

Analiza posadowienia fundamentu pierścieniowego chłodni kominowej



mgr inż.
WITOLD BOGUSZ
Instytut Techniki Budowlanej
ORCID: 0000-0002-6266-342X



mgr inż.
MICHAŁ KOCINIAK
DOMINION Deutschland GmbH
ORCID: 0000-0003-0090-4635



dr hab. inż.
TOMASZ GODLEWSKI
Instytut Techniki Budowlanej
ORCID: 0000-0001-7986-5995



dr
STANISŁAW ŁUKASIK
Instytut Techniki Budowlanej
ORCID: 0000-0003-3826-3917

W niniejszym artykule przedstawiono przykład analizy przeprowadzonej na potrzeby projektu posadowienia kolejnej chłodni kominowej realizowanej w Polsce. Omówione zostały w nim założenia analizy, uzyskane rezultaty, jak również ostatecznie przyjęte rozwiązanie posadowienia.

Chłodnie kominowe zaliczane są do obiektów głównych elektrowni konwencjonalnych. Z uwagi na specyfikę swojej konstrukcji powłokowej różnią się od standardowych budynków i innych obiektów budowlanych. Wpływa to również na zróżnicowanie posadowienia w przypadku ich projektowania. Pomimo dostępnej literatury [1] oraz wytycznych VGB [2] dotyczących projektowania samej konstrukcji tych obiektów zagadnienie ich współpracy z podłożem nadal jest tematem wymagającym dalszych prac badawczych. W ostatnich latach zbudowano w Polsce kilka nowych obiektów tego rodzaju. Doświadczenia uzyskane podczas ich budowy, w niektórych przypadkach, zostały dobrze udokumentowane [3-6] i mogą stanowić podstawę do analiz naukowych oraz opracowania wytycznych projektowania.

Charakterystyka konstrukcji obiektu

Rozpatrywana chłodnia kominowa jest związana z realizacją konwencjonalnego bloku energetycznego z zamkniętym obiegiem wody chłodzącej. Wysokość chłodni wynosi ok. 190 m, a jej średnica w poziomie posadowienia ok. 131 m. Składa się ona przede wszystkim z żelbetowej powłoki o zmiennej grubości, generalnie od 0,20 m do 0,24 m, lokalnie pogrubionej do 0,35 m na szczycie i 1,0 m na dolnej krawędzi, która przenosi obciążenia na fundament pierścieniowy poprzez układ 41 słupów obwodowych. Sam fundament pierścieniowy zaprojektowano

o szerokości 6 m oraz wysokości 1,5 m. Średnie naprężenia pod fundamentem dla kombinacji obciążeń stałych przewidziano na ok. 230 kPa.

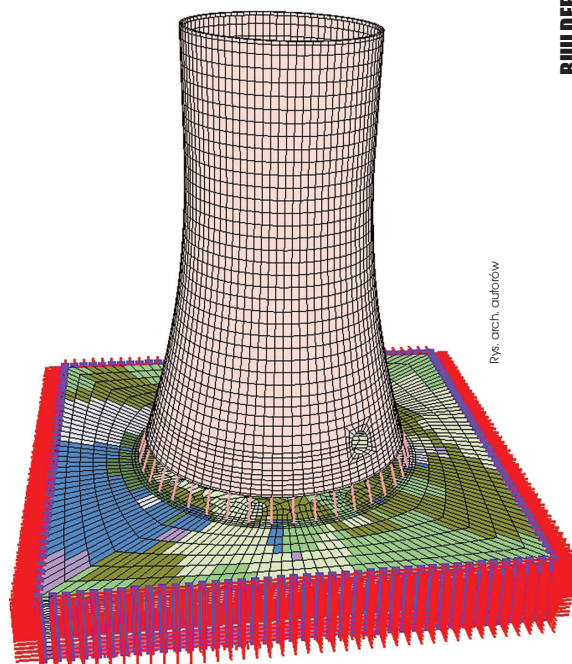
Analiza stanów granicznych w projekcie posadowienia

Z uwagi na charakterystykę geometryczną analizowanego fundamentu, gdy średnica pierścienia jest znacznie większa od jego szerokości, nośność lokalna fundamentu (stan graniczny GEO) oraz nośność konstrukcyjna (STR) są czynnikami determinującymi rozwiązania projektowe dla samego fundamentu (PN-EN 1997) [7]. Jednakże, z uwagi na typ posadawianej konstrukcji, a przede wszystkim jej relatywnie wiotką powłokę, decydującym stanem granicznym z punktu widzenia projektowania geotechnicznego jest stan użyteczności samego obiektu. Ma to związek z wpływem przemieszczeń na przyrost sił przekrojowych w konstrukcji poddanej nierównomiernym osiadaniom. Jest to szczególnie ważne przy posadowieniu na podłożu o znacznie zróżnicowanej sztywności.

