

Prof. dr hab. inż. Wojciech Puła
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechnika Wroclawska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: Wojciech.pula@pwr.edu.pl

dr hab. inż. Piotr Folęga, prof. PŚ

Wrocław, 6.11.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Tomasza Żyrka pt.
„Weryfikacja metod obliczania poziomych przemieszczeń stalowych
ścianek szczelnych”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę do opracowania niniejszej recenzji stanowi Uchwała nr 103/2024 Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej z dnia 24 października 2024, podpisana przez dr hab. inż. Piotra Folęgę, prof. PŚ.

2. Wprowadzenie

Ścianki szczelne należą do konstrukcji oporowych powszechnie spotykanych w budownictwie. Coraz większa powszechność występowania ścianek szczelnych wynika z potrzeby wykonywania głębokich wykopów w zabudowie miejskiej, budowy garaży podziemnych konstruowania szlaków komunikacyjnych oraz innych konstrukcji współpracujących z podłożem gruntowym. Zatem mogłoby się wydawać, że projektowanie tych konstrukcji nie nastręcza problemów. Trzeba jednak pamiętać, że ze względu na indywidualne warunki gruntowe oraz specyfikę poszczególnych zastosowań projektowanie ścianki szczelnej może stanowić spore wyzwanie dla konstruktora. Ponadto współcześnie oczekuje się projektowania optymalnego, w którym zużycie materiału (w tym przypadku stalowych grodzic) nie będzie zbędnie nadmierne. Powszechnie stosowane proste metody obliczeń ścianek szczelnych, zarówno w zakresie stanów granicznych nośności jak i użyteczności, są w większości mało dokładne, co powoduje, że dla zapewnienia bezpieczeństwa konstrukcji stosuje się obliczenia „po stronie bezpiecznej”, które często prowadzą do przewymiarowania ścianki. Dokładniejsze obliczenia wymagają zastawiania metody elementów skończonych wraz ze złożonym modelowaniem konstytutywnym gruntu. Takie podejście wymaga często stosowania skomplikowanych procedur oznaczania paramentów modelu, co z kolei implikuje wzrost kosztów rozpoznania geotechnicznego. W tym kontekście problem podjęty przez autora recenzowanej pracy należy uznać jako aktualny i istotny z punktu widzenia projektowania geotechnicznego.

3. Przegląd treści rozprawy

Recenzowana praca autorstwa pana mgr. inż. Tomasza Żyrka powstała pod kierunkiem dr hab. inż. Mariana Łupieżowca, profesora Politechniki Śląskiej. Praca zawiera 188 stron i składa się z siedmiu rozdziałów oraz Bibliografii zawierającej 169 pozycji. Dodatkowe elementy stanowią streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spis treści.

Rozdział 1: Wprowadzenie składa się z 28 stron, na których podano stosunkowo obszernie omówienie technologii ścianek szczelnych. Omówienie to zawiera charakterystykę najczęściej stosowanych grodzic, a także sposoby ich pograżania w grunt. Scharakteryzowano też zastosowania stalowych ścianek szczelnych jako obudowy tymczasowe głębokich wykopów oraz jako trwałych konstrukcji oporowych. Ponadto omówiono stosunkowo obszernie metody zapewnienia stateczności ścianek poprzez zastosowanie kotwi lub rozpór, a także fazy wykonawstwa w różnych sytuacjach.

Rozdział 2: Cel i zakres pracy. Rozdział składa się z trzech stron. Sformułowano w nim następujące cele pracy:

- „weryfikacja metod obliczeniowych stosowanych do prognozowania poziomych przemieszczeń stalowych ścianek szczelnych, stanowiących konstrukcje ścian oporowych, zabezpieczających głębokie wykopy, ponadto analiza tych metod, pod kątem ich przydatności do celów obliczeń projektowych oraz weryfikacja w odniesieniu do rzeczywistych danych pomiarowych”;
- „dostarczenie wniosków praktycznych, które mogą być pomocne w procesie projektowania ścianek szczelnych oraz opracowanie rekomendacji, które mogą być wykorzystane przez inżynierów w praktyce projektowej by zapewnić bardziej zbliżone do rzeczywistości wyniki obliczeń przemieszczeń stalowych ścianek szczelnych.”

