

MICHAŁ GRODECKI\*

## WPLYW WARSTWY SŁABEJ NA PRACĘ ŚCIANKI SZCZELNEJ NIEKOTWIONEJ

---

### INFLUENCE OF A WEAK SOIL LAYER ON SHEET PILE WALL BEHAVIOUR

---

#### Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki symulacji numerycznych zachowania się zabezpieczenia wykopu ścianką szczelną w sytuacji występowania warstwy słabej (o niższych od pozostałej części ośrodka gruntowego parametrach wytrzymałościowych). Prezentowane wyniki pozwalają ocenić wpływ położenia warstwy słabej na stateczność i momenty zginające w ścianie.

*Słowa kluczowe: ścianka szczelna, stateczność, moment zginający, warstwa słaba*

#### Abstract

In this paper results of a numerical simulations of a sheet pile wall working as a excavation support are presented. Influence of a presence and position of a weak soil layer on stability and bending moment in the wall is shown.

*Keywords: sheet pile wall, stability, bending moment, weak soil layer*

---

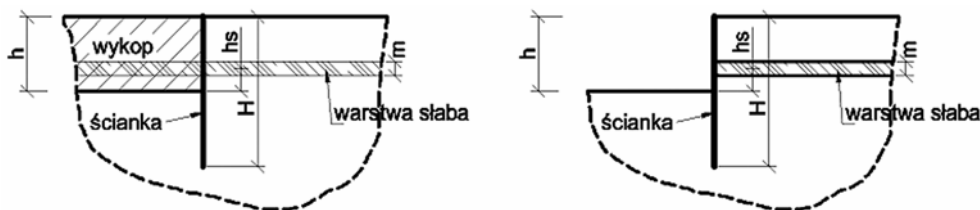
\* Dr inż. Michał Grodecki, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

### Oznaczenia

$\phi$	– kąt tarcia wewnętrznego [deg]
$\gamma$	– ciężar objętościowy gruntu [ $\text{kN/m}^3$ ]
$c$	– kohezja [kPa]
$h_s$	– położenie warstwy słabej [m]
$m$	– miąższość warstwy słabej [m]
$M$	– moment zginający [ $\text{kNm/m}$ ]
$M_{\max}$	– maksymalny moment zginający [ $\text{kNm/m}$ ]
$m$	– miąższość warstwy słabej
$Y$	– współrzędna pionowa [m]

### 1. Wstęp

Omawiana w artykule tematyka jest kontynuacją rozważań podjętych w pracy [1]. Przedmiot badań stanowi współpraca z gruntem ścianki szczelnej niekotwionej zabezpieczającej wykop o nieobciążonym naziemiu. W ośrodku gruntowym uwzględnia się obecność warstwy słabej (to jest o niższych od reszty masywu gruntowego parametrach wytrzymałościowych). Głównym celem artykułu jest wykazanie wpływu obecności warstwy słabej oraz jej położenia na stateczność ścianki oraz występujące w niej siły przekrojowe.



Rys. 1. Analizowany obiekt

Fig. 1. Analysed object

### 2. Eksperyment numeryczny

Przeprowadzono eksperyment numeryczny polegający na symulacji pracy ścianki dla około 300 przypadków obliczeniowych.

Obliczenia wykonano za pomocą systemu MES Z\_Soil.PC (dokładną charakterystykę można znaleźć w pracach [4] i [5]) z zastosowaniem modelu sprężysto-plastycznego Coulomba–Mohra z warunkiem *cut-off* (bez nośności na rozciąganie). Przyjęto niestowarzyszone prawo płynięcia ( $\psi = 0$ ). W celu uwzględnienia możliwości wystąpienia nieciągłości pola deformacji na styku grunt–ścianka wykorzystano elementy kontaktowe. Współczynniki stateczności określono metodą proporcjonalnej redukcji parametrów wytrzymałościowych ( $c - \phi$  redukcji), omawianą wyczerpująco w pracy [3]. W analizie wykorzystano technologię częściowego odprężenia, umożliwiającą efektywne i odpowia-

dające rzeczywistemu przebiegowi modelowanie procesu wykonywania wykopu. Wszystkie obliczenia przeprowadzono przy założeniu płaskiego stanu odkształceń.

