

ALEKSANDER URBĄŃSKI*, MICHAŁ GRODECKI*

WYBRANE PROBLEMY MODELOWANIA KOMPUTEROWEGO ZAGADNIEŃ STATYKI ŚCIANEK SZCZELNYCH

SELECTED PROBLEMS OF COMPUTER MODELLING OF SHEET PILE WALL STATIC

Streszczenie

Artykuł przedstawia wybrane problemy modelowania komputerowego problemu współpracy ścianki szczelnej z gruntem. Podano zasady, jakich należy przestrzegać, prowadząc symulacje numeryczne zachowania tego typu konstrukcji.

Słowa kluczowe: ścianka szczelna, stateczność, moment zginający

Abstract

In this paper selected problems of numerical modeling of sheet pile wall interaction with soil are presented. Rules which should be accepted during simulations are described.

Keywords: sheet pile wall, stability, bending moment

* Dr hab. inż. Aleksander Urbański, prof. PK, dr inż. Michał Grodecki, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

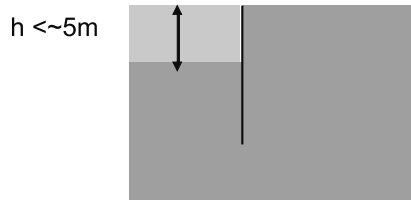
1. Wstęp

Pomimo swojej technicznej prostoty ścianki szczelne są konstrukcjami, których analiza statyczna nastręcza pewne trudności, z uwagi na złożony charakter interakcji pomiędzy kontinuum gruntowym a odkształcalną konstrukcją. Klasyczne metody obliczeniowe, służące do ich analizy statycznej i wymiarowania, zawierają liczne uproszczenia i założenia wstępne, niejednokrotnie trudne do przyjęcia z uwagi na ich niezgodność z rzeczywistą pracą konstrukcji i współpracującego z nią gruntu. Nie pozwalają na uwzględnienie wszystkich istotnych czynników działających na konstrukcję, a więc mogących mieć wpływ na podejmowane decyzje projektowe.

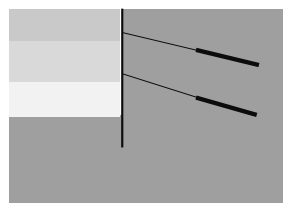
W artykule analizuje się niektóre z nich, wskazując jednocześnie na możliwości zastosowania modelowania numerycznego opartego na Metodzie Elementów Skończonych. Wykazuje się, że warunkiem poprawnego odtworzenia stanów mechanicznych ścian i współpracującego ośrodka jest przestrzeganie zasady wiernego odwzorowania procesu budowy ściany w analizie numerycznej. Zamieszczone przykładowe wyniki obliczeń (uzyskane z wykorzystaniem systemu Z_Soil.PC, omawianego w pracach [1, 2] ścianek wskazują na wysoką efektywność proponowanego podejścia. Najczęstsze zastosowanie znajdują przedstawione na rys. 1 układy konstrukcyjne.

Typowe rozwiązania ścianek szczelnych

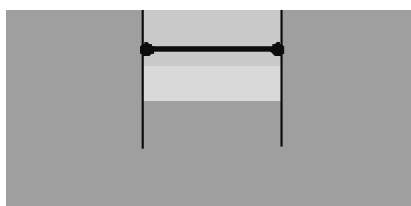
Wspornikowa:



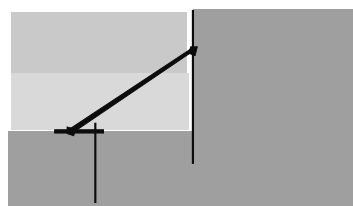
Kotwiona:



Rozpierana:



Podparta:



Rys. 1. Typowe układy konstrukcyjne ścianek szczelnych stanowiących zabezpieczenie wykopu

