

MICHAŁ GRODECKI*

WPŁYW UPROSZCZONEGO MODELOWANIA NA WYNIKI
ANALIZ NUMERYCZNYCH ŚCIANEK SZCZELNYCH

INFLUENCE OF SIMPLIFIED MODELLING ON SHEET
PILE WALLS NUMERICAL ANALYSIES RESULTS

Streszczenie

Praca przedstawia wyniki obliczeń porównawczych ścianek szczelnych, prowadzonych z wykorzystaniem wzorcowych i uproszczonych modeli.

Słowa kluczowe: ścianka szczelna, stateczność, moment zginający

Abstract

In this paper results of comparative calculations (with use of full and simplified modeling) of a sheet pile walls are presented.

Keywords: sheet pile wall, stability, bending moment

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

Oznaczenia

ϕ	–	kąt tarcia wewnętrznego [deg]
γ	–	ciężar objętościowy gruntu [kN/m ³]
c	–	spójność [kPa]
h	–	głębokość wykopu [m]
H	–	długość ścianki [m]
M	–	moment zginający [kNm/m]
M_{\max}	–	maksymalny moment zginający [kNm/m]
SF	–	współczynnik stateczności [–]

1. Wstęp

Modelowanie numeryczne ścianek szczelnych jest coraz częściej stosowane w procesie projektowania rzeczywistych konstrukcji. Niejednokrotnie można spotkać się z przypadkami stosowania uproszczonych modeli numerycznych. Niniejszy artykuł stanowi próbę oceny wpływu możliwych do zastosowania uproszczeń na uzyskiwane wyniki oraz określenia czy uproszczenia mogą być stosowane.

Analizowano następujące możliwe uproszczenia:

- niezastosowania elementów kontaktowych na styku grunt–konstrukcja,
- nieuwzględnienie etapowania wykonywania konstrukcji,
- niestosowanie techniki częściowego odprężenia,
- uwzględnienie w obliczeniach zbyt małego obszaru gruntu, co skutkuje zbyt małą odległością pomiędzy ścianką a brzegami obszaru obliczeniowego.

2. Eksperyment numeryczny

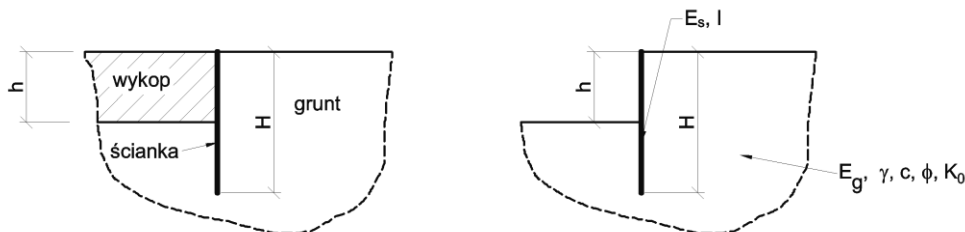
W celu oceny wpływu wymienionych uprzednio uproszczeń na uzyskiwane wyniki wykonano eksperyment numeryczny, polegający na symulacji pracy ścianki z wykorzystaniem modelu wzorcowego oraz modeli z uproszczeniami.

Obliczenia wykonano za pomocą systemu MES Z_Soil.PC (dokładną charakterystykę można znaleźć w pracach [1 i 3]) z wykorzystaniem modelu sprężysto-plastycznego Coulomba-Mohra z warunkiem *cut-off* (bez nośności na rozciąganie). Przyjęto niestowarzyszone prawo płynięcia ($\psi = 0$). Współczynniki stateczności określono metodą proporcjonalnej redukcji parametrów wytrzymałościowych ($c - \phi$ redukcji), omawianą wyczerpująco w pracy [2]. Wszystkie obliczenia wykonano przy założeniu płaskiego stanu odkształceń.

Analizowano ściankę niekotwioną (rys. 1) oraz ściankę z zastrzałem (rys. 6).

3. Uzyskane wyniki**3.1. Ścianka niekotwiona**

Przedstawione dalej wyniki uzyskano na drodze analizy numerycznej modelowej ścianki niekotwionej, pokazanej na rys. 1.



