

Przegląd komputerowych programów inżynierskich do obliczeń geotechnicznych

Mgr inż. Marta Bodziuch

Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska

Programy komputerowe służące do inżynierskich obliczeń geotechnicznych coraz częściej zastępują ujęcia analityczne i pozwalają na rozwiązywanie nawet skomplikowanych zagadnień. Na rynku jest dostępne różnego rodzaju oprogramowanie różniące się możliwościami obliczeniowymi. Głównym celem artykułu jest przedstawienie trzech wybranych programów geotechnicznych: Plaxis 2D 2012, Z_Soil 2012 oraz GeoStudio 2012, a następnie porównanie ich i ocenienie pod względem przydatności dla użytkownika oraz kryterium ich wyboru.

KRÓTKA CHARAKTERYSTYKA ANALIZOWANYCH PROGRAMÓW

Plaxis, Z_Soil oraz GeoStudio są programami powszechnie używanymi do rozwiązywania zagadnień geotechnicznych. Umożliwiają one modelowanie i analizę zagadnień występujących podczas wznoszenia i eksploatacji obiektów; wszystkie opierają się na Metodzie Elementów Skończonych (MES) [1, 3, 5]. Między innymi, można za ich pomocą budować zaawansowane modele gruntowe, badać konsolidację gruntu czy też określać przepływ wody gruntowej.

Oprócz podstawowej wersji program Plaxis można rozszerzyć o moduł Dynamics (analiza drgań) oraz PlaxFlow (uwzględnia przepływ wody w gruntach). Natomiast Z_Soil wszelkie dostępne narzędzia zawiera w podstawowej wersji oprogramowania. O ile Plaxis oraz Z_Soil są pojedynczymi programami, to GeoStudio stanowi pakiet programów inżynierskich, w którym można odróżnić, między innymi, moduł pozwalający na analizę naprężeń i przemieszczeń, stateczności zbocza, przepływu wody, czy też obciążeń dynamicznych i termicznych. W niniejszym opracowaniu skupiono się na dokładniejszym opisie tylko jednego modułu tego programu – modułu SIGMA/W.

RODZAJE ANALIZ

Ze względu na złożoność i różnorodność zagadnień geotechnicznych w każdym z rozpatrywanych tu programów wyodrębniono procedury, które służą użytkownikowi do dokładnego zdefiniowania analizowanego problemu. Wszystkie programy pozwalają na określenie stanu początkowego – naprężenia pierwotnego panującego w gruncie (przez procedurę K_0) oraz na ocenę jego nośności i określenie przemieszczeń. Plaxis i Z_Soil mają w wersji podstawowej programu możliwość przeprowadzenia analizy dynamicznej i konsolidacji gruntu. Z_Soil [2] pozwala też na zbadanie przepływu cieczy i ciepła przez grunt. Moduł SIGMA/W GeoStudio [4] umożliwia także analizę dynamiczną, natomiast w przypadku określenia stateczności konstrukcji bądź przepływu wody należy skorzystać z pozostałych modułów oferowanych przez ten program.

KONSTRUOWANIE MODELU OBLICZENIOWEGO

Wprowadzanie modelu do każdego z przedstawianych tu programów jest bardzo podobne. Polega ono na graficznym zamodelowaniu warstw gruntu, elementów konstrukcji, obciążeń oraz warunków brzegowych. Pozwala to na wykonanie dokładnego modelu w prosty, intuicyjny sposób. Użytkownik ma możliwość podzielenia modelu według etapów wykonywania konstrukcji, co pozwala na określenie rozkładu naprężenia i deformacji w każdym z nich – można dodać lub odjąć odpowiadające im warstwy czy fragmenty gruntu lub zmieniać obciążenia i ciśnienie wody gruntowej.

MODELE MATERIAŁOWE

W tabl. 1 zestawiono najczęstsze modele materiałowe służące do modelowania ośrodka gruntowego. Oprócz nich, każdy z programów umożliwia wprowadzenie innych, rzadziej stosowanych modeli, a programy Plaxis i GeoStudio pozwalają zdefiniować użytkownikowi własny model gruntu.

