

Dr hab. inż. Katarzyna Zabielska-Adamska, prof. nzw.      Białystok, dnia 25 sierpnia 2019 r.  
Katedra Geotechniki i Mechaniki Konstrukcji  
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska  
Politechnika Białostocka

## RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Marcina Ćwirko

nt. „Analiza współpracy stalowych siatek zgrzewanych z gruntem  
w konstrukcjach oporowych wykonanych w technologii murów gabionowych”

### 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 25 czerwca 2019 r.), realizującej decyzję Rady Wydziału z dnia 5 czerwca 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. Sławomir Kwiecień.

### 2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PRACY

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

Inżynieria geotechniczna jest dziedziną nauki i techniki zajmującą się modyfikacją (ulepszaniem) podłoża gruntowego oraz materiałów gruntowych w budowlach ziemnych. Znanych jest pięć głównych sposobów na ulepszanie podłoża gruntowego oraz materiałów gruntowych, różniących się mechanizmem ulepszenia, takich jak: zagęszczanie gruntu, wymiana gruntu, prekonsolidacja, cementacja i stabilizacja oraz zbrojenie masywu gruntowego. Należy tu dodać, że problematyką zbrojenia gruntów zajmuje wielu naukowców i producentów materiałów i firm wykonawczych. Mimo to, tematykę rozprawy należy zakwalifikować jako nową i z praktycznego punktu widzenia bardzo przydatną.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Ćwirko składa się z sześciu rozdziałów, wykazu najważniejszych oznaczeń, spisu literatury, spisów rysunków i tabel oraz 5. załączników. Rozprawa wraz z bibliografią zajmuje 187 stron formatu A4,

Wpłynęło dnia 29.08.2019r.

zawiera 51 tabel oraz 130 rysunków. W spisie literatury Autor przytacza 153 pozycje literatury (w tym aż 35 pozycji stanowią materiały reklamowe, 5 – patenty i 19 – normy). Literatura w całości dotyczy problematyki wzmocnienia skarp i zbrojenia gruntów, jest więc ściśle związana z tematyką pracy. Wykorzystanie tak wielu materiałów reklamowych jest całkowicie uzasadnione. Doktorant podjął się tematyki, która szczególnie w zakresie modelowania numerycznego wymagała szczegółowych informacji niedostępnych w pracach naukowych. Wykorzystane źródła literaturowe zostały napisane w zdecydowanej większości w języku angielskim. Załączniki stanowią przede wszystkim karty badań siatek zgrzewanych, ale także kalibrację siłownika i opis „metody 0,3 H”.

Tytuł pracy „Analiza współpracy stalowych siatek zgrzewanych z gruntem w konstrukcjach oporowych wykonanych w technologii murów gabionowych” oddaje jej treść, ale może budzić problemy ze zrozumieniem u osób mniej biegłych w geotechnice. Myślę, że bardziej czytelne byłoby, np. „Współpraca stalowych siatek zgrzewanych i gruntu w konstrukcjach oporowych wykonanych w technologii murów gabionowych”.

Rozdział 1. stanowi wstęp do pracy. Autor przedstawia charakterystykę gabionów i opisuje historię ich stosowania. Doktorant podaje motywację podjęcia problematyki badawczej, wyjaśniając nowatorski i ekonomiczny aspekt zastosowania siatek zgrzewanych w technologii gabionów do zbrojenia gruntów.

Rozdział 2. poświęcono prezentacji celu i zakresu pracy oraz tez badawczych. Głównym celem pracy jest „określenie zasadności stosowania zbrojenia gruntu w konstrukcjach oporowych wykonanego z siatki zgrzewanej tożsamej z taką, jaką obecnie stosuje się do produkcji koszy gabionowych”. Celami szczegółowymi są:

- określenie współpracy siatki stalowej (wykorzystywanej do produkcji gabionów) i gruntu, w zależności od rodzaju gruntu i parametrów siatki;
- wyznaczenie siły potrzebnej do wyrwania badanych stalowych siatek zgrzewanych z otaczającego gruntu;
- ustalenie przydatności stalowych siatek zgrzewanych do wykonania zasypki za konstrukcją oporową;
- opracowanie procedury obliczeniowej do projektowania zbrojenia gruntu stalowymi siatkami zgrzewanymi.

