

Recenzja spełnia wymagania formalne

Przewodniczący Rady Dyscypliny
Inżynieria Lądowa i Transport

dr hab. inż. Marcin Staniek, prof. PŚ

Zielona Góra 10.02.2021

Dr hab. inż. Waldemar Szajna, prof. UZ
Wydział Budownictwa, Architektury
i Inżynierii Środowiska
Uniwersytet Zielonogórski

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Magdaleny KRECZMAR

pt.: „*Analiza układu: podłoże – pal obciążony siłą poziomą
z uwzględnieniem zmiany sztywności układu*”

1. Podstawa opracowania recenzji

- Zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 21.12.2021 roku, zgodne z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport Politechniki Śląskiej w Gliwicach, z dnia 17.12.2021 roku.
- Egzemplarz rozprawy doktorskiej.

2. Charakterystyka rozprawy pod względem formalnym

Praca doktorska składa się z siedmiu rozdziałów w części zasadniczej oraz sześciu załączników. Rozdział 1. *Wprowadzenie*, zawiera cel, zakres i układ pracy. Rozdział 2. *Przegląd metod obliczania pali obciążonych siłą poziomą*, stanowi analizę stanu wiedzy. Rozdział 3. *Badania terenowe*, dotyczy badań gruntu i próbnego obciążenia pali. Rozdział 4. *Badania laboratoryjne*, poświęcony jest badaniom pali poddanych zginaniu w warunkach laboratoryjnych. Rozdział 5. *Analiza teoretyczna i obliczenia analityczne z wykorzystaniem wyników badań laboratoryjnych*, poświęcony jest tworzeniu modelu pala żelbetowego. Rozdział 6. *Analiza interakcji pal – podłoże gruntowe*, zważywszy na tytuł pracy, jest rozdziałem kluczowym, który zawiera symulacje zachowania testowanych pali, poddanych obciążeniom poziomym. Rozdział 7. *Zakończenie*, zawiera podsumowanie i wnioski oraz przedstawia perspektywy dalszych badań. Załączniki obejmują rezultaty badań gruntu, wyniki terenowych badań pali, wyniki badań laboratoryjnych pali oraz parametry materiałowe stali. Ponadto zamieszczono bibliografię, spis rysunków i spis tabel.

Praca liczy 217 stron w części zasadniczej oraz 46 stron załączników. Bibliografia obejmuje ponad 150 pozycje literatury naukowej oraz spis cytowanych norm. W pracy zamieszczono 128 rysunków i 27 tabel.

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

3. Ocena doboru tematu, celu i zakresu pracy

Rozprawa dotyczy analizy współpracy pali żelbetowych z podłożem gruntowym i obejmuje pale obciążane siłą poziomą, których zbrojenie stanowi profil stalowy.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 18.02.2021

nr RDUT/69 zał. —

Temat pracy jest bardzo aktualny, gdyż pale ze sztywnym zbrojeniem wykorzystywane są jako posadowienia pośrednie w obiektach kubaturowych, zaś kolumny betonowe zbrojone profilami stalowymi są bardzo powszechnie stosowane jako elementy wzmacniania podłoża, w szczególności stref krawędziowych nasypów drogowych i kolejowych. O szerokim wykorzystaniu takich pali i kolumn decyduje niższy koszt zbrojenia, w stosunku do rozwiązań ze zbrojeniem prętami wiotkimi, oraz łatwiejsza instalacja sztywnego zbrojenia na budowie. Wadą tego rozwiązania jest skoncentrowanie zbrojenia w osi geometrycznej przekroju pala i wynikający stąd brak zbrojenia w sąsiedztwie jego pobocznic, co bardzo niekorzystnie wpływa na nośność i sztywność konstrukcji poddanej zginaniu, ze względu na niską wytrzymałość betonu na rozciąganie. Autorka jest świadoma zarówno zalet, jak i wad takiego rozwiązania. Oddzielnym problemem technicznym jest sposób pograżania profilu stalowego w świeżym betonie pala. Spotykaną praktyką, nawet w renomowanych firmach, jest wciskanie profili z wykorzystaniem łyżki koparki, co może powodować niecentralne usytuowanie zbrojenia. Nawet w przypadku pograżania z wykorzystaniem wibratora, położenie zbrojenia nie podlega kontroli. Wydaje się, że imperfekcje geometryczne są immanentną cechą tego typu konstrukcji. Uwaga powyższa ma znaczenie w kontekście przyjętej w pracy metody analizy.

