

PROBLEMY ZWIĄZANE Z WYMIAROWANIEM PLATFORM ROBOCZYCH

Angelika DUSZYŃSKA, Katarzyna BIAŁEK*

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Streszczenie: W pracy przedstawiono problem wymiarowania konstrukcji służących tymczasowemu wzmocnieniu podłoża, umożliwiającemu prowadzenie robót fundamentowych na gruntach słabonośnych. Omówiono dostępne metody obliczeniowe, kładąc szczególny nacisk na metodę projektowania platform roboczych pod ciężki sprzęt do robót ziemnych przedstawioną w poradniku BRE 470 „Working platforms for tracked plant”. Analiza ma na celu określenie niezbędnej miąższości platformy roboczej przy założonych warunkach geotechnicznych. Zastosowano analizę porównawczą wykorzystując metodę Jewella oraz symulacje numeryczne przy użyciu programu Plaxis bazującego na MES.

Słowa kluczowe: platformy robocze, geosyntetyki, podłoże słabonośne.

1. Wprowadzenie

Platformy robocze są to konstrukcje tymczasowe, które stosuje się w celu powierzchniowego wzmocnienia i przygotowania słabonośnego podłoża gruntowego na wjazd sprzętu używanego do docelowej jego modyfikacji. Wydawać by się mogło, że nie potrzebują one specjalnego projektu, w którym oszacowano by, w jaki sposób naciski od działających na platformach urządzeń wpłyną na ich nośność, a ich wykonanie nie przysparza większych problemów. Taki sposób myślenia spotykany jest na większości placów budowy w Polsce, czego wynikiem są awarie czy niezdatność do użytku powodująca przestoje na budowie. Podejście takie może być związane ze zbyt dużym skupieniem nad utrzymaniem tempa robót i „oszczędnością czasu” na zbędne badania i projekty.

Standardowo przyjmuje się, że platformę roboczą może stanowić warstwa istniejącego nasypu budowlanego, jeżeli pozwoli ona na stabilne poruszanie się sprzętu w każdych warunkach pogodowych. Przyjmuje się, że powierzchnia platformy roboczej powinna znajdować się 1,0 m (0,5 m w przypadku pracy lekkiego sprzętu) powyżej poziomu wody gruntowej.

Platformy tworzy się często z materiałów miejscowych, na przykład gruzu z rozbiórki. Najczęściej z góry zakłada się warstwę nasypową o grubości od 50 do 100 cm. Jeżeli podłoże jest „problematyczne” stosuje się dodatkowo geotekstylię lub wyroby pokrewne w celu separacji materiału platformy od podłoża słabonośnego lub/i wzmocnienia podłoża.

Chociaż poważne wypadki, w których platformy robocze mają swój udział są stosunkowo rzadkie, zdarzają się jednak bardzo często awarie. Analizując sytuację na polskich placach budów zlokalizowanych na terenach o podłożu gruntowym charakteryzującym się niską wytrzymałością, zauważyć można tendencję do przerzucania całkowitej odpowiedzialności za przygotowanie frontu robót, w tym odpowiednio dostosowanych platform roboczych umożliwiających wjazd ciężkiego sprzętu budowlanego, na wykonawcę robót fundamentowych. Szczegółowe analizy zaistniałych sytuacji awaryjnych wskazują na konieczność wprowadzenia obowiązku projektowania i wyceniania platform roboczych w ramach projektów realizowanych przez biura projektów. Generalni wykonawcy będą budować odpowiednie platformy w sytuacji, kiedy będą one częścią projektu i wyceny realizacji robót, a ich wykonanie będzie egzekwowane przez nadzór inwestorski. W dzisiejszej praktyce platformy robocze nie są elementami, które wycenia się odrębnie. Dlatego generalni wykonawcy unikają wykonania platform z oszczędności. Całe ryzyko związane z prowadzeniem robót przechodzi w takiej sytuacji na firmy fundamentowe. Z drugiej strony, brakuje prostych metod obliczeniowych, pozwalających na szybkie ustalenie bezpiecznej i ekonomicznej miąższości platformy, stąd może wynikać problem unikania obliczeń platform na etapie projektu budowlanego.

