

Prof. dr hab. inż. Joanna Bzówka
Politechnika Śląska
Wydział Budownictwa
Katedra Geotechniki i Dróg
ul. Akademicka 5
44–100 Gliwice

Gliwice, 24 kwietnia 2026 roku

Wpłynęło
do Biura Wydziału WILiŚ
dn.'s 04.05.2026
L.dz 336 podpis [podpis]

RECENZJA

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Artura Zachodniego pt. „Badania współpracy fundamentów płytowo-palowych z podłożem gruntowym”

1. Podstawa opracowania recenzji

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Zachodniego pt. „Badania współpracy fundamentów płytowo-palowych z podłożem gruntowym” wykonano na podstawie pisma Dziekan Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej Pani Prof. dr hab. inż. Ewy Wojciechowskiej nr 148/WILiŚ/2026 z dnia 2 marca 2026 roku w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej nr 12/2026 z dnia 4 lutego 2026 roku, o wyznaczeniu na recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr inż. Arturowi Zachodniemu ze Szkoły Doktorskiej Wdrożeniowej na Politechnice Gdańskiej.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana praca doktorska została napisana w języku polskim, liczy 178 stron tekstu oraz 73 pozycje literatury. Praca doktorska zawiera załącznik (270 stron) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim.

Praca została podzielona na 7 rozdziałów, a te zostały podzielone na podrozdziały. Załącznik (zał.) zawiera wyniki przeprowadzonych analiz współpracy fundamentów płytowo-palowych z podłożem gruntowym dla złożonego i prostego schematu obciążenia uwzględniających wpływ różnych czynników w postaci wykresów i tabel. Analizy obejmowały wpływ modelu konstytutywnego (rozdział 1 zał.), wpływ początkowego stanu naprężenia (rozdział 2 zał.), wpływ anizotropii sztywności (rozdział 3 zał.), wpływ modelowania pali za pomocą belek – gęsta siatka elementów skończonych (rozdział 4 zał.), wpływ modelowania pali za pomocą belek – rzadka siatka elementów skończonych (rozdział 5 zał.), wpływ modelowania pali za pomocą belek – rzadka siatka elementów skończonych z lok. zagęszczonymi strefami na spodzie pali (rozdział 6 zał.), wpływ modelowania pali za pomocą belek – zestawienia zbiorcze (rozdział 7 zał.) oraz wpływ wiązania betonu – zestawienia zbiorcze (rozdział 8 zał.).

2.1. Aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy

W ostatnich latach, posadowienie budynków wysokościowych, jak również obiektów mostowych jest realizowane poprzez fundamenty płytowo-palowe, które stanowią alternatywę dla tradycyjnych fundamentów palowych. W przypadku występowania w strefie przypowierzchniowej glin o dużej sztywności bądź zagęszczonych piasków, fundamenty płytowo-palowe FPP ograniczają koszty posadowienia budowli.

Jak dowodzi Doktorant, zasadnicza różnica między tradycyjnym fundamentem palowym a fundamentem palowo-płytowym FPP polega na sposobie przekazywania obciążeń. W przypadku fundamentów FPP, obciążenia rozdzielane są pomiędzy płytę

fundamentową i pale. Odpowiednio zaprojektowany system FPP umożliwi znaczną redukcję kosztów inwestycyjnych, gdyż pale pełnią głównie funkcję ograniczającą różnicę osiadań, a ich pełna nośność nie musi odpowiadać całkowitemu obciążeniu konstrukcji. Kluczowe staje się zapewnienie odpowiedniej nośności całego układu fundamentowego. Będą spełnione wymagania dotyczące osiadań całkowitych i różnicowych przy mniejszej liczbie pali, jednocześnie zachowując wymagane parametry nośności fundamentu.

Autor rozprawy doktorskiej stwierdził, że dotychczasowe badania i doświadczenia w zakresie fundamentów płytowo-palowych koncentrowały się głównie na analizie rozdziału obciążeń pomiędzy płytę fundamentową i pale, uwzględniając zależności geometryczne, tj. długość pali, ich średnicę, rozstaw, stosunek powierzchni pali do powierzchni płyty fundamentowej oraz grubość płyty. Natomiast, według Doktoranta, analiza dostępnych metod obliczeniowych wskazuje, że jedynym podejściem umożliwiającym kompleksowe odwzorowanie wszystkich istotnych interakcji pomiędzy elementami fundamentu jest analiza numeryczna zagadnienia brzegowo-początkowego równowagi statycznej z zastosowaniem metody elementów skończonych MES.

Fundamenty bezpośrednie, w tym płyty fundamentowe, stanowią efektywne rozwiązanie w przypadku występowania gruntów o stosunkowo dużej nośności w strefie przypowierzchniowej, jednak nawet przy spełnieniu warunków nośności granicznej, może dojść do nadmiernych osiadań płyty fundamentowej.