Celem pracy, jak podaje autorka, jest *„ocena zachowania zginanego pala o przekroju kołowym zbrojonego profilem stalowym z uwzględnieniem zmiany jego sztywności oraz nieliniowej zmiany oporu gruntu wraz z głębokością”*. Zmiany sztywności betonu powodowane są w głównej mierze jego zarysowaniem podczas zginania pala. Aspekt ten, jak podkreślono w poprzednim akapicie, jest bardzo istotny w analizowanej klasie konstrukcji. W standardowym projektowaniu, do wyznaczenia sił wewnętrznych i przemieszczeń, pomija się degradację sztywności betonu, pomimo że inżynierowie są jej świadomi. Podjęcie próby ilościowej oceny wpływu tego czynnika i uwzględnienia go w obliczeniach zasługuje na uznanie.

W układzie żelbetowy pal – ośrodek gruntowy, podłoże jest elementem o wielokrotnie mniejszej sztywności i mniejszej wytrzymałości. Ponadto, ze względu na rozdrobniony charakter ośrodka i rolę tarcia w przenoszeniu oddziaływań pomiędzy ziarnami lub cząstkami, konieczność uwzględnienia nieliniowości gruntu wydaje się oczywista. Druga część zdania definiującego cel pracy zawęża problem nieliniowości podłoża do zmian oporów wraz z głębokością. Warto jednak pamiętać, że sztywność gruntu zależy nie tylko od poziomu naprężenia (wzrasta, wraz ze wzrostem naprężeń średnich) zależy także od poziomu odkształceń, warunków drenażu, kierunku ścieżki obciążenia i kilku innych czynników.

Autorka podejmuje się ambitnego zadania analizy współdziałania dwóch materiałów konstrukcyjnych o skomplikowanym zachowaniu – żelbetu i ośrodka gruntowego. Każdy z nich jest domeną niezależnej specjalności w dyscyplinie inżynierii lądowej.

Zakres pracy jest szeroki i równie ambitny. Obejmuje badania terenowe pali w skali rzeczywistej, badania laboratoryjne pełnoskalowych elementów żelbetowych, analizy teoretyczne zachowania się przekroju żelbetowego podczas zginania i wreszcie analizy interakcji układu pal – podłoże gruntowe. Każdy z tych elementów jest poważnym wyzwaniem badawczym.

Podsumowując należy podkreślić aktualność i wagę tematyki, ambitne cele badawcze oraz szeroki zakres komplementarnych metod badawczych, użytych do rozwiązania problemu.

4. Ocena znajomości dyscypliny wiedzy

W rozdziale drugim przedstawiono szeroki, 52-stronicowy przegląd literatury przedmiotu, obejmujący metody obliczania pali obciążonych poziomo.

W kontekście modelowania gruntu, wyodrębniono metody bazujące na teorii reakcji podłoża, sprowadzające ośrodek gruntowy jedynie do strefy kontaktu z konstrukcją, nazywane w literaturze analogami, oraz metody traktujące grunt jako kontinuum. Na potrzeby prowadzonej w dalszych rozdziałach analizy przekrojów żelbetowych omówiono literaturę dotyczącą wyznaczania sztywności giętej pali. Wreszcie dokonano przeglądu inżynierskich metod projektowania pali obciążonych poziomo. W tej ostatniej kwestii, bez szkody dla rozprawy, można było zrezygnować ze szczegółowego omawiania metod mających dzisiaj jedynie znaczenie historyczne.

Zdaniem recenzenta autorka większy nacisk kładzie na literaturę dotyczącą teorii reakcji podłoża. Nie w pełni widzi wady tej grupy metod. Realny ośrodek gruntowy w przypadku konstrukcji w nim zagłębionej nie tylko przenosi reakcje od oddziaływań tej konstrukcji, jak w przypadku modeli reakcji podłoża, ale także generuje na nią parcie. Parcie to przyrasta wraz z głębokością, zmieniając zachowanie gruntu oraz warunki wzajemnego oddziaływania podukładów. Modele reakcji podłoża nie uwzględniają kluczowych dla zachowania gruntu zjawisk jak np. wpływ warunków drenażu, czy wpływ dylatacji. Istnieje ponadto trudność uwzględnienia interakcji pomiędzy sąsiadującymi konstrukcjami.

Z drugiej strony, zaawansowane modele konstytutywne gruntu, zaimplementowanych w dostępnych dla inżynierów programach komputerowych, ocenie są przez autorkę z perspektywy trudności wyznaczania parametrów (str. 33). Takie trudności oczywiście występują, ale warto pamiętać, że przesłanką do tworzenia zaawansowanych modeli konstytutywnych były niesatysfakcjonujące rezultaty uzyskiwane przy wykorzystaniu modeli prostych.