Podstawowe założenia przyjętego rozwiązania posadowienia

Pomimo istotnego zróżnicowania warunków podłoża założono realizację posadowienia bezpośredniego jako najkorzystniejszego rozwiązania projektowego. W rozpatrywanym przypadku analiza została podzielona na dwa etapy. Na pierwszym, na potrzeby projek-

tu budowlanego, zrealizowano wstępną analizę w oparciu o obliczenia metodą półempiryczną [8]. Drugi etap, na potrzeby projektu wykonawczego, został oparty o modelowanie numeryczne z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES). W każdym z nich analizę przeprowadzono dla dwóch wariantów obliczeniowych. Pierwszego, nieuwzględniają-



Rys. 1. Przestrzenny model konstrukcji chłodni kominowej współpracującej z podłożem

cego wymiany gruntu w poziomie posadowienia, oraz drugiego, z wymianą do głębokości min. 0,5 m poniżej poziomu posadowienia na całym obwodzie oraz, w miejscach zalegania gruntów o większej odkształcalności ($E < 15$ MPa), do poziomu maksymalnie ok. 2,0÷2,5 m. Grubość warstwy wymiany gruntu została przyjęta jako główna zmienna projektowa. Poza dodatkową funkcją drenażową, w części obwodu, płytka wymiana miała pełnić również rolę kompensacyjną, zwiększającą podatność podłoża w obszarze występowania gruntów o znacznie większej sztywności. Celem projektowym była redukcja zmienności odpowiedzi podłoża pod fundamentem, oceniana na podstawie wyznaczonych współczynników podatności sprężystej podłoża oraz rozkładów wartości przewidywanych osiadań po obwodzie fundamentu.

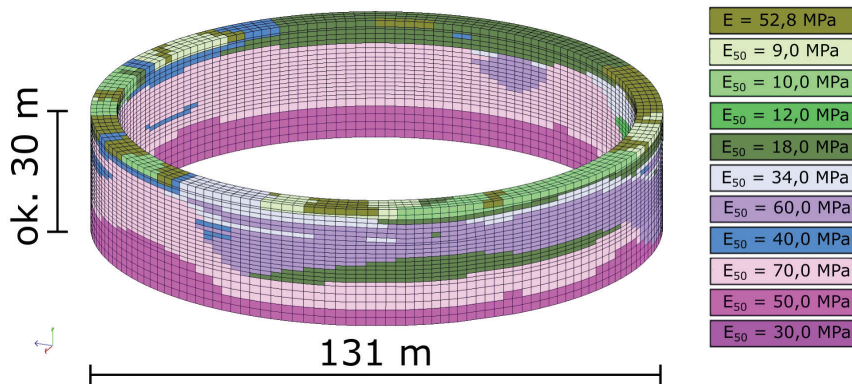
Uwarunkowania geotechniczne podłoża

Na obszarze, na którym zlokalizowano projektowaną chłodnię kominową, stwierdzono występowanie złożonych warunków grunto-wodnych, zgodnie z Rozporządzeniem MTBiGM [9]. Z uwagi na charakter i rangę obiektu planowaną realizację zakwalifikowano do III kategorii geotechnicznej.