W zagranicznej praktyce projektowej przy wymiarowaniu platform roboczych bazuje się na klasycznych metodach projektowania dróg

* Autor odpowiedzialny za korespondencję. E-mail: katarzyna.bialek@wilis.pg.gda.pl

tymczasowych w oparciu o mechanizm ścięcia przy przebiciu, co stanowi znaczne uproszczenie rzeczywistej sytuacji. W związku z tym, należy przeprowadzić szczegółowe analizy istniejących metod obliczeń, jak również podjąć szerokie badania terenowe i laboratoryjne platform roboczych, celem wskazania metody umożliwiającej wyznaczenie takiej grubości platformy, która nie tylko byłaby bezpieczna, ale i nie generowała dodatkowych niepotrzebnych kosztów.

W Laboratorium Geotechniki Politechniki Gdańskiej przeprowadzono w latach 2010-2012 dwa rodzaje badań modelowych. W przyszłości planuje się wykonanie serii badań w warunkach przestrzennych oraz kalibrację dobranej metody poprzez badania terenowe.

W artykule dokonano próby porównania dostępnych metod obliczeniowych. Analiza ma na celu obliczenie niezbędnej miąższości platformy roboczej, przy znanych warunkach geotechnicznych. W tym celu wykorzystano metodę Jewella i zalecenia obliczeniowe poradnika BRE 470 „Working platforms for tracked plants” (Skinner, 2004) oraz symulacje numeryczne przy użyciu programu Plaxis bazującego na metodzie elementów skończonych.

2. Metody obliczania platform roboczych

Za początki projektowania konstrukcji tymczasowych, pełniących funkcję adekwatną do dzisiejszych platform roboczych, można uznać badania prowadzone przez armię amerykańską. Poniżej w porządku chronologicznym omówione zostały najpopularniejsze, dotychczas stosowane metody mogące służyć do projektowania platform roboczych.

Pierwsza z nich, dająca podwaliny do dalszych rozważań – metoda Hammita (1970) oparta jest głównie na rezultatach badań empirycznych. Po wykonaniu szerokiej serii badań terenowych ustalono wzór na obliczanie minimalnej miąższości niezbędnej do zachowania nośności podłoża pod planowanym tymczasowym obciążeniem ruchem. W metodzie uwzględniono liczbę przejazdów oraz parametry podłoża słabonośnego, jednak całkowicie pominięto parametry charakteryzujące podłoże. To samo podejście zaobserwować można w metodzie Girouda i Noiray’a (1981). Wprowadzili oni jednak dwa współczynniki nośności odpowiadające odpowiednio konstrukcjom tymczasowym wzmocnionym i niewzmocnionym. Przełomowa pod względem uwzględnienia parametrów wytrzymałościowych nasypu wzmocniającego była metoda Houlsby’ego (Houlsby i in., 1989), następnie rozwijana przez Jewella (1996). Należy zauważyć, że w metodzie tej kluczowym parametrem jest kąt rozkładu naprężenia. Jego odpowiedni dobór ma istotny wpływ na wartości uzyskanych miąższości tymczasowych warstw wzmocniających podłoże słabonośne. W zaleceniach do swojej metody Jewell (1996) proponuje, aby do tymczasowego projektowania przyjmować bezpieczną wartość kąta wynoszącą $26,6^\circ$. Podkreśla jednak, że kąt rozkładu naprężenia,

w przypadku użycia materiałów o lepszych parametrach wytrzymałościowych, osiągać może wartość nawet 45° .

Kolejną (w porządku chronologicznym) ważną pozycją poświęconą projektowaniu platform roboczych jest wydany w 2002 roku w Hong Kongu poradnik Geoguide 6 (Colin, 2002). W poradniku zawarto szczegółowe informacje o przygotowaniu placu budowy oraz wykonawstwie konstrukcji z gruntu zbrojonego. W części projektowej autorzy skupili się na obliczaniu wytrzymałości na zerwanie oraz oporu na wyciągnięcie elementów wzmocniających. Brak jednak wskazówek dotyczących obliczeń nośności konstrukcji tymczasowych.

W 2004 roku opublikowano poradnik całkowicie poświęcony tematyce platform roboczych – BRE 470 „Working platforms for tracked plants” (Skinner, 2004). Zawarto w nim zalecenia dotyczące przygotowania placu budowy, badań wstępnych, wykonawstwa, utrzymania i konserwacji platform roboczych oraz metodę obliczania ich bezpiecznej miąższości. Jest to nowe podejście, bazujące na normach brytyjskich, uwzględniające nie tylko parametry słabego podłoża i materiału nasypowego platformy roboczej, ale również dodatkową nośność uzyskaną dzięki zastosowaniu wzmocnienia geosyntetycznego.