Przyjęto założenie upraszczające, zgodnie z którym warstwa słaba ma obydwa parametry wytrzymałościowe (kohezję i kąt tarcia wewnętrzznego) niższe niż reszta ośrodka gruntowego.

### 3. Analiza uzyskanych wyników

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że:

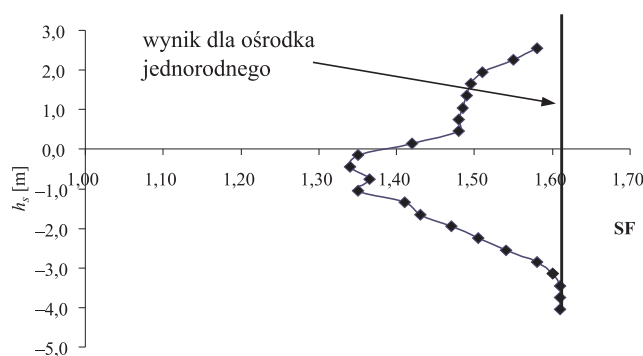
- obecność warstwy słabej pogarsza stateczność ścianki (zmniejsza współczynnik stateczności SF), nie wpływa natomiast na mechanizm utraty stateczności (kształt i położenie powierzchni poślizgu),
- w zależności od położenia warstwy słabej jej obecność może zwiększać lub zmniejszać wartości momentów zginających w ścianie,
- wpływ warstwy słabej rośnie wraz ze wzrostem jej miąższości.

Pierwszy i ostatni wniosek są w pełni zgodne z intuicyjną oceną wynikającą z praktyki inżynierskiej. Szerszego komentarza wymaga natomiast drugi wniosek, wskazujący na możliwość zmniejszenia wartości momentów zginających w ścianie na skutek obecności warstwy gruntu słabego. Zagadnienie to szerzej omówiono w dalszej części artykułu.

Zamieszczone w dalszej części artykułu wyniki obliczeń uzyskano dla modelowej ścianki o wysokości  $H = 6$  m zabezpieczającej wykop o głębokości  $h = 3$  m wykonany w gruncie o  $\phi = 25^\circ$  i  $c = 10$  kPa. Przyjmowano zmienną miąższość warstwy słabej. Zaprezentowane w dalszej części artykułu wyniki uzyskano, przyjmując warstwę gruntu słabego o miąższości  $m = 0,9$  m oraz  $\phi = 13^\circ$  i  $c = 5$  kPa.

#### 3.1. Wpływ położenia warstwy słabej na stateczność ścianki

Stwierdzono, że najniższe współczynniki stateczności uzyskuje się w przypadku, gdy warstwa słaba położona jest nieco poniżej dna wykopu. Zagadnienie ilustruje wykres zamieszczony na rys. 2.



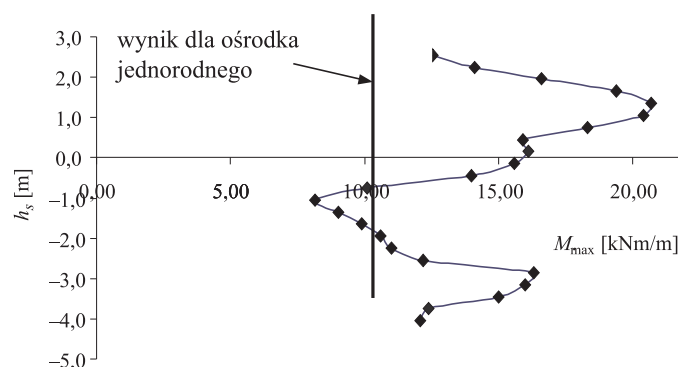
Rys. 2. Wpływ położenia warstwy słabej na stateczność testowej ścianki

