

# Analiza nośności granicznej platformy roboczej na podłożu słabonośnym

Mgr inż. Katarzyna Białek, dr hab. inż. Lech Bałachowski  
Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

Mechanizm zniszczenia platform roboczych zależy zasadniczo od czterech czynników: parametrów materiału nasypowego, słabego podłoża, natężenia i rodzaju ruchu oraz parametrów wzmocnienia geosyntetycznego [1]. Prezentowana w artykule analiza numeryczna ma na celu prześledzenie wrażliwości współczynnika bezpieczeństwa na zmiany parametrów geotechnicznych platformy i podłoża. W artykule omówiono również metodę szybkiego i efektywnego wyznaczenia wspomnianych parametrów przy użyciu badania dylatometrycznego (DMT).

## SYMULACJE NUMERYCZNE

### Informacje podstawowe o zastosowanym programie

Do symulacji platformy roboczej obciążonej ciężkim sprzętem do robót ziemnych zastosowano program LimitState:GEO 3.2 stworzony do analizy stanu granicznego nośności szerokiego zakresu problemów geotechnicznych. Oprogramowanie można stosować do modelowania zagadnień w płaskim stanie odkształcenia w dowolnej, wprowadzanej przez użytkownika geometrii (włączając zbocza, ściany oporowe, fundamenty, rurociągi, tunele, kotwy itd. oraz inne dowolne kombinacje wymienionych elementów).

Sprawdza się warunek stanu granicznego nośności (SGN) przy użyciu techniki *Discontinuity Layout Optimization* (DLO, Optymalizacja Układu Nieciągłego). Program zaprojektowano pod kątem współpracy z aktualnymi normami projektowymi, takimi jak Eurokod 7, poprzez umożliwienie swobodnego wyboru częściowych współczynników bezpieczeństwa i opcji rozwiązywania wielokrotnych scenariuszy [2].

W DLO wykorzystuje się techniki optymalizacji matematycznych do identyfikacji krytycznych powierzchni nieciągłości układu, tworzących się podczas wystąpienia awarii. Powierzchniami tymi są zazwyczaj linie poślizgu w geotechnicznych problemach płaskiego stanu odkształcenia i służą one do zdefiniowania granicy pomiędzy przemieszczającymi się, sztywnymi blokami materiału, które tworzą mechanizm awarii. Uzyskane rozwiązanie stanowi górne oszacowanie stanu granicznego nośności zgodnie z teorią plastyczności. W ten sposób wykorzystane w LimitState:GEO procedury powielają i automatyzują tradycyjne ręczne metody obliczania stanu granicznego nośności, stosowane przez inżynierów geotechników od wielu lat. DLO można stosować w szerokim zakresie geotechnicznych problemów stateczności uwzględniających grunty spoiste i niespoiste.

W obliczeniach można stosować dwa podejścia. W pierwszym wyznacza się współczynnik bezpieczeństwa ze względu

na obciążenie (*Factor on load*). Szuka się, przy jakim współczynniku zwiększającym obciążenie wystąpi utrata nośności granicznej. W drugim podejściu wyznacza się wartość współczynnika bezpieczeństwa ze względu na parametry wytrzymałościowe gruntu (*Factor on strength*). Szuka się wówczas współczynnika, przez który należy podzielić  $\phi'$  i  $c'$  lub wytrzymałość na ścinanie bez odpływu  $c_u$ , aby nastąpiła utrata nośności podłoża (SGN).

