

STATECZNOŚĆ MASZYN BUDOWLANYCH

mgr inż. Mateusz Richter
dr hab. inż. Aleksander Urbański, prof. PK

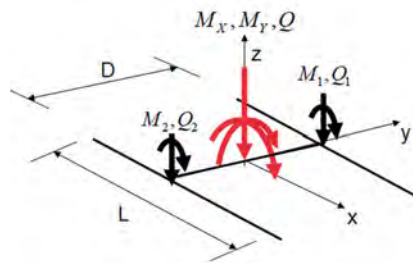
Aby ciężkie maszyny budowlane mogły bezpiecznie wykonywać swoją pracę, należy sprawdzić, czy podłoże gruntowe ma wystarczającą nośność...

Wykonanie fundamentów pośrednich wymaga zastosowania specjalistycznych maszyn roboczych, które ze względu na charakter swojej pracy wymagają przemyślnych decyzji w fazie projektowej i wykonawczej inwestycji budowlanej. Współczesne maszyny do wykonania pali fundamentowych mają duży ciężar (dochodzący wraz z całym wyposażeniem nawet do 200 ton), a środek ciężkości wysoko położony (w celu zwiększenia średnic wykonywanych pali oraz ich głębokości posadowienia) i taki, którego położenie zmienia się w zależności od fazy pracy (transport maszyny ze złożonym masztem, poruszanie się maszyny z rozstawionym masztem, praca maszyny z rozstawionym masztem). Aby ciężkie maszyny budowlane mogły bezpiecznie wykonywać swoją pracę, należy sprawdzić, czy podłoże gruntowe ma wystarczającą nośność. W przypadku jej niedoboru należy odpowiednio wzmocnić podłoże poprzez wykonanie platformy roboczej. W artykule przedstawiono analizę współpracy palownicy gąsienicowej z podłożem słaboniosnym wzmocnionym warstwą platformy roboczej.

Platformy robocze powinny podlegać obowiązkowemu projektowaniu. Odpowiednie przepisy powinny również regulować odpowiedzialność uczestników procesu budowlanego na etapie projektowania, wykonywania oraz eksploatacji platformy roboczej.

Założenia teoretyczne

W celu wykonania modelu fizycznego założono, że palownica o ciężarze całkowitym Q przekazuje obciążenia na podłoże gruntowe poprzez gąsienicowy układ bieżny. Składa się on z dwóch gąsienic, z których jedna przekazuje na podłoże gruntowe obciążenie Q_1 , a druga – obciążenie Q_2 . Schematycznie uproszczony model fizyczny palownicy przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model fizyczny palownicy

Podstawowe równania równowagi układu jak na rys. 2.:

$$Q_1 + Q_2 = Q \quad (1)$$

$$M_1 + M_2 = M_x \quad (2)$$

$$Q_1 \cdot \frac{D}{2} + Q_2 \cdot \frac{D}{2} = M_y \quad (3)$$

gdzie:

Q_1, Q_2 – obciążenia przypadające na poszczególne gąsienice [kN]

Q – całkowity ciężar palownicy [kN]

M_1, M_2 – wartość momentu wywołana mimosiarami e_1, e_2 [kNm]

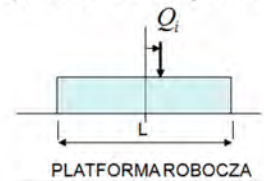
M_x, M_y – całkowity moment: w kierunku osi x, w kierunku osi y [kNm]

D – rozstaw osiowy gąsienic [m]

L – obliczeniowa długość gąsienicy [m]

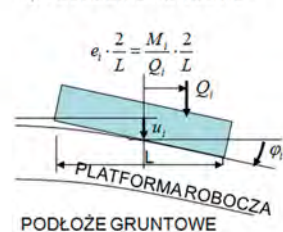
B – szerokość gąsienicy [m]

