

MARIUSZ BIAŁY*

WPŁYW PREKONSOLIDACJI PODŁOŻA NA OSIADANIA
HIPERBOLOIDALNEJ CHŁODNI KOMINOWEJINFLUENCE OF OVERCONSOLIDATION OF SUBSOIL
ON SETTLEMENTS OF HYPERBOLIC COOLING TOWER

Streszczenie

W artykule przedstawiono weryfikację lokalnego modelu numerycznego współpracy chłodni kominowej o powłoce hiperboloidalnej z normalnie skonsolidowanym i prekonsolidowanym podłożem gruntowym. Do opisu gruntu w symulacjach numerycznych zastosowano dwa modele gruntu: MCC i FC+MCC. Opisano wyniki monitoringu osiadań hiperboloidalnej chłodni kominowej prowadzonego w trakcie jej budowy.

Słowa kluczowe: hiperboloidalna chłodnia kominowa, monitoring osiadań, współdziałanie konstrukcji z podłożem

Abstract

The paper presents verification of the local numerical model of interaction of hyperbolic cooling tower with normally consolidated and overconsolidated subsoil. Soil in simulations was described by Modified Cam-Clay and FC+MCC models. The paper described results of monitoring settlements of cooling tower under construction.

Keywords: hyperbolic cooling tower, monitoring of settlements, soil-structure interaction

* Dr inż. Mariusz Biały, Katedra Geotechniki, Wydział Budownictwa, Politechnika Śląska.

1. Wstęp

Rezultaty prowadzonych wspólnie badań dowodzą, że traktowany makroskopowo grunt jest ośrodkiem nieliniowo odkształcalnym [1], zwłaszcza w przedziale małych deformacji i w stanie przedkrytycznym. Odznacza się też dużą wrażliwością na ścieżkę obciążenia, a w szczególności na zjawisko prekonsolidacji. Posiada przy tym zdolność zapamiętywania historii obciążenia, co ma decydujące znaczenie w przypadku posadowienia budowli na terenach, które w przeszłości były już obciążone np. nasypami o dużej wysokości bądź też innymi budowlami. Stosowany powszechnie w projektowaniu fundamentów pierścieniowych chłodni kominowych sprężysty model podłoża nie uwzględnia powyższych istotnych cech gruntu. Konieczne jest więc zastosowanie do opisu współpracy chłodni z podłożem bardziej zaawansowanych praw konstytutywnych, takich jak np. Modified-Cam Clay, w przypadku gruntów normalnie skonsolidowanych, i komplementarnego modelu Faheya Cartera plus Modified-Cam Clay dla gruntów silnie prekonsolidowanych. Zastosowanie tych praw w symulacjach numerycznych współpracy budowli z podłożem zaprezentowano w publikacjach [2–4], a dokładny opis modelu Faheya Cartera, który był bazą do stworzenia związków FC+MCC, można znaleźć w publikacji [6].

Jednym z decydujących czynników o dokładnym wyznaczeniu rozkładów i wartości naprężeń i osiadań podłoża fundamentów pierścieniowych chłodni jest prawidłowy dobór schematu statycznego fundamentu. W obliczeniach inżynierskich konstrukcji chłodni powszechnie stosuje się uproszczony schemat prostoliniowego fundamentu obciążonego równomiernie na całej długości zamiast zakrzywionego w planie, obciążonego punktowo, pierścienia. Rezygnacja z ww. uproszczonego schematu statycznego, a także ze schematu płyty pierścieniowej na sprężystym podłożu, zaproponowanego w pracy [10] na rzecz modelu przestrzennego, i użycie odpowiednio zaawansowanego prawa konstytutywnego w istotny sposób zmieniają parametry projektowe. Dotyczy to głównie wyznaczania wartości osiadań chłodni, szacowanych na etapie projektowania posadowienia tych obiektów. Ma to duże znaczenie ze względu na skalę i kształt konstrukcji, tzn. bardzo dużą powierzchnię kontaktu fundament pierścieniowy–podłoże, a co za tym idzie możliwość występowania zróżnicowanych warunków posadowienia fundamentu na całym jego obwodzie. Istotnym problemem jest w tym przypadku zapewnienie bezpiecznego posadowienia chłodni, czyli takiego, które zagwarantuje zminimalizowanie różnic osiadań podłoża pierścienia fundamentowego. Wiąże się z tym konieczność precyzyjnego oszacowania osiadań konstrukcji na etapie projektowania posadowienia z uwzględnieniem stopnia prekonsolidacji podłoża. Precyzja szacowania osiadań w dużym stopniu zależy od adekwatności prawa konstytutywnego przyjętego do opisu gruntu.