Sformułowano dwie tezy badawcze:

1. możliwe jest wykonanie konstrukcji oporowej w technologii zbrojenia gruntu z wykorzystaniem do tego stalowych siatek zgrzewanych stosowanych do produkcji koszy gabionowych;

2. istnieje możliwość zaimplementowania wyników prowadzonych badań do projektowania lekkich konstrukcji ze zbrojeniem gruntu siatkami zgrzewanymi.

W kolejnych rozdziałach dokładnie zdefiniowano badane stalowe siatki zgrzewane, podając rodzaj stali, grubość drutów, a nawet rodzaj powłoki przeciwkorozyjnej. Określony cel pracy ma bardzo duże walory poznawcze i znaczenie praktyczne. Jako nowy rodzaj zbrojenia zostaną wykorzystane siatki znane z technologii koszy szanćowych, tak więc znane są już technologie łączenia prętów o różnych parametrach.

Rozdział 3. poświęcono aktualnemu stanowi wiedzy w tematyce rozprawy doktorskiej. Omówiono klasyfikację konstrukcji inżynierskich budowanych z gabionów, scharakteryzowano rodzaje siatek stosowanych do produkcji koszy gabionowych, wskazując ich wady i zalety, pokazano przykłady klasycznych konstrukcji oporowych wykonanych z gabionów, jak też konstrukcji gabionowych z wykorzystaniem elementów zbrojących. Wiele uwagi poświęcono zbrojeniu gruntu za pomocą siatek zbliżonych formą do gabionowych siatek zgrzewanych. Dokładnie opisano wymagania stawiane gruntom stosowanym w konstrukcji gruntu zbrojonego. W rozdziale 3. przedstawiono też na podstawie literatury badania modelowe zbrojenia gruntu. Autor przytoczył tu między innymi rezultaty badań nad zgrzewanymi siatkami stalowymi, badanymi samodzielnie i we współpracy z gruntem. Wyniki badań porównano z wynikami uzyskanymi w przypadku georusztów i siatek stalowych zaplatanych. Przytoczone zostały też wyniki analiz numerycznych, głównie stalowych siatek zaplatanych.

Przedstawione uwagi w krytycznym przeglądzie literatury są uzasadnieniem podjęcia tematu i ustalenia celów poznawczych. Współpraca z gruntem stalowych siatek zaplatanych, stosowanych już do zbrojenia gruntów, opiera się głównie na tarcu pomiędzy siatką a gruntem. Wykorzystanie bardziej sztywnych siatek zgrzewanych powinno przynieść dodatkowe efekty w postaci klinowania się ziaren. Doktorant dotarł do wielu materiałów o charakterze naukowym i informacyjnym, rozdział 3. ma więc oprócz wartości naukowej dużą wartość dydaktyczną.

Rozdział 4. jest głównym rozdziałem pracy doktorskiej. Zamieszczono w nim zarówno opis wykonanych badań laboratoryjnych wraz z wynikami badań, jak i wykonane analizy numeryczne. Zrealizowane badania laboratoryjne są zgodne z celami szczegółowymi pracy, przedstawionymi powyżej. Wykonano też badania właściwości fizyczno-mechanicznych dwóch rodzajów gruntów, które posłużą do ustalenia parametrów siatek współpracujących z gruntem. Uziarnienie piasku drobnego i łupka przywęglowego dobrano generalnie zgodnie z wymaganiami wynikającymi z wymiarów oczek siatek. Badania przeprowadzono

