

Autoreferat

1. Dane osobowe

Waldemar Stanisław SZAJNA

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania:

- 1986 Dyplom magistra inżyniera, specjalności konstrukcje budowlane i inżynierskie. Praca magisterska *Projekt dwunawowej hali stalowej z analizą optymalnego doboru układu poprzecznego*. Wyższa Szkoła Inżynierska w Zielonej Górze.
- 2000 Stopień doktora nauk technicznych. Praca doktorska: *Interakcja konstrukcji z podłożem gruntowym w warunkach płaskiego stanu odkształcenia*. Politechnika Zielonogórska. Promotor prof. dr hab. inż. Romuald Świtka.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

3.1. Miejsce zatrudnienia

Uniwersytet Zielonogórski (wcześniej Politechnika Zielonogórska i Wyższa Szkoła Inżynierska)
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska,
Instytut Budownictwa,
ul. Prof. Z. Szafrana 1,
65-516 Zielona Góra

3.2. Przebieg pracy i pełnione funkcje:

- asystent (1988 – 1996) w Zakładzie Mechaniki Budowli,
- wykładowca (1996 – 2000) w Zakładzie Mechaniki Budowli,
- adiunkt (2000 – 2016) w Zakładzie Mechaniki Budowli, od 2007 w Zakładzie Geotechniki i Geodezji,
- starszy wykładowca (2016 –) w Zakładzie Technologii Budownictwa, Geotechniki i Geodezji.

- kierownik Zakładu Geotechniki i Geodezji (2008 – 2015).
- kierownik Zakładu Technologii Budownictwa, Geotechniki i Geodezji (2016 –).

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Współdziałanie konstrukcji budowlanych z podłożem: Interpretacja badań gruntu i analizy numeryczne zagadnień geotechniki

4.2. Dane bibliograficzne monografii stanowiące podstawę wniosku i recenzenci wydawniczy

Szajna W.St. (2017) *Współdziałanie konstrukcji budowlanych z podłożem: Interpretacja badań gruntu i analizy numeryczne zagadnień geotechniki*, Wyd. KILiW PAN, Warszawa, s. 330.

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Maciej Gryczmański,
 prof. dr hab. inż. Zbigniew Młynarek.

4.3. Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich ewentualnego wykorzystania

4.3.1. Wstęp – przedmiot badań i motywacja

W analizie zagadnień współdziałania budowli z podłożem w literaturze przedmiotu występują dwa podejścia. Pierwsze, skoncentrowane jest na problemach modelowania budowli, uwzględnia niejednorodne, degradujące się cechy materiałów, podatność złączy elementów konstrukcyjnych, problemy stateczności czy też zmiany sztywności podczas wznoszenia. W podejściu tym oddziaływania podłoża sprowadzane są na drugi plan. W skrajnych przypadkach podłoże uwzględniane jest w postaci modeli nazywanych analogami (np. modele powierzchniowe: Winklera, Pasternaka czy Hetenyi'ego) ewentualnie w postaci półprzestrzeni lub warstwy sprężystej. Sytuacja taka występuje zazwyczaj w przypadkach, gdy złożona budowla spoczywa na powierzchni gruntu o dobrych właściwościach mechanicznych oraz w problemach dynamiki budowli. W drugim podejściu eksponowane są problemy modelowania podłoża, zaś marginalizowane są zagadnienia dotyczące konstrukcji. Cechy sprężyste, plastyczne i lepkie gruntu odwzorowane są realistycznie w zakresie dużych i małych odkształceń, a parametry modelu kalibrowane są w badaniach elementowych gruntu przy reprezentatywnych ścieżkach naprężenia. Analiza zjawisk zachodzących w konstrukcji jest jednak minimalizowana i sprowadzana do odwzorowania jedynie jej geometrii oraz sztywności, w sensie ciała sprężystego. Przypadek taki ma miejsce zazwyczaj, gdy problemy geotechniczne dominują w analizowanym zagadnieniu, np. podłoże jest silnie odkształcalne lub konstrukcja jest w nim zagłębiona – grunt jednocześnie przenosi obciążenia i je wywołuje. Istotne staje się wówczas realistyczne odwzorowanie zachowań mechanicznych podłoża i modelowanie warunków kontaktu podukładów, pozwalające na ich lokalną separację i poślizgi.

Zainteresowania naukowe autora ewoluowały od metod numerycznych i podejścia pierwszego, skupionego na konstrukcjach (w tym żelbetowych i zespolonych), w kierunku badań gruntu i podejścia drugiego. Na taką drogę badawczą z jednej strony miał wpływ półroczny staż naukowy, przed obroną doktoratu, w Instytucie Geotechniki Uniwersytetu Manchester u prof. I.M. Smitha, ówczesnego redaktora naczelnego *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, z drugiej zaś udział w warsztatach *Soil mechanics in engineering practice*, w 2008 roku w Dreźnie, prowadzonych dla kilkunastoosobowej grupy słuchaczy przez prof. J. Atkinsona z Imperial College w Londynie. Istotną rolę odegrał również fakt znacznego unowocześnienia Laboratorium Geotechniki Uniwersytetu Zielonogórskiego, w wyniku realizacji grantów, które opisano w punkcie [L1], zał. 3.

W monografii będącej podstawą niniejszego wniosku, analizowano dwa przykłady konstrukcji zagłębionych w gruncie: żelbetową, cylindryczną studnię startową, osadzoną w ile zastoisowym, poddaną dużym obciążeniom poziomym w trakcie mikrotunelowania oraz konstrukcję gruntowo-powłokową stanowiącą przepust, której wiotka powłoka stalowa obciążana jest zasypką gruntową w trakcie wznoszenia obiektu. W obu przypadkach starano się, aby stopień złożoności użytych modeli budowli i podłoża oraz warunków kontaktu był zbliżony. Pewnym nieuniknionym ryzykiem, związanym z zajęciem się interdyscyplinarnymi problemami, obejmującymi zarówno konstrukcję jak i podłoże, może być nie w pełni satysfakcjonujące specjalistów od konstrukcji potraktowanie problemów budowli i analogiczna krytyka ze strony specjalistów mechaniki gruntów, dotycząca modelowania podłoża.

Wybór obiektów (studnia oraz konstrukcja gruntowo-powłokowa), dla których wykonano analizy, inspirowany był współpracą autora z przemysłem, instytucjami badawczymi i projektowymi. W przypadku studni była to współpraca z biurem projektów i wytwórcą studni żelbetowych oraz przedstawicielami firmy projektującej i produkującej głowice do mikrotunelowania (punkt [Q3], zał. 3), w przypadku konstrukcji gruntowo-powłokowych – współpraca z filią Instytutu Badawczego Dróg i Mostów [Q1], zał. 3.

Zarówno budowla jak i podłoże mają swoją specyfikę. Większość materiałów i elementów konstrukcyjnych posiada dwa atrybuty:

- kształt elementów konstrukcyjnych i stosowane materiały są świadomie dobierane przez projektanta,
- materiały i konstrukcje wytwarzane są pod kontrolą inżynierów według zaprojektowanych receptur i poddawane są badaniom sprawdzającym wartości parametrów oraz ich powtarzalność.

Na tym tle charakterystyka gruntów stanowiących podłoże jest następująca:

- jest to materiał naturalny, tworzony poza kontrolą człowieka, o jego cechach i rozmieszczeniu składników decydują procesy geologiczne, rozległe w czasie i przestrzeni,
- grunt jest ośrodkiem rozdrobnionym, o potencjalnie dużych różnicach rozmiarów komponentów i odmiennych siłach determinujących zachowania mikroskopijnych cząstek i dużych ziaren,

- jest to ośrodek trójfazowy, w którym przynajmniej część porów wypełnia woda, a istotną rolę odgrywają oddziaływania mechaniczne pomiędzy fazami (w przypadku ilów ważne są także oddziaływania elektryczne i chemiczne).