Autor zaznacza, że praca dotyczy jedynie stalowych ścianek szczelnych. Analizy dotyczą wybranych metod stosowanych do obliczania przemieszczeń stalowych ścianek szczelnych, a także wyników pomiarów na kilku poletkach badawczych, które służą weryfikacji uzyskanych wyników obliczeń prowadzonych tymi metodami. Na zakończenie rozdziału sformułowana jest teza pracy, która ma następujące brzmienie:

„Zaawansowany model HS-Brick jest w stanie bardzo dobrze opisać kształt odkształceń ścianki szczelnej zabezpieczającej wykop oraz realistycznie oszacować wartości sił wewnętrznych pozwalających na zaprojektowanie elementów obudowy”.

Rozdział 3: Metody analizy statyczno-wytrzymałościowej oraz obliczania przemieszczeń stalowych ścianek szczelnych liczy 34 strony. Przedstawiono w nim trzy różne, stosowane przez inżynierów, metody obliczania ścianek szczelnych, a mianowicie:

- metodę równowagi granicznej;
- metodę bazującą na tzw. „modelu Winklera podłoża”, którą autor określa jako: metoda parć zależnych, modułu reakcji (podatności) podłoża gruntowego;
- metody numeryczne – analiza Metodą Elementów Skończonych (MES), przy czym szczególną uwagę zwrócono na następujące modele konstytutywne gruntu – model Coulomba-Mohra, model Druckera-Pragera, model „CAP” oraz rodzinę modeli HS (Model Hardening Soil): HS-standard, HS-small; HS-brick.

W omówieniu metody parć zależnych autor podał kilka metod wyznaczania modułu podatności podłoża, który jest kluczowym parametrem w tej metodzie. W dalszej części pracy (rozdział 6) korzystano z nich, a mianowicie metody Chadeissona, metody Schmitta oraz metody holenderskiej CUR166.

W przypadku modeli konstytutywnych związanych z obliczeniami MES, więcej uwagi poświęcono modelom HS, przy czym szczegóły dotyczące identyfikacji parametrów przeniesiono do rozdziału 5,

Rozdział 4: Pomiary przemieszczeń stalowych ścianek szczelnych składa się z 19 stron i prezentuje opis badań przeprowadzanych przez autora w terenie. Omówiono w nim metody pomiarowe przemieszczeń poziomych ścianek szczelnych, skupiając się na technikach pozwalających monitorować konstrukcję, czyli pomiarach geodezyjnych oraz pomiarach inklinometrycznych. Aby umożliwić pomiary inklinometryczne na grodzicach montowano zamknięte profile stalowe o przekroju kwadratowym, które zostały przyspawane do półek grodzic. W rozdziale podano także opis czterech poletek badawczych, na których autor prowadził pomiary. Pierwsze poletko było zlokalizowane w Krakowie, gdzie mierzono przemieszczenia stalowej ścianki szczelnej zabezpieczającej wykop dla wykonania jednokondygnacyjnego garażu podziemnego. Głęboki wykop zabezpieczono wspornikową ścianką szczelną. Układ warstw podłoża gruntowego podano na podstawie odwiertów geologicznych oraz sondowania CPT. Drugie poletko zlokalizowane było w Jastrzębiu-Zdroju. W tym przypadku ścianka szczelna stanowiła ścianę oporową zabezpieczającą istniejącą skarpe w sąsiedztwie realizowanego obiektu handlowo-usługowego. Zastosowano tu jednokrotnie kotwioną ściankę z grodzic stalowych jako rozwiązanie trwałe. Układ warstw podłoża gruntowego oraz parametry geotechniczne poszczególnych warstw określono na podstawie otworów geologicznych, badań laboratoryjnych oraz sondowań CPTU. Następnym obiektem (poletkiem) była ścianka szczelna pełniąca rolę ściany oporowej trwałe zabezpieczającej skarpe w obrębie układu drogowego w południowej Polsce. W tym przypadku zastosowano ściankę szczelną kotwioną na trzech poziomach. Rozpoznanie warunków gruntowych opierało się na wierceniu otworów geologicznych, ocenie makroskopowej oraz wynikach sondowań statycznych CPTU. Ostatnie poletko stanowiła ścianka szczelna tymczasowo zabezpieczająca wykop pod przyczółek wiaduktu na budowie autostradowego węzła drogowego w Gliwicach Sośnicy. Ze względu na teren zróżnicowany wysokościowo ścianka zabezpieczała wykopy o różnych głębokościach. Aby zapewnić stateczność ścianki zaprojektowano dwa poziomy jej rozparcia w postaci rozpór rurowych. W tym przypadku autor uzyskał informacje o parametrach podłoża korzystając z „Dokumentacji geologiczno-inżynierskiej” wchodzącej w skład projektu przygotowanego dla przedmiotowej inwestycji.

