

Dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska, prof. nzw. Białystok, dnia 9 września 2019 r.
Katedra Geotechniki i Mechaniki Konstrukcji
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Politechnika Białostocka

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Bartosza Piotrowicza

nt. „Wpływ zmian temperatury ośrodka gruntowego na nośność pali grzewczych”

1. WSTĘP

Recenzja została opracowana na zlecenie prof. dr hab. inż. Joanny Bzówki – Dziekan Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach (pismo nr RB-0/4020/18/19 z dnia 8 lipca 2019 r.), realizującej decyzję Rady Wydziału z dnia 3 lipca 2019 r.

Praca doktorska została wykonana w Politechnice Śląskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Małgorzaty Jastrzębskiej, zatrudnionej na stanowisku profesora nadzwyczajnego. Promotorem pomocniczym pracy był dr inż. Marian Łupieżowiec.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PRACY

Problematyka pracy doktorskiej zawiera się w obszarze dyscypliny budownictwo (inżynieria lądowa i transport) i specjalności geotechnika.

Zagadnienie fundamentów energetycznych, czerpiących lub oddających ciepło ośrodkowi gruntowemu, jest wciąż mało rozpoznane w Polsce i na świecie, pomimo coraz większej liczby zrealizowanych inwestycji posadowionych na palach, gdzie wiele z pali wykonano w technologii pali energetycznych (termopali), energetycznych obudów tuneli i ścian szczelinowych, a nawet termokotew. Według doniesień literaturowych koszt wyposażenia fundamentu palowego w wymienniki ciepła jest znikomy w porównaniu do całkowitego kosztu fundamentów, zatem wykorzystanie ośrodka gruntowego jako nośnika energii cieplnej w technologii pośrednich i głębokich fundamentów energetycznych na pewno będzie rozwijane w przyszłości. Rozważania Doktoranta na podstawie przeprowadzonych badań

laboratoryjnych i analiz numerycznych stanowią ważny wkład w problematykę podłoża gruntowego jako źródła energii cieplnej.

Praca doktorska mgr. inż. Bartosza Piotrowicza składa się z części podstawowej i załączników. Zasadniczą część pracy stanowi: wstęp, cztery rozdziały, wykaz najważniejszych oznaczeń, spis literatury, spisy rysunków i tabel. Rozprawa wraz z bibliografią zajmuje 190 stron formatu A4, zawiera 28 tabel oraz 102 rysunki. Załączniki stanowią raporty z badań laboratoryjnych parametrów fizycznych i mechanicznych gruntów oraz badań wyciągania pali – kontrolnego i energetycznych – z podłoża na stanowisku modelowym. Zawierają także charakterystykę płynu wykorzystywanego w badaniach trójosiowych w temperaturze -21°C . Załączniki zawarto na 93 stronach. W spisie literatury Autor przytacza 137 pozycji (dwóm pozycjom przyporządkowano podwójny numer), w tym 10 pozycji stanowią materiały reklamowe, 15 – normy i akty prawne oraz 12 – strony internetowe. Literatura dotyczy prawie w całości problematyki wymiany ciepła, pali grzewczych i ich nośności, co jest ściśle powiązane z tematyką pracy. Jako *Literaturę przedmiotu* wykorzystano źródła literaturowe napisane w równej części w języku polskim i angielskim.

We Wstępie Autor przybliży problematykę energii geotermalnej i technologii fundamentów energetycznych. Wyjaśnia motywację przyjęcia szerokiego zakresu temperatury w badaniach własnych, związanej zarówno z pozyskaniem energii cieplnej z gruntu, jak i chłodzeniem. Wspomina też o oddziaływaniu temperatury na nośność fundamentów palowych.

W rozdziale 1. przedstawiono problem badawczy wraz z celami, тезami i metodyką pracy. Omówiono zrealizowany zakres pracy. Doktorant określa główny cel rozprawy doktorskiej jako: określenie stopnia wpływu pozyskania ciepła z ośrodka gruntowego przez pale grzewcze na ich nośność oraz parametry mechaniczne gruntu. Celami szczegółowymi są:

- określenie sposobu uwzględniania w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych zmian nośności pali grzewczych, wynikających z przepływu ciepła między palem a ośrodkiem gruntowym, w trakcie ich eksploatacji;
- określenie zachowania się betonu pod wpływem naprzemiennych cykli chłodzenia i ogrzewania, o dużej amplitudzie w ciągu roku;
- określenie wytycznych materiałowych mających na celu zwiększenie trwałości pali energetycznych;

- określenie, w jakim stopniu zmiana temperatury gruntu wpływa na jego zachowanie się pod wpływem obciążeń zewnętrznych, w kontekście nośności i przemieszczeń pali fundamentowych.