### Metodologia prowadzenia analizy

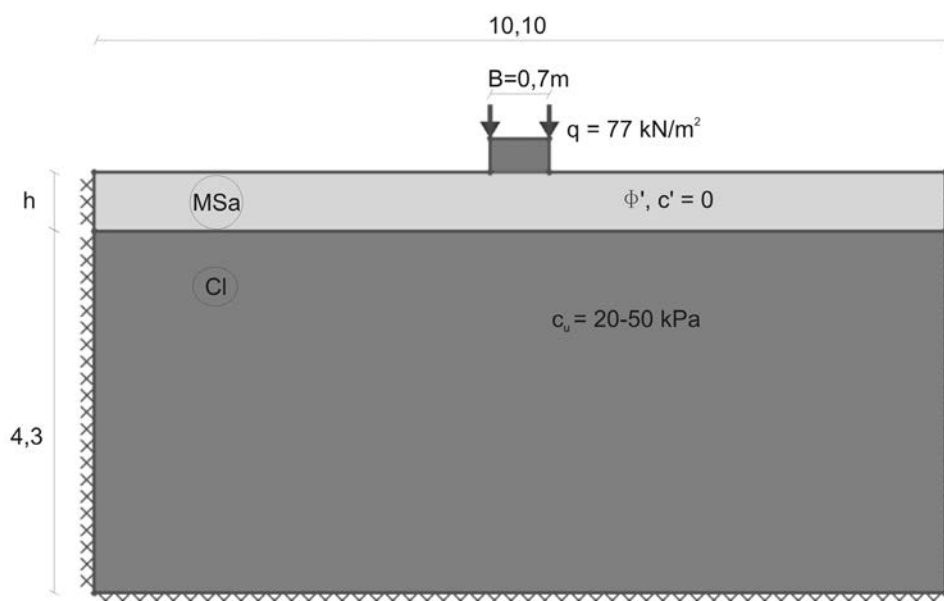
Rozpatrywano przypadek platformy roboczej wykonanej z piasku średniego na podłożu słabonośnym z gliny obciążonej maszyną Liebherr LBR 155 o szerokości gąsienicy 0,7 m przekazującej na podłoże obciążenie 77 kN/m<sup>2</sup>.

Obliczenia wykonywane są w układzie płaskim. Zastosowano model Coulomba-Mohra. Przyjęto, że materiał platformy roboczej (piasek średni) charakteryzuje się kątem tarcia wewnętrznego równym 32°. Wytrzymałość na ścinanie bez odpływu warstwy słabonośnej przyjęto w zakresie od 20 do 50 kPa.

Do opisu strefy kontaktu pomiędzy gąsienicą a platformą roboczą użyto dostępnego w programie LimitState GEO elementu Boundary o zerowej grubości. W celu scharakteryzowania tarcia pomiędzy gąsienicą a platformą roboczą przyjęto model Coulomba-Mohra o wytrzymałości zredukowanej o 50% w stosunku do wytrzymałości materiału platformy roboczej.

### Platforma robocza

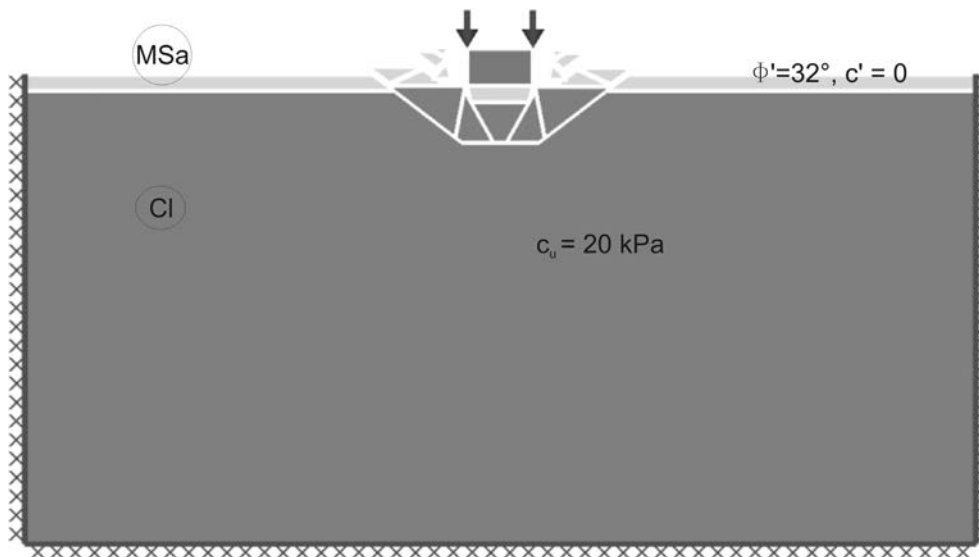
Geometrię platformy przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat platformy na słabonośnej warstwie gliny