Zdaniem recenzenta, celowe byłoby zamieszczenie w rozdziale drugim dwóch dodatkowych podrozdziałów, charakteryzujących modelowanie zachowania gruntu i modelowanie zachowania żelbetu. Zbyt szybko autorka przeszła na poziom analizy metod obliczania układu pal żelbetowy – podłoże gruntowe.

Podsumowując, można stwierdzić, że na tym wczesnym etapie prac nad rozprawą, jakim jest analiza stanu wiedzy, skoncentrowano się na wybranych opcjach rozwiązania problemu.

Na podkreślenie zasługuje sposób dokonania przeglądu literatury. Autorka z dużą swobodą analizuje światową literaturę przedmiotu. Wystarczająco szeroko omawia poszczególne prace, aby przedstawić ich istotę. Dobór literatury oraz jej ilość, z zastrzeżeniami przedstawionymi powyżej, świadczy o dobrej znajomości dyscypliny.

5. Ocena rozwiązań podstawowego zagadnienia oraz użytych metod

5.1. Ocena badań gruntu i próbnego obciążenia pali

Badania terenowe prowadzono w dwóch miejscach, oznaczonych symbolicznie jako T/A i T/B, w których realizowane były budowy obiektów z wykorzystaniem pali fundamentowych. W

miejscu T/A, w którym wykonano dwa pierwsze próbne obciążenia pali o średnicy 0,4 m, podłoże zostało rozpoznane z wykorzystaniem trzech wierceń wykonanych na potrzeby budowy, znajdujących się w odległości kilkunastu/kilkudziesięciu metrów od miejsca testowanych pali. W bezpośrednim sąsiedztwie miejsca badania wykonano wiercenie do głębokości 2,5 m, celem pobrania próbek gruntu na potrzeby badań laboratoryjnych. Podłoże w miejscu badań jest bardzo niejednorodne. Tworzą je osady wodno-łodowcowe przykryte warstwą holocenijskich utworów rzeczno-zastoiskowych. Z punktu widzenia przedmiotowych badań naukowych niejednorodność podłoża nie jest cechą korzystną. W tym kontekście także zakres badań terenowych jest ograniczony. Pewnym standardem badań nawet tylko na potrzeby wykonawstwa pali na budowach są sondowania statyczne CPTu, zaś w przypadku pali obciążonych poziomo celowe byłoby wykonanie np. badań dylatometrycznych. Wykonanie tych badań pozwoliłoby na bardziej precyzyjne rozpoznanie podłoża, w tym także na ocenę parametrów sztywności, wytrzymałości i filtracji wyznaczonych w laboratorium.

Analizowany rozdział 3 obejmuje także badania laboratoryjne gruntu. Badania laboratoryjne, prowadzone na próbkach z głębokości 0,5 m i 2,5 m, dotyczyły wyznaczenia cech fizycznych i cech mechanicznych gruntu (parametrów wytrzymałości w aparacie bezpośredniego ścinania oraz badania ściśliwości w edometrze). Parametry gruntów z innych głębokości przyjęto na podstawie *Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej*, wykonanej na potrzeby budowy. Wyniki badań stanowią pierwszy z załączników rozprawy.

W drugim miejscu realizacji próbnego obciążenia pali, oznaczonym jako T/B, warunki gruntowe są także niejednorodne. Warstwy osadów czwartorzędowych stanowią gliny pylaste, pyły i pyły organiczne. Jak wynika z rysunków zaczerpniętych z *Dokumentacji badań podłoża gruntowego* wykonanej na potrzeby budowy, zakres badań terenowych był szerszy i obejmował także sondowanie statyczne CPT w sąsiedztwie miejsca próbnego obciążenia pali. Badania laboratoryjne gruntu obejmowały wyznaczenie cech fizycznych i mechanicznych, w tym przypadku jednak zamiast badań bezpośredniego ścinania wykonano badania trójosiowego ściskania.

Z przyczyn niewyjaśnionych w dysertacji, nie wykorzystano wyników CPT oraz nie zamieszczono rezultatów badań trójosiowego ściskania gruntu.