Autor wysuwa trzy równoważne tezy pracy:

1. Równoczesne występowanie oddziaływań termicznych i mechanicznych w palu fundamentowym ma wpływ na jego nośność i zachowanie pod obciążeniem.
2. Pod wpływem zmian temperatury ośrodka gruntowego zmieniają się właściwości mechaniczne gruntów.
3. Istnieje możliwość określenia inżynierskiego sposobu uwzględnienia w obliczeniach statyczno-wytrzymałościowych wpływu oddziaływań termicznych na nośność pali fundamentowych.

Tezy należy uznać za poprawnie sformułowane i możliwe do weryfikacji w trakcie zaplanowanych badań. Nie można się jednak zgodzić z Doktorantem, że sformułowanie celów pozwala na postawienie tez (strona 23. pracy), ponieważ to postawione cele mają prowadzić do rozwiązania (wyjaśnienia) tezy. Celem pracy jest udowodnienie tezy.

Dalszą część rozdziału 1. poświęcono krótkiemu przeglądowi literatury na temat odnawialnych źródeł energii, co jest powtórzeniem części wiadomości zawartych we Wstępie, a także tradycyjnym fundamentom palowym i palom grzewczym. W przypadku charakterystyki fundamentów palowych dziwi fakt przytaczania w jednym miejscu podręcznika K. Gwizdały, niekwestionowanego autorytetu krajowego i międzynarodowego, i artykułu z czasopisma popularno-technicznego. W części przeglądu literatury brak jest odniesień literaturowych, przykładowo podczas charakterystyki wymienników ciepła.

Rozdział 2. poświęcono przemianom termodynamicznym w pompach ciepła i gruntach. Pompy ciepła zostały opisane bardzo szczegółowo, wraz z podstawami teoretycznymi procesu pozyskiwania ciepła. Opisano przepływ ciepła pomiędzy gruntem i fundamentem energetycznym oraz rezultaty badań wpływu obecności wymiennika ciepła w fundamencie palowym na jego nośność. Scharakteryzowano wpływ temperatury na właściwości gruntów. Szkoda, że w przeglądzie literatury nie uwzględniono monografii A. Różańskiego¹ poświęconej charakterystyce cieplnej ośrodka gruntowego.

Rozdział 3. pracy stanowi główną część pracy. Przedstawiono tu badania własne pali przeprowadzone na stanowisku modelowym oraz badania wytrzymałościowe gruntu

¹ Różański A. (2018). Analiza wieloskalowa charakterystyki cieplnej wielofazowego ośrodka gruntowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław.

spoistego w różnych warunkach temperaturowych, a także analizy numeryczne pali w różnych warunkach obciążenia.

Wykonano badania doświadczalne pali wyciąganych na stanowisku modelowym. Pale o średnicy 20 cm formowano jako betonowe, wykonywane w osłonie rur PP. Zrealizowano badania na dwóch palach z wbudowaną instalacją przepływu ciepła – jeden z nich pozyskiwał ciepło z podłoża gruntowego, drugi oddawał. Przygotowano także pal kontrolny bez instalacji, służący do porównania pracy pali wyciąganych nieobciążonych temperaturą. Pale umieszczono w zagęszczonym podłożu z piasku średniego. Nasuwa się tu pytanie w jaki sposób formowano pale, czy rurę PP wyciągano po uformowaniu betonowych pali i zagęszczeniu gruntu? Czy wyciąganie rury miało wpływ na rozluźnienie gruntu na stanowisku modelowym? Badania wyciągania pali prowadzono do momentu zerwania pobocznicy pala, z pomiarem ciągłym przyrostu siły z dokładnością 1 N. Stwierdzono wyraźny wpływ instalacji grzewczej na siłę wyciągającą. Badania wykonano na jednym palu każdego rodzaju. Przeprowadzono także badania nad wytrzymałością gruntu spoistego w aparacie trójosiowego ściskania, w różnych warunkach termicznych. Ścinano próbki w stanie naturalnym, a próbki zamrażane badano przy ujemnej temperaturze płynu w komorze trójosiowej i różnych temperaturach poza komorą. Uzyskano znaczące zróżnicowanie zależności naprężenia dewiatorowego od odkształcenia osiowego w przypadku każdego z rodzajów badanych próbek. Do interpretacji wyników badań trójosiowych będą miała uwagi opisane w *Uwagach krytycznych i dyskusyjnych*.