3. Analiza sposobu projektowania platform roboczych pod ciężki sprzęt do robót ziemnych według poradnika BRE „Working platforms for tracked plant”

W celu sprawdzenia poprawności procedury obliczeniowej proponowanej w BRE 470 dla założonego przypadku dokonano obliczeń platformy roboczej przy użyciu metod: BRE 470, Jewella oraz elementów skończonych (Białek, 2010).

W przyjętym przypadku obliczeniowym układ warstw gruntowych przedstawia się następująco:

- warstwa materiału platformy – w analizie zastosowano dwa rodzaje materiałów: kruszywo łamane oraz piasek średni (pierwszy z materiałów jest analogiczny do materiału stosowanego w przykładzie obliczeniowym poradnika BRE 470, natomiast drugi odpowiada materiałowi często stosowanemu w praktyce w warunkach polskich);
 - warstwa podłoża słabonośnego – przyjęto glinę „tiel clay”, której parametry określono na podstawie wyników badań opisanych w pracy Bauduina i in. (1999);
 - warstwa podłoża nośnego (zalegająca głębiej) – założono piasek średni o ustalonych parametrach.
- Zestawienie danych geotechnicznych znajduje się w tabelach 1 i 2.

W projektowanej platformie roboczej przyjęto zbrojenie z geotkaniny Wigolen o wytrzymałości na rozciąganie $T_{ult} = 37,57$ kN/m. Zbrojenie geosyntetyczne scharakteryzowane jest w programie Plaxis poprzez sztywność osiową (moduł styczny) EA,

Tab. 1. Zestawienie parametrów warstw gruntowych

Parametr gruntu		Kruszywo łamane	P _S (platforma)	G (tiel clay)	P _S (podłoże)
I _D /I _L	[-]	0,70	0,82	-	0,50
Φ _u	[°]	40	35	19	33
c _u	[kPa]	-	0,00	34,66	-
Φ'	[°]	40	35	20	33
c'	[kPa]	-	-	10	-
γ _s	[kN/m ³]	26,00	26,00	26,19	26,00
w _n	[%]	3	4	16	14
γ	[kN/m ³]	20,00	18,64	15	18,15
E ₀	[MPa]	180	133,1	-	79,9
E	[MPa]	180	147,9	-	88,8
M ₀	[MPa]	200	159,0	-	105,2
M	[MPa]	200	176,7	-	116,9
γ'	[kN/m ³]	12,09	11,16	8,09	9,91
γ _{sr}	[kN/m ³]	21,90	20,97	17,90	19,72

Tab. 2. Zestawienie parametrów gruntowych użytych w symulacjach numerycznych

Parametr gruntu			Kruszywo łamane	P _S (platforma)	G (tiel clay)	P _S (podłoże)
			Model Coulomb- Mohr	Model Coulomb- Mohr	Model Soft Soil	Model Coulomb- Mohr
			Z odpływem	Z odpływem	Bez odpływu	Z odpływem
Ciężar objętościowy gruntu powyżej zwg	γ _{unsat} (γ)	kN/m ³	20,00	18,64	15,00	18,15
Ciężar objętościowy gruntu poniżej zwg	γ _{sat} (γ')	kN/m ³	21,90	20,97	17,90	19,17
Współczynnik filtracji w kierunku poziomym	k _x	m/dzień	1	1	0,0013	1,0
Współczynnik filtracji w kierunku pionowym	k _y	m/dzień	1	1	0,0013	1,0
Moduł Younga	E _{ref}	kPa	200 000	159 030	-	105 210
Współczynnik Poissona	ν	-	0,20	0,25	0,35	0,25
Spójność	c _{ref}	kPa	1	1	12	1
Kąt tarcia wewnętrznego	Φ	°	40	35	23	33
Kąt dylatacji	ψ	°	3	3	0	2
Zmodyfikowany współczynnik ścisłości	λ*	-	-	-	0,07	-
Zmodyfikowany współczynnik odprężenia	κ*	-	-	-	0,015	-

którą określa się przez pomnożenie modułu Younga geosyntetyku przez jego grubość. Zatem, aby możliwe było wykonanie obliczeń niezbędne jest wcześniejsze określenie sztywności osiowej geotkaniny. Na podstawie badań wytrzymałości na rozciąganie, zgodnie z kierunkiem produkcji ustalono wartość $EA = 176 \text{ kN/m}$.

