

Dr hab. inż. Waldemar Szajna, prof. UZ
Instytut Budownictwa
Uniwersytet Zielonogórski

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Zygmunta BARTOSZKA

pt.: „Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża poduszką i geomateracem”

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę do pracowania przedstawionej recenzji były następujące dokumenty:

- Zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej w Gliwicach, dr hab. inż. Marcina Stańka, prof. PŚ z dnia 10.07.2023 roku, zgodne z uchwałą Rady tej dyscypliny z dnia 29.06.2023 roku.
- Egzemplarz rozprawy doktorskiej.

2. Charakterystyka rozprawy

Praca doktorska, zgodnie z tematem, dotyczy wzmocniania podłoża gruntowego z wykorzystaniem poduszek i geomateracy. Istotą pracy jest porównanie, jak zmienia się sztywność i nośność układu fundament – podłoże, gdy w miejsce bezpośredniego posadowienia na słabym podłożu, zastosuje się w podstawie fundamentu wzmocniającą poduszkę gruntową lub dodatkowo geomaterac. Analizę problemu wykonano z wykorzystaniem laboratoryjnych badań modelowych, próbnego obciążenia pełnoskalowych fundamentów w warunkach terenowych oraz symulacji numerycznych.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Sławomir Kwiecień prof. PŚ.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów oraz spisu literatury. Rozdział 1. *Wstęp*, zawiera definicję geosyntetyków oraz przedstawia rosnącą rolę tych materiałów i inżynierii. W Rozdziale 2 zamieszczono tezy pracy, zaś w Rozdziale 3, przedstawiono stan wiedzy dotyczącej przedmiotu rozprawy. Rozdział 4. *Koncepcja metody badawczej* zawiera ogólną charakterystykę narzędzi badawczych użytych w kolejnych rozdziałach pracy. W rozdziale tym omówiono zagadnienia efektu skali, podobieństwa modelowego, krótką charakterystykę użytych w analizach numerycznych modeli konstytutywnych oraz uwagi o kalibrowaniu parametrów modeli.

Zasadnicza część pracy, stanowiąca wkład autora w dyscyplinę, składa się z dwóch kolejnych rozdziałów. Rozdział 5. *Badania modelowe* składa się z dwóch podrozdziałów 5.1. *Badania laboratoryjne* oraz 5.2. *Badania w skali naturalnej*. Pierwszy podrozdział zawiera opis laboratoryjnego stanowiska badawczego, w wersji pierwotnej i zmodyfikowanej, opis materiału gruntowego oraz opis użytych do zbrojenia geosyntetyków. Zawiera także rezultaty poszczególnych serii badań. W podrozdziale drugim omówiono badania terenowe, polegające

na próbnym obciążeniu stopy fundamentowej, wykonanej bezpośrednio na słabym podłożu oraz na podłożu wzmocnionym w dwóch lokalizacjach: w Chorzowie i w Piekarach Śląskich.

W rozdziale 6. *Badania teoretyczne – analizy MES* zawiera symulacje numeryczne większości wykonanych testów laboratoryjnych i terenowych.

Rozdział 7 zawiera wnioski. Pracę kończy spis literatury

Praca liczy 111 stron. Bibliografia obejmuje 135 pozycji cytowanej literatury naukowej, norm, katalogów i stron internetowych. W pracy zamieszczono 68 rysunków i fotografii oraz 15 tabel.

3. Dobór tematu, zakres pracy i postawione tezy

Temat pracy jest bardzo aktualny i ma wymiar aplikacyjny. Wobec braku terenów budowlanych o dobrych warunkach gruntowych, coraz częściej obiekty planowane są na obszarach, w których występują słabe i bardzo odkształcalne grunty naturalne bądź niekontrolowane nasypy antropogeniczne. Jedną z metod spełnienia projektowych wymogów nośności i użyteczności układu fundament – podłoże, może być w takich przypadkach płytka wymiana słabego gruntu w sąsiedztwie planowanej podstawy fundamentu z zastosowaniem zagęszczanego kruszywa w postaci tzw. poduszki wzmacniającej lub kruszywa zbrojonego warstwami geosyntetyku – geomateraca.