Warto odnotować, że w każdym powyższych czterech przypadków schemat statyczny badanej ścianki szczelnej był inny. Dla każdego z poletek autor podał wyniki pomiarów. W pierwszym przypadku były to wyniki geodezyjne, w przypadku drugim oprócz pomiarów geodezyjnych wykonano również pomiary inklinometryczne dla czterech różnych etapów wykonywania wykopu. W trzecim przypadku również oprócz pomiarów geodezyjnych wykonano pomiary inklinometryczne. Dotyczyły one fazy pośredniej (poziom zakotwienia) i docelowej wykopu. W ostatnim przypadku również wykonano pomiary geodezyjne i inklinometryczne., które dotyczyły dwóch przekrojów i zostały dokonane w następujących fazach wykonania ścianki:

- pomiar po wykonaniu wykopu dla montażu górnego poziomu rozparcia ścianki
- pomiar po wykonaniu wykopu docelowego
- pomiar po około trzech tygodniach od wykonania pełnego wykopu.

Rozdział 5: Analiza obliczeniowa oraz założenia modelowe dla prowadzonych obliczeń liczy 24 strony. Przedstawiono w nim podstawowe założenia oraz metody

wyznaczania parametrów niezbędnych do obliczeń według trzech wcześniej wzmiankowanych metod. Znakomita większość poświęcona jest analizom numerycznym za pomocą metody elementów skończonych. Dla celów modelowania ośrodka gruntowego zastosowano modele konstytutywne Coulomba-Mohra oraz modele *hardening soil brick* (do analizy 2D) oraz *hardening soil small* (analiza 3D). Szczegółowo opisano konstruowanie modeli numerycznych dla wszystkich czterech przypadków rozpatrywanych w rozdziale 4. Na uwagę zasługuje obszerna analiza poświęcona modelowaniu elementów kontaktowych. Prawie połowę rozdziału poświęcono oznaczaniu parametrów stosowanych w modelach *Hardening Soil*. Poprawne oznaczenie tych parametrów poprzez badania laboratoryjne jest kłopotliwe i kosztowne, dlatego najczęściej nie jest wykonywane w standardowych badaniach geotechnicznych dla potrzeb inwestycyjnych. Jednak w ciągu ostatnich kilkunastu lat opublikowano wiele prac (cytowanych przez autora w rozprawie), które dają możliwość określenia tych parametrów na podstawie wyników sondowania CPTU. Taką też metodą posłużył się autor, opisując szczegółowo sposób obliczenia każdego z niezbędnych parametrów. Ta część pracy zdaniem recenzenta jest szczególnie wartościowa.

Rozdział 6: Analiza porównawcza wyników obliczeń z badaniami zawiera 65 stron i jest najobszerniejszym i najistotniejszym rozdziałem w rozprawie. Zawiera on porównanie wyników uzyskanych z obliczeń różnymi metodami z rzeczywistymi przemieszczeniami pomierzonymi na poszczególnych poletkach badawczych w kolejności od pierwszego do czwartego. Porównania są przedstawione w sposób klarowny w postaci tabel i wykresów. Autor przedstawia komentarze i wnioski dla poszczególnych przypadków. Dla pierwszych trzech poletek konkluzje są zbliżone. Bardzo dobre i dobre odwzorowania rzeczywistych przemieszczeń uzyskano stosując obliczenia metodą elementów skończonych z zastosowaniem modelu *Hardening Soil Brick*. W kilku sytuacjach dobrą zgodność uzyskano też z wykorzystaniem MES z modelem Coulomba-Mohra oraz poprzez zastosowanie metody parć zależnych z modułem k_s wyznaczony wg CUR166. Jednak w przypadku czwartego poletka żadna z zastosowanych metod nie dała dobrego przybliżenia. W tej sytuacji autor doszedł do wniosku, że obliczenia z wykorzystaniem modelu dwuwymiarowego nie mogą dobrze odwzorować rzeczywistej pracy konstrukcji. Dlatego do obliczeń MES zbudował model trójwymiarowy, w którym modelem konstytutywnym podłoża był model *HS-small*. W rezultacie wartości obliczonych przemieszczeń okazały się zbliżone z wartościami przemieszczeń pomierzonych.

Rozdział 7: Wnioski składa się z trzech stron i zawiera tablicę (Tablica 7.1) będącą podsumowaniem porównań dokonanych w rozdziale 6, a także najważniejsze wnioski wynikające z treści rozprawy.