Do próbnego obciążenia pali w miejscu pierwszym (T/A) wykorzystano zrealizowane na potrzeby budowy pale o średnicy 0,4 m, długości 5 m i rozstawie osiowym 0,5 m, tworzące palisadę. W dwóch wybranych palach na sztywne zbrojenie w postaci dwuteownika IPE100, przed jego instalacją, naklejono tensometry elektrooporowe, odpowiednio na trzech i dwóch głębokościach. Ponadto na powierzchni terenu zainstalowano czujniki przemieszczeń, śledzące odchylenia poziome głowic pali w trakcie próbnego obciążenia. Belkę oporową siłownika oparto na dwóch sąsiednich palach. W wyniku eksperymentu uzyskano zależności obciążenie – przemieszczenie, na poziomie głowicy oraz relacje obciążenie – odkształcenie zbrojenia stalowego w punktach instalacji tensometrów.

Pewne zastrzeżenia budzi schemat stanowiska badawczego, gdyż pale kotwiące znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie pala badanego, zaledwie w odległości 10 cm od niego i poprzez stany naprężenia i odkształcenia w podłożu oddziałują na badany pal. Głowica testowanego pala przemieszczana jest w kierunku obciążenia generowanego przez siłownik, zaś głowice obu

sąsiednich pali, obciążone reakcjami zakotwienia przemieszczane są w kierunku przeciwnym. Grunt pomiędzy palami poddawany jest intensywnemu ścinaniu, które z pewnością redukuje jego sztywność. Takie warunki współpracy pali z gruntem nie występują przy obciążeniu eksploatacyjnym.

W miejscu drugiego testu obciążenia pali (T/B) konstrukcja wsporcza siłownika oparta jest na palu kotwiącym odległym o 1,8 m od pala badanego. W tym przypadku badany pal ma średnicę 0,5 m, długość 10 m, a w górnym 6-metrowym odcinku zbrojony jest dwuteownikiem IPE120. Do środka profilu zamontowano rurę do badań inklinometrycznych. Na wysokości głowicy pala zainstalowano czujniki przemieszczeń. W wyniku badań otrzymano zależności obciążenie – przemieszczenie oraz wartości przemieszczeń poziomych górnej części pala, na podstawie pomiarów inklinometrycznych.

W przypadku testów w miejscu T/B stanowisko badawcze nie budzi zastrzeżeń recenzenta.

5.2. Ocena badań laboratoryjnych

Rozdział 4 poświęcony jest badaniom laboratoryjnym pali. Eksperymenty wykonano na trzech palach o średnicy 0,4 m i długości 3 m, zbrojonych profilem stalowym IPE100. Przekrój poprzeczny i zbrojenie odpowiadają palom testowanym w miejscu palisady (T/B). Każdy z pali montowany był w układzie poziomej belki wspornikowej z utwierdzeniem na jednym końcu i obciążeniem pionową siłą skupioną na drugim. Do pomiaru przemieszczeń użyto czujników indukcyjnych. Odształcenia poboczniczy pala mierzono z wykorzystaniem systemu optycznego, zaś odształcenia zbrojenia z wykorzystaniem tensometrów. Wykonano ponadto standardowe badania wytrzymałości betonu użytego do wykonania pali.

Dla każdego z badanych pali uzyskano relacje siła – przemieszczenie, obraz zarysowania trzonu pala na poszczególnych etapach obciążenia oraz wartości odształceń powierzchni zbrojenia, w układzie odształcenie – moment zginający. W rozdziale tym zamieszczono także analizę wyników badań, porównując pomiary ugięć z przewidywaniami teoretycznymi, prowadzonymi przy założeniu, że pal nie ulega zarysowaniu. Brak zgodności tych dwóch rezultatów jest uzasadnieniem konieczności uwzględnienia degradacji sztywności przekroju żelbetowego w trakcie wzrostu obciążenia w dalszej części rozprawy. W końcowej części rozdziału opisano także obserwację wskazującą na koncentrację odształceń pala (nieciągłość krzywizny) w miejscach zarysowania.

W odniesieniu do tego rozdziału na odnotowanie zasługuje fakt, że aż trzy pełnowymiarowe konstrukcje poddano badaniom, na dobrze opomiarowanych stanowiskach. Pewne zastrzeżenie można mieć co do sposobu zamocowania pali w postaci utwierdzenia. Taki sposób zamocowania cechuje się trudną do określenia podatnością podpory, która wpływa na wartości pomierzonych przemieszczeń.