Reakcja gruntu na obciążenie jest złożona. Badanie i modelowanie gruntu należy do niebanalnych zadań mechaniki. Wpływa na to rozdrobniony charakter ośrodka, który w zasadzie nie przenosi rozciągania, a siły przekazywane są przez kontakt pomiędzy ziarnami. Reakcje gruntu na obciążenie zależą od aktualnej porowatości, która pod wpływem oddziaływań zmienia się. Kluczową rolę odgrywa tarcie. Na stykach dochodzi do poślizgów i kruszenia ziaren, które mają charakter nieodwracalny. Pomimo dyskretnej budowy ośrodka i punktowego sposobu oddziaływań międzyziarnowych, w modelowaniu dominuje podejście fenomenologiczne i posługiwanie się terminami mechaniki ośrodków ciągłych, takimi jak wytrzymałość i sztywność. Te zaś wymagają zdefiniowania ciągłych pól naprężeń i odkształceń. Zarówno wytrzymałość jak i sztywność zależą od aktualnego stanu układu, w tym porowatości, stanu naprężenia i stanu odkształcenia. W przypadku wprowadzenia zbrojenia geosyntetycznego, które ma przenosić rozciągania, ale jednocześnie tworzy więzy kinematyczne stabilizujące stykające się ze zbrojeniem i sąsiadujące z nim ziarna, obraz zjawisk mechanicznych bardzo się komplikuje. Niebanalną rolę odgrywają także właściwości reologiczne geosyntetyków oraz imperfekcje powstające przy ich układaniu.

W rozprawie podjęto ambitną próbę laboratoryjnego, terenowego i numerycznego modelowania wzmocniania podłoża poduszkami i geomateracami. W warunkach laboratoryjnych badań modelowych trudne jest odtwarzanie struktury gruntu o założonej porowatości, a mierzenie odpowiedzi podłoża na obciążenie możliwe jest na poziomie fenomenologicznym. W warunkach terenowych materiał gruntowy jest niejednorodny, zaś mierzenie jego sztywności i wytrzymałości jest skomplikowane. Numeryczne symulacje zachowania gruntu pod obciążeniem wymagają realistycznego odwzorowania kluczowych zjawisk i wymuszają konieczność stosowania złożonych modeli konstytutywnych. Każde z wymienionych wyżej podejść do modelowania jest poważnym wyzwaniem badawczym.

Szerokie ujęcie tematu przez doktoranta, w sensie użytych narzędzi badawczych, pociągnęło za sobą konieczność wielu kompromisów. Z jednej strony występowała dokładność modelowania zjawisk, z drugiej zaś konieczność kontynuowania badań przy ograniczonych zasobach sprzętowych, finansowych, czasowych i organizacyjnych. Daty wcześniejszych publikacji doktoranta wskazują, że badania były bardzo rozciągnięte w czasie.

W pracy postawiono trzy następujące tezy:

1. *Zastosowanie poduszki i materaca w sposób istotny zwiększa nośność podłoża gruntowego i redukuje osiadania fundamentu.*
2. *Efektywność wzmocnienia podłoża poduszką i geomateracem, wyrażona wzrostem nośności i redukcją osiadań, zależy od charakteru współpracy geosyntetyku i gruntu.*
3. *Przy dostatecznie dobrze zdefiniowanych modelach dyskretnych i parametrach modelu konstytutywnego, jesteśmy w stanie w miarę prostymi narzędziami odwzorować jego współpracę przy uwzględnieniu odmiennego jej charakteru w zależności od rodzaju geosyntetyku.*

W podsumowaniu tej części recenzji należy podkreślić aktualność i wagę tematyki, ambitne cele badawcze oraz szeroki zakres narzędzi modelowania, użytych do rozwiązania problemu.

4. Ocena znajomości dyscypliny na podstawie przeglądu literatury

W rozdziale trzecim przedstawiono stosunkowo szeroki, 30-stronicowy, przegląd literatury przedmiotu. Przegląd obejmuje:

- ogólną charakterystykę, właściwości mechaniczne, metody i wyniki badań geosyntetyków,
- współpracę geosyntetyków z gruntem,
- reguły prowadzenia badań modelowych,
- metody projektowania geopoduszek i geomateracy oraz
- analizy numeryczne.

W przeglądzie ujęto zasadnicze prace, istotne z punktu widzenia rozpatrywanej materii, jednakże poprzez użyty sposób cytowania (podawano zazwyczaj numer pozycji ze spisu literatury) nie rozgraniczono prac istotnych od przyczynkowych, pomijając w ten sposób wagę poszczególnych pozycji. Prace naukowe, które ze swej natury mają charakter recenzowanych, obiektywnych badań konkretnych autorów, cytowano obok katalogów komercyjnych firm, materiałów reklamowych, certyfikatów, stron internetowych, obowiązujących i wycofanych norm badawczych i projektowych, wreszcie dokumentacji projektowych i wykonanych na ich potrzeby dokumentacji badań podłoża.