Konsekwencje dotyczące modelowania i badania gruntu, wynikające z powyższych cech, są wielorakie. Ze względu na oddziaływania pomiędzy fazami, analizy należy prowadzić posługując się naprężeniami efektywnymi i parametrami efektywnymi. Z powodu rozdrobnienia ośrodka należy określić nie tylko rodzaj gruntu (skład mineralny, uziarnienie i kształt ziaren), ale także jego stan (porowatość, gęstość, historię zmian stanu naprężenia, itd.) oraz strukturę (układ cząstek lub ziaren i powiązania pomiędzy nimi). Rozdrobnienie i wielofazowość powodują, że grunt deformując się pod obciążeniem zmienia porowatość. W ośrodku nasyconym następuje przepływ wody, bądź zmiana jej ciśnienia. Rozdrobnienie sprawia, że duża część deformacji, będąca wynikiem poślizgów i pękania składników, ma charakter nieodwracalny. Układ dostosowuje się w ten sposób do wielkości i kierunku aktualnie działających naprężeń (naprężeń prekonsolidacji). Trwała zmiana konfiguracji składników, wywołana tym naprężeniem, traktowana jest, jako swoiste 'zapamiętanie' naprężenia prekonsolidacji. Ze względu na usytuowanie gruntu, jego rozdrobnienie i wielofazowość, jest to materiał trudno dostępny badaniom (nieznany materiał znajduje się pod powierzchnią terenu, a wykonując badania *in-situ* czy też pobierając próbki, łatwo jest naruszyć stan lub strukturę ośrodka, bądź zmienić naprężenia efektywne, co znacząco wpływa na wyniki badań). Przy opisie makroskopowym grunt charakteryzuje się potencjalnie dużą zmiennością cech i rozstępem wartości parametrów. Z powodu nieznanego *a priori* rozmieszczenia poszczególnych rodzajów gruntu, zmienności jego stanu i struktury w przestrzeni, podłoże należy każdorazowo rozpoznać za pomocą odpowiednio dobranych badań.

Clayton i in. (1995) podają, że jedynie niespełna milionowa część objętości gruntu współdziałająca z budowlą poddawana jest bezpośrednim testom. Oznacza to, że w analizach inżynierskich występuje poważny deficyt informacji o cechach gruntu. Oznacza to także, że wszelkie źródła danych o podłożu, winny być w racjonalny sposób wykorzystane, a tworzenie jego modelu powinno być procesem iteracyjnym, w którym informacje z wcześniejszych etapów badań sugerują metodykę kolejnych badań.

Powyższe czynniki sprawiły, że część monografii dotycząca interakcji konstrukcji z gruntem poprzedzona została obszernymi rozważaniami dotyczącymi budowy modelu podłoża i interpretacji wyników badań gruntu. Zagadnienie tworzenia jego modelu dyskutowane było w kilku skalach: w skali modelu geologicznego, w skali podłoża bezpośrednio przenoszącego obciążenia od budowli, w skali próbki i w skali ziaren gruntu. Powyższe zmiany perspektywy opisu miały na celu z jednej strony krytyczną ocenę stosowanych w danym przypadku narzędzi badawczych, z drugiej zaś umożliwić ocenę potencjalnych możliwości związanych z charakterystyką problemu w analizowanej skali. Kluczem, wg którego oceniano możliwości badawcze w poszczególnych skalach były trzy zasadnicze cechy mechaniczne gruntu stosowane w jego opisie makroskopowym (wytrzymałość, szytywność i zdolności filtracyjne).

W kolejnych rozdziałach pracy omówiono rolę modelu w analizach interakcji budowli z podłożem i badaniach inżynierskich (rozd. 1), rolę badań geologicznych w rozpoznaniu podłoża (rozd. 2) oraz rolę pomocniczych cech opisu gruntu (natury, stanu i struktury), a także wpływ braku precyzji tego opisu na obraz spodziewanych cech mechanicznych podłoża (rozd. 3). Rozdział ten kończy analizę pomocniczych cech opisu gruntu.

W rozdz. 4 przedstawiono narzędzia służące do makroskopowego opisu zasadniczych, mechanicznych cech gruntu. Zdefiniowano w nim niezmienniki stanu naprężenia i odkształcenia, ścieżki i przestrzenie naprężeń oraz oceniono możliwości badawcze podstawowych aparatów służących do laboratoryjnego określania tych cech. Rozdział 5 zawiera szeroki przegląd podstawowych reakcji gruntów na obciążenia. Analizowano w nim wytrzymałość, szytywność i zdolności filtracyjne gruntów. Wyodrębniono zachowania tzw. gruntów podręcznikowych (niescementowanych piasków kwarcowych i ilów) oraz tzw. gruntów pośrednich (o bardzo zróżnicowanym uziarnieniu). W rozdz. 6 przedstawiono mikroskopowy opis cech mechanicznych gruntu. Wskazano na potencjalne możliwości modelowania zachowań gruntu metodą elementów dyskretnych. Przedstawiono także związki pomiędzy morfologią ziaren, wytrzymałością krytyczną oraz genezą gruntów gruboziarnistych. Podsumowując opis makroskopowy i mikroskopowy mechaniki gruntów, sformułowano hipotezę przystosowania strukturalnego ośrodka rozdrobnionego, wyjaśniającą zjawisko 'pamięci' gruntu. W rozdz. 7 omówiono terenowe badania geoseismiczne i geomechaniczne podłoża. Przedstawiono autorskie przykłady, wskazujące na trudności interpretacji wyników badań gruntów niepodręcznikowych. Rozdział 8 zawiera krótki przegląd badań kontaktu materiałów konstrukcyjnych z gruntem. W zasadniczym, najbardziej

obszernym rozdz. 9 zaprezentowano rozwiązania zadań współdziałania budowli i podłoża, opisano także zastosowane modele żelbetu i gruntu. W rozdz. 10 przedstawiono podsumowanie pracy oraz wnioski.

Przedstawiony układ monografii podporządkowany został logice wywodu i hierarchii ważności omawianych problemów. Każdy rozdział kończy się bibliografią. Ze względu na stosunkowo szeroki zakres tematyczny, liczbę cytowanych prac należało ograniczyć do niezbędnego minimum. Pomimo tego sumaryczna liczba niezależnych pozycji bibliograficznych przekracza 400. Wybór prac był zadaniem trudnym i autor ma świadomość, że wielu wartościowych i ważnych publikacji nie omówiono.

4.3.2. Cele naukowe i ważniejsze wyniki badań

Zasadnicze cele monografii, mające swoje odzwierciedlenie w jej tytule, można sformułować następująco:

1. wskazanie możliwości i zagrożeń powstających na kolejnych etapach budowy modelu podłoża, związanych z interpretacją wyników badań gruntu, a także planowaniem ich właściwej sekwencji i zakresu.
2. sformułowanie i rozwiązanie pewnej klasy zadań interakcji budowli z podłożem, w których konstrukcje są zagłębione w gruncie, z analizą wrażliwości modeli na zastosowane uproszczenia i wartości użytych parametrów.

Tak określone cele są próbą ustosunkowania się autora do dwóch źródeł niepewności powstających w procesie modelowania (Phoon, 2008) – niepewności danych i niepewności modelu.

Powyższe dwa zasadnicze cele pracy, w poszczególnych rozdziałach przekładają się na pewne cele szczegółowe, i tak w pierwszym rozdziale przedstawiono rolę modelowania w rozwiązywaniu zagadnień współdziałania budowli z podłożem. Modelowanie jest próbą opisu relacji pomiędzy przyczynami i skutkami procesów fizycznych, jest więc próbą ich zrozumienia i przewidywania ich skutków. Ponieważ procesy wywoływane są przez wiele przyczyn i są zazwyczaj złożone, model jest uproszczonym opisem rzeczywistości. Kluczową rolę przy jego tworzeniu odgrywa wskazanie, które z czynników są najistotniejsze w modelowanym procesie. Czynniki te stanowią rdzeń modelu. Ostatecznie model przyjmuje postać relacji matematycznych, pozwalając na symulację procesów mechanicznych i ilościową analizę wyników. Spośród zadań mechaniki można wyodrębnić zadania proste (zadania analizy) i zadania odwrotne (pomiaru, syntezy i identyfikacji). Rozwiązania zadań odwrotnych mogą być niejednoznaczne. W pracy wskazano również na celowość wyodrębnienia w zagadnieniu interakcji modelu konstrukcji, modelu podłoża i modelu warunków kontaktu. Postuluje się ponadto, aby stopień złożoności trzech wyodrębnionych powyższych modeli był zbliżony, co umożliwi realistyczną ocenę wrażliwości całego układu na elementy zawarte w rdzeniach poszczególnych modeli składowych.

