



Nośność na wyciąganie fundamentów stopowych z nakładkami płytowymi

Jarosław Paluszyński¹, Sławomir Labocha², Agnieszka Biernacka³

STRESZCZENIE:

Omówiono wybrane zagadnienia nośności na wyciąganie fundamentów stopowych z nakładkami płytowymi. Fundamenty dedykowane są dla słupów napowietrznych linii elektroenergetycznych 400 kV. Przedstawiono badania poligonowe fundamentów w skali 1:1 przeprowadzone zgodnie z normą PN-EN 61773:2000. Rezultaty badań porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą metody elementów skończonych oraz metodami analitycznymi zgodnie z procedurami określonymi normami PN-EN 50341-1:2013 i PN-B-03322:1980.

SŁOWA KLUCZOWE:

nośność na wyciąganie; fundamenty wież kratowych; fundamenty słupów elektroenergetycznych; badania polowe

1. Wprowadzenie

Wymogi projektowania konstrukcji wsporczych napowietrznych linii elektroenergetycznych ujęto w normach PN-EN 50341-1 [1] oraz PN-EN 50341-2-22 [2]. Normy te zawierają konieczne uzupełnienia lub nawet modyfikacje zasad projektowania ujętych w Eurokodach. Specyfika wymagań dotyczy również fundamentów konstrukcji wsporczych. W szczególności obejmują one zasady oceny nośności najliczniejszej grupy fundamentów, tj. stóp grzybkowych stalowych słupów kratowych. Cechą znamioną tego typu fundamentów konstrukcji wsporczych linii napowietrznych jest odmienność od typowych fundamentów budynków i konstrukcji szkieletowych posadowionych na stopach, polegająca na tym, iż krytyczną wielkością warunkującą bezpieczeństwo posadowienia jest tutaj nośność stóp na wyciąganie. Zasad oceny nośności fundamentów wyciąganych nie sprecyzowano jednak w Eurokodach ujmujących zagadnienia geotechniczne, tj. PN-EN 1997-1 [3] i PN-EN 1997-2 [4]. Z uwagi na znaczną liczbę fundamentów słupów linii elektroenergetycznych zapewnienie nośności wyłącznie za pomocą przeciwwagi grawitacyjnej nie może być akceptowalne z uwagi na zbyt wysokie koszty. Racjonalne projektowanie stóp grzybkowych dla kratowych słupów elektroenergetycznych wymaga uwzględniania przy nośności na wrywanie dodatkowego oporu generowanego w ośrodku gruntowym na płaszczyźnie bocznej wyciąganej bryły fundament+grunt. Z reguły warunek nośności na wyciąganie fundamentów słupów linii napowietrznych jest warunkujący, gdyż stopień wyężenia stóp przy wciskaniu jest prawie zawsze niższy. W związku z tym poszukuje się rozwiązań zwiększających nośność na wyciąganie przy jednoczesnej minimalizacji kosztów. Jednym ze sposobów jest powiększenie powierzchni czynnej gruntu poprzez stosowanie nakładek na płytę dolną. W przypadku najpowszechniejszych grzybkowych żelbetowych stópów prefabrykowanych sto-

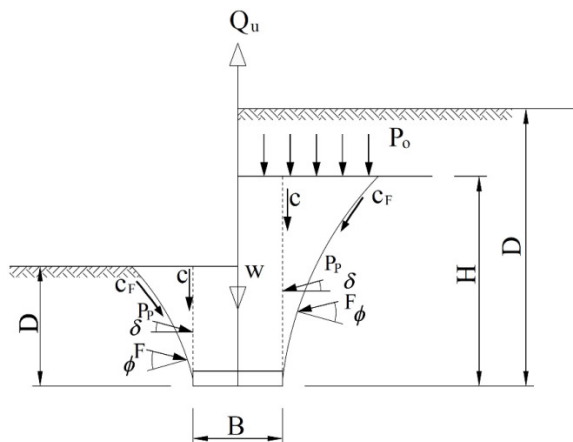
¹ Politechnika Częstochowska, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 3, 42-218 Częstochowa, e-mail: jaroslaw.paluszynski@pocz.pl, orcid id: 0000-0002-2434-3812

² Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach, ul. Rolna 43, 40-555 Katowice; ENPROM Sp. z o.o., ul. Taneczna 18C, 02-829 Warszawa, e-mail: biuro@stahlbau.com.pl, orcid id: 0000-0003-0331-4585

³ ENPROM Sp. z o.o., ul. Taneczna 18C, 02-829 Warszawa, e-mail: a.biernacka@enprom.pl

suje się również prefabrykowane żelbetowe płyty nakładkowe. Z uwagi na kontaktowy sposób mocowania ich do stopy grzybkowej płyty nakładkowe uczestniczą w przenoszeniu obciążeń tylko przy obciążeniach wyrywających. Dzięki temu, stosując standardowe prefabrykаты, można przy zapewnionej nośności na wiskanie dowolnie podnieść nośność na wyciąganie. Racjonalne rozwiązanie wymaga zbalansowania obu typów nośności stóp.

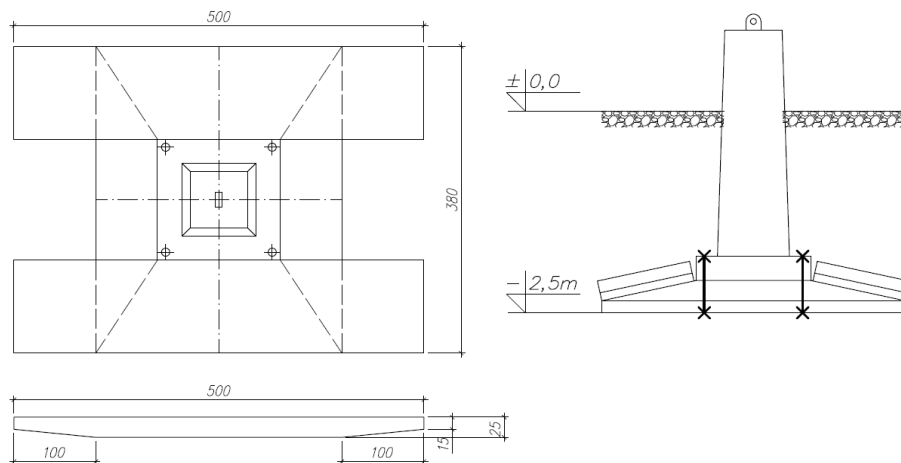
Asekuracyjną ocenę nośności stóp wyrywanych zaproponowano w normie PN-EN 50341-1 [1]. Jej zalecenia znacząco różnią się od zasad oceny nośności takich fundamentów ujętych w normie PN-B-03322 [5]. Norma PN-B-03322 [5] przez wiele lat była stosowana z powodzeniem w energetyce i prowadziła do bezpiecznego, lecz zarazem ekonomicznego doboru fundamentów. Brak awarii i katastrof budowlanych związanych z tymi posadowieniami zdecydował o wprowadzeniu do załącznika krajowego PN-EN 50341-2-22 [2] zalecenia dopuszczającego stosowanie dotychczasowych sprawdzonych modeli obliczeniowych. Tym samym, dochowując innych ogólnych zasad projektowania posadowień zgodnie z normą PN-EN 1997-1 [3], można w ocenie nośności stóp fundamentowych na wyrywanie posiłkować się modelem wprowadzonym do normy PN-B-03322 [5], tj. bazującym na modelu Meyerhoffa [6]. Schemat ideowy tego modelu przedstawiono na rysunku 1. Problemem w takim podejściu są jednak różnice formalne wynikające między innymi z odmiennych wartości częściowych współczynników bezpieczeństwa występujących w normach PN-EN 1997-1 [3] oraz PN-B-03322 [5].



Rys. 1. Schemat pracy fundamentu przy wyciąganiu wg [6]

