

Wybrane problemy projektowania fundamentów elektrowni wiatrowych

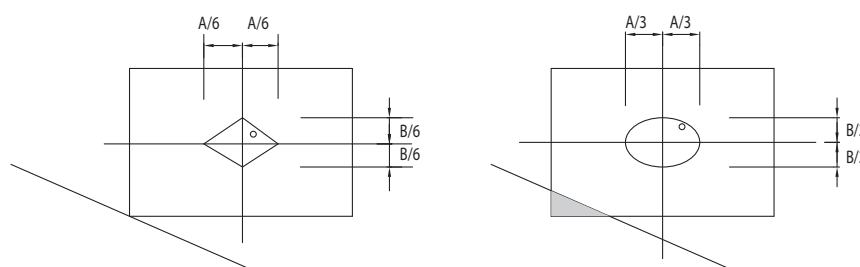
Dr inż. Maciej Minch, dr inż. Aleksander Trochanowski, Politechnika Wroclawska

1. Wprowadzenie

Rozwój ekologicznych metod pozyskiwania energii powoduje coraz większe zainteresowanie budową elektrowni wiatrowych na terenie Polski. Ostatnio powstają farmy wiatrowe na północy Polski w Karnicach i Karcinie. O ile dostawcą technologii i urządzeń są inwestorzy zagraniczni mający wieloletnie doświadczenia w budowie tego typu obiektów, to posadowienie musi być zaprojektowane zgodnie z polskimi normatywami przez projektanta posiadającego polskie uprawnienia. Aktualnie brak jest polskich normatywów bezpośrednio odnoszących się do posadowienia, obciążeń i budowy farm wiatrowych. Powoduje to określone problemy dla projektantów i trudności we współpracy z inwestorami zagranicznymi. Niniejszy artykuł jest próbą uporządkowania tej tematyki w oparciu o doświadczenia autorów przy projektowaniu fundamentów farm wiatrowych.

2. Wymagania dotyczące fundamentu

W przypadku posadowienia bezpośredniego wiatraków farm wiatrowych, o geometrii fundamentu w niewielkim stopniu decydują parametry podłoża gruntowego. Wobec dużych mimośrodków sił działających na fundament, z reguły wymiary fundamentu determinowane są warunkiem niedopuszczenia do odrywania fundamentu, czy bardziej restrykcyjnym wymogiem stosunku naprężeń maksymalnych do minimalnych w podłożu gruntowym.



Rys. 1. Opcje obliczeniowe programu Robot dla Eurocode7

Wobec braku polskich uregulowań normowych traktujących wprost o posadowieniu tego typu konstrukcji, przeanalizujemy wymogi innych norm w porównaniu do normy PN-81/B-03020 „Posadowienia bezpośrednie budowli” i normy PN-93/B-03201 – „Kominy obliczenia i projektowanie”.

ACI \ BS 8004:1986 \ CSA (USA)
Warunek ograniczający mimośród nie jest dostępny w wymienionych normach.

DTU 13.12 / Fascicule 62 Titre V (Francja)

Miarą definiującą odrywanie fundamentu dla normy Fascicule 62 Titre V jest efektywna powierzchnia kontaktu stopy z gruntem wyrażona procentowo (w odniesieniu do całkowitej powierzchni fundamentu). Kryteria procentowej powierzchni kontaktu fundament–grunt określone są w następujący sposób:

- SGN: 10%,
- SGU (dla kombinacji częstej): 100%,
- SGU (dla kombinacji rzadkiej): 75%.

Wartości te odpowiadają wymogom stawianym przez normę

FASCICULE. Dokument DTU 13.12 nie narzuca szczególnych wymagań dotyczących odrywania fundamentu. Kombinacje normowe dla DTU 13.12 nie wydzielają ze stanu SGU kombinacji częstych i rzadkich. Dostępne są jedynie dwa limity: odrębnie dla SGN i odrębnie dla SGU.