Tabl. 1. Wyniki analizy

| h     | h / B | Współczynnik ze względu na obciążenie |        |        |        |        |        | Współczynniki ze względu na parametry podłoża |        |        |        |        |        |
|-------|-------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|       |       | współczynniki = 1                     |        |        | EC7    |        |        | współczynniki = 1                             |        |        | EC7    |        |        |
|       |       | $c_u$                                 |        |        | $c_u$  |        |        | $c_u$                                         |        |        | $c_u$  |        |        |
| [m]   | [-]   | 20 kPa                                | 30 kPa | 50 kPa | 20 kPa | 30 kPa | 50 kPa | 20 kPa                                        | 30 kPa | 50 kPa | 20 kPa | 30 kPa | 50 kPa |
| 0,175 | 0,25  | 1,353                                 | 1,785  | 2,403  | 0,6979 | 0,9083 | 1,112  | 1,132                                         | 1,258  | 1,04   | 0,8919 | 0,9379 | 1,167  |
| 0,28  | 0,4   | 1,422                                 | 2,064  | 2,766  | 0,9727 | 1,238  | 1,4    | 1,293                                         | 1,403  | 1,518  | 0,9814 | 1,094  | 1,218  |
| 0,35  | 0,5   | 1,486                                 | 2,125  | 2,727  | 0,9813 | 1,194  | 1,413  | 1,293                                         | 1,345  | 1,403  | 1,001  | 1,068  | 1,126  |
| 0,525 | 0,75  | 1,5                                   | 2,071  | 2,979  | 0,9241 | 1,151  | 1,37   | 1,253                                         | 1,334  | 1,352  | 0,9699 | 1,058  | 1,085  |
| 0,7   | 1     | 1,905                                 | 2,295  | 2,813  | 1,109  | 1,261  | 1,321  | 1,336                                         | 1,381  | 1,379  | 1,056  | 1,106  | 1,105  |
| 0,875 | 1,25  | 2,129                                 | 2,586  | 3,028  | 1,288  | 1,332  | 1,332  | 1,377                                         | 1,378  | 1,378  | 1,105  | 1,104  | 1,104  |
| 1,05  | 1,5   | 2,501                                 | 2,986  | 3,255  | 1,495  | 1,495  | 1,495  | 1,393                                         | 1,393  | 1,393  | 1,117  | 1,117  | 1,116  |
| 1,225 | 1,75  | 2,841                                 | 3,402  | 3,554  | 1,678  | 1,678  | 1,678  | 1,374                                         | 1,373  | 1,374  | 1,102  | 1,102  | 1,102  |
| 1,4   | 2     | 3,316                                 | 3,316  | 3,316  | 1,612  | 1,612  | 1,612  | 1,413                                         | 1,414  | 1,414  | 1,132  | 1,133  | 1,133  |



Rys. 2. Przykładowy mechanizm zniszczenia przypadku  $(h/B) = 0,4$

Warstwę platformy roboczej zdefiniowano jako materiał z odpływem, natomiast grunt słabonośny przyjęto jako pracujący w warunkach bez odpływu.

Stosowano dwa sposoby doboru częściowych współczynników dotyczących parametrów podłoża i oddziaływań. W pierwszym przyjęto, że współczynniki te wynoszą 1. Drugi sposób polega na przyjęciu odpowiedniego zestawu częściowych współczynników do oddziaływań oraz do materiału podłoża zgodnie z podejściem przedstawionym w Eurokodzie 7 dla stanu GEO. W obliczeniach przyjmowano następujące wartości częściowych współczynników do wytrzymałości gruntów:

$$\gamma_{\phi'} = 1,25, \quad \gamma_{c'} = 1,25, \quad \gamma_{c_u} = 1,4$$

Przyjęto, że współczynnik częściowy do oddziaływań wynosi:

$$\gamma_F = 1$$

W pierwszej części analizy sprawdzano wpływ zmiany wytrzymałości na ścinanie podłoża słabego przy różnej miąższości platformy roboczej od około 18 cm do 1,4 m. W związku z tym rozpatrywano 9 różnych miąższości platformy i 3 warianty wytrzymałości na ścinanie słabonośnego podłoża. Wartości współczynników bezpieczeństwa do obciążeń oraz do wytrzymałości podłoża zestawiono w tabl. 1.

## ANALIZA WYNIKÓW OBLICZEŃ

W zależności od względnej miąższości platformy  $(h/B)$  uzyskano różne mechanizmy zniszczenia. Przy  $(h/B) \leq 0,75$  tworzył się mechanizm przebiccia platformy. Uzyskane współczynniki bezpieczeństwa były niskie, a w przypadku podejścia według Eurokodu 7 nie przekraczały jedności, gdy podłoże charakteryzowało się niską wartością wytrzymałości na ścinanie bez odpływu. Świadczy to o niestateczności tak przyjętego podłoża uwarstwionego. Przykładowy mechanizm zniszczenia w postaci linii poślizgu dla  $(h/B) = 0,4$  przedstawiono na rys. 2.

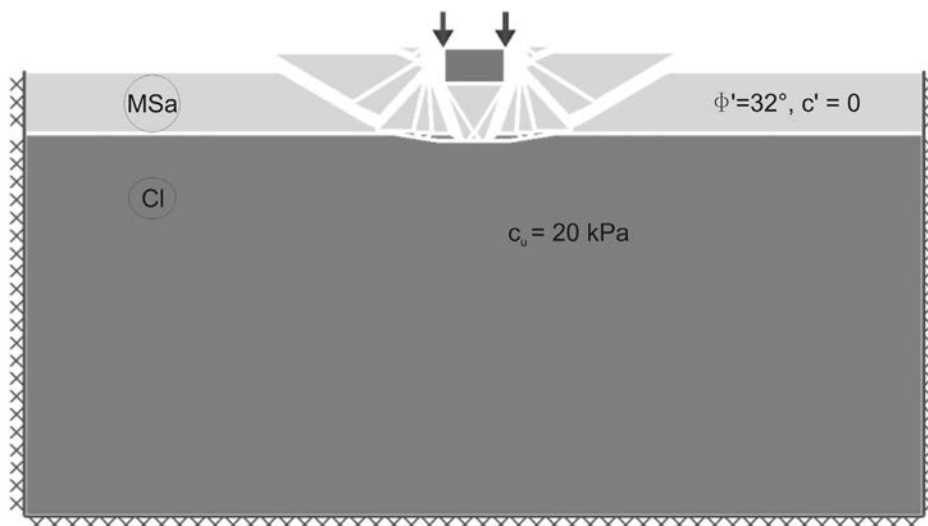
Przy stosunkowo dużej miąższości platformy  $(h/B) > 1$  obserwuje się powierzchnię poślizgu jedynie w materiale platfor-

my. Wartości współczynników bezpieczeństwa oraz szczegółowy mechanizm poślizgu zależą od wytrzymałości  $c_u$  warstwy słabej. Na rys. 3 przedstawiono mechanizm zniszczenia przy  $(h/B) = 1$ , w którym powierzchnie poślizgu przebiegają w materiale platformy oraz na styku platformy i słabonośnego podłoża. Należy zauważyć, że dalsze zwiększanie miąższości względnej platformy  $(h/B) > 1,5$  nie prowadzi do wyraźnego przyrostu nośności takiego układu, a tym samym wartości współczynnika bezpieczeństwa. W takim przypadku obecność warstwy słabonośnej nie wpływa już na nośność podłoża.