Z uwagi na kluczowe znaczenie w energetyce oceny nośności fundamentów bezpośrednich poddanych obciążeniom wyrywającym podjęto projekt badawczy mający na celu zweryfikowanie rzeczywistej nośności takich fundamentów. Należy przy tym podkreślić, iż nie tylko w aktualnej normie PN-EN 50341-1 [1], ale również w wycofanej normie PN-B-03322 [5] nie podano zasad oceny nośności stóp grzybkowych z nakładkami. W praktyce obliczeniową nośność takich posadowień określało się, przyjmując zastępczy schemat obliczeniowy o równoważnej powierzchni płyty prostokątnej podstawy. W istocie nieregularny kształt rzutu fundamentu jednak mocno odbiega od tej idealizacji. Widok przykładowego rozwiązania konstrukcyjnego fundamentu stopowego z nakładkami płytowymi przedstawiono na rysunku 2. Rzeczywistą nośność przedmiotowej konstrukcji można ustalić najdokładniej tylko podczas badań poligonowych in situ. Należy przy tym podkreślić, iż przedmiotowe rozwiązanie, jakkolwiek znane, było dotychczas stosowane przy budowie linii 110 kV i 220 kV, lecz głównie poza granicami kraju (przeważnie na terenie krajów byłego ZSRR). W przypadku budowy linii 400 kV rozwiązanie to stanowi innowację wymagającą dokładniejszej weryfikacji. Prace badawcze prowadzone były w ramach realizacji zadań do projektu Enprom z puli NCBR Nr POIR.01.01.01-00-0789/17 pt. „Opracowanie nowego typoszeregu słupów energetycznych 400 kV oraz odpowiednich dla nich fundamentów, w tym fundamentów do zastosowania na gruntach o szczególnie niekorzyst-

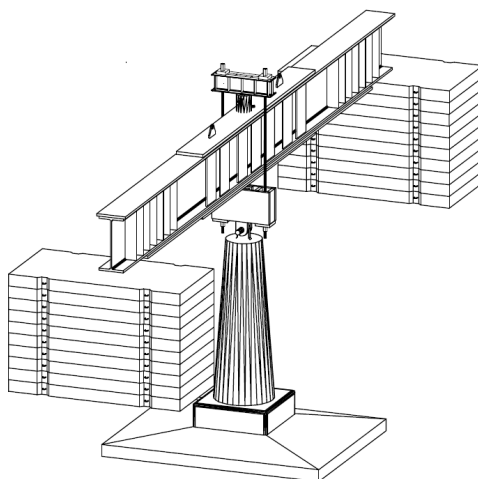
nych parametrach geotechnicznych”. Badaniom poligonowym poddano różne typy fundamentów stopowych, w tym serii konstrukcji przedstawionych na rysunku 2. Testy przeprowadzono na obiektach w skali naturalnej 1:1, w stosunku do fundamentów faktycznie stosowanych na liniach 400 kV. Wszystkie badania powtarzano w tych samych warunkach geotechnicznych trzykrotnie, prowadząc niezależną kontrolę stanu gruntów zasypowych. Projekt prowadzono we współpracy z Instytutem Dróg i Mostów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.



Rys. 2. Schemat konstrukcji fundamentu stopowego z nakładkami płytowymi [7]

2. Badania poligonowe fundamentów stopowych z nakładkami

Przedmiotem niniejszego artykułu jest opis badań fundamentów stopowych z nakładkami przeznaczonych dla kratowych słupów linii elektroenergetycznych 400 kV. Celem badań była ocena ich rzeczywistej nośności w gruncie na wrywanie. Schemat aksonometryczny stanowiska badawczego przedstawiono na rysunku 3. Na rysunku 4 pokazano widok ogólny elementów testowych, natomiast na rysunku 5 gotowe stanowisko badawcze z układem pomiarowym po zasypaniu fundamentów. Głębokość posadowienia stóp wynosiła 2,5 m.



Rys. 3. Schemat aksonometryczny stanowiska badawczego Piletest [8]



Rys. 4. Widok elementu testowego [7]



Rys. 5. Widok stanowiska badawczego [7]

