

# Modelowanie numeryczne współpracy chłodni kominowej z podłożem gruntowym

Dr inż. Mariusz Biały, Politechnika Śląska, Gliwice

## 1. Wprowadzenie

Żelbetowe hiperboloidalne chłodnie kominowe pełnią rolę wymienników ciepła w instalacjach chłodzenia bloków energetycznych współczesnych elektrowni. Są to budowle wielkoskalowe o złożonej geometrii i konstrukcji. Zapewnienie równomierności osiadań, przy bardzo dużej powierzchni kontaktu fundament pierścieniowy-podłoże, a co za tym idzie przy możliwości występowania zróżnicowanych warunków posadowienia na jego obwodzie, stanowi duży problem dla projektantów chłodni. Bezpieczne posadowienie tych obiektów sprowadza się przede wszystkim do dokładnego oszacowania i minimalizacji różnic osiadań podłoża. Zmieniające się często w trakcie budowy warunki gruntowe dodatkowo utrudniają budowniczym realizację posadowienia chłodni.

## 2. Właściwości podłoża gruntowego

Czynnikiem decydującym o realnej ocenie osiadań jest adekwatny opis podłoża, uwzględniający podstawowe właściwości gruntów. Stosowany powszechnie w projektowaniu fundamentów pierścieniowych chłodni uproszczony schemat płyty pierścieniowej na sprężystym podłożu [6] nie uwzględnia istotnych cech gruntu. Traktowany makroskopowo grunt jest ośrodkiem rozdrobnionym, wielofazowym i nieliniowo odkształcalnym, zwłaszcza w prze-

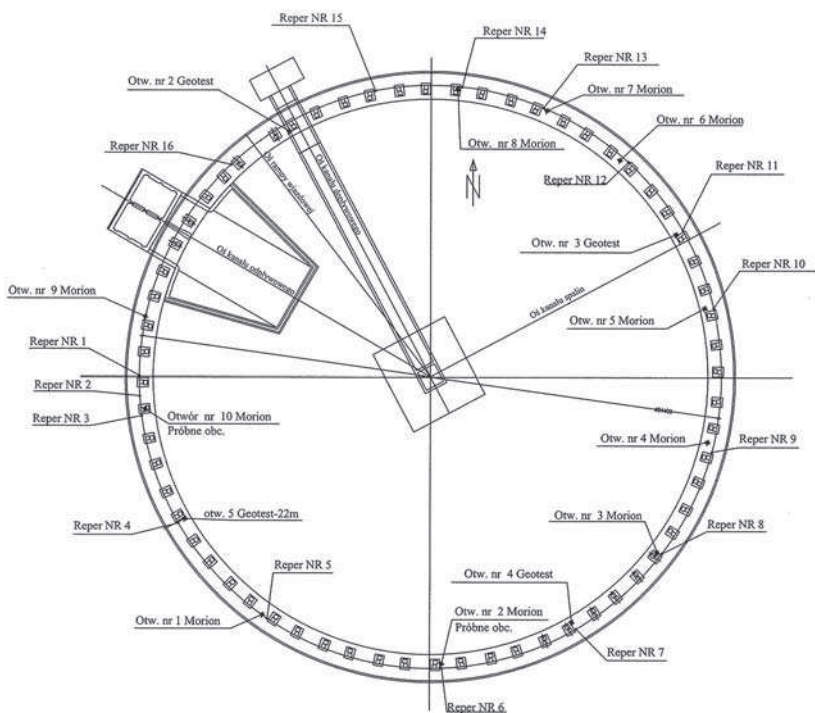
dziale małych deformacji i w stanie przedkrytycznym [1]. W przypadku podłoża prekonsolidowanego widoczny jest wzrost początkowej sztywności z głębokością i współczynnikiem prekonsolidacji OCR a następnie gwałtowny spadek sztywności ze wzrostem deformacji masywu gruntowego. Te cechy uwidaczniają się w sytuacji posadowienia budowli na terenach, które w przeszłości były obciążone innymi budowlami. Uwzględnienie wszystkich ww. kluczowych cech masywu gruntowego wymaga lepiej dostosowanych do specyfiki gruntów modeli konstytutywnych. W przypadku gruntów słabo prekonsolidowanych wystarczą do tego celu proste związki oferowane przez grupę modeli Cam Clays z Modified Cam Clay na czele. Do opisu podłoża silnie prekonsolidowanego zdecydowanie lepszy jest hybrydowy model FC+MCC zaproponowany przez Gryczmańskiego i Uliniarza [5], bazujący na modelu Fahey-Cartera [4].

