie konstrukcyjnego ograniczenia przemieszczeń. Badania Autora dowiodły, że można wyróżnić grupę technologii, które w procesie zagęszczania wprowadzanego do ośrodka gruntowego materiału kamienistego charakteryzują się narastającą sztywnością ośrodka otaczającego formowaną kolumnę wynikającą z efektywnego współdziałania warstw formowanej kolumny z otoczeniem.

Na przykładzie badań w gruntach uwarstwionych niespoistych z wyraźną warstwą słabą identyfikuje zjawiska występujące w podłożu wpływające na dogęszczenie ośrodka gruntowego oraz ocenia ilościowo ich wartości.

Podsumowując moją opinię o pracy mgr inż. Piotra Kantego pod tytułem: „**Analiza doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej gruntu na otoczenie**” stwierdzam, że jest syntezą najważniejszych opublikowanych opracowań naukowych dotyczących zmian stanu środka gruntowego w otoczeniu kolumn formowanych metodami udarowymi oraz wyników badań własnych.

Wkładem własnym autora w rozpoznanie tej problematyki jest:

- opracowanie metodyki, oprzyrządowania oraz sposobu przeprowadzenia badań modelowych, w ramach, których można analizować mechanizm zmian stanu ośrodka gruntowego w otoczeniu kolumn formowanych metodami udarowymi,
- opracowanie metodyki i przeprowadzenie w warunkach polowych badań jakościowych i ilościowych na stanowiskach odpowiednio oprzyrządowanych umożliwiających ocenę mechanizmu zmian stanu ośrodka gruntowego w otoczeniu kolumn formowanych metodami wymiany dynamicznej,
- rozpoznanie wpływu procesu formowania kolumny na sztywność całego ośrodka wykazanie roli warstw platformy roboczej przy rozpatrywaniu zachowania się podłoża gruntowego, gabarytów oraz kształtu formowanych kolumn kamiennych,
- ustalenie mechanizmu interakcji urządzenia zagęszczającego i niespoistego materiału kolumny oraz wpływu na jego odkształcalność
- zastosowanie selektywnej metody oceny zachowania się badanych parametrów w warunkach polowych; specyfika metodologii badań polegała na bezpośrednim porównywaniu parametrów geotechnicznych w takich samych warunkach gruntowych i jednakowo obciążonych, co pozwoliło wyeliminować ewentualne różnice wynikające z różnych warunków badań,
- przedstawienie specyfiki oddziaływania kolumn kamiennych polegającej na przekazywaniu w określony sposób obciążeń w podłożu gruntowe, w układzie przestrzennego współdziałania obciążanej dynamicznie warstwy kruszywa z otaczającym gruntem podłoża.
- określenie zależności wpływu formowania kolumny w technologii wymiany dynamicznej (DR) na zmiany badanych wielkości, a mianowicie: przemieszczeń poziomych i pionowych otaczającego gruntu, jego parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych a także wilgotności, wodoprzepuszczalności i współczynnika K_0 oraz OCR.
- określenie zasięgu zmian w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej formowanej w warunkach in situ oraz w warunkach laboratoryjnych, który jest mniejszy niż $2,5D_k$ oraz udokumentowania, że deformacje otoczenia kolumny DR mają charakter asymetryczny, co wynika najprawdopodobniej z czynników losowych oraz uwarunkowań technologicznych,
- udokumentowania, że w czasie formowania kolumny wymiany dynamicznej w otaczającym ją gruncie następuje zniszczenie struktury, w następstwie czego ma miejsce spadek

parametrów mechanicznych gruntu, a po uformowaniu kolumny DR struktura gruntu w jej sąsiedztwie podlega odbudowie, a jego parametru zwiększeniu,

- na podstawie równolegle wykonywanych badań CPTU i DMT określono, że zmiany w otoczeniu kolumny mają charakter kierunkowy. Badania dylatometryczne lepiej niż sondowania statyczne oddają kierunkową specyfikę wzmocnienia podłoża kolumnami kamiennymi.

Pragnę zaznaczyć, że przedstawiana praca stanowi liczące się kompleksowe opracowanie tego tematu w światowej literaturze naukowej, a w Polsce według mojego rozeznania jest doskonałą kontynuacją prac Zespołu Badawczego Politechniki Śląskiej specjalizującego się w metodach uzdatniania słabego podłoża gruntowego w której:

- przedstawiono oryginalne kompleksowe opracowanie zagadnienia oceny pracy ośrodka gruntowego w otoczeniu kolumny z materiału gruboziarnistego w procesie jej formowania oraz w procesie rozpraszania nadwyżki w porach gruntu spowodowanej dynamicznym oddziaływaniem.
- dokonano szerokiej analizy literatury przedmiotu, zestawione w spisie literatury pozycje są cytowane w poszczególnych rozdziałach. Literatura ta oddaje obecny stan wiedzy i jest cytowana prawidłowo,
- zawarto elementy nowości do nauki w zakresie geotechniki, przyczyniając się do znacznego poszerzenia bazy danych oraz wyjaśnienia podstawowych mechanizmów pracy ośrodka gruntowego w złożonych stanach naprężenia i odkształcenia.

Autor wskazuje potrzebę dalszych prac nad:

- uwzględnieniem pracy wbijanej kolumny kamiennej jako drenu.
- wpływem formowania grupy kolumn DR na otoczenie gruntowe,
- opracowaniem procedury odbiorczej kolumn kamiennych, wykorzystującej m.in. metody geofizyczne do oceny kształtu kolumny,
- opracowaniem metody projektowania kolumn DR bazującej wyłącznie na parametrach sondowań CPTU lub/i DMT,
- opracowaniem metody predykcji efektywności wzmocnienia na podstawie obserwacji zachowania się gruntu podczas formowania kolumny w warunkach in situ.

7. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Działając na podstawie Uchwały Rady Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach, podjętej na posiedzeniu w dniu 25 czerwca 2014 roku oraz na podstawie Ustawy z dnia 18 marca 2011 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytułach w zakresie sztuki, po zapoznaniu się z rozprawą pt.: „**Analiza doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej gruntu na otoczenie**” stwierdzam, że przedłożoną pracę doktorską oceniam pozytywnie i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Piotra Kantego do dalszych faz przewodu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie - nauki techniczne, dyscyplinie – budownictwo, specjalności – geotechnika.

Gdańsk 28.08.2014

Adam Bolt