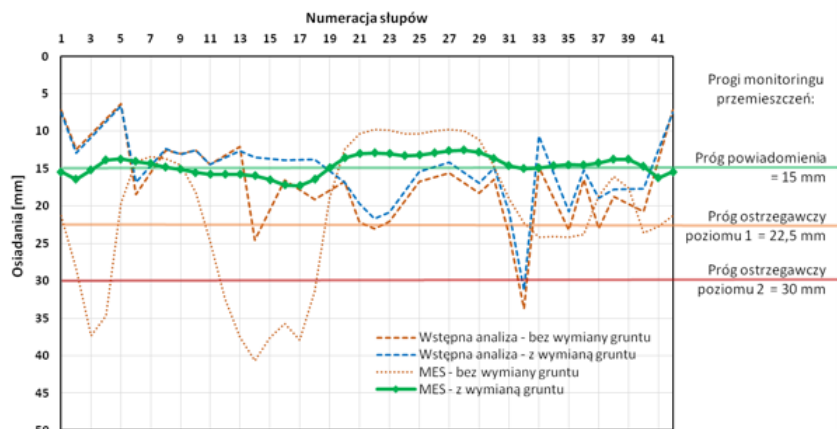
Warstwę powierzchniową stanowią utwory piaszczyste pochodzenia eolicznego i fluwio-glacialnego (piaski drobne, pylaste oraz średnie). Poniżej zalegają utwory glacialne, wykształcone jako piaski gliniaste i gliny piaszczyste, z przewarstwieniami piasków. W części południowej obszaru inwestycji występują utwory zastoiskowe, wykształcone jako pyły, gliny pylaste, ily, gliny pylaste zwięzłe oraz piaski drobne i pylaste. Poniżej rozpoznania otworami zalegają utwory wodnolodowcowe, zwałowe i zastoiskowe, a poniżej nich osady neo-geneńskie (trzeciorzędowe).

Model geotechniczny podłoża

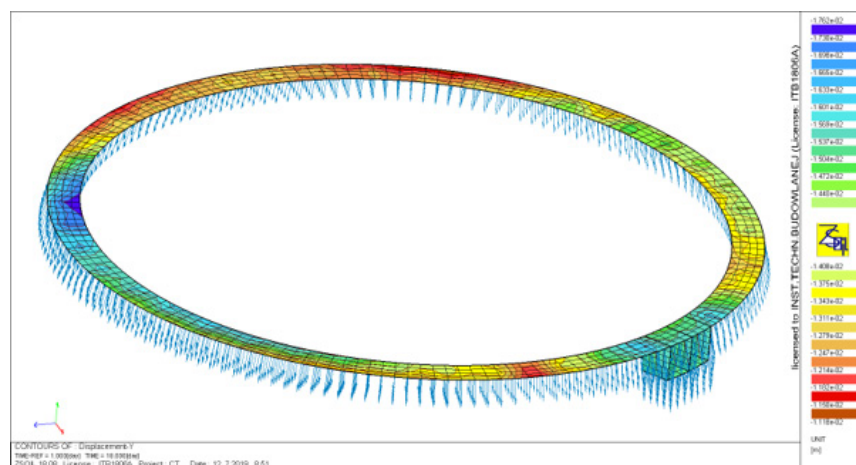
Dla wskazania sposobu posadowienia chłodni kominowej przeprowadzono obliczenia z zastosowaniem metody elementów skończonych. W tym celu wykorzystano program ZSoil 2D&3D 2018 [10] umożliwiający kompleksową analizę współpracy konstrukcji z podłożem. Ze względu na istotny wpływ sztywności przestrzennej samej konstrukcji poza pierścieniem fundamentowym w analizie uwzględniono również żelbetową powłokę chłodni. Także z uwagi na złożony układ warstw podłoża, objawiający się głównie poprzez znaczną zmienność przebiegu warstw pod fundamentem analizowanego obiektu oraz sam jego kształt, przeprowadzono przestrzenną analizę z wykorzystaniem MES (rys. 1.). Za pomocą metody krzygu elementem siatki MES przypisano parametry materiałowe. Złożoność budowy podłoża pod samym fundamentem przedstawia rys. 2. Ze względu na zastosowanie w analizie nieliniowe-



Rys. 2. Wybrane elementy skończone podłoża pod fundamentem pierścieniowym w odniesieniu do modułów odkształcenia dla poszczególnych warstw



Rys. 3. Rozkład osiadań po obwodzie fundamentu wraz z przyjętymi progami ostrzegawczymi na potrzeby monitoringu



