

# Nośność graniczna fundamentów grzybkowych wrywanych w gruntach gruboziarnistych



dr inż.  
**SŁAWOMIR LABOCHA**  
ENPROM Sp. z o.o.  
**ORCID: 0000-0003-0331-4585**

W artykule przedstawiono rozwiązanie zagadnienia nośności granicznej fundamentów grzybkowych wrywanych z podłoża. Analiza jest dedykowana praktycznym problemom posadowienia kratowych słupów elektroenergetycznych, gdzie dominującym obciążeniem krytycznym jest pionowa siła wyciągająca fundament.

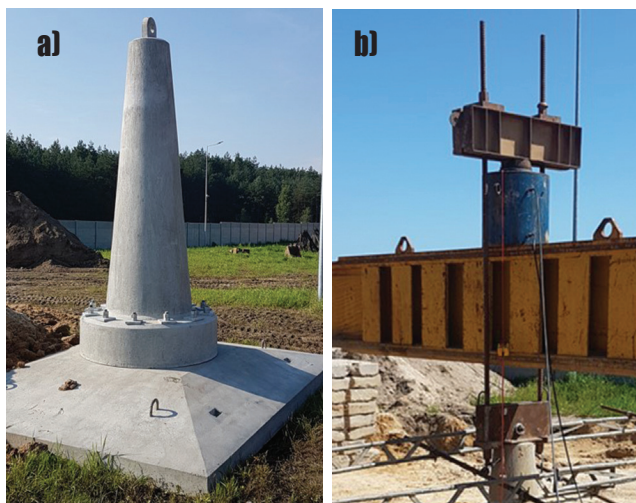
## Wprowadzenie

Problemy nośności fundamentów w zasadniczej większości są rozpatrywane w kontekście dopuszczalnych nacisków na podłoże wywieranych przez budowle lub zagadnień stateczności skarp i zboczy. W takich przypadkach dominującymi wpływami są oddziaływania dociskające, związane z siłami grawitacyjnymi. Tymczasem w przypadku konstrukcji wieżowych posadowionych na fundamentach dzielonych kluczowa staje się nośność fundamentów dla oddziaływań wrywających. W szczególności dotyczy to konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych, gdzie najpopularniejszym typem fundamentów są prefabrykowane stopy tzw. grzybkowe. Wynika to głównie z dużej, powtarzalnej liczby instalowanych słupów na linii. Ze względów ekonomicznych współpraca z podłożem powinna być uwzględniana w ocenie nośności fundamentów wrywanych, gdyż zapewnienie nośności tylko z wykorzystaniem sił masowych byłoby zbyt kosztowne.

Wprowadzenie nowych norm branżowych PN-EN 50341-1:2013 [1] i PN-EN 50341-2-22:2016 [2] oraz wymogów norm geotechnicznych PN-EN 1997-1:2008 [3] i PN-EN 1997-2:2009 [4] spowodowało podniesienie standardów bezpieczeństwa w budowie linii napowietrznych i tym samym wymusiło zwiększenie wymogów nośności konstrukcji wsporczych, szczególnie w odniesieniu do fundamentów wyciąganych. Ze względu na wagę problemu prowadzi się w energetyce prace

badawcze w tym zakresie, np. w ramach działań firmy Enprom w projekcie NCBIR POIR.01.01.01-00-0789/17 pt. „Opracowanie nowego typu szeregu słupów energetycznych 400 kV oraz odpowiednich dla nich fundamentów, w tym fundamentów do zastosowania na gruntach o szczególnie niekorzystnych parametrach geotechnicznych”. Projekt prowadzono we współpracy z Instytutem Dróg i Mostów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, a badaniom poligonowym poddano różne typy fundamentów stopowych. Unikalność tych badań polegała na przeprowadzeniu testów na fundamentach w skali naturalnej 1:1, w stosunku do konstrukcji faktycznie stosowanych na liniach napowietrznych 400 kV. Metodologię tych badań, bazujących na normie PN-EN 61773:2000 [5] opisano szerzej w pracy [6]. Widok jednej z testowanych konstrukcji pokazano na rysunku 1a, natomiast na rysunku 1b stanowisko badawcze przygotowane do prób.

