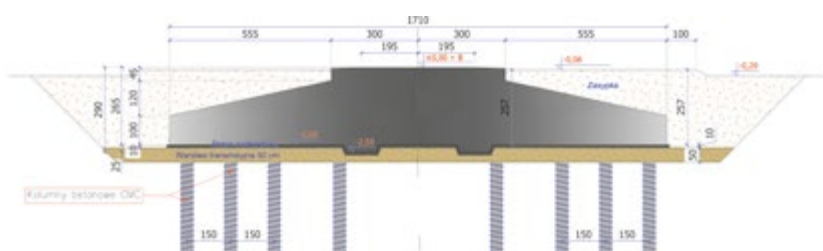


Projekt i realizacja wzmocnienia podłoża pod fundamentami turbin farmy wiatrowej Słupia

tekst: **TOMASZ PILARSKI, RAFAŁ KĘPA, DANIEL DALAK**, Menard Polska Sp. z o.o.

Farma wiatrowa Słupia znajduje się w województwie łódzkim, w powiecie skierniewickim, ok. 1 km na północny wschód od miejscowości Słupia oraz w okolicy miejscowości Gzów. Inwestycja dotyczy budowy 12 turbin wiatrowych o łącznej mocy 24 MW. Pod 11 turbinami wykonano wzmocnienie podłoża gruntowego w technologii kolumn przemieszczeniowych CMC.



Ryc. 1. Przekrój poprzeczny przez fundament turbiny wiatrowej [1]

Podstawowe parametry pojedynczej turbiny są następujące:

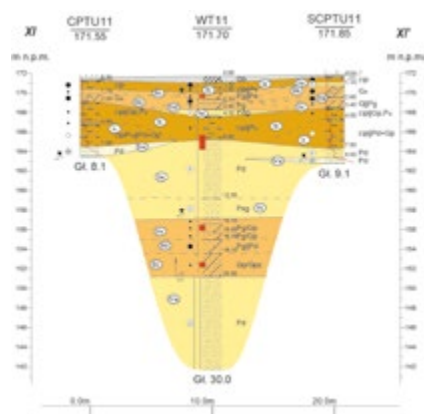
- wysokość wieży: 105 m,
- średnica wirnika: 90 m,
- moc znamionowa: 2,0 MW,
- typ turbiny: V90,
- producent turbiny: Vestas.

Turbiny wiatrowe zostały posadowione na fundamentach żelbetonowych o średnicy 17,1 m, 18,5 m oraz 20,2 m. Poziom posadowienia wynosi -2,65 m poniżej projektowanego poziomu terenu (ryc. 1).

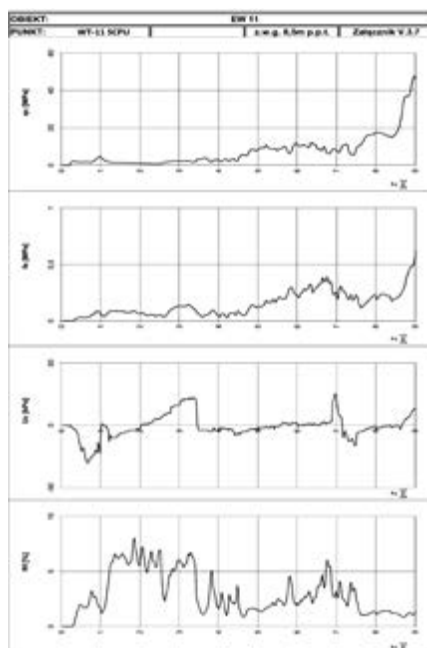
Warunki gruntowo-wodne

W poziomie oraz bezpośrednio poniżej poziomu posadowienia turbin występują grunty spoiste. Grunty te litologicznie są wykształcone jako gliny piaszczyste, gliny

oraz piaski gliniaste. Występują w stanie plastycznym, twaroplastycznym oraz półzwartym (ryc. 2). Stopień plastyczności I_L wynosi od 0,00 do 0,40. Opór na stożku q_c równa się od 1 do 4 MPa (ryc. 3). Pod warstwą gruntów spoistych występują grunty niespoiste (piaski drobne i średnie). Są one średnio zagęszczone i zagęszczone. Stopień zagęszczenia I_d wynosi od 0,4 do 0,9. Opór na stożku q_c jest w przedziale od 6 do 30 MPa.