Tabl. 1. Zestawienie wybranych modeli materiałowych dostępnych w analizowanych programach

Model materiałowy	Plaxis	Z_Soil	GeoStudio
Liniowo-sprężysty	×	×	×
Coulomb-Mohr	×	×	×
Drucker-Prager	–	×	–
Zmodyfikowany Cam Clay	×	×	×
Hardening Soil	×	×	–
Hardening Soil Small Strain	×	×	–
Holk-Brown	×	×	–

ELEMENTY SKOŃCZONE

Wszystkie omawiane programy opierają się na MES. Do modelowania dwuwymiarowego ośrodka gruntowego Plaxis oferuje: 6- lub 15-węzłowe elementy trójkątne, Z_Soil: 3-węzłowe elementy trójkątne i 4-węzłowe kwadratowe, GeoStudio: 3-węzłowe elementy trójkątne oraz 4- lub 9-węzłowe kwadratowe. Programy te pozwalają też na lokalne zagęszczenia siatki według potrzeb użytkownika.

ELEMENTY KONSTRUKCYJNE

W każdym z programów użytkownik ma możliwość wprowadzenia podstawowych elementów konstrukcyjnych, takich jak elementy belkowe lub elementy charakteryzowane jedynie przez sztywność, np. kotwy i geotekstyli. Plaxis pozwala ponadto modelować w dwuwymiarowej przestrzeni grupy pali, natomiast Z_Soil ma dodatkowe funkcje modelowania powłok i gwoździ zbrojących grunt. Wszystkie programy dają możliwość modelowania w łatwy sposób interfejsu, czyli interakcji między gruntem a konstrukcją.

OBCIĄŻENIE ZEWNĘTRZNE ORAZ WODA GRUNTOWA

Plaxis, Z_Soil oraz GeoStudio mają możliwość definiowania obciążeń skupionych bądź równomiernie rozłożonych na długości elementu. Użytkownik może modyfikować obciążenia podczas każdej fazy konstrukcyjnej. Ponadto program Z_Soil pozwala na utworzenie funkcji obciążenia, dzięki czemu można dokładnie zdefiniować stopniowy wzrost lub spadek siły w zależności od czasu.

Warunki wodne panujące w ośrodku gruntowym są możliwe do modelowania we wszystkich programach. Plaxis pozwala na określenie poziomu zwierciadła wody gruntowej, określenia ustalonego przepływu lub zasymulowania opadów atmosferycznych na danym obszarze. Z_Soil pozwala na zasymulowanie stałego lub zmiennego zwierciadła wody gruntowej oraz stałego lub zmiennego ciśnienia wody. GeoStudio pozwala na ustalenie warunków wodnych za pomocą zwierciadła wody gruntowej lub funkcji przestrzennej (ang. *spatial function*). Funkcja ta umożliwia określenie ciśnienia w konkretnych punktach, a program przez interpolację wyznacza wartości ciśnienia na pozostałym obszarze.

PRZEDSTAWIENIE WYNIKÓW OBLICZEŃ

Wszystkie trzy programy pozwalają na graficzne przedstawienie wyników obliczeń w postaci map lub izolinii, jak i dokładnych wartości dotyczących każdego węzła lub elementu skończonego. Uzyskujemy obraz deformacji konstrukcji, a także wartości sił przekrojowych w elementach zginanych (belkowych) lub rozciąganych i ściskanych (między innymi kotwy, geosyntetyki). Wszystkie wyniki można w łatwy sposób eksportować do innych programów w celu ich dalszej obróbki. Dodatkowo Z_Soil umożliwia analizę zmienności w czasie dowolnych wielkości występujących w modelu.