Zagadnienie określania nośności na wrywanie fundamentów stopowych ma już dość długą historię oraz rozbudowaną literaturę przedmiotu, niemniej zdecydowanie słabiej rozwiniętą i ugruntowaną niż problemy nośności fundamentów wciskanych w podłoże. Znane metody wyznaczania nośności fundamentów na wyciąganie bazują na wielu założeniach upraszczających i korelacji z wynikami badań laboratoryjnych oraz polowych, przy czym tych ostatnich, zwłaszcza w skali naturalnej, wykonano stosunkowo niewiele. Wyczerpujący przegląd stosowanych metod obliczeniowych można znaleźć w pracy Biareza i Barrauda [7], Kovacs i innych [8], Morsa [9] oraz Boldyriewa [10]. Metody te bazują na zakładanych a priori postaciach brył fundamentowo-gruntowych wrywanych z podłoża lub na metodach równowagi granicznej ośrodka przy założeniu określonych powierzchni poślizgu. W niektórych przypadkach analizy teoretyczne są uzupełniane o współczynniki korekcyjne bazujące na wynikach wybranych doświadczeń, np. teoria Mariupolskiego [11] odniesiona do badań Kanyana [12]. Kluczowymi rozprawami w przedmiocie są jednak prace Meyerhofa i Adamsa [13] oraz Martina [14], posilujące się założeniami o popartych obserwacjami formach powierzchni poślizgu brył wrywanych. Stabelaryzowana metoda obliczeń fundamentów stopowych wrywanych zaimplementowana w polskiej normie PN-B-03322:1980 [15] bazuje właśnie na założeniach przyjętych w pracach Meyerhofa i Adamsa [13] oraz Martina [14]. Należy odnotować, iż formalnie wycofana norma PN-B-03322:1980 [15] została z uwagi na swoje walory w zakresie merytorycznym dopuszczona do stosowania z zapisami aktualnego krajowego załącznika PN-EN 50341-2-22:2016 [2]. Wśród fundamentalnych i kompletnych prac teoretycznych należy wymienić opracowanie Balli [16] przyjmującego ko-



Rys. 1. Badania fundamentów wrywanych w skali 1:1 [6]:  
a) widok jednego z elementów testowych, b) widok stanowiska badawczego

W celu szerszych uogólnień przedstawionego rozwiązania należy rozważyć bardziej złożone mechanizmy kinematyczne, w tym odpowiadające jakościowej ich zmianie w przypadku fundamentów grzybkowych o dużym zagłębieniu.

ową linię poślizgu oraz opracowania Matsuo [17, 18], przyjmującego linię poślizgu wg logarytmicznej krzywej spiralnej. Interesująca i wartościowa jest również praca Podsiadło [19] wykorzystująca metodę charakterystyk równania różniczkowego problemu osiowo-symetrycznego. Liczne pozostałe prace w temacie nośności stopowych fundamentów wrywanych z podłoża są głównie tylko przyczynkowe, bez uogólnień lub możliwości bezpośredniego wykorzystania w praktyce. Należy przy tym podkreślić, iż dominującym w analizach przypadkiem jest zagadnienie osiowosymetrycznego stanu naprężenia odpowiadającego fundamentom stopowym o rzucie kołowym. Mniej liczne i zasadniczo uproszczone metody odnoszą się do fundamentów o stopie w rzucie prostokątnym, przy czym najczęściej sprowadzane są one do zastępczego rzutu kołowego.

Oczywiście, jak również przedstawiono w pracy [6], można obecnie z powodzeniem do rozwiązania problemu nośności fundamentów wrywanych zastosować liczne znane komercyjne programy bazujące na metodzie elementów skończonych i dedykowane zagadnieniom geotechnicznym (np. Plaxis, Midas GTS, ZSoil). Znaczenie metod analitycznych nie zmalało jednak zupełnie, będąc z jednej strony weryfikacją rezultatów numerycznych, a z drugiej znacznie efektywniejszą i tańszą drogą pozyskania wyników inżynierskich w praktyce.

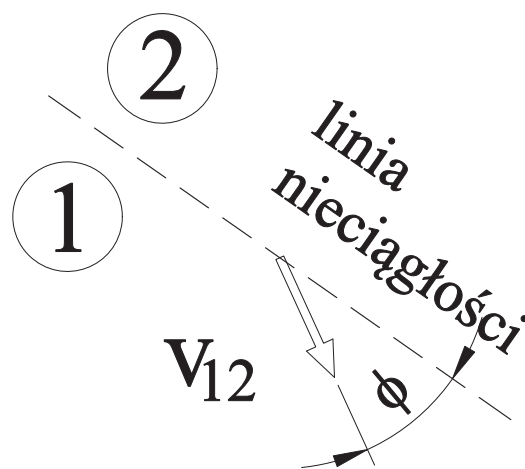
### Metody nośności granicznej wg teorii plastyczności w mechanice gruntów

Za efektywny początek zastosowania teorii plastyczności w geomechanice można uważać pracę Druckera i Pragera [20]. Obecnie literatura przedmiotu w tym zakresie jest bardzo szeroka. Wyczerpujący opis teorii i zastosowań w mechanice gruntów przedstawiono między innymi w znanej książce Chena [21]. W Polsce również ukazały się wartościowe wydawnictwa książkowe szczegółowo przedstawiające tę problematykę, np. publikacje Izbickiego i Mroza [22], Szczepińskiego [23], a ostatnio Pietruszczaka [24]. W podanych przykładowych pracach można znaleźć stosowne odniesienia źródłowe.