Zastosowanie pali pozwala na skuteczne ograniczenie osiadań różnicowych, które mogą być dodatkowo zredukowane poprzez zwiększenie sztywności płyty fundamentowej. Spośród dostępnych metod kontroli osiadań, zastosowanie pali okazuje się być najbardziej efektywne i ekonomiczne, o ile warunki gruntowe są odpowiednie.

Jak podkreśla Autor rozprawy, w systemach fundamentowych opartych na współpracy płyty fundamentowej z palami, nawet ograniczona liczba pali może istotnie poprawić pracę systemu fundamentowego. W takich systemach pale nie pełnią roli podstawowych elementów nośnych, lecz działają jako elementy kontrolujące przemieszczenia; w efekcie ich liczba jest znacznie mniejsza niż w tradycyjnych rozwiązaniach palowych.

Doktorant dowodzi zasadność stosowania fundamentów płytowo-palowych FPP, w których pale współpracują z płytą fundamentową, a nie stanowią jej zamiennika. Oprócz funkcji związanej z ograniczaniem średnich i różnicowych osiadań, pale mogą również przyczynić się do zwiększenia nośności oraz sztywności całego systemu fundamentowego.

2.2. Struktura rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska składa się z siedmiu rozdziałów głównych, spisu literatury oraz załącznika.

W Rozdziale 1 Doktorant scharakteryzował fundamenty płytowo-palowe, które są przedmiotem badań i analiz podjętych przez Autora rozprawy. Zostały przedstawione główne założenia dotyczące rozwiązania posadowienia typu FPP oraz główne zależności geometryczne wpływające na pracę fundamentu płytowo-palowego. W rozdziale tym został przedstawiony przegląd literatury dotyczący systemu fundamentu płytowo-palowego, na podstawie którego Doktorant wskazał na konieczność indywidualnego podejścia do modelowania FPP w zależności od charakterystyki systemu fundamentowego oraz rodzaju obciążenia, zwłaszcza w przypadku uwzględniania oddziaływań poziomych.

W Rozdziale 1 zostały również opisane cele pracy, problem badawczy, zakres i struktura rozprawy. Autor rozprawy wskazał, że celem pracy jest opracowanie metodyki poprawnego modelowania współpracy fundamentów płytowo-palowych z ośrodkiem gruntowym, z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Głównym zagadnieniem badawczym jest pogłębiona analiza mechanizmu współpracy fundamentów płytowo-palowych z ośrodkiem gruntowym, ze szczególnym uwzględnieniem mechanizmu

redystrybucji obciążeń pomiędzy elementy palowe a grunt podlegający oddziaływaniu płyty fundamentowej. Jak stwierdza Doktorant, obecna praktyka inżynierska w zakresie projektowania tego rodzaju systemów fundamentowych opiera się na dużych uproszczeniach, najczęściej ograniczając się do modelowania płyty fundamentowej na sprężystym podłożu. Ujęcie problemu jako zagadnienia brzegowo-początkowego, rozwiązywanego przy zastosowaniu metody elementów skończonych, umożliwia kompleksowe odwzorowanie sprzężonych interakcji zachodzących pomiędzy płytą, palami a ośrodkiem gruntowym. Zaletą takiego podejścia jest możliwość uwzględnienia istotnych właściwości fizycznych gruntów, takich jak barotropia sztywności oraz jej nieliniowa degradacja z odkształceniem w zakresie małych i pośrednich odkształceń, anizotropia sztywności, prekonsolidacja oraz stan naprężenia początkowego. Ponadto, analizy numeryczne oparte na metodzie elementów skończonych pozwalają na uwzględnienie warunków odpływu wody w gruncie podczas obciążenia lub odciążenia.

Zasadniczym celem pracy, jak dowodzi Autor rozprawy, jest analiza wpływu sztywności, geometrii układu konstrukcyjnego, wariantów opisu materiałowego oraz warunków odpływu w podłożu na zachowanie fundamentów zespolonych. Na podstawie wyników analizy Doktorant przedstawił wytyczne do zastosowania w projektowaniu i weryfikacji fundamentów płytowo-palowych. Opracował model obliczeniowy na podstawie rzeczywistego obiektu inżynierskiego, dokładnie odwzorowując geometrię konstrukcji oraz schemat przyrostu obciążeń w kolejnych etapach jej wznoszenia. Warunki gruntowe zostały uproszczone poprzez przyjęcie jednorodnego podłoża, co pozwoliło na redukcję liczby zmiennych i zwrócenie szczególnej uwagi na analizę wpływu wybranych parametrów materiałowych. Doktorant określił również wpływ wymienionych wyżej czynników na zachowanie przyjętych wariantów FPP. Analizował ich wpływ na wartości osiadań średnich i różnicowych oraz redystrybucję obciążeń pomiędzy płytą fundamentową oraz palami.