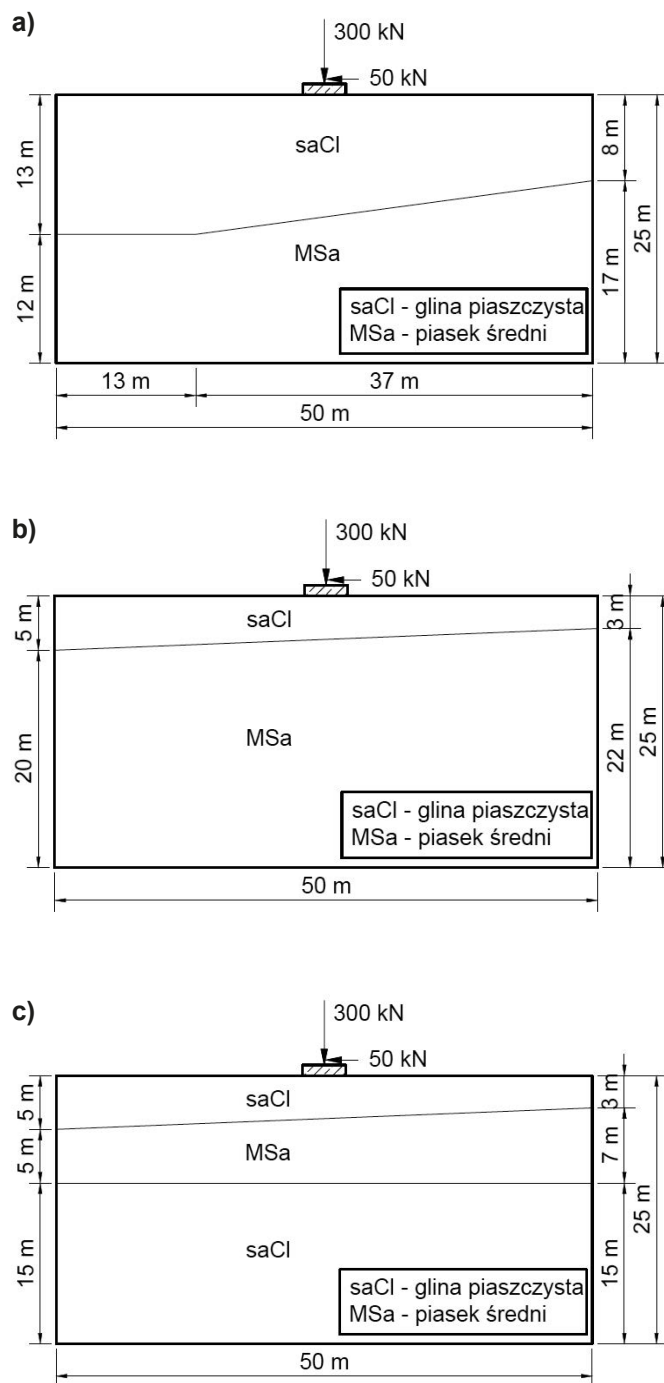
SZCZEGÓŁOWA ANALIZA PROGRAMÓW KOMPUTEROWYCH – ROZWIĄZANIE ZAGADNIENIA GEOTECHNICZEGO

W celu porównania omówionych programów dokonano dwuwymiarowej analizy prostego zagadnienia geotechnicznego, jakim jest stopa fundamentowa posadowiona na gruncie uwarstwowionym. Przyjęte wymiary stopy: $2,0 \times 2,0 \times 0,5$ m.

Fundament obciążono siłą pionową o wartości 300 kN oraz siłą poziomą o wartości 50 kN. Rozważono trzy niesymetryczne warianty warunków gruntowych, których szczegóły przedstawiono na rys 1.

MODELE MATERIAŁOWE

Ze względu na ograniczenia wersji programu GeoStudio wykonano obliczenia, stosując dwa różne modele materiałowe: model Coulomba-Mohra w programach Plaxis i Z_Soil oraz model materiału liniowo-sprężystego we wszystkich programach. Zadaniem pierwszego było symulowanie rzeczywistej



