dr inż. Rafał Szydłowski [1)*]
mgr inż. Małgorzata Mieszczak[1)]

Koncepcja dwustumetrowej wieży z fibrobetonu sprężonego pod turbinę wiatrową

Conceptual design of 200 m high fibre reinforced concrete tower for wind turbine

DOI: 10.15199/33.2015.09.37

(Oryginalny artykuł naukowy)

Streszczenie. W przypadku pozyskiwania energii wiatrowej duży wpływ na wydajność turbiny ma jej wysokość ponad terenem. W świecie stosowane są wieże o przekroju rurowym do wysokości 120 m. Większą wysokość (max. 160 m) osiągnięto, stosując stalowe konstrukcje kratowe. W Politechnice Krakowskiej opracowano koncepcję wieży z fibrobetonu sprężonego pod turbinę zainstalowaną na wysokości 200 m. W artykule przedstawiono podstawowe założenia konstrukcyjno-materiałowe i technologiczne, wyniki obliczeń modelowych oraz wnioski.

Słowa kluczowe: fibrobeton, kabel sprężający, turbina wiatrowa.

Abstract. The efficiency of the wind turbine is strongly influenced on its height above the ground. Closed tube cross-section towers are used to the maximum height of 120 m. The most height is achieved by using steel truss structure (max. 160 m). The conceptual project of the tower made of prestressed fibres reinforced concrete for the wind turbine installed 200 m over the ground was prepared at Cracow University of Technology. This paper presents the structural and technological assumptions, analysis results and conclusions.

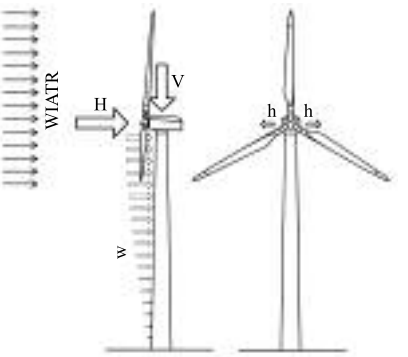
Keywords: fibre reinforced concrete, prestressing cable, wind turbine.

Wzrost zapotrzebowania na wysokowydajne źródła energii odnawialnej wymaga poszukiwania coraz doskonalszych rozwiązań technicznych. W przypadku elektrowni wiatrowych zdolności wytwórcze turbiny zwiększają się wraz ze wzrostem wysokości ponad powierzchnię terenu lub morza. W świecie konstruowane są coraz większe łopaty i coraz wyższe wieże pod turbiny. Średnica wirnika osiągnęła już 154 m, natomiast wysokość całego zespołu 210 m.

Wieże o zamkniętych przekrojach rurowych (ze względu na trudny transport prefabrykatów) konstruuje się do wysokości 120 m (zasadnicza część wieży jest z betonowych prefabrykatów sprężonych, najwyższe 20 ÷ 30% z rury stalowej). W Politechnice Krakowskiej opracowano koncepcję wieży o wysokości 200 m, przewidzianej do wykonania w całości z betonu na mokro. Zastosowano zbrojenie rozproszone (fibrobeton) oraz wewnętrzne sprężenie pionowe.

Podstawowym obciążeniem wieży jest siła pozioma na szczycie od oporu aerodynamicznygo wirnika i gondoli (H) – rysunek 1.

[1)] Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej
[*)] Autor do korespondencji:
e-mail: rszydlowski@pk.edu.pl



Rys. 1. Obciążenia działające na wieżę (opis w tekście)
Fig. 1. The loads acting on tower (according to text)

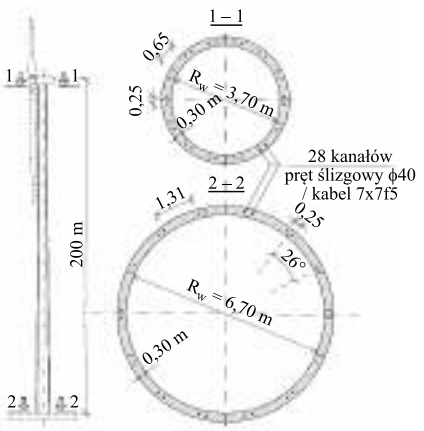
Ponadto na szczycie wieży działa siła dynamiczna, prostopadła do kierunku wiatru, o zmiennym znaku wywołana wzbudzeniem wirowym (h). Jej udział w pracy giętnej wieży jest wielokrotnie mniejszy od statycznej siły H. Dodatkowo należy uwzględniać obciążenie poziome wiatrem samej wieży w oraz pozytywny efekt obciążenia pionowego od wirnika i gondoli V.