Zdaniem recenzenta, celowe byłoby rozgraniczenie w spisie literatury poszczególnych grup materiałów, co przy odpowiednich oznaczeniach mogłoby zniwelować mankamenty przyjętego sposobu cytowania, ułatwiając czytanie i ocenę pracy.

Rozeznanie doktoranta w aktualnym stanie wiedzy należy ocenić jako odpowiednie. Należy także wyrazić nadzieję, że ma świadomość wagi przytaczanych prac i siłę stojących za nimi argumentów.

5. Ocena badań modelowych

5.1. Ocena badań modelowych w skali laboratoryjnej

Laboratoryjne badania modelowe zrealizowano w skrzyni o wymiarach 1 x 1 x 1 m. Skrzynię stanowiła stalowa rama, której boki wykonano z płyt z pleksiglasu o grubości 20 mm. W skrzyni wykonano łącznie 9 testów (oznaczonych jako modele o numerach od 1 do 9) uporządkowanych w dwie serie, różniące się mechanizmem wywołującym obciążenie. Dolną część skrzyni na stałe wypełniono 30 cm warstwą żwiru. Górną część do każdego testu oddzielnie wypełniano piaskiem. W każdej serii istotną rolę odgrywały trzy następujące konfiguracje ułożenia piasku, stosowane w poszczególnych modelach:

1. luźny piasek, stanowiący podłoże fundamentu, modelujący słaby grunt (modele 1, 4 i 5),
2. luźny piasek, jak w konfiguracji 1, w którym pod fundamentem wykonano poduszkę wzmacniającą o szerokości 28 cm i miąższości 14 cm (modele 2, 6 i 7),
3. luźny piasek z poduszką o szerokości 14 cm i miąższość 10,5 cm, pod którą wykonano geomaterac (stanowi go zagęszczony piasek o grubości 3,5 cm z dwiema warstwami geotkaniny) – łączna miąższość wzmocnienia jest identyczna jak w konfiguracji 2 (modele 3 i 8; w modelu 9 geotkaninę zastąpiono dwiema warstwami sztywnej siatki).

Modelem ławy fundamentowej była drewniana belka o długości zbliżonej do długości skrzyni, szerokości 14 cm i wysokości 23 cm, obciążana pionowo w środkowej części, za pośrednictwem przegubu kulistego. W pierwszej serii badań ręczny siłownik hydrauliczny przekazywał obciążenie na belkę poprzez dynamometr pierścieniowy. Osiadania modelu fundamentu rejestrowały 4 czujniki przemieszczeń usytuowane na obu końcach belki.

W serii tej piasek barwiono warstwami, w celu obserwacji odkształceń podłoża przez przezroczystą ścianę skrzyni. Drobnny piasek, modelujący słabe podłoże ($I_D = 6\%$) usypywano ręcznie z wysokości 10 cm (model 1). W modelu 2, w analogiczny sposób wykonano słabe podłoże oraz poduszkę o porównywalnym stopniu zagęszczenia ($I_D = 8\%$) usypaną z grubego piasku. W modelu 3 słabe podłoże i poduszkę wykonano analogicznie, zaś geomaterac wypełniono średniozagęszczonym kruszywem bazaltowym ($I_D = 65\%$). Rezultaty badań, dla każdego modelu, przedstawiono w postaci wykresów w układzie obciążenie – osiadanie. Zastosowanie poduszki zredukowało osiadania o 38%, zaś użycie poduszki i geomateraca aż o 65%.

Istotnym mankamentem pracy jest brak zamieszczenia rezultatów wykonanych badań cech fizycznych i mechanicznych w postaci krzywych przesiewu, badań Proctora, czy też badań w aparacie bezpośredniego ścinania. Zamieszczono jedynie liczbowe wyniki końcowe. Zasadne byłoby zamieszczenie pełnych wyników badań w załącznikach.

Pierwszą serię badań potraktowano jako badania wstępne, wprowadzając w drugiej serii modyfikację stanowiska badawczego i sposobu przygotowania podłoża. Ze względu na niestabilną pracę siłownika hydraulicznego w drugiej serii zastosowano dźwignię jednostronnej, na końcu której przykładano obciążniki. Zrezygnowano z barwienia piasku i paza modelem 4, zmieniono sposób zagęszczania gruntu stosując ręczny ubijak opuszczany z wysokości 15 cm. Masy ubijaka nie podano. W nowej metodzie układania słaby grunt uzyskał

zagęszczenie $I_D = 25\%$, a grunt poduszki, który w drugiej serii formowany był z piasku średniego, $I_D = 34\%$.