Fig. 2. Influence of a weak soil layer vertical position on a SF of the wall

### 3.2. Wpływ położenia warstwy słabej na momenty zginające w ścianie

Wpływ położenia warstwy słabej na wartość maksymalnego momentu zginającego w ścianie ilustruje wykres zamieszczony na rys. 3. Jego analiza pozwala stwierdzić, że obserwowana zależność ma trzy ekstrema. Są to:

- pierwsze maximum lokalne – gdy warstwa słaba zlokalizowana jest w rejonie połowy głębokości wykopu,
- minimum globalne – gdy warstwa słaba zalega nieco poniżej dna wykopu,
- drugie maximum lokalne – gdy warstwa słaba znajduje się nieco powyżej dolnego końca ścianki.



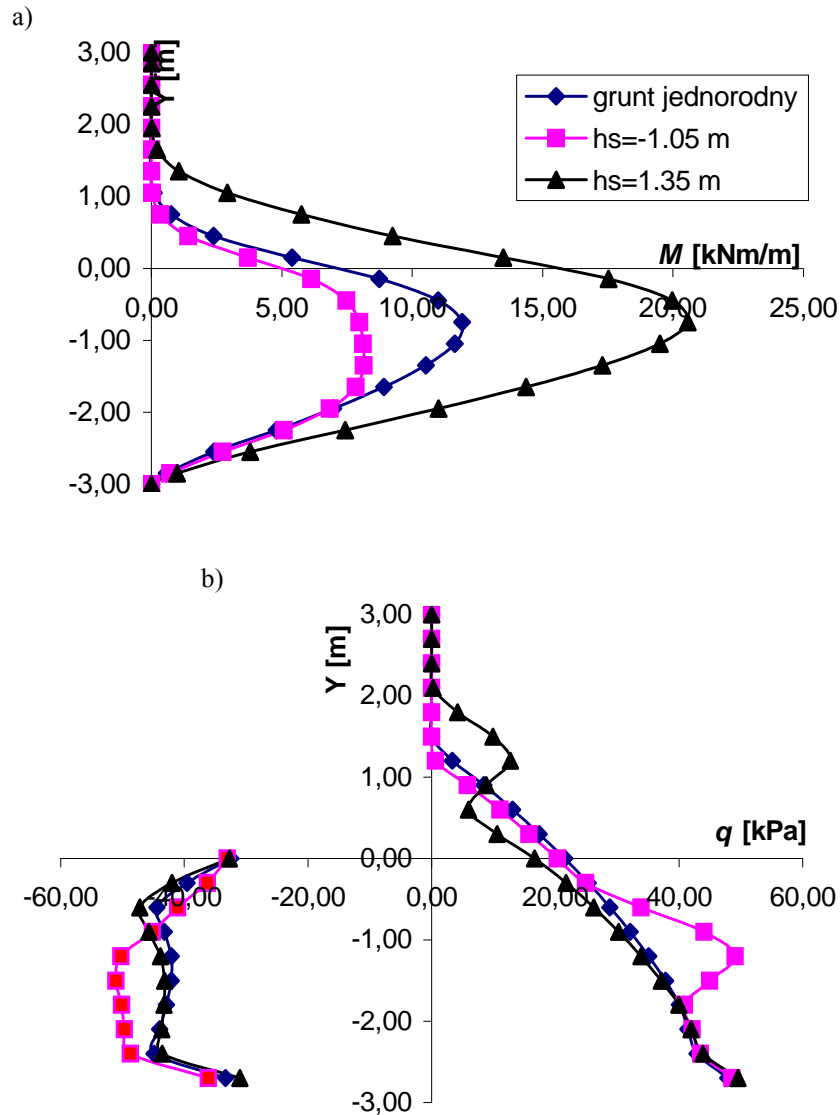
Rys. 3. Wpływ położenia warstwy słabej na maksymalny moment zginający w testowej ścianie

Fig. 3. Influence of a weak soil layer vertical position on a maximum bending moment in a test wall

Dla ścianek zagłębionych w gruncie sypkim maximum globalne momentu zginającego odpowiada pierwszemu maximum lokalnemu. Dla ścianek zagłębionych w gruncie o wysokiej kohezji, a niskim kącie tarcia wewnętrznego większe wartości momentu zginającego dają drugie maximum lokalne.

