

dr inż. Mariusz Biały\*

# Kalibrowanie modelu współdziałania fundamentu chłodni z podłożem

*Calibration of model of interaction foundation of cooling tower with subsoil*

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono kalibrację lokalnego modelu numerycznego współpracy hiperboloidalnej chłodni kominowej z podłożem. Do opisu gruntu w symulacjach numerycznych zastosowano modele sprężysty, Modified Cam Clay i FC+MCC.

**Słowa kluczowe:** hiperboloidalna chłodnia kominowa, współdziałanie konstrukcji z podłożem, kalibracja modelu numerycznego.

**Abstract.** The paper presents calibration of the local numerical model of interaction of hyperbolic cooling tower with subsoil. Soil in simulations was described by elastic, Modified Cam Clay and FC+MCC models.

**Keywords:** hyperbolic cooling tower, soil-structure interaction, calibration of numerical model.

Opisywany w artykule lokalny model numeryczny zbudowano w wyspecjalizowanym do analiz zagadnień geotechnicznych systemie Z\_Soil [1], na potrzeby oszacowania osiadań żelbetowej hiperboloidalnej chłodni kominowej o wysokości 133,2 m, wznoszonej dla bloku o mocy 460 MW w Łągiszy. Chłodnia spoczywa na pierścieniu fundamentowym o promieniu 47,2 m i przekroju poprzecznym o wymiarach 1,3 x 4,5 m. Powłokę chłodni oparto na 32 parach prefabrykowanych słupów ukośnych. Budowę powłoki rozpoczęto od montażu na słupach ukośnych dolnego, prefabrykowanego pierścienia żelbetowego. Wyższe segmenty (pierścienie) powłoki wykonano tradycyjnie w przestawnych szalunkach metodą betonowania „na mokro”. Wysokość chłodni mierzona od poziomu terenu równa jest 133,2 m. Obszar przewidywany do posadowienia chłodni obejmował podłoże gruntowe prekonsolidowane ciężarem starej, wyburzonej chłodni i podłoże niezabudowane o niewielkiej prekonsolidacji. Podłoże chłodni zbadano w kilku etapach, wykonując wiercenia w gruntach i skałach, pobierając próbki do badań laboratoryjnych wykonanych w edometrach i aparatach trójosiowego ściskania. Uzyskane w badaniach parametry wykorzystano do opisu gruntów w symu-

lacjach numerycznych bazujących na modelach gruntu sprężystym, Modified Cam Clay i Faheya Cartera + Modified Cam Clay (w skrócie FC+MCC). Ze względu na ograniczoną objętość artykułu nie podano więcej danych o projektowanej konstrukcji i jej podłożu, ale pozostałe szczegóły dotyczące badań podłoża chłodni, parametrów modeli opisujących grunty i pomiarów osiadań fundamentu pierścieniowego można znaleźć w publikacjach [2] i [3].

## Koncepcja modelu lokalnego

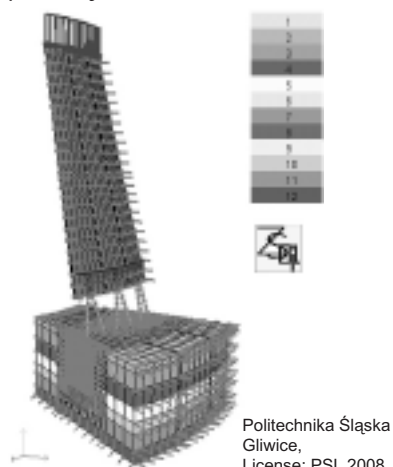
Koncepcja ta bazuje na specyficznej, periodycznej budowie żelbetowych hiperboloidalnych chłodni kominowych. Można podzielić ich konstrukcję na wiele powtarzalnych segmentów. Każdy z nich rozpościera się między południkami przecinającymi powierzchnię powłoki i fundament z podłożem w poziomie rozstawu osi sąsiadujących ze sobą dwóch par słupów ukośnych. Symetria tego podziału zaburzona jest w miejscu usytuowania bramy wjazdowej do chłodni i w miejscach przejścia przez pierścień fundamentowy kanału zasilania i odpływu, ale do analizy tych szczególnych fragmentów chłodni można odpowiednio dostosować siatkę elementów skończonych modeli lokalnych. Kolejną właściwością chłodni, którą wykorzystano przy tworzeniu modelu, jest geometria samej powłoki, której grubość znacznie zmienia się z wysokością. W miejscu opar-