Rys. 1. Schemat warunków gruntowych a) wariant 1, b) wariant 2, c) wariant 3

Tabl. 2. Zestawienie parametrów materiałowych gruntów

Parametr		Symbol	Jednostka	saCl	MSa
Ciężar objętościowy gruntu		γ_{wet}	kN/m ³	21	19,5
Ciężar objętościowy szkieletu gruntowego		γ_{dry}	kN/m ³	18	18
Efektywny moduł odkształcenia	Wariant 1	E'	kPa	35 000	65 000
	Wariant 2		kPa	15 000	78 000
	Wariant 3		kPa	15 000 / 85 000	40 000
Współczynnik Poissona		ν'	–	0,32	0,28
Efektywny kąt tarcia wewnętrzznego		Φ'	–	18	33
Spójność efektywna		c'	kPa	30	1
Kąt dyatacji		ψ	–	0	3

odpowiedzi gruntu na zadane obciążenie, natomiast model drugi pozwolił zweryfikować i porównać wszystkie programy oraz ocenić ich przydatność.

W tabl. 2 zestawiono parametry materiałowe gruntów potrzebne do wykonania obliczeń. Parametry takie jak: efektywny kąt tarcia wewnętrzznego, spójność efektywna oraz kąt dyatacji wykorzystano w obliczeniach z użyciem modelu materiałowego Coulomba-Mohra.

Pomimo że w każdym z programów fundament bezpośredni zamodelowano jako element belkowy, to parametry potrzebne do zdefiniowania przekroju są różne. Niezbędne parametry do przeprowadzenia obliczeń to: moment bezwładności 1 mb (I) wynoszący $10,4 \cdot 10^3 \text{ m}^4/\text{m}$, sztywność na zginanie 1 mb (EA) wynosząca $15 \cdot 10^6 \text{ kN/m}$ oraz sztywność na rozciąganie 1 mb (EI) o wartości $312,5 \cdot 10^3 \text{ kNm}^2/\text{m}$. Przyjęto, że stopę fundamentową wykonano z betonu klasy C20/25 o wartości modułu Younga 30 GPa i współczynnika Poissona 0,2.