Celem rozdz. 2 było przedstawienie potencjalnych możliwości rozpoznania podłoża na podstawie badań geologicznych. Geologia posługuje się aparatem wnioskowania o cechach i spodziewanym rozmieszczeniu osadów, na podstawie wiedzy o procesach zachodzących w przeszłości i analizie form geomorfologicznych, które są obecnie obserwowane w terenie. Z inżynierskiego punktu widzenia podejście takie jest cenne w tym sensie, że charakterystyka gruntu tworzona jest w dużej mierze na podstawie innych źródeł wiedzy niż bezpośrednie badania (wiercenia, testy *in-situ*, czy analizy laboratoryjne), będące zasadniczą domeną inżynierskiego rozpoznania ośrodka. Należy jednak pamiętać, że parametry mechaniczne, stanowiące sedno analizy geotechnicznej, są na peryferiach zainteresowań geologii. W rozdziale omówiono relacje pomiędzy procesami geologicznymi, formami geomorfologicznymi i osadami. Skoncentrowano się na przedstawieniu logiki procesów kształtujących dwa powszechnie spotykane na terenie Niżu Polskiego środowiska sedymentacji – środowisko rzeki meandrującej i środowisko związane z oddziaływaniem lądolodu. Dla każdego z nich pokazano modelowe profile sedymentacyjne. Przedstawiono metodkę tworzenia modelu geologicznego rekomendowaną w ostatnich kilku latach przez Międzynarodowe Stowarzyszenie Geologii Inżynierskiej i Środowiskowej (Parry i in., 2014). Zwrócono jednak uwagę, że wnioskowanie geologiczne powszechnie wykorzystuje analizy odwrotne, których rezultaty mogą być niejednoznaczne. Z punktu widzenia analizy interakcji konstrukcji i podłoża, modele geologiczne pomimo iż są ważne, stanowią jedynie pojęciowe modele opisowe i mają zazwyczaj charakter jakościowy.

Kolejnym etapem tworzenia modelu podłoża jest określenie pomocniczych cech opisu gruntu, w tym dokonanie jego klasyfikacji i oceny stanu. Prawdłowo określone cechy pomocnicze powinny dawać pewien wstępny obraz spodziewanych reakcji mechanicznych ośrodka na obciążenie budowlą. Ich

niewłaściwe wyznaczenie zniekształca ten obraz. W rozdz. 3 analizowano skuteczność metod klasyfikacji gruntów spoistych i metod badania stopnia zagęszczenia I_D . Do weryfikacji metod klasyfikacyjnych użyto 26 gruntów ilastych opisanych w pracy (Grabowska-Olszewska i in., 1984), w których w 18 zawartość frakcji iłowej f_i wynosiła ponad 30%. Określono ją na podstawie analizy sedymentacyjnej i mikroagregatowej. Według powszechnie stosowanej w kraju metody bazującej na założeniu $f_i \approx I_p$ (I_p jest wskaźnikiem plastyczności), jedynie 2 spośród gruntów zakwalifikowano by jako iły, zaś użycie metody wykresu plastyczności Casagrande'a sprawia, że aż 16 próbek kwalifikowanych byłoby jako iły. Zaniżając zawartość frakcji iłowej, zniekształca się jeden z ważniejszych elementów charakterystyki gruntów droбноziarnistych.

Podobny brak precyzji występuje przy określaniu parametrów stanu. Stopień zagęszczenia piasku wyznaczany krajową metodą widełek wibracyjnych jest dużo wyższy niż parametr ten określany np. metodą młota wibracyjnego (metoda rekomendowana przez normę EC-7). Ponadto metoda widełek cechuje się dużym rozstępem wyników, zaś parametr I_D , ze względu na sposób jego zdefiniowania, jest bardzo wrażliwy nawet na niewielkie błędy pomiarowe. Wobec powyższego, w złożonych zagadnieniach geotechniki, określenie stopnia zagęszczenia powinno być jedynie elementem ogólnej charakterystyki ośrodka, a nie etapem w procedurze wyznaczania parametrów mechanicznych. Obydwa omówione przykłady pokazują, że duży wpływ na niepewność danych w modelu mają błędy lub braki precyzji stosowanych procedur badawczych.

Rozdział 4 pełni rolę pomocniczą w stosunku do dalszych części monografii. Opracowano go, podobnie jak kolejny rozdział, na podstawie analizy literatury przedmiotu. Przedstawiono w nim narzędzia służące do makroskopowego opisu cech mechanicznych gruntu. Pierwsza część tego rozdziału pełni rolę formalną. Zdefiniowano w niej niezmienniki stanu naprężenia i odkształcenia, przestrzenie naprężeń i główne ścieżki naprężeń. Celem drugiej części była ocena możliwości badawczych podstawowych aparatów do laboratoryjnego badania cech mechanicznych gruntu (edometru, konwencjonalnego i 'prawdziwego' aparatu trójosiowego ściskania, aparatów prostego i kierunkowego ścinania, aparatu wydrążonego cylindra). Kanwę do oceny stanowił opis zmian stanu naprężenia, któremu podlega podłoże obciążone budowlą. W wyniku oddziaływań budowli zmianom podlegają nie tylko wartości naprężeń, ale także proporcje naprężeń głównych oraz ich kierunki. Na tym tle oceniono możliwości symulowania takich zmian w omawianych aparatach. W konkluzjach wskazano, że większość aparatów jest w stanie realizować jedynie najprostsze ścieżki naprężenia, a ten sam parametr określany w różnych aparatach, generujących nieco odmienne ścieżki, może mieć znacznie różne wartości.

Modelowanie zagadnień współdziałania budowli i podłoża wymaga wiedzy o tym, jak materiały występujące w podkładach (budowli i podłożu) reagują na obciążenia. Celem rozdz. 5 było dokonanie przeglądu zachowań mechanicznych gruntów poddanych wybranym ścieżkom naprężenia. Omówiono wyniki badań elementowych wytrzymałości, sztywności i zdolności filtracyjnych. Przegląd obejmuje typowe reakcje na obciążenie gruntów podręcznikowych, stanowiąc podstawy laboratoryjne teorii stanu krytycznego, której zasadniczymi elementami są: sprzężenie pomiędzy naprężeniem średnim, wytrzymałością i zmianami objętości (lub ciśnienia porowego), stałość położenia linii normalnej ściśliwości i linii (powierzchni) stanu krytycznego oraz niezależność tego położenia od stanu początkowego ośrodka. W przeglądzie przedstawiono także zachowania gruntów pośrednich, których reakcje na obciążenie nie dają się ująć tą teorią. W rozdziale pokazano konsekwencje historycznych uchybień w definiowaniu wytrzymałości w warunkach obciążenia z drenażem i bez drenażu (chodzi tu o pominięcie wpływu naprężenia pośredniego na kąt tarcia wewnętrznego i wytrzymałość bez drenażu). Omówiono wpływ wielkości odkształceń na parametry wytrzymałości i sztywności. Uwypuklono ponadto wpływ historii obciążenia, wpływ anizotropii pierwotnej i indukowanej naprężeniami oraz wpływ czynników strukturalnych na odpowiedzi gruntu na realizowaną ścieżkę naprężenia.