W dalszej części rozdziału 3. wykonano analizy numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych za pomocą programu komputerowego Z_Soil v. 14.10, umożliwiającego uwzględnienie oddziaływań różnego typu na konstrukcję zagłębioną w podłożu gruntowym. Analizy posłużyły weryfikacji przeprowadzonych badań modelowych nad palami wyciąganymi, jak też wykonano analizy pala wciskanego w podłoże. Uwzględniono jednoczesny wpływ obciążeń termicznych i mechanicznych. Analizy numeryczne przeprowadzono podobnie jak badania na stanowisku modelowym – w przypadku pala kontrolnego oraz dwóch pali energetycznych przy oddawaniu i pobieraniu ciepła z gruntu.

Na zakończenie rozdziału 3. przeprowadzono obliczenia pala energetycznego w podłożu z łu poddanego cyklicznym obciążeniom termicznym oraz sformułowano wytyczne dla materiałów stosowanych do konstruowania betonowych pali energetycznych.

Rozdział 4. stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań i uzyskanych zależności. Z pewnością można stwierdzić, że tezy zostały udowodnione a cel i cele szczegółowe

spełnione. Wskazano też kierunki dalszych badań. Nie sformułowano wniosków uogólnionych.

3. OCENA PRACY

Praca doktorska mgr. inż. Bartosza Piotrowicza ma charakter doświadczalno-teoretyczny. Autor wykazał się umiejętnością sprecyzowania tematu i posługiwania się metodą naukową przy jego realizacji. Tematyka rozprawy jest oryginalna, a tezy i cele pracy jasno określone.

Według recenzenta do głównych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

1. Ustalenie charakteru zależności siły wyciągającej pal betonowy z podłoża gruntowego w czasie, w zależności od obciążenia termicznego pala, na podstawie badań modelowych na podłożu z gruntu niespoistego.
2. Przeprowadzenie kompleksowych badań wytrzymałości zagęszczanego łu w różnej temperaturze badania i zróżnicowanym czasie zamrażania próbek. Ustalenie liniowej zależności czasu zamrażania próbek łu na wartość spójności.
3. Określenie, że instalacja grzewcza ma negatywny wpływ na nośność pala wyciąganego, w porównaniu do pala kontrolnego bez instalacji, co wykonano zarówno na podstawie badań numerycznych dla pali wciskanych, jak i pali wyciąganych na podstawie badań modelowych i analiz numerycznych.
4. Ustalenie na podstawie analizy numerycznej pali wyciąganych i wciskanych zróżnicowania przemieszczeń pali z instalacją grzewczą, w porównaniu do pala kontrolnego, przy czym większe przemieszczenie uzyskano w przypadku pala pozyskującego ciepło z podłoża.
5. Zaproponowanie sposobu uwzględnienia nośności pali grzewczych w procedurze projektowej.
6. Wykazanie, że obecność instalacji grzewczej powoduje powstanie dodatkowego naprężenia rozciągającego w betonie, co powoduje konieczność zastosowania zbrojenia rozproszanego w betonie pala z instalacją grzewczą.

4. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

Uwagi krytyczne:

1. Wytrzymałość piasku średniego badano w aparacie skrzynkowym, nie podano jednak sposobu zagęszczenia próbki. Nie podano także jakie zagęszczenie piasku osiągnięto na stanowisku modelowym.

2. Na stronach 106-107 podano interpretację wyników badań trójosiowych próbek zagęszczanego ilu. II badano bez nasycenia próbek wodą metodą bez konsolidacji i odpływu. Natomiast jako wyjaśnienie uzyskanych parametrów przedstawiono wyniki badań powolnie ścinanego gruntu spoistego bez konsolidacji i odpływu wody z próbki w przypadku gruntu całkowicie nasyconego wodą.

Uwagi krytyczne natury formalnej:

W treści pracy przywołano rysunki i tabele zamieszczone w rozprawie, nie przywołano jednak wszystkich pozycji literatury zamieszczonych w spisie. Stwierdzono literówki oraz błędy fleksyjne i interpunkcyjne, głównie w części poświęconej przeglądowi literatury, ale także w opisie problematyki badawczej i celów pracy.