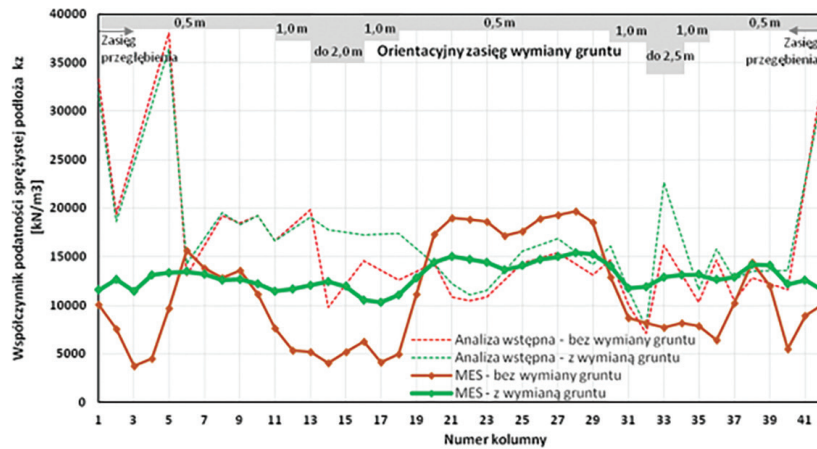
Rys. 4. Mapa i wektory przemieszczeń reprezentujące osiadania fundamentu w fazie docelowej (min. -11,6 mm; max. -17,6 mm)

go modelu Hardening Soil [11] uwzględniono etapowe nadbudowywanie powłoki chłodni kominowej.

Wyniki analiz numerycznych i przewidywane zachowanie obiektu

Rezultaty obliczeń osiadań fundamentu przeprowadzonych dla obu etapów analizy w obu wariantach przedstawiono na rys. 3. Otrzymane rezultaty rozkładu przemieszczeń

wzdłuż osi fundamentu wskazują na korzystny wpływ zastosowania wymiany gruntu. Pozostawienie gruntów słabych pod fundamentem prowadziłoby lokalnie do osiadań rzędu ok. 40 mm. Zastosowanie wymiany gruntu pozwoliło na ich ograniczenie do wartości w przedziale ok. 11 ÷ 18 mm (rys. 4.), co wykazały obliczenia MES, w których uwzględniono redystrybucję obciążeń z uwagi na sztywność konstrukcji. Średnia wartość przewidywanych osiadań wyniosła ok. 15 mm, w osi



Rys. 5. Rozkład współczynnika podatności sprężystej podłoża po obwodzie fundamentu

fundamentu, a ich charakter generalnie jest równomierny. Różnice pomiędzy wynikami na kolejnych etapach analizy wynikały głównie z uwzględnienia redystrybucji obciążeń w obliczeniach numerycznych (MES).

Zalecenia do analiz konstrukcyjnych

Na podstawie analizy przemieszczeń uzyskanych metodą pólempiryczną oraz przy wykorzystaniu metody elementów skończonych obliczono wartości współczynników podatności podłoża według teorii Winklera, odpowiadające panującym warunkom gruntowym oraz charakterowi samej konstrukcji i jej obciążen. Porównanie wartości współczynników w wariantach z wymianą gruntu oraz bez jej przeprowadzenia, a także przybliżony zakres wymiany gruntów, przedstawiono na rys. 5.

W wariantcie bez wymiany gruntu występuje istotne zróżnicowanie wartości współczynników podatności sprężystej podłoża ($k_z = \sim 5000 \div 20000 \text{ kN/m}^3$ z analizy MES). Otrzymany rozkład obniżeń sztywności podłoża po obwodzie fundamentu odpowiada lokalizacji występowania utworów odkształcalnych bezpośrednio poniżej poziomu posadowienia. W przypadku przeprowadzenia wymiany gruntu, jako wzmocnienia i jako warstwy kompensacyjnej, możliwe było otrzymanie rozkładu podatności o znacznie bardziej jednorodnym charakterze ($k_z = \sim 10000 \div 15000 \text{ kN/m}^3$ z analizy MES). Zapewniło to optymalne warunki pracy całej konstrukcji chłodni kominowej.

Zalecenia do monitoringu na etapie realizacji

W celu walidacji przyjętych założeń odnośnie do przewidywanego zachowania się konstrukcji zalecono prowadzenie monitoringu przemieszczeń pionowych dla pierścienia fundamentowego w miejscach lokalizacji słupów. W stosunku do przewidywanych

średnich osiadań (15 mm) zalecono przyjęcie trzech progów ostrzegawczych (rys. 3.).