Charakterystyka fibrobetonu

Beton ze zbrojeniem rozproszonym ma lepsze właściwoście mechaniczne w porównaniu z betonem zwykłym. Włókna wg [1] redukują skurcz o 30 – 50% oraz zwiększają: wytrzymałość na ściskanie i docisk o 10 ÷ 30%, wytrzymałość na rozciąganie o 20 ÷ 40% i wytrzymałość na zginanie o 30 ÷ 70%. Nie stwierdzono jednak wpływu włókien na moduł sprężystości betonu. Wyniki badań odporności zmęczeniowej przy ściskaniu wskazują na znikomy wpływ włókien. W przypadku rozciągania osiowego wytrzymałość zmęczeniowa wynosiła 65 – 70% wytrzymałości doraźnej (dla betonu zwykłego wynosi ok. 50%).

Podstawowe założenia konstrukcyjne i technologiczne

Głównym założeniem było opracowanie monolitycznej wieży betonowej wykonanej w technologii deskowań ślizgowych, pozbawionej tradycyjnych wkładek zbrojeniowych. Zastosowano jedynie zbrojenie rozproszone oraz pionowe jednoetapowe sprężanie, po wykonaniu całej konstrukcji. Z tego względu fibrobetonowy trzon powinien znieść działanie wiatru bez udziału sprężenia. Wstępne oszacowania wykazały, iż naprężeń dopuszczalnych dotrzyma się, gdy średnica trzonu w utwierdzeniu wyniesie ok. 7,0 m, a grubość ścianki 300 mm (rysunek 2). Założono beton klasy C50/60 zawierający 1,5% włókien stalowych (f_{ctm} wg [2] wynosi 6,8 MPa). Sprężenie pionowe stanowi 28 kabli siedmiosplotowych (7×7ϕ5) o f_{pk} = 1860 MPa. Kable rozmieszczono w środku grubości ściany,



Rys. 2. Geometria wieży
Fig. 2. Tower geometry

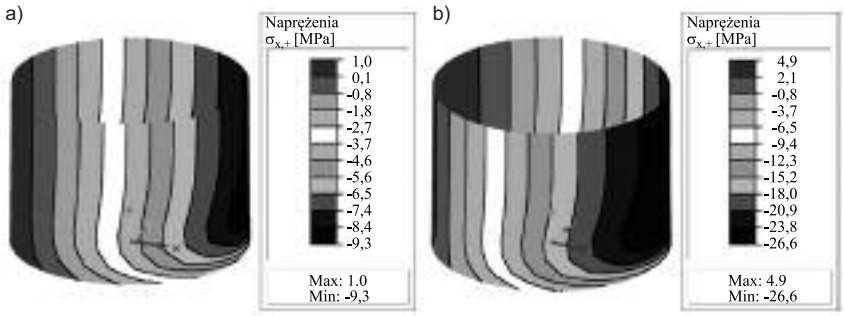
dwójkami co 26°. Jako kanały kablowe wykorzystano kanały prętów nośnych deskowania ślizgowego.

Obliczenia modelowe

Analizę statyczno-wytrzymałościową wieży przeprowadzono w programie RFEM. Zastosowano czterowęzłowe elementy powierzchniowe o wymiarach ok. 0,5 × 0,5 m. Do analizy przyjęto turbinę ENERCON E126/7580 kW o średnicy wirnika 126 m i masie 580 t. Założono, że szczytowa prędkość wiatru wynosi 45,9 m/s, a ciśnienie wiatru na wysokości 200 m – 1,73 kPa. Ponadto przyjęto:

- statyczną siłę poziomą od oporu aerodynamicznego – 479,3 kN;
- siłę poziomą na szczycie od wzbudzeń wirowych, o zmiennym znaku – 8 kN;
- obciążenie wieży ciśnieniem wiatru zgodnie z [5];
- moment zginający wywołany siłą pionową działającą na odkształconej od wiatru wieży (wychylenie 2,02 m);