Zrealizowana w Elektrowni Łągisza, dla nowego bloku energetycznego o mocy 460 MW, chłodnia kominowa została wzniesiona w miejscu posadowienia starego, wyburzonego obiektu. Część pierścienia fundamentowego nowej chłodni posadowiono na obszarze będącym pod wpływem obciążenia starą, wyburzoną chłodnią zaś pozostała część fundamentu spoczęła na podłożu, które nie było uprzednio obciążone żadną budowlą (rys. 2). Takie usytuowanie dało okazję do zbadania wpływu prekonsolidacji podłoża

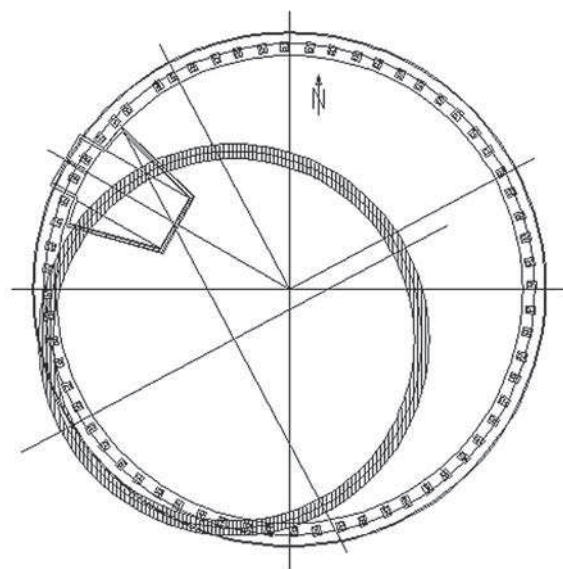
na osiadanie. Monitoring osiadań pierścienia fundamentowego prowadzono w trakcie budowy nowej chłodni, a jego wyniki posłużyły do zweryfikowania przyjętego modelu numerycznego współpracy chłodni z uwarstwionym podłożem. Periodyczna budowa chłodni, z regularnie rozmieszczonymi parami słupów ukośnych podpierających powłokę, pozwala na budowanie modeli lokalnych współpracy tych obiektów z podłożem. Ostateczna weryfikacja modeli lokalnych prowadzona jest obecnie na modelach lokalno-globalnym i globalnym opisanych w punkcie 4.

## 3. Charakterystyka podłoża chłodni w Łągiszy

Charakterystyka podłoża chłodni bazuje na profilach geotechnicznych 9 otworów wiertniczych o głębokości 22 m (8 na obwodzie chłodni i 1 pośrodku), 10 dodatkowych otworów o głębokości od 3 do 4 m wykonanych na obwodzie pierścienia fundamentowego oraz na wynikach badań laboratoryjnych próbek gruntów. Dane geotechniczne uzupełniają wyniki sondowań statycznych CPT usytuowanych blisko głębokich otworów. Na próbkach NNS pobranych w trakcie ww. wierceń wykonano badania edometryczne i w aparacie trójosiowego ściskania. Utwory skaliste badanego podłoża wiercono systemem mechaniczno-obrotowym, rdzenio-wo z użyciem płuczki, a pobrane próbki skał zbadano w laborato-