Decyzję o zwiększeniu stopnia zagęszczenia gruntów słabych z 6% w pierwszej serii na 25% w drugiej, należy ocenić pozytywnie. W tak luźnym gruncie liczba koordynacyjna (średnia liczba kontaktów pojedynczego ziarna z sąsiednimi ziarnami) jest bardzo mała. Makroporowata struktura ulega wówczas zapadaniu nawet przy nieznaczących oddziaływaniach, związanych np. z instalowaniem modelu fundamentu. Pozostałe zmiany mają także stronę negatywną.

Zdaniem recenzenta, w przeprowadzonych badaniach modelowych kluczową rolę odgrywa sposób przygotowania podłoża do badań, zapewniający jego jednorodność i powtarzalność zagęszczenia do kolejnych testów. Z wyjątkiem porównania modeli 1 i 4, różniących się sposobem realizacji obciążenia, w pracy nie zamieszczono wyników testów replikacyjnych. Porównanie wyników modeli 1 i 4 wskazuje na duże rozbieżności rezultatów, które autor przypisuje jedynie zmianie sposobu obciążenia. W początkowych fazach obu testów osiadania przyrastają proporcjonalnie do obciążenia i łatwo można oszacować, że sztywność gruntu w modelu 4 jest wyższa o ponad 70% od sztywności podłoża w modelu 1.

Wykonywanie warstw podłoża metodą usypywania stosowane w pierwszej serii, przy braku mechanizacji w postaci siewnika, było z pewnością bardzo pracochłonne. Zapewniało jednak lokalne oddziaływanie spadających ziaren i uzyskiwanie zbliżonego zagęszczenia na poszczególnych głębokościach w profilu pionowym. Istnieje obawa, że użycie w drugiej serii ubijaka, generującego impulsy dynamiczne, mogło dodatkowo dogęszczać także niższe warstwy piasku, wbrew założeniom o jednorodności. Jednocześnie nie wykonano badań jednorodności stanu zagęszczenia podłoża.

Kontrowersyjną decyzją było zastosowanie w modelu 9 sztywnej siatki o nieznanym parametrach mechanicznych, przy czym siatki tej nie poddano stosownym badaniom. Zdaniem recenzenta model ten powinien być wykluczony z rozważań.

Sztywność drewnianej belki modelującej fundament może być niewystarczająca przy zastosowaniu bardziej zagęszczonego podłoża. Szacunkowe obliczenia, przeprowadzone przy założeniu stałej wartości odporów pod fundamentem wskazują, że różnica przemieszczeń pionowych na długości belki w modelach zawierających wzmocnione podłoże może stanowić kilkanaście procent rejestrowanych osiadań.

Zmiana sposobu wymuszania przemieszczeń przez fundament, polegająca na rezygnacji z siłownika na rzecz dźwigni, ma także konsekwencje badawcze. Jest to *de facto* zastąpienie sterowania przemieszczeniem na sterowanie siłą. W pierwszym przypadku możliwe było obserwowanie ciekawego efektu osłabienia i związanej z tym redukcje nośności po wcześniejszym uzyskaniu maksymalnej nośności układu. Efekt taki, pokazany w przeglądzie literatury na rys. 3.20, odnotowali Hegde i Sitharam, 2012. Celowe byłoby zastąpienie hydraulicznego siłownika ręcznym siłownikiem sterowanym pompą. Milimetrowe przyrosty osiadania uzyskiwane w kolejnych stadiach obciążenia pozwalały także na użycie śrubowego mechanizmu wymuszania przemieszczeń.

5.2. Ocena badań modelowych prowadzonych w warunkach terenowych

Badania terenowe prowadzono w dwóch lokalizacjach, w Chorzowie i w Piekarach Śląskich, na stopach fundamentowych o naturalnych wymiarach, odpowiednio 1,5 x 3 m oraz 1,5 x 2 m. Testy miały charakter próbnego obciążenia, w których fundamenty balastowano płytami lub blokami żelbetowymi, mierząc osiadania za pomocą niwelatorów. Łącznie wykonano 5 testów. Na stanowisku w Chorzowie badano grunt rodzimy oraz grunt wzmocniony poduszką i geomateracem w jej spągu. Na stanowisku w Piekarach Śląskich wykonano trzy testy: na gruncie niezmodyfikowanym, na gruncie wzmocnionym poduszką z geomateracem z geosiatką oraz z poduszką i geomateracem wykonanym z wykorzystaniem georusztu.