Eurocode7

Norma Eurocode7 narzuca specjalne wymagania dotyczące fundamentów obciążonych dużym mimośrodem (6.5.4), możliwe jest zaprojektowanie fundamentu z uwzględnieniem granicznego warunku położenia wypadkowej sił $1/3$ długości lub szerokości 6.5.4 (1). Norma nie określa ostrzejszego warunku niedopuszczenia do odrywania, co zaimplementowane jest w niektórych programach komputerowych np. Robot (RSA Autodesk). Z uwagi na niebezpieczny wpływ odrywania fundamentu, możliwe jest wprowadzenie w programie ostrzejszego warunku położenia wypadkowej, który zapobiega pojawianiu się odrywania – $1/6$ długości lub szerokości, co odpowiada rdzeniowi przekroju. Warunek ten może być

wykorzystany podczas projektowania fundamentów dla bardziej odpowiedzialnych budowli.

SNiP 2.02.01-83 (Rosja)

Warunek ograniczający mimośród nie jest dostępny w wymienionej normie.

PN-81/B-03020 (Polska)

Dla polskiej normy obciążenia SGN są podzielone na dwie grupy:

- grupa obciążeń długotrwałych,
- grupa obciążeń całkowitych.

Każda grupa obciążeń posiada możliwość określania położenia wypadkowej obciążenia względem podstawy fundamentu.

Dla obu tych grup możemy użyć następujących ograniczeń położenia mimośrodu:

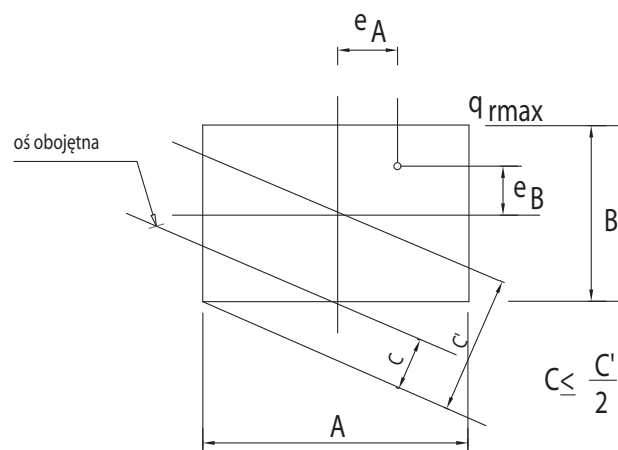
Rdzeń 0

Położenie wypadkowej w rdzeniu 0 zapewnia dobór takiego kształtu podstawy fundamentu, aby mimośród obciążenia dla zginania jednokierunkowego nie przekraczał $1/30$ wymiaru podstawy fundamentu. Dla takiego przypadku rozkład naprężeń pod stopą, literatura dopuszcza stosowanie uproszczonego sposobu obliczeń jak dla obciążenia osiowego w połączeniu z dodatkowym współczynnikiem bezpieczeństwa.

Rdzeń I

Warunkiem, jaki spełnia rdzeń I jest uniknięcie powstania szczeliny pod podstawą fundamentu, czyli pojawienia się odrywania. W tym przypadku mimośród nie może przekraczać wartości $A/6$ i $B/6$. Oznacza to, że oś obojętna nie przecina się z podstawą fundamentu. „...dla budowli wysokich (gdy wypadkowa zaczepiona jest na wysokości większej niż $3B$) oraz fundamentów słupów hal obciążonych suwnicami, wypadkowa sił od obliczeniowych, obciążeń stałych oraz zmiennych długo- i krótkotrwałych nie może wychodzić poza rdzeń podstawy fundamentu...” 2.3.d.

Rys. 2. Położenie wypadkowej wg PN-81/B-03020



Rdzeń II

Rdzeń uogólniony został wprowadzony z uwagi na ograniczenie dopuszczalnej rozwarości szczeliny pod fundamentem w przypadku występowania odrywania podstawy stopy 2.3 a. Norma dopuszcza powstanie szczeliny między podłożem i podstawą fundamentu, której zasięg C nie może być większy od połowy odległości C' między prostą przechodzącą równoległe do osi obojętnej przez środek ciężkości całej podstawy, a skrajnym punktem podstawy przeciwnym do punktu, w którym występuje maksymalna wartość naprężenia q_{rmax} . Dlatego też dopuszczalna, względna wartość szczeliny dla II rdzenia wynosi 0.5 i wynika z proporcji C/C' . Dla prostego przypadku przy $eB = 0$, $C = A/4$, a $C' = A/2$.