Rys. 1. Modelowa ścianka niekotwiona

Fig. 1. Example cantilever wall

W ocenie autora największy wpływ na uzyskiwane wyniki ma uproszczenie polegające na niezastosowaniu elementów kontaktowych (co prowadzi do nieuwzględnienia możliwości wystąpienia nieciągłego pola przemieszczeń na styku gruntu i konstrukcji). Jak wykazały przeprowadzone obliczenia, skutkuje ono niejednokrotnie uzyskaniem znacznie zawyżonych wielkości współczynnika stateczności (co jest wynikiem po stronie niebezpiecznej) oraz zupełnie nierealistycznych wartości momentów zginających (zarówno zawyżonych, jak i zaniżonych). Możliwe jest w takiej sytuacji uzyskanie wykresu momentów zginających w ścianie po stronie wykopu (co oznaczałoby, iż krzywizna ścianki jest wypukła w stronę wykopu) – co w przypadku ścianki niekotwionej jest wynikiem sprzecznym z naturą zagadnienia. Efekt ten jest wyraźnie widoczny na wykresach zamieszczonych na rys. 3.

Obserwuje się charakterystyczną postać deformacji naziomu (wąski klin gruntu „zawieszony” na ścianie w jej pobliżu), odmienną od uzyskiwanej w modelu poprawnym – co ilustruje rys. 2. Zdaniem Autora takie podejście jest niedopuszczalne.

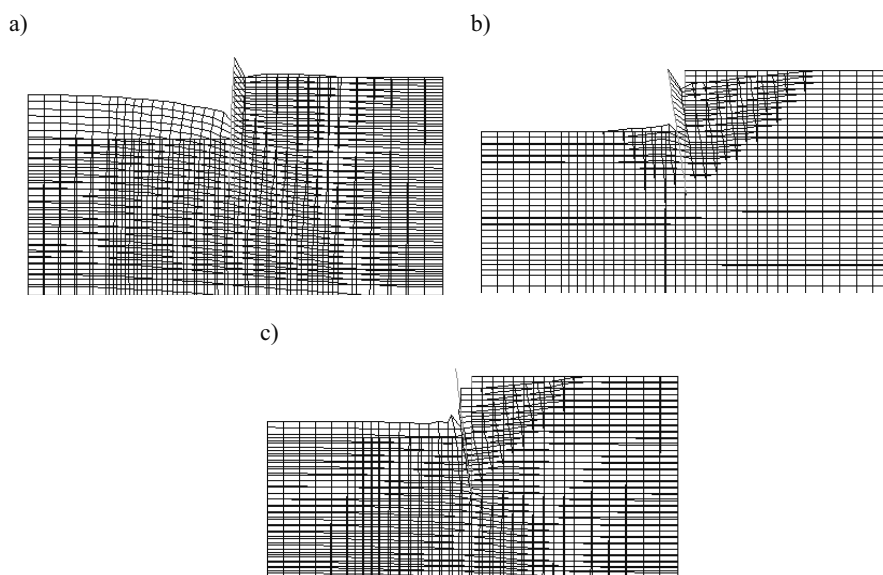
Nieuwzględnienie etapowania wykonywania konstrukcji, to jest analiza, w której:

- rozważa się wyłącznie finalny stan konstrukcji, bez uprzedniego wyznaczenia stanu *in situ* i symulacji wykonywania wykopu,
- przyrostowo zwiększa się ciężar ośrodka,

proceeds to a non-significant reduction in the safety factor value and an overestimation of the bending moment values (with a correct shape of their diagram). The main disadvantage of this modeling method is the lack of possibility of obtaining a convergent numerical solution for walls working in conditions close to the limit state (with safety factors SF close to 1) and the impossibility of obtaining information about soil and wall displacements during excavation.

The application of the technique of partial relaxation (that is, the removal in one step of the entire load caused by the excavation) does not influence the obtained safety factor values. The model gives slightly overestimated values of bending moments. It is characterized by significant (though smaller than the model without staging) problems with obtaining a convergent numerical solution for walls with a small safety factor reserve.

A summary comparison of safety factor values and bending moments for an example wall working in conditions far from the limit state is presented in table 1. An analogous comparison for a wall working in conditions close to the limit state is presented in table 2. The obtained bending moment diagrams illustrate the diagrams shown in fig. 3.