1) POŁOŻENIE POCZĄTKOWE



PLATFORMA ROBOCZA
PODŁOŻE GRUNTOWE

2) POŁOŻENIE KOŃCOWE



PLATFORMA ROBOCZA
PODŁOŻE GRUNTOWE

Rys. 3. Schemat realizacji przemieszczeń i kąta obrotu gąsienicy przy zmianie wartości mimosiarami e_i

Ze względu na zmienne obciążenie przekazywane przez poszczególne gąsienice na podłoże gruntowe wprowadzono bezwymiarowy współczynnik rozdziału obciążenia.

$$\xi_i = \frac{Q_i}{Q}, \quad i=1,2 \quad (4)$$

$$e_i = \frac{2M_i}{Q_i \cdot L}, \quad i=1,2 \quad (5)$$

$$e_x = \frac{2M_x}{Q \cdot L} \quad (6)$$

$$e_y = \frac{2M_y}{Q \cdot D} \quad (7)$$

gdzie:

ξ_i – bezwymiarowy współczynnik rozdziału obciążeń całkowitych; $\xi_i \in <0;1>$ [-]

Q_i – obciążenie przypadające na gąsienicę, $i=1,2$ [kN]

e_x – całkowita wartość mimosiarnego (bezwymiarowego) w kierunku x [-]

Rys. 1. Przykład niedostatecznej nośności podłoża pod gąsienicami palownicy (fot. PZWFS)



e_y – całkowita wartość mimośrodu względnego (bezwymiarowego) w kierunku y [-]
 e_i – wartość mimośrodu względnego (bezwymiarowego) na gąsienicach, $i=1,2$ [-]
 $e_x \in <0;1>$; $e_y \in <0;1>$; $e_i \in <0;1>$
 M_i – wartość momentu wywołanego działaniem mimośrodu e_i , $i=1,2$ [kNm]
 φ_i – kąt obrotu węzła gąsienicy znajdującego się na przecięciu osi gąsienicy [rad]

Podstawowy układ równań:

$$\begin{cases}
 \xi_1 + \xi_2 = 1 & (8) \\
 \xi_1 \cdot e_1 + \xi_2 \cdot e_2 = e_x & (9) \\
 \xi_1 - \xi_2 = e_y & (10) \\
 \varphi_1(\xi_1 Q_1 e_1) = \varphi_2(\xi_2 Q_2 e_2) & (11)
 \end{cases}$$

4 równania
4 niewiadome

Równanie (11) wyraża zgodność kątów obrotu obydwu gąsienic. Wynika ono z założenia o nieskończonej sztywności układu jezdźnego. Rozwiązanie układu równań stanowi podstawę do analizy współpracy palownicy z podłożem gruntowym.

Analiza numeryczna

Celem analizy numerycznej jest sprawdzenie, w jaki sposób zmiana parametrów wytrzymałościowych platformy roboczej wpływa na jej nośność graniczną. Analizę numeryczną – metodą elementów skończonych – wykonano w programie Zsoil v16.03.

Założenia:

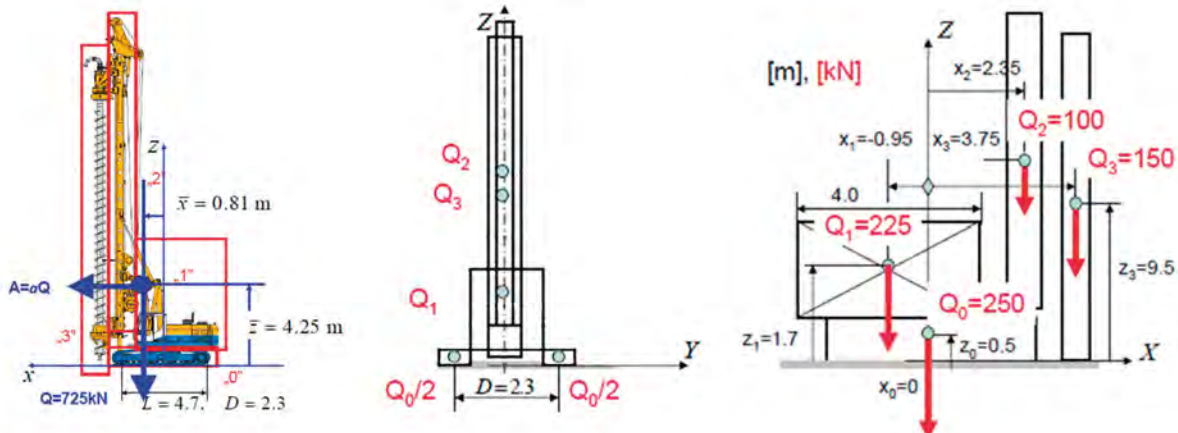
- 1) $\xi=0,5$ – przypadek symetryczny, każda z gąsienic jest obciążona taką samą siłą;
- 2) przyjęto platformę roboczą o grubości 0,5 m i parametrach materiałowych zgodnych z tabelą 1. Obliczenia przeprowadzono dla 6 modeli obliczeniowych;
- 3) zmianę kąta obrotu oraz zmianę przemieszczeń pionowych obliczono w węźle znajdującym się w punkcie przecięcia osi symetrii pojedynczej gąsienicy (rys. 3.);
- 4) zamodelowano strefę kontaktu gąsienicy z podłożem gruntowym poprzez elementy *contact interface*, umożliwia ona zasymulowanie odrywania się gąsienicy od podłoża gruntowego w przypadku działania na układ sił mimośrodowych;

- 5) zamodelowano podłoże podatne, model sprężysto-plastyczny;
- 6) układ przekazujący obciążenia na grunt (gąsienice) traktowany jako bryła sztywna;
- 7) niestowarzyszone prawo plastycznego płynięcia z kątem dylatacji ψ ;
- 8) pominięto nakładanie się stref oddziaływań poszczególnych gąsienic na podłoże gruntowe;
- 9) sterowanie parametrami: $\xi; Q=0.5 \cdot 725 \text{ kN}$, $M=\{0, \dots, Q \cdot e\}$.

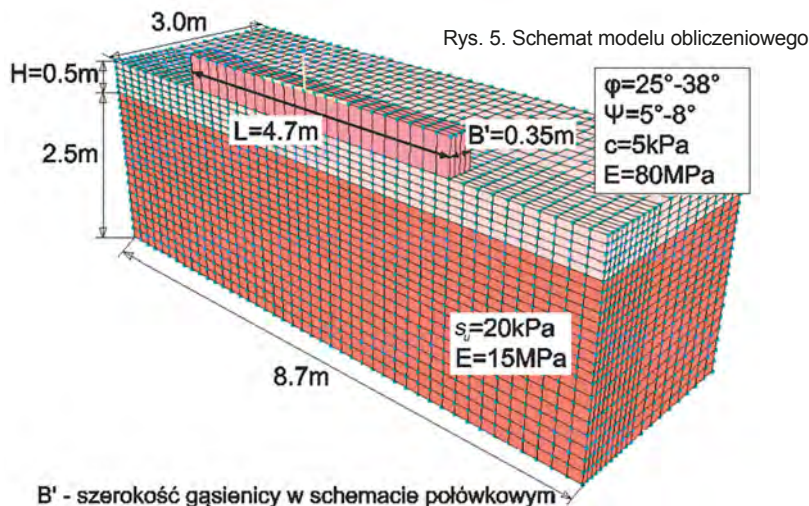
Model maszyny budowlanej

Do obliczeń przyjęto model fizyczny palownicy Bauer BG 20H/BT60 o całkowitym ciężarze 725 kN. Na podstawie dostępnej dokumentacji technicznej oszacowano ciężary poszczególnych elementów palownicy oraz ustalono położenie środka ciężkości. Schematyczne rozłożenie ciężarów poszczególnych elementów palownicy pokazano na rys. 4.