Rys. 1. Usytuowanie reperów i otworów badawczych



Rys. 2. Usytuowanie fundamentu nowej i ślad fundamentu starej, wyburzonej chłodni. Ślad starej, wyburzonej chłodni, o mniejszym promieniu fundamentu, jest zakreślony.

rium wyznaczając ich parametry. Tak dokładne badania gruntów i skał zalegających w analizowanym podłożu chłodni były konieczne ze względu na bardzo duże zróżnicowanie modułów odkształcenia poszczególnych jego warstw. Decydująca o warunkach posadowienia warstwa to zwierzelina utworów karbońskich piaskowców, iłowców i mułowców wykształcona w formie przewarstwiających się glin, glin pylastych i pyłów

piaszczystych, piasków gliniastych i iłów. Pod nią zalega warstwa skał, zbudowana z piaskowców i iłowców o zróżnicowanych modułach sztywności. Na uwagę zasługuje fakt miejscowego występowania spękanych skał o niskich modułach odkształcenia ( $E=6$  MPa) na stosunkowo niewielkich głębokościach od 1,6 do 10 m, co ma duży wpływ na zachowanie fundament-podłoże. Wyniki badań labo-

ratoryjnych posłużyły do wyznaczenia parametrów  $\lambda$  i  $\kappa$  modeli gruntu MCC i FC+MCC użytych do opisu gruntu w symulacjach numerycznych współpracy chłodni z podłożem.

Ze względu na występowanie w wierzchnich warstwach gruntów spoistych podatnych na uplastycznienie pod wpływem opadów atmosferycznych, w trakcie prowadzenia robót ziemnych zdecydowano o usuwaniu ewentualnych uplastycznionych powierzchniowych warstw tych gruntów. W miejsce tych warstw wbudowano poduszki wykonane z kruszywa dolomitowego lub pospółki i zagęszczono je przez wałowanie. Bezpośrednio pod fundamentem, na całym jego obwodzie, wykonano poduszkę dolomitową, a po zagęszczeniu tej poduszki wykonano podkład betonowy pierścienia fundamentowego. Pomiary osiadań rozpoczęto po zakończeniu robót ziemnych i po wykonaniu betonowego podkładu pierścienia. W trakcie montażu zbrojenia fundamentu przygotowano 16 reperów ze stali nierdzewnej do osadzenia w betonie podkładu. Repery wklejono żywicą epoksydową w otwory nawiercone w podkładzie, a po związaniu żywicy od razu wykonano pierwszy pomiar ich wysokości. Kolejne pomiary prowadzono sukcesywnie wraz z postępem robót. Obejmowały one zakończone etapy betonowania i montażu, kolejno:

- pierścienia fundamentowego,
- słupów ukośnych i dolnego prefabrykowanego pierścienia powłoki,
- 3. -, 9. -, 22. -, 40. -, 86. -, i 106. cyklu betonowania powłoki.

Numery cykli betonowania powłoki na potrzeby pomiaru osiadań dobrano tak, aby uzyskać w miarę równomierny przyrost obciążenia podłoża fundamentem. Nacisk ten pochodzi od obciążenia ciężarem własnym chłodni. Całość powłoki zabetonowano w 106 cyklach. W sumie wykonano 12 pomiarów osiadań kompletu 16 repe-

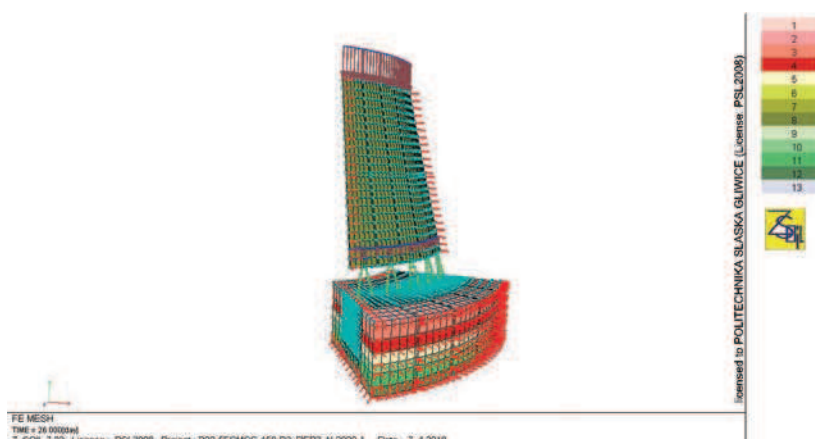
rów, umieszczonych na obwodzie pierścienia fundamentowego i dwóch reperów porównawczych, osadzonych na obiektach położonych poza obrębem badanej konstrukcji.