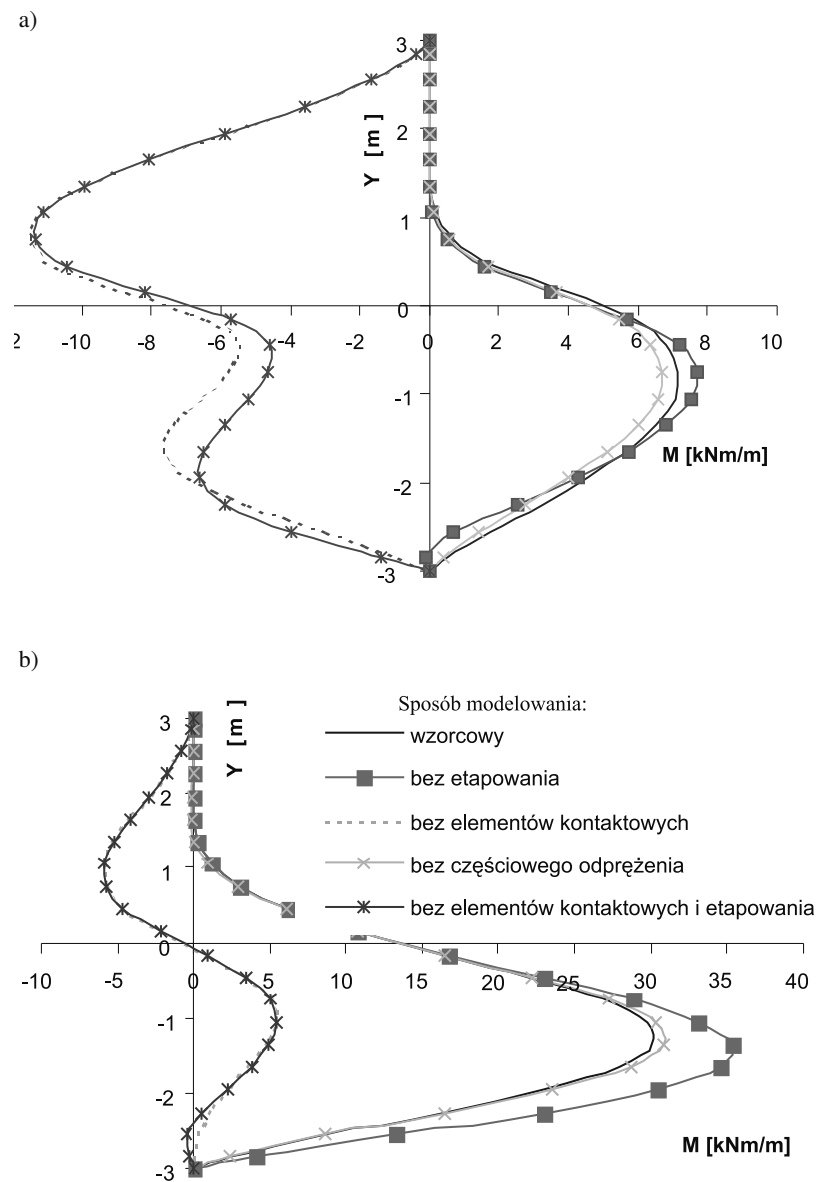
Rys. 2. Postacie deformacji ścianki modelowej w zależności od sposobu modelowania:
 a) bez elementów kontaktowych – stan po wykonaniu wykopu, b) bez elementów kontaktowych
 – postać utraty stateczności c) model wzorcowy – stan po wykonaniu wykopu, analogiczny
 do postaci utraty stateczności

Fig. 2. Deformation modes – obtained with different ways of modeling: a) without contact
 elements – after excavation, b) without contact elements – stability loss form, c) proper
 modeling – after excavation, stability loss form is identical

Tabela 1

Zestawienie wyników uzyskanych przy wzorcowym i uproszczonym modelowaniu przykładowej ścianki sztywnej pracującej w warunkach odległych od stanu granicznego ($H = 6$ m, $h = 3$ m, $\gamma = 19$ kN/m³, $c = 10$ kPa $\phi = 25^\circ$)