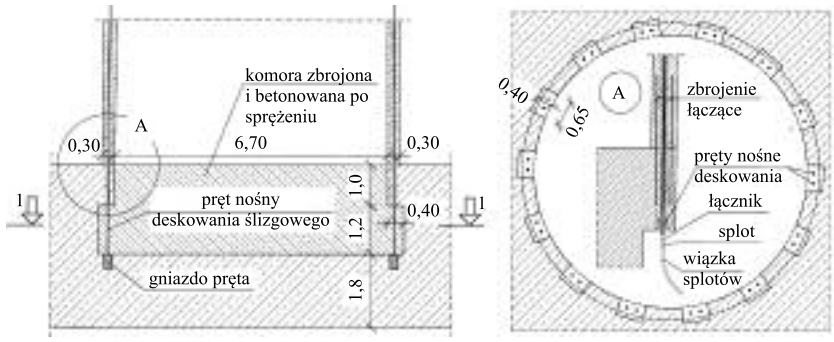
W analizie rozważono trzy sytuacje obliczeniowe: montażową, początkową i użytkową. W sytuacji montażowej przyjęto ciężar wieży oraz działanie wiatru na wieżę, w sytuacji początkowej założono działanie wszystkich obciążeń oraz siły sprężającej po stratach doraźnych, w sytuacji użytkowej przyjęto komplet obciążeń i trwałą siłę sprężającą. W analizie dynamicznej oszacowano pierwszą częstość drgań własnych. Otrzymano 0,127 Hz dla wieży w sytuacji montażowej oraz 0,044 Hz – wieży sprężonej z turbiną na szczycie (580 t). Na rysunku 3 przedstawiono wyniki naprężeń pionowych w przekroju przy fundamencie w sytuacji montażowej (rysunek 3a) oraz użytkowej (rysunek 3b). W sytuacji montażowej największe naprężenie ściskające wynosi -9,3 MP, a rozciągające +1,0 MPa. W sytuacji użytkowej otrzymano wartości -26,6 MPa oraz +4,9 MPa. Największe wychylenie górnego punktu od pionu wynosi 2,02 m (1/100 wysokości), a kąt obrotu górnej korony wieży to 1,1°.



Rys. 3. Naprężenia pionowe w utwierdzeniu w sytuacji montażowej (a) oraz użytkowej (b)
Fig. 3. The fixing cross-section vertical stresses in the in montage (a) and final (b) design situations

Wybrane szczegóły konstrukcyjne

Na rysunku 4 przedstawiono propozycję strefy zamocowania wieży w fundamencie. W płycie fundamentowej zaproponowano wykonanie komory montażowej pod wieżą o średnicy 6,70 m i głębokości 2,2 m. W komorze tej znajduje się 14 prostopadłościennych wcięć pod ścianą wieży, umożliwiających osadzenie prętów deskowania, wprowadzenie cięgien, montaż zakotwień oraz naciąg kabli i iniekcję kanałów. Po zabetonowaniu ściany pręty należy wyciągnąć z kanałów. Zabieg ten można wykorzystać do wprowadzenia do kanałów splotów sprężających. W tym celu niezbędne będzie skonstruowanie odpowiedniego łącznika gwintowanej końcówki pręta ze splotami (rysunek 4 – szczegół A). W ten sposób wyciągany w górę pręt będzie równocześnie wciągał sploty do kanału kablowego. Sprężanie oraz iniekcję można będzie również przeprowadzić od dołu, wykorzystując wnęki pod ścianą.



Rys. 4. Koncepcja wykonania strefy zamocowania wraz z propozycją wprowadzenia cięgien do kanałów (szczegół A)
Fig. 4. Conception of fixing area as well as the idea of tendons insertion (detail A)

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, iż:

- w najbardziej wytężonym przekroju podporowym wieży naprężenia ściskające i rozciągające mieszczą się w dopuszczalnych granicach;
- w przypadku założonej geometrii i warunków obciążeniowych możliwe jest wykonanie wieży o wysokości 200 m bez tradycyjnego zbrojenia zwykłego i sprężenie jej po ukończeniu w jednym etapie;
- kąt obrotu korony wieży przy maksymalnym wychyleniu (2,02 m) wynosi zaledwie 1,1°, co pozwoli na użytkowanie turbiny bez dodatkowych systemów stabilizujących.

Literatura

[1] Zych T.: Współczesny fibrobeton – możliwość kształtowania elementów konstrukcyjnych i form architektonicznych, Czasopismo techniczne, Z. 1-B/2010.
[2] RILEM TC162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. „Materials and Structures", No. 36, 2003.
[3] Glinicki. M. A.: Beton ze zbrojeniem strukturalnym, Materiały XXV Ogólnopolskich Warsztatów Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk 2010.
[4] RILEM TC162-TDF: Test and design methods for steel fibre reinfo-rced concrete, „Materials and Structures", No. 36, 2003.
[5] PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4: Oddziaływania ogólne – Oddziaływania wiatru.

Przyjęto do druku: 01.08.2015 r.