Rodzime podłoże stanowiły w obu przypadkach nasypy niekontrolowane uformowane głównie z nieprzepalonego łupka, podścielone gruntami mineralnymi. Autor stwierdza, że w wykonanych otworach badawczych zwierciadła wód gruntowych nie stwierdzono. W Chorzowie do wypełnienia poduszki i geomateraca użyto równoziarnistego żwiru, który zagęszczano lekką płytą wibracyjną. W Piekarach zastosowano w tym celu różnoziarniste kruszywo żuźlowe.

Na stanowisku w Chorzowie grunt obciążono do wartości rzędu 160 kPa, a następnie odciążono do około 90 kPa i powtórnie obciążono. Zarówno w przypadku podłoża niezmodyfikowanego jak i wzmocnionego, zarejestrowano znaczący wzrost jego sztywności przy obciążeniu wtórnym. W Piekarach Śląskich zastosowano obciążenie ściśle monotoniczne i przemieszczenia mierzono do wartości obciążenia rzędu 125 kPa. Rezultaty testów przedstawiono na wykresach w układzie obciążenie – osiadanie. Test w Chorzowie wykonany na gruncie bez wzmocnienia oraz test w Piekarach Śląskich wykonany na podłożu wzmocnionym poduszką i georusztem wykazał usztywnianie się podłoża w całym zakresie obciążenia. Pozostałe dwa testy wykonane w Piekarach wykazały usztywnianie podłoża jedynie w początkowej fazie. Wykres wyników testu wykonanego na podłożu wzmocnionym w Chorzowie przebiegał w dużym przybliżeniu w sposób liniowy. Zastosowanie wzmocnienia w Chorzowie zredukowało osiadania o 27%. Wykonanie poduszki i materaca z geosiatką na stanowisku w Piekarach zmniejszyło osiadania o 7%, zaś zastosowanie georusztu zmniejszyło pierwotną wartość przemieszczenia pionowego aż o 56%.

Informacje o cechach antropogenicznych nasypów są bardzo lakoniczne. W pracy nie zamieszczono przekrojów geotechnicznych pozwalających ocenić budowę geologiczną obszarów badań. Co ważniejsze, nie zamieszczono wyników ilościowych badań terenowych dających obraz stanu gruntu w miejscach próbnych obciążeń i wzmocnień. Doktorant pisze zdawkowo, że w obu lokalizacja stanowiska badawcze umieszczono obok siebie, nie podając szczegółów – nawet odległości. Nasypy niekontrolowane zazwyczaj są bardzo niejednorodne zarówno w przekrojach pionowych jak i poziomych. Czytelnik nie znając tła (geotechnicznych warunków początkowych) nie może ocenić, czy wzmocnienie było skuteczne i czy zasadne jest porównywanie wyników z sąsiadującymi ze sobą punktów badawczych. Autor wyjaśnia, że badanie gruboziarnistego materiału, jakim jest nieprzepalony łupek i żużel jest trudne ze względu na obecność, a nawet lokalną dominację frakcji kamienistej. Istnieją jednak tanie i powszechnie stosowane metody badania takiego podłoża, przykładowo sondowania dynamiczne. Interpretacja wyników tych badań w gruntach antropogenicznych w sensie

wyznaczania konkretnych parametrów sztywności i wytrzymałości jest utrudniona, pozwala jednak dobrze pod względem jakościowym ocenić zmienność cech w profilach pionowych, a przy wykonaniu kilku testów w sąsiednich lokalizacjach, także zmienność horyzontalną stanu podłoża. Co więcej, w obu lokalizacjach realizowane były realne inwestycje i powstały dla nich standardowe dokumentacje geotechniczne, cytowane w pracy, które z dużym prawdopodobieństwem zawierały znaczną część brakujących w dysertacji danych.

W opinii recenzenta, podrozdział traktujący o badaniach modelowych w skali naturalnej w zaprezentowanej formie, pomimo zapewne dużego nakładu pracy doktoranta, przy braku zamieszczenia szczegółowych informacji o cechach mechanicznych podłoża w miejscach prowadzenia testów, znacząco ogranicza możliwość oceny zaprezentowanych na jego końcu wniosków.