Sposób modelowania	SF [-]	M_{\max} [kNm/m]	Uwagi
wzorcowy	1.68	7.23	
bez elementów kontaktowych	2.21	11.60	wykres momentów po stronie wykopu
bez etapowania	1.62	7.77	
bez częściowego odprężenia	1.68	6.79	
bez elementów kontaktowych i etapowania	2.20	11.50	wykres momentów po stronie wykopu

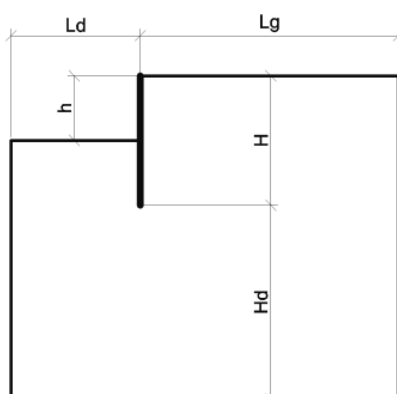


Rys. 3. Wykresy momentów zginających uzyskanych przy wzorcowym i uproszczonym modelowaniu przykładowej ścianki sztywnej: a) pracującej w warunkach odległych od stanu granicznego ($H = 6$ m, $h = 3$ m, $\gamma = 19$ kN/m³, $c = 10$ kPa, $\phi = 25^\circ$), b) pracującej w warunkach bliskich stanowi granicznego ($H = 6$ m, $h = 3$ m, $\gamma = 19$ kN/m³, $c = 5$ kPa, $\phi = 20^\circ$)

Fig. 3. Bending moments plot corresponding to different ways of modeling: a) for wall working far from ultimate state conditions ($H = 6$ m, $h = 3$ m, $\gamma = 19$ kN/m³, $c = 10$ kPa, $\phi = 25^\circ$), b) for wall working close to ultimate state conditions ($H = 6$ m, $h = 3$ m, $\gamma = 19$ kN/m³, $c = 5$ kPa, $\phi = 20^\circ$)

Zestawienie wyników uzyskanych przy wzorcowym i uproszczonym modelowaniu przykładowej ścianki sztywnej pracującej w warunkach bliskich stanowi granicznemu ($H = 6\text{ m}$, $h = 3\text{ m}$, $\gamma = 19\text{ kN/m}^3$, $c = 5\text{ kPa}$, $\phi = 20^\circ$)

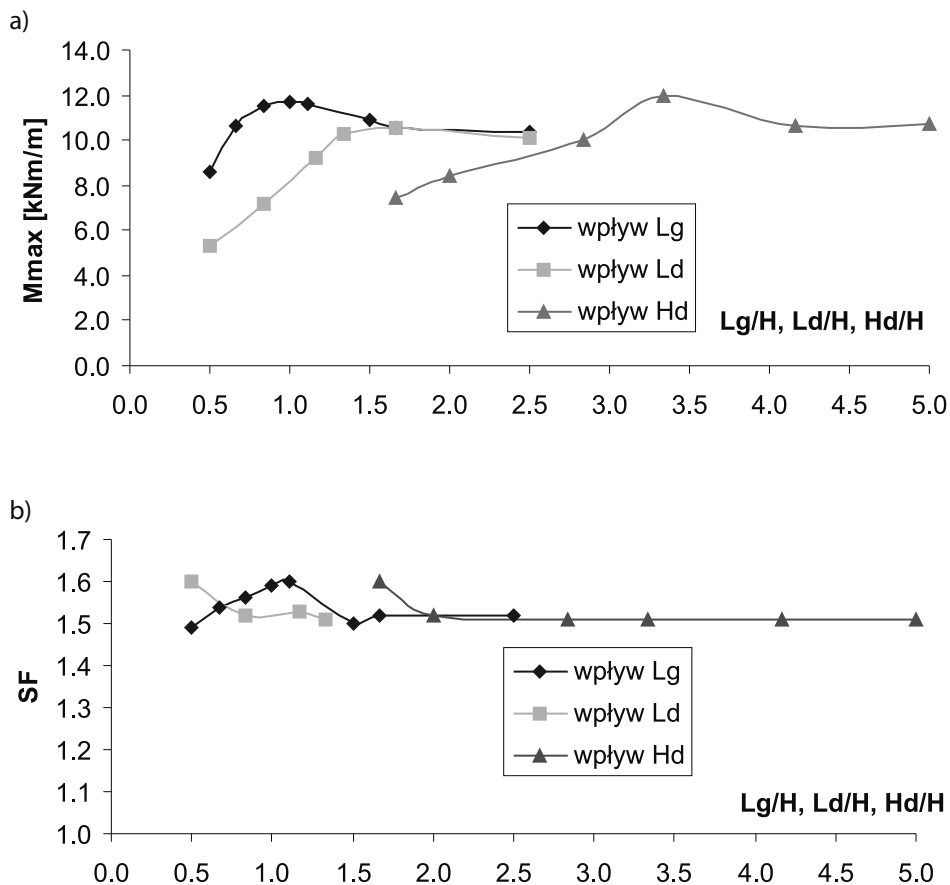
Sposób modelowania	SF [-]	M_{\max} [kNm/m]	Uwagi
wzorcowy	1.09	30.60	
bez elementów kontaktowych	1.43	6.10	wykres momentów po obydwu stronach ścianki
bez etapowania	1.05	35.80	
bez częściowego odprężenia	1.09	31.30	
bez elementów kontaktowych i etapowania	1.42	5.50	wykres momentów po obydwu stronach ścianki