PN-93/B-03201

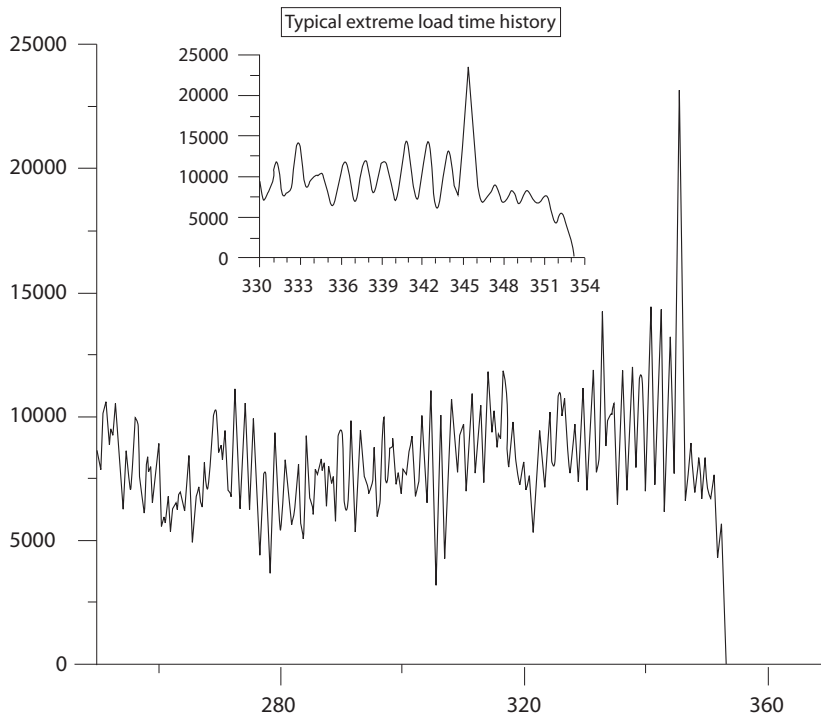
Norma w punkcie 5.7 nakłada dodatkowo warunek dla obciążeń charakterystycznych, aby stosunek naprężeń maksymalnych do minimalnych pod fundamentem był mniejszy od 5.

3. Obciążenia

W przypadku obciążeń na fundament, dane te podaje producent urządzenia w swoistego rodzaju danych techniczno-ruchowych. Należy zaznaczyć, że pod pojęciem urządzenia rozumiemy sam generator, jak również wieże. W informa-

cji podane są więc bezpośrednio oddziaływania na fundament dla danego generatora, określonej konstrukcji maszty i lokalizacji [2, 4]. Dane te opracowywane są przez dostawcę, producenta urządzenia na podstawie pomiarów i norm [1]. Pozostaje problem interpretacji tych informacji w nawiązaniu do naszych uregulowań normowych. Norma [1] rozróżnia osiem schematów obciążeń, w każdym schemacie po kilka kombinacji obciążeń dla różnych przypadków eksploatacji (postój, praca, transport, rozruch i inne). Dla projektanta fundamentu istotne są DLC od 1.1. do 1.6. (Design Load Case). Można rozróżnić dwa podstawowe przypadki obciążenia wiatrem. Jest to obciążenie eksploatacyjne długotrwałe o powtarzalności 5 lat, rys. 3.

Dane statystyczne wg [1] opracowywane są na poziomie ufności 90%. Na rysunku 4 pokazano maksymalne obciążenie eksploatacyjne dla poziomu ufności 90% i 95%, dla przykładowego fundamentu w Karnicach. Drugi przypadek obciążenia to obciążenie wyjątkowe krótkotrwałe (około 1-2 sek.) o powtarzalności 50 lat. Powstaje pytanie, jakim warunkom musi odpowiadać fundament dla tych dwóch przypadków obciążenia. Wydaje się, że dla przypadku obciążenia eksploatacyjnego fundament musi spełniać wszystkie wymogi normowe łącznie z wymogiem normy PN-93/B-03201, tak aby stosunek naprężeń maksymal-



Rys. 3. Typowy rozkład momentu w czasie, w poziomie fundamentu.