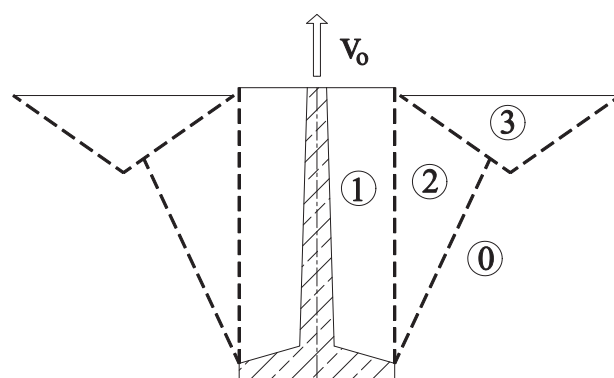
Obok ogólnych sformułowań związków teorii plastyczności w mechanice gruntów szczególnie efektywne dla pewnych grup zagadnień może być uproszczone podejście przy zastosowaniu idealizacji geomateriału modelem idealnie sztywno-plastycznym. Dzięki temu możliwe jest oszacowanie górne i dolne wartości obciążenia niszczonego na bazie twierdzeń o nośności granicznej. Te znane twierdzenia można sformułować następująco za [24]:

- konstrukcja nie ulegnie zniszczeniu lub co najwyżej znajdzie się w stanie równowagi granicznej, jeżeli dla zadanego obciążenia można znaleźć odpowiadające mu statycznie i plastycznie dopuszczalne pole naprężeń (oszacowanie dolne);
- konstrukcja nie ulegnie zniszczeniu lub znajdzie się co najwyżej w stanie równowagi granicznej, jeżeli można znaleźć kinematycznie dopuszczalne pole prędkości, dla którego praca obciążeń zewnętrznych jest równa mocy dyssypacji wewnętrznej (oszacowanie górne).

W przypadku analizowanego problemu nośności granicznej fundamentów stopowych wrywanych z gruntu niespoistego szczególnie efektywna może być metoda oszacowania górnej jej wartości. W przypadku materiałów gruboziarnistych (niespoistych) opisywanych przez stowarzyszone prawo płynięcia dyssypacja energii jest bowiem równa zeru. W tym przypadku wystarczy założyć kinematycznie dopuszczalne po-



Rys. 2. Kierunek nieciągłości prędkości na granicach bloków w materiale Coulomba

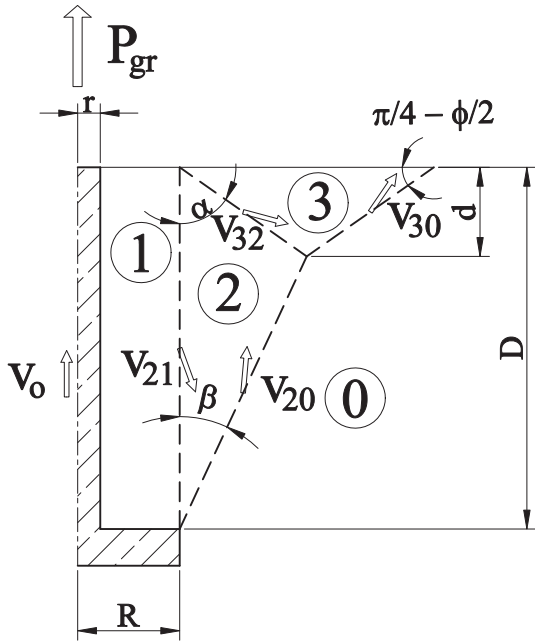


Rys. 3. Proponowany mechanizm kinematyczny dla fundamentu stopowego wrywanego

le prędkości dla układów wydzielonych sztywnych bloków gruntu, które ślizgają się względem siebie wzdłuż linii nieciągłości prędkości, tworząc globalny mechanizm. Kierunek nieciągłości na granicach bloków w tym wypadku można zilustrować jak na rysunku 2. Względna prędkość przykładowych bloków 1 i 2 jest nachylona względem linii (płaszczyzny) nieciągłości pod kątem równym kątowi tarcia wewnętrznego materiału  $\phi$ . Przyrównując do zera równanie pracy uwzględniającej działanie obciążeń zewnętrznych i sił masowych, otrzymuje się górne oszacowanie nośności granicznej. Im bardziej realistyczny mechanizm kinematyczny zostanie przyjęty, tym otrzymuje się niższą wartość obciążenia krytycznego. Przydatne mogą być również relatywnie proste mechanizmy kinematyczne. W zagadnieniu nośności granicznej fundamentów grzybkowych rozważa się tutaj podstawowy przykładowy mechanizm w układzie kołowo-symetrycznym przedstawiony na rys. 3.