Obciążenie od maszyny przyjęto w sposób podobny jak w przykładzie obliczeniowym poradnika BRE 470 dla maszyny Liebherr LBR 155 z zainstalowanym siłownikiem hydraulicznym do wciskania ścianek szczelnych Model 4080. Według zaleceń FPS (*Federation of Piling Specialists*), do obliczeń metodą proponowaną w BRE 470 należy przyjąć określone w poprawny sposób naciski od gąsienic, to znaczy przez wyliczenie momentów wywołanych przez ciężar własny bądź pracę poszczególnych części maszyny oddziałujących na powierzchnię kontaktową maszyna-platforma robocza. Daje to zazwyczaj dużo wyższe naciski od określonych w prosty, klasyczny sposób, przez obliczenie stosunku całkowitego obciążenia od maszyny do całkowitego pola podstawy gąsienic. Na stronie internetowej FPS znaleźć można ogólnodostępny arkusz kalkulacyjny (*Microsoft Office Excel*), przy pomocy którego wyliczyć można naciski od gąsienic oraz efektywną długość gąsienic dla dwóch przypadków obliczeniowych podanych w poradniku BRE 470. W rozpatrywanym przypadku otrzymano wartości: $q_1 = 169 \text{ kPa}$ oraz $q_2 = 248 \text{ kPa}$. Do analizy platformy roboczej w programie Plaxis przyjęto najbardziej niekorzystny przypadek obciążenia – przypadek drugi obciążenia wyznaczony zgodnie z zaleceniami poradnika BRE. Poszukiwano platformy roboczej o najmniejszej miąższości będącej w stanie przenieść obciążenia od sprzętu, przy jednoczesnym uwzględnieniu bezpiecznej granicy osiadań.

3.1 Modelowanie platform roboczych w programie Plaxis

Analizę numeryczną mechanizmu ścicia przy przebiegu platformy roboczej z wykorzystaniem programu Plaxis (v 8.6) przeprowadzono w warunkach płaskiego stanu odkształcenia, dla dwóch przypadków materiału platformy – piasku średniego oraz kruszywa łamanego.

Obliczenia wykonywane są w układzie płaskim. Do modelowania warstwy platformy roboczej oraz nośnego podłoża wykorzystano model Coulomba-Mohra. W rozważanym przypadku obliczeniowym sprowadza się to głównie do wykorzystania sprężystej części tego modelu opierającej się na liniowym prawie Hooke'a. Otrzymane w ten sposób wartości osiadania będą więc przede wszystkim zależne od wartości modułu odkształcenia/ściśliwości. Wartość modułu Younga pozostaje stała w czasie całej symulacji numerycznej w programie Plaxis. Metoda ta jest powszechnie stosowana, jednakże prowadzi z reguły do przeszacowania osiadań jakim może ulec podłoże gruntowe.

Do symulacji zachowania się warstwy podłoża słabonośnego wykorzystano bardziej zaawansowany model gruntu – Soft Soil. Podstawową cechą tego modelu materiałowego jest wprowadzenie zmienności sztywności

szkieletu gruntowego z naprężeniem średnim, jak również uwzględnienie różnych wartości sztywności w przypadku obciążenia i odciążenia rozpatrywanego elementu gruntowego. Zmodyfikowane współczynniki dla gruntu słabego opisujące sztywność λ^* oraz κ^* zostały przyjęte według Baudouina i Vermeera (1999).

W związku z tym, że nad gruntem słabonośnym zalegała warstwa innego gruntu, uległ on prekonsolidacji i należało określić współczynnik OCR (Verruijt, 2001). Został on przyjęty dla ekstremalnego przypadku obciążenia:

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma_{yy}^0} = \frac{90}{76,31} \cong 1,2 \quad (1)$$