Zgodnie z rys. 4. środek ciężkości maszyny znajduje się w odległości $x=0,81$ m, $z=4,25$ m, $y=0$ m (przypadek symetrycz-



Rys. 4. Schemat palownicy Bauer BG 20H/BT60



Tab. 1. Parametry wytrzymałościowe platformy roboczej i podłoża gruntowego

Lp.	Ozn.	Platforma robocza				Podłoże gruntowe			
		φ [°]	ψ [°]	E [MPa]	c [kPa]	φ [°]	ψ [°]	E [MPa]	s_u [kPa]
1.	M1	25	5	80	5	0	0	15	20
2.	M2	28	5						
3.	M3	30	5						
4.	M4	32	8						
5.	M5	35	8						
6.	M6	38	8						

gdzie:

M1-M6 – oznaczenia kolejnych modeli obliczeniowych

φ – wartość kąta tarcia wewnętrznego [°]

ψ – wartość kąta dylatacji [°]

E – moduł Younga [MPa]

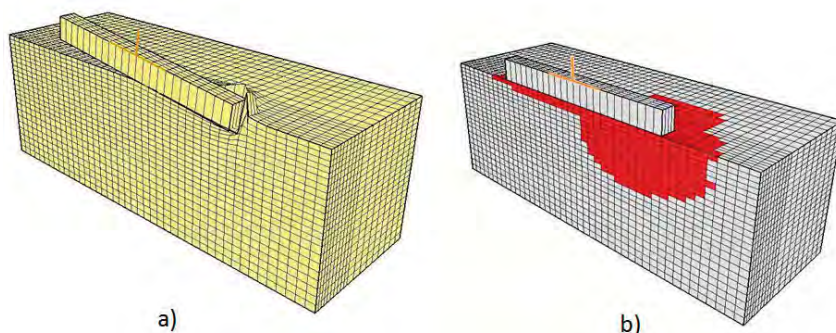
c – kohezja [kPa]

s_u – wytrzymałość na ścinanie bez odpływu [kPa]

Tab. 2. Zestawienie wyników obliczeń

Lp.	Ozn.	ξ [-]	Q_c [kN]	Q [kN]	M_{max} [kNm]	e [m]	e_w [-]
1.	M1*	0.5	725	290.0	-	-	-
2.	M2			362.5	295.0	0.80	0.35
3.	M3			362.5	330.0	0.91	0.39
4.	M4			362.5	362.0	1.0	0.42
5.	M5			362.5	398.0	1.1	0.47
6.	M6			362.5	440.0	1.21	0.51

*W przypadku obliczeń platformy roboczej o kącie tarcia wewnętrznego $\varphi=25^\circ$ (tab. 1., Ozn. M1) osiągnięto stan graniczny nośności przy sile skupionej równej $Q=290\text{ kN}$ (80% obciążenia docelowego). Nie osiągnięto pełnej wartości obciążenia docelowego, dlatego w dalszej części artykułu ten przypadek został pominięty. Platforma robocza o takich parametrach wytrzymałościowych nie jest zdolna do przeniesienia obciążeń pochodzących od analizowanej palownicy.



Rys. 6. Rezultaty obliczeń modelu numerycznego

a) Deformacja podłoża z oderwaniem gąsienicy od podłoża gruntowego

b) Strefy plastyczne

ny) od początku układu współrzędnych. Położenie środka ciężkości oszacowano w sytuacji pracy maszyny (maszt ustawiony pionowo).