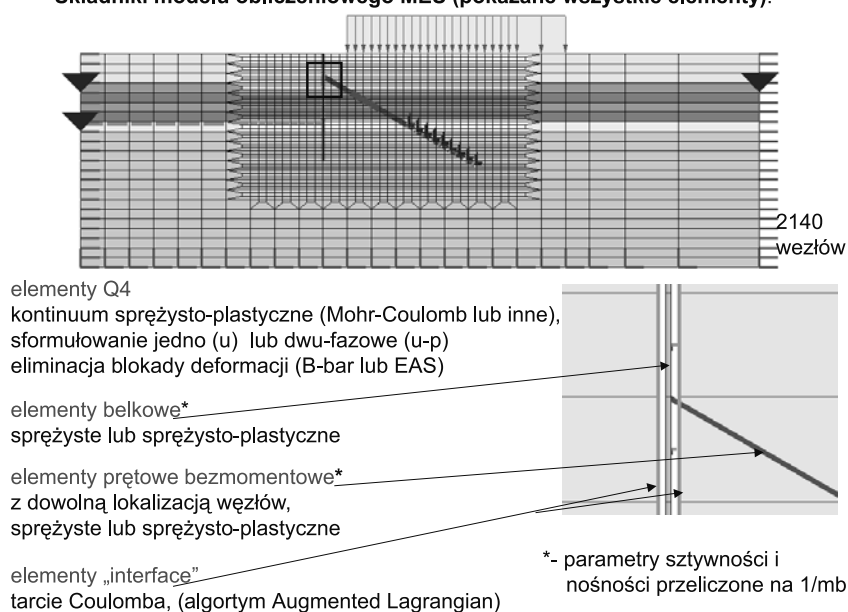
Fig. 1. Typical structural schemes for sheet pile wall used as excavation support

2. Zasady budowy modelu numerycznego

Obliczenia numeryczne prowadzi się najczęściej przy założeniu płaskiego stanu odkształceń, rzadziej stosuje się analizę trójwymiarową. Składnikami modelu numerycznego MES są przedstawione na rys. 2:

- ośrodek gruntowy,
- ściany,
- kotwy i rozpory,
- kontakt pomiędzy gruntem a konstrukcją,
- warunki brzegowe dla ciśnień filtracyjnych i przemieszczeń,
- obciążenia zewnętrzne.

Składniki modelu obliczeniowego MES (pokazane wszystkie elementy):



Rys. 2. Składniki modelu obliczeniowego

Fig. 2. Numerical model components

Na drodze analizy numerycznej MES problemu brzegowego statyki ośrodka sprężysto-plastycznego poszukuje się:

- współczynnika stateczności,
- postaci (mechanizmu) jej utraty (powierzchni poślizgu),
- wielkości sił przekrojowych (w szczególności momentów zginających w ścianie i sił podłużnych w kotwach i rozporach jako odgrywających najważniejszą rolę w procesie wymiarowania konstrukcji),
- pola przemieszczeń (zwłaszcza przemieszczeń poziomych ścianki i pionowych naziomu) na każdym etapie wykonywania i eksploatacji obiektu.

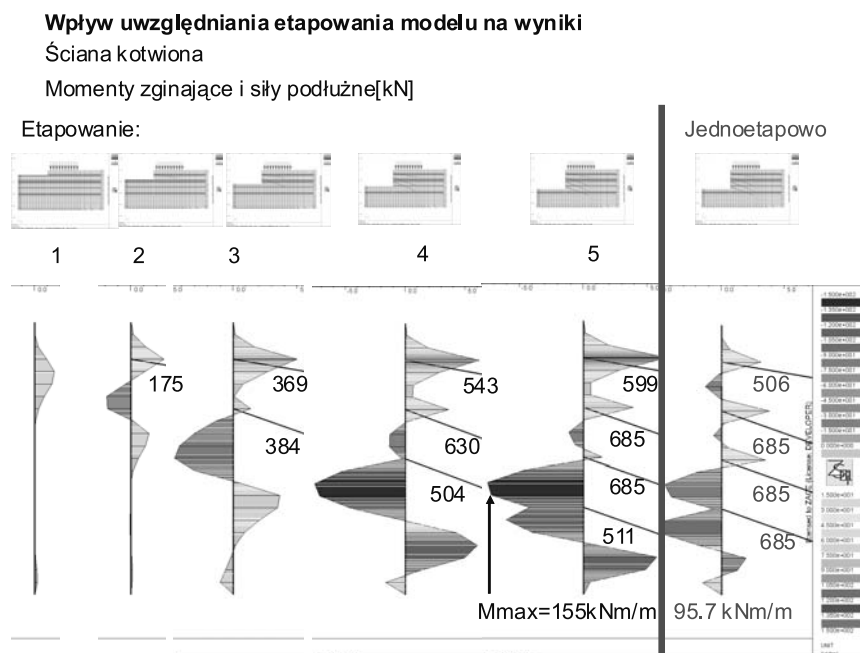
Z uwagi na potrzebę zgodnego z rzeczywistością modelowania zachodzących zjawisk niezbędne jest:

- uwzględnianie zgodnego z rzeczywistym harmonogramem prac etapowania wykonywania konstrukcji,
- w celu zamodelowania możliwości wystąpienia nieciągłego pola przemieszczeń na styku grunt - konstrukcja zastosowanie elementów kontaktowych. Konieczność ich stosowania wykazały eksperymenty numeryczne, por. [9],
- z uwagi na znaczny wpływ stosunków sztywności elementów konstrukcji ścianki i gruntu na uzyskiwane wielkości sił przekrojowych i przemieszczeń każda ich zmiana wymaga powtórzenia obliczeń,
- uwzględnianie obecności wody gruntowej (w tym zjawisk filtracyjnych o charakterze ustalonym i nieustalonym) poprzez wyznaczenie pola ciśnień porowych i wynikających z niego sił masowych, co prowadzi do traktowania gruntu jako ośrodka dwufazowego,
- uwzględnianie w obliczeniach poprawnie zidentyfikowanego stanu naprężeń *in situ*, co w praktyce wymaga znajomości wartości współczynnika parcia spoczynkowego K_0 ,
- użycie elementów skończonych wolnych od efektów blokady deformacji objętościowej (np. typu B lub EAS, dokładnie omawianych w pracy [4]).

Szczególnego podkreślenia wymaga fakt (na co zwraca uwagę praca [3]), iż w analizie numerycznej nie rozważa się oddzielnie kilku schematów statycznych konstrukcji występujących na różnych etapach jej wykonywania, lecz symuluje się pełny proces jej rozwoju – od wyznaczenia stanu naprężeń *in situ* poprzez instalację i usuwanie ścianek, kotew (z uwzględnieniem ich sprężania), rozpór, zastrzałów, wykonywanie wykopów i ich zasypywanie, zmiany stosunków wodnych (zgodnie z rzeczywistym harmonogramem wykonywania konstrukcji) oraz przykładania i usuwanie obciążeń zewnętrznych do uzyskania stanu końcowego. Konieczność stosowania takiego podejścia wynika z wrażliwości stosowanych modeli konstytutywnych gruntu na historię procesu oraz z faktu, iż elementy konstrukcyjne wprowadzane są do częściowo już zdeformowanego układu i nie będą w znaczący sposób obciążone, dopóki nie nastąpi dalsza jego deformacja (występujące w nich siły wewnętrzne są tylko i wyłącznie skutkiem deformacji zachodzącej po ich zainstalowaniu, wywołanej dalszym głębieniem wykopu, procesami filtracyjnymi, termicznymi, wprowadzonym obciążeniem zewnętrznym).

Stateczność analizuje się z wykorzystaniem metody redukcji $c-\phi$ (omawianej dokładnie w pracy [6]), otrzymując w wyniku współczynnik stateczności oraz mechanizm jej utraty (powierzchnię poślizgu).

Niezastosowanie się do powyższych zaleceń może prowadzić do uzyskania wyników będących po stronie niebezpiecznej, tj. zawyżonych współczynników stateczności i zaniżonych wielkości sił przekrojowych – co podkreśla praca [5]. Różnice w uzyskanych dwoma metodami (z pełnym etapowaniem lub jednoetapowo) wykresach momentów zginających na przykładzie ścianki wielokrotnie kotwionej przedstawia rys. 3. Zwraca się uwagę, iż w przedstawionym przykładzie obliczenia jednoetapowe prowadzą do uzyskania zaniżonych wartości momentów zginających w ścianie.