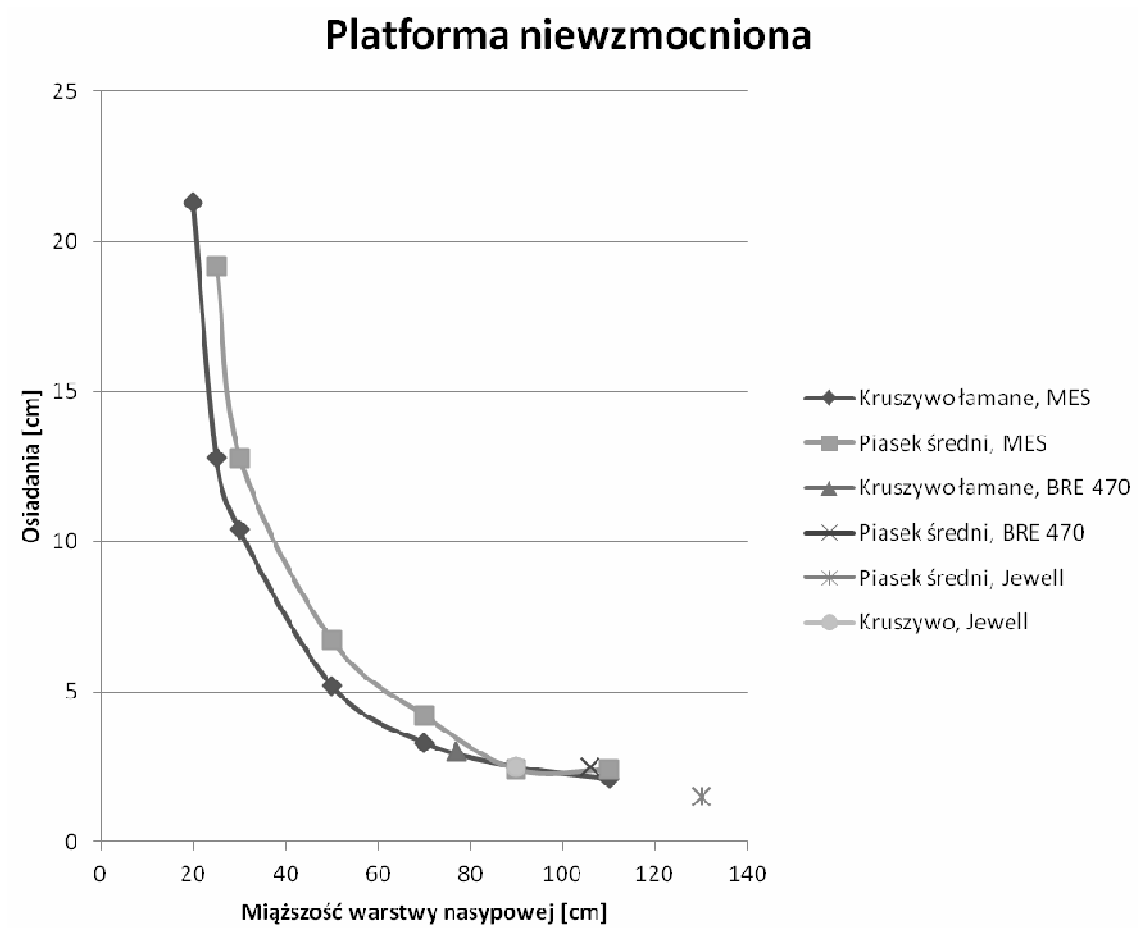
Natura wybranego do obliczeń gruntu związana jest z możliwością powstania tak zwanej „skorupy” gruntowej, która zwiększa nośność warstwy gruntowej. W celu jej odzwierciedlenia przyjęto wskaźnik $POP = 20 \text{ kPa}$ (*Pre-Overburden Pressure*).

Do opisu strefy kontaktu pomiędzy gruntem a geotkaniną użyto dostępnych w programie Plaxis elementów *interface* o zerowej grubości. W celu scharakteryzowania tarcia pomiędzy gruntem i geosyntetykami przyjęto współczynnik redukcyjny dla parametrów wytrzymałościowych interfejsu $R_{inter} = \tan \Phi$, gdzie Φ jest kątem tarcia wewnętrznego danej warstwy gruntu.