W Rozdziale 2, Doktorant przedstawił podejście projektowe oraz kluczowe metody analizy fundamentów płytowo-palowych. Metody obliczeniowe zostały scharakteryzowane, począwszy od podejść konwencjonalnych, opartych na uproszczonych modelach analitycznych, aż do zaawansowanych technik numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych, stanowiących preferowane narzędzie w projektowaniu fundamentów płytowo-palowych. W rozdziale tym, w oparciu o wytyczne zawarte w normie EN 1997-3:2022, Autor przedstawił sposób sprawdzania stanów granicznych, zarówno nośności, jak i użyteczności, które muszą zostać spełnione w projektowaniu fundamentów FPP.

Rozdział 3 zawiera analizy numeryczne, w tym szczegółowy opis zastosowanego modelu obliczeniowego oraz przyjętych dla ośrodka gruntowego modeli konstytutywnych. Doktorant przedstawił strukturę modelu numerycznego, sposób odwzorowania elementów konstrukcyjnych – płyty fundamentowej i pali, oraz procedurę modelowania przyrostu obciążenia.

Autor rozprawy w Rozdziale 3 szczególną uwagę poświęcił analizie wpływu doboru modelu konstytutywnego, uwzględniania stanu początkowego naprężenia w podłożu oraz anizotropii sztywności na charakter pracy systemu fundamentowego FPP. Doktorant przeanalizował wpływ powyższych czynników na rozkład osiadań, podział obciążenia pomiędzy płytą i palami oraz ogólną odpowiedź konstrukcji. Na podstawie porównania uzyskanych wyników, Doktorant przedstawił wnioski dotyczące wrażliwości modelu na przyjęte założenia materiałowe oraz wskazał implikacje praktyczne w projektowaniu fundamentów płytowo-palowych w złożonych warunkach gruntowych.

Zagadnieniu modelowania pali fundamentowych w ujęciu trójwymiarowym został poświęcony **Rozdział 4**. Doktorant przedstawił zastosowaną metodę dyskretyzacji elementów konstrukcyjnych, w której pale zostały odwzorowane za pomocą elementów belkowych

współpracujących z przestrzennym ośrodkiem gruntowym. Ponadto, Doktorant analizował odpowiedzi modelu numerycznego uzyskane dla dwóch podejść: elementów objętościowych (3D) oraz jednowymiarowych (1D) elementów belkowych modelujących pale.

Rozdział 5 rozprawy zawiera analizę pracy fundamentu płytowo-palowego przy uwzględnieniu zmienności modułu sprężystości betonu w czasie, która wynika z procesu jego dojrzewania i twardnienia. Autor rozprawy w swoich analizach uwzględnił również etapowanie wzrostu sztywności materiału betonu oraz jego wpływ na rozdział obciążenia pomiędzy pale i płytę fundamentową.

W Rozdziale 6 można znaleźć wytyczne projektowe dla fundamentów FPP, które Doktorant opracował na podstawie analizy literatury oraz rezultatów własnych badań numerycznych. W wytycznych zostały uwzględnione zarówno aspekty geometryczne systemu fundamentowego FPP oraz doboru modeli konstytutywnych.

Wnioski końcowe z przeprowadzonych badań, dotyczące wpływu wybranych parametrów materiałowych ośrodka gruntowego na pracę fundamentu płytowo-palowego zostały przedstawione **w Rozdziale 7** pracy.

Ponadto praca zawiera spis wykorzystanej literatury oraz materiałów źródłowych, jak również wykaz dokumentów normatywnych oraz wytycznych projektowych.

Dodatkowo w rozprawie doktorskiej można znaleźć listę użytych w pracy oznaczeń, spis tablic i rysunków. Strukturę i zawartość rozprawy doktorskiej, jak również jej tytuł oceniam pozytywnie.

3. Ocena dorobku rozprawy

Punktem wyjścia dla tematyki podjętej przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej była potrzeba opracowania wytycznych projektowania fundamentu płytowo-palowego FPP, który może być stosowany do realizacji złożonych obiektów inżynierskich w trudnych warunkach gruntowych. W przypadku stosowania fundamentów płytowo-palowych FPP, przenoszenie obciążeń odbywa się poprzez współpracę płyty fundamentowej, pali oraz podłoża gruntowego.

Autor rozprawy dokonał przeglądu metod projektowania fundamentów płytowo-palowych, opisując następujące trzy alternatywne podejścia projektowe stosowane współcześnie w projektowaniu FPP, różniące się zakładanym mechanizmem współpracy pali i płyty fundamentowej w przenoszeniu obciążenia na podłoże gruntowe:

- podejście „konwencjonalne” – w którym pale stanowią główny element nośny, przenosząc zasadniczą część obciążeń na głębsze nośne warstwy gruntu. Zakłada się jednocześnie, że płyta fundamentowa przejmuje niewielką część obciążeń, zwiększając ogólną sztywność systemu,
- podejście „*creep piling*” – w którym zakłada się pracę pali przy poziomie obciążeń zbliżonym do wartości progowej, przy której rozpoczyna się pełzanie materiału gruntowego, typowo odpowiadającej 70÷80% nośności pala; podejście to dopuszcza pełne wykorzystanie nośności pali,
- podejście oparte na kontroli osiadań różnicowych – główny nacisk położony jest na ograniczenie osiadań różnicowych, które stanowią istotne zagrożenie dla integralności konstrukcji, natomiast redukcja osiadań średnich nie jest celem nadrzędnym.