na siatkach pokrytych stopem cynkowo-aluminiowym (o wymiarach oczek 4,50 i 3,00 mm) oraz ocynkowanych i zabezpieczonych dodatkowo PVC (o oczkach 4,30 i 3,20 mm). Wykonano rozciąganie samych siatek oraz siatek wbudowanych w grunt, a także przeprowadzono uproszczone badania typu *pullout* w celu określenia siły koniecznej do wyciągnięcia siatki z gruntu. Badania samych siatek poprzedzono badaniami wstępnymi służącymi do ustalenia metodyki badań i budowy stanowiska. Wszystkie badania przeprowadzono na zmodyfikowanym stanowisku do badań geosyntetyków. Autor przeprowadził szereg modernizacji stanowiska, koniecznych do realizacji poszczególnych badań. Przed omówieniem każdego z typów badań zaprezentowano procedurę badania, a na zakończenie sformułowano wnioski. W przypadku rozciągania siatek współpracujących z gruntem nie uzyskano spodziewanego wpływu uziarnienia gruntu, co wiąże się z przygotowaniem próbki do badań. Dodatkowe uwagi do tej części rozdziału opisałam w Uwagach krytycznych i dyskusyjnych. W przypadku wyciągania siatek z gruntu, siła wyciągająca siatkę z łupka znacznie przewyższała siłę uzyskaną dla piasku.

W rozdziale 4. przedstawiono także wyniki analiz numerycznych przeprowadzonych przy użyciu programu Autodesk Robot. Modelowanie wykonano nie tylko dla badanych stalowych siatek zgrzewanych, ale także dla siatek zaplatanych. Materiał siatek przedstawiono za pomocą modelu liniowo-sprężystego, a badane grunty za pomocą modelu Winklera z jednostronnym zdefiniowaniem więzi pomiędzy gruntem i siatką. Przeprowadzono analizy: siatek obciążonych siłą skupioną lub obciążeniem równomiernie rozłożonym, siatek wbudowanych w grunt z uwzględnieniem jedynie wpływu wbudowania oraz wpływu zmiennej odkształcalności gruntu. Przeprowadzono także symulację uszkodzenia siatek.

W rozdziale 5. zamieszczono wstępne wytyczne z uwzględnieniem wyników badań własnych dotyczące projektowania konstrukcji gabionowych z wbudowanym arkuszem zbrojenia ze stalowej siatki zgrzewanej. Autor jeszcze raz przeanalizował literaturę i wyniki badań własnych, porządkując je i zestawiając w formie wstępnych wytycznych. Szkoda jednak, że Doktorant pominął pracę prof. E. Stigler-Szydło<sup>1</sup>, czy też szeroko wykorzystywane w Europie rekomendacje EBGEO<sup>2</sup>.

Pracę kończy rozdział 6. *Wnioski końcowe*. Z pewnością można stwierdzić, że tezy zostały udowodnione a cele i cele szczegółowe spełnione. Nie do końca mogą się jednak

---

<sup>1</sup> Stigler-Szydło E.: Posadowienia budowli infrastruktury transportu lądowego: teoria – projektowanie – realizacja. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2005.

<sup>2</sup> EBGEO: Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements. Ernst W. & Sohn Verlag, Berlin 2011.

zgodzić z postawionym wnioskiem, że w przypadku odkształcalności siatki zgrzewanej ważniejszy jest fakt zabudowania zbrojenia niż parametry gruntu, ponieważ badania współpracy siatki z łupkiem przywęglowym wykonano przy niedostatecznym zagęszczeniu gruntu.

### 3. OCENA PRACY

Praca doktorska mgr. inż. Marcina Ćwirko 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. Doktorant wykazał się dobrą znajomością literatury przedmiotu.