### Nośność graniczna fundamentu grzybkowego na wrywanie

Zakłada się kinematyczny mechanizm zniszczenia według rys. 3., przy uwzględnieniu kołowej symetrii zagadnienia. Dla uproszczenia trzon i płytę o nieznacznie zmiennych gabarytach, odpowiednio średnicy ( $2r$ ) oraz grubości zastępuje się ich wartościami średnimi, natomiast średnicę płyty ( $2R$ ) w przypadku podstaw o rzucie prostokątnym zastępuje się odpowiednikiem o równoważnej powierzchni. Odpowiadające przyjętemu mechanizmowi pole oraz hodograf prędkości wynikają z założenia, że fundament pod obciążeniem granicznym  $P_{gr}$  porusza się ze stałą prędkością  $v_0$  (rys. 4.). Wszystkie wektory prędkości są nachylone względem linii nieciągłości prędkości pod kątem tarcia wewnętrznego gruntu  $\phi$ .



Rys. 4. Pole prędkości w przyjętym mechanizmie kinematycznym

Finalnie równanie bilansu pracy, przy zerowej dyssypacji energii ośrodka gruboziarnistego (bez spójności), można zapisać równaniem

$$P_{gr}v_0 - G_f v_0 - G_1 v_0 - G_2 v_{20v} - G_3 v_{30v} = 0 \quad (1)$$

w którym  $G_f$  jest ciężarem fundamentu, a  $G_1$ ,  $G_2$  i  $G_3$  oznaczają siły masowe brył gruntu w układzie geometrii modelu kołowo-symetrycznej konstrukcji i otaczającego jej gruntu o ciężarze objętościowym  $\gamma$ , wynoszące odpowiednio

$$G_1 = 2\pi\gamma \frac{D}{2} (R - r)(R + r) \quad (2)$$

$$G_2 = 2\pi\gamma \left[ \frac{1}{2} D d \tan \alpha \left( R + \frac{1}{3} d \tan \alpha \right) \right] \quad (3)$$

$$G_3 = 2\pi\gamma \left[ \frac{1}{2} d^2 \tan \alpha \left( R + \frac{2}{3} d \tan \alpha \right) + \frac{1}{2} \frac{d^2}{\tan\left(\frac{\pi - \phi}{2}\right)} \left( R + d \tan \alpha + \frac{1}{3} \frac{d}{\tan\left(\frac{\pi - \phi}{2}\right)} \right) \right] \quad (4)$$

Na podstawie hodografu prędkości przedstawionego na rysunku 4 można zapisać

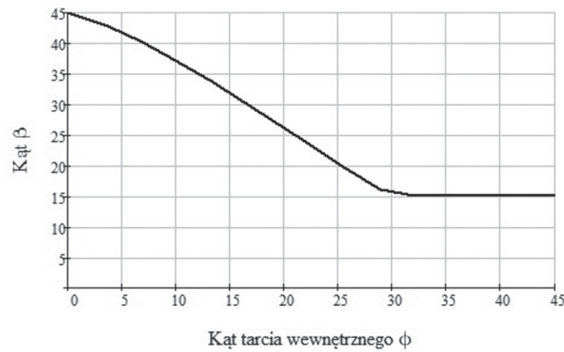
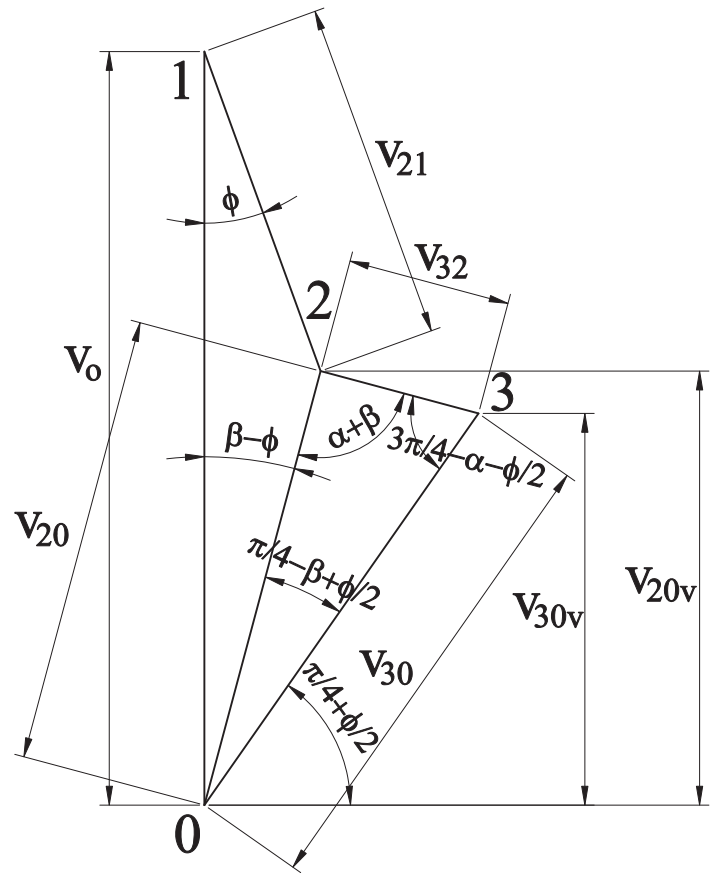
$$v_{20v} = v_0 \frac{\sin \phi}{\sin(\pi - \beta)} \cos(\beta - \phi) \quad (5)$$

$$v_{30v} = v_0 \frac{\sin \phi}{\sin(\pi - \beta)} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin\left(\frac{3}{4}\pi - \alpha - \frac{\phi}{2}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \quad (6)$$