6. Ocena symulacji numerycznych testów laboratoryjnych i terenowych

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki analiz numerycznych siedmiu wybranych modeli testowanych w laboratorium (modele 1÷3, 5, 7÷9) dla których wykonano symulacje 2D oraz trzech badań terenowych wykonanych w Piekarach Śląskich, dla których zrealizowano symulacje 3D. Do analiz użyto specjalistycznego systemu metody elementów skończonych *Z-Soil*.

Wszystkie symulacje wykonano z użyciem klasycznych modeli konstytutywnych: sprężysto-plastycznego modelu Coulomba-Mohra do modelowania warstw gruntowych oraz modelu liniowo-sprężystego do symulacji pozostałych elementów konstrukcyjnych, takich jak zbrojenie geosyntetyczne i poszczególne fundamenty.

Wobec ograniczonej liczby badań terenowych i laboratoryjnych cech mechanicznych gruntu, w pracy przyjęto koncepcję kalibrowania modeli numerycznych tzw. metodą analizy wstecznej. Wyjściowe wartości parametrów określono na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych i na podstawie literatury by następnie zmieniać ich wartości, aż do uzyskania zgodności przemieszczeń modelu numerycznego z wynikami eksperymentu. Parametry geosyntetyków przyjęto z certyfikatów producentów – wyjątek stanowi omówiony wcześniej model 9. W strefach kontaktu gruntu ze zbrojeniem dodatkowo zawyżono wartości parametrów sztywności i wytrzymałości gruntu, co miało symulować więzy nakładane przez geosyntetyk na sąsiadujące z nim ziarna. Jako miarę zgodności kalibrowanych modeli z eksperymentami przyjęto zmodyfikowany współczynnik determinacji, zaproponowany przez Pieczyraka, 2001.

Rezultaty symulacji zaprezentowano wg przyjętej już wcześniej konwencji, w układach obciążenie – osiadanie. Wykresy uzyskane z analiz numerycznych nakładano na wyniki eksperymentu, podając każdorazowo wartość miary zgodności. Na dodatkowych rysunkach przedstawiano warstwice przemieszczeń, zdeformowane siatki elementów skończonych oraz rozkłady wektorów przemieszczeń węzłów. Bardzo poważną usterką, zapewne redakcyjną, jest brak skali na niemal wszystkich wykresach warstwicowych.

Należy mieć świadomość, że analiza wsteczna jest niejednoznaczna. Dostarcza jedynie jednego z możliwych zestawów parametrów zapewniających określoną wartość miary zgodności. W takich przypadkach celowe może być zastosowanie dodatkowej analizy wrażliwości.

Pewnym elementem analizy wrażliwości jest wykres wpływu sztywności zbrojenia geosyntetycznego na relacje obciążenie – osiadanie, dotyczący jednego z modeli laboratoryjnych (rys. 6.13). Sztywność zbrojenia zmieniano w kolejnych symulacjach w bardzo dużym zakresie, od 0,4 MN/m (wartość podana przez producenta) do 1 GN/m, uzyskując umiarkowanie mały wpływ na nośność fundamentu i pomijalnie mały wpływ na sztywność układu fundament – podłoże. W tym kontekście rodzi się pytanie: dlaczego w wyniku analizy wstecznej dotyczącej próbnego obciążenia w Piekarach Śląskich końcowa wartość modułu Younga geosiatki jest niemal trzykrotnie niższa, zaś georusztu ponad sześciokrotnie wyższa od początkowych wartości podanych przez producentów?

Mając na uwadze opisane wcześniej trudności badań gruntów kamienistych nasuwa się kolejne pytanie: dlaczego w analizach wstecznych wykonanych testów laboratoryjnych i terenowych nie potraktowano próbnego obciążenia jako źródła informacji o sztywności podłoża? W miejsce parametrów literaturowych, których wartości były bardzo odległe od lokalnie występujących, wykorzystując formuły analityczne opracowane dla warstwy sprężystej obciążonej sztywnym pasmem lub stemplem (patrz np. Poulos, Davis, 1974) można było wyznaczyć wiarygodne wartości tych parametrów. Zabieg taki wpłynąłby stabilizująco na procedurę wsteczną zmniejszając liczbę zmiennych decyzyjnych.