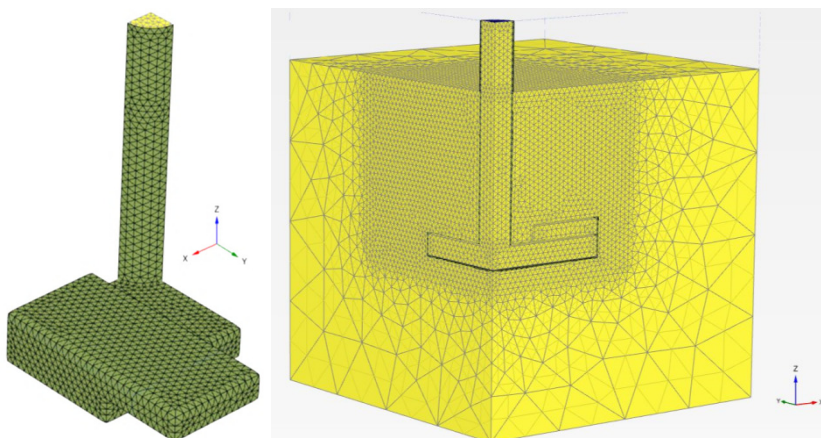
Seria badań obejmowała 3 testy fundamentów posadowionych w jednorodnych warunkach gruntowych. Do zasypów użyto gruntów niespoistych, określonych w badaniach jako piaski średnie. Zasyp układano zagęszczanymi warstwami miąższości 30-40 cm. Badania prowadzono zgodnie z wymogami normy PN-EN 61773 [9]. Podczas badań, których głównym celem była ocena nośności granicznej fundamentów, prowadzono również stosowne pomiary przemieszczeń. Norma PN-EN 61773 [9] precyzuje metodykę pomiarów nośności fundamentów, jak również proponuje kilka metod oceny nośności fundamentów na podstawie uzyskanych ścieżek równowagi statycznej. Wyznaczenie tych krzywych podczas badań wymagało dodatkowych pomiarów przemieszczeń fundamentu. Odczyty przemieszczeń rejestrowano czterema czujnikami indukcyjnymi o dokładności 0,01 mm w 5-minutowych odstępach oraz natychmiast po zmianie obciążenia. Pomiar sił był wykonywany za pomocą elektronicznego dynamometru umieszczonego między tłokiem siłownika a belką główną. Wyniki z czujników przemieszczeń oraz dynamometru rejestrowane były za pomocą komputera przemysłowego DataLogger.

Badania w każdym teście prowadzono aż do uzyskania granicznej siły w układzie pomiarowym, tj. gdy odczyty na manometrze siłownika wskazywały brak przyrostu siły przy rejestrowanych przyrostach przemieszczeń w określonych normą przedziałach czasowych. Tak określone siły graniczne w trzech próbach wyniosły kolejno: 1400 kN, 1400 kN oraz 1450 kN, średnio

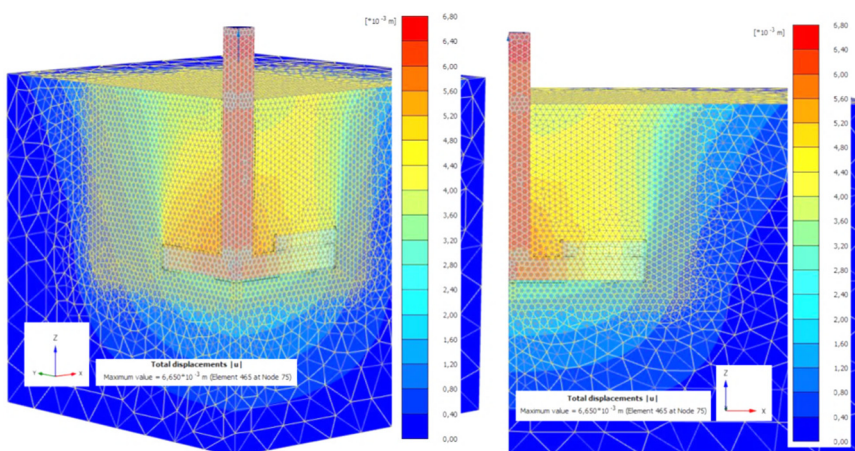
1416 kN. Ciągły pomiar sił i przemieszczeń pozwolił na zbudowanie statycznych ścieżek równowagi przedstawionych w punkcie 3.