Podstawieniu zależności (2) do (6) do równania (1) oraz skróceniu przez  $v_0$  otrzymuje się ostatecznie górne oszacowanie nośności fundamentu na wrywanie w postaci

$$P_{gr} = G_f + 2\pi\gamma \left\{ \begin{aligned} & \frac{D}{2} (R^2 - r^2) + \frac{1}{2} D d \tan \alpha \left( R + \frac{1}{3} d \tan \alpha \right) \frac{\sin \phi}{\sin(\pi - \beta)} \cos(\beta - \phi) + \\ & \left[ \frac{1}{2} d^2 \tan \alpha \left( R + \frac{2}{3} d \tan \alpha \right) + \frac{1}{2} \frac{d^2}{\tan\left(\frac{\pi - \phi}{2}\right)} \left( R + d \tan \alpha + \frac{1}{3} \frac{d}{\tan\left(\frac{\pi - \phi}{2}\right)} \right) \right] \frac{\sin \phi}{\sin(\pi - \beta)} \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin\left(\frac{3}{4}\pi - \alpha - \frac{\phi}{2}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Wartość kąta  $\alpha$  można przyjąć za pracę Böldyriewa [10] równą  $\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}$ , natomiast wartość kąta  $\beta$  w istocie zmienia się w zależności od kąta tarcia wewnętrznego gruntu  $\phi$  w przedziale od około  $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$  do



Rys. 5. Przebieg zmienności wartości kąta  $\beta$

około  $\frac{\pi}{4} - \phi$ , jakkolwiek do swoich obliczeń Böldyriew [10] przyjmuje wartość  $\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ . Podobne spostrzeżenia wynikają z prac badawczych innych autorów, np. Balli [16] czy Matsuo [17, 18]. Autor niniejszej pracy proponuje uzmiennienie wartości kąta  $\beta$ , przyjmując zależność, która płynnie zmienia jego wielkości w przedziale od  $\frac{\pi}{4}$  do  $\frac{\pi}{12}$ , dla zmieniających się kątów tarcia wewnętrznego gruntu  $\phi$  od 0 do  $\frac{\pi}{6}$ , tj. zakładając dla małych wartości kątów  $\phi$  wielkość zbliżoną do  $\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$ , natomiast dla dużych wartości kątów  $\phi$  wielkość zbliżoną do  $\beta = \frac{\pi}{4} - \phi$ , lecz nie mniej niż  $\frac{\pi}{12}$ . Ostateczna postać zależności opisującej wartość kąta  $\beta$  wygląda więc następująco:

$$\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \left( 1 + \frac{\phi}{\pi} - \frac{3\phi}{\pi^2} \phi^2 \right) \text{ lecz } \beta \geq \frac{\pi}{12} \quad (8)$$

Przebieg zmienności kąta  $\beta$  w funkcji wartości kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  zgodnie z zależnością (8) przedstawiono na rys. 5.

Wprowadzenie wartości kątów  $\alpha$  i  $\beta$  do zależności (7) pozwala na łatwe i szybkie obliczenie górnego oszacowania nośności granicznej  $P_{gr}$  fundamentu wrywanego w dowolnym arkuszu matematycznym (MathCad, Excel). Przyjęcie tradycyjnej stałej wartości kąta  $\beta = \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}$  prowadzi do wyższej wartości nośności, w szczególności dla kątów



Tab. 1. Porównanie nośności z badań i obliczeń wg wzoru (7)

Badanie Źródło Biarez Barraud [7]	Fundament		Grunt		Nośność kN		Różnica względna
	R [m]	D [m]	$\phi$ [deg]	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	Badania	Wzór (7)	
EP Kraków	1,0	2,65	32	15,70	392	408	+4,1%
	0,35	1,35	32	15,70	69	80,7	+17%
Edison USA	0,651	2,74	30	17,26	312	292	-6%
	0,51	2,03	35	19,12	244	164	-33%

tarcia wewnętrznego gruntów  $\phi > 30$  stopni. Dolne ograniczenie wartości kąta wg zależności (8) wynika z konieczności zapewnienia monotoniczności funkcji nośności (7). Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na bardzo istotny mankament normy PN-B-03322:1980 [15], w której zarys bryły odłamu fundamentu wyrwanego jest uzależniony od kąta tarcia wewnętrznego i ma w normie całkowicie niezgodny z fizyką skok wartości dla kąta równego 15 stopni. Dzięki formule (8) proponowana funkcja nośności (7) jest pozbawiona tej wady.