5.3. Ocena analiz teoretycznych badań laboratoryjnych

W rozdziale 5 przedstawiono analizy teoretyczne służące stworzeniu modelu obliczeniowego, który umożliwiłby symulacje pali żelbetowych ze sztywnym zbrojeniem poddanych obciążeniom poziomym. Autorka dąży do uzyskania dla wybranego przekroju pala, o określonej geometrii betonu i stalowego zbrojenia oraz o określonych zależnościach naprężenie

– odkształcenie dla materiałów składowych, relacji pomiędzy momentem zginającym i sztywnością przekroju na zginanie. Wykorzystuje dwa rodzaje związków konstytutywnych dla betonu, proponowanych w Eurokodzie 2, w postaci paraboli z gałęzią osłabienia przy ściskaniu i pominięciem naprężeń w strefie betonu rozciąganego oraz alternatywnie model jak wyżej, ale uwzględniający relację sprężysto-kruchą przy rozciąganiu. W przypadku stali, związek konstytutywny ma postać sprężysto-plastyczną bez wzmocnienia. Wykorzystując zasadę płaskich przekrojów Bernoulliego i całkując naprężenia normalne po polu przekroju pała można operować siłami przekrojowymi w miejsce naprężeń. Ponieważ obydwa związki konstytutywne przyjęto dla betonu zarysowanego, autorka uzyskuje dla przekroju żelbetowego relacje moment zginający – krzywizna w miejscu powstania rysy. Sztywność przekrojów pomiędzy rysami jest oczywiście większa. Aby uwzględnić ten fakt, autorka określa sztywność odcinkową pała. Wykorzystuje w tym celu aproksymację linii ugięcia, będącej nieciągłą krzywą z załamaniami w przekrojach zarysowanych, wielomianem.

Zdaniem recenzenta, w numerycznym modelowaniu żelbetowych konstrukcji prętowych i powierzchniowych istnieją dwa podejścia. W pierwszym, na wejściu tworzy się relacje konstytutywne dla przekroju. Są to np. relacje pomiędzy momentem zginającym i krzywizną pręta. Zaletą tego podejścia jest posługiwanie się w programach siłami wewnętrznymi, a przekrój sprowadzony jest do osi (punktu) lub do powierzchni środkowej. Konkretna relacja moment – krzywizna nie ma jednak cech ogólności, gdyż obowiązuje dla konkretnego przekroju o ustalonej geometrii i ustalonych cechach mechanicznych.

W alternatywnym sposobie modelowania na wejściu operuje się wprost relacjami naprężenie – odkształcenie, wyrażonymi przez określoną liczbę parametrów materiałowych. Na wejściu należy ponadto zdefiniować geometrię przekroju lub przekrojów z uwzględnieniem sposobu rozłożenia zbrojenia. W podejściu tym, w przypadku metody elementów skończonych, całkowanie naprężeń odbywa się wewnątrz programu na etapie tworzenia macierzy sztywności elementu. W ten sposób relacje konstytutywne i parametry geometryczne wchodzi do programu jako niezależne od siebie dane. Przykładowo, aby przeanalizować zachowanie pała, w którym sztywne zbrojenie w wyniku nieprawidłowości wykonawczych nie jest ustawione centralnie, wystarczy zdefiniować stosowną geometrię przekroju, pozostawiając niezmiennione parametry materiałowe, bez konieczności budowania nowych relacji moment – krzywizna. Oczywiście wielokrotnie całkowanie naprężeń wewnątrz programu na każdym przyroście obciążenia wydłuża działanie programu, ale jest to kompensowane wygodą użytkownika.

W opinii recenzenta nakłady związane z przygotowaniem relacji moment zginający – sztywność przekroju nie przekładają się na ułatwienie analiz numerycznych. W pełni zrozumiałe są natomiast względy utylitarne – zastosowana metodyka pozwoliła na wykorzystanie dostępnego oprogramowania komputerowego. Bezsporną zaletą tego podejścia jest możliwość zobrazowania, jak przekrój reaguje utratą sztywności na wzrost wartości momentu zginającego przewyższającej wartość momentu rysującego. Przyczynia się to do lepszego zrozumienia reakcji konstrukcji na obciążenie.