Rys. 3. Wpływ uwzględnienia etapowania na uzyskiwane wykresy momentów zginających

Fig. 3. Influence of taking into account construction stages on bending moments graphs

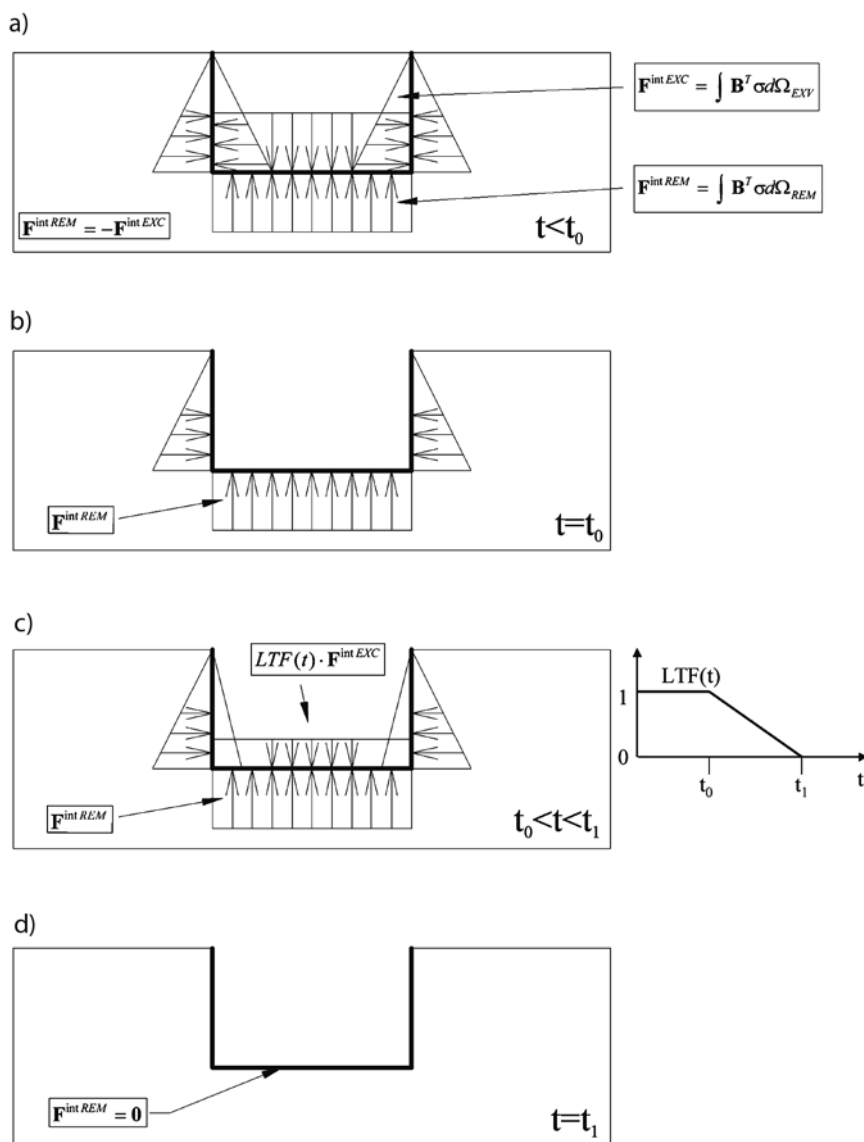
Najczęściej stosuje się model sprężysto-plastyczny Coulomba-Mohra do opisu pracy gruntu. Często stosowany jest też model Druckera-Pragera, którego stożkowa powierzchnia plastyczności jest traktowana jako aproksymacja ostrosłupowej powierzchni Coulomba-Mohra. Jest to wystarczające, gdy poszukuje się w pierwszej kolejności, warunków stateczności układu i sił w elementach konstrukcji (I stan graniczny). Analiza II stanu granicznego (przemieszczeń układu) może wymagać użycia bardziej zaawansowanych modeli gruntu [8]. Do opisu pracy elementów konstrukcji (ścianek, kotew, rozpór) wykorzystuje się model liniowo-sprężysty lub sprężysto-plastyczny z ograniczeniem wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie.

Do modelowania ścianki stosuje się elementy belkowe z liniowymi funkcjami kształtu I stopnia, co powoduje, że belki te podlegają dyskretyzacji zgodnej z dyskretyzacją przylegającego do nich ośrodka gruntowego.