Model platformy roboczej i podłoża gruntowego

Do obliczeń przyjęto model trójwymiarowy składający się z 3 części (rys. 5):

- 1) gąsienicy o długości $L=4,7$ m i szerokości $B=0,7$ m. Obliczenia przeprowadzono dla jednej z gąsienic (ze względu na identyczny rozkład obciążenia pod drugą). Ze względu na występowanie osi symetrii gąsienicy w modelu zastosowano schemat połówkowy – $B'=0,5$ B.
- 2) warstwy platformy roboczej o grubości $H=0,5$ m (tab. 1.),
- 3) podłoża gruntowego (tab. 1.).

Wyniki

W wyniku występowania siły mimośrodowej działającej na palownicę dochodzi do jej odrywania od platformy roboczej. Odpowiednie zamodelowanie strefy kontaktu gąsienicy i platformy roboczej (*contact interface*) pozwala na pominięcie sił rozciągających.

Zgodnie z założeniami platforma robocza ma wystarczającą nośność, jeżeli jest zdolna przenieść obciążenie ciężarem Q_i oraz momentem M_i . Zatem w przypadku symetrycznego obciążenia gąsienic – ($\xi=0,5$): $Q_{min}=\xi \cdot Q_c$, $Q_{min}=0,5 \cdot 725$ kN, $Q_{min}=362,5$ kN; $M_{min}=Q_{min} \cdot x$, $M_{min}=362,5$ kN $\cdot 0,81$ m, $M_{min}=293,6$ kNm – należy brać pod uwagę, że w rzeczywistej pracy palownice – w zależności od fazy pracy, położenia masztu lub wstępnego kąta nachylenia terenu obciążenia na poszczególne gąsienicach – nie zawsze są sobie równe ($\xi \neq 0,5$).

Wnioski

Obliczenia przeprowadzone dla symetrycznego przypadku (obie gąsienice obciążone jednakową siłą: $Q_1=Q_2=0,5$ Q, $\xi=0,5$) stanowią wstęp do pełnego opisu zachowania się ciężkiego budowlanego pojazdu gąsienicowego pracującego na platformie roboczej. Należy brać pod uwagę, że przypadek takiego samego obciążenia obu gąsienic jest przypadkiem szczególnym, ponieważ nacisk wywierany przez gąsienice podczas normalnej pracy jest wartością zmienną i zależy od wielu czynników (wstępnego pochylenia terenu, położenia masztu, fazy pracy maszyny).

W analizie numerycznej założono, że wartości charakterystyczne są równe wartościom obliczeniowym (współczynnik bezpieczeństwa równy jeden). Określenie wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa nastąpi na podstawie zbioru większej liczby wyników analizy numerycznej, ponieważ w dostępnej literaturze oraz normach

nie ma informacji nt. niezawodności tymczasowych konstrukcji geotechnicznych, do których można zaliczyć platformy robocze. Częściowe współczynniki bezpieczeństwa zostaną określone zgodnie z wynikami analizy numerycznej, zgodnie z PN-EN 1990 oraz w odniesieniu do PN-EN 1997-1.

Analiza uzyskanych wyników wskazuje na konieczność dokładnego badania parametrów wytrzymałościowych platformy roboczej (kąta tarcia wewnętrznego). Niewielka zmiana wartości parametrów znacznie obniża lub podwyższa nośność graniczną platformy roboczej, co prowadzi do awarii lub przewymiarowania platformy roboczej.

W wyniku obciążenia mimośrodowego, które występuje podczas normalnej pracy palownicy, dochodzi do odrywania gąsienic od podłoża, na którym pracują. Jest to szczególnie niebezpieczne, ponieważ w wyniku odrywania zmniejsza się powierzchnia kontaktu gąsienicy z podłożem, co prowadzi do wzrostu naprężeń w podłożu gruntowym.

Badania zaistniałych sytuacji awaryjnych oraz katastrof budowlanych związanych z pracą ciężkiego sprzętu roboczego na gruntach słabonośnych prowadzą do wniosku, że platformy robocze powinny podlegać obowiązkowemu projektowaniu. Odpowiednie przepisy powinny również regulować odpowiedzialność uczestników procesu budowlanego na etapie projektowania, wykonywania oraz eksploatacji platformy roboczej.