Zastosowana w pracy metodyka kalibrowania parametrów modelu (po zakończeniu eksperymentu, gdy jego wyniki są już znane) określona została przez Lambego (1973) jako predykcja klasy C1. W projektowaniu wymagana jest predykcja klasy A – chcielibyśmy znać na etapie analiz projektowych zachowanie obiektu, zanim zostanie on wybudowany. Niemniej jednak, predykcje klasy C mogą być cennym źródłem informacji dla projektantów, gdy mają do czynienia ze specyficznymi dla danego regionu materiałami gruntowymi, jak nieprzepalony łupek, stanowiąc swego rodzaju studium przypadku.

Wykorzystany system MES umożliwia prowadzenie analiz 3D z zastosowaniem bardzo zaawansowanych modeli konstytutywnych, realistycznie odzwierciedlających wiele zjawisk zachodzących podczas obciążania i odciążania gruntu. Jednakże każdy model jest na tyle dobry na ile poprawnie wyznaczy się jego parametry. Użycie złożonych modeli wymagałoby wyznaczenia w badaniach wielu specyficznych parametrów, co byłoby trudne i kosztowne w wybranych miejscach badań terenowych. Stąd zdaniem recenzenta zastosowane podejście było uzasadnione, chociaż wyciągane wnioski zbyt daleko idące – co zostanie omówione w końcowej części recenzji.

6. Uwagi formalne i redakcyjne

Praca napisana jest poprawnym językiem technicznym, a jej struktura jest przejrzysta. Sposób cytowania literatury przez podawanie numerów pozycji ze spisu jest mało przyjazny, w szczególności w kontekście wspólnego spisu wszystkich pozycji (prac naukowych, materiałów informacyjnych i reklamowych firm, itd.) o czym była już mowa w 4 punkcie recenzji. Pozycje literatury zawierające adresy stron internetowych, ze względu na specyfikę tego medium, powinny być uzupełnione o daty, w których cytowane treści były dostępne.

Kolejność publikowania rysunków w przeglądzie literatury powinna odpowiadać kolejności ich omawiania, co nie wszędzie zostało spełnione.

Ze względu na dużą liczbę modeli badanych w laboratorium, przy odmiennych metodach wzmocnienia i zbrojenia, różnych sposobach zagęszczania, zmianie systemu obciążającego, wreszcie zmianie rodzaju gruntu i zmianie docelowych wartości poziomu zagęszczenia, śledzenie intencji doktoranta i analiza wniosków jest bardzo utrudniona. Celowe byłoby zebranie wszystkich 9 modeli w jedną tabelę, w której można było zaznaczyć specyfikę każdego z nich.

Istotną usterką jest brak skali na wykresach warstwicznych przemieszczeń. W przypadku jednego wykresu (rys. 6.4) skala się pojawia, lecz jest mała i zupełnie nieczytelna.

W pracy brak jest załączników, które mogłyby zawierać wykonane badania cech materiałów, których nie przytoczono w zasadniczej treści rozprawy, gdzie podano jedynie końcowe, liczbowe wyniki testów. W załącznikach można także było zamieścić wyniki badań wykonanych na potrzeby projektów komercyjnych, do których czytelnik pracy siłą rzeczy nie ma dostępu, a które są istotne z punktu widzenia oceny treści pracy (mowa tu przykładowo o przekrojach geologicznych w miejscach badań terenowych).

7. Ocena podsumowująca i wniosek końcowy

Geotechnika i Mechanika gruntów, nie należą do młodych dziedzin wiedzy. Od wydania pierwszego podręcznika Mechaniki gruntów autorstwa prof. Terzagiego minie niebawem 100 lat. W przypadku tak dojrzałych specjalności trudno jest formułować przełomowe tezy obalające wcześniejsze podglądy, które stanowiłyby zwrot w dyscyplinie. Postęp następuje w wyniku licznych prac, które niewielkimi krokami przesuwają zakres wiedzy o interesujących nas zjawiskach, a następnie pozwalają na ulepszanie metod badawczych i modyfikację metod projektowania. W takich warunkach formułowane tezy wielu prac doktorskich siłą rzeczy nie są przełomowe. Gdy już są formułowane zawierają raczej zapisy ogólnikowe, a często są zgodne z intuicją specjalistów w dziedzinie, przynajmniej pod względem jakościowym. Ich formułowanie, zdaniem recenzenta, bywa często sztuczne i wynika z przyjętej konwencji – jest więc elementem kulturowym, a nie wymogiem merytorycznym. Wartość pracy polega na planowaniu i realizowaniu niebanalnych eksperymentów, potwierdzaniu lub odrzucaniu założeń, czy wyników innych prac, krytycznym wnioskowaniu, a zazwyczaj na nauce na własnych błędach – tworząc postęp w dziedzinie. Jest to przypadek także tej rozprawy. W krajach anglosaskich całą pracę dokorską nazywa się po prostu tezami (*PhD thesis*).