nych do minimalnych pod fundamentem był mniejszy od 5. Dla obciążeń wyjątkowych można zrezygnować z restrykcyjnego warunku normy PN-93/B-03201, zachowując warunek pozostawiania wypadkowej w rdzeniu I.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę, że ilość betonu w fundamencie to kilkaset m³, a stali

kilkadziesiąt ton, koszt wykonania fundamentu pod turbinę wiatrową jest niebagatelny. Zrozumiałe jest więc dążenie inwestora do optymalizacji rozwiązania. O ile projektanci inwestora bez większych oporów akceptują niedopuszczenie do odrywania, pomimo że EC7 nie wprowadza takiego warunku, to warunek normy PN-93/B-03201 jest dla nich trudny do zaakceptowania. Dodatkowo polscy projek-

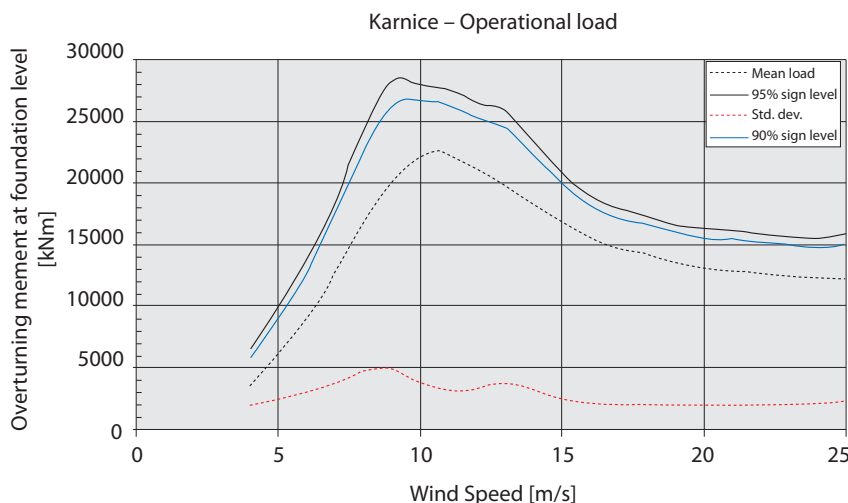
tanci często przyjmują do obliczeń fundamentu obciążenia wyjątkowe krótkotrwałe, co powoduje większe zużycie betonu, o około 50–100 m³ oraz zwiększenie o kilka ton zużycia stali zbrojeniowej, w stosunku do projektów inwestora. To wszystko prowadzi do niezadowolenia inwestora z projektów fundamentów.

Na podstawie przedstawionych powyżej analiz wydaje się, że projekt fundamentu powinien spełniać następujące warunki:

- Dla obciążeń eksploatacyjnych – warunek braku odrywania dla obciążeń obliczeniowych, warunek $q_{max}/q_{min} < 5$ dla obciążeń charakterystycznych,
- Dla obciążeń wyjątkowych – pozostanie wypadkowej w rdzeniu I ewentualnie w rdzeniu II, wymiarowanie zbrojenia,
- Określenie obciążeń eksploatacyjnych na poziomie ufności 95%.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEC61400-1 Wind turbines, part 1: Design requirements, third edition 2005–08
- [2] Karnice Wind Farm, Design of foundations Guidelines for design, Dong Energy Power A/S, 4 December 2008
- [3] Offshore Standard DNV-OS-J101, DESIGN OF OFFSHORE WIND TURBINE STRUCTURES, October 2007
- [4] Gjerding J. B., Karnice Load description, 08-12-2008
- [5] Eurocode 7: Geotechnical design –Part 1: General rules
- [6] ACI \ BS 8004:1986 \ CSA (USA) - Code of practice for foundations
- [7] DTU 13.12 / Fascicule 62 Titre V (Francja) – Fondations profondes
- [8] SNiP 2.02.01-83 (Rosja) - Footing of buildings and structures
- [9] PN-81/B-03020 (Polska) - Grunty budowlane. Posadowienie bezpośrednie budowli. Obliczenia statyczne i projektowanie
- [10] PN-93/B-03201 - Konstrukcje stalowe - Kominy – Obliczenia i projektowanie



Rys. 4. Maksymalne obciążenie eksploatacyjne.