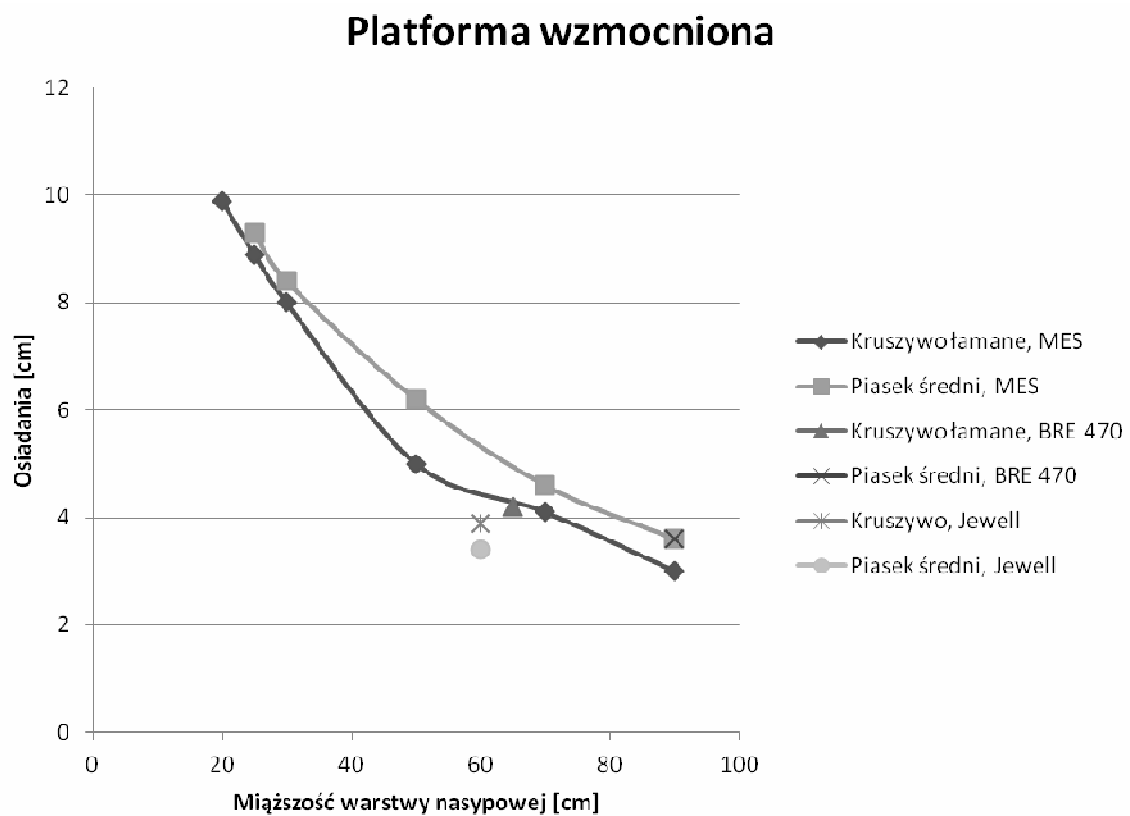
3.2 Wyniki analizy

Wyniki analizy zestawiono w tabeli 3 oraz na wykresach (rys. 1 i 2). Z przeprowadzonej analizy porównawczej wynika, że w przedstawionym przypadku obliczeniowym metoda BRE 470 okazała się bardziej zachowawcza, a w konsekwencji nieekonomiczna. Wyliczone przy jej użyciu miąższości platform roboczych, znacznie przewyższają miąższości platform wyznaczone przy użyciu metody elementów skończonych. W każdej kombinacji obliczenia numeryczne wykazały, że dla danych parametrów gruntowych platforma o miąższości 50 cm daje optymalne osiadania, umożliwiające uznanie platformy roboczej za bezpieczną pod względem użyteczności. Porównanie z metodą Jewella również wskazuje na zbyt dużą zachowawczość metody BRE470 w przypadku platform z zastosowaniem wzmocnienia geosyntetycznego.

Potwierdzono korzystne działanie geotkaniny w konstrukcji platformy roboczej. Użycie geosyntetyku skutkuje redukcją przemieszczeń w wyniku rozłożenia sił na większy obszar, przez co otrzymano mniejsze przemieszczenia na większej powierzchni. W efekcie obserwuje się zmniejszenie osiadań.