3. Modelowanie MES fundamentów stopowych z nakładkami

Wyniki badań polowych skonfrontowano z rezultatami uzyskanymi z obliczeń metodą MES, posługując się programem PLAXIS 3D. Zbudowano modele objętościowe reprezentujące $\frac{1}{4}$ część badanego ustroju. Konstrukcję fundamentów zamodelowano elementami o własnościach liniowo-sprężystych odpowiadających betonowi C30/37. Ośrodek gruntowy zamodelowano elementami o własnościach sprężysto-plastycznych, bazujących na hipotezie Coulomba-Mohra o parametrach sprecyzowanych w Raporcie WIL PW [10]. Do obliczeń przyjęto następujące średnie parametry geotechniczne gruntów zasypowych zaklasyfikowanych do piasków średnich: moduł sprężystości 50 MPa, współczynnik Poissona 0,3, gęstość objętościowa 18,95 kN/m³, kąt tarcia wewnętrznego 35,5 stopnia, kąt dylatacji 5,5 stopnia, spójność 1 kPa. Na styku między elementami betonowymi i gruntem wykorzystano powierzchniowe elementy kontaktowe interferencyjne ze współczynnikiem redukcyjnym równym 0,7. Widok ogólny modelu MES wraz z siatkowaniem pokazano na rysunku 6, natomiast typowy schemat deformacji w fazie zniszczenia przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 6. Widok modelu i siatki MES



Rys. 7. Mapy deformacji dla fazy zniszczenia modelu MES

4. Analiza wyników

Wszystkie przeprowadzone próby charakteryzowały się ciągłym przyrostem przemieszczeń przy stałej lub lekko spadającej wielkości odczytywanej na mierniku na poziomie wartości siły maksymalnej, uznanej wówczas za graniczną. Otrzymane z badań ścieżki równowagi statycznej aproksymowano krzywymi gładkimi, niwelując zaburzenia wynikające ze skokowej zmiany przyrostów obciążeń aplikowanych zgodnie z wymogami normy PN-EN 61773 [9]. Norma ta przewiduje do określenia rzeczywistej nośności fundamentu na podstawie badań jedno z następujących przybliżeń w postaci:

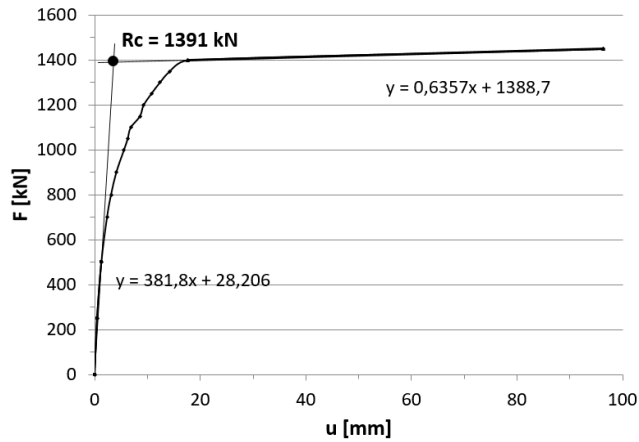
- metody stycznych przecinających się (nośność określa się jako obciążenie związane z przecięciem dwóch stycznych krzywej obciążenie-przemieszczenie, jednej reprezentującej zakresy sprężyste, drugiej plastyczne),
- metody logarytmicznej (nośność określa się przez punkt przecięcia prostych odcinków wykresów, w których współrzędne obciążenia-przemieszczenia są w skali logarytmicznej),
- metody modelu parabolicznego (nośność określa się wzorem $R_c = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{c_1 c_2}}$, gdzie wartości c_1 i c_2 oznaczają odpowiednio nachylenie linii wykresu i punkt przecięcia osi rzędnych na zmodyfikowany wykres ścieżki, gdzie na osi rzędnych odkładany jest iloraz pierwiastka kwadratowego przemieszczenia przez obciążenie),
- kryterium 90% (nośność określa obciążenie dające dwukrotnie większe przemieszczenie niż osiągnięte przy 90% obciążenia),
- metody modelu hiperbolicznego (nośność określa się wzorem $R_c = \frac{1}{c_1}$, gdzie wartość c_1 oznacza nachylenie linii wykresu zmodyfikowanej ścieżki, gdzie na osi rzędnych odkładany jest iloraz przemieszczenia przez obciążenie),
- metody nachylenia stycznych (nośność określa przecięcie linii równoległej do wyjściowego odcinka krzywej obciążenie-przemieszczenie, w odległości odpowiadającej przemieszczeniu 4 mm).