Rys. 4. Wymiary obszaru obliczeniowego

Fig. 4. Calculations range dimensions

Analiza wpływu wymiarów obszaru obliczeniowego na uzyskiwane wyniki wykazała, iż orientacyjne minimalne jego wymiary wynoszą $L_d = L_g = 1,5 H$ $H_d = 2H$ (oznaczenia jak na rys. 4). Wykorzystanie modelu o mniejszych wymiarach może prowadzić do znacznego niedoszacowania wartości momentów zginających w ścianie oraz nieznacznego przeszacowania współczynnika stateczności.



Rys. 5. Wpływ wymiarów obszaru obliczeniowego na maksymalny moment zginający i współczynnik stateczności dla ścianki modelowej

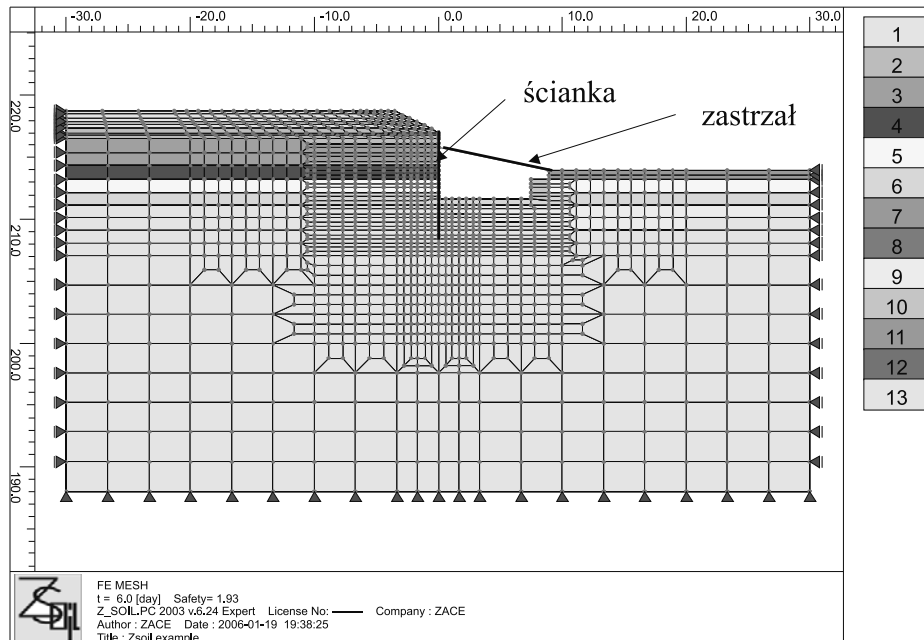
Fig. 5. Influence of calculations range dimensions on maximal bending moment and SF

3.2. Ścianka z zastrzałem – wpływ etapowania

Analizie poddano przypadek rzeczywisty ścianki szczelnej stanowiącej zabezpieczenie wykopu. Z uwagi na lokalne przegłębienie wykopu zastosowano zastrzał oparty o wykonaną uprzednio płytę denną. Uwzględniono następujące etapy wykonywania konstrukcji:

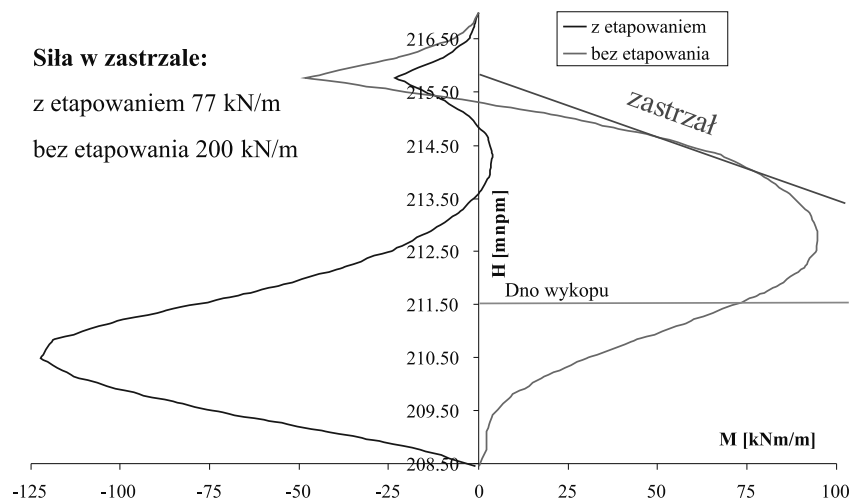
- stan *in situ*,
- wykonanie niezabezpieczonej części wykopu,
- zainstalowanie ścianki szczelnej,
- wykonanie nie przegłębionej części wykopu,
- wykonanie płyty dennej oraz opartego o nią zastrzału,
- wykonanie przegłębionej części wykopu.

Model numeryczny stanu finalnego przedstawia rys. 6, a uzyskane wykresy momentów zginających i sił podłużnych ilustruje rys. 7.



Rys. 6. Model obliczeniowy – ścianka z zastrzałem, stan finalny

Fig. 6. Calculations model – final stage



Rys. 7. Wykres momentów zginających – ścianka z zastrzałem, stan finalny

Fig. 7. Bending moments plot – wall with strut, final stage

Porównano wykresy momentów zginających w ścianie i wartości sił podłużnych w zastrzale (w stanie finalnym, po wykonaniu części przegłębionej wykopu) uzyskane za pomocą modelu wzorcowego oraz modelu bez etapowania (analiza statyki stanu finalnego). Można stwierdzić, iż w takim przypadku modelowanie bez uwzględnienia etapowania jest niedopuszczalne, gdyż prowadzi do uzyskania wykresu momentów zginających po niewłaściwej stronie ścianki oraz niedoszacowania wartości maksymalnego momentu zginającego. Zwraca uwagę znaczne (około dwu i półkrotne) przeszacowanie siły podłużnej w zastrzale uzyskanej bez uwzględnienia etapowania.

4. Wnioski

Uprozczone modelowanie może prowadzić do uzyskania wyników odległych od poprawnych. Największe błędy wywołuje niezastosowanie elementów kontaktowych, co zdaniem Autora jest niedopuszczalne. W przypadku obiektów o skomplikowanym sposobie etapowania wykonywania konstrukcji zaniedbanie jego pełnego odzwierciedlenia w modelu numerycznym może prowadzić do uzyskania rozkładów momentów zginających, zupełnie nieodpowiadających rzeczywistej pracy konstrukcji.

Literatura

- [1] Podleś K., Truty A., Urbański A., *Analiza zagadnień geotechnicznych w systemie Z_SOIL*, X Jubileuszowa Konferencja Naukowa „Metody Numeryczne do Projektowania i Analizy Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbilów 1998, 100-108.
- [2] Truty A., Urbański A., Grodecki M., Podleś K., *Komputerowe modele zagadnień osuwiskowych oraz ich zabezpieczeń*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej w Krakowie 88, 144, Kraków 2009.
- [3] *Z_Soil.PC, Theoretical Manual*, ZACE Services Ltd., Lozanna 1998.