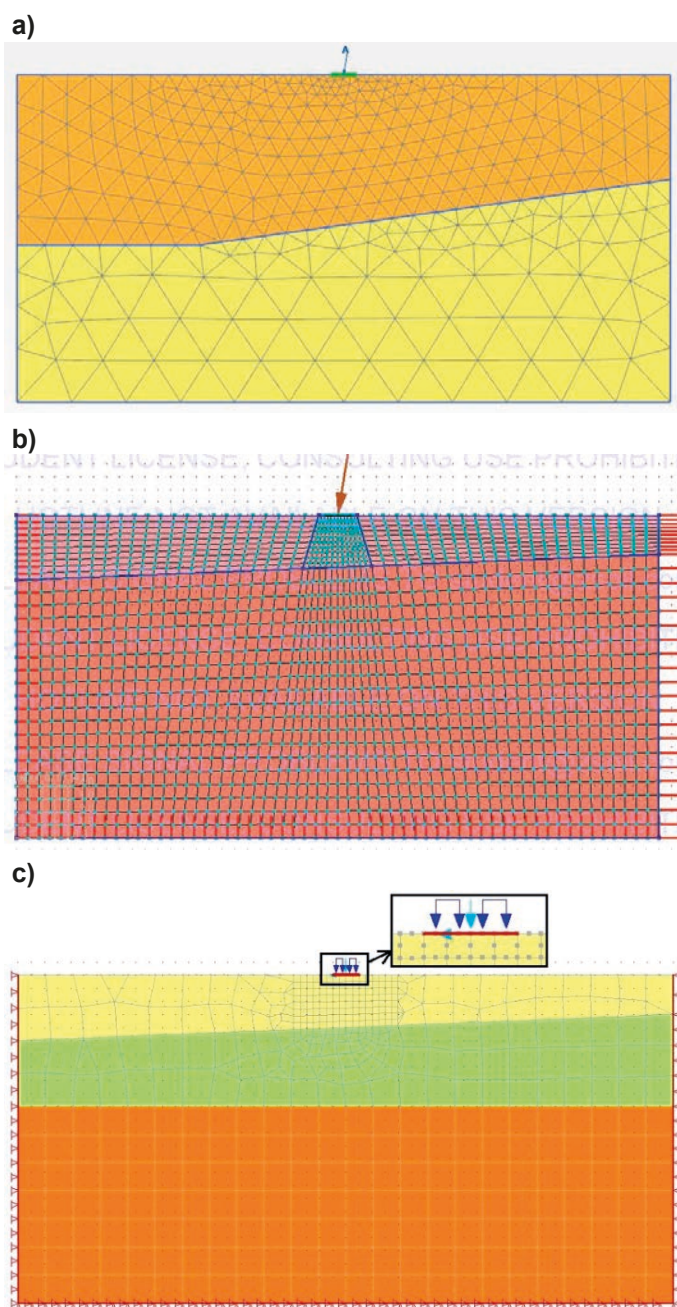
MODELOWANIE ZADANIA

W celu zasymulowania jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistości warunków wykonywania konstrukcji w każdym z programów dokonano podziału na następujące kolejne fazy:

1. Analiza *in situ*, w której za pomocą metody K_0 określa się naprężenie pierwotne;
2. Posadowienie stopy fundamentowej na gruncie;
3. Obciążenie fundamentu siłą pionową i poziomą.

Ze względu na ograniczenia programu GeoStudio (możliwość modelowania jedynie dwóch faz w posiadanej wersji oprogramowania) obliczenia dotyczące modelu materiałowego liniowo-sprężystego wykonano z pominięciem fazy drugiej.

Definiowanie modelu w każdym z programów przebiegało podobnie. Graficznie określono model gruntu, a następnie wprowadzono fundament jako element belkowy. Zadano warunki brzegowe: krawędź dolna zablokowana w dwóch kierunkach, przesunięcie krawędzi bocznych zablokowane w kierunku poziomym. Na koniec zdefiniowano obciążenie fundamentu siłą skupioną poziomą i pionową. Ostatnim krokiem, najbardziej różniącym się w każdym z programów, było wykonanie siatkowania utworzonego modelu. Starano się, aby wprowadzone



Rys. 2. Przykład modelu dotyczącego: a) wariantu 1 w programie Plaxis, b) wariantu 2 w programie Z_Soil, c) wariantu 3 w programie GeoStudio

modele geometryczne były jak najbardziej zbliżone do siebie, uwzględniając ograniczenia stawiane przez posiadaną wersję programu, głównie związane z liczbą elementów skończonych.

W programie Plaxis do modelowania ośrodka gruntowego posłużono się siatką 6-węzłowych elementów trójkątnych, o gęstości określonej przez program jako „medium”, z lokalnym zagęszczeniem siatki pod fundamentem (rys. 2a). Niestety program umożliwia lokalne zagęszczenie bądź rozrzedzenie siatki bez sprawowania pełnej kontroli nad wielkością elementów, co często jest utrudnieniem dla użytkownika. Natomiast Z_Soil umożliwia dokładniejsze zdefiniowanie siatki niż Plaxis poprzez, między innymi, określenie przybliżonego rozmiaru elementu na danym obszarze lub określenie na ile części powinna być podzielona odpowiednia krawędź obszaru. W przykładzie wygenerowano siatkę złożoną z 4-węzłowych elementów kwadratowych. Tuż pod fundamentem utworzono siatkę gęstszą o wymiarze elementu w przybliżeniu 0,25 m, na pozostałym obszarze wielkość wynosiła 1 m (rys. 2b). Bardzo podobnie jak w oprogramowaniu Z_Soil GeoStudio pozwala na dokładne zdefiniowanie rodzaju i wielkości elementów skończonych. Do modelowania ośrodka gruntowego wykorzystano 9-węzłowe kwadratowe elementy skończone. Ze względu na ograniczenia programu do 500 elementów skończonych w rozważanym przykładzie dokonano następującego siatkowania: pod fundamentem przybliżony rozmiar elementów to 0,75 m, na pozostałym obszarze 3 m (rys. 2c).