Szerszego komentarza wymaga fakt uzyskiwania mniejszych wartości maksymalnego momentu zginającego od rozwiązania dla ścianki zagłębionej w gruncie jednorodnym – gdy warstwa słaba położona jest nieco poniżej dna wykopu. Zjawisko to można wytłumaczyć, analizując otrzymane rozkłady parcia i oporu, zamieszczone na rys. 4. Przy takim położeniu warstwy słabej w celu spełnienia warunków równowagi obserwuje się zdecydowanie największą mobilizację oporu w strefie poniżej dna wykopu, co skutkuje gwałtownym spadkiem wartości momentu zginającego. Zjawisko to jest skorelowane z uzyskiwaniem najmniejszego współczynnika stateczności, co świadczy o zbliżaniu się ścianki do warunków stanu granicznego (dla których uzyskuje się największe wartości oporu, bliskie oporowi granicznemu).

Największy moment zginający uzyskano dla warstwy słabej położonej nieco poniżej połowy głębokości wykopu – widoczny jest wyraźny wzrost parcia w jej obrębie, mający zasadniczy wpływ na omawiane zjawisko.



Rys. 4. Wykresy momentów zginających (a) oraz parcia i oporu (b) dla testowej ścianki w zależności od położenia warstwy słabej  $h_s$

Fig. 4. Plot of bending moment (a), active and passive load (b) for sample wall as a function of weak soil layer vertical position  $h_s$

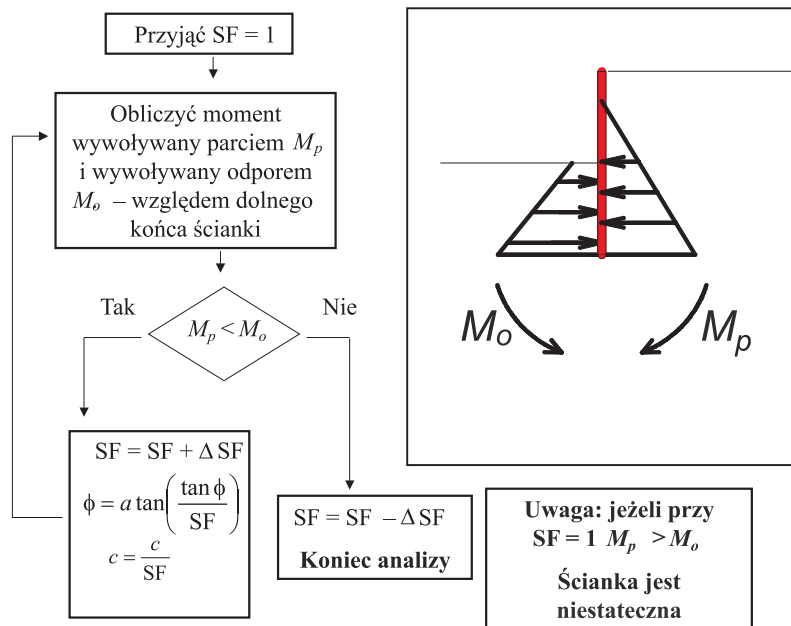
W prezentowanym przykładzie uzyskano stosunek maksymalnej i minimalnej wartości maksymalnego momentu zginającego wynoszący ok. 3. Tak więc wpływ położenia warstwy słabej na wartość maksymalnego momentu zginającego należy określić jako znaczny.

#### 4. Propozycja uproszczonej metody obliczeniowej do analizy stateczności ścianek

Jak wykazano, obecność i położenie warstwy słabej mogą mieć istotny wpływ na jej stateczność. Do oceny stateczności ścianek w opisywanej sytuacji proponuje się autorską metodę będącą kombinacją teorii parcia i oporu granicznego oraz metody  $c$ - $\phi$  redukcji.