Na zakończenie przedstawionych rozważań należy jednak podkreślić, iż przyjęty mechanizm zniszczenia jest adekwatny tylko w przypadku fundamentów płytkich, scharakteryzowanych relatywnie niskimi wielkościami stosunku  $\frac{D}{R}$ , tj. szacunkowo do wartości około 2,5. Takie proporcje są jednak najczęściej spotykane w praktyce posadowienia słupów elektroenergetycznych.

### Przykład obliczeniowy

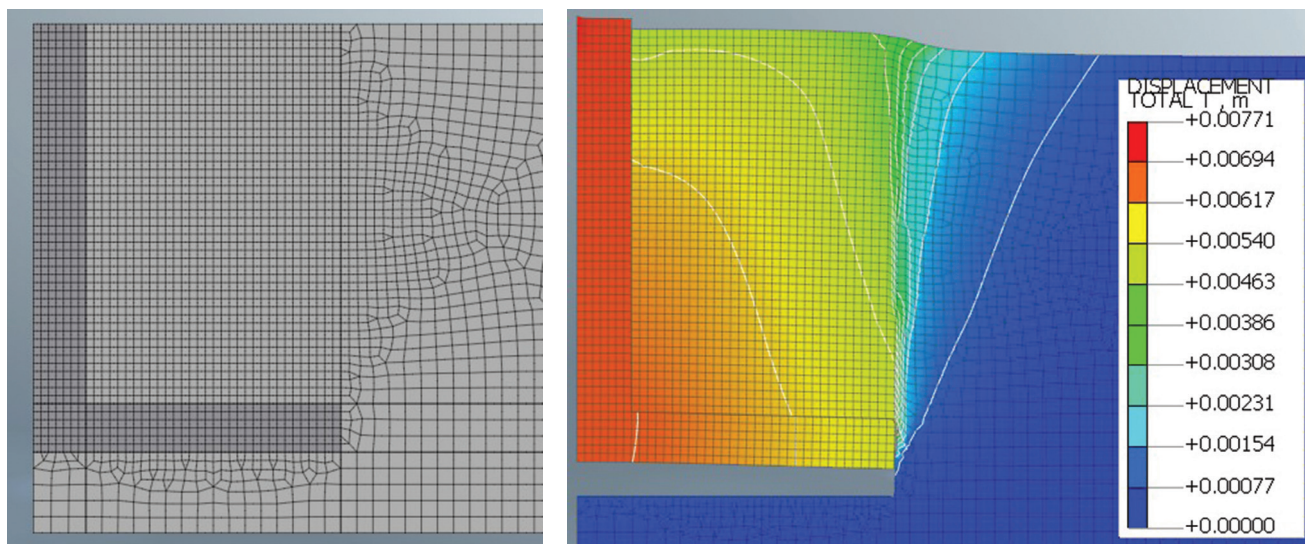
Jako referencyjny przykład zastosowania przyjęto porównanie z wynikami badań opisanymi w pracy [6]. Rozważany jest testowany na poligonie badawczym fundament o rzucie podstawy 3 x 3,8 m i ciężarze około 110 kN. Średni promień trzonu wynosił  $r=0,325$  m. Poziom posadowienia do górnej krawędzi płyty podstawy wynosił  $D=2,35$  m. Zastępczy promień podstawy przyjęto równy  $R = \sqrt{\frac{3 \cdot 3,8}{\pi}} = 1,905$  m. Grunt zasypowy był scharakteryzowany następującymi parametrami:  $\phi=35,5^\circ$  i  $\gamma=18,95$  kN/m<sup>3</sup>. Po podstawieniu podanych wielkości do wzoru (7) przy wielkościach  $\beta = \frac{\pi}{12} = 15^\circ$  oraz  $d = D \frac{\tan \beta}{\tan \alpha + \tan \beta} = 2,35 \frac{\tan \frac{\pi}{12}}{\tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{12}) + \tan \frac{\pi}{12}} = 0,285$  m uzyskuje się ostatecznie górne oszacowanie nośności na poziomie  $P_{gr}=1053,4$  kN. Wartość ta niemal idealnie zgadza się ze średnią wartością uzyska-

ną podczas badań równą 1050 kN (min. 1000 kN, max 1100 kN spośród 3 identycznych testów, w sumie przeprowadzono 26 badań różnych fundamentów) i bardzo niewiele odbiega od nośności z badań określonych zgodnie z normą PN-EN 61773:2000 [5], gdzie w zależności od metody estymowania nośności uzyskano wartości od 992 kN (-5,8%) do 1141 kN (+8,3%). Weryfikacja rozwiązania została przeprowadzona metodą elementów skończonych, z wykorzystaniem komercyjnego programu Midas GTS, którego przyjętą siatkę MES oraz schemat deformacji w stanie granicznym przedstawiono na rys. 6. Obliczenia prowadzą do wyników: 1056,2kN (+0,3%) przy zastosowaniu standardowego modelu z warunkiem zniszczenia Coulomba-Mohra (CM) oraz 1075 kN (+2,1%) przy zastosowaniu zmodyfikowanego modelu z warunkiem zniszczenia Coulomba-Mohra (MCM) – odpowiednika modelu Hardening Soil (HS).