Praca w programie Plaxis polega na wprowadzeniu geometrii modelu, zdefiniowaniu materiałów oraz określeniu siatkowania w pierwszej części programu nazwanej Input. Następnie w module Calculations określone są kolejne fazy konstrukcyjne oraz aktywuje się lub dezaktywuje poszczególne elementy biorące udział w danym etapie obliczeniowym. Część programu o nazwie Output służy do analizy wyników. Podział ten bardzo ułatwia i systematyzuje pracę w programie. Praca w programie jest bardzo intuicyjna, a podczas wykonywania modelu nie napotykamy większych trudności.

W Z_Soil analizę można podzielić na kilka etapów. W pierwszym z nich definiujemy materiały. W następnym określamy „existence function”, czyli w fikcyjny sposób ustalamy czas powstawania całej konstrukcji, a następnie przyporządkowu-

jemy elementom ich czas trwania. W kolejnym etapie określamy charakter funkcji obciążenia – definiujemy wartość funkcji w zależności od momentu wykonywania konstrukcji. Ostatnim etapem jest utworzenie modelu, a po wykonaniu obliczeń można dokonać analizy ich wyników. Po poznaniu programu (np. kolejności wprowadzania poszczególnych elementów modelu) praca jest prosta, lecz początkującemu użytkownikowi może stwarzać trudności.

W programie GeoStudio modelowanie rozpoczyna się od wybrania modułu, w którym będzie analizowane zadanie. W rozważanym przypadku jest to SIGMA/W. Następnie definiujemy kolejne fazy konstrukcyjne, przy czym mamy także możliwość korzystania z pozostałych modułów obliczeniowych. Po wstępnych ustaleniach przechodzimy do okna, w którym określa się geometrię modelu oraz wszelkie materiały. Po wykonaniu obliczeń w tym samym oknie są prezentowane wyniki. Praca w programie jest dość intuicyjna i po zapoznaniu się z udostępnianymi przez wydawcę materiałami przebiega bez większych problemów.

Wprowadzanie modelu w każdym z programów przebiegało z podobnym stopniem trudności, lecz najbardziej problematyczny okazał się program Z_Soil. Program był najmniej intuicyjny i niektóre funkcje nie były dość oczywiste. Jednak wydawca załączył do programu zestaw materiałów pomocniczych, których dokładne przestudiowanie pomogło rozwiązać napotkane trudności.

WYNIKI OBLICZEŃ

W pierwszym kroku poddano analizie przemieszczenia całkowite. W tabl. 3 przedstawiono zestawienie maksymalnych przemieszczeń całkowitych uzyskanych w każdym z programów. Przemieszczenia są do siebie bardzo zbliżone, największa rozbieżność wynosi 3,5% między wynikami dotyczącymi wariantu 1. Przykład mapy przemieszczeń całkowitych pokazano na rys. 3.

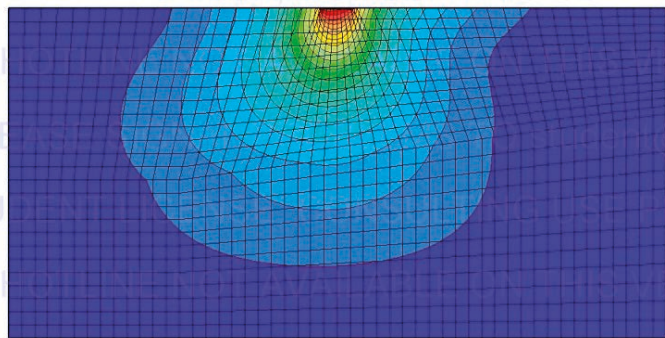
W tabl. 4 zestawiono składowe pionowe naprężenia pod środkiem stopy uzyskane w każdym z programów. Na rys. 4 przedstawiono przykład mapy składowych pionowych naprężeń.