Doktorant przedstawił również klasyfikację metod analizy FPP, dzieląc je na metody uproszczone, przybliżone i dokładne.

Z uwagi na fakt, że statyczny schemat fundamentu płytowo-palowego cechuje się wysokim stopniem złożoności wynikającym z jego geometrii, wzajemnych interakcji pomiędzy elementami systemu fundamentowego oraz często występującego zróżnicowania warstwowego podłoża gruntowego, Doktorant stwierdził, że w praktyce inżynierskiej tego

rodzaju zagadnienia są rozwiązywane poprzez modelowanie numeryczne, dlatego przeprowadził wielowariantową analizę numeryczną systemu FPP.

Aby możliwe było przeprowadzenie wiarygodnej analizy rzeczywistego obiektu geotechnicznego, konieczne było sformułowanie modelu numerycznego, który powinien uwzględniać m.in.: sposób modelowania warunków filtracji i odpływu wody, wybór wymiaru przestrzennego modelu oraz granic obszaru obliczeniowego, sposób odwzorowania elementów konstrukcyjnych, jak również wybór modelu materiałowego.

Autor rozprawy, na potrzeby analiz numerycznych, wykorzystał program *Z_Soil*, z uwagi na zaawansowane możliwości tego programu w zakresie modelowania nieliniowego zachowania się gruntu, w tym dostępność modeli konstytutywnych *Hardening Soil Brick* (HS-Brick) oraz *Anisotropic Hardening Soil Brick* (AHS-Brick), które umożliwiają uwzględnienie zmiennej sztywności ośrodka w zakresie małych i pośrednich odkształceń oraz efektów anizotropii sztywności. W celach porównawczych Doktorant przeprowadził również obliczenia kontrolne w programie *Plaxis*.

Dla Autora rozprawy podstawowym zagadnieniem badawczym była analiza mechanizmów współpracy fundamentów płytowo-palowych z podłożem gruntowym. Przy wyborze modeli konstytutywnych Doktorant uwzględnił nieliniową zależność sztywności od naprężenia, degradację sztywności w zakresie małych i pośrednich odkształceń, anizotropię cech sprężystych oraz klasyczne kryterium wytrzymałości na ścinanie. Do analiz został wykorzystany model *Hardening Soil* (HS), a do modelowania sztywności w zakresie małych odkształceń model *Hardening Soil Small* (HSS) oraz modele *Hardening Soil Brick* (HS-Brick) i *Anisotropic Hardening Soil Brick* (AHS-Brick).

Analizowany przebieg interakcji w fundamentach płytowo-palowych był analizowany pod kątem wpływu warunków drenażu w gruncie, początkowego stanu naprężenia, opisu materiałowego gruntu, schematu obciążenia oraz samej geometrii fundamentu płytowo-palowego, tj. gęstości siatki pali. Doktorant wypracował sposób porównywania interakcji fundamentu FPP z podłożem w różnych schematach, warunkach początkowych oraz opisach materiałowych. Podstawowym wykresem opisującym pracę FPP jest krzywa zależności współczynnika α_{PRF} od czasu. Wykresy zmian α_{PRF} oraz obciążenia są przedstawiane z wykresami osiadania środka fundamentów w czasie. Do obliczenia aktualnej wartości α_{PRF} dla całego fundamentu stworzono skrypty w języku *Python* sumujące składową pionową naprężenia na brzegach elementów skończonych reprezentujących grunt i zlokalizowanych bezpośrednio pod płytą. W zakresie analizy przemieszczeń FPP, oprócz wartości osiadania środka płyty fundamentowej, Autor rozprawy rozpatrywał również jej przechyły oraz ugięcia.

Doktorant w swojej pracy przedstawił uproszczenia stosowane w analizie numerycznej fundamentu płytowo-palowego w projektowaniu.

W celu analizy pracy fundamentu FPP, w którym pale odwzorowano za pomocą jednowymiarowych, nielokalnych elementów belkowych, Autor przeprowadził dodatkowe analizy numeryczne przy wykorzystaniu modelu HS-Brick do modelowania warstwy gruntów drobnoziarnistych w warunkach z konsolidacją. Obliczenia zostały przeprowadzone dla trzech wariantów siatek elementów skończonych: siatki gęstej, odpowiadającej dyskretyzacji w modelu z palami objętościowymi, siatki rzadkiej oraz siatki rzadkiej z lokalnym zagęszczeniem w strefie spodu pali fundamentowych. Obliczenia zostały wykonane dla dwóch schematów obciążenia: przy jednoczesnym działaniu sił pionowych, poziomych oraz momentów zginających (I schemat: MHV) oraz przy wyłącznym działaniu sił pionowych (II schemat: V).