4. Ocena merytorycznej wartości pracy

Jak już wspomniano na początku recenzji, stalowe ścianki szczelne projektowane są często z nadmiernym zapasem bezpieczeństwa, co prowadzi do znacznego kosztu ich wykonania. Ta sytuacja wynika najczęściej ze stosowania bardzo przybliżonych metod obliczeniowych. W tym kontekście problem podjęty przez autora recenzowanej rozprawy należy uznać za bardzo istotny z punktu widzenia projektowania geotechnicznego. Trzeba podkreślić, że autor podjął się niełatwego zadania znalezienia metody obliczeniowej adekwatnej do odwzorowania rzeczywistych

przemieszczeń ścianek szczelnych. Ponadto wybrana metoda powinna bazować na takich parametrach, które można określić posługując się standardowymi badaniami geotechnicznymi, na przykład sondowania CPTU.

Drugim ważnym aspektem rozprawy jest skorzystanie z pomiarów przemieszczeń rzeczywistych konstrukcji. Prowadzenie pomiarów na rzeczywistych konstrukcjach współpracujących z gruntem nie zawsze jest możliwe dla badacza ze względu na ograniczenia dostępu do takich konstrukcji oraz wysokie najczęściej koszty związane z pomiarami. W tym kontekście praca pana mgr inż. Tomasza Żyrka jest interesująca z badawczego punktu widzenia.

Trzeci wyróżniający aspekt to aplikacyjny charakter rozprawy. Uzyskane w niej rezultaty powinny być wykorzystane w projektowaniu geotechnicznym.

W rozdziale drugim autor sformułował dwa podstawowe cele pracy. Pierwszym z nich była weryfikacja metod obliczeniowych służących do prognozowania przemieszczeń poziomych stalowych ścianek szczelnych. Analizy wybranych przez autora metod przeprowadzone w rozdziale szóstym oparte na dokonanych pomiarach zdaniem recenzenta wskazują na osiągnięcie tego celu.

Drugim celem pracy sformułowanim przez autora było dostarczenie praktycznych wniosków, które mogą być pomocne w projektowaniu stalowych ścianek szczelnych. Autor wykazał, że obliczenia przeprowadzone metodą elementów skończonych z wykorzystaniem modeli konstytutywnych HS-brick lub HS-small (w przypadku 3D) są zbliżone z wynikami pomiarów prowadzonych na czterech wybranych poletkach doświadczalnych. Jest to ważna wskazówka dla projektantów, dotycząca wyboru metody obliczeniowej. Zatem uważam, że drugi cel sformułowany przez autora w recenzowanej pracy został osiągnięty.

W zakończeniu rozdziału drugiego autor sformułował również tezę pracy. Przytaczam ją ponownie poniżej:

„Zaawansowany model HS-Brick jest w stanie bardzo dobrze opisać kształt odkształceń ścianki szczelnej zabezpieczającej wykop oraz realistycznie oszacować wartości sił wewnętrznych pozwalających na zaprojektowanie elementów obudowy”.

Zdaniem recenzenta teza ta została zweryfikowana w przypadku trzech poletek badawczych opisanych w rozdziale czwartym. W ogólnym przypadku teza ta nie jest dowodliwa, gdyż warunki geotechniczne zmieniają się w zależności od obiektu, co skutkuje innymi wartościami przemieszczeń poziomych konstrukcji. Tezę tę można by pominąć, koncentrując się na celach pracy, co by nie pomniejszyło wartości merytorycznej rozprawy.

Kluczowym dla całości jest rozdział szósty, w którym autor zestawia przeprowadzone obliczenia z uzyskanymi wynikami pomiarów. Rozdział ten jest opracowany bardzo dobrze. Prezentacja wyników podana jest w sposób klarowny i precyzyjny, a wnioski są bezpośrednią konsekwencją zaprezentowanych analiz.

W mojej opinii na wyróżnienie zasługuje też fragment rozdziału 5, w którym autor prezentuje metodykę określania parametrów modelu *Hardening Soil* na podstawie pomiarów sondą CPTU. Co prawda fragment ten ma charakter odtwórczy (autor cytuje odpowiednie publikacje), ale sposób opracowania wskazuje na bardzo dobrą znajomość zagadnienia oraz na gruntowną wiedzę autora w zakresie modelowania konstytutywnego we współczesnej mechanice gruntów.

