

ZAŁĄCZNIK NR 3

AUTOREFERAT
PRZEDSTAWIAJĄCY
OPIS DOROBKU I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH
SŁAWOMIRA KWIECIEN

Gliwice, marzec 2019 r

SPIS TREŚCI:

1. Sławomir Kwiecień	2
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	2
2.1. Inne istotne dyplomy i świadectwa świadczące o doksztalcaniu się habilitanta.....	2
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych, przebiegu działalności naukowej	3
3.1. Ogólna charakterystyka działalności naukowej	3
3.2. Działalność naukowa podczas odbywania studiów doktoranckich.....	3
3.3. Badania naukowe prowadzone po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, związane z przewodem habilitacyjnym.....	4
4. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789).....	5
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.....	5
4.2. Wykaz prac naukowych, dokumentujących osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego	5
4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	5
4.4. Kierunki dalszych prac.....	25
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta	26

1. Sławomir Kwiecień

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- **2008 r. - dr inż. nauk technicznych w zakresie budownictwa**, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa.

Tytuł pracy doktorskiej: *Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża wymianą dynamiczną.*

Promotor: Dr hab. inż. Jerzy Sękowski, prof. PŚ. Politechnika Śląska,

Recenzenci: Dr hab. inż. Adam Bolt, prof. PG. Politechnika Gdańska,
Prof. dr hab. inż. Maciej Gryczmański, Politechnika Śląska.

Praca wyróżniona przez Radę Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Dysertacja uzyskała także wyróżnienie Ministra Infrastruktury w roku 2009.

- **2001 r. - mgr inż. budownictwa w specjalności metody komputerowe w mechanice konstrukcji**, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

Tytuł rozprawy magisterskiej: *Skręcanie ortotropowych prętów cienkościennych.*

Promotor: Dr Jadwiga Jędrzejczyk-Kubik,

Koreferent: Prof. dr hab. inż. Szczepan Borkowski

2.1. Inne istotne dyplomy i świadectwa świadczące o doksztalcaniu się habilitanta

- 2015 r. – Zaświadczenie ukończenia szkolenia „Zarządzanie projektami badawczymi”, Politechnika Śląska
- 2006 r. – Zaświadczenie ukończenia Studium Doskonalenia Pedagogicznego dla nauczycieli akademickich, Politechnika Śląska, Ośrodek Badań i Doskonalenia Dydaktyki

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych, przebiegu działalności naukowej

- 15.12.2003 r. – nadal, Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa,

Stanowisko:

12.2003 – 06.2008 – studia doktoranckie,

7.2008 – 9.2010 – asystent,

10.2010 – nadal – adiunkt.

3.1. Ogólna charakterystyka działalności naukowej

Głównym obszarem działalności w mojej pracy naukowej są badania doświadczalne i teoretyczne związane z metodami wzmocnienia podłoża gruntowego wchodzącymi w skład inżynierii geotechnicznej a zwłaszcza z metodą wymiany dynamicznej. Uzyskane wyniki badań były przedstawiane systematycznie w publikacjach naukowych na konferencjach krajowych, zagranicznych i międzynarodowych, w czasopismach branżowych, zagranicznych oraz opracowań o charakterze monograficznym o zasięgu ogólnokrajowym.

3.2. Działalność naukowa podczas odbywania studiów doktoranckich

Moja aktywność naukowa podczas odbywania studiów doktoranckich w latach 2003-2008 związana była głównie z inżynierią geotechniczną i obejmowała prace w zakresie badań teoretycznych i doświadczalnych, o charakterze podstawowym, dotyczących metody wymiany dynamicznej.

Zdobyte umiejętności i doświadczenia wykorzystałem w pracy doktorskiej pt. *Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża metodą wymiany dynamicznej*, którą obroniłem z wyróżnieniem w 2008 roku. Praca została uhonorowana wyróżnieniem Ministra Infrastruktury. Za swój oryginalny dorobek naukowy związany z tematyką pracy doktorskiej, wykorzystany w późniejszym okresie w swojej działalności naukowo - badawczej, uważam:

- wstępne rozpoznanie kształtów kolumn wymiany dynamicznej,
- wstępne określenie wpływu formowania kolumn na otoczenie gruntowe,
- model numeryczny MES podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną w warunkach tzw. komórki jednostkowej.

Częstkowe wyniki badań związanych z pracą doktorską publikowałem na konferencjach krajowych.

3.3. Badania naukowe prowadzone po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych, związane z przewodem habilitacyjnym.

Działalność naukowa w okresie 7.2008 r. – 02.2019 r. stanowi kontynuację prac realizowanych w okresie wcześniejszym. Prace prowadziłem wielowątkowo, koncentrując uwagę na:

- kształtach kolumn wymiany dynamicznej określanych w warunkach polowych (lata 2008-2015),
- wpływie formowania kolumn wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe w warunkach laboratoryjnych i polowych (byłem członkiem zespołu realizującego projekt badawczy pt. „Analiza teoretyczna i doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe” z Narodowego Centrum Nauki w Krakowie nr 1989/B/T02/2011/40. Autorzy: dr hab. inż. Jerzy Sękowski, prof. Pol. Śl. (kierownik projektu), dr inż. Sławomir Kwiecień, mgr inż. Piotr Kanty (lata 2011-2014),
- modelowaniu MES podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną (lata 2013-2018),
- procesie formowania kolumn wymiany dynamicznej w warunkach laboratoryjnych (2017-2018),
- odkształcalności kolumn wymiany dynamicznej ustalonej na podstawie próbnych obciążeń (lata 2017-2019).

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego wynikającego z art. 16 ust. 2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

WZMOCNIENIE PODŁOŻA GRUNTOWEGO METODĄ WYMIANY DYNAMICZNEJ

4.2. Wykaz prac naukowych, dokumentujących osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego

- [1] **Kwiecień S.**: *Odkształcalność kolumn wymiany dynamicznej ustalana na podstawie próbnych obciążeń*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2019.
Recenzenci wydawniczy:
Prof. dr hab. inż. Antoni Florckiewicz, Politechnika Poznańska,
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
- [2] Kanty P., **Kwiecień S.**, Sękowski J.: *Wpływ formowania wbijanej kolumny kamiennej na otoczenie gruntowe*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2015.
Recenzenci wydawniczy:
Prof. dr hab. inż. Ryszard COUFAL, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie.
Prof. dr hab. inż. Zbigniew Lechowicz, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie.
Mój procentowy udział w powstanie monografii szacuję na 33%.
- [3] **Kwiecień S.**, Sękowski J.: *Kolumny kamienne formowane w technologii wymiany dynamicznej*. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2012.
Recenzenci wydawniczy:
Dr hab. inż. Adam Bolt, prof. Politechniki Gdańskiej,
Dr hab. inż. Zenon Szypcio, prof. Politechniki Białostockiej.
Mój procentowy udział w powstanie monografii szacuję na 50%.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wymiana dynamiczna jest jedną z kilkudziesięciu metod wzmocnienia podłoża w ramach inżynierii geotechnicznej. Zalicza się ją do metod częściowej, wglębnej wymiany gruntu. Istota mechanizmu wzmocnienia jest prosta – w trakcie wymiany dynamicznej grunt, na skutek zrzutów ubijaka o dużej masie (10-20 Mg), przy równoczesnym wprowadzaniu kruszywa, przemieszczany jest w różnych kierunkach. W jego miejsce trafia zagęszczane kruszywo i formowane są w ten sposób kolumny, charakteryzujące się, jak ustalono w pracy doktorskiej autora, różnym kształtem (często odmiennym od cylindrycznego) oraz

parametrami fizyko-mechanicznymi korzystniejszymi od parametrów gruntu. Wskutek formowania kolumn zachodzą również zmiany w gruncie otaczającym kolumny.

Wspomniana specyfika technologii wymiany dynamicznej powoduje pewne trudności związane z projektowaniem, wykonawstwem oraz badaniami odbiorczymi tak wzmocnionego podłoża. Z jednej strony, istniejące metody wymiarowania obejmują układy o cylindrycznych kolumnach bez uwzględnienia procesów zachodzących w otoczeniu kolumn powodujących zmianę jego parametrów fizyko-mechanicznych. Z drugiej strony, brak jest jasnych wytycznych dotyczących prowadzenia i interpretacji badań odbiorowych w postaci próbnych obciążeń kolumn wymiany dynamicznej.

Celem wymienionych w p. 4.2 prac było doskonalenie metod opisu podłoża wzmocnionego metodą wymiany dynamicznej, między innymi pod kątem projektowania, wykonawstwa i badań odbiorczych. W szczególności przeprowadzone badania dotyczyły:

- a) identyfikacji kształtu kolumn wymiany dynamicznej,
- b) wpływu formowania kolumn wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe,
- c) określenia odkształcalności kolumn wymiany dynamicznej ustalonej na podstawie próbnych obciążeń.

Ad. a) identyfikacja kształtu kolumn wymiany dynamicznej

Znajomość kształtów kolumn wykonywanych metodą wymiany dynamicznej oraz możliwych do uzyskania ich średnic i długości jest niezwykle istotna z punktu widzenia projektowania, wykonawstwa ale również interpretacji badań odbiorczych (np. próbnych obciążeń). Projektując punktowe, wgłębne wzmocnienie podłoża zakładamy pewne średnice i długości kolumn, które muszą być następnie uzyskane na budowie. Wykonując z kolei kolumny konieczna jest znajomość ilości (objętości) potrzebnego materiału. Równocześnie trzeba wziąć pod uwagę, że spośród wszystkich metod formowania kolumn (np. wibrowymiana, geopier) w przypadku wymiany dynamicznej, operator ma mniejszą kontrolę nad uzyskiwaną średnicą i jej zmianą na długości kolumny oraz nad długością samej kolumny. Może to powodować nieprozumienia na linii projektant – wykonawca – nadzór.

Przeprowadzony, pod kątem kształtu kolumn, w pracach [1] i [3] przegląd literatury wykazał, że w większości badacze podają podstawowe informacje dotyczące średnicy głowicy kolumn i ich długości. Wyniki w postaci pełnego kształtu stanowią nieliczną grupę.

Argumenty te zadecydowały o podjęciu, przez autora, badań nad kształtem kolumn uzyskiwanych w technologii wymiany dynamicznej. Badania te prowadzone są, w warunkach polowych, od 2007 roku. W swojej pracy doktorskiej z 2008 r. autor przedstawił wyniki inwentaryzacji 14 kolumn wykonanych w różnych warunkach gruntowo-wodnych. Tak mała liczba badań nie pozwalała na wprowadzenie klasyfikacji, której głównym kryterium jest kształt uformowanych kolumn. Prowadzone sukcesywnie, w latach 2008-2015, dalsze badania, pozwoliły na wprowadzenie dwóch klasyfikacji. Pierwszą, opublikowaną w 2012 r.,

w rozdziale 4 pracy [3], oparto na wynikach inwentaryzacji 31 kolumn. Druga, z roku 2019, przedstawiona w rozdziale 4 oraz załącznikach pracy [1] i w prezentowanym autoreferacie, powstała na podstawie inwentaryzacji 61 kolumn.

Wszystkie z przeprowadzonych badań wykonano przy okazji realizowanych inwestycji drogowych (budowa różnych odcinków tras A1, A4, S7) i hydrotechnicznych (budowa wałów przeciwpowodziowych). Zinwentaryzowane kolumny odkryto koparko-ładowarką (usunięcie połowy kolumny na całej jej długości). Pomiary średnic, długości oraz zdjęcia kolumn wykonywano z poziomu terenu.

Warunki gruntowo-wodne określono na podstawie dokumentacji geotechnicznych wykonywanych na potrzeby budowy, każdorazowo uszczegółowiając je w trakcie odkrywek.

Wszystkie z uformowanych kolumn [1] wykonywano ubijakami, o średnicy (szerokości) od 1 do 1,2 m, wysokości od 1,2 do 2 m i masach 10-12 Mg, zrzucanymi z wysokości do 25 m.

Na podstawie przeprowadzonych badań wprowadzono dwie główne grupy kształtów obejmujących: kolumny oparte lub wprowadzone w warstwy gruntów o dużej sztywności (co najmniej średnio zagęszczone grunty niespoiste) i zawieszane w warstwie wzmocnionej lub wprowadzone w grunty spoiste w stanie od twaroplastycznego do miękkooplastycznego. W każdej z grup wprowadzono podgrupy skupiające kolumny o zbliżonym kształcie, występujące w podłożu o określonej miąższości. Zbiorcze zestawienie badanych kolumn przedstawiono w tabeli nr 1.

Dla każdej kolumny przeprowadzono analizę: charakterystycznych średnic (głowicy (D_g), podstawy (D_{pd}) oraz najmniejszej (D_{kmin}) i największej (D_{kmax})), część z nich (D_g , D_{kmax}) odnosząc do średnicy (szerokości) zastosowanych ubijaków (D_u). Analizowano również zmiany średnic kolumn na ich długości oraz smukłość kolumn (stosunek długości kolumn (H_k) do ich minimalnej średnicy (D_{kmin})).

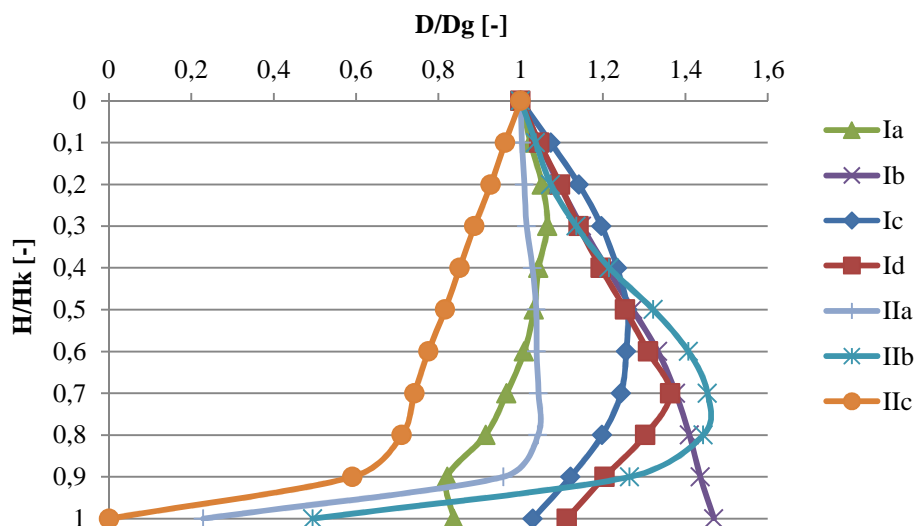
Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej obliczono wartości średnie uzyskanych charakterystycznych średnic kolumn poszczególnych podgrup (tab. 2) oraz określono zmianę średnic kolumn w odniesieniu do średnicy głowicy w funkcji ich długości (rys. 1).

Tabela 1. Podział badanych kolumn wymiany dynamicznej

Grupa	Typ (Podgrupa)	Kolumny
I. Kolumny oparte na warstwach o dużej sztywności (o płaskiej podstawie) Łącznie 34 szt.	Ia – kolumny o kształcie cylindrycznym, miąższość gruntów wzmacnianych 1-2 m	Ia ₁ -Ia ₃ , 3 szt.
	Ib – kolumny o średnicy zwiększającej się wraz z głębokością, miąższość gruntów wzmacnianych 2-2,7 m	Ib ₁ -Ib ₃ , 3 szt.
	Ic – kolumny, których największa średnica występuje w okolicy środka ich długości, miąższość gruntów wzmacnianych 2,7-3,8 m	Ic ₁ -Ic ₂₂ , 22 szt.
	Id – kolumny o zwiększonej średnicy w ich dolnej części, miąższość gruntów wzmacnianych 3,8-4,4 m	Id ₁ -Id ₆ , 6 szt.
II. Kolumny zawieszane lub oparte na gruntach spoistych (o półkolistej podstawie) Łącznie 27 szt.	IIa – kolumny o kształcie zbliżonym do cylindrycznego, długość kolumn 3,0-4,5 m	IIa ₁ -IIa ₉ , 9 szt.
	IIb – kolumny o poszerzonej podstawie, długość kolumn 3,0-4,2 m	IIb ₁ -IIb ₁₀ , 10 szt.
	IIc – kolumny o poszerzonej głowicy, długość kolumn 1,9-4,4 m	IIc ₁ -IIc ₈ , 8 szt.

Tabela 2. Wybrane średnice (wartości średnie) kolumn

Podgrupa	D _g	D _{pd}	D _{min}	D _{max}
Ia	1,93	1,95	1,87	2,07
Ib	1,63	2,4	1,63	2,4
Ic	2,00	2,03	1,87	2,55
Id	1,85	1,95	1,60	2,47
IIa	1,93	2,00	1,90	2,04
IIb	1,73	2,50	1,72	2,65
IIc	2,26	1,59	1,59	2,26



Rys. 1. Wykres zmienności średnic kolumn (wartości średnie) na ich długości - grupy I -II

W załącznikach pracy [1] przedstawiono wyniki poszczególnych odkrywek kolumn wraz z występującymi w podłożu warunkami gruntowymi.

Uzyskane wyniki stanowią podstawę do projektowania kolumn wymiany dynamicznej, a w szczególności doboru ich średnic oraz ich zmian na długości kolumn w funkcji miąższości podłoża i występujących warunków gruntowych. Nie są znane autorowi tego typu klasyfikacje zarówno w kraju jak i poza jego granicami.

Ad. b) wpływ formowania kolumn wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe

W trakcie formowania kolumn wymianą dynamiczną dochodzi do dużych przemieszczeń podłoża w otoczeniu kolumny oraz zmian jego właściwości. Tych ostatnich nie uwzględnia żadna z istniejących metod wymiarowania kolumn. Jest to zapewne związane z trudnością opisu skomplikowanych procesów, mających miejsce w czasie wykonywania kolumn jak i po ich uformowaniu. Powyższe przesłanki skłoniły zespół badawczy w osobach: Dra hab. inż. Jerzego Sękowskiego, prof. Pol. Śl., Dra Sławomira Kwietnia oraz mgr inż. Piotra Kantego do podjęcia się tego tematu i wystąpienia w 2010 r do Narodowego Centrum Nauki w Krakowie o wykonanie projektu badawczego pt. „Analiza teoretyczna i doświadczalna wpływu wymiany dynamicznej na otoczenie gruntowe”. Projekt ten został zaakceptowany i przeprowadzony w latach 2011-2014 (nr 1989/B/T02/2011/40). Przeprowadzone badania, wyniki i ich analiza stanowiły podstawę do napisania monografii [2], w której podjęto próbę ustalenia wpływu formowania pojedynczej kolumny na otoczenie gruntowe.

Szczegółowy zakres prac wykonanych przez autora autoreferatu w projekcie badawczym i monografii [2] przedstawiono w załączniku nr 5, p. IB i p. III

Przeprowadzona w pierwszej kolejności, w rozdziale 1, analiza stanu wiedzy wykazała brak jednoznacznej odpowiedzi dotyczącej wpływu formowania kolumn na otoczenie gruntowe w funkcji czasu jak i odległości od kolumny. Z kolei przeprowadzone badania wstępne oraz uzyskane wyniki (rozdział 2) potwierdziły zasadność takiego podejścia badawczego jak i skierowały autorów monografii [2] na zastosowanie metod badań umożliwiających rozpoznanie podłoża w sposób ciągły (sondowania CPTU i DMT).

Badania prowadzono w warunkach laboratoryjnych i polowych. Ze względu na jakościowy charakter badań laboratoryjnych, ich opis, wyniki i ich analizę pominięto w autoreferacie, a skupiono się jedynie na badaniach in-situ.

Badania polowe zostały przeprowadzone na poletku badawczym, zlokalizowanym w miejscowości Przeworsk, na budowanej na południowym wschodzie kraju autostradzie A4, odcinek Rzeszów – Jarosław.

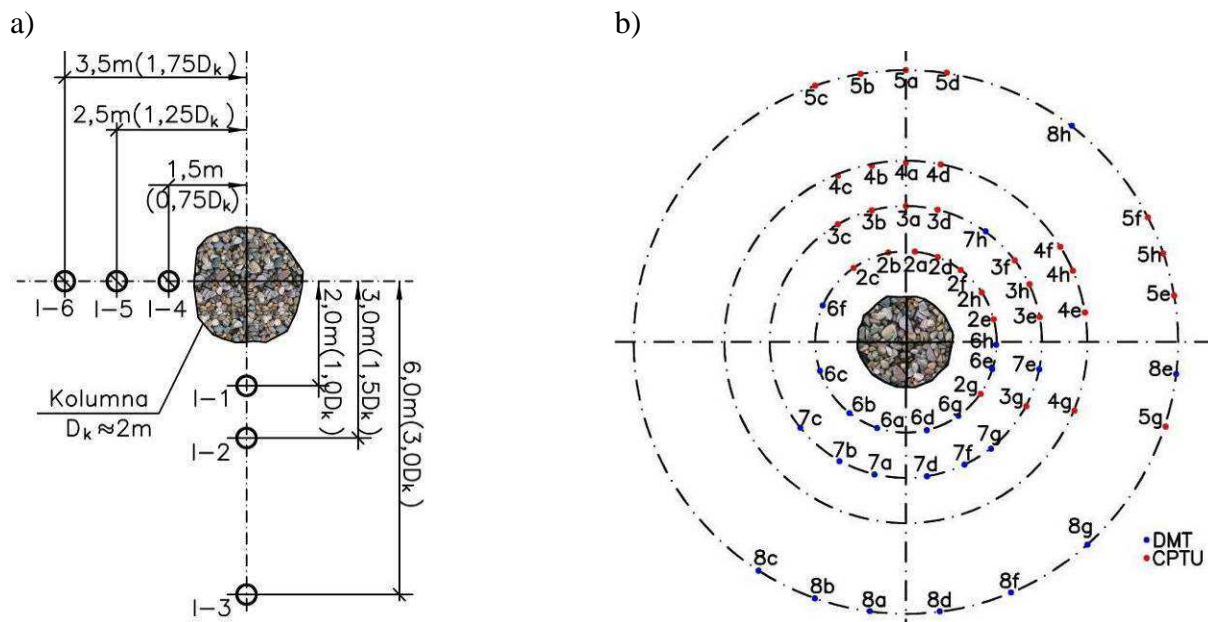
Wpływ formowania kolumny na otoczenie gruntowe wyrażony został przez przemieszczenia (poziome i pionowe) ośrodka gruntowego, oraz zmianę parametrów sondowań i wyznaczonych na ich podstawie parametrów mechanicznych i stanu przylegającego do kolumny gruntu.

Program badań obejmował przeprowadzenie sondowań statycznych (CPTU) i dylatometrycznych (DMT), badań inklinometrycznych oraz geodezyjnych pomiarów poziomu terenu przylegającego do formowanej kolumny w różnym czasie, tj. przed wykonaniem kolumny (seria a, bez badań DMT, z 1 otworem wiertniczym), po wykonaniu: 1/3 (seria b), (2/3-c) i całej kolumny (d), oraz po upływie: 1 dnia (seria e), 8 (f) i 30 dni (g) od uformowania kolumny (bez badań geodezyjnych). W 34 dniu po uformowaniu kolumny zostało przeprowadzone próbne obciążenie kolumny, sondowania CPTU i DMT oraz inwentaryzacja kolumny (na podstawie odkrywki). Różne były też odległości punktów pomiarowych od formowanej kolumny. Badania inklinometryczne (punkty I1-I6) wykonano w odległości: 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5 i 6 m od jej osi (rys. 2a), sondowania CPTU (punkty 2-5) oraz badania geodezyjne z kolei w odległości 2; 3; 4 i 6 m, a badania DMT (punkty 6-8) odpowiednio w odległości 2; 3 i 6 m (rys. 2b).

Głębokość prowadzonych sondowań, wierceń oraz badań inklinometrycznych wynosiła odpowiednio: 6; 7,5 i 7,5 m.

Szczegóły dotyczące zastosowanego sprzętu, sposobu prowadzenia badań, interpretacji ich wyników przedstawiono w pracy [2].

W trakcie formowania kolumny notowano: wysokości zrzutów ubijaka, głębokości powstałego krateru oraz ilości stosowanego kruszywa.



Rys. 2. Rozmieszczenie badań: a) inklinometrycznych, b) CPTU i DMT ($D_k=2,0$ m- średnica głowicy kolumny) [2]

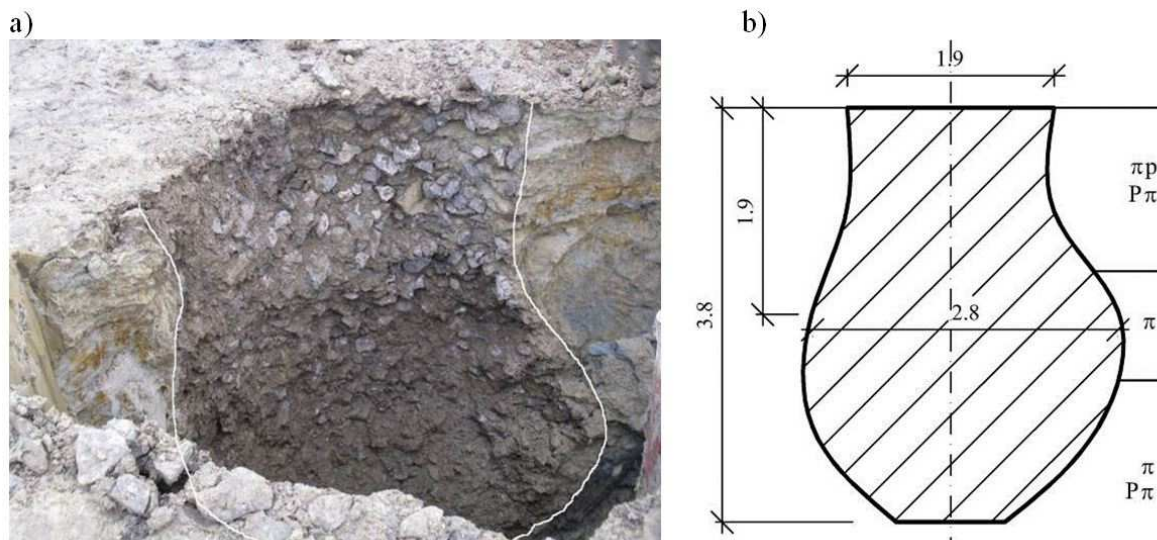
Jak wynikało z przeprowadzonych badań wstępnych (seria a) podłoże budowały cztery charakterystyczne warstwy gruntów:

- I. warstwa pierwsza, zalegająca do głębokości ok. 1,5 m p.p.t., to średnio zagęszczone piaski pylaste przewarstwione pyłami piaszczystymi w stanie twaroplastycznym na pograniczu stanu plastycznego. Warstwa charakteryzowała się wartościami oporu stożka sondy CPTU z zakresu $q_c=1,5 - 5,0$ MPa,
- II. warstwa druga, rozpoznana od 1,5 do 2,5 m p.p.t., to plastyczne i miękkoplastyczne osady pylaste. Opory stożka mieściły się w zakresie $q_c=0,8 - 4,0$ MPa,
- III. warstwa trzecia, występująca do głębokości 4,8 m p.p.t., to plastyczne osady pylaste z większym udziałem luźnych i średnio zagęszczonych gruntów piaszczystych. Opory stożka mieściły się w zakresie $q_c=1,1 - 5,0$ MPa,
- IV. warstwa czwarta to średnio zagęszczone piaski średnie i drobne stanowiące warstwę nośną. Opory stożka mieściły się w zakresie $q_c=4,0 - 10,7$ MPa.

Nawiercone zwierciadło wody gruntowej znajdowało się na głębokości 5,3 m, a ustabilizowane na głębokości 3,0 m p.p.t.

Uformowana kolumna charakteryzowała się zmienną wzdłuż długości średnicą. Średnica głowicy kolumny wynosiła 1,9 - 2,0 m. Średnica maksymalna z kolei 2,8 m, a długość kolumny 3,8 m (rys. 3).

Przy przedstawianiu wyników, odległości od kolumny wyrażono w funkcji jej średnicy głowicy ($D_k=2,0$ m).



Rys. 3. Uformowana kolumna: a) w czasie odkrywki, b) szkic po inwentaryzacji [2]

Jak wynikało z przeprowadzonych badań, na skutek formowania kolumny, w podłożu dochodzi do zmian. Po pierwsze obserwowane są asymetryczne przemieszczenia pionowe i poziome w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej. Maksymalne wielkości przemieszczeń wynosiły: dla przemieszczeń poziomych 170 mm ($1,25D_k$ od osi kolumny), a dla wypiętrzeń 300 mm ($1,0D_k$ od osi kolumny). 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 największe przemieszczenia na głębokości $0,55H_k$ (H_k -długość kolumny), 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 wbijania 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 podstawie przemieszczeń pionowych i poziomych 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 najszabszej warstwy gruntu (II), w której kolumna charakteryzowała się największą średnicą. Stąd wniosek, że te trzy elementy (największe przemieszczenia poziome, najszabsza warstwa, największa średnica kolumny) są ze sobą ściśle związane. Związek ten powinien być brany pod uwagę przy próbach określenia kształtu wbijanej kolumny kamiennej lub przemieszczeń jej sąsiedztwa.

Obszerna analiza parametru sondowania CPTU w postaci oporu stożka q_c pozwoliła na selekcję wyników i zawężenie rozważań do warstw 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 badań są bardziej wyraźne niż w przypadku badań CPTU. Przekłada się to również na wyniki szczegółowe – zmiany wartości parametrów geotechnicznych ϕ' (kąta tarcia wewnętrznego), c' (spójności), S_u (wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu) i M_0 (pierwotnego modułu ściśliwości). W badaniach CPTU zaobserwowano, że formowanie kolumny doprowadziło do ujednoczenia (wyrównania) parametrów podłoża. Parametry geotechniczne warstwy najśłabszej (II) zwiększyły się, 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 zwiększenie kąta tarcia wewnętrznego wynosiło 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' . Należy podkreślić, że wyjściowe wartości tego parametru określone z badania DMT (33°) były znacząco większe od uzyskanych z CPTU (27°).

Porównując wyniki analizy pierwotnych modułów ściśliwości uzyskanych na podstawie badań DMT i CPTU, można stwierdzić, że rezultaty również się różnią. Badania wykazały brak zmian wartości modułu 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 znaczące zwiększenie (160%) po 30 dniach od uformowania kolumny, który nie był zauważalny w wynikach badania DMT. Początkowa wartość modułu równa 8 MPa określona na podstawie obu badań jest taka sama. Większe różnice zaobserwowano w warstwie III. W badaniu CPTU zaobserwowano złożone zmiany zarówno w postaci zwiększenia (o 20%), jak i zmniejszenia (o 40%) wartości M_0 . W wynikach z badania DMT zwiększenie wartości modułów jest ewidentne i wynosi do 250%.

Różnice w wynikach mogą mieć związek ze specyfiką wymiany dynamicznej oraz badań CPTU i DMT. Można założyć, że przemieszczenia, a więc zmiana gęstości gruntu w otoczeniu wbijanej kolumny kamiennej, są największe wzdłuż hipotetycznych linii rozchodzących się promieniście od kolumny. Podczas penetracji dylatometru w podłoże membrana łopatki 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 naprężenia. W przypadku badania DMT jest inaczej, kierunek mierzonych przez membranę łopatki ciśnień związany jest z poziomą składową naprężenia geostatycznego. Na istnienie anizotropii w podłożu mogą wskazywać analizy zmian modułu ściśliwości w czasie. Wyjściowo dla warstwy III pierwotny

moduł ściśliwości określony na podstawie CPTU był taki sam jak wyznaczony na podstawie DMT. Po wykonaniu kolumny wartość modułu z CPTU zmieniała się o kilkanaście procent (\pm), natomiast moduł określony na podstawie badań DMT wykazywał zwiększenie o max. 250%.

Można wysnuć tezę, że zwiększenie parametrów warstwy II w badaniu CPTU jest związane ze stanem odkształcenia podłoża, natomiast znaczące zwiększenie parametrów w warstwie III badanej za pomocą DMT ma związek ze stanem naprężenia.

W analizie wartości OCR (współczynnik prekonsolidacji) oraz K_0 (współczynnik parcia gruntu w spoczynku) stwierdzono związek zmian tych parametrów z procesem formowania kolumny kamiennej. Proces formowania kolumny wpłynął na zmianę parametrów, ujawniającą się na różnych etapach badań. Ogólnie zaobserwowano zwiększenie OCR oraz K_0 o kilkanaście procent, co z inżynierskiego punktu widzenia jest zmianą raczej mało istotną.

Wszystkie przeprowadzone badania wykazały, że w wyniku formowania kolumny w jej otoczeniu następuje zniszczenie struktury gruntu (a więc zmniejszenie jego parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych). Następnie struktura ulega przebudowie, a parametry wzrastają, osiągając z reguły wielkości zbliżone do początkowych. Lokalnie zanotowano ich zwiększenie względem pierwotnych. Zmiany były niestabilne w analizowanym czasie badań i zależne od odległości od kolumny.

Należy podkreślić, że badanie było wykonane dla kolumny pojedynczej, która po uformowaniu nie została obciążona nasypem ani fundamentem, a czas testów wynosił 30 dni. Określony zasięg zmian ($3,0D_k$) jest większy od standardowo stosowanego w projektowaniu rozstawu kolumny wynoszącego $1,5 - 2,0D_k$. Oznacza to, że kolumna wykonywana w sąsiedztwie innej uformowanej wcześniej jest włączana w silnie zdeformowane podłoże o parametrach anizotropowych. Na podstawie wyników z poletka można przyjąć, że parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe gruntu otaczającego kolumnę w kierunku pionowym są zbliżone do pierwotnych (badanie CPTU), natomiast w kierunku poziomym są większe (badania DMT). Pomierzone wartości parametrów wytrzymałościowych gruntu w otoczeniu wbijanej kolumny wykazują zmniejszenie na etapie formowania, a następnie zwiększenie do wartości początkowej lub większej. Wynik ten może stanowić zalecenie do wykonywania badań odbiorczych metodą wymiany dynamicznej, które zdaniem autorów powinny być realizowane w możliwie odległym czasie od uformowania kolumny. Można to zrealizować badając kolumny, które zostały wykonane jako jedne z pierwszych w całej serii. Przykładowo, realizując wzmocnienie obszaru kolumnami DR w liczbie 200 sztuk za pomocą jednej maszyny o wydajności 15-20 sztuk na dzień, można uznać za zasadne przeprowadzenie badań odbiorczych na kolumnach wykonanych w pierwszym dniu realizacji wzmocnienia. Wówczas badanie będzie wykonane, uwzględniając weekendy, minimum 14 dni po uformowaniu kolumny.

Badania wykonane przez autorów wyróżniają się, ze względu na ich zakres, na tle innych badań znanych z literatury. Można uznać, że mają one charakter pionierski.

Wyniki cząstkowe przedstawionych badań były publikowane w artykułach czasopism krajowych i zagranicznych (poz.: 1, 10, 11, 17, 18, 19, 20, p. IIEb, załącznik nr 5) oraz referatach konferencyjnych (poz. 5, 6, 7, p. IIL, załącznik nr 5).

c) odkształcalność kolumn wymiany dynamicznej ustalana na podstawie próbnych obciążeń.

Po wzmocnieniu podłoża wymianą dynamiczną wykonywane są badania odbiorcze, sprawdzające postawione wymagania. Zależą one od przyjętych w projektowaniu metod wymiarowania. Te z kolei mogą być prowadzone różnymi podejściami.

Z jednej strony, stosowane są istniejące metody szacowania nośności i osiadań, w których obliczenia opierają się na modułach sztywności (E_k) lub modułach odkształcenia (E_{0k}) kolumn. Aby potwierdzić projektowane ich wartości wykonywane są próbne obciążenia kolumn.

Z drugiej strony, projektowanie odbywa się również z zastosowaniem metody elementów skończonych, w układach płaskich lub przestrzennych, przy przyjęciu różnego rodzaju modeli konstytutywnych opisujących materiał kolumn i wzmacnianego gruntu. W tej sytuacji konieczne jest sprawdzenie założonych w projekcie parametrów wybranego modelu kolumn. Jeżeli kolumny wykonano z kruszywa o uziarnieniu podfrakcji piaskowej część parametrów określana jest na podstawie sondowań, np. statycznych, dylatometrycznych czy też presjometrycznych. W większości jednak, a zwłaszcza przy stosowaniu kruszywa o większym uziarnieniu, wykonywane są próbne obciążenia kolumn, a ich wyniki, w postaci zależności „obciążenie-osiadanie”, są podstawą do przeprowadzenia analizy wstecznej metodą elementów skończonych, w której wyznacza się parametry przyjętego modelu kolumny.

W przypadku „odbierania” podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną pod nasypami drogowymi wymaga się również uzyskania określonego normą PN-S-02205 modułu odkształcenia wtórnego i wskaźnika odkształcenia. Wielkości te wyznacza się również na podstawie wyników próbnego obciążenia.

Próbne obciążenia pełnią zatem istotną rolę w badaniach odbiorczych podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną.

Sposób ich przeprowadzenia zależy od wartości przewidywanych nacisków.

W przypadku badań prowadzonych do kilkuset kilopaskali (np. 0-300 kPa) płyta obciążająca ustawiana jest na zagęszczonej i wyrównanej głowicy kolumny, a obciążenie realizowane jest siłownikami zapieranymi o dźwиг, stosowany przy wzmocnieniu podłoża. Pomiar osiadań realizowany jest za pomocą trzech lub czterech czujników mechanicznych lub elektronicznych, opartych na niezależnych stalowych ramach, rozstawionych równomiernie wokół płyty. Badania są przeprowadzane metodą stałych stopni obciążenia, przy zachowaniu

przyjętej wartości stabilizacji osiadań, w zakresie nacisków pierwotnych i wtórnych. Przedstawiona koncepcja jest stosowana w codziennej praktyce odbiorowej.

Wynikiem badań są zależności obciążenie – osiadanie w zakresie nacisków pierwotnych, lub pierwotnych i wtórnych, na podstawie których oblicza się moduły odkształcenia wzmocnionego podłoża (pierwotne (E_0) i wtórne (E)) oraz wskaźnik odkształcenia (I_0). Korzysta się tu z rozwiązań zadania Boussinesqa dla półprzestrzeni sprężystej.

Dla osiągnięcia większych nacisków, np. w badaniu nośności kolumn, konieczna jest budowa stanowiska zbliżonego do stosowanego w przypadku próbnych obciążeń pali (grupa stalowych belek, o które zapierane są siłowniki, zakotwionych w podłożu np. palami).

Specyfika wymiany dynamicznej, a w szczególności zmienność uzyskiwanych średnic kolumn (punkt 4.3a autoreferatu) powoduje, że próbne obciążenia wykonywane są przy różnym stosunku średnicy płyty obciążającej (D_p) do średnicy głowicy kolumn (D_g), zwykle mniejszym niż 1. Powodem stosowania płyt o mniejszych średnicach są również koszty potrzebne do budowy stanowisk przenoszących duże obciążenia jak i czas ich wykonania.

Zachodzi zatem pytanie: jaki wpływ na wyniki próbnych obciążeń będzie miało zastosowanie płyt obciążających o różnych średnicach, w szczególności spełniających warunek $D_p/D_g \leq 1$? Zastosowanie w próbnych obciążeniach płyt, dla których stosunek D_p/D_g będzie zmienny może skutkować powstaniem strefy współpracy o różnej objętości. W jej skład oprócz obciążanej kolumny i jej bezpośredniego otoczenia może również wchodzić warstwa podścielająca kolumny a nawet kolumny sąsiednie.

Specyfika kolumn wykonywanych metodą wymiany dynamicznej skutkuje również powstawaniem kolumn o różnym kształcie, najczęściej niecylicyndrycznym (punkt 4.3a autoreferatu). Do postawionego już wcześniej pytania dochodzi kolejne dotyczące wpływu kształtu i sposobu oparcia kolumn na wyniki próbnych obciążeń.

Porządkując powyższe rozważania można postawić następującą tezę:

Na wyniki próbnych obciążeń kolumn, formowanych metodą wymiany dynamicznej, ma wpływ wiele czynników, między innymi takich jak: średnica płyty obciążającej, kształt kolumn, sposób ich oparcia oraz występowanie kolumn sąsiednich. W związku z powyższym interpretacja uzyskanych wyników powinna odbywać się z zastosowaniem zaawansowanych metod, uwzględniających złożoność zagadnienia, np. w postaci analizy numerycznej metodą elementów skończonych.

Przeprowadzony w rozdziale 2 pracy [1] przegląd literatury wykazał, że wpływ wspomnianych czynników jest często pomijany.

Wpływ średnicy płyty obciążającej (stosunku D_p/D_g) na wyniki próbnych obciążeń, potwierdził się w badaniach polowych, analizowanych w rozdziale 3 pracy [1]. W pierwszej grupie badań przedstawiono wyniki uzyskane na trzech różnych poletkach badawczych. Cechami wspólnymi poszczególnych poletek były: warunki gruntowe, kształt kolumn, sąsiedztwo kolumn oraz materiał, z którego były one wykonane. Badania przeprowadzono

przy różnym stosunku D_p/D_g wynoszącym: 0,55÷0,75 (poletko nr 1), 0,62÷0,7 (nr 2) i 0,17÷,58 (nr 3), w zakresie nacisków: 0÷290 kPa (nr 1), 0÷250 kPa (nr 2, 3).

Wszystkie z powyższych badań wykazały, że im stosunek średnicy płyty obciążającej (D_p) do średnicy głowicy kolumny (D_g) jest większy, tym większa jest odkształcalność kolumn (mniejsze moduły odkształcenia). Przykładowo, w przypadku pierwotnych modułów, różnice dla poszczególnych poletek wynosiły: ok. 88% (poletko nr 1), 28% (nr 2) i 328% (nr 3).

W drugiej grupie badań, zawartych w rozdziale 3 pracy [1], przedstawiono wpływ warunków gruntowo-wodnych, a przez to pośrednio kształtów kolumn, na uzyskane wyniki próbnych obciążeń. Dotyczyły one kolumn wykonanych z tego samego materiału, w różnych warunkach gruntowo-wodnych, obciążanych płytami o tym samym stosunku D_p/D_g (0,62, 0,65 i 0,55). W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono, że kolumny uformowane w gruntach charakteryzujących się większym oporem stożka w badaniach CPTU charakteryzowały się większą odkształcalnością. Powodem tego może być kształt kolumn, zależny od warunków gruntowo-wodnych [3]. W związku z tym nawet przy tym samym stosunku D_p/D_g w zasięgu działania obciążenia znajdują się kolumny o różnej objętości (większej przy podłożu o mniejszych parametrach mechanicznych) a przez to wyniki próbnego obciążenia kolumn wykazują ich różną, odmienną od przewidywanej, odkształcalność.

Ponieważ przedstawione w rozdziale 3 pracy [1] badania były prowadzone w niepełnym zakresie stosunku D_p/D_g (pierwsza grupa badań), oraz bez ustalenia jednoznacznego kształtu kolumn (druga grupa badań) wymagały one dalszego rozpoznania. Wątpliwości w odniesieniu do powyższych spostrzeżeń sprawdzono stosując analizę teoretyczną z użyciem metody elementów skończonych. Potrzebny był jednak dobór odpowiednich modeli konstytutywnych ośrodka gruntowego, ich parametrów oraz zdefiniowanie grup końcowych kształtów kolumn uzyskiwanych w praktyce. Te ostatnie, w postaci siedmiu typów kształtów, zdefiniowano na podstawie odkrywek 61 kolumn przedstawionych w pracach [1], [2] i [3], a opisanych w p. 4.3a autoreferatu.

Kolejnym etapem była budowa modelu numerycznego MES podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną oraz wybór modeli konstytutywnych i ich parametrów. Jego podstawą były wyniki polowego badania nośności kolumny wymiany dynamicznej, w postaci zależności „obciążenie-osiadanie”, kształtu badanej kolumny oraz badań laboratoryjnych gruntu ją otaczającego. Pozwoliły one na wykalibrowanie modelu przestrzennego, składającego się z czterech stref materiałowych, tj. kolumn (1), gruntu je otaczającego (2) oraz podścielającego (3) i płyty obciążającej (4).

Analiza, będąca kontynuacją a zarazem rozwinięciem wcześniej stosowanych podejść [3], (poz. nr 6, p. IIEb, załącznik nr 5), była prowadzona z uwzględnieniem konsolidacji ośrodka gruntowego.

W przypadku gruntów ziarnistych formujących kolumnę jak i warstwę występujących pod nią gruntów charakteryzujących się małą ściśliwością został zastosowany model sprężysto-

idealnie plastyczny z powierzchnią graniczną Coulomba – Mohra (C-M) i niestowarzyszonym prawem płynięcia. Słabe, odkształcalne otoczenie kolumny symulował dobrze znany i wdrożony do programów MES model stanu krytycznego o wzmocnieniu izotropowym Modified Cam-Clay (MCC). Dla płyty betonowej obciążającej kolumnę zastosowano model liniowo sprężysty. Kalibracja parametrów przyjętych modeli przebiegała dwutorowo.

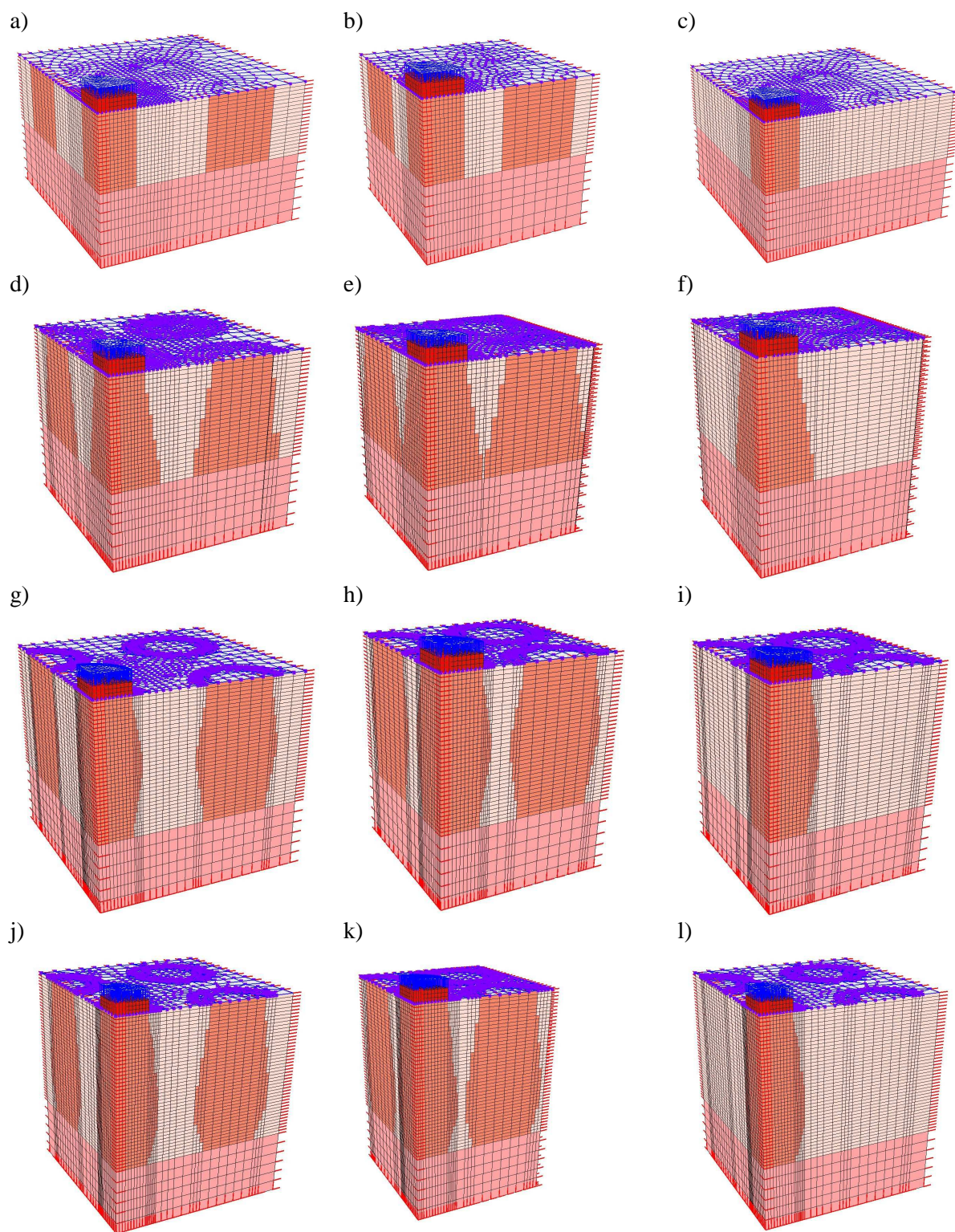
Z jednej strony zostały przeprowadzone badania laboratoryjne, z wykorzystaniem niektórych parametrów z dokumentacji oraz literatury. Dla gruntu otaczającego kolumny parametry modelu MCC przyjęto na podstawie badań edometrycznych (λ , κ wyznaczono na podstawie C_c i C_s), trójosiowych (M) oraz z literatury (ν). Wskaźnik porowatości (e_0) oraz współczynnik filtracji (k_v) określono w badaniach laboratoryjnych. Współczynnik Poissona (ν) modelu kolumn (C-M) oraz wartość współczynnika filtracji przyjęto literaturowo. Parametry modelu liniowo-sprężystego betonu (E , ν) przyjęto normowo. W przypadku warstwy podścielającej kolumny, parametry modelu C-M (E , ν , ϕ , c), przyjęto na podstawie dokumentacji geotechnicznej i literatury (ψ , k).

Z drugiej strony, pozostała część parametrów, tj. kąt tarcia wewnętrzznego, kąt dylatacji, spójność oraz moduł sprężystości modelu kolumn (C-M) zostały określone analizą wsteczną. Warunkiem było uzyskanie jak najlepszej zgodności między numeryczną krzywą „obciążenie-osiadanie” a krzywą z badań polowych. Zgodność tą potwierdziła, zbliżona do jedności, wartość zmodyfikowanego współczynnika determinacji.

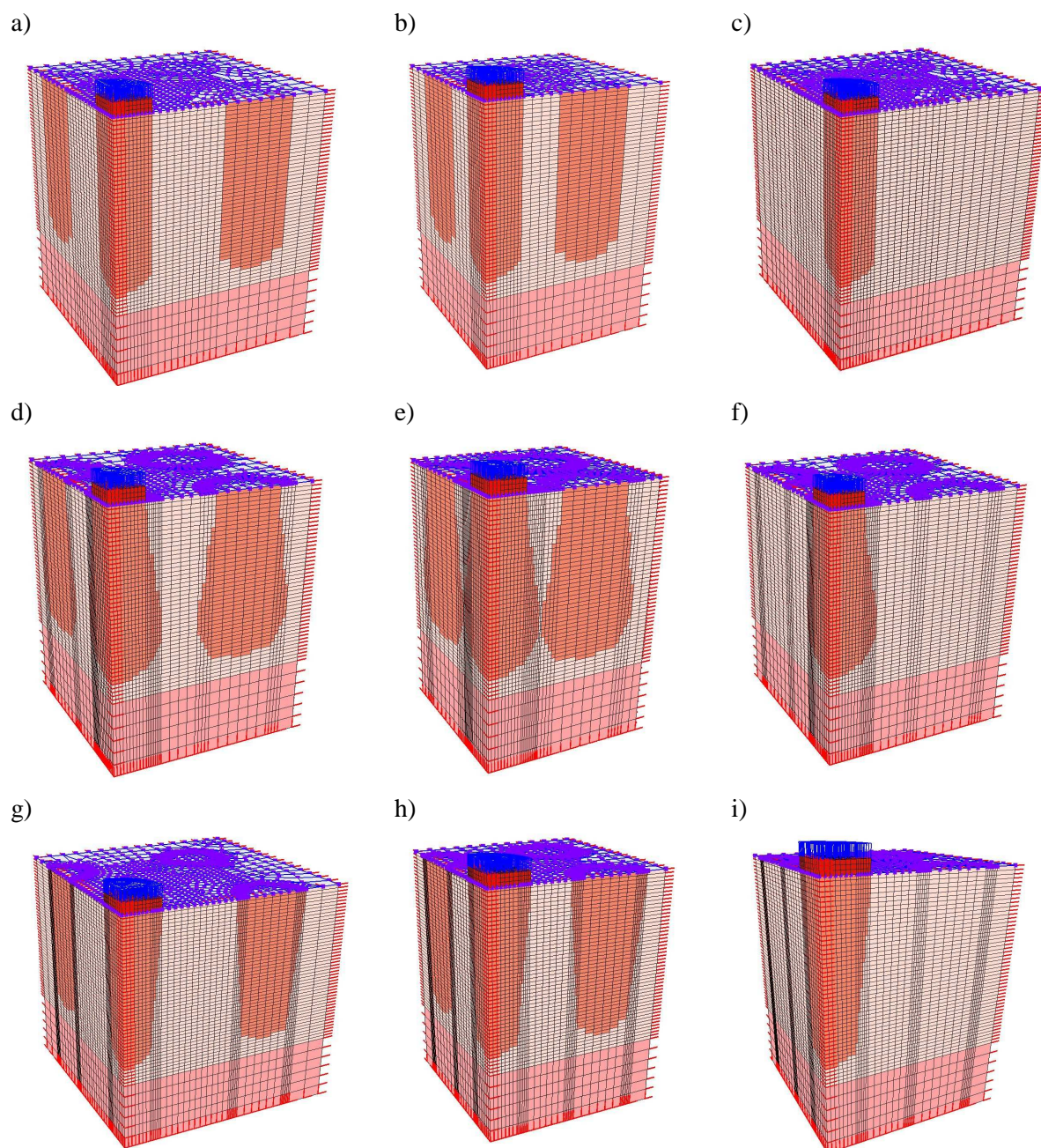
Wykalibrowane modele wraz z parametrami wprowadzonych czterech stref materiałowych zostały przyjęte w głównej analizie MES. W obliczeniach modeli przestrzennych, prowadzonych z uwzględnieniem konsolidacji ośrodków gruntowych, odwzorowano kształty poszczególnych siedmiu podgrup kolumn (Ia-IIc), obciążanych płytami, dla których stosunek ich średnicy (D_p) do średnicy głowicy (D_g) był równy: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 i 1,0, a obciążane kolumny były modelowane jako pojedyncze oraz w rozstawie półtorzej i dwukrotności średnicy głowicy-rys. 4, 5. Łącznie przeanalizowano wyniki dla 105 modeli.

W pierwszej kolejności, dla każdego z modeli, poddano analizie zależności „obciążenie – osiadanie”, zwracając przy tym uwagę na wyczerpanie nośności obciążanej kolumny. Aby podkreślić wpływ wielkości płyty obciążającej na uzyskane wyniki przeanalizowano obszar podłoża współpracującego z płytą obciążającą, a zależności „obciążenie – osiadanie” były podstawą do obliczenia pierwotnych modułów odkształcenia (E_0) wzmocnionego podłoża, tak jak odbywa się to w badaniach odbiorczych. Zwrócono również uwagę na powierzchnię stref plastycznych oraz na mechanizm zniszczenia poszczególnych grup kolumn. Analizę porównawczą przeprowadzono w dwóch przedziałach obciążeń. Pierwszy, najczęściej stosowany w praktyce, był równy od 0 do 300 kPa. Drugi obejmował obciążenia większe.

Obliczenia, wyniki oraz ich analiza wykazały, że wszystkie ze wspomnianych czynników mają wpływ na wyniki próbnych obciążeń kolumn, choć jest on różny.



Rys. 4. Modele dyskretne podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną: a) podgrupa Ia, $L=2D_g$, b) Ia, $L=1,5D_g$, c) Ia, kolumna pojedyncza, d) podgrupa Ib, $L=2D_g$, e) Ib, $L=1,5D_g$, f) Ib, kolumna pojedyncza, g) podgrupa Ic, $L=2D_g$, h) Ic, $L=1,5D_g$, i) Ic, kolumna pojedyncza, j) podgrupa Id, $L=2D_g$, k) Id, $L=1,5D_g$, l) Id, kolumna pojedyncza



Rys. 5. Modele dyskretne podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną: a) podgrupa IIa, $L=2D_g$, b) IIa, $L=1,5D_g$, c) IIa, kolumna pojedyncza, d) podgrupa IIb, $L=2D_g$, e) IIb, $L=1,5D_g$, f) IIb, kolumna pojedyncza, g) podgrupa IIc, $L=2D_g$, h) IIc, $L=1,5D_g$, i) IIc, kolumna pojedyncza

W przypadku zastosowania w próbnym obciążeniu nacisków z zakresu 0-300 kPa największy wpływ na wyniki obciążeń mają: średnica zastosowanej płyty obciążającej, sposób oparcia podstawy kolumn oraz ich kształt.

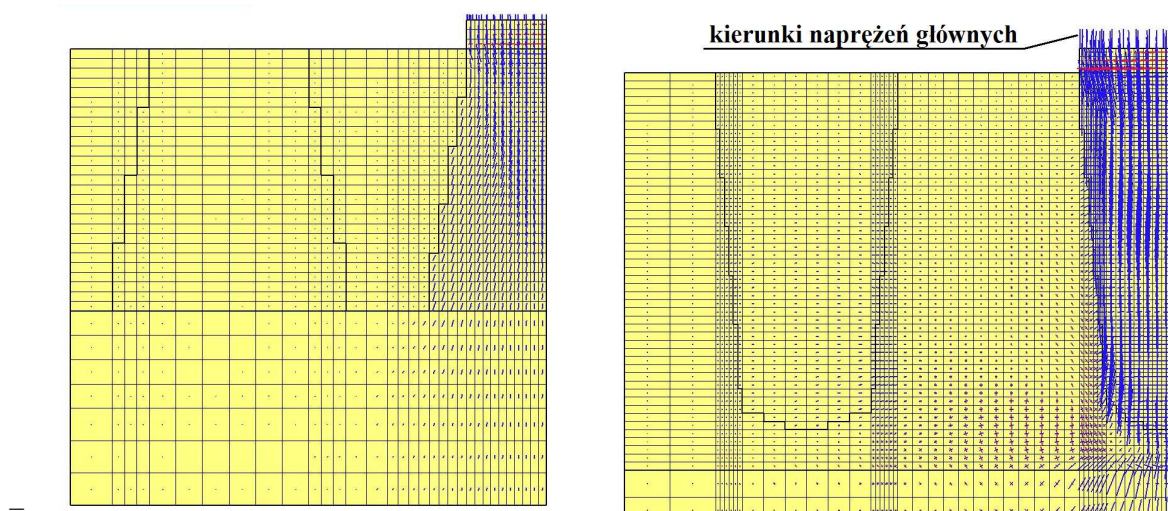
Dla płyt o średnicach z zakresu $D_p/D_g=0,2\div 1,0$, dla wszystkich podgrup kolumn, najmniejsze osiadania i największe wartości modułów odkształcenia uzyskano w przypadku zastosowania najmniejszej z płyt obciążających ($D_p/D_g=0,2$) - tab. 3. Wpływ oddziaływania takich płyt na podłoże praktycznie zamyka się w strefie samej kolumny, przez co wyniki

badania określają wartości modułu odkształcenia samego materiału kolumny. Wraz ze zwiększaniem średnicy płyty obciążającej osiadania kolumn rosną a wartości modułów odkształcenia zmniejszają się osiągając minimum dla płyt największych ($D_p/D_g=1,0$) - tab. 3. Maksymalne różnice w uzyskanych wartościach modułów dla płyty największej i najmniejszej wynoszą od 55 do 85%. Decyduje o tym sposób oparcia oraz kształt kolumn. Najmniejszą odkształcalnością charakteryzują się kolumny oparte na warstwie sztywnej, których średnica rośnie wraz z głębokością (grupa Ib), największą z kolei kolumny wiszące o stałej (IIa) i zmniejszającej się wraz z głębokością średnicy (grupa IIc). Uzyskane spostrzeżenia były zbliżone do wniosków z poletek badawczych przedstawionych w rozdziale 3 pracy [1].

Tabel 3. Zestawienie pierwotnych modułów odkształcenia poszczególnych podgrup, rozstaw kolumn $L=2D_g$, $D_p/D_g=0,2\div 1,0$

Lp.	D_p/D_g [-]	Pierwotny moduł odkształcenia, 0-300 kPa, [MPa] dla podgrupy:							E_{0max}/E_{0min} [-]
		Ia	Ib	Ic	Id	IIa	IIb	IIc	
1.	0,2	59	59	58	57	55	57	55	1,07
2.	0,4	44	47	48	47	40	45	39	1,23
3.	0,6	34	38	38	36	26	35	22	1,73
4.	0,8	28	31	27	28	16	26	11	2,82
5.	1,0	24	26	20	22	10	18	8	3,25
E_{0max}/E_{0min} [-]		2,46	2,27	2,90	2,59	5,50	3,17	6,88	

Analiza map kierunków naprężeń głównych (rys. 6) wykazała, że w przypadku kolumn opartych na warstwach sztywnych i o zwiększającej się wraz z głębokością średnicy (podgrupa Ib) kierunek składowej większej naprężeń głównych jest równoległy do poboczniczy kolumny a druga składowa ma niewielką wartość. Obciążenia przekazywane są na grunt podścielający kolumnę. W przypadku kolumn zawieszonych, w których średnica zmniejsza się wraz z głębokością (podgrupa IIc) składowe naprężeń głównych układają się na kierunkach: pionowym i poziomym oraz mają zbliżone do siebie wartości. Zwiększa to penetrację kolumny w grunt, analogicznie jak w przypadku działania klina.



Rys. 6. Mapy kierunków naprężeń głównych, $q=0-300$ kPa, $L=2D_g$, $D_p/D_g=1,0$: a) model Ib, b) IIc

Dla pozostałych kolumn z grupy I zmniejszenie wartości modułów wynosiło od 60% (kolumny o stałej średnicy - Ia i o największej średnicy w okolicy podstawy - Id) do 65% (o największej średnicy w okolicy środka kolumn - Ic).

W przypadku kolumn grupy I stosunek wartości ekstremalnych modułów odkształcenia, dla poszczególnych płyt obciążających i różnych kształtów kolumn (tab. 3), wynosi od 1,04 (dla $D_p/D_g=0,2$) do 1,3 (1,0). W przypadku kolumn grupy II zbliżoną wartość tego stosunku (1,04-1,15) uzyskano jedynie dla płyt, dla których $D_p/D_g \leq 0,4$. Dla płyt spełniających warunek $D_p/D_g \geq 0,6$ wpływ kształtu kolumn grupy II jest już większy a wspomniany stosunek wynosi od 1,59 ($D_p/D_g=0,6$) do 2,36 (0,8). W tym wypadku największą odkształcalnością charakteryzują się kolumny o średnicy zmniejszającej się wraz z głębokością (IIc) a najmniejszą z kolei kolumny o średnicy zwiększającej się wraz z głębokością (grupa IIb). Te ostatnie wpisują się swoją odpowiedzią na obciążenie w grupę kolumn opartych na warstwie sztywnej (I). Widać zatem wyraźnie jak duży wpływ na wyniki próbnych obciążeń ma kształt kolumn w grupie II.

W przypadku kolumn zawieszonych i płyt obciążających spełniających warunki: $D_p/D_g=0,8 \div 1,0$ (grupy IIa i IIb) oraz $D_p/D_g=0,6 \div 1,0$ (IIc), duży udział w osiadaniach kolumn ma grunt je podścielający. Obserwowane osiadania podstawy kolumn wynoszą od 11 do 47% osiadań głowicy, a dla płyt mniejszych jest to na poziomie 6-7%, czyli tak jak dla kolumn opartych na warstwach sztywnych (grupa I). Można uznać, że w przypadku kolumn zawieszonych grupy IIa i IIb jeżeli stosunek ich długości (H_k) do średnicy płyty obciążającej (D_p) jest równy bądź większy od ok. 4 to pracują one jak kolumny oparte na warstwie sztywnej. W przypadku kolumn grupy IIc stosunek ten jest jednak większy i wynosi ok. 4,9. Tym samym, aby w próbnych obciążeniach wychwycić fakt wykonania kolumny zawieszonej konieczne jest przeprowadzenie badań płytami spełniającymi warunek $D_p/D_g=0,8 \div 1,0$. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że w przypadku kolumn podgrupy IIb obliczone moduły

odkształcenia są jedynie o kilka procent mniejsze od grupy kolumn opartych na warstwach sztywnych (grupa I).

Najmniejszy wpływ, spośród wybranych czynników, na wyniki obciążeń w przedziale 0-300 kPa, miało sąsiedztwo kolumn. W przypadku rozstawu kolumn równego dwukrotności średnicy głowicy ($L=2D_g$) kolumny sąsiednie zmniejszały osiadania badanej do 10% (grupa Ia-Id, IIb i IIc) i 26% (grupa IIa). Zmniejszenie rozstawu do $L=1,5D_g$ powoduje zwiększenie wpływu kolumn sąsiednich, choć dla większości grup, tj. Ia-Id i IIb jest to jedynie do 13%. W przypadku kolumn podgrupy IIa i IIc, dla których zaobserwowano przekazywanie na otoczenie gruntowe naprężeń poziomych większych niż w przypadku kolumn grupy I, wpływ ten jest większy i wynosi od 22-36% (przy zastosowaniu płyty o największej średnicy, dla płyt mniejszych do 13%).

Wraz ze zwiększaniem nacisków jednostkowych ($q>300$ kPa) różnice między wynikami dla poszczególnych płyt rosną. W przypadku zastosowania w obciążeniach płyt większych ($D_p/D_g \geq 0,4$) niż najmniejsza ($D_p/D_g=0,2$) zwiększenie osiadań a tym samym zmniejszenie modułów odkształcenia wynosi do ok.: 75-91% ($D_p/D_g=0,4$), 88-97% (0,6), 96-98% (0,8) i 94-97% (1,0). Różnice te są bardzo duże, ale trzeba mieć na uwadze, że w przypadku najmniejszej z płyt nie dochodziło, w rozpatrywanym przedziale obciążenia (0-1400 kPa), do wyczerpania nośności kolumn.

Potwierdza się część spostrzeżeń zauważonych w przedziale obciążenia 0-300 kPa. Przy zastosowaniu w obciążeniach większych płyt, spełniających warunek $D_p/D_g \geq 0,6$, najmniejszą odkształcalnością charakteryzują się kolumny o poszerzającej się wraz z głębokością średnicy, oparte na warstwie sztywnej, tj. grup Ib i Id. Dla płyt mniejszych, z kolei, są to odpowiednio kolumny grupy Ic i Id. I tu następuje pewna zmiana, bo największą odkształcalnością w grupie I charakteryzują się kolumny krótkie o stałym cylindrycznym kształcie. W przypadku wszystkich kolumn i przy zastosowaniu płyt o średnicy $D_p/D_g \geq 0,4$ największą odkształcalnością cechują się kolumny podgrupy IIa i IIc, a przy $D_p/D_g=0,2$ kolumny podgrupy Ia.

Wpływ kolumn sąsiednich na wyniki obciążeń w drugiej grupie nacisków ($q>300$ kPa) jest już większy. W przypadku zastosowania we wzmocnieniu podłoża rozstawu kolumn $L=2D_g$ kolumny sąsiednie zmniejszają osiadania badanej do ok. 3% (podgrupa Ia), 5% (Ic), 10% (IIb i IIc), 15-16% (IIa) i 20% (Ib). W przypadku zastosowania mniejszych rozstawów kolumn ($L=1,5D_g$) wpływ ten jest już większy i wynosi do ok. 16% (podgrupa Ia), 21-25% (Ic i Id), 31% (IIb) i 46-50% (IIa, IIc i Ib).

Analiza uzyskanych wyników pozwoliła również na wyciągnięcie pewnych wniosków dotyczących nośności obciążanych kolumn. Wpływ na jej wartość miały: średnica płyty obciążającej, sposób oparcia kolumn oraz ich kształt.

W przypadku obciążenia kolumn najmniejszą z płyt ($D_p/D_g=0,2$) nie stwierdzono wyczerpania ich nośności, w przedziale 0-1400 kPa, we wszystkich podgrupach. Podobnie dla części kolumn, tj. podgrup Ia, Ic, Id i IIb, przy zastosowaniu płyty większej ($D_p/D_g=0,4$).

W pozostałych przypadkach zanotowano nośności kolumn dla znacznie różniących się obciążeń. Najmniejsze wartości nośności uzyskano przy stosowaniu największej z płyt obciążających ($D_p/D_g=1,0$). W tym przypadku największą nośność miały kolumny oparte na warstwie sztywnej, charakteryzujące się największą średnicą w okolicach podstawy (Ib i Id), a najmniejszą nośność odpowiednio kolumny wiszące o stałej (IIa) i zmniejszającej się wraz z głębokością średnicy (IIc). Zmniejszenie średnicy płyty obciążającej o 20% (z $D_p/D_g=1,0$ na 0,8) spowodowało zwiększenie nośności kolumn o ok.: 6% (Ia), 20% (Ib, Id, IIb), 30% (IIa, IIc) i 56% (Ic). Dla kolejnych płyt ($D_p/D_g=0,6$ i 0,4) dalsze przyrosty nośności wynosiły od 20% do 40%. W przypadku kolumn grupy I oraz kolumn grupy II i płyt spełniających warunek $D_p/D_g \leq 0,6$ (podgrupy IIa i IIb) oraz $D_p/D_g \leq 0,4$ (IIc) wyczerpanie nośności następuje w wyniku wyparcia gruntu w otoczeniu głowicy. Dla płyt większych wspomnianej grupy II jest to połączenie wyparcia gruntu spod podstawy kolumn i w okolicy ich głowic. Ze względu na zawyżenie wartości granicznych naprężeń kontaktowych w przypadku badań z użyciem płyt, dla których średnica jest mniejsza od średnicy głowicy zaleca się, w badaniu nośności, aby stosować płyty, których średnica jest równa średnicy głowicy kolumny ($D_p/D_g=1,0$).

Istotny, ze względu na nośność i odkształcalność kolumn, był również sposób modelowania zagadnienia brzegowego – analiza konsolidacji z odzwierciedleniem czasu badania. Duża prędkość zmiany obciążenia w stosunku do zdolności filtracyjnych otoczenia kolumn powoduje powstawanie nadwyżki ciśnienia wody w porach i zmniejszenia średnich naprężeń efektywnych a przez to i wytrzymałości na ścinanie gruntu otaczającego kolumnę. Rozważania autora prowadzone w warunkach z pełnym odpływem w otoczeniu kolumn, wykazały brak wyczerpania ich nośności w podobnym przedziale obciążeń i średnic stosowanych płyt. W związku z tym modelowanie pracy obciążonych kolumn w analizach MES powinno odbywać się z uwzględnieniem warunków filtracji wody w porach gruntów.

Przeprowadzone i opisane badania pozwoliły na pozytywne zweryfikowanie tezy pracy [1].

Wykonana analiza wykazała, że ocena, badanych w próbnym obciążeniu kolumn, jedynie na podstawie obliczonego modułu odkształcenia, jest niejednoznaczna. Może ona prowadzić do błędnych wniosków, np. do dyskwalifikacji kolumny badanej płytami o średnicach zbliżonych do głowicy kolumny (uzyskanie zbyt małej wartości modułu odkształcenia) lub dopuszczenia kolumny zawieszanej (zastosowanie zbyt małej średnicy płyty obciążającej). Dlatego też, interpretacja wyników próbnego obciążenia powinna odbywać się na podstawie zaawansowanych analiz numerycznych metodą elementów skończonych, z zastosowaniem odpowiednich modeli konstytutywnych, w których oprócz znajomości podłoża gruntowego i jego parametrów, konieczne jest rozpoznanie kształtu kolumny, sposobu oparcia jej podstawy oraz uwzględnienia wpływu kolumn sąsiednich.

Można stwierdzić, że powyższe wyniki badań służą udoskonaleniom metod opisu kolumn jak i ułatwiają projektowanie oraz prowadzenie badań odbiorczych podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną.

Przedstawione, w p. 4.3, prace prowadziłem w płaszczyźnie doświadczalnej oraz teoretycznej.

W zakresie doświadczalnym, za największe osiągnięcia uważam:

- opracowanie klasyfikacji kolumn wymiany dynamicznej pod kątem ich kształtu,
- określenie wpływu formowanej kolumny wymiany dynamicznej na grunty pylaste i piaszczysto-pylaste w warunkach polowych,
- określenie wpływu średnicy płyty obciążającej i warunków gruntowo-wodnych na wyniki próbnych obciążeń.

W przypadku prac teoretycznych, związanych z modelowaniem MES, za najważniejsze osiągnięcie uważam:

- stworzenie modelu numerycznego podłoża wzmocnionego wymianą dynamiczną,
- określenie wpływu wybranych czynników, tj.: średnicy płyty obciążającej, kształtu i sposobu oparcia kolumn oraz występowania kolumn sąsiednich na wyniki próbnych obciążeń.

4.4. Kierunki dalszych prac

Swoje dalsze prace zamierzam poświęcić zarówno problematyce eksperymentalnej jak i teoretycznej.

W zakresie doświadczalnym dotyczącym wymiany dynamicznej planuje między innymi:

- o kontynuację badań nad kształtem kolumn w warunkach polowych i uzupełnianie bazy danych (wyników odkrywek kolumn),
- o zbadanie procesu formowania kolumn wymiany dynamicznej w warunkach laboratoryjnych i polowych celem jego optymalizacji,
- o sprawdzenie i aplikację metod geofizycznych do badań kształtu kolumn wymiany dynamicznej w warunkach polowych (częściowo realizowane, poz. 16, p. IIEb, załącznik nr 5),
- o określenie wpływu formowania pojedynczych kolumn na otoczenie gruntowe w warunkach polowych, odmiennych od sprawdzonych (p. 4.3b) (np. grunty organiczne, mineralne średnio i zwięzłe spoiste),
- o określenie wpływu formowania grupy kolumn na otoczenie w różnych warunkach gruntowo-wodnych.

W przypadku jednego ze wspomnianych zagadnień wykonywana jest praca doktorska mgra inż. Roberta Musiała pt. „Analiza teoretyczna i doświadczalna procesu formowania

kolumny w technologii wymiany dynamicznej”, pod kierunkiem dr hab. inż. Jerzego Sękowskiego, prof. Pol. Śl., w której jestem promotorem pomocniczym (załącznik nr 9).

Dalsze prace teoretyczne, nawiązujące do prac doświadczalnych, będą związane z zagadnieniami modelowania wymiany dynamicznej przy pomocy metody elementów skończonych i tzw. metod bezsiatkowych (np. metodą punktów materialnych). W tych kwestiach planuję:

- o dalsze prace nad modelem MES podłoża wzmocnionego metodą wymiany dynamicznej (modele konstytutywne i ich kalibracja),
- o stworzenie modelu odzwierciedlającego proces formowania kolumny wymiany dynamicznej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych, świadczących o istotnej aktywności naukowej habilitanta

Oprócz działalności naukowo-badawczej dot. wzmocnienia podłoża metodą wymiany dynamicznej w obszarze zainteresowań autora znajdują się dwie inne grupy zagadnień.

Pierwsza dotyczy innych metod wzmocnienia podłoża gruntowego wchodzących w skład inżynierii geotechnicznej a w szczególności ich wpływ na ośrodek gruntowy. W swojej pracy badawczej autor zajmował się takimi metodami wzmocnienia jak: dynamiczne zagęszczenie podłoża gruntowego (publikacja: poz. 13, p. IIEb), stabilizacją chemiczną: wapnem (publikacja: poz. 26, p. IIEb, poz. 13, p. IIF, poz. 21, p. IIL załącznik nr 5), cementem (publikacja: poz. 15, p. IIEb, poz. 11, p. IIF, załącznik nr 5), stabilizacją warstw powierzchniowych georusztem (publikacja: poz. 9, p. IIL, załącznik nr 5), zbrojeniem gruntu siatkami stalowymi (publikacja: poz. 5, p. IIEb, załącznik nr 5).

Podejmowane badania wykonywane były w terenie jak i w laboratorium. W przypadku tych pierwszych były prowadzone próbne obciążenia płytami o różnych średnicach i szerokościach, w tym wielkogabarytowe próbne obciążenia. W przypadku badań laboratoryjnych wyznaczano parametry fizyczno-mechaniczne z wykorzystaniem podstawowej aparatury geotechnicznej (np. edometr, aparat bezpośredniego ścinania, itp.).

Uzyskane wyniki stanowią cenne źródło informacji dla projektantów tego typu wzmocnień i były w większości publikowane w czasopismach krajowych.

W przypadku jednego ze wspomnianych zagadnień wykonywana jest praca doktorska mgra inż. Marcina Ćwirko pt. „Analiza współpracy stalowych siatek zgrzewanych z gruntem w konstrukcjach oporowych wykonywanych w technologii murów gabionowych” pod kierunkiem dr hab. inż. Małgorzaty Jastrzębskiej, prof. Pol. Śl., w której jestem promotorem pomocniczym (załącznik nr 9).

Drugi kierunek zainteresowań autora stanowi posadowienie obiektów zabytkowych. Autor brał wielokrotnie udział w zespołach interdyscyplinarnych rozwiązujących problemy wybranych zabytków. Celem badań była pomoc w utrzymaniu tych obiektów oraz ich popularyzacja. Wszystkie badania prowadzone były pod patronatem Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w ramach tzw. Zabytku roku na Wydziale Budownictwa. Badania geotechniczne prowadzone były pod kierunkiem Dra hab. inż. Jerzego Sękowskiego, prof. Pol. Śl. Uzyskane wyniki były publikowane w monografiach krajowych (poz. 3, 5, 7, 8, 9 w p. IIEa, oraz poz. 14, p. IIEb, załącznik nr 5).

Stawpui r Kwiecien'