Autor rozprawy, w celu oceny wpływu procesu wiązania betonu na pracę fundamentu płytowo-palowego, przeprowadził serię analiz obliczeniowych na przykładowym fundamencie podpory mostowej posadowionej na 20 palach w siatce 5 x 4, zaś wpływ efektu zmiany sprężystości betonu w czasie na pracę fundamentu FPP analizował przy założeniu

natychmiastowego przyłożenia pełnego obciążenia (wariant 1) oraz przy założeniu etapowego przyrostu obciążenia (wariant 2). W celu uzyskania realnych wyników, całkowite obciążenie od konstrukcji w obu wariantach było przyjęte w taki sposób, aby było one jak najbliższe ciężarowi części konstrukcji, która powinna zostać zbudowana w ciągu 28 dni. Analizy zostały przeprowadzone z uwzględnieniem konsolidacji do praktycznie całkowitej dyssypacji nadciśnienia porowego, a wiązanie betonu zamodelowano poprzez zastosowanie funkcji obciążenia, czyli poprzez przyrost wartości modułu Younga betonu w czasie.

Na podstawie wniosków wynikających z przeprowadzonych analiz, w rozdziale 6 rozprawy doktorskiej, Doktorant przedstawił rekomendacje dotyczące projektowania fundamentów płytowo-palowych, stwierdzając że z uwagi na złożoność systemu fundamentowego, skuteczne zaprojektowanie FPP jest możliwe jedynie przy ścisłej współpracy projektanta konstrukcji i projektanta posadowienia. Efektywna współpraca obu specjalistów umożliwia opracowanie bezpiecznego i optymalnego pod kątem ekonomicznym projektu FPP.

Autor rozprawy określił podstawowe zadania projektanta posadowienia oraz projektanta konstrukcji, do których zaliczył, odpowiednio:

- zadania projektanta posadowienia: określenie parametrów gruntowych i ich zmienności w podłożu, oszacowanie nośności pali i płyty, prognozowanie osiadania, przechyłów oraz redystrybucji obciążeń, analiza i weryfikacja pracy pali w stanach granicznych nośności i użytkowalności,
- zadania projektanta konstrukcji: określenie obciążeń działających na konstrukcję (obciążenia stałe i zmienne, obciążenia wiatrem, sejsmiczne, wynikające z parcia gruntu oraz przemieszczeń podłoża, czynniki środowiskowe – śnieg, lód), wyznaczenie wartości granicznych parametrów użytkowych, zgodnie z wymaganiami normowymi oraz obowiązującymi wytycznymi krajowymi dotyczącymi funkcjonalności i bezpieczeństwa użytkowania obiektu, analiza pracy płyty fundamentowej i zaprojektowanie jej zbrojenia.

Ponadto, Autor rozprawy stwierdził, że aby oszacować realne przemieszczenia, odkształcenia, zarówno konstrukcji, jak i współpracującego z nią podłoża gruntowego, konieczne jest uwzględnienie nieliniowego zachowania się gruntu, szczególnie w zakresie bardzo małych i pośrednich odkształceń. Wymaga to sformułowania zagadnienia współpracy fundamentu płytowo-palowego z gruntem jako zagadnienia brzegowo-początkowego równowagi statycznej, które rozwiązuje się poprzez modelowanie numeryczne za pomocą metody elementów skończonych.

Niewątpliwie wielką zaletą recenzowanej rozprawy doktorskiej jest fakt, że Doktorant przedstawił zestawienie tabelaryczne parametrów gruntowych do zalecanych modeli gruntowych, tj. modelu HS oraz HS-Brick, modelu AHS-Brick, jak również opracował wytyczne dotyczące rozpoznania gruntowego, wytyczne dotyczące wyznaczania parametrów bezpośrednio z badań laboratoryjnych, jak również przedstawił pośrednią identyfikację parametrów dla gruntów na podstawie testów elementowych.

Autor rozprawy przedstawił również budowę modelu numerycznego fundamentu płytowo-palowego w systemach MES, obejmującego realny model geometryczny zarówno elementów konstrukcyjnych fundamentu, jak i ośrodka gruntowego. Doktorant odwzorował właściwości materiałowe konstrukcji oraz gruntu, a także zamodelował kontakt pomiędzy elementami konstrukcyjnymi i podłożem gruntowym. Dla wiarygodnego odwzorowania pracy FPP wraz z towarzyszącymi interakcjami między jego elementami, zastosował przestrzenny model numeryczny, ograniczając model obliczeniowy do reprezentatywnego fragmentu rzeczywistego układu fundamentowego, dobierając w ten sposób wymiary, aby wpływ konstrukcji na krawędzie modelu był pomijalny. Jednocześnie Doktorant zwrócił uwagę, że aby zapewnić wiarygodne wyniki analizy numerycznej FPP, należy przestrzegać następujących zaleceń: zastosować symetrię geometryczną, wykluczyć możliwość

wystąpienia odkształceń plastycznych w rejonach brzegowych, dolna granica modelu powinna zostać zlokalizowana na takiej głębokości, aby warunki brzegowe nie wpływały sztucznie na rozkład przemieszczenia i naprężenia w strefie pracy fundamentu, zastosować gradację siatkowania – siatka elementów skończonych powinna być najgęstsza w rejonie bezpośrednio pod płytą i palami, po zbudowaniu modelu należy przeprowadzić analizę wrażliwości na rozmiary modelu obliczeniowego.