Bibliografia

- [1] Rychlewski P., Szwejkowski W., Przygotowanie placu budowy do robót geotechnicznych, „Inżynier Budownictwa” 12/2017.
- [2] Rychlewski P., Nowak P., Bezpieczeństwo robót geotechnicznych – platformy robocze, Seminarium IBDiM i PZWFS – Warszawa, 5 marca 2015 – FUNDAMENTY PALOWE 2015.
- [3] Skinner H., 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.
- [4] Truty A., Urbański A., Referat Stateczność maszyn roboczych ciężkich poruszających się po słabonośnym podłożu. XXIX Ogólnopolska Konferencja Naukowa Metody komputerowe w projektowaniu i analizie konstrukcji hydrotechnicznych, Korbielew 2016 [niepubl.].

Abstrakt. Analiza wpływu parametrów wytrzymałościowych platformy roboczej na stateczność ciężkich maszyn budowlanych. **Analysis of influence of working platform strength parameters for stability of heavy machines.** Aby ciężkie maszyny budowlane mogły bezpiecznie wykonywać swoją pracę, należy sprawdzić, czy podłoże gruntowe ma wystarczającą nośność. W przypadku jej niedoboru należy odpowiednio wzmocnić podłoże poprzez wykonanie platformy roboczej. W artykule przedstawiono analizę współpracy palownicy gąsienicowej z podłożem słabonośnym wzmocnionym warstwą platformy roboczej.

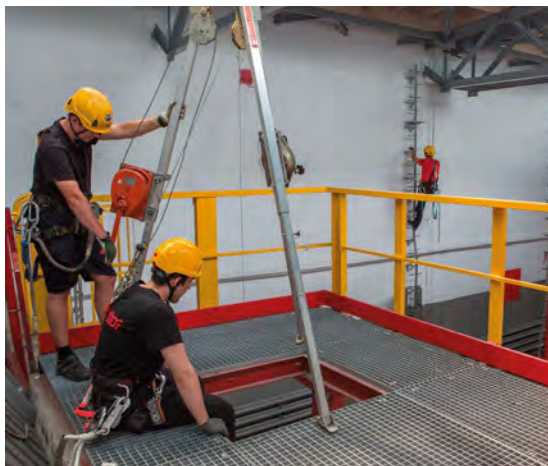
Słowa kluczowe: platformy robocze, stateczność maszyn budowlanych ciężkich, palownice, podłoże słabonośne, metoda elementów skończonych

Pełna wersja artykułu z wykresami zależności przemieszczenia oraz kąta obrotu od wartości mimośrodu – na www.buildercorp.pl

BEZPIECZNA BUDOWA | INFORMACJE

Sundoor dla bezpieczeństwa

Praca na wysokości należy do prac szczególnie niebezpiecznych. Każdy popełniony błąd może prowadzić do ciężkiego urazu, a nawet śmierci, dlatego należy bezwzględnie zadbać o każdy czynnik stanowiący bezpieczeństwo. Badania wysokościowe i zakup certyfikowanego sprzętu to dopiero pierwszy krok. Następnie należy zadbać o odpowiednie szkolenia, po których pracownik będzie potrafił odpowiednio dobrać i stosować wszystkie elementy systemu zabezpieczającego.



Szyb technologiczny

W maju tego roku Soletanche Polska zrealizowała szyb technologiczny w istniejącej hali produkcyjnej zlokalizowanej pod Bełchatowem. Ze względu na dostępną przestrzeń roboty były prowadzone z platformy roboczej obniżonej o 5 m. Cylinder o średnicy 6 m wykonany w technologii ścian szczelinowych zabezpiecza wykop do głębokości 35 m i odcina dopływ wody o zwierciadle stabilizującym się na głębokości 20 m.