Biorąc pod uwagę dostępne narzędzia mechaniki, których zasadnicza część wiąże się z modelowaniem ośrodków ciągłych (definiowaniem ciągłych, różniczkowalnych funkcji, w ciągłych przestrzeniach, czego konsekwencją jest możliwość używania pojęć naprężeń i odkształceń) oraz wyraźnie dyskretną, cząsteczkową i wielofazową budowę gruntu, uwidacznia się dwoistość matematycznego opisu i laboratoryjnych obserwacji. Zalety podejścia fenomenologicznego, polegające na pomijaniu struktury ośrodka i koncentrujące się na reakcjach na obciążenia, stają się jego podstawowymi ograniczeniami. Wyniki badań laboratoryjnych pokazują, że wiele procesów w ośrodku rozdrobnionym ma charakter nieciągły, występuje np. lokalizacja odkształceń. Próby 'uciągania' wiążą się z uśrednianiem opisu zjawisk, zaciemniając ich przebieg lub alternatywnie prowadzą do bardzo

skomplikowanych zależności konstytutywnych. Celem rozdz. 6 było pokazanie nowych możliwości opisu związanych ze zmianą perspektywy z makroskopowej na mikroskopową.

Rozdział szósty składa się z dwóch części. W części pierwszej omówiono rolę metody elementów dyskretnych (DEM) w opisie mikroskopowym. Pokazano także, że zasadniczy wpływ na zachowanie gruntów gruboziarnistych mają siły masowe, zaś gruntów drobnoziarnistych – siły powierzchniowe. Oczywiście w obu przypadkach istotne są także tzw. siły szkieletowe, będące wynikiem obciążeń od budowli. Obserwując procesy w skali makroskopowej zachodzące w obciążonym ośrodku rozdrobnionym uwiadamia się wrażliwość tego ośrodka na historię zmian stanu naprężenia. Materiał niejako 'pamięta' nie tylko wartości naprężeń prekonsolidacji, ale także kierunek tych naprężeń. Odmienne są reakcje na obciążenie gruntu konsolidowanego izotropowo i konsolidowanego ścieżką K_0 . Na tym tle rodzi się pytanie: gdzie ulokowana jest owa 'pamięć', co jest jej nośnikiem i jaki jest mechanizm jej działania. Rozważania zawarte w pierwszej części rozdz. 6 pozwoliły udzielić odpowiedzi na te pytania. Sformułowano tu hipotezę nazwaną *przystosowaniem strukturalnym gruntu do zrealizowanej ścieżki naprężenia*. Przypomnijmy, że przez strukturę rozumie się geometryczny układ cząstek lub ziaren gruntu oraz powiązania pomiędzy nimi. Wyniki DEM wskazują, że w gruntach gruboziarnistych oddziaływania pomiędzy ziarnami mają wybitnie dyskretny charakter. Przy danym sposobie obciążenia zewnętrznego tworzy się w ośrodku konkretna sieć sił szkieletowych. Jej układ jest zgodny z kierunkami obciążenia. Ziarna na liniach sił (ziarna zasadnicze) są silnie obciążone, zaś sąsiednie ziarna (pomocnicze), przez które linie nie przechodzą, mogą być obciążone nieznacznie. Kolumny ziaren zasadniczych mogą tracić stateczność, a same ziarna mogą ulegać pękaniu. Ziarna pomocnicze wspomagają utrzymanie stateczności kolumn, stanowiąc dla nich niewielkie, ale istotne wsparcie. Po załamaniu kolumny, ziarno pomocnicze może się znaleźć na nowej linii sił, stając się ziarnem zasadniczym, gdy stos okruszowy w jego sąsiedztwie jest stabilny. Ponieważ poślizgi, załamania kolumn i kruszenie ziaren ma charakter nieodwracalny, w ośrodku powstaje trwała konfiguracja ziaren przystosowana do przenoszenia konkretnej ścieżki naprężenia i konkretnego, wcześniej występującego poziomu obciążenia.

W drugiej części rozdz. 6 przedstawiono autorskie wyniki mikroskopowych badań morfologii ziaren piasku (kształtu i stopnia obtoczenia), makroskopowych badań ich wytrzymałości krytycznej oraz ocenę ich genezy (piaski pobrane zostały z różnych środowisk sedymentacji z 28 miejsc Zachodniej Polski, poczynając od Sudetów po ujście Warty). Celem tej części było wykazanie związków pomiędzy cechami mikroskopowymi (morfologią ziaren), cechami makroskopowymi (wytrzymałością krytyczną piasku) oraz jego genezą. Rezultaty przedstawiono w postaci zależności korelacyjnej. Zaproponowana zależność pozwala, w przypadku piasków z niektórych środowisk, ocenić wstępnie ich wytrzymałość na podstawie genezy. Zależność uzasadnia także konieczność oceny morfologii ziaren przy wizualnym ich opisie, wymaganą przez normę PN EN ISO 14 688.

Rozdział 7 poświęcony jest badaniom gruntu w warunkach *in-situ*, z wykorzystaniem testów geosejsmicznych i geomechanicznych. W pierwszej części rozdziału, spośród testów geosejsmicznych omówiono badania nieinwazyjne metodami seismiki powierzchniowej, skupiając się na technice *multichannel analysis of surface waves* (MASW) oraz inwazyjne badania sejsmiczne typu *down-hole* (D-H). Z grupy testów geomechanicznych skoncentrowano się badaniu penetracyjnym sondą statyczną (CPTu) i badaniu obciążeniowo-penetracyjnym dylatometrem Marchettiego (DMT). Poszczególne testy różnią się poziomem odkształceń generowanych w podłożu. Celem tej części rozdziału była krytyczna ocena wyżej wymienionych rodzajów badań. W przeciwieństwie do badań laboratoryjnych wykonywanych na próbkach pobieranych punktowo z masywu gruntowego, badania CPTu i DMT pozwalają na praktycznie ciągłe rozpoznanie cech gruntu w całym profilu pionowym, stąd można je nazwać testami 1-D. Metody seismiki powierzchniowej, np. MASW, umożliwiają uzyskanie informacji o cechach podłoża w całym przekroju pionowym, stanowiąc testy 2-D. Zakres przestrzenny rozpoznania nie jest jednak zgodny z bezwzględną dokładnością uzyskiwanych rezultatów. Badania sejsmiczne pozwalają na określenie sztywności ścinania gruntu, w zakresie bardzo małych odkształceń, na podstawie prędkości fal poprzecznych. Prędkości te są bezpośrednio mierzone (test D-H) lub wyznaczane na podstawie analizy odwrotnej (badania MASW). W badaniu penetracyjnym CPTu mierzone są opory gruntu wywołane zagłębieniem stożka z tuleją oraz ciśnienia porowe wywołane penetracją. W teście DMT mierzone są ciśnienia wywołujące określone deformacje membrany dylatometru, po wcześniejszym zagłębieniu łopatki na żadaną głębokość. Ponieważ w testach geomechanicznych ścieżki naprężenia są nieznane, a sam test stanowi zagadnienie brzegowe, urządzenia te nie nadają się do poznawania zachowań mechanicznych gruntu, lecz jedynie do

wyznaczania wybranych jego parametrów i do jego klasyfikacji. Nie jest to oczywiście klasyfikacja granulometryczna, lecz behawioralna. W testach penetracyjnych parametry mechaniczne gruntu wyznaczone są z zależności korelacyjnych, te zaś opracowane zostały na podstawie badań gruntów podręcznikowych. Czynniki powyższe sprawiają, że interpretacja wyników badań CPTu i do pewnego stopnia także DMT jest bardzo utrudniona w gruntach niepodręcznikowych. *A priori* trudno jest natomiast stwierdzić czy aktualnie badane podłoże stanowią grunty podręcznikowe.