W metodzie tej poszukuje się takiej wartości współczynnika stateczności SF, by dla krytycznych parametrów gruntu, danych wzorami  $\phi_{kr} = \arctan\left(\frac{\text{tg}\phi}{\text{SF}}\right)$   $c_{kr} = \frac{c}{\text{SF}}$  (określonych osobno dla gruntu zasadniczego i słabego) zachodziła równość momentu obracającego ściankę  $M_p$  (wywołanego parciem granicznym) i utrzymującego (wywołanego odporem granicznym)  $M_o$ . Rozkłady parcia i oporu przyjmuje się wg teorii parcia i oporu granicznego Rankinea.

Schemat blokowy postępowania w proponowanej metodzie przedstawiono na rys. 5. Podobnie jak w metodzie proporcjonalnej redukcji parametrów wytrzymałościowych, można przyjmować dowolnie mały przyrost współczynnika stateczności  $\Delta\text{SF}$ , jednak w praktyce nie stosuje się  $\Delta\text{SF} < 0,01$ .



Rys. 5. Schemat postępowania w proponowanej metodzie obliczeniowej

Fig. 5. Working scheme of a proposed calculation method

Przeprowadzone obliczenia testowe wykazały dobrą zgodność otrzymywanych proponowaną metodą wartości współczynnika stateczności z uzyskanymi na drodze analizy numerycznej – różnice nie przekraczają 10%. Jest to dokładność w zupełności wystarczająca, by uznać, że proponowana metoda nadaje się do zastosowania w praktyce projektowej.

## 5. Wnioski

Poczynione w toku eksperymentu numerycznego obserwacje pozwalają stwierdzić, że:

1. Nie jest możliwe poprawne analizowanie ścianki bez określenia lokalizacji warstwy słabej – błędne jej zlokalizowanie może prowadzić do otrzymania wyników leżących po stronie niebezpiecznej (zawyżonego współczynnika stateczności i zaniżonej wartości momentu zginającego).
2. W sytuacji znacznej niepewności co do położenia warstwy słabej może być potrzebne przeanalizowanie kilku możliwych jej położzeń (innego najniekorzystniejszego z punktu widzenia stateczności, innego z punktu widzenia sił przekrojowych).
3. Najmniejsze wartości współczynnika stateczności uzyskuje się, gdy warstwa słaba położona jest nieco poniżej dna wykopu.
4. Największe wartości maksymalnego momentu zginającego uzyskuje się dla warstwy słabej położonej na wysokości połowy głębokości wykopu (dla gruntów sypkich lub mało spoiстых) lub około połowy części zagłębionej ścianki (dla gruntów spoiстых).
5. Proponowane podejście uproszczone nadaje się do oceny stateczności ścianek w sytuacji występowania warstwy słabej.

## Literatura

- [1] Grodecki M., *Modelowanie numeryczne ścianki szczelnej niekotwionej*, Materiały Pokonferencyjne XV Konferencji Naukowej nt. „Metody numeryczne w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych”, Zakład Podstaw Konstrukcji Inżynierskich, Politechnika Krakowska, Kraków 2003.
- [2] Grodecki M., Truty A., Urbański A., *Modelowanie numeryczne pracy ścian szczelnych i szczelinowych*, Górnictwo i Geoinżynieria, Kwartalnik Akademii Górniczo-Hutniczej, Rok 27 (2003), z. 3–4.
- [3] Sanecki L., Truty A., Urbański A., *O możliwościach modelowania komputerowego stateczności złożonych układów geotechnicznych*, Materiały XLV Konf. Nauk. KILiW PAN Krynica'99, Wrocław 1999.
- [4] Truty A., Urbański A., Podleś K., *Analiza zagadnień geotechnicznych w systemie Z\_SOIL*, Materiały Pokonferencyjne X Jubileuszowej Konferencji Naukowej nt. „Metody numeryczne do projektowania i analizy konstrukcji hydrotechnicznych”, Samodzielny Zakład Podstaw Konstrukcji Budowli Wodnych, Politechnika Krakowska, Kraków 1998.
- [5] *Z\_Soil.PC, Theoretical Manual*, ZACE Services Ltd., Lozanna 1998.