Według recenzenta do głównych osiągnięć pracy należy zaliczyć:

1. Szczegółowy przegląd literatury dotyczący zbrojenia gruntu za pomocą gabionów i współpracujących z nimi arkuszy zbrojenia, dokonany na podstawie materiałów naukowych i informacyjnych.
2. Modyfikacja stanowiska badawczego umożliwiająca zarówno rozciąganie siatek stalowych, jak i badanie rozciągania i wyciągania siatek wbudowanych w grunt.
3. Określenie wytrzymałości na rozciąganie i odkształcalności siatek zgrzewanych o różnych wymiarach oczek i zabezpieczeniu przeciwkorozyjnym.
4. Wykazanie, że siatki zgrzewane mogą charakteryzować się większą wytrzymałością na rozciąganie ze względu na możliwość wykorzystania grubszego drutu spowodowaną brakiem ograniczeń technologicznych przy zabezpieczeniu przeciwkorozyjnym.
5. Udowodnienie, że niewielka odkształcalność siatek zgrzewanych umożliwia ich zastosowanie jako zbrojenia również w przyczółkach mostowych.
6. Wykazanie, że dobór uziarnienia gruntu jest kluczowy ze względu na wytrzymałość na wyciąganie siatki wbudowanej w grunt. Większą wytrzymałość uzyskano w przypadku gruntu o grubszym uziarnieniu.
7. Udowodnienie, że siatki zgrzewane niezabudowane w gruncie, wykonane z tego samego materiału co siatki zaplatane, charakteryzują się mniejszą odkształcalnością podczas rozciągania, natomiast po wbudowaniu w grunt ich odkształcenie zależy od współczynnika podatności podłoża i rodzaju przyłożonego obciążenia.
8. Ustalenie, że siatki zaplatane charakteryzują się większą tolerancją na uszkodzenia pojedynczych drutów wewnątrz siatki w porównaniu do siatek zgrzewanych, natomiast na jej zniszczenie mocno wpływa drut brzegowy.

#### 4. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

##### **Uwagi krytyczne:**

1. Badania współpracy siatki zgrzewanej z łupkiem przywęglowym przeprowadzono w warunkach niedogęszczenia materiału gruntowego, czyli nieosiągnięcia wymaganego wskaźnika zagęszczenia. Doktorant wcześniej poinformował o wykonaniu badania Proctora łupka w cylindrze o objętości  $2,2 \text{ dm}^3$  z powodu braku aparatu wielkoformatowego oraz o przesianiu gruntu przez nieodpowiednie sito (bez podania jego rozmiaru). Obecnie obowiązująca norma PN-EN 13286-2:2010 dopuszcza standardowe zagęszczanie gruntu o uziarnieniu  $< 63,0 \text{ mm}$  w cylindrze o objętości  $2,12 \text{ dm}^3$  przy użyciu standardowego lekkiego ubijaka, więc wybór cylindra jest właściwy. Nie jest jednak wiadomy rozmiar sita, przez które przesiano grunt. Brak na rysunku 69 linii nasycenia gruntu wodą nie pozwala na wyciągnięcie wniosku o dobrej lub złej zagęszczalności odpadu. Należy tu przypomnieć, że metoda Proctora jest zagęszczeniem udarowym gruntu, natomiast na stanowisku grunt zagęszczano wibracyjnie, co może prowadzić do dużej rozbieżności w uzyskanych wartościach gęstości objętościowej szkieletu gruntowego.

Tym niemniej, uzyskane zagęszczenie jest niewystarczające, co powoduje, że wnioski o współpracy siatek z gruntami o różnym uziarnieniu są dyskusyjne. Prawdopodobnie oba grunty – zagęszczony piasek drobny i nieodpowiednio zagęszczony łupek przywęglowy charakteryzują się taką samą wytrzymałością na ścinanie.

2. W opisie badań wytrzymałości gruntów, prowadzącym do określenia parametrów wytrzymałościowych gruntów, nie podano sposobu formowania i zagęszczenia próbki. W obu przypadkach parametr określony jako spójność jest oporem spójności.