Tabl. 3. Zestawienie przemieszczeń całkowitych [u], [mm]

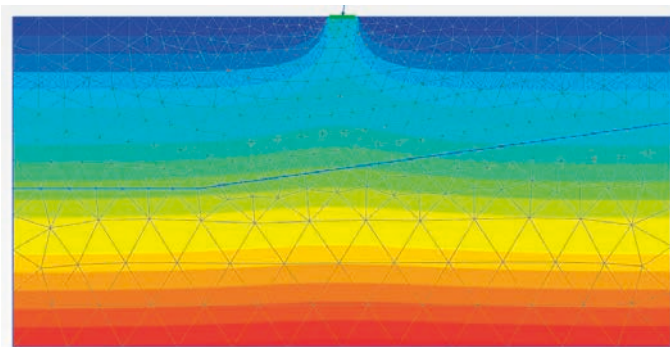
Program	Wariant 1		Wariant 2		Wariant 3	
	Mohr-Coulomb	Liniowo-sprężysty	Mohr-Coulomb	Liniowo-sprężysty	Mohr-Coulomb	Liniowo-sprężysty
Plaxis	17,05	16,18	26,21	24,41	27,99	25,97
Z_Soil	17,02	15,69	27,20	24,10	28,12	26,11
GeoStudio	–	15,91	–	24,10	–	25,95

Tabl. 4. Zestawienie składowych pionowych naprężeń, [kN/m²]

Program	Wariant 1		Wariant 2		Wariant 3	
	Mohr-Coulomb	Liniowo-sprężysty	Mohr-Coulomb	Liniowo-sprężysty	Mohr-Coulomb	Liniowo-sprężysty
Plaxis	116,3	111,0	124,7	115,9	122,5	111,8
Z_Soil	121,2	107,6	125,1	109,2	122,6	113,4
GeoStudio	–	108,53	–	110,7	–	109,93



Rys. 3. Mapa przemieszczeń całkowitych $|u|$ w wariancie 1 uzyskana w programie Z_Soil



Rys. 4. Mapa składowych pionowych naprężenia w wariancie 1 uzyskana w programie Plaxis

Na wykresie (rys. 5a) porównano przemieszczenia gruntu pod środkiem stopy fundamentowej w zależności od głębokości. Wyraźnie widać, że wykazują bardzo zbliżone wyniki. Natomiast na rys. 5b porównano składowe pionowe naprężenia w zależności od głębokości. Krzywe uzyskane z programów GeoStudio oraz Plaxis praktycznie pokrywają się. Wyniki wygenerowane przez program Z_Soil w skrajnym punkcie osiągają wartość o 6% większą.

Programy oferują dużo więcej możliwości analizowania wyników, lecz tu skupiono się tylko na zagadnieniach podstawowych.

WNIOSKI I SUGESTIE DO DALSZYCH ANALIZ

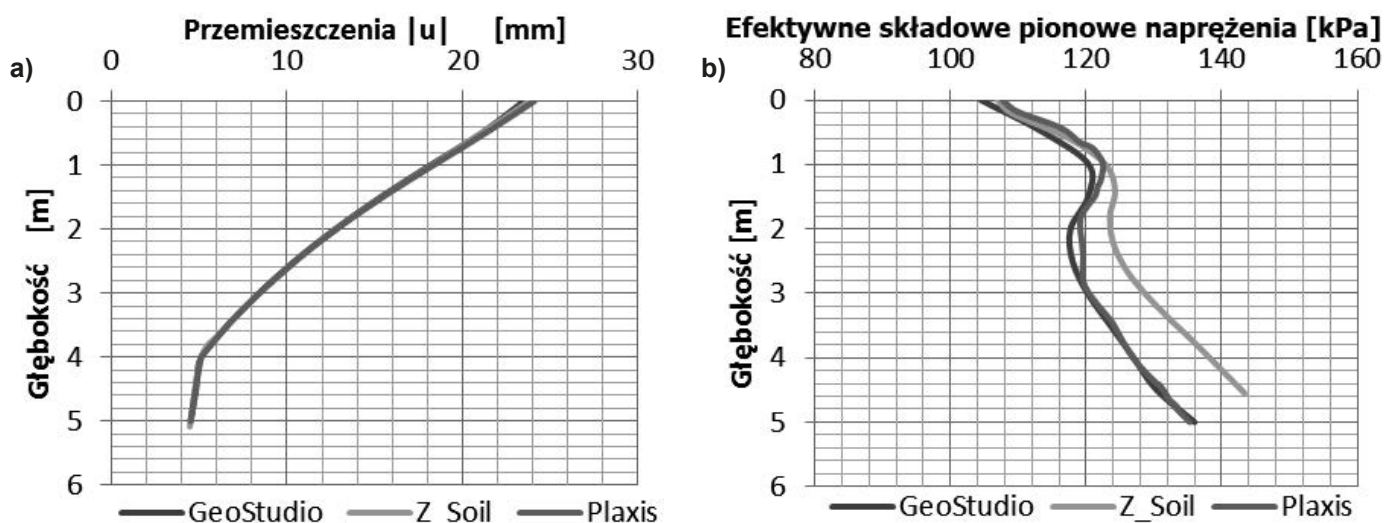
Głównym celem tego opracowania było porównanie wyników uzyskanych w popularnych programach inżynierskich. Z przeprowadzonych rozważań wynika, że programy Plaxis, Z_Soil oraz GeoStudio doskonale nadają się do rozwiązywania prostych zagadnień geotechnicznych. Programy te generują bardzo zbliżone wyniki, dlatego mogą być używane zamiennie do rozwiązywania problemów inżynierskich.