Ryc. 2. Przykładowy przekrój geotechniczny [2]



Ryc. 3. Przykładowe sondowanie CPTU [2]

Woda gruntowa ma charakter swobodny i związana jest z przypowierzchniowymi soczewkami gruntów niespoistych.

Wymagania dotyczące podłoża gruntowego pod fundamentami turbin

Przy projektowaniu wzmocnienia podłoża gruntowego pod tego typu obiektami należy uwzględnić specyfikę pracy turbiny. Oprócz oddziaływań statycznych przekazywanych na podłożę gruntowe występują także oddziaływania dynamiczne (cykliczne). Szczegółowe wymagania podawane są przez producenta turbiny oraz projektanta fundamentu. W przypadku farmy wiatrowej Słupia posadowienie fundamentów turbin wiatrowych na wzmocnionym podłożu miało zapewnić spełnienie poniższych wymagań:

- Minimalna statyczna i dynamiczna sztywność gruntu:
 $C_{stat,vert} = 4,97-8,07 \text{ MN/m}^3$, $C_{dyn,vert} = 23,59-35,19 \text{ MN/m}^3$;
- Minimalny statyczny i dynamiczny moduł okształcenia:
 $E_{s,stat} = 40-55 \text{ MN/m}^2$, $E_{s,dyn} = 190-240 \text{ MN/m}^2$;
- Nośność podłoża po wzmocnieniu:
 $160-243 \text{ kN/m}^2$.

Po analizie wymienionych wymagań oraz warunków gruntowo-wodnych jako technologię wzmocnienia wybrano betonowe kolumny przemieszczeniowe CMC wraz z warstwą transmisyjną zbudowaną z kruszywa naturalnego.

Technologia kolumn przemieszczeniowych CMC

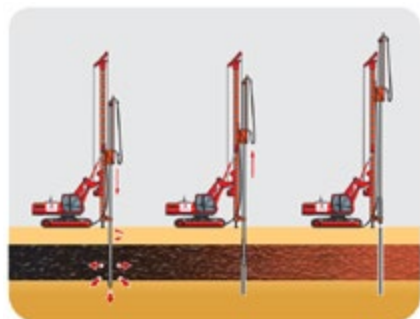
Technologia przemieszczeniowych kolumn betonowych CMC to jedna

z najpopularniejszych obecnie metod służących do wzmocniania słabonośnego podłoża gruntowego. W odróżnieniu od kolumn żwirowych lub kolumn DSM, których stateczność oraz wytrzymałość zależy w głównym stopniu od parametrów gruntu wzmocnianego, materiał kolumn CMC jest praktycznie niezależny od parametrów podłoża gruntowego. Kolumny CMC przy zachowaniu odpowiednich reżimów technologicznych mogą być wykonywane nawet w gruntach organicznych o wytrzymałości na ścinanie w warunkach bez odpływu $S_u \geq 15$ kPa.

Do wykonywania kolumn CMC stosowany jest specjalistyczny świder przemieszczeniowy (ryc. 4), który przemieszcza grunt w kierunku poziomym do osi otworu. W momencie, gdy świder osiągnie głębokość określoną w projekcie wykonawczym, następuje pompowanie mieszanki betonowej pod odpowiednim ciśnieniem, zależnym od warunków gruntowych (ryc. 5). Iniekcja materiału kolumny jest wykonywana równoległe z podciąganiem świdra do góry, co w połączeniu z jego pełnym kształtem eliminuje możliwość uszkodzenia ścian otworu podczas formowania kolumn. Nie dochodzi do mieszania gruntu z podawanym materiałem. Kolumny formowane są za pomocą maszyn wiertniczych o wysokim momencie obrotowym, rzędu 200–400 kNm, oraz nacisku statycznym rzędu 150–200 kN.