Analizując wyniki pierwszej części obliczeń (współczynnik ze względu na obciążenie), można zaobserwować zbliżony rozkład wystąpienia mechanizmu zniszczenia platformy roboczej. W tabl. 1 szarymi polami wyodrębniono przypadki wystąpienia awarii platformy. W przypadku Eurokodu 7 zniszczenie występuje poniżej współczynnika równego 1. W sytuacji, gdy wszystkie współczynniki częściowe są równe 1, zniszczenie występuje, gdy współczynnik (*factor on load*) jest mniejszy od 2, co odpowiada wartości współczynnika bezpieczeństwa w klasycznym rozwiązaniu nośności fundamentu bezpośredniego. W analizach stosowano gęsty i bardzo gęsty podział siatki, gdyż zaobserwowano jej wpływ na postać mechanizmu zniszczenia oraz na wartości współczynników bezpieczeństwa.

## UŻYCIĘ DYLATOMETRU DO WYZNACZENIA KĄTA TARCIA WEWNĘTRZNEGO MATERIAŁU PLATFORMY

Badania DMT mogą posłużyć do kontroli zagęszczenia materiału platformy [3] oraz do wyznaczenia parametrów podłoża słabonośnego. Zgodnie z typową procedurą interpretacji wyznacza się oszacowanie dolne kąta tarcia wewnętrznego materiału platformy, wytrzymałość na ścinanie bez odpływu podłoża słabonośnego oraz moduły  $M_{DMT}$  obu tych warstw. Należy podkreślić, że parametry te są wyznaczone z uwzględnieniem stanu i historii naprężenia w gruncie, co jest istotne zarówno w przypadku sprawdzania SGN, jak i SGU. Stanowi to niewątpliwą zaletę stosowania badania dylatometrycznego. Pierwsze tego rodzaju badania przeprowadzono już na polietku doświadczalnym.



Rys. 3. Przykładowy mechanizm zniszczenia przypadku ( $h/B = 1$ )

## WNIOSKI

Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że wytrzymałość platformy roboczej zależy przede wszystkim od jej miąższości, kąta tarcia wewnętrznego materiału platformy roboczej oraz od wytrzymałości na ścinanie warstwy słabonośnej. Najprostszym sposobem na zwiększenie nośności platformy jest zwiększenie jej miąższości. Działanie takie na ogół sprawdza się, gdy brakuje projektu platformy roboczej i dopiero po jej wykonaniu jest badana jej nośność. Nie jest to niestety podejście ekonomicznie poprawne i może przyczynić się do generowania wysokich kosztów wykonawstwa. Ustalenie na wstępie poprawnych parametrów geotechnicznych na poletku doświadczalnym oraz wykonanie projektu platformy jest dobrą praktyką, która ogranicza możliwość wystąpienia późniejszych trudności na placu budowy. Do ustalenia parametrów geotechnicznych można posłużyć się badaniami przeprowadzonymi na poletku doświadczalnym przy użyciu dylatometru. Dysponując wysoce wyspecjalizowaną ekipą, badanie takie można przeprowadzić

w ciągu jednego dnia. Obsługa sondy oraz interpretacja uzyskanych wyników wymaga jednak wiedzy oraz doświadczenia od osoby nadzorującej i interpretującej. Przeprowadzone analizy numeryczne metodą kinematyczną pozwoliły na wyznaczenie oszacowania górnej nośności platformy na podłożu słabonośnym. Potwierdziły istnienie różnych mechanizmów zniszczenia w zależności od względnej miąższości platformy ( $h/B$ ) oraz wytrzymałości na ścinanie bez odpływu podłoża spoistego.

## LITERATURA

1. Białek K.: Analiza kąta rozkładu naprężenia w platformach roboczych na podstawie badań modelowych. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/2012.
2. LimitState Ltd 2014. LimitState:GEO Manual VERSION 3.2.a.
3. Marchetti S., Monaco P., Totani G., Calabrese M.: "The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations" A Report by the ISSMGE Committee TC16. Proc. IN SITU 2001, Intl. Conf. On In situ Measurement of Soil Properties, Bali, Indonesia, May 2001.