Z praktyki wiadomo, iż metody b) i f) prowadzą do znacznego zaniżenia nośności, natomiast metoda d) wymaga postępowania iteracyjnego, mało efektywnego praktycznie, dając jednak rezultaty zbliżone do metod a) i c). Sugestie w tym zakresie wprowadzono nawet wprost do normy PN-EN 61773 [9]. W zawiązku z tym oszacowania nośności w przedmiotowym projekcie dokonano, modyfikując krzywe nośności z badań i analiz numerycznych zgodnie z metodami a), c) i e). Odpowiednie wykresy i ich modyfikacje dla ścieżki równowagi otrzymanej z badań dla próby o sile maksymalnej 1450 kN zaprezentowano na rysunkach 8-10. Na podstawie odpowiednich krzywych określono szacowane nośności fundamentu zarówno dla ścieżek równowagi statycznej otrzymanych z badań poligonowych, jak i analiz numerycznych, stosując identyczne kryteria do odpowiadających sobie krzywych. Zestawienie wyników szczegółowych obliczeń podano w tabeli 1. W tabeli tej zamieszczono również wyniki obliczeń nośności nominalnych (tj. wyznaczonych dla charakterystycznych wartości parametrów geotechnicznych gruntów) określonych zgodnie z metodyką norm PN-EN 50341-1 [1] oraz PN-B-03322 [5] dla fundamentu zastępczego.

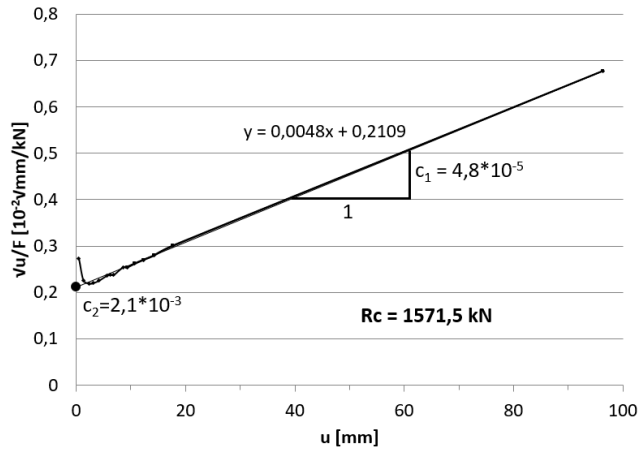
Tabela 1

Porównanie nośności uzyskanych z badań polowych, modelowania MES oraz metod analitycznych normowych

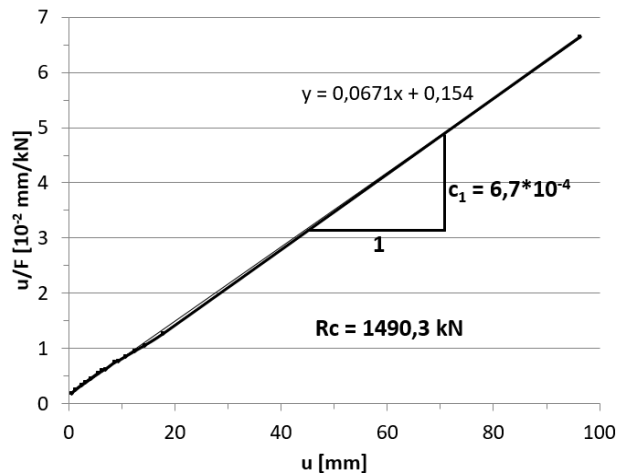
Poz.	Metoda	Nośność Badania polowe [kN]	Nośność MES [kN]
1	Metoda stycznych	1391	1205
2	Metoda modelu parabolicznego	1571,5	1377
3	Metoda modelu hiperbolicznego	1490,3	1511
4	PN-EN 50341-1 [1]	1302	
5	PN-B-03322 [5]	1432	



Rys. 8. Ocena nośności fundamentu metodą stycznych wg PN-EN 61773 [9]



Rys. 9. Ocena nośności fundamentu metodą modelu parabolicznego wg PN-EN 61773 [9]



Rys. 10. Ocena nośności fundamentu metodą modelu hiperbolicznego wg PN-EN 61773 [9]

5. Podsumowanie

Testy poligonowe pozwoliły dokonać następujących spostrzeżeń:

- w trakcie badań, podczas wrywania fundamentu, na powierzchni gruntu pojawiały się nieregularne pęknięcia, a grunt wokół fundamentu unosił się,
- po osiągnięciu siły granicznej następował ciągły przyrost przemieszczeń fundamentu w górę bez przyrostu odczytów sił,
- po odciążeniu grunt z fundamentem wracał praktycznie do stanu początkowego, nieregularne pęknięcia zamykały się, a uwidaczniały się regularne pęknięcia obwodowe wokół osi pionowej fundamentu w odległości około 1 m poza obrysem krawędzi podłużnej i około 0,5 m poza obrysem krawędzi poprzecznych płyt dolnych,
- ścięcie wrywanej bryły gruntu przebiegało pod kątem, jak sugeruje model z normy PN-B-03322 [5], a nie pionowo nad skrajem płyty, jak sugeruje norma PN-EN 50341-1 [1], przy czym część gruntu między płytami nakładkowymi również uległa uniesieniu, co pozwala na opracowanie modelu obliczeniowego fundamentów z nakładkami w postaci zastępczego schematu wyciąganej płyty jednolitej,
- żelbetowe fundamenty nie uległy żadnym uszkodzeniom, na wyciągniętych elementach testowych nie odnaleziono pęknięć ani zarysowań na powierzchniach, deformacji nie uległy również stalowe ucha, przez które poprzez sworzeń przekazywano obciążenia.

Można zauważyć na podstawie tabeli 1, iż nośność wyznaczona zgodnie z normą PN-EN 50341-1 [1] jest niższa o około 7% od oceny metodą stycznych, dającej dolne oszacowanie nośności z wybranych metod proponowanych przez normę PN-EN 61773 [9] i o około 21% od oceny metodą modelu parabolicznego wg tej normy. Jednocześnie jest ona również niższa od obliczonej zgodnie z normą PN-B-03322 [5] o wielkość około 10%.

Przeprowadzone badania wykazały doskonałe dopasowanie metody oceny nośności na wrywanie fundamentów stopowych zgodnie z normą PN-B-03322 [5]. Oszacowana zgodnie z nią nośność graniczna fundamentu równa 1432 kN różniła się tylko o około 1% od średniej wartości z badań równej 1416 kN. Jednocześnie w stosunku do oszacowania nośności z badań wg normy PN-EN 61773 [9] odchyłka ta zawierała się w przedziale od -4 do +3%, co również jest bardzo dobrym potwierdzeniem poprawności modelu oceny nośności granicznej fundamentów wrywanych zgodnie z normą PN-B-03322 [5].

Wyniki uzyskane metodą MES z modelu Coulomba-Mohra stanowią dolne oszacowanie nośności uzyskanej z badań.

Literatura

- [1] PN-EN 50341-1:2013. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 1: Wymagania ogólne.
- [2] PN-EN 50341-2-22:2016. Elektroenergetyczne linie napowietrzne prądu przemiennego powyżej 1 kV. Część 2-22: Krajowe warunki normatywne (NNA) dla Polski (oparte na EN50341-1:2012).
- [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-B-03322:1980. Elektroenergetyczne linie napowietrzne. Fundamenty konstrukcji wsporczych. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [6] Meyerhof G.G., Adams J.J., The ultimate uplift capacity of foundations, Canadian Geotechnical Journal 1968, V, 4.
- [7] Raport Enprom. Badania fundamentów grzybkowych. Enprom Sp. z o.o., Warszawa 2018.
- [8] Piletest Projekt próbnych obciążeń statycznych na wyciąganie stóp fundamentowych, Piletest Sp. z o.o., Bielsko-Biała 2018.
- [9] PN-EN 61773:2000. Elektroenergetyczne linie napowietrzne Badanie fundamentów konstrukcji wsporczych.
- [10] Raport WIL PW. Raport końcowy z nadzoru naukowego nad badaniami poligonowymi grzybkowych fundamentów stopowych pod słupy energetyczne 400 kV, Instytut Dróg i Mostów, Wydział Inżynierii Lądowej PW, Warszawa 2018.

Uplift capacity of tower foundations with plates of transmission lines

ABSTRACT:

The ultimate uplift capacity of foundations with special reference to transmission tower footings is evaluated. Special foundations with overlay plates were analysed. Full scale tests according to standard PN-EN 61773 were presented. The results were studied and compared with FEM models and requirements according to standards PN-EN 50341-1 and PN-B-03322.

KEYWORDS:

uplift foundations; lattice tower foundations; transmission tower foundations; in-situ testing