Ryc. 4. Świder przemieszczeniowy CMC [3]



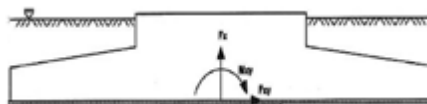
Ryc. 5. Proces instalacji kolumn przemieszczeniowych CMC [3]

Zasadą wzmocnienia podłoża kolumnami CMC jest stworzenie kompozytu gruntu i kolumn, współpracujących jako jednolita struktura o zwiększonej nośności. Zaletą technologii przemieszcze-

niowych jest maksymalne ograniczenie urobku w trakcie formowania kolumn, co znacząco zwiększa sztywność otaczającego gruntu. Efekt poprawy parametrów gruntowych jest pomijany w przypadku projektowania tego typu wzmocnienia, co stanowi dodatkowy zapas bezpieczeństwa.

Projektowanie

Według ICE 61400-1, żywotność turbiny wiatrowej wynosi 20 lat. W tym okresie mogą wystąpić następujące warianty pracy konstrukcji: montaż, demontaż, uruchomienie, produkcja energii, wiatr ekstremalny (50-letni, występowanie pięć razy na 231 mln cykli), awaria itd. Na podstawie tych wariantów wyznaczane są oddziaływania przekazywane na podłoże gruntowe, w postaci siły pionowej F_z , siły poziomej F_{xy} oraz momentów skręcającego M_r oraz wywracającego M_{xy} (ryc. 6).

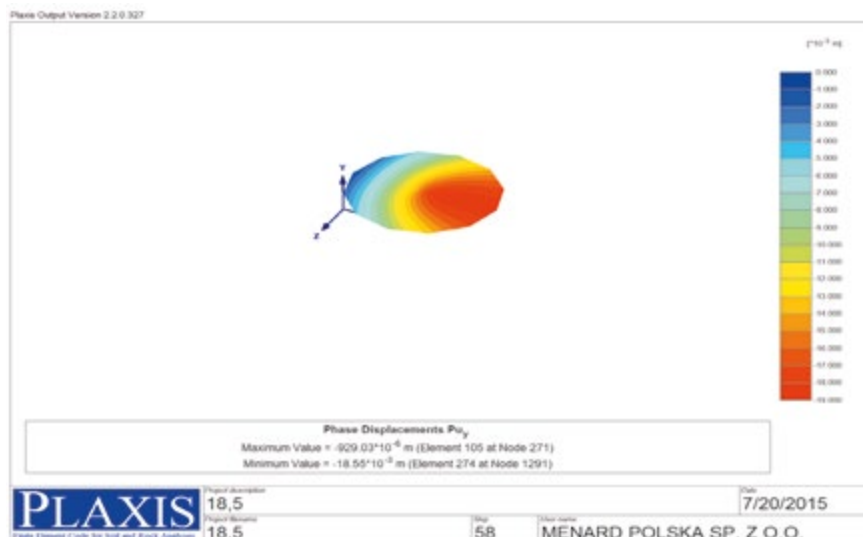


Ryc. 6. Oddziaływania przekazywane na podłoże gruntowe [4]

Wyróżniamy dwa główne przypadki obliczeniowe LC1 – faza normalnego użytkowania, oddziaływania długotrwałe oraz LC3 – warunki ekstremalne. Na podstawie doświadczeń autorów, najczęściej głównym kryterium wymiarującym jest przypadek pierwszy, dla którego należy tak dobrać fundament, aby nie wystąpiło jego odrywanie. Dla tego warunku

weryfikuje się również dynamiczną sztywność obrotową. Analiza ta ma na celu wykluczenie możliwości powstania rezonansu [5]. W przypadku wysokiego poziomu wody gruntowej należy także uwzględnić możliwość wystąpienia wyporu wody jako oddziaływania destabilizującego, które w większości przypadków będzie decydowało o wielkości oraz kształcie fundamentu turbiny.