Wielkości osiadań budowli, wyznaczone na bazie obowiązującej nadal i powszechnie stosowanej w praktyce projektowej normy PN/81/B-03020, często odbiegają od pomierzonych wartości osiadań rzeczywistych obiektów. Wynika to głównie z pobieżnego i uproszczonego potraktowania zjawiska prekonsolidacji w tej normie. Kolejnym powodem obserwowanych rozbieżności osiadań obliczonych na podstawie normy, a także osiadań pomierzonych, jest sposób szacowania modułów sztywności gruntów E_0 . Autorzy normy PN-74/B-03020 (będącej podstawą stworzenia późniejszej wersji normy, tj. PN-81/B-03020), budując zależności korelacyjne pomiędzy stopniem plastyczności gruntów spoistych lub stopniem zagęszczenia gruntów niespoistych a modułem odkształcenia E_0 , oparli się na wynikach badań prowadzonych w latach 60. przez Boleńskiego [5] i opublikowanych

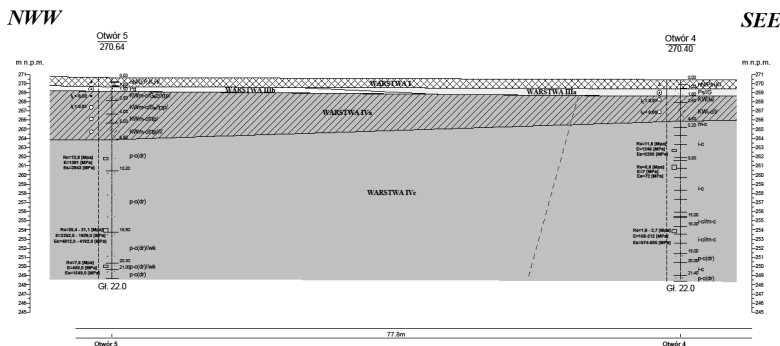
w 1972 r. W badaniach tych przeprowadzono pomiary wielu wysokich budynków w Warszawie, posadowionych na gruntach jednorodnych. Wartości modułu odkształcenia E_0 , specyfikujące wspomniane zależności, ustalone zostały w drodze analizy odwrotnego zagadnienia równowagi półprzestrzeni sprężystej Boussinesq pod obciążeniem z fundamentu, z wykorzystaniem osiadań zmierzonych przez Boleńskiego [5]. Zależności korelacyjne uzupełnione zostały o wpływ czynnika genetycznego lub uziarnienia odpowiednio w przypadku gruntów spoiстых i niespoistych. Wartości modułu odkształcenia, zamieszczone w PN-81/B-03020, na pierwszy rzut oka wydają się być użyteczne w analizach osiadań chłodni. Po pierwsze, są one związane z obszarami obciążenia o dużych rozmiarach w rzucie (fundamenty płytowe w badaniach Boleńskiego) i nie są miarodajne dla fundamentów pierścieniowych. Po wtóre, w modelach stanu krytycznego nie pojawiają się granice Atterberga, niezbędne do określenia stopnia plastyczności – zmiennej niezależnej w związkach korelacyjnych PN-81/B-03020. Po trzecie, najważniejsze, czynnik genetyczny – charakterystyka typowo opisowa – nie może zastąpić podstawowego parametru modeli stanu krytycznego, tj. współczynnika prekonsolidacji OCR.