Rys. 1. Zestawienie obliczeń platformy niewzmocnionej przy użyciu 3 metod: MES, Jewella oraz BRE 470



Rys. 2. Zestawienie obliczeń platformy wzmocnionej przy użyciu 3 metod: MES, Jewella oraz BRE 470

Tab. 3. Skład chemiczny popiołu fluidalnego

Metoda	Miąższość platformy [cm]	Osiedlenia [cm]			
		Platforma niewzmocniona		Platforma wzmocniona	
		Kruszywo łamane	P _s	Kruszywo łamane	P _s
MES	15	awaria	awaria	awaria	awaria
	20	21,3	11,17	9,9	awaria
	25	12,8	19,2	8,9	9,3
	30	10,4	12,8	8	8,4
	50	5,2	6,7	5	6,2
	70	3,3	4,2	4,1	4,6
	90	2,5	2,4	3	3,6
BRE 470	110	2,1	2,4	-	-
	65	-	-	4,2	-
	77	3,0	-	-	-
	90	-	-	-	3,6
Jewell	106	-	2,5	-	-
	60	-	-	4,4	5,0
	90	2,5	-	-	-
	130	-	1,5	-	-

4. Wnioski

Przedstawiona w pracy analiza dostępnych metod obliczeniowych platform roboczych oraz wyników obliczeń wykonanych przy użyciu metody elementów skończonych wykazała spore rozbieżności. W wyniku prostych metod obliczeniowych otrzymuje się większe miąższości od wyliczonych przy użyciu programu Plaxis.

Metoda projektowa zaproponowana w poradniku BRE 470 (Skinner, 2004), oparta została na wielu upraszczających założeniach i nie reprezentuje w pełni faktycznego zachowania gruntu. Stanowi jednak podstawę do obliczeń bezpiecznych. W prasie branżowej spotkać się można z zarzutami, że jest ona zbyt zachowawcza i nieekonomiczna, jednak umożliwiła obliczenie w prosty sposób miąższość platformy roboczej, która zapewni stateczność maszyn budowlanych.

Projektując platformy można bazować na symulacjach numerycznych zagadnienia z wykorzystaniem MES, jednakże nie jest to metoda tak przystępna dla przeciętnego projektanta jak metody opisane w poradniku BRE 470 oraz przez Jewella. Wymaga odpowiedniej znajomości programów, często dosyć wrażliwych na niewielkie zmiany we wprowadzanych danych.

Wymiarowanie platform roboczych wymaga zatem dobrania odpowiedniej metody obliczeniowej przez osobę posiadającą wiedzę ekspercką i umiejącą w sposób krytyczny ocenić otrzymane wyniki.

Literatura

Bauduin C. M., De Vos M., Vermeer P. A. (1999). Back analysis of staged embankment failure: The Case study streefkerk. W: *Proceedings Plaxis Symposium "Beyond 2000 in Computational Geotechnics"*, Amsterdam, Rotterdam: Balkema, 1999, 79-90.

Białek K. (2010). Projektowanie platform roboczych z zastosowaniem geosyntetyków. Praca dyplomowa magisterska (promotor Duszyńska A.), *Politechnika Gdańska*.

Colin J. F. (2002). Geoguide 6. Hong Kong. *The Government of the Hong Kong Special Administrative Region*.

Giroud J. P., Noiray L. (1981). Geotextiles-reinforced unpaved road design. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 107, No. 9, 1233-1253.

Hammit G. (1970). Thickness Requirements for unsurfaced Roads and Airfields Bare Base Support. Technical report. *Vicksburg M.S. US Army Engineer Waterway Experiment Station*.

Houlsby G. T., Milligan G., Jewell R. A., Burd H. J. (1989). A new approach to the design of unpaved roads: Part I. *Ground Engineering*, Vol. 22, No. 5, 25-29.

Jewell R. A. (1996). Working Platforms and unpaved roads. Soil Reinforcement with geotextiles. *CIRIA Special Publication 123*, Chapter 12, 235-289.

Skinner H. (2004). Working platforms for tracked plant: good practice guide to the design, installation, maintenance and repair of ground-supported working platforms. BRE 470, Garston, Watford: *BRE Press*.

Verruijt A. (2001). Soil Mechanics. *Delft University of Technology*.

PROBLEMS RELATED WITH WORKING PLATFORM DESIGNING

Abstract: The problem of designing of temporary constructions used for weak subgrade strengthening is presented in the paper. Firstly available designing methods are briefly talked over. Next analysis of BRE "Working platforms for tracked plant" guide is submitted in detail. The aim of the analysis was to calculate the necessary thickness of working platform, over well-known conditions. It was decided to use Jewell's and numeric analysis with use of the Plaxis programme which base on FEM for this aim.