W drugiej części rozdz. 7 zamieszczono wyniki autorskich badań terenowych – organogenicznych piasków jeziornych i lekko scementowanych piasków polodowcowych. W pierwszym przypadku wykonano sondowania dynamiczne (DPL), badania CPTu oraz DMT. W drugim przypadku dodatkowo wykonano także badania MASW i D-H. Celem tej części rozdziału było wskazanie niebezpieczeństw związanych z ograniczonym zakresem badań gruntów niepodręcznikowych. W każdym z przykładów zaobserwowano znaczne niespójności rezultatów wybranych testów. Spektakularnym przypadkiem był rozkład wartości modułu edometrycznego wyznaczony w zakresie bardzo małych odkształceń (w testach D-H) i przy dużych odkształceniach (w testach DMT), w piaskach polodowcowych. W strefie przypowierzchniowej, do głębokości ok. 3 m, wartości pierwszego modułu były maksymalne w stosunku do innych wartości w profilu, zaś wartości drugiego osiągały w tych miejscach minimum. Poniżej głębokości ok. 5 m przebiegi wykresów były jakościowo zgodne. Sytuacja taka wystąpiła nie w jednym punkcie badawczym, lecz we wszystkich punktach. Dodatkowo wyniki badań MASW potwierdzały rezultaty testów D-H, zaś badania CPTu potwierdzały wyniki testów DMT. Warto przypomnieć, że obie grupy testów (D-H i MASW oraz DMT i CPTu) różnią się poziomem generowanych odkształceń, zaś sztywność gruntu, a do pewnego stopnia także wytrzymałość, zależą od wielkości odkształceń. Przyczyną pozornych niespójności rezultatów była tu niewielka, trudna do identyfikacji, cementacja piasku w strefie przypowierzchniowej. Niewielka cementacja wielokrotnie zwiększa sztywność gruntu w zakresie bardzo małych odkształceń, zaś jedynie w nieznacznym stopniu wzmacnia grunt, stąd aparaty badawcze podczas penetracji niszczą słabe wiązania pomiędzy ziarnami i w zakresie dużych odkształceń skutki cementacji mogą nie być widoczne. Zamieszczone przykłady wskazują, że interpretacja wyników badań gruntów niepodręcznikowych zwykle jest bardzo utrudniona, zaś ograniczony zakres badań, wykorzystujących tylko jeden rodzaj testu, może prowadzić do błędnego rozpoznania cech mechanicznych podłoża. Rozdz. 7 kończy część monografii poświęconą interpretacji wyników badań gruntu.

Na model współdziałania konstrukcji i podłoża, poza dwoma elementami występującymi w samej nazwie zagadnienia, wpływają także warunki kontaktu materiałów budowlanych z gruntem. Właściwe odwzorowanie tych warunków jest istotne w tym sensie, że wszystkie obciążenia przekazywane z budowli, stanowiącej względnie sztywny układ, na podatne podłoże, które nie przenosi rozciągania, odbywa się przez powierzchnie kontaktu. Podłoże, w stosunku do budowli tworzy swego rodzaju więzy ograniczające jej przemieszczenia. Dla kierunków normalnych do powierzchni styku są to więzy jednostronne, dla kierunków stycznych zasadniczą rolę odgrywa tarcie. Celem rozdz. 8 był przedstawienie wyników badań kontaktu stycznego materiałów budowlanych z gruntem gruboziarnistym i gruntem drobnoziarnistym, głównie w ujęciu makroskopowym. W ujęciu tym powszechnie akceptowanym modelem przenoszenia naprężeń stycznych jest model tarcia Coulomba, w którym zasadniczą rolę odgrywa współczynnik tarcia μ . Zaprezentowane wyniki badań świadczą, że w procesie przekazywania naprężeń stycznych na powierzchni styku ważna jest nie sama chropowatość powierzchni, lecz stosunek chropowatości do wielkości ziaren gruntu. W piaskach, przy dużym zagęszczeniu, krzywe ścinania wykazują wartości szczytowe oraz demonstrują nieznaczące osłabienie do wartości residualnych. Osłabieniu towarzyszy dylatacja gruntu. Oznacza to, że należy rozróżnić szczytowy (μ_p) i residualny (μ_r) współczynnik tarcia. Z badań wynika, że przy wzroście chropowatości kolejnych próbek wartość współczynnika μ_p wzrasta, aż do pewnej wielkości granicznej, zależnej od stopnia zagęszczenia gruntu. Po przekroczeniu tej chropowatości wartość współczynnika stabilizuje się, gdyż poślizg zachodzi wówczas nie na powierzchni styku, lecz wewnątrz gruntu. W ośrodku drobnoziarnistym różnica pomiędzy współczynnikami μ_p i μ_r może być znaczna i wzrasta przy wzroście zawartości frakcji ilowej.

Mając świadomość złożoności zachowań mechanicznych gruntów, materiałów konstrukcyjnych (w szczególności żelbetu) i złożoności procesów zachodzących na powierzchni kontaktu oraz ograniczeń badawczych i interpretacyjnych tych zachowań i procesów, w rozdz. 9 zamieszczono przykłady analiz numerycznych interakcji konstrukcji budowlanych z podłożem. Wszystkie symulacje wykonano z wykorzystaniem metody elementów skończonych, posługując się systemem Abaqus.

Cechą wspólną analizowanych konstrukcji jest ich zagłębienie w podłożu. Ponieważ konstrukcje są obciążane, a elementy współdziałających podukładów (budowla i podłoże) odkształcają się, stwarza to możliwość ich separacji. W przykładach uwzględniono więzy jednostronne pomiędzy budowlą i podłożem w kierunkach normalnych do powierzchni kontaktu oraz możliwość powstawania trwałych poślizgów w kierunkach stycznych, po osiągnięciu przez naprężenia wartości określonych modelem tarcia Coulomba. Ponieważ w użytym modelu tarcia wartość współczynnika musi być stała, zaś z rozważań rozdz. 8 wynika, że wartość ta ulega zmianom, w przykładach wykonano analizy parametryczne wrażliwości układów na zmiany wartości tego parametru. W stosunku do modeli konstytutywnych materiałów (gruntu, stali i żelbetu) zastosowano jednolite sprężysto-plastyczne podejście mechaniki ośrodków ciągłych. Podejście takie wykorzystano do modelowania nawet tak wyraźnie dyskretnych procesów jak zarysowanie betonu – stosując teorię rys rozmytych.

Pierwszy przykład dotyczy analizy nośności żelbetowej, cylindrycznej studni startowej w trakcie mikrotunelowania. Proces mikrotunelowania polega na wierceniu tunelu od studni startowej do studni końcowej. Głowica wierząca przemieszczana jest w gruncie przez siłowniki oparte na studni. Ich reakcje generują na studnię duże obciążenia poziome przy jej podstawie. Wielkości obciążeń zależą od warunków gruntowych na trasie głowicy oraz od długości odcinka mikrotunelu. Stosowanie technologii bezwykopowych ma wiele zalet, w szczególności przy ich wykorzystaniu na terenach silnie zurbanizowanych. Mikrotunelowanie jest metodą efektywną i skuteczną, pod warunkiem, że wszystkie elementy systemu zostały precyzyjnie zaprojektowane. Wszelkie błędy w projektowaniu mogą skutkować bardzo kosztownymi zmianami w trakcie wykonywania robót, takimi jak konieczność wykonania nieplanowanej wcześniej studni pośredniej lub tzw. studni ratunkowej, gdy nośność studni startowej jest niewystarczająca i głowicy nie doje się doprowadzić do studni końcowej. Studnia jest elementem projektowanym, niepewność wiąże się natomiast z cechami mechanicznymi gruntu, w którym studnia startowa jest osadzona. Utrata nośności układu może nastąpić w wyniku zniszczenia żelbetu lub w wyniku wyczerpania nośności gruntu. W praktyce obie sytuacje mogą mieć miejsce.