Najmniej „przyjazny” dla użytkownika okazał się Z_Soil, w którym wykonanie modelu wymagało poświęcenia dużo więcej czasu oraz posiadania wiedzy na temat funkcji programu. Jednakże jego ogromną zaletą jest szereg funkcji umożliwiających rozwiązywanie bardziej skomplikowanych zagadnień. Do rozwiązywania prostszych zagadnień doskonale nadaje się zarówno Plaxis, jak i GeoStudio. Nie zauważono znaczącej różnicy w prędkości obliczeń, jednak mogło być to spowodowane nieskomplikowanym modelem.

Przy wyborze programu każdy użytkownik powinien zastanowić się, jaki problem planuje rozwiązać, a następnie, jaka jest jego złożoność i różnorodność. W przypadku, jeśli użytkownik zamierza analizować różnorodne zagadnienia geotechniczne, najlepszym wyborem będzie pakiet programów GeoStudio. Natomiast dla użytkownika, który planuje analizować zachowanie się gruntu w zależności od przyjętego modelu materiałowego, znaczącym kryterium przy wyborze programu będzie ich różnorodność. Wtedy najlepszym wyborem może okazać się Plaxis.

W dużej mierze efektywność pracy w każdym z programów zależy przede wszystkim od wiedzy i doświadczenia użytkownika. Ważne jest, aby umiał on ocenić, czy uzyskane wyniki są zgodne z jego oczekiwaniami, poczynawszy od analizy warunków początkowych, skończywszy na zachowaniu się konstrukcji.

W artykule skupiono się na prostym zagadnieniu geotechnicznym i nie uwzględniono zagadnienia stateczności. Autorka planuje kontynuować pracę, skupiając się na analizie bezpieczeństwa konstrukcji. Również ciekawym zagadnieniem do dalszych badań może okazać się ocena programów w przypadku rozwiązywania dużo bardziej złożonego zagadnienia geotechnicznego.



Rys. 5. Porównanie: a) przemieszczeń całkowitych, b) składowych pionowych naprężenia w zależności od głębokości uzyskanych w wariancie 2

LITERATURA

1. Brinkgreve R., Engin E., Swolfs W.: Plaxis – Manual, 2014.
2. Commend S., Obrzud R., Podleś K., Truty A., Zimmermann Th.: Numerics in geotechnic and structures. ZSOIL.PC Getting Started, February 2012.
3. Truty A., Zimmermann Th., Podleś K., Obrzud R.: ZSOIL.PC 2012 User Manual – Soil, Rock and Structural Mechanics in dry or partially saturated media.
4. Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W. An Engineering Methodology. May 2014 Edition. GEO-SLOPE International Ltd.
5. <http://www.geo-slope.com>