cia powłoki na słupach ukośnych jej grubość osiąga 0,75 m, a na wysokości 17,5 m wynosi już tylko 0,19 m. Biorąc pod uwagę dużą sztywność tego obszaru i jego wpływ na zachowanie się układu słupy-pierścień fundamentowy-podłoże, można przyjąć, że oddziaływanie to w przypadku wyższych segmentów jest znacznie mniejsze. Z tego powodu przyjęto założenie o modelowaniu jedynie fragmentu powłoki o ograniczonej wysokości. Można zbudować strukturę złożoną z jednego lub kilku powtarzalnych segmentów, z których każdy zawiera jedną parę słupów ukośnych wraz z wycinkiem opartej na nich powłoki oraz odpowiadający tej parze fragment fundamentu i bryły podłoża. Taki wydzielony segment lub grupę segmentów tworzących model geometryczny można analizować ze ściśle spełnionymi warunkami brzegowymi, ustalonymi wzdłuż ograniczających południków: zerowym przemieszczeniem obwodowym i zerowymi naprężeniami stycznymi w kierunkach pionowym i radialnym. Zaletą modelu lokalnego jest uwzględnienie w obliczeniach efektu działania momentu skręcającego na zakrzywiony pierścień fundamentowy i punktowe oparcie na nim słupów podtrzymujących powłokę.

Lokalny model, ze względu na jego ograniczone rozmiary, pozwala na użycie bardzo gęstej siatki elementów skończonych, jednak modelowanie obciążenia wiatrem jest w tym przypadku

\* Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

trudne. Możliwa jest symulacja tego obciążenia jedynie w przypadku, kiedy znane są wartości sił działających na dolny pierścień powłoki i słupy podbudowy wyliczone w innym systemie. Ja skorzystałem z obliczeń przeprowadzonych przez projektantów chłodni w Łagiszy, którzy w analizach numerycznych przeprowadzonych w systemie Robot wyznaczyli wielkości charakterystyczne sił, jakie wystąpią w elementach chłodni przy maksymalnej wartości obciążenia jej powłoki od wiatru. W celu uwzględnienia punktowego obciążenia fundamentu w modelu lokalnym pokazanym na rysunku 1, utworzonym w systemie Z\_Soil, wyznaczone siły zadano na poziomie dolnego, prefabrykowanego pierścienia powłoki. W ten sposób uzyskano dodatkowy przyrost naprężeń pod fundamentem od parcia i ssania wiatru na powłokę.

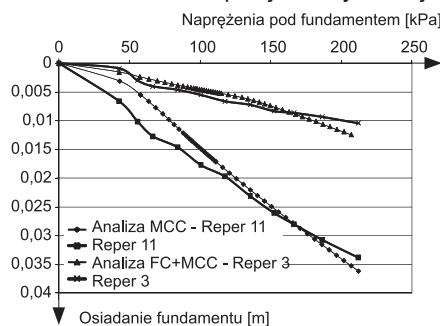


Rys. 1. Widok lokalnego bazowego modelu trzysegmentowego

### Kalibracja modelu lokalnego

Kalibrację geometrii zadania przestrzennego rozpoczęto od badania wpływu ilości modelowanych segmentów na wyniki analiz. Zbadano strukturę złożoną z jednego, trzech i pięciu takich segmentów, obserwując zmiany rozkładów i wartości naprężeń oraz przemieszczeń w gruncie (dla trzech i pięciu segmentów obserwowano te zmiany pod środkowym segmentem). Wykonane na tym etapie symulacje pokazały, że **model lokalny zbudowany z jednego segmentu jest mało dokładny** ze względu na wpływ bliskiego sąsiedztwa podpór zadanych na brzegach. W dwóch pozostałych przypadkach wyniki analiz były zbliżone.