W przypadku recenzowanej pracy pierwsza teza brzmi w sposób oczywisty '*Zastosowanie poduszki i materaca w sposób istotny zwiększa nośność podłoża gruntowego i redukuje osiadania fundamentu*'. Oczywiście jest, że wymienione tu metody wzmocnienia podłoża stosuje się od wielu lat by poprawiać cechy wytrzymałościowe. A ponieważ robi się to przez długi czas, to z pewnością jest to skuteczne. Nieostre sformułowanie, że metody '*w sposób istotny*' wpływają na tę poprawę daje pole do dywagacji, przy braku sformułowania kryterium ilościowego. Postawienie podobnej tezy byłoby zasadne, gdyby praktyka inżynierska wskazywała, że znaczna część takich wzmocnień kończy się niepowodzeniem i gdyby udało

się sformułować ilościowe warunki konieczne, których spełnienie zapewniałoby sukces metody.

Trzecia teza pracy, mówiąca że *'Przy dostatecznie dobrze zdefiniowanych modelach dyskretnych i parametrach modelu konstytutywnego, jesteśmy w stanie w miarę prostymi narzędziami odwzorować jego współpracę przy uwzględnieniu odmiennego jej charakteru w zależności od rodzaju geosyntetyku'* zawierająca także nieostre określenie. Zdaniem recenzenta teza ta zawiera zbyt daleko idącą sugestię. Zakładając, że autor dostatecznie dobrze zdefiniował modele dyskretnie i parametry modeli konstytutywnych, to i tak w kilku miejscach pojawiały się braki wynikające z przyjętych uproszczeń. Jest to np. wniosek, że skrzynia badawcza jest zbyt mała w stosunku do wymiarów modelu ławy fundamentowej. Wniosek ten wyciągnięto na podstawie analiz numerycznych, w których użyto modelu sprężysto-plastycznego, co oznacza, że wewnątrz powierzchni ograniczającej zachowanie modelu podłoża jest idealnie sprężyste, a z istoty podejścia deformacje mają charakter ciągły. Rzeczywisty luźny piasek doznaje zlokalizowanych odkształceń w sąsiedztwie podstawy fundamentu, a jego gęstość i sztywność wzrasta w tym rejonie. Grunt odległy od bezpośredniej strefy obciążenia jest wielokrotnie sztywniejszy. Przyjęcie bardziej realistycznego modelu konstytutywnego ustrzegłoby autora od formułowania powyższego wniosku. Każdy model jest tylko uproszczeniem rzeczywistości. Wnioskowanie, czy uproszczenia są, czy nie są zasadne warto przedstawiać, gdy użyło się obu sposobów modelowania.

Zdaniem recenzenta pominięcie trzech jednozdaniowych tez poprawiłoby jakość pracy, gdyż zwolniłoby jej autora z obowiązku uzasadniania oczywistych lub niejednoznacznych sformułowań. Wartością niniejszej pracy jest jej zawartość. Wystarczające są rzetelnie wykonane badania i symulacje oraz wyciągane na ich podstawie wnioski. Wszystkie te elementy muszą oczywiście podlegać krytycznej ocenie, by pokazać inną perspektywę niż ujęcie autora.

Praca zawiera szeroki zakres badań i symulacji, i dotyczy złożonej i ważnej specjalności naukowej, mającej charakter aplikacyjny. Autor wykazał się dobrym rozpoznaniem publikacji w przedmiotowej specjalności, umiejętnością planowania badań, krytycznej oceny wcześniejszych etapów własnej pracy i korygowania programu badań, umiejętnością prowadzenia badań laboratoryjnych, badań terenowych, umiejętnością prowadzenia symulacji numerycznych, interpretacji wyników pomiarów i obliczeń oraz formułowania wniosków. Pomimo przedstawionych uwag krytycznych, recenzowaną dysertację oceniam pozytywnie. Uważam, że praca mgr inż. Zygmunta Bartosza pt.: *„Analiza teoretyczna i doświadczalna wzmocnienia podłoża poduszką i geomateracem”* spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim, w związku z czym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do obrony.

dr hab. inż. Waldemar Szajna, prof. UZ

W. Szajna