W pracy Biareza i Barrauda [7] zebrano dane z testów nośności fundamentów na wyciąganie. W zestawieniu tym brakuje niektórych parametrów mających również wpływ na finalną nośność fundamentów. Szacując ich wartość (np. ciężar fundamentów oraz promień ich rdzenia), można dokonać porównania testów i wyników uzyskiwanych wzorem (7). W tab. 1. zebrano porównanie dla wybranych przypadków.

### Wnioski

Przedstawiona w artykule metoda górnej oceny nośności granicznej fundamentów stopowych grzybkowych słupów elektroenergetycznych nie była dotychczas wykorzystywana w praktyce. Przedstawiony tu proponowany mechanizm kinematyczny dla gruntów gruboziarnistych (niespoistych) jest relatywnie prosty, ale dzięki temu łatwy do inżynierskich zastosowań,



Rys. 6. Model MES fundamentu: widok siatki (z lewej) oraz schemat deformacji (z prawej)

Zagadnienie określania nośności na wrywanie fundamentów stopowych ma już dość długą historię oraz rozbudowaną literaturę przedmiotu, niemniej zdecydowanie słabiej rozwiniętą i ugruntowaną niż problemy nośności fundamentów wciskanych w podłoże.

a otrzymane rezultaty dobrze korelują z wynikami badań realnych fundamentów, jak pokazano to w załączonych przykładach. Zaproponowana funkcja regresji kąta  $\beta$  silnie redukuje nośność w przypadku znacznych wartości kąta tarcia wewnętrznego gruntów, a jej przebieg może zostać uściślony w trakcie dalszych badań. Należy tu zaznaczyć, iż przyjęty w obliczeniach porównawczych ciężar własny fundamentów oszacowano na podstawie konstrukcji z podobnego okresu stosowania w Polsce, a podane parametry gruntów podano wprost za pracą źródłową Biareza i Barrauda [7].

Przyjmowanie w obliczeniach wysokich kątów tarcia wewnętrznego (np. powyżej 35 stopni) autor uważa za dyskusyjne, biorąc pod uwagę praktykę i zapewnienie równomiernego zagęszczenia gruntów zasypowych w całej objętości. W proponowanej ocenie nośności fundamentów na wyciąganie sugeruje się wykorzystanie wartości efektywnego kąta tarcia wewnętrznego. Jednocześnie niższe jego wartości (np. znacznie poniżej 25 stopni), charakterystyczne dla gruntów drobnoziarnistych, także czasem wykorzystywanych do zasypów, mogą być po stronie bezpiecznej stosowane z pominięciem spójności. Wiąże się to z problemem ewentualnego „odbudowania” spójności w zasypach, co sankcjonowała nawet poprzednia wersja normy PN-B-03322:1980 [15], nakazując jej redukcję o 50%.

Inwentaryzacja rys na powierzchni terenu nad fundamentami w stanie granicznym podczas badań wykazała wyraźne ich zaokrąglenia w rejonie naroży prostokątnej podstawy. Może to stanowić pewne uzasadnienie stosowanych tu uproszczeń w kontekście użycia modelu obliczeniowego o osiowej symetrii również do fundamentów o dolnej płycie w rzucie prostokątnej.

W celu szerszych uogólnień przedstawionego rozwiązania należy jednak rozważyć bardziej złożone mechanizmy kinematyczne, w tym odpowiadające jakościowej ich zmianie w przypadku fundamentów grzybkowych o dużym zagłębieniu.