Reper 3. zamocowano w podkładzie betonowym fundamentu nad strefą podłoża, która poddana była wpływom prekonsolidacji od starej wyburzonej chłodni. Reper 11. ustalono w miejscu, gdzie podłoże nie ulegało wpływom obciążenia starą chłodnią.

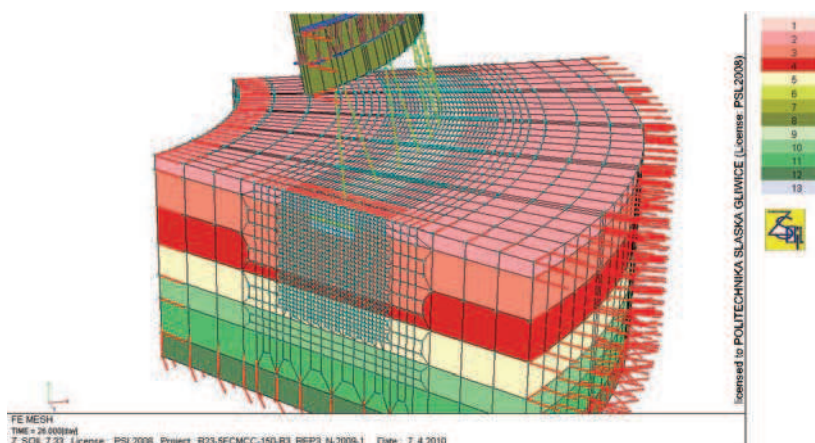
Porównanie zachowania się tych dwóch reperów dało możliwość obserwowania wpływu prekonsolidacji na osiadanie chłodni. Schemat rozmieszczenia reperów pokazano na rysunku 1. Poniżej, na rysunku 2, pokazano strefę oddziaływania fundamentu starej chłodni na tle rzutu fundamentu nowej chłodni, której pierścień fundamentowy ma znacznie większy promień.

#### 4. Analizy numeryczne

Pełna analiza współpracy konstrukcji chłodni z podłożem przy uwzględnieniu obciążeń od parcia i ssania wiatru w zadaniu przestrzennym możliwa jest tylko w przypadku zamodelowania całej konstrukcji powłoki. Symulacje numeryczne prowadzono początkowo bazując na modelach lokalnych 3 i 5-cio segmentowych, o bardzo dużym zagęszczeniu elementów skończonych, co gwarantuje otrzymanie bardzo dokładnych wyników osiadań. Obecnie trwają prace nad modelami lokalno-globalnym i globalnym, które pozwolą dokładniej symulować zachowanie się chłodni obciążonej wiatrem. Budowa modeli globalnych współpracy chłodni z podłożem możliwa jest teraz dzięki szybkiemu rozwojowi wyspecjalizowanego do obliczeń zagadnień geotechnicznych systemu Z\_Soil oraz bardzo dużemu postępowi zdolności obliczeniowych komputerów osobistych jaki nastąpił w latach 2009–2010. Widoki modelu lokalnego pokazano na rysunkach 3 i 4.