Na bardzo pozytywną ocenę w rozdziale 5. zasługują wnikliwe przeanalizowania współpracy sztywnego zbrojenia z otaczającą matrycą betonową, w tym porównanie odkształceń teoretycznych profilu stalowego i wartościami pomierzonymi. Materiał zawarty w rozdziale

jest z pewnością ogromnym źródłem wiedzy o zachowaniu przekrojów konstrukcji zespolonych. Z załączonych rezultatów badań wynika, że praktycznie bezpośrednio po zarysowaniu cały profil stalowy przenosi naprężenia rozciągające. Uwzględniając proporcje wymiarów przekroju stali i betonu oznacza to, że bardzo duża część przekroju poprzecznego pała szybko wyłącza się z przenoszenia obciążeń. Dotyczy to także przekrojów odległych od miejsca powstania rysy. Rozmieszczenie zbrojenia nie jest dostosowane do charakteru obciążenia. W tym kontekście interesujące byłoby uzyskanie odpowiedzi na następujące pytanie: Jaka jest relacja ceny pała do jego nośności w przypadku dominacji zginania, gdyż jak wspomniano we wprowadzeniu do rozdziału 1 pale te są chętnie stosowane ze względów ekonomicznych? Wydaje się, że autorka posiada narzędzia i wiedzę ekspercką do udzielenia odpowiedzi na to ważne pytanie.

5.4. Ocena analiz interakcji pał – podłoże gruntowe

Rozdział 6 w pierwszej części zawiera omówienie użytych metod analizy i użytych modeli materiałów oraz przyjęty sposób kalibracji parametrów. W drugiej części rozdziału zamieszczono wyniki analiz współdziałania układu pał – podłoże modelowanego w dwojaki sposób. W pierwszym podejściu, operującym w przestrzeni trójwymiarowej, pał i podłoże traktowane były jako ośrodki 3D. W drugim podejściu, układ był analizowany w przestrzeni jednowymiarowej, w której pał traktowano jako element prętowy, a do odwzorowania współdziałającego gruntu użyto modelu reakcji podłoża.

W analizach przestrzennych wykorzystano model liniowo-sprężysty, a także sprężysto-plastyczny model Coulomba-Mohra do odwzorowania podłoża oraz model Rankine'a z modyfikacją Menétreya i Willama do odwzorowania zachowania pała żelbetowego. Dyskretyzacji przestrzennej dokonano z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) oraz komercyjnego programu *Z-Soil*.

W przypadku analiz jednowymiarowych oprócz analiz liniowo-sprężystych, posłużono się nieliniowym modelem żelbetu, w którym sztywność przekroju uzależniona jest od wartości momentu zginającego oraz sprężysto-plastycznym modelem reakcji podłoża. Do dyskretyzacji przestrzennej wykorzystano metodę różnic skończonych (MRS) i autorskie programy prof. Grzegorza Wandzika, opracowane w Politechnice Śląskiej.

Przed wykonaniem analiz dokonano kalibracji modeli obliczeniowych. Zastosowano połączenie kalibracji lokalnej, polegającej na określeniu parametrów materiałowych na podstawie badań laboratoryjnych oraz globalnej, w której parametry modelu kalibruje się ze względu na zgodność zachowania modelu z pomierzonym zachowaniem realnej konstrukcji. Kalibracji parametrów sztywności dokonano z wykorzystaniem metody globalnej, dobierając wartość modułu Younga podłoża tak, by uzyskać zgodność przemieszczeń pała w podejściu 3D z wynikami próbnego obciążenia, w założonym zakresie obciążenia. Tak uzyskany moduł były następnie przekształcane na parametry modelu reakcji podłoża, zgodnie z metodyką omówioną w przeglądzie literatury.

Wyniki analiz współdziałania układu konstrukcja – podłoże poprzedzone zostały symulacją 3D badań laboratoryjnych pała z wykorzystaniem liniowo-sprężystego sposobu modelowania

materiału pala oraz z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu Rankine'a. Wskazano na rozbieżność wyników symulacji i badań laboratoryjnych przy wyższych poziomach obciążenia.

Porównanie przemieszczeń poziomych pala współdziałającego z podłożem modelowanym jako układ 3D wskazują na znaczną zgodność symulacji z eksperymentem, w przypadku przyjęcia zmodyfikowanego modelu Rankine'a. Gdy zaś pal był modelowany jako liniowo-sprężysty, występuje znaczna zgodność symulacji z testem w zakresie niskich poziomów obciążenia, do ok. 50% nośności. Przy obciążeniach równych nośności model taki wykazuje kilkukrotnie mniejsze przemieszczenia od pomierzonych.

Analiza przemieszczeń poziomych układu pal – podłoże w ujęciu modelu jednowymiarowego wskazuje na bardzo dużą wrażliwość wyników na wartość empirycznego parametru zwanego głębokością krytyczną z_c . Parametr ten jest związany ze sposobem przeliczania parametrów sztywności gruntu na parametry modelu reakcji podłoża. W literaturze, cytowanej w rozdziale drugim, wartość parametru z_c uzależniana jest od spistości gruntu. Najlepszą zgodność symulacji z eksperymentem uzyskano przy wartości tego parametru odmiennej od sugerowanej w literaturze przedmiotu.