Poniżej zamieszczono bardziej szczegółowe uwagi natury edycyjnej:

1. Na stronach 15. i 26. Ziemia (w sensie planety) napisano z małej litery.
2. Autor używa określenia metodologia zamiast metodyka (str. 25.). Jest to błędne, gdyż metodologia jest nauką o metodach naukowych, a metodyka zbiorem metod badawczych służących do rozwiązywania problemu.
3. Na rysunku 32. (str. 85.) zamieszczono wykres krzywej uziarnienia piasku średniego, który przedłużono poza zakres wykonanej analizy sitowej.
4. Rysunki cytowane za pozycjami obcojęzycznymi powinny mieć przetłumaczone tytuły osi i napisy.
5. W spisie *Bibliografia. Literatura przedmiotu* zamieszczono 17 pozycji, których nie zacytowano w treści pracy. Są to pozycje: 1, 12, 18, 20, 28, 37, 38, 45, 52, 53, 65, 68, 72, 76, 79, 92 i 101. Nie zacytowano w pracy także trzech pozycji materiałów informacyjnych, dwóch norm i jednego rozporządzenia MTBiGM oraz kilku stron internetowych.
6. Jednej z pozycji literatury przyporządkowano podwójny numer – 39 i 40, a jedną powtórzono w spisie jako 73 i 74.
7. Pozycje literatury: 24, 30, 33, niepoprawnie opisano w spisie – sformułowania i inni (w skrócie i in.) używa się przytaczając pozycje literaturowe w tekście, natomiast w spisie literatury należy wyliczyć wszystkich autorów pracy. Dwukrotnie występuje pozycja (Abuel-Naga i in. 2007) – powinny być opisane jako 2007a i 2007b.
8. W kilku przypadkach pomyłono nazwiska autorów przytaczanych pozycji literatury, przykładowo: Loveridge1 zamiast Loveridge, Różycki zamiast Ryżyński (str. 45.), Wermer-Juszczuk zamiast Werner-Juszczuk.

9. Nie umieszczono w spisie pozycji literatury zacytowanych w tekście: (Abuel-Naga 2007) – str. 19., (Fadajev i Simson 2017) – str. 69., Haka Geodur (?) – str. 40, (Jastrzębska i Piotrowicz 2014) – str. 43., (Lalou i in. 2003) – str. 18., (Robinet 1996) – str. 81., a także 8. stron internetowych.

Uwagi dyskusyjne:

1. Na stronie 35. Autor opisuje, że w przypadku wykonywania pali wierconych i idącego za tym rozluźnienia gruntu, jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań jest wykonanie iniekcji ciśnieniowej metodą *jet grouting* wokół pala i pod jego podstawą. Według wiedzy recenzenta i literatury² w takim wypadku wykonuje się klasyczną iniekcję penetracyjną, a nie iniekcję ciśnieniową. Proszę o wyjaśnienie podczas obrony pracy.
2. W pracy nie wyjaśniono dlaczego na stanowisku modelowym pale umieszczono w piasku średnim, a badaniom trójosiowym poddano grunt spoisty. Oba rodzaje gruntów wykorzystano jako grunty podłoża podczas badań numerycznych. Proszę o wyjaśnienie tego podczas obrony pracy. Czy podejmowano próbę wbudowania gliny na stanowisku modelowym?
3. Próbkę gruntu spoistego zagęszczano w cylindrze Proctora, a następnie wycinano za pomocą cylindrów. Z doświadczenia recenzenta wynika, że wycinanie próbek cylindrem powoduje utratę wartości spójności gruntu. Czy próbowano wycinać próbki za pomocą struny i porównać wyniki?
4. Biorąc pod uwagę strefy przemarzania podłoża gruntowego i liczbę dni mrozowych w Polsce, czy nie należało się skupić na badaniach zamrażanych przez krótsze okresy czasu?

5. WNIOSEK

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego zarówno w zakresie problematyki, jak i metod badawczych. Mgr inż. Bartosz Piotrowicz udowodnił, że potrafi samodzielnie prowadzić pracę badawczą i posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej budownictwo/inżynieria lądowa i transport. Założony cel i cele szczegółowe zostały osiągnięte, a przyjęte trzy tezy udowodnione. Zrealizowana praca doktorska ma oprócz aspektu poznawczego także bardzo duży walor aplikacyjny. Doktorant przeprowadził

² Gwizdała K. (2010). Fundamenty palowe. Technologie i obliczenia. Tom I. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

szereg doświadczalnych badań własnych i analiz numerycznych, których wyniki badań wnoszą istotny wkład do problematyki fundamentów energetycznych.

Praca doktorska mgr. inż. Bartosza Piotrowicza pt. „Wpływ zmian temperatury ośrodka gruntowego na nośność pali grzewczych” spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 Nr 65 poz. 595 z późn. zm.).

Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr. inż. Bartosza Piotrowicza do publicznej obrony.

K. Kulicki - Adam