Dla omawianej farmy wiatrowej obliczenia współpracy układu fundament – warstwa transmisyjna – kolumny przeprowadzono dla układu przestrzennego 3D z wykorzystaniem metody elementów skończonych dla zaimplementowanych praw konstytutywnych, odpowiednich do rozwiązywania zagadnień geotechnicznych. Jako reprezentatywny dla ośrodka gruntowego przyjęto model idealnie sprężysto-plastyczny z warunkiem ścicia Mohra-Coulomba. Proces obliczeniowy polegający na dobraniu rozstawów oraz długości kolumn przeprowadzono kilkakrotnie, doprowadzając do spełnienia wymagań stawianych przez producenta i projektanta konstrukcji fundamentu. Wysokość warstwy transmisyjnej zaprojektowano w sposób, który zminimalizował oddziaływanie naprężeń ścinających przekazywanych na głowice kolumn oraz umożliwił zmaksymalizowanie udziału gruntu pomiędzy kolumnami w przenoszeniu obciążeń przekazywanych przez fundament turbiny. Rycina 7 przedstawia wyniki analizy przemieszczeń pionowych fundamentu turbiny posadowionej na wzmocnionym podłożu gruntowym z wykorzystaniem kolumn betonowych CMC.



Ryc. 7. Przemieszczenia fundamentu posadowionego na wzmocnionym podłożu kolumnami CMC [1]

Realizacja

Budowa farmy wiatrowej jest wymagającym logistycznie przedsięwzięciem. Poszczególne turbiny w większości przypadków położone są na terenach rolniczych, tj. polach ornych, łąkach, nieużytkach, do których należy doprowadzić infrastrukturę drogową oraz energetyczną. Teren budowy i lokalizacje poszczególnych turbin wymagają zapewnienia odpowiedniej powierzchni terenu w celu wykonania wykopu oraz przygotowania zaplecza i placów składowych. Niezwykle ważne przed rozpoczęciem prac jest ustalenie odpowiedniego harmonogramu robót z dokładną kolejnością wykonywania turbin, przygotowanie platform roboczych, miejsca pod montaż i demontaż maszyn wiertniczych oraz miejsca na usytuowanie zaplecza socjalno-magazynowego dla pracowników.

Na omawianej inwestycji prace wykonywane były za pomocą maszyny Bauer BG20H, wyposażonej w świder przemieszczeniowy CMC o średnicy 400 mm (ryc. 8). Beton dostarczano betonowozami i tłoczono przez pompę zlokalizowaną przy maszynie głównej. Wykonując kolumny betonowe, maszyna poruszała się po platformie roboczej, która jest niezbędnym elementem dla poprawnej realizacji kolumn oraz wykonania robót w sposób bezpieczny dla pracowników oraz otoczenia. Platforma musi stanowić stabilne podłoże dla ciężkiego sprzętu budowlanego, w tym dla pojazdów gąsienicowych o masie 80 t w każdych warunkach pogodowych. Badaniem odbiorczym najczęściej jest pomiar za pomocą płyty dynamicznej lub płyty statycznej VSS. Minimalna wymagana wartość wtórny modułu odkształcenia podłoża stanowiącego platformę roboczą wynosi E_{v2} 40 MPa. Ważnym elementem, na który należy zwrócić uwagę, jest poziom zwierciadła wody gruntowej oraz system odprowadzania wód opadowych, które mają bardzo duży wpływ na jakość oraz nośność platformy w trakcie wykonywania robót wzmocnienia podłoża.

W celu zapewnienia najwyższej jakości wykonanych robót przed przystąpieniem do instalacji kolumn uprawieni geodeci tycyli wszystkie punkty kolumn. Głowice kolumn betonowych kończono na poziomie platformy roboczej, po czym ścinano kolumny za pomocą maszyny pomocniczej do rzędnej posadowienia według projektu wykonawczego. W celu spełnienia założeń projektowych niwelację wykonywano przez

domiar do repera roboczego, który został zastabilizowany przez zespół geodezyjny.

Podczas wiercenia kolumn betonowych rejestrowano parametry wykonania kolumny, co umożliwiło ciągłą kontrolę tworzonej inkluzji oraz stanu gruntu w danym miejscu. Rezultatem takiego monitoringu są metryki, w których zawarta jest informacja o profilu kolumny, poborze energii podczas wiercenia, momencie obrotowym świdra, ciśnieniu oraz ilości wpompowanego betonu.