Komponentami modelu numerycznego MES są ośrodek gruntowy, elementy konstrukcyjne, pale fundamentowe oraz elementy kontaktowe typu *interface*.

Proces budowy FPP powinien być modelowany etapowo. Kluczowymi parametrami geometrycznymi, determinującymi zachowanie FPP są grubość płyty fundamentowej, liczba pali, rozstaw pali, lokalizacja pali, średnica i długość pali. Kontur płyty fundamentowej powinien być tak dobrany, aby dla rozwiązania posadowienia bezpośredniego nie występowało rozciąganie na styku płyta – grunt. Grubość płyty, jak dowodzi Doktorant, ma istotny wpływ na rozkład obciążeń pomiędzy poszczególne pale; im większa jest grubość płyty, tym bardziej równomierny staje się rozkład sił w palach, co z kolei wpływa korzystnie na interakcję pala z gruntem.

Autor rozprawy zaleca, aby dla fundamentu FPP grubość płyty nie była mniejsza niż 1,0 m. Wstępna liczba pali może zostać przyjęta na podstawie uproszczonej metody podanej przez Longa (2015), według której należy oszacować obciążenia przenoszone przez płytę fundamentową bez pali przy zadanym osiadaniu; obciążenie to odpowiada wartości przenoszonej przez płytę FPP. Następnie należy oszacować obciążenia przenoszone przez pale ($P_{pale} = P_{całkowite} - P_{płyta}$), gdzie $P_{całkowite}$ to całkowite przyłożone obciążenie. Na końcu należy oszacować liczbę pali, zakładając, że pale pracują blisko granicy nośności. Liczba pali może być wyznaczona jako $n = P_{pale} / P_s$, gdzie P_s to nośność graniczna pojedynczego pala.

Według Autora rozprawy, zalecany początkowy rozstaw pali wynosi od 3 do 4 wielokrotności średnicy pala. Układ pali należy zweryfikować na podstawie obliczeń, uwzględniając wymagania projektowe dotyczące dopuszczalnych osiadań i przechyłów konstrukcji. W przypadku płyt fundamentowych o dużej powierzchni, lokalizacja pali powinna być skoncentrowana w rejonach o największych obciążeniach, aby były zredukowane osiadania różnicowe.

Zalecane pale stosowane w FPP rozpoczynają się od średnicy ok. 600 mm, a kończą na palach wielkośrednicowych. W uzasadnionych przypadkach, jak stwierdza Doktorant, jest możliwe zastosowanie baret fundamentowych wykonywanych w technologii ścian szczelinowych. Długość pali powinna być tak dobrana, aby osiągnąć możliwie równomierne osiadania całej płyty. Długość pali nie powinna przekraczać szerokości płyty fundamentowej, a w obszarach o mniejszym obciążeniu dopuszcza się skrócenie długości pali.

Analiza fundamentów płytowo-palowych polega na sprawdzeniu stanów granicznych nośności i użyteczności oraz oszacowaniu procentowej wartości sił, które przenoszone są przez pale. W tym celu wykonuje się model obliczeniowy, który pozwoli na rzetelne oszacowanie osiadania i przechyłów konstrukcji oraz wyznaczenie sił wewnętrznych w elementach konstrukcyjnych, a także sprawdzenie nośności granicznej całego fundamentu płytowo-palowego.

Jak zaznacza Autor rozprawy, w przeprowadzonych analizach obliczeniowych szczególną uwagę zwraca się na sprawdzenie przebiegu rozdziału obciążenia na pale i bezpośrednio na grunt poprzez płytę fundamentową (współczynnik α_{PRF}). Jak wykazał Doktorant, w początkowej fazie wzrostu obciążenia znaczną część sił przenoszą pale, co wynika z ich większej sztywności w porównaniu z podłożem gruntowym, a po osiągnięciu wartości maksymalnej udziału pali w przenoszeniu obciążenia (α_{PRF}^{MAX}), dalszy przyrost obciążenia prowadzi do stopniowej mobilizacji reakcji podłoża na poziomie spodu płyty. Wzrost naprężenia w gruncie powoduje zwiększenie jego sztywności; równocześnie dochodzi

do uplastycznienia gruntu w strefie poziomu podstaw pali, co skutkuje przejmowaniem większej części obciążenia bezpośrednio przez podłoże gruntowe.