##### **Uwagi krytyczne natury formalnej:**

Praca została starannie zredagowana, pozycje literaturowe generalnie poprawnie cytowano w pracy. W treści pracy przywołano rysunki i tabele zamieszczone w rozprawie. Nasuwa się jednak kilka uwag natury edycyjnej:

1. Na stronie 17. powinno być „cementację” zamiast „cementyzację”.
2. Autor przywołał rysunek 15. przedstawiający ideę projektowania zbrojenia gruntu za pomocą geosyntetyków, poprzez porównanie wytrzymałości na rozciąganie wymaganej dla geosyntetyku na danym etapie życia konstrukcji i zmian tej wytrzymałości w czasie, jako „zjawisko zwiększenia wydłużenia geosiatek w czasie w zależności od stopnia ich obciążenia”.

3. Na stronie 30. dokonano zbyt dużego skrótu myślowego wywodząc technologię Terramesh System, czyli koszy gabionowych z siatki ze zintegrowanym panelem siatki zamocowanej od strony zasypki, bezpośrednio od konstrukcji z gruntu zbrojonego H. Vidala zaprojektowanej jako zbrojenie suchego gruntu za pomocą taśm metalowych. Uogólniając, H. Vidal stworzył podstawy teoretyczne gruntu zbrojonego, polegającego na wprowadzeniu do gruntu innego materiału o odpowiedniej przyczepności, wytrzymałości i trwałości, a Terramesh System jest technologią mieszaną, o czym Autor pisał na stronie 18.
4. Nie jest zrozumiała podpis tabeli 3. w kontekście danych przedstawionych w tabeli.
5. W pracy pokazano badania siatek zgrzewanych, podczas których ze względu na budowę stanowiska doszło do uplastycznienia drutów poprzecznych przy rozciąganiu. Badań tych nie brano pod uwagę podczas dalszych analiz. Wyniki tych badań powinny być pokazane w punkcie nt. badań wstępnych czy ustalenia metodyki badań. Podobnie Autor nie powinien wspominać o próbie „0”.
6. Rysunki cytowane za pozycjami obcojęzycznymi powinny mieć przetłumaczone tytuły osi i napisy, a także przeliczone jednostki na układ SI. Autor zamieścił tłumaczenia pod rysunkami, ale nie ułatwia to korzystania z tych rysunków.
7. Przyjęta w pracy forma przypisu harwardzkiego powinna zawierać nazwiska autorów i rok publikacji. W przypadku więcej niż dwóch autorów używa się formy (Kowalski i in., 2018), a wszystkich autorów należy wymienić jedynie w spisie literatury na końcu pracy. Podobnie, w miejscu cytowania nie podaje się imion autorów czy ich pierwszych liter.
8. W spisie *Bibliografia* zamieszczono 3 pozycje, którym nie przyporządkowano wydawnictwa lub czasopisma wraz z numerem – pozycje: 1, 12, 54, 71. Jedna z pozycji w spisie nie została zacytowana w pracy – 87.

#### **Uwagi dyskusyjne:**

1. Proszę o wyjaśnienie w trakcie obrony pracy doktorskiej sposobu ułożenia siatki na stanowisku badawczym, aby uzyskać współpracę gruntu z siatką podczas rozciągania i wyciągania siatki. Według opisu siatkę umieszcza się w szczelinie tak, aby nie dotykała żadnej części stalowej skrzyni. Grunt w skrzyni dolnej jest wyrównany do poziomu górnej części skrzyni (rys. 88c), nie styka się więc z siatką. Czy grunt w skrzyni dolnej nie powinien wystawać ponad poziom skrzyni?

## 5. WNIOSEK

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego zarówno w zakresie problematyki, jak i metod badawczych. Mgr inż. Marcin Ćwirko udowodnił, że potrafi samodzielnie prowadzić pracę badawczą i posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie naukowej budownictwo/inżynieria lądowa i transport. Założone cele zostały osiągnięte, a przyjęte dwie tezy udowodnione.

Praca doktorska mgr. inż. Macieja Ćwirko pt. „Analiza współpracy stalowych siatek zgrzewanych z gruntem w konstrukcjach oporowych wykonanych w technologii murów gabionowych” 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. Marcina Ćwirko do publicznej obrony.

*K. Ulecińska-Adamna*