Ryc. 8. Wykonywanie kolumn CMC

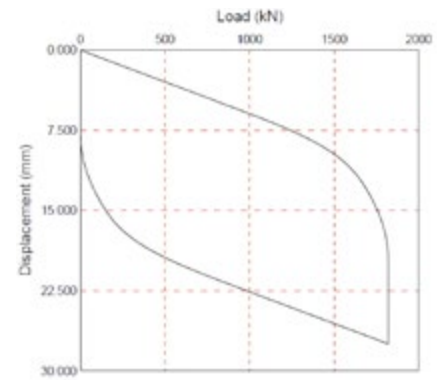
Badania kontrolne

W celu weryfikacji założeń projektowych wykonano dwa próbne obciążenia dynamiczne pojedynczej kolumny (ryc. 9) oraz pobrano próbki betonu do badań wytrzymałościowych. Próbkę pobierała na świeżo wyspecjalizowana jednostka. W celu kontroli wytrzymałości betonu na próbkach dojrzewających w warunkach rzeczywistych wykonano również odwierty rdzeniowe. Próbne obciążenie miały za zadanie stwierdzić, czy wykonane kolumny spełniają kryterium sztywności określone w projekcie. Natomiast pobór próbek miał na celu zweryfikować założenia wytrzymałości na ściskanie kolumn CMC.



Ryc. 9. Odstonięta kolumna CMC przygotowana do badania dynamicznego

Interpretacja wyników próbných obciążeń potwierdziła słuszność założeń projektowych oraz techniczne zalety kolumn przemieszczeniowych (ryc. 10). Osiadania pojedynczej kolumny przy maksymalnym obciążeniu obliczeniowym wyniosły od 5 do 7,5 mm. Takie wartości przemieszczeń



Ryc. 10. Krzywa osiadanie – obciążenie dla kolumny testowej nr 1 [6]

pozwołyły stwierdzić, że kryteria sztywności statycznej i dynamicznej zostały spełnione z zapasem bezpieczeństwa, pozwalającym na stabilną i pewną eksploatację turbin wiatrowych. Wyniki wytrzymałości na ściskanie wykazały, że przyjęty materiał kolumn charakteryzuje się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi, spełniającymi wymagania projektowe.

Podsumowanie

W artykule przeanalizowano aspekty projektowe i wykonawcze wzmocnienia podłoża gruntowego w technologii kolumn przemieszczeniowych CMC. Na omawianej inwestycji wszelkie prace przebiegły w sposób określony w projekcie wykonawczym, którego założenia zostały zweryfikowane podczas badań kontrolnych. Autorzy dziękują generalnemu wykonawcy, firmie Mega SA, za pomoc oraz wyrażenie zgody na publikację materiałów.

Literatura

- [1] Dalak D., Zaremba A.: *Projekt wykonawczy wzmocnienia podłoża w technologii kolumn CMC pod turbinami Farmy Wiatrowej Słupia*. Warszawa 2015.
- [2] *Dokumentacja badań podłoża gruntowego na potrzeby budowy Farmy Wiatrowej Słupia*. Agro Trade Grzegorz Bujak. Kielce 2014.
- [3] Materiały wewnętrzne firmy Menard Polska Sp. z o.o.
- [4] Briet S., Plomteux C.: *Integrated Ground Improvement Solution for Windmill Foundation Support in soft soils*. Calgary 2010.
- [5] Dalak D., Zaremba A.: *Analiza posadowienia turbin wiatrowych*. „Geoinżynieria. Drogi, mosty, tunele” 2015, nr 4.
- [6] *Raport z próbných obciążeń kolumn*. Metris Sp. z o.o. Kutno 2015.



Innowacyjność to podstawa naszego biznesu

Pomagamy naszym Klientom w realizacji
najśmielszych wizji. Motorem napędowym naszego rozwoju
jest ciągle udoskonalanie stosowanych przez nas technologii.



Wdrożyliśmy i usprawniliśmy wiele nowych metod
wzmacniania gruntu i oczyszczania terenów zanieczyszczonych.
Naszym celem jest prowadzenie każdej inwestycji w sposób
kompleksowy, wydajny i ekonomiczny.