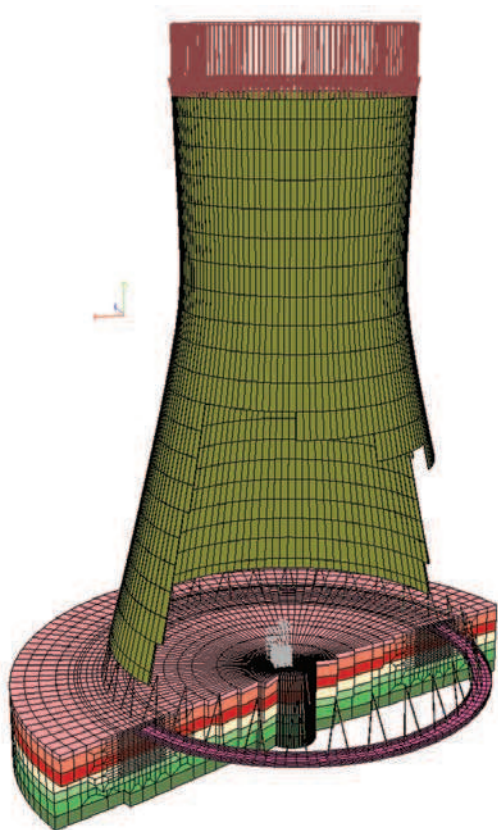
Rys. 3. Widok 5-segmentowego modelu lokalnego



Rys. 4. Symulacja osiadań fundamentu w miejscu mocowania reperu 3. Deformacja siatki elementów skończonych podłoża gruntowego

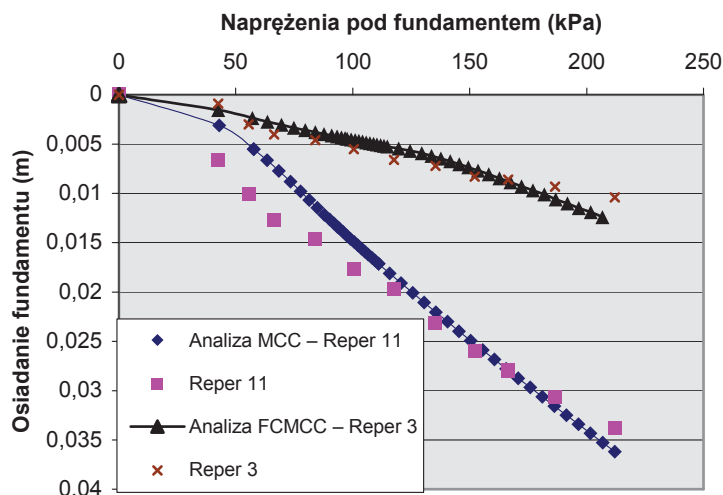
W modelu lokalnym powłoka chłodni została zamodelowana do poziomu 41% całkowitej wysokości obiektu. Ciężar wyższych segmentów powłoki zastąpiono obciążeniem równomiernie rozłożonym na górnej powierzchni zamodelowanego fragmentu. Lokalny model geometryczny ze względu na jego ograniczone rozmiary pozwala na bardzo gęste zamodelowanie podłoża ale modelowanie obciążenia wiatrem jest w tym przypadku trudne. Możliwa jest symulacja obciążenia wiatrem w modelu lokalnym jedynie w przypadku kiedy znane są wartości sił działających na dolny pierścień powłoki i słupy podbudowy wyliczone dla schematu obciążenia wiatrem. Siły te można wyznaczyć mode-

lując całą powłokę na podporach ukośnych w innym systemie obliczeniowym. Autor skorzystał z wyników obliczeń statycznych wykonanych przez projektantów chłodni w Łagiszy. W obliczeniach numerycznych przeprowadzonych systemem Robot wyznaczono wielkości charakterystyczne sił jakie wystąpią w elementach chłodni przy maksymalnej wartości obciążenia parciem i ssaniem wiatru. Dla uwzględnienia punktowego obciążenia fundamentu od podpór powłoki w modelu lokalnym wyznaczone siły zadano na poziomie dolnego pierścienia powłoki. W ten uproszczony sposób otrzymano dodatkowy przyrost naprężeń pod fundamentem od parcia i ssania wiatru na powłokę chłodni.