Zrealizowana dla nowego bloku energetycznego nowa hiperboloidalna chłodnia kominowa o mocy 460 MW w Elektrowni Łągisza została wzniesiona w miejscu posadowienia starej, wyburzonej chłodni. Część pierścienia fundamentowego nowej chłodni posadowiono na obszarze będącym pod wpływem obciążenia starą chłodnią, zaś pozostała część fundamentu spoczęła na podłożu, które nie było uprzednio obciążone żadną budowlą (rys. 4). Takie usytuowanie chłodni dało okazję do zbadania wpływu prekonsolidacji podłoża na osiadania. Badania osiadań pierścienia fundamentowego prowadzono w trakcie budowy nowej chłodni, a ich wyniki posłużyły do zweryfikowania przestrzennego, lokalnego modelu numerycznego współpracy chłodni z uwarstwionym podłożem.

2. Badania i charakterystyka podłoża chłodni w Łągiszy

Badania polowe i laboratoryjne podłoża, na potrzeby projektu posadowienia chłodni, prowadzono w kilku etapach. Podstawowe badania wykonał Zakład Robót Geologiczno-Inżynierskich GEOTEST Tychy. Wykonano 5 otworów badawczych o głębokości 22 m: jeden w centrum chłodni i cztery na obwodzie pierścienia fundamentowego. Opis podłoża uzupełniły dane uzyskane z czterech otworów archiwalnych, z których trzy wykonano wewnątrz pierścienia, a jeden na zewnątrz (rys. 1). Do stropu skalistych utworów karbońskich wiercenie prowadzono systemem mechaniczno-obrotowym, na sucho, z użyciem świdra rurowego (szapy) lub świdra spiralnego, natomiast skały karbońskie wiercono systemem mechaniczno-obrotowym, rdzeniowo, z użyciem płuczki. W trakcie prac wiertniczych pobierano próbki o naturalnej wilgotności (NW), na których wykonano badania makroskopowe i próbki o nienaruszonej strukturze (NNS). Część z tych próbek gruntu wytypowano do badań laboratoryjnych w celu określenia ich cech fizykomechanicznych.

Na próbkach o nienaruszonej strukturze wykonano badania laboratoryjne w aparacie trójosiowego ściskania i w edometrze. Do badań w aparacie trójosiowego ściskania użyto próbek o średnicy $D = 3,5$ cm i wysokości $h = 8$ cm, wyciętych z prób NNS. Dla próbek ściętych (z tej samej serii prób NNS) przy różnych naprężeniach efektywnych określono wartości parametrów ϕ' i c' . Badania edometryczne przeprowadzono na próbkach o wysokości $h = 2$ cm i średnicy $\phi = 5,0$ cm, wyciętych z prób gruntu o nienaruszonej strukturze



PPUH "GEOTEST" ZRG-I			Zak. Nr
ul. Przewoła 12, TYCHY			9.5
ALSTOM Power Sp. z o.o. - Wnioskodawca		Dokumentacja geotechniczna	
Obiekt w Długości		Opisany (z) w terminie i miejscu	
ul. Skowronowa 2, ELBLĄG		Przekrój geologiczny	
	020	120	200
Opisany	24.07.2008	mgr P. Stawiszyn	VI

Rys. 2. Przekrój podłoża przez otwory 4 i 5 (ZRGi GEOTEST Tychy)

Fig. 2. Cross-section of subsoil across bore-holes 4 and 5 (ZRGi GEOTEST Tychy)

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, a następnie zagęszczono je przez walcowanie. Bezpośrednio pod fundamentem, na całym jego obwodzie, wykonano poduszkę dolomitową, a po zagęszczeniu tej poduszki wykonano podkład betonowy pierścienia fundamentowego.