W literaturze znane są przykłady analiz porównawczych obliczeń z pomiarami przemieszczeń ścianek, o czym autor wspomina w punkcie 5.2 rozprawy. Jednak pracę autora należy uznać za oryginalną ze względu na skomplikowane konstrukcje

usytuowane w Polsce w specyficznych warunkach geotechnicznych, innych od tych przedstawionych w cytowanej literaturze.

Moim zdaniem praca pana mgr. inż. Tomasza Żyrka jest niewątpliwie wartościowa i zasługuje na wysoką ocenę.

5. Uwagi krytyczne i pytania

Moim zdaniem tytuł rozprawy powinien być nieco ostrożniej sformułowany, a mianowicie: *Weryfikacja **wybranych** metod.....* Albowiem autor z pewnością nie wyczerpał wszystkich możliwych metod obliczania przemieszczeń poziomych stalowych ścianek szczelnych.

Jak wcześniej wspomniano, sformułowana przez autora teza nie jest dowodliwa. Nie można uznać za dowód sprawdzenia tezy dla trzech przypadków. Zdaniem recenzenta pominięcie tezy nie zmniejszyłoby wartości pracy.

Rozdział pierwszy wydaje się być zbyt obszerny, prezentuje wiele zagadnień niewykorzystanych w dalszej części pracy.

W kilku przypadkach przy analizowaniu zgodności obliczeń metodą elementów skończonych z pomiarami daje się zauważyć, że różnice są niewielkie. Trzeba mieć na uwadze, że wyniki są obarczone pewnym losowym rozrzutem wynikającym z przestrzennych zmienności parametrów podłoża. Tę ostatnią można modelować za pomocą pól losowych i uzyskać ocenę prawdopodobieństwa zdarzenia, że rezultaty mieszczą się w określonym przedziale wartości. Tego typu podejście służy zwykle analizie bezpieczeństwa konstrukcji. Szkoda, że autor nie wspomniał o pracach analizujących ściany kotwione losową metodą elementów skończonych.

Autor nie podaje precyzyjnie, jakie parametry i w których przypadkach były wyznaczone w badaniach laboratoryjnych. Brak informacji, czy badania laboratoryjne były wykonywane przez autora, czy też zaczerpnięte z innych źródeł. Recenzent oczekuje odpowiedzi na to pytanie.

W związku z wspomnianą wyżej przestrzenną zmiennością parametrów podłoża ważne jest, jak usytuowane były rury inklinometryczne względem miejsc, w których przeprowadzono sondowania statyczne. Tu również oczekiwana jest odpowiedź.

Zaprezentowany przez autora model trójwymiarowy (przypadek poletka nr 4) jest niewątpliwie wrażliwy na efekt brzegu modelu. Czy autor wziął pod uwagę, że rozmiar całego modelu może być za mały w stosunku do analizowanej konstrukcji (zbyt mała odległość konstrukcji od brzegu modelu)?

6. Uwagi szczegółowe

Str. 35

Wzory (3.3) oraz (3.4) są prawdziwe przy założeniach, że brak jest tarcia pomiędzy ścianą a gruntem, kąt nachylenia naziomu jest zerowy, a ścianka jest pionowa.

Str. 58

We wzorze (3.37) brakuje „fi”

Str. 62 (i w innych miejscach)

Autor zamiennie używa sformułowania „w warunkach bez odpływu” i „w warunkach bez drenażu”. Ostatnio w literaturze polskojęzycznej używa się

sformułowania „w warunkach bez odpływu”. Podobnie ma się rzecz z zamiennym użyciem „brusy” i „grodzice”. W nowej literaturze polskojęzycznej używa się określenia „grodzice”.

7. Podsumowanie i wniosek końcowy.

Przedstawiony w rozprawie problem naukowy mieści się w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport, a w szczególności w nurcie aktualnej tematyki w geotechnice. Jak już wcześniej wspomniano praca pana mgr. inż. Tomasza Żyrka jest wartościowa i zawiera oryginalne elementy. Autor wykazał się umiejętnością prowadzenia badań w zakresie odpowiednim do nakreślonego celu naukowego rozprawy, a także w zakresie zastosowanej metodologii badań i sposobu wnioskowania. Ważny jest także aplikacyjny charakter pracy.

Wobec powyższych argumentów mogę stwierdzić, że praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w „Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14.03.2003 r. oraz aktów normatywnych wykonawczych wydanych na jej podstawie i może stanowić podstawę nadania jej autorowi stopnia doktora w dyscyplinie naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport. Zatem wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Elektronicznie
podpisany przez
WOJCIECH PUŁA
Data: 2024.11.06
13:53:51 +01'00'