3. Modelowanie procesu wykonywania wykopu

W celu zamodelowania procesu wykonywania wykopu niezbędna jest deaktywacja pewnej części modelu numerycznego (odpowiadającej strefie wykonywanego wykopu). Proponuje się wykorzystanie w tym celu techniki częściowego odprężenia, zilustrowanej przez rys. 4. Poniżej podaje się przyjęte na nim oznaczenia:

EXC – część modelu usunięta w procesie wykonywania wykopu,
 REM – część modelu pozostająca po wykonaniu wykopu,
 F^{int} – siły wewnętrzne pochodzące od poszczególnych części modelu.



Rys. 4. Technologia częściowego odprężenia w zastosowaniu do symulacji wykonywania wykopu: a) stan *in situ*, b) stan po wykonaniu wykopu bez odprężenia, c) stan po wykonaniu wykopu przy częściowym odprężeniu, d) docelowy stan po wykonaniu wykopu

Fig. 4. Partial unloading technology in excavation simulation: a) *in situ* state, b) after excavation without unloading, c) after excavation with partial unloading, d) final state after excavation

Opisywana technologia polega na usunięciu z modelu strefy odpowiadającej wykopowi, przy jednoczesnym przyłożeniu do brzegu pozostałego obszaru obciążeń równych siłom wewnętrznym pochodzącym od usuniętego fragmentu. Siły te są w kolejnych krokach przyrostowych stopniowo redukowane do zera. Podejście takie umożliwia zarówno dwuwymiarową symulację rzeczywistego trójwymiarowego procesu wykonywania wykopu, jak też pozwala na uniknięcie problemów stabilności rozwiązania numerycznego występujących przy „skokowym” wyłączaniu elementów modelu, a związanych z pojawieniem się znacznego nierównoważenia sił wewnętrznych. Taką samą technologię stosuje się w przypadku symulowania usuwania elementów konstrukcji – np. rozpór tymczasowych. Finalny, uzyskiwany po tym etapie model numeryczny przedstawia rys. 4d.

4. Modelowanie kotew gruntowych

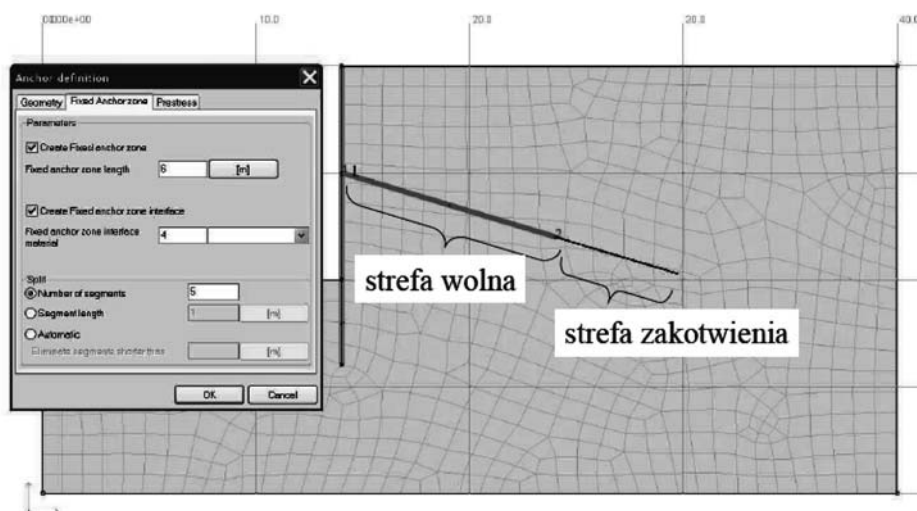
Poprawne zamodelowanie pracy kotew ma zasadnicze znaczenie dla uzyskania zgodnych z rzeczywistością wyników symulacji numerycznej. W tym celu należy uwzględnić:

- nośność połączenia kotwy z otaczającym ją gruntem,
- ograniczoną wytrzymałość kotwy,
- wstępne sprężenie kotwy,
- połączenie kotwy ze ścianką,
- brak powiązania kotwy z gruntem na długości wolnej.

W systemie Z_Soil (do wersji z roku 2009) realizuje się to, wykorzystując elementy prętowe jak na rysunku 5. Nośność połączenia kotwy z gruntem może być łatwo uwzględniona przez wprowadzenie fikcyjnych sprężysto-plastycznych łączników (elementów prętowych). Elementy prętowe mogą być lokowane w dowolnych miejscach elementów kontinuum gruntowego – niekoniecznie w węzłach. Geometria kotwy nie jest zależna od dyskretyzacji ośrodka gruntowego. W tym celu wykorzystuje się podejście pokazane na rysunku 6, które zapewnia zgodność przemieszczeń i równowagę sił wynikającą z zasady prac wirtualnych.