3. Monitoring osiadań chłodni posadowionej na uwarstwionym podłożu

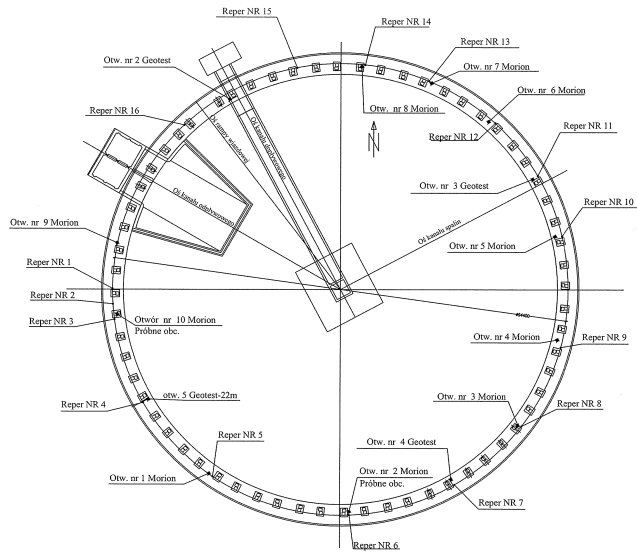
Pomiary osiadań rozpoczęto po zakończeniu robót ziemnych i po wykonaniu podkładu betonowego pierścienia. W trakcie montażu zbrojenia fundamentu przygotowano 16 reperów ze stali nierdzewnej do osadzenia w betonie podkładu. Repery wklejono żywicą epoksydową w otwory nawiercone w podkładzie, a po związaniu żywicy od razu wykonano pierwszy pomiar ich wysokości. Kolejne pomiary prowadzono sukcesywnie wraz z postępem robót. Obejmowały one zakończone etapy betonowania i montażu:

- 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 naprężeń pod badanym fundamentem od obciążenia ciężarem własnym chłodni. Całość powłoki zabetonowano w 106 cyklach.

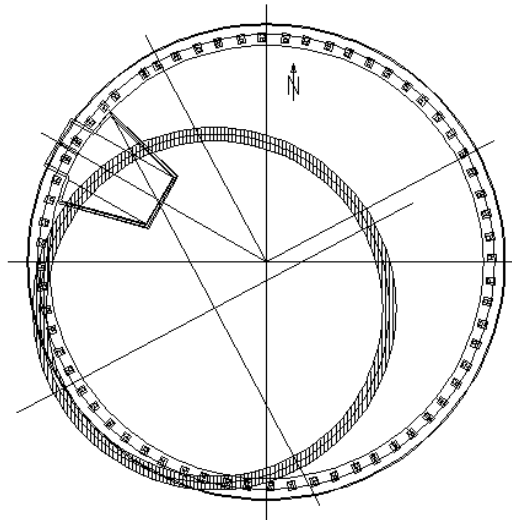
Pomiary osiadań kontynuowano po zakończeniu budowy powłoki, jeszcze w trakcie prac nad urządzeniami wewnętrznymi chłodni. W sumie wykonano 12 pomiarów osiadań kompletu 16 reperów, umieszczonych na obwodzie pierścienia fundamentowego i dwóch

reperów porównawczych, osadzonych na obiektach położonych poza obrębem badanej konstrukcji.



Rys. 3. Usytuowanie reperów i otworów badawczych

Fig. 3. Location of bench-marks and exploratory bore-hols



Rys. 4. Usytuowanie fundamentu nowej i ślad fundamentu starej, wyburzonej chłodni

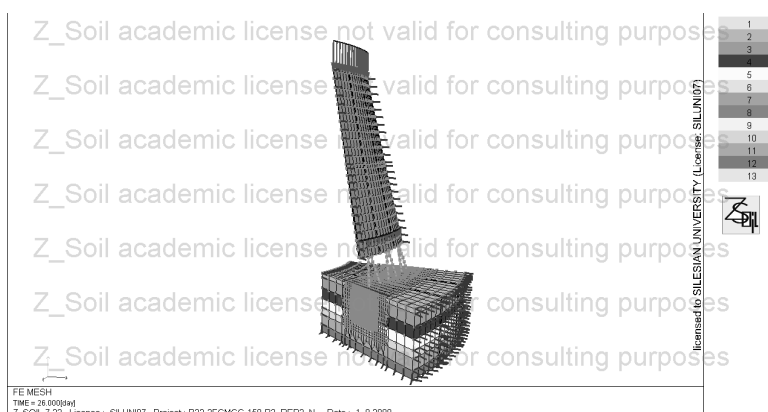
Fig. 4. Location of foundation of new cooling tower and track of foundation after demolition of older cooling tower

Reper 3 zamocowano w podkładzie betonowym fundamentu nad strefą podłoża, która poddana była wpływowi prekonsolidacji od starej chłodni. Reper 11 ustalono w miejscu, gdzie podłoże nie ulegało wpływowi obciążenia starą chłodnią. Porównanie zachowania się tych dwóch reperów dało możliwość obserwowania wpływu prekonsolidacji na osiadania chłodni. Schemat rozmieszczenia reperów pokazano na rys. 3. Poniżej, na rys. 4, pokazano strefę oddziaływania fundamentu starej chłodni na tle rzutu fundamentu nowej chłodni, której pierścień fundamentowy ma znacznie większy promień.

4. Analizy numeryczne układu chłodnia–podłoże

W analizach numerycznych posłużono się przestrzennym, lokalnym, trójsegmentowym modelem (rys. 5 i 6), zbudowanym na bazie sześć- i ośmiowęzłowych izoparametrycznych przestrzennych elementów skończonych. Do budowy modelu geometrycznego użyto 22 286 elementów przestrzennych i 22 520 węzłów. W celu uzyskania dokładnych wyników obliczeń zagęszczono siatkę elementów skończonych w bezpośrednim sąsiedztwie fundamentu, zgodnie z zasadami podanymi przez Gryczmańskiego [8]. Na styku fundament–podłoże wygenerowano powierzchniowe elementy kontaktowe. Obliczenia przeprowadzono na komputerze przenośnym, z procesorem Intel Core 2 Duo, o częstotliwości taktowania 1,73 GHz, z pamięcią operacyjną 2 GB. Czas trwania obliczeń jednego zadania wynosił od 4,5 do 6 godzin.

Analizy numeryczne przeprowadzono dla chłodni kominowej posadowionej na uwarstwionym podłożu gruntowym, opisanym modelami: MCC, FC+MCC i sprężystym.

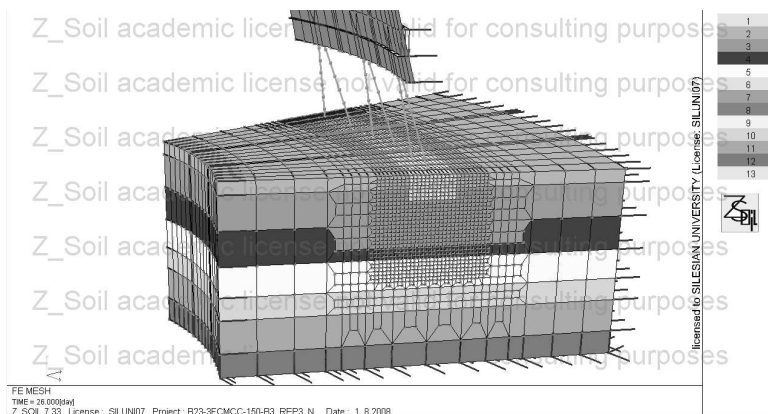


Rys. 5. Model MES układu fundament–podłoże

Fig. 5. Foundation–subsoil MES model

Żelbetowa konstrukcja fundamentu pierścieniowego, podpór i powłoki chłodni traktowana jest jako izotropowy materiał liniowo-sprężysty.

Całkowita wysokość chłodni mierzona od poziomego terenu wynosi 133,2 m. Promień fundamentu pierścieniowego ma długość 47,2 m. Wysokość fundamentu równa jest 1,3 m, a jego szerokość 4,5 m.



Rys. 6. Model MES – dyskretyzacja podłoża w symulacji osiadań fundamentu dla reperu 3

Fig. 6. FEM model – discretisation of subsoil in simulation of foundation settlement for bench-mark 3

Powłoka chłodni została zamodelowana do poziomu 41% całkowitej wysokości konstrukcji chłodni. Ciężar pozostałej części powłoki zastąpiono przyłożonym do górnej części zamodelowanego fragmentu obciążeniem równomiernie rozłożonym.

5. Parametry podłoża w miejscu osadzenia reperów badawczych 3 i 11

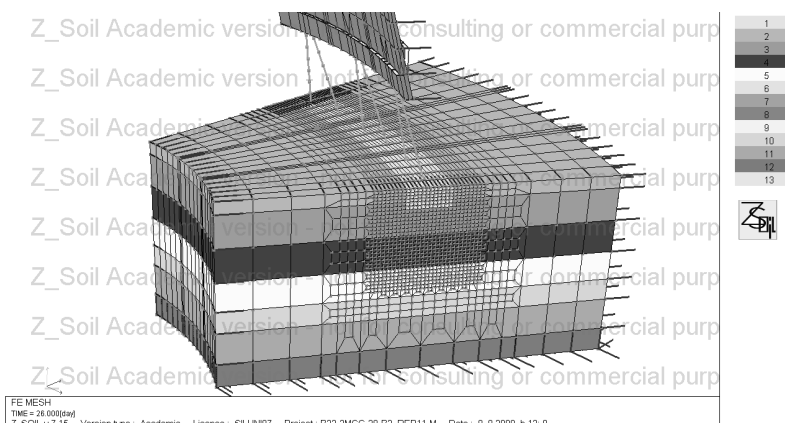
Podłoże fundamentu w miejscu osadzenia reperu 3 zbudowane jest z trzech warstw: pyłu piaszczystego w stanie półzwartym zalegającego w warstwie IVa o grubości 5,2 m, warstwy piaskowca o grubości 8,55 m o module sprężystości $E = 1091$ MPa i warstwy piaskowca o grubości 2,4 m o module sprężystości $E = 1929$ MPa. Ze względu na konieczność usunięcia pozostałości gruzu ze starej chłodni wykonano w to miejsce poduszkę dolomitową o grubości 1,125 m. Podłoże zbadano otworem nr 5, wykonanym przez GEOTEST Tychy, oraz sondowaniem statycznym w otworze nr 39. Parametry modelu FC+MCC przyjęto na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych na próbkach NNS w aparacie trójosiowego ściskania i w edometrze. Moduły sprężystości skał przyjęto na podstawie wyników badań wykonanych przez Laboratorium Geomechaniki Górniczej GIG. Wartości gęstości objętościowej i współczynnika Poissona dla skał i kruszywa dolomitowego przyjęto na podstawie literatury [7]. Stopień zagęszczenia poduszki dolomitowej określono po wykonaniu badań sondą dynamiczną lekką.

Przyjęty model geometryczny podłoża pokazano na rys. 6. Warstwę pyłu piaszczystego oznaczono numerem 3, piaskowiec o module sprężystości $E = 1091$ MPa numerami 4, 5, 10 i 11, a piaskowiec o module $E = 1929$ MPa nr 12. Materiał poduszki dolomitowej oznaczony jest numerami 6 i 13.

Podłoże fundamentu w miejscu osadzenia reperu 11 zbudowane jest z pięciu warstw: gliny pylastej zwięzłej przewarstwionej pyłem piaszczystym