Doktorant stwierdza również, że po przyłożeniu pełnego obciążenia obserwuje się stopniowy spadek udziału pali w przenoszeniu obciążenia, wynikający z postępującej konsolidacji gruntu, czyli sukcesywnej dyssypacji nadciśnienia porowego wygenerowanego przyłożonym obciążeniem. Wraz z upływem czasu, wraz ze spadkiem wygenerowanego nadciśnienia porowego, układ dąży do ustabilizowania, a rozdział obciążenia pomiędzy palami i gruntem przyjmuje stałą wartość.

Jak dowiódł Autor rozprawy, współpraca fundamentu płytowo-palowego z gruntem jest najefektywniejsza, gdy dochodzi do redystrybucji obciążenia na skutek której udział sił przenoszonych przez pale maleje, a procent sił przenoszonych bezpośrednio przez grunt rośnie, a tym samym jest osiągana stabilizacja wartości współczynnika α_{PRF} .

Doktorant przedstawił zasady projektowania fundamentu FPP za pomocą krzywej α_{PRF} – obciążenie, które są następujące:

- w pierwszym etapie projektuje się płytę (fundament bezpośredni), która charakteryzuje się brakiem odrywania,
- w następnej kolejności definiowane są pale, ich rozstaw, średnica oraz długość. Średnica jest przyjmowana na podstawie grubości płyty i możliwości wykonawczych. Zakłada się, że płyta nie ulega zmianie w dalszych etapach optymalizacji rozwiązania FPP,
- po określeniu wstępnej geometrii FPP i po przeprowadzeniu pierwszych analiz numerycznych, opracowuje się i ocenia rozkład współczynnika α_{PRF} w funkcji przyrostu obciążenia,
- dostosowuje się rozstaw i/lub długość pali, dokonując zmian w ich rozstawie i długości, aż do momentu uzyskania wymaganej współpracy podłoża w przenoszeniu obciążeń oraz osiągnięcia stabilnej wartości współczynnika α_{PRF} ,
- po uzyskaniu pożądanego schematu pracy FPP, sprawdza się spełnienie warunków stanu granicznego użyteczności, dokonując ewentualnych korekt rozstawu, liczby lub długości pali, aż do momentu spełnienia SGU i uzyskania oczekiwanego charakteru pracy układu FPP.

Doktorant w swojej pracy pokazał, że projektowanie fundamentów płytowo-palowych stanowi złożony proces. Ostateczne rozwiązanie projektowe powinno zapewniać spełnienie warunków zarówno stanu granicznego nośności SGN, jak i stanu granicznego użyteczności SGU. Z uwagi na relatywnie duże wymiary płyty fundamentowej w stosunku do obciążeń, stan graniczny nośności nie stanowi ograniczenia projektowego. Ponadto, projekt FPP powinien maksymalizować udział podłoża w przenoszeniu obciążeń, co pozwala na optymalizację kosztów realizacji posadowienia.

Biorąc pod uwagę zakres pracy można stwierdzić, że postawione na początku rozprawy doktorskiej przez mgr inż. Artura Zachodniego cele zostały osiągnięte, a problem badawczy został rozwiązany.

4. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

Rozprawa doktorska została napisana przez mgr inż. Artura Zachodniego poprawnym językiem polskim. Wszystkie rysunki, tablice zostały przygotowane z dużą starannością, dokładnością i dbałością o szczegóły.

Po zapoznaniu się z treścią pracy nasuwają się pytania:

- czy jest możliwe zastosowanie w proponowanej przez Doktoranta metodzie projektowania FPP innych modeli konstytutywnych dla gruntu, np. modelu Mohra-Coulomba? Czy były wykonywane analizy numeryczne z wykorzystaniem tego modelu?

- czy opracowane przez Doktoranta wytyczne projektowania fundamentów FPP z wykorzystaniem metody MES zostały wdrożone do praktyki inżynierskiej?
- jakie są kierunki przyszłych prac związanych z projektowaniem i wykonawstwem fundamentów FPP?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Głównym celem pracy doktorskiej było opracowanie wytycznych projektowania fundamentów płytowo-palowych FPP z wykorzystaniem metody elementów skończonych, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu założeń modelowania numerycznego na ocenę pracy fundamentu.

Z całym przekonaniem można stwierdzić, że Autor rozprawy w swojej pracy badawczej zrealizował postawione przez siebie cele pracy i problemy badawcze. Realizacja tych zadań odznaczała się wysokim stopniem złożoności obliczeniowej, wynikającym m.in. z konieczności zastosowania zaawansowanych modeli konstytutywnych, prowadzenia symulacji wielkoskalowych oraz trójwymiarowych modeli przestrzennych. W celu zapewnienia równowagi pomiędzy rzeczywistym modelem a realizacją obliczeń, Doktorant przyjął jako analizowany model fundament podpory mostowej.