Przyjęto, że studnia osadzona jest w ile zastoiskowym. W takich warunkach gruntowych sposób oddziaływania siłowników stanowi obciążenie bez drenażu. Do symulacji zachowań gruntu przyjęto prosty, jednoparametrowy model Treski, koncentrując się na problemach związanych z poprawnym wyznaczeniem parametru modelu (c_u) w badaniach *in-situ*. W rozdz. 5 wykazano, że wytrzymałość bez drenażu c_u w ilach silnie zależy od kierunku działania obciążenia. W przypadku poziomego ściskania może być nawet dwukrotnie mniejsza, niż przy pionowym ściskaniu. Wstępne założenie sugerujące, że wartość c_u korzystnie byłoby wyznaczyć w badaniu dylatometrycznym, w którym membrana, podobnie jak studnia, oddziałuje na grunt poziomo, okazało się chybione. Twórcy urządzenia kalibrowali test DMT ze względu na zgodność wyników z badaniami trójosiowego pionowego (a nie poziomego) ściskania oraz ścinania sondą krzyżakową. Przykład ten wskazuje, że w przypadku badań, których interpretacja wymaga stosowania zależności korelacyjnych, fizyczne podobieństwo warunków prowadzenia testu, do sposobu oddziaływań budowli na podłoże, jest niewystarczające do uzyskania poprawnych wartości parametrów mechanicznych gruntu. Każdorazowo konieczna jest analiza założeń użytych do opracowania formuł korelacyjnych.

Do modelowania studni zastosowano warstwowy model żelbetu. W strefie ściskanej betonu użyto modelu sprężysto-plastycznego z warunkiem plastyczności Druckera-Pragera, którego wzmocnienie i osłabienie sterowane jest krzywą uzyskaną podczas jednoosiowego ściskania tego materiału. Model, w przypadku płaskiego stanu naprężenia występującego w powłoce żelbetowej studni, dobrze wpisuje się w wyniki uzyskiwane dla dwukierunkowo ściskanego betonu (test Kupfera). W strefie rozciąganej betonu zastosowano teorię rys rozmytych, uwzględniono tarcie pomiędzy zbrojeniem i betonem oraz usztywnienie betonu pomiędzy rysami. Stal zbrojeniowa modelowana jest jako materiał idealnie sprężysto-plastyczny.

Charakter zadania wymagał zastosowania analizy 3-D. Do dyskretyzacji bryły podłoża użyto przestrzennych, ośmiowęzłowych elementów skończonych Lagrange'a, z funkcjami kształtu w postaci wielomianów pierwszego stopnia. Zastosowanie interpolacji niskiego stopnia podyktowane było algorytmem użytym do modelowania więzów jednostronnych (algorytm *master-slave*), w którym bada się zwrot sił węzłowych. W celu uniknięcia blokady ścinania zastosowano selektywne, zredukowane całkowanie elementów modelujących grunt. We wstępnych analizach dobrano wielkość bryły podłoża oraz gęstość siatki jej elementów. Zastosowany model zawierał blisko 200 tys. stopni swobody. Zbyt mała bryła otaczająca studnię i bliskość zewnętrznych warunków brzegowych, powodują zawyżenie

nośności układu. Dążenie do ograniczenia wymiarów zadania podyktowane było nakładaniem się kilku rodzajów nieliniowości, wpływających na czas analizy. Oddzielnym problemem była zbieżność zadania.

W przygotowanym modelu numerycznym nieliniowości wynikają ze sprężysto-plastycznego modelowania gruntu, nieliniowych warunków kontaktu studni i podłoża oraz sposobu modelowania żelbetu. Szczególnie silną nieliniowość wprowadza separacja studni i podłoża oraz zarysowanie betonu, co objawia się osłabianiem układu. W takich warunkach do rozwiązania problemu nieliniowego najbardziej skuteczna okazała się procedura Riksa (*The arc length method*).

Celem wykonanych symulacji numerycznych była analiza wrażliwości układu na następujące elementy modelu i parametry: sposób modelowania kontaktu normalnego studni z podłożem, wartość współczynnika tarcia na powierzchniach styku, wartość wytrzymałości gruntu, sztywność gruntu, sposób modelowania żelbetu i wartości parametrów betonu, grubość powłoki studni i in. Zmieniając parametry modelu, analizy prowadzono dwutorowo: tak, aby o nośności układu mogły decydować warunki gruntowe oraz tak, aby nośność układu determinowana była przez zniszczenie żelbetu.

Analizy parametryczne wykonane dla studni żelbetowej pozwalają sformułować wnioski ogólne dotyczące modelowania tego typu układów. Jeżeli celem analizy jest wyznaczenie sił wewnętrznych w powłoce w zakresie sprężystych zachowań układu studnia-podłoże, to warunki kontaktu na powierzchniach styku mają znaczenie drugorzędne i można przyjąć model z więzami dwustronnymi. W każdym przypadku, gdy celem analizy są przemieszczenia, warunki kontaktu muszą być realistyczne. W przypadkach, których o nośności układu decyduje nośność podłoża, wzrost sztywności studni i wzrost współczynnika tarcia na powierzchniach kontaktu, zwiększa nośność całego układu. Gdy najsłabszym elementem jest żelbet, cechy gruntu i współczynnik tarcia stają się mało istotne.

W drugim przykładzie rozdz. 9 analizowano wybrane aspekty zachowania się konstrukcji gruntowo-powłokowych. Specyfika tego typu układów polega na współdziałaniu stosunkowo wiotkiej powłoki, zazwyczaj stalowej, z gruntem, którym jest zasypywana i który, po odpowiednim ułożeniu i zagęszczeniu, tworzy dla niej stabilne oparcie. O efektywności układu decydują zasadniczo dwa niezależne czynniki. Pierwszym jest możliwość wygenerowania w powłoce, w fazie wznoszenia, wstępnych stanów naprężenia, korzystnych z punktu widzenia działania obciążeń użytkowych, na nieco podobnej zasadzie, jak w przypadku żelbetowych konstrukcji sprężonych. Drugim czynnikiem, występującym w fazie eksploatacji, jest zjawisko przesklepienia gruntu nad konstrukcją podatną, powodujące redukcję obciążeń działających na powłokę.

Zjawisko przesklepienia analizowane było w monografii w pierwszej kolejności. Problem przesklepienia w materiałach sypkich występuje w wielu dziedzinach inżynierii, między innymi: w silosach, w zapadliskach górniczych, a także podatnych budowlach podziemnych (tunelach, rurociągach i omawianych tu mostowych konstrukcjach gruntowo-powłokowych). W pracy wykonano symulację tego zjawiska, analizując tzw. problem zapadni, która obniżając się wywołuje przesklepienie w pokrywającym ją materiale sypkim. Opiswane w literaturze eksperymenty wskazują, że odciążenie zapadni wywołane jej obniżaniem i uaktywnianiem przesklepienia, jest tym większe im większa jest względna grubość zasypki H/B (H jest miąższością zasypki, B jest szerokością zapadni) i im większe jest jej zagęszczenie. Jako miarę przesklepienia przyjęto proporcję parcia działającego na zapadnię, gdy efekt przesklepienia występuje, w stosunku do parcia, gdy przesklepienie jeszcze się nie uaktywniło. W monografii analizowano układy z płytką warstwą zasypki ($H/B \leq 1$).

Do symulacji gruntu przyjęto prosty, sprężysto-plastyczny model Coulomba-Mohra z niestowarzyszonym z warunkiem plastyczności prawem płynięcia. Dzięki temu, w analizach wrażliwości układu na parametry mechaniczne gruntu można było posługiwać się jedynie kątem tarcia wewnętrznego ϕ i kątem dylatacji ψ , mającymi jasne interpretacje fizyczne. Symulacje potwierdziły spostrzeżenia odnotowane w doświadczeniach. Redukcja parcia wzrastała, zarówno przy wzroście H/B , jak i przy wzroście ϕ lub ψ . W przypadku dylatujących, zagęszczonych piasków sięgała 80%, przy $H/B=1$. Symulacje pozwoliły dodatkowo zbadać, jak zmieniają się wartości parcia na zapadnię na jej szerokości. Przy płytkich warstwach zasypki redukcja parcia dotyczy jedynie stref krawędziowych zapadni. Jednocześnie można było zaobserwować redystrybucję parcia, ze strefy krawędziowej nad zapadnią do strefy w bezpośrednim sąsiedztwie na zewnątrz zapadni. Transfer ten następował za pośrednictwem naprężeń stycznych. W tym miejscu warto zauważyć, że termin 'redukcja parcia' jest nieco mylący i nie wskazuje na przyczyny owej redukcji (równania równowagi pionowej muszą być spełnione). Bardziej trafne jest określenie 'redystrybucja parcia'.