Element prętowy używany do modelowania kotew umożliwia uwzględnienie wstępnego sprężenia. W wybranych chwilach czasowych odpowiadających okresom aktywności sprężenia siła w elemencie jest równa zadanej wartości siły sprężającej, a sztywność osiowa elementu jest pomijalna.

W najnowszej wersji programu Z_Soil (2010) zastosowano specjalny element interfejsowy, pozwalający na modelowanie w sposób ciągły połączeń między kotwą a kontinuum gruntowym o ograniczonej wytrzymałości na ścinanie. Proponowane podejście w znacznym stopniu upraszcza budowę modelu numerycznego.



Rys. 7. Model kotwy w programie Z_Soil v.2010

Fig. 7. Model of anchor in Z_Soil v.2010

5. Wnioski

Można postawić tezę, że moc obliczeniowa nie stanowi już dziś bariery w wykorzystaniu dwuwymiarowych modeli MES w praktycznej działalności projektowej. Posługując się modelem 2D (płaski stan odkształcenia) dla układów ścianka szczelna–grunt można wykonywać wielokrotne, wielowariantowe symulacje z dużą ilością kroków obliczeniowych wraz z towarzyszącymi im iteracjami. Możliwa do przeanalizowania liczba wariantów (wynikających ze zmienności warunków gruntowych oraz rozważanych różnych rozwiązań konstrukcyjnych) wielokrotnie przekracza możliwości klasycznych metod obliczeniowych.

Proponowane podejście pozwala na efektywne, a jednocześnie bliskie rzeczywistości symulowanie pracy konstrukcji, tak więc umożliwia podejmowanie decyzji projektowych nie obciążonych wstępnymi założeniami, niezgodnymi z naturą zachodzących zjawisk.

Warunkiem *sine qua non* dla jakiegokolwiek analizy numerycznej jest dysponowanie przez projektanta wiarygodnymi danymi określającymi cechy mechaniczne podłoża i jego morfologię. Nakłady ponoszone na coraz dokładniejsze badania podłoża mogą być jednak zniweczone, jeżeli ich wyniki nie będą wykorzystane przez odpowiednio dokładne analizy obliczeniowe, a z drugiej strony najbardziej nawet wyrafinowana analiza nie zniweluje skutków błędnej oceny parametrów wejściowych modelu.

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”, Korbiewów 1998, 100-108.

- [2] Podleś K., Truty A., Urbański A., *Modelowanie złożonych problemów geotechniczno-budowlanych w systemie Z_SOIL 3D*, Mat. Pokonf. XII Konf. Naukowej nt. „Metody Numeryczne w Projektowaniu i Analizie Konstrukcji Hydrotechnicznych”, Korbielów marzec 2000, 86-99.
- [3] Ryż K., Urbański A., *Nowe obszary zastosowań stalowych ścian szczelnych – wybrane aspekty konstrukcyjne i obliczeniowe*, Geoinżynieria i Tunelowanie 03/2004.
- [4] Truty A., *On certain classes of mixed and stabilized mixed finite element formulations for single and two-phase geomaterials*, praca habilitacyjna, Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Inżynieria Środowiska, nr 48, Kraków 2002.
- [5] Truty A., Urbański A., *Współczesne możliwości modelowania komputerowego w zagadnieniach geotechniczno-budowlanych*, Materiały Pokonferencyjne XX Ogólnopolskiej Konferencji Warsztat pracy Projektanta Konstrukcji, Wisła Ustroń 2005.
- [6] 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, nr 88, z. 144, 2009.
- [7] Urbański A., Grodecki M., Piszczyk K., *Propozycja prostej metody oceny stateczności ścianek szczelnych niekotwionych*, Czasopismo Techniczne, 1Ś/2007, Wydawnictwo PK, Kraków 2004, 159-167.
- [8] *Z_Soil.PC, Theoretical Manual*”, ZACE Services Ltd., Lozanna 1998.
- [9] Grodecki M., *Modelowanie numeryczne statyki ścianek szczelnych i szczelinowych*, praca doktorska, Politechnika Krakowska 2007.