W modelu jednowymiarowym dokonano także porównania wrażliwości rezultatów na sposób modelowania pala. Przemieszczenia uzyskane dla liniowego modelu pala wykazują wysoką zgodność z pomierzonymi przy niskich poziomach wyężenia (rzędu do 50%). Przy wyższym wyężeniu uwzględnienie redukcji sztywności pala wywołanego jego zarysowaniem pozwala na uzyskanie dobrej zgodności z pomiarami.

Zastosowany jednowymiarowy model pala sprowadza cechy żelbetu do degradacji sztywności wywołanej momentem zginającym, przez użycie nieliniowej relacji moment zginający – sztywność przekroju na zginanie. Uwzględniając charakter obciążeń działających na pale wykonane na budowach, należy zakładać, że proporcja siły osiowej do momentu zginającego może być znaczna, nawet w przypadku konstrukcji oporowych. Siła osiowa będzie kompensować niekorzystne skutki działania momentu zginającego. W tym kontekście rodzi się pytanie, czy model nie powinien uwzględniać wpływu siły osiowej na sztywność przekroju.

Zdaniem recenzenta, w rozdziale zamieszczono dużą ilość wartościowych analiz dotyczących przemieszczeń, sił wewnętrznych, zmian sztywności, rozwoju stref uplastycznienia gruntu i innych. Wyniki te pozwalają na głębsze zrozumienie istoty współdziałania pali z podłożem. Dążąc do dokładnego odwzorowania rzeczywistości nie możemy jednak zapominać o przybliżonym charakterze wyników symulacji numerycznych i złożoności natury zjawisk. Przykładowo, autorka stara się bardzo precyzyjnie kalibrować użyte modele na zgodność z eksperymentem prowadzonym dla pierwszego pala w miejscu T/A. Jednak w drugim teście, w tej lokalizacji, pomierzone przemieszczenia drugiego pala, przy niskim poziomie wyężenia (do 50%), są około trzykrotnie niższe niż pala pierwszego, użytego do kalibracji. Na taką rozbieżność wyników próbnego obciążenia mogły wpłynąć zarówno różnice w warunkach gruntowych, jak i różnice w sposobie wykonania badanych pali.

Prof. Gudehus w 1993 roku zorganizował warsztaty w Karlsruhe dotyczące przewidywania zachowania się stalowej, rozpartej ścianki szczelnej, w trakcie wykonywania wykopu i obciążania przyległego gruntu. Uczestnicy warsztatów wcześniej otrzymali wyniki

szczegółowych badań gruntu w miejscu eksperymentu i ich zadaniem było przewidzieć jak się zachowa realna konstrukcja. W trakcie warsztatów eksperyment został wykonany. Największe rozbieżności predykcji przemieszczeń, przesłanych przez uczestników, dotyczyły zaawansowanej fazy obciążenia. Wyniki różniące się o 100% od wyników pomiarów uchodziły za w miarę poprawne. Świadczy to o złożoności rozpatrywanej materii i ograniczonej dokładności symulacji. Od 1993 roku nastąpił jednak znaczny postęp w rozwoju modeli konstytutywnych gruntu.

Na str. 143 czytamy „Im bardziej skomplikowany model gruntu, tym więcej jego parametrów do zinterpretowania i identyfikacji, a tym samym większa niepewność miarodajności uzyskanych wyników”. Recenzent nie podziela sceptycyzmu autorki odnośnie stosowania zaawansowanych modeli konstytutywnych, w szczególności gdy modele te są dostępne w wykorzystywanym oprogramowaniu, a wykonane badania pozwalają na identyfikację parametrów. Program *Z-Soil* ma wbudowany model *Hardenig Soil*, a na próbkach pobranych w miejscu T/B wykonano badania trójosiowego ściskania. Wydaje się, że wszystkie komponenty do wykonania analizy były dostępne. Niechęć do stosowania zaawansowanych modeli jest być może wynikiem przeświadczenia, że skomplikowane zjawiska można symulować z równie dobrą dokładnością przy wykorzystaniu prostych modeli obliczeniowych. Taka reguła jednak nie obowiązuje i poza sytuacjami przypadkowej zgodności z eksperymentem wyników symulacji wykorzystujących proste modele lub sytuacji kosztownego ich kalibrowania, należy się liczyć z ograniczoną dokładnością rozwiązań. Identyfikacja wielu parametrów jest oczywiście uciążliwa, ale jest to cena płacona za dokładność rezultatów. Zrozumiała jest niechęć projektantów do stosowania złożonych modeli, gdyż wiąże się z koniecznością zgłębiania skomplikowanych teorii. W pracach badawczych nie powinno się *a priori* odrzucać modeli zaawansowanych.