Autor rozprawy zauważył, że najistotniejszy wpływ na wyniki modelowania numerycznego stwierdzono w odniesieniu do opisu nieliniowej sztywności gruntu w zakresie małych odkształceń oraz przyjęcia realistycznego współczynnika parcia spoczynkowego K_0 , w szczególności w gruntach prekonsolidowanych. Doktorant wykazał również istotny wpływ anizotropii sztywności na redukcję prognozowanych osiadań FPP. Ponadto wskazał na zasadność stosowania warunków konsolidacyjnych w analizach FPP realizowanych w podłożu zbudowanym z gruntów drobnoziarnistych. Wykazał, że wpływ procesu dojrzewania betonu płyty fundamentowej na pracę fundamentu płytowo-palowego ma znaczenie pomijalne z punktu widzenia praktyki projektowej.

Autor rozprawy porównywał modele numeryczne o różnym stopniu złożoności, obejmujące model referencyjny z objętościowym odwzorowaniem pali oraz model uproszczony z zastosowaniem nielokalnych elementów belkowych. Wykazał, że model uproszczony, przy odpowiednio dobranej dyskretyzacji podłoża, umożliwia uzyskanie wyników zbliżonych do modelu referencyjnego, co ma istotne znaczenie dla zastosowań projektowych.

Do efektów praktycznych – wdrożeniowych rozprawy doktorskiej zalicza się:

- opracowanie metodyki doboru modeli konstytutywnych gruntów, uwzględniającej specyfikę warunków geotechnicznych oraz sposób prowadzenia analiz numerycznych, niezbędnych do uzyskania reprezentatywnych i wiarygodnych rezultatów inżynierskich,
- propozycję iteracyjnej procedury doboru podstawowych parametrów fundamentu płytowo-palowego, tj. długości, średnicy i rozstawu pali, na podstawie analizy zmienności współczynnika α_{PRF} rozdziału obciążenia przekazywanego bezpośrednio na grunt przez płytę fundamentową oraz na podpory palowe.

W moim przekonaniu, o oryginalności pracy świadczą następujące osiągnięcia Autora rozprawy doktorskiej:

- zrealizowany plan zaawansowanych analiz numerycznych zagadnienia współpracy fundamentów płytowo-palowych z podłożem gruntowym,
- prezentacja niepublikowanych dotąd w literaturze wyników analiz numerycznych dotyczących współpracy fundamentów FPP z podłożem gruntowym,
- wskazanie na zmienność wartości współczynnika α_{PRF} rozdziału obciążenia przekazywanego bezpośrednio na grunt przez płytę fundamentową oraz na podpory palowe w czasie przekazywania obciążenia na fundament, a co za tym idzie wskazanie wartości

- współczynnika α_{PRF} jako zmiennej stanu w systemie FPP, którą łącznie z przebiegiem osiadania w czasie można zastosować w zaawansowanej analizie projektowej z wykorzystaniem modelowania numerycznego,
- wykazanie wpływu opisu materiałowego oraz początkowego stanu naprężenia efektywnego w gruncie na przebieg współczynnika α_{PRF} oraz osiadania w możliwie realistycznym aktualnie sposobie modelowania,
 - wykazanie na podstawie dodatkowych obliczeń, że wpływ uwzględnienia wiązania betonu płyty fundamentowej na przebieg wartości α_{PRF} w modelowaniu FPP jest nieznaczny z praktycznego punktu widzenia,
 - opracowanie modelu numerycznego MES w celu jak najdokładniejszego odwzorowania przykładowego obiektu rzeczywistego, w tym sposobu modelowania pali (elementy objętościowe o dużym zagęszczeniu siatki), kontaktów konstrukcja-grunt, płyty fundamentowej i gruntu w obszarze największego oddziaływania fundamentu (duże zagęszczenie siatki odpowiadające dyskretyzacji pali),
 - opracowanie modelu uproszczonego, akceptowalnego w projektowaniu, także w przypadku znacznie bardziej skomplikowanej geometrii dotyczącej zarówno schematu konstrukcji, jak i budowy geologicznej podłoża. W modelu do symulacji pali Autor zastosował nielocalne elementy belkowe,
 - efekty wdrożeniowe pracy, w tym m.in. propozycja iteracyjnej procedury projektowania podstawowych parametrów FPP na podstawie analizy zmienności współczynnika α_{PRF} w funkcji postępu obciążenia.

Reasumując, stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr inż. Artura Zachodniego pt. „Badania współpracy fundamentów płytowo-palowych z podłożem gruntowym” spełnia warunki i wymagania zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.), stanowiąc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Biorąc powyższe pod uwagę oraz moją pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej, wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Gdańskiej oraz dopuszczenie Pana mgr inż. Artura Zachodniego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie, z uwagi na aktualność, ważność i złożony charakter podjętego przez Doktoranta problemu badawczego, jak również wdrożeniowy charakter rozprawy doktorskiej wnioskuję o jej wyróżnienie.