Istotnym aspektem prowadzenia monitoringu przemieszczeń jest zdobywanie i dokumentowanie doświadczeń związanych z posadowieniem tak nietypowych obiektów. Mogą one w przyszłości stanowić podstawę do lepszej kalibracji modeli obliczeniowych na potrzeby przyszłych realizacji.

Wnioski

Zastosowanie posadowienia bezpośredniego z wymianą gruntu pozwoliło na uzyskanie równomiernych osiadań oraz odporów podłoża po obwodzie fundamentu mimo występowania złożonych warunków gruntowych. Zaprezentowane podejście związane z realizacją analiz projektowych w dwóch fazach, poprzedzonych uzupełniającymi badaniami geotechnicznymi, oraz przy wsparciu zaawansowanych metod obliczeniowych, jest szczególnie wskazane w przypadku nietypowych (wrażliwych na nierównomierne osiadania) obiektów zaliczanych do III kategorii geotechnicznej.

Literatura

- [1] Ledwoń J., Golczyk M., Chłodnie kominowe i wentylatorowe, Arkady, Warszawa 1967.
- [2] VGB PowerTech, Structural design of cooling towers, VGB Guideline VGB-R 610e, 2010.
- [3] Biały M., Wpływ prekonsolidacji podłoża na osiadania hiperboidalnej chłodni kominowej, „Czasopismo Techniczne – Środowisko”, 4, str. 3–14, 2009.
- [4] Biały M., Monitorowanie osiadań fundamentów hiperboidalnej chłodni kominowej, „Przegląd Budowlany” 6, 40–43, 2012.
- [5] Bogusz W., Godlewski T., Kociniak M., Posadowienie chłodni kominowej w skomplikowanych warunkach geotechnicznych, „Materiały Budowlane”, 05/2016, str. 26–27, doi: 10.15199/33.2016.05.11.
- [6] Bogusz W., Kociniak M., Numerical analysis of a foundation of a cooling tower in difficult geotechnical conditions, Proc. NUMGE Conf., Porto, Portugal, 2018.
- [7] PN-EN 1997-1 Eurokod 7: Projektowanie geotechniczne – Część 1: Zasady ogólne.
- [8] PN-81/B-03020 Grunty budowlane: Posadowienie bezpośrednie budowli.
- [9] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 25.04.2012 w sprawie ustalania geotechnicznych warunków posadowienia, Dz.U. poz 463.
- [10] Program ZSoil 2D&3D 2018, ZACE Ltd., Lausanne.
- [11] Obrzud R., Truty A., The Hardening Soil model – a practical guidebook, Zace services Ltd., 2018.

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Bogusz Witold, Kociniak Michał, Godlewski Tomasz, Łukasik Stanisław, 2020, Analiza posadowienia fundamentu pierścieniowego chłodni kominowej, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.9706

Streszczenie: Artykuł prezentuje analizę posadowienia oraz wytyczne do projektu konstrukcji chłodni kominowej w elektrowni konwencjonalnej. Zaprezentowano ogólną charakterystykę konstrukcji, główne założenia projektowe oraz opis warunków gruntowo-wodnych na rozpatrywanym obszarze. Następnie omówiono zakres i główne założenia analizy. Otrzymane na podstawie analizy wyniki prezentują podsumowanie rozważań projektowych związanych z wyborem ostatecznie przyjętego sposobu posadowienia. Ostatecznie uzyskano zoptymalizowany rozkład współczynnika podatności sprężystej podłoża, wraz z przewidywanymi wartościami osiadań po obwodzie fundamentu chłodni kominowej.

Słowa kluczowe: chłodnia kominowa, posadowienie bezpośrednie, fundament pierścieniowy, współpraca konstrukcji z podłożem

Abstract: The paper presents an analysis regarding the foundation solution as well as provided guidance for structural calculations for a cooling tower of a conventional coal-fired power plant. The characteristic of the structure, its main design assumptions, and description of ground conditions at the site are briefly presented. Then, the scope and main assumptions of the analysis are described. Presented results, based on this analysis, show the summary of design consideration for the optimal foundation solution chosen in the end. Finally, the optimized distribution of modulus of subgrade reaction was obtained, together with predicted settlement, along the circumference of the cooling tower's foundation.

Key words: cooling tower, spread foundation, ring foundation, soil-structure interaction