Autorytet w dziedzinie mechaniki gruntów, prof. Lambe w artykule *Predictions in soil engineering* (1973) twierdzi, że predykcje są sednem praktyki inżynierskiej. Wyróżnia 5 klas predykcji, od klasy A (gdy potrafimy z zadowalającą dokładnością przewidzieć ilościowy przebieg zjawiska jeszcze przed jego rozpoczęciem) aż do klasy C1 (gdy nasza symulacja dotyczy poprawnego odtworzenia zjawiska, które już się zakończyło i znamy jego rezultaty). Analiza wsteczna jest przykładem z tej ostatniej grupy. W mechanice konstrukcji żelbetowych wiele predykcji jest klasy A i nie ma potrzeby próbnego obciążania na budowach takich elementów konstrukcyjnych jak belki, słupy czy stropy (wyjątek stanowią tutaj mosty). W przypadku geotechniki predykcje klasy A należą do rzadkości. Analizy wsteczne w celu kalibrowania modeli są na porządku dziennym a przykładowo próbne obciążanie pali jest pewnym standardem. Nie oznacza to jednak, że nie powinniśmy dążyć do predykcji klasy A. Krokiem naprzód na tej drodze jest stosowanie zaawansowanych modeli konstytutywnych. Wprawdzie badania związane z wyznaczaniem parametrów są kosztowne, ale koszty próbných obciążeń są zazwyczaj znacznie wyższe.

6. Ocena strony formalnej pracy

Praca napisana jest bardzo starannie, a jej struktura jest przejrzysta. Cechuje ją dobra polszczyzna, chociaż podwójne użycie słowa „układ” w tytule jest niefortunne. Rysunki są

czytelne i dobrze opisana. Recenzent napotkał bardzo niewiele usterek językowych, redakcyjnych i formalnych, których wykaz zamieszczono poniżej. Indeksy górne i dolne oznaczają odpowiednio numer wiersza liczony od góry strony lub od dołu.

Str. 27⁷. Niefortunne sformułowanie „równanie numeryczne”.

Str. 28₁₈. Błąd literowy – winno być „Po wystąpieniu ...”.

Str. 29¹⁰. f_r – moduł pękania. Czy nie jest to po prostu wytrzymałość betonu na rozciąganie?

Str. 32¹⁷. Niewłaściwa data publikacji – powinno być Meyerhof (1955).

Str. 53². Niejednoznaczny symbol I_p – tu wskaźnik plastyczności, a na następnej stronie moment bezwładności pala.

Str. 68₆. Indeks dolny po niewłaściwej stronie parametru – winno być „ $E_s = \dots$ ”.

Str. 94. Niewłaściwa średnica badanego pala na rys. 4-1.

Str. 123³. Niezrozumiałe zdanie „Wyznaczony w analizie ...”.

Str. 178₁₃. Umożliwiać coś, pozwalać na coś.

7. Ocena podsumowująca i wniosek końcowy

Doktorantka zajmowała się tematyką, która jest ważna z punktu widzenia praktyki inżynierskiej i złożona z punktu widzenia teoretycznego, obejmującą zagadnienia geotechniki oraz mechaniki konstrukcji żelbetowych. Wykazała się umiejętnością prowadzenia badań terenowych, badań laboratoryjnych, umiejętnością prowadzenia symulacji numerycznych oraz interpretacji wyników pomiarów i obliczeń. Literatura przedmiotu, jak i wykonane badania oraz symulacje zostały opisane w bardzo czytelny sposób. Wnioski, spostrzeżenia i uwagi formułowane były na każdym etapie prowadzonych prac w sposób przejrzysty. Świadczy to o dużej wnikliwości i umiejętnościach komunikacyjnych doktorantki. Zakres wykonanych badań świadczy zaś o pracowitości autorki.

Pomimo przedstawionych uwag krytycznych recenzowana dysertację oceniam wysoko i stwierdzam, że praca mgr inż. Magdaleny Kreczmar pt.: *„Analiza układu: podłoże – pal obciążony siłą poziomą z uwzględnieniem zmiany sztywności układu”* spełnia moim zdaniem ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim, w związku z czym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do obrony.

Waldemar Szajna