**Rys. 5.** Widok modelu globalnego – wersja robocza

W analizach numerycznych postużono się przestrzennym, lokalnym, 5-segmentowym modelem (rys. 3) złożonym z 38706 6- i 8-węzłowych izoparametrycznych trójwymiarowych elementów skończonych. Łączna liczba węzłów wynosiła 43318. Na styku fundament – podłoże wygenerowano powierzchniowe elementy kontaktowe. Czas trwania obliczeń jednego zadania wynosił od 4,5 do 6 godzin. Widok wersji roboczej modelu globalnego z pełną powłoką pokazano na rysunku 5. Do budowy modelu globalnego użyto 82870 węzłów i 73472 elementów skończonych. Żelbet konstrukcji fundamentu pierścieniowego, podpór i powłoki chłodni traktowany jest jak izotropowy materiał liniowo-sprężysty. Całkowita wysokość chłodni mierzona od poziomu terenu wynosi 133,2 m. Promień fundamentu pierścieniowego ma długość 47,2 m, jego wysokość równa jest 1,3 m, a szerokość 4,5 m. Do opisu pod-



**Rys. 6.** Porównanie charakterystyk napężenia – osiadania dla fundamentu posadzonego na podłożu normalnie skonsolidowanym (reper 11) i prekonsolidowanym (reper 3), otrzymanych w badaniach terenowych i w symulacjach numerycznych z zastosowaniem 5-segmentowego modelu lokalnego

łoża zastosowano modele gruntów sprężyste (skały i poduszki żwirowe), MCC (grunty normalnie skonsolidowane) i FC+MCC (grunty prekonsolidowane). Kalibrację lokalnych modeli przestrzennych i dokładny opis parametrów ww. modeli gruntów zamieszczono w dysertacji doktorskiej Białego [2] i w publikacji [3]. Wyniki symulacji numerycznej modelu lokalnego pokazano na rysunku 6.

### 5. Wnioski

Wyniki obliczeń i monitoringu osiadań chłodni w Łagiszy są zbieżne, co potwierdza skuteczność stosowania lokalnych modeli przestrzennych i zaawansowanych praw konstytutywnych (tu FC+MCC) w analizach współpracy chłodni z uwarstwionym, normalnie skonsolidowanym i silnie prekonsolidowanym podłożem. Wpływ prekonsolidacji podłoża, wywołanej naciskiem starej wyburzonej chłodni, na wartości osiadań nowobudowanego obiektu w Łagiszy jest wyraźnie widoczny (rys. 6), co świadczy o tym, że historia obciążenia podłoża powinna być dokładnie analizowa-

wana w procesie projektowania posadzenia tych obiektów.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Atkinson J. H., Bransby P. L., The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics. McGraw-Hill Book Company, London, 1978
- [2] Biały M., Przestrzenna analiza współdziałania fundamentu chłodni kominowej z nieliniowo odkształcalnym podłożem przy uwzględnieniu sztywności nadbudowy. Dysertacja doktorska, Gliwice, 2008
- [3] Biały M., Zastosowanie modelu FC+MCC w analizie numerycznej współpracy chłodni kominowej z podłożem gruntowym. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Czasopismo Techniczne z. 3-Ś/2008, zeszyt 20 (105), s. 21 do 29, Kraków, 2008
- [4] Fahey M., Carter J. P., A finite element study of the pressuremeter in sand using a nonlinear elastic plastic model. Canadian Geotechnical Journal, vol.30, p.p. 348–362, 1993
- [5] Gryczmański M., Uliniarz R., A simple critical state model with small strain nonlinearity overconsolidation soils. Foundations of civil and environmental engineering, Poznań, 2008
- [6] Ledwoń J., Golczyk M., Chłodnie kominowe i wentylatorowe. Arkady, Warszawa, 1967