Ostatnim zagadnieniem omówionym w monografii jest analiza procesu wznoszenia konstrukcji gruntowo-powłokowej. Jest to symulacja numeryczna eksperymentu wykonanego w laboratoriach Instytutu Dróg i Mostów. Wiotka powłoka, stanowiąca połowę cylindra ułożonego poziomo i opartego na fundamentach, wykonana z arkuszy blachy falistej, zasypywana jest kolejnymi warstwami piasku. Każda warstwa jest zagęszczana, przed ułożeniem kolejnej. Warstwy dolne, w wyniku układania i zagęszczania generują parcia poziome na ramiona powłoki w strefie przypodporowej, powodując przemieszczenia tych stref do wewnątrz z jednoczesnym wypiętrzaniem klucza powłoki ku górze. Proces ten wywołuje zginanie powłoki i ukształtowanie się pewnego rozkładu momentów zginających, takich, że włókna zewnętrzne nad jej kluczem są rozciągane. Układanie kolejnych warstw powoduje redystrybucję i przyrosty momentów zginających. Wreszcie układanie warstw nad powłoką zmienia trend i klucz powłoki zaczyna przemieszczać się ku dołowi, zaś ramiona wysklepiane są na zewnątrz, a momenty w kluczu maleją. Powłoka zostaje wstępnie sprężona w gruncie. Wygenerowane momenty zginające mają przeciwny znak niż momenty, które powstaną w wyniku działania obciążeń eksploatacyjnych. Wcześniejsze doświadczenia, prowadzone także na rzeczywistych, eksploatowanych obiektach wykazały, że siły wewnętrzne powstające na etapie wykonania są tego samego rzędu, co siły od obciążeń użytkowych.

Symulacja procesu wznoszenia konstrukcji gruntowo-powłokowej jest zadaniem złożonym. Składa się na to kilka czynników:

- Geometria, masa, porowatość oraz warunki brzegowe ulegają zmianie w wyniku układania kolejnych warstw i ich zagęszczania.
- Na powierzchniach kontaktu istotną rolę odgrywa tarcie pomiędzy powłoką i zasypką, zaś w wyniku zagęszczania kolejnych warstw może dochodzić do separacji powłoki i zasypki w warstwach wcześniej wykonanych.
- Ponieważ powłoka deformuje się w wyniku oddziaływań gruntu (działania ciężaru własnego kolejnych warstw i ich zagęszczania), model gruntu winien poprawnie odzwierciedlać jego rzeczywiste zachowania.

Uwzględniając powyższe uwagi w symulacjach wykorzystano istniejący w systemie Abaqus mechanizm analizy krokowej. W każdym kroku geometria układu (w tym liczba elementów skończonych), sposób obciążenia i warunki brzegowe mogą ulegać zmianom. Jednocześnie opracowano specjalną procedurę symulującą zagęszczanie gruntu oraz procedurę sterującą ujmującą wszystkie powyższe kroki (aktywację kolejnych warstw elementów skończonych, zmiany warunków brzegowych, generowanie sił masowych, zagęszczanie warstwy i analizę równowagi aktualnego układu) w odpowiednią sekwencję. Słabością procedury sterującej jest konieczność 'ręcznego' dostosowania położenia węzłów kontaktowych podczas aktywacji nowej warstwy do aktualnej konfiguracji powłoki. Do symulacji więzów jednostronnych pomiędzy powłoką i zasypką użyto procedury *master-slave*. Tarcie dla kierunków stycznych symulowano modelem Coulomba. Do symulacji zasypki oraz gruntu rodzimego, na którym spoczywają ławy żelbetowe zastosowano sprężysto-plastyczny model stanu krytycznego gruntu ze wzmocnieniem gęstościowym. Zadanie rozwiązywano w płaskim stanie odkształcenia.

Geometria analizowanego układu (powłoka cylindryczna o średnicy 2,5 m; grubość blachy 2,5 mm; miąższość zasypki powyżej klucza powłoki 0,5 m) w pełni odpowiadała konstrukcji badanej w laboratorium. Podstawowym parametrem weryfikującym poprawność symulacji były pomierzone w badaniach przemieszczenia powłoki. W analizach parametrycznych stwierdzono, że zasadniczy wpływ na przemieszczenia i siły wewnętrzne w powłoce ma zagęszczanie zasypki gruntowej oraz wartości współczynnika tarcia na powierzchni kontaktu powłoki z gruntem.

4.3.3. Możliwości ewentualnego wykorzystania wyników

Monografia dotyczy dwóch, ważnych zdaniem autora, problemów związanych z modelowaniem zagadnień interakcji konstrukcji i podłoża: wieloetapowego procesu tworzenia modelu podłoża oraz rozwiązywania wybranej klasy zadań współdziałania budowli z gruntem (obiektów zagłębionych w podłożu). Interdyscyplinarność w spojrzeniu na poszczególne etapy budowy złożonego obrazu podłoża (perspektywa geologiczna, perspektywa badań makroskopowych i mikroskopowych, wreszcie perspektywa badań terenowych), może stanowić pewną wartość poznawczą. Kilka szczegółowych zagadnień diskutowanych w pracy może mieć również charakter aplikacyjny.

Dołączenie rozdz. 2, poświęconego tworzeniu modelu geologicznego podyktowane było tocząca się w kraju dyskusją, dotyczącą relacji pomiędzy geologią a geotechniką oraz kompetencji specjalistów z obu dziedzin w procesie inwestycyjnym. W rozdziale przedstawiono możliwości i ograniczenia dotyczące rozpoznania podłoża, wynikające ze stosowanego w tej dyscyplinie aparatu badawczego. Podobna dyskusja miała miejsce w Wielkiej Brytanii 30 lat temu (Henkel, 1982), doprowadzając do zdefiniowania istotnej, specyficznej i wzajemnie uzupełniającej się roli każdej z dziedzin.

Przedstawione w rozdz. 3 przykłady wskazują na mogącą wystąpić ograniczoną skuteczność dotychczas stosowanej w kraju metody klasyfikacji gruntów spoistych i metody wyznaczania stopnia zagęszczenia. W obu procedurach zaznacza się wpływ czynników subiektywnych. Wskazanie źródeł problemów może zachęcić środowisko do stosowania metod alternatywnych, dopuszczonych przez normy krajowe, spójnych z metodami stosowanymi w innych krajach. W dobie intensywnej wymiany międzynarodowej obejmującej specjalistów i aparaturę badawczą (w szczególności stosowanie sprzętu do badań *in-situ*), ujednolicenie tych metod może ułatwić adaptację procedur interpretacji wyników uzyskiwanych z wykorzystaniem tej aparatury oraz ułatwić wymianę wiedzy i doświadczeń.

Sformułowana w rozdz. 6 hipoteza *przystosowania strukturalnego gruntu do zrealizowanej ścieżki naprężenia*, pozwala w racjonalny sposób wyjaśnić zjawisko 'pamięci' występujące w ośrodkach rozdrobnionych. W szerszym kontekście hipoteza pozwala w spójny sposób spojrzeć na makroskopowe i mikroskopowe metody badań gruntu, podkreślając rolę czynnika strukturalnego w obu opisach.