## Bibliografia

- [1] PN-EN 50341-1:2013. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1. Wymagania ogólne. Specyfikacje wspólne.
- [2] PN-EN 50341-2-22:2016. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1kV. Część 2-22. Zbiór normatywnych warunków krajowych. Normatywne warunki krajowe Polski.
- [3] PN-EN 1997-1:2008. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 1: Zasady ogólne.
- [4] PN-EN 1997-2:2009. Eurokod 7. Projektowanie geotechniczne. Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [5] PN-EN 61773:2000. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Badanie fundamentów konstrukcji wsporczych.
- [6] Labocha S., Czyż R., Biernacka A.: Nośność na wyciąganie fundamentów stupów linii elektroenergetycznych 400 kV. „Acta Sci. Pol. Architectura”, 19 (2), 59–66.
- [7] Biarez J., Barraud Y.: The use of soil mechanics methods for adapting tower foundations to soil conditions. International Conference on Large High Tension Electric Systems. Paris 1968.
- [8] Kovacs A., Blouin S., McKelvy B., Colligan H.: On the theory of ground anchors. Technical Report 258. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire 1975.
- [9] Mors H.: Methods of dimensioning for uplift foundations of transmission line towers. CIGRE Paper No. 210, 1964.
- [10] Boldyriev G.G.: Ustojcziwost i deformiruyemost osnowanij ankiernych fundamentow. Strojdat, Moskwa 1987.
- [11] Mariupolskii L.G.: The bearing capacity of anchor foundations. Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, No. 1, s. 14–18, 1965.

- [12] Kanayan A.S.: Experimental investigation of the stability of bases of anchor foundation. Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov, No. 6, s. 9–12, 1966.
- [13] Meyerhof G.G., Adams, J. J.: The ultimate uplift capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, 5 (4), 225–244, 1968.
- [14] Martin D.: Design of uplift foundations. Electra No 38. 1975.
- [15] PN-B-03322:1980 Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Fundamenty konstrukcji wsporczych. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [16] Balla A.: Uplift resistance of bulb type foundations for overhead line foundations. Minutes of the 5th International Congress on Soil Mechanics and Foundations Works. Paris 1961.
- [17] Matsuo M.: Study on the uplift resistance of footing. Soil and Foundation (I). Vol. 7, Issue 4, 1967, s. 1–37.
- [18] Matsuo M.: Study on the uplift resistance of footing. Soil and Foundation (II). Vol. 8, Issue 1, 1968, s. 18–48.
- [19] Podsiadlo R.: Nośność graniczna fundamentów wyciąganych z gruntu. Część II. Rozwiązania teoretyczne i analiza wyników. „Archiwum Hydrotechniki”. Tom XVIII, Zeszyt 2, 1971.
- [20] Drucker D.C., Prager W.: Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 10, No. 2, 1952, s. 157–175.
- [21] Chen W.F.: Limit analysis and soil plasticity. Elsevier, Amsterdam 1975.
- [22] Izbiński J.R., Mróz Z.: Metody nośności granicznej w mechanice gruntów i skal. PWN Warszawa-Poznań 1976.
- [23] Szczepiński W.: Stany graniczne i kinematyka ośrodków sypkich. PAN IPPT, PWN Warszawa 1974.
- [24] Pietruszczak S.: Podstawy teorii plastyczności w geomechanice. Dolnośląskie Wyd. Edukacyjne, Wrocław 2015.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8260

## PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Labocha Sławomir, 2022, Nośność graniczna fundamentów grzybkowych wrywanych w gruntach gruboziarnistych, „Builder” 5 (298). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8260

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono rozwiązanie zagadnienia nośności granicznej fundamentów grzybkowych wrywanych z podłoża. Analiza jest dedykowana praktycznym problemom posadowienia kratowych słupów elektroenergetycznych, gdzie dominującym obciążeniem krytycznym jest pionowa siła wyciągająca fundament. Pokazane w artykule przykładowe rozwiązanie zagadnienia wywodzi się z grupy metod nośności granicznej analitycznych modeli sztywno-plastycznych teorii plastyczności. Zaprezentowano górne oszacowanie nośności granicznej na wrywanie według przyjętego kinematycznie dopuszczalnego schematu niszczenia. Podano zamknięte formuły na nośność oraz dokonano porównania z poligonowymi wynikami badań fundamentów w skali 1:1. Propozycja obliczeń przedstawiona w pracy stanowi alternatywne podejście do asekuracyjnych zaleceń podanych w normie PN-EN 50341-1-1:2013.

**Słowa kluczowe:** napowietrzne linie elektroenergetyczne; badania poligonowe, fundamenty grzybkowe, nośność fundamentów na wyciąganie, plastyczna nośność graniczna

**Abstract: LIMIT RESISTANCE TO BREAKING OUT OF MUSHROOM FOUNDATIONS IN COARSE SOILS.** In the article one presented answer to a problem of the limit resistance of mushroom foundations subjected to uplift loads. The analysis is dedicated to practical problems of lattice towers of overhead lines, where a dominant critical load is the vertical uplift force. Shown in the article the example problem descends from the group of methods of the limit capacity of analytical rigid-plastic models of the plasticity theory. One presented the upper bond estimated capacities of limit breaking out according to the adopted kinematically permissible failure diagram. One gave closed formulas on the capacity and one made the comparison with tests of the foundations in the scale 1:1. The proposal of calculations presented in the work constitutes the alternative approach to recommendations given in the standard PN-EN 50341-1-1:2013.

**Keywords:** overhead power lines (OHL); field tests; mushroom foundations; uplift resistance of foundations, limit plastic capacity