Do dalszych symulacji przyjęto model trzysegmentowy (rysunek 1) i zbadano wpływ wysokości wycinka powłoki na wyniki analiz. Rozpatrywano wycinki o wysokości 4,66 m, 25,62 m i 51,28 m. Otrzymane różnice rozkładów i wielkości naprężeń i osiadań w przypadku odcinków wysokości 4,66 m i 25,62 m były znaczne, a w przypadku 25,62 m i 51,28 m niewielkie. Do następnych obliczeń przyjęto wycinek wysokości 51,28 m, a ciężar niezamodelowanych segmentów występujących powyżej tego poziomu aż do galerii zastąpiono obciążeniem równomiernie rozłożonym przyłożonym na górnej powierzchni zamodelowanego fragmentu. W kolejnej fazie kalibracji zbadano wpływ głębokości podłoża na otrzymywane wyniki obliczeń, testując bryły o miąższości 19, 29 i 39 m. Wyniki osiadania fundamentu w tych trzech przypadkach różniły się maksymalnie o 1,5 mm, dlatego przyjęto miąższość 19 m jako minimalną i odpowiednią do odwzorowania osiadania. Ostatecznie do dalszych analiz i zbadania wrażliwości zadania numerycznego na zmiany związków konstytutywnych opisujących grunty użyto modelu bazowego trzysegmentowego, o głębokości bryły podłoża 19 m, z wycinkiem powłoki wysokości 51,28 m. Analizy te prowadzono początkowo dla jednorodnego podłoża o małym współczynniku prekonsolidacji OCR, opisanego modelem MCC, a następnie sprawdzano działanie modelu FC+MCC zaproponowanego przez Gryczmańskiego i Uliniarza [4] w przypadku podłoża silnie prekonsolidowanego (rysunek 2). Model FC+MCC dobrze opisuje stany słabej



Rys. 2. Porównanie charakterystyk osiadanie-naprężenie uzyskanych z pomiarów osiadań chłodni i w analizach numerycznych z użyciem modeli MCC i FC+MCC. Reper 3 zamocowano w fundamencie nad strefą podłoża silnie prekonsolidowanego, a reper 11 nad strefą podłoża o słabej prekonsolidacji

i silnej prekonsolidacji gruntu i co ważne uwzględnia istotne w modelowaniu zmiany sztywności gruntów w zakresie bardzo małych odkształceń, zbadane przez Burlanda i opisane w poz. [5]. W dalszej części prowadzono symulacje dotyczące podłoża uwarstwionego o różnym współczynniku prekonsolidacji.

Wyniki symulacji wykazały wrażliwość modelu numerycznego na zadawane zmiany parametrów modeli gruntów i obciążenia zewnętrzne. Zmierzone w trakcie wznoszenia chłodni osiadanie fundamentu pierścieniowego było bliskie osiadańm prognozowanym w symulacjach numerycznych.

### Wnioski

- Kalibracja jest niezbędna do uzyskania pewności, że przyjęty rozmiar modelu geometrycznego jest wystarczający do prawidłowego odwzorowania osiadania i naprężeń podłoża fundamentu pierścieniowego chłodni.

- Niezbędnym krokiem w kalibracji jest sprawdzenie odpowiedzi modelu numerycznego na zmiany parametrów modeli gruntów.

- Zastosowanie w obliczeniach wieloparametrowych modeli gruntów, opisujących stany słabej i silnej prekonsolidacji, wymaga przeprowadzenia znacznej liczby sesji obliczeniowych w celu zbadania wpływu zmienności parametrów na uzyskiwane rozkłady naprężeń i osiadań podłoża, co w dużym stopniu wydłuża proces kalibracji.

### Literatura

- [1] Zimmermann Th., Truty A., Urbański A., Podleś K., Z\_Soil. PC 2007 manual. Zace Services Ltd, Software Engineering, Lausanne, 2007.
- [2] Biały M., Przestrzenna analiza współdziałania fundamentu chłodni kominowej z nieliniowo odkształcalnym podłożem przy uwzględnieniu sztywności nadbudowy. Dysertacja doktorska. Politechnika Śląska, 2008.
- [3] Gryczmański M., State of the art in modeling of soil behavior at small strains. Architecture Civil Engineering Environment. Vol 2, No 1/2009, pp. 61 – 80.
- [4] Gryczmański M., Uliniarz R., A simple critical state model with small strain nonlinearity overconsolidation soils. Foundations of Civil and Environmental Engineering, tom 12, 2008, str. 49 – 60.
- [5] Burland J.B., Small is beautiful – the stiffness of soils at small strains. 9-th Bjerrun Memorial Lectures, Canadian Geotechnical Journal, vol. 26, pp. 499 – 516.