W rozdz. 5 i 7 silnie zaakcentowano różnice w zachowaniach gruntów podręcznikowych i gruntów pośrednich, wskazując na wynikające stąd problemy interpretacji badań tych drugich. Celowe byłoby wyróżnienie tych gruntów w klasyfikacjach i uwrażliwienie specjalistów na konieczność stosowania komplementarnych metod badania tych gruntów w warunkach *in-situ*, z zastosowaniem aparatury do badań w zakresie małych i dużych odkształceń, przy odpowiednio dobranych warunkach drenażu.

Obydwa analizowane w rozdz. 9 przykłady (nośność studni startowej do mikrotunelowania i symulacja wznoszenia konstrukcji grunto-powłokowa) realizowane były w celu odpowiedzi na pytania formułowane ze strony instytucji związanych przemysłem, instytucji badawczych i projektowych. Pytania w pierwszym przypadku dotyczyły rozwiązań projektowych, w obu przypadkach zaś procedur analizy i możliwości stosowania uproszczeń w modelowaniu. Problem w szczególności dotyczy konstrukcji grunto-powłokowych coraz powszechniej projektowanych, jako przejścia dla zwierząt nad drogami, przepusty i małe mosty. Pomimo, że siły wewnętrzne powstające na etapie ich wznoszenia są tego samego rzędu, co siły od obciążeń użytkowych, fakt ten w projektowaniu jest pomijany. Zaprezentowane w monografii informacje i doświadczenia autora mogą stanowić przyczynek w kierunku bardziej racjonalnej analizy tego typu obiektów.

4.3.4. Bibliografia

1. Clayton C.R.I., Matthews M.C., Simons N.E. (1995) *Site investigations*, Wiley-Blackwell, Oxford.
2. Henkel D.J. (1982) Geology, geomorphology and geotechnics, The 22nd Rankine Lecture, *Géotechnique*, **32** (3): 175-194.
3. Grabowska-Olszewska B., Osipov V., Sokolov V. (1984) *Atlas of the microstructure of clay soils*, PWN, Warszawa.
4. Parry S., Baynes F.J., Culshaw M.G., Eggers M., Keaton J.F., Lentfer K., Novotny J., Paul D. (2014), Engineering geological models: an introduction, IAEG Commission 25, *Bull. Eng. Geol. Environ.*, **73**, 689-706.
5. Phoon K.K. (2008) Numerical recipes for reliability analysis – a primer, [W:] K.K. Phoon (ed.) *Reliability-based design in geotechnical engineering*, Taylor & Francis, London.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych, wyszczególniony w zał. 3*

Biorąc pod uwagę zawartość omówionej wyżej monografii, mój dorobek publikacyjny po doktoracie, można podzielić na dwie grupy: publikacje chronologicznie starsze, dotyczące problemów konstrukcji zespolonych, konstrukcji żelbetowych na podłożu, a także programowania zagadnień połączenia modelu półprzestrzeni sprężystej z modelem skończonym bryły podłoża o nieliniowych cechach oraz publikacje,

* W niniejszym punkcie w nawiasach kwadratowych podano odnośniki do odpowiednich pozycji w zał. 3.

których ostatecznym efektem była monografia, przedstawiające zaprezentowane w niej zagadnienia szczegółowe. Pierwszą grupę stanowią następujące problemy i odnoszące się do ich prace:

- Numeryczne modelowanie żelbetu oraz opracowanie elementu kontaktowego stosowanego w konstrukcjach żelbetowych na podłożu [D1] i konstrukcjach zespolonych [D2], [C1].
- Połączenie metody elementów skończonych, modelujących bryłę podłoża o nieliniowych cechach z metodą elementów brzegowych, używaną do modelowania półprzestrzeni sprężystej [D3].

Do drugiej, szerszej grupy zagadnień składających się na tematykę poruszaną w monografii należą:

- Modelowanie wznoszenia konstrukcji gruntowo-powłokowych obejmujące: analizę przemieszczeń układu [C2], [C3], analizę sił wewnętrznych [C5], analizę układu z uwzględnieniem tarcia na powierzchniach kontaktu [C16].
- Modelowanie przesklepienia gruntu nad konstrukcją podatną: [D10], [C8].
- Analiza współdziałania studni startowej do mikrotunelowania z gruntem: w zakresie sprężystym [C6], uwzględniająca wpływ warunków kontaktu podukładów na nośność [C7] oraz wpływ modelu żelbetu na nośność [C14].
- Badania *in-situ* obejmujące: identyfikację parametrów wytrzymałości gruntu w testach CPT [D6], badania terenów zapadliskowych [B1], badania gruntów organogenicznych [C10], badania geosejsmiczne i geomechaniczne gruntów scementowanych [C9], [C13].
- Badania morfologii ziaren, wytrzymałości krytycznej i genezy piasku [D11].
- Badania klasyfikacyjne gruntów dotyczące: metod klasyfikacji gruntów spoistych [C11] oraz badania zagęszczenia piasków [C12], [D12], [C15].

Łącznie po doktoracie opublikowałem jedną monografię [A1], jedną pracę w czasopiśmie z bazy (JCR) [B1], 16 publikacji stanowiących artykuły w czasopismach lub rozdziały w monografiach [C1+C16] oraz 14 publikacji w materiałach konferencyjnych i innych wydawnictwach [D1+D14]. Ponad 80% powyższych prac stanowią publikacje indywidualne.

Uczestniczyłem w jednym międzynarodowym projekcie badawczym [G1] oraz jednym międzynarodowym programie współpracy i wymiany naukowej [J1]. Jestem autorem 3 wykładów wygłoszonych na zaproszenia polskich i zagranicznych instytucji naukowych (dwóch na posiedzeniach sekcji PAN [H1], [H3] i jednego na Uniwersytecie w Gruzji [H2]). Wygłosiłem także 25 referatów na konferencjach naukowych [I1+I25], większość to konferencje międzynarodowe, z których dwa zostały wyróżnione [S].

Byłem sekretarzem dwóch dużych konferencji międzynarodowych [K1], [K2] (jedna z udziałem naukowców z 24 państw). Uczestniczyłem w pracach komitetów organizacyjnych czterech konferencji krajowych i międzynarodowych [K3+K6] oraz byłem członkiem jednego komitetu naukowego konferencji zagranicznej [K7]. Byłem także członkiem dwóch sekcji Polskiej Akademii Nauk [N1], [N2] oraz towarzystw naukowych i zawodowych [N3+N6]. Przygotowałem recenzje 14 prac opublikowanych w czasopismach i materiałach konferencyjnych [R].

W okresie (2007-2009) byłem osobą odpowiedzialną w Instytucie Budownictwa Uniwersytetu Zielonogórskiego za zakupy geotechnicznej aparatury badawczej z dwóch realizowanych wówczas grantów europejskich [L1]. Za działalność naukową i organizacyjną dwukrotnie otrzymałem nagrody Rektora Uniwersytetu Zielonogórskiego [M1], [M2].

W sferze dydaktycznej [O1], prowadzę przedmioty związane z metodami komputerowymi w mechanice i geotechnice oraz związane z mechaniką gruntów, modelami konstytutywnymi gruntu oraz fundamentowaniem. Trzykrotnie prowadziłem semestralne zajęcia kursowe w języku angielskim dla studentów z zagranicy. Byłem także opiekunem studentów z zagranicy oraz Wydziałowym Koordynatorem Programu Erasmus. Jestem autorem instytutowej biblioteki procedur numerycznych (modMES) wykorzystywanej w badaniach naukowych i w dydaktyce. W sferze popularyzacji nauki, wielokrotnie prowadziłem pokazy i wykłady w ramach Dni Otwartych Uniwersytetu, Festiwalu Nauki i innych podobnych inicjatyw [O2]. Byłem także opiekunem studenckiego koła naukowego i promotorem 12 prac dyplomowych [P].

W sferze działalności zawodowej [Q], jestem współautorem kilku ekspertyz związanych z badaniami podłoża i analizami obiektów geotechnicznych oraz konstrukcji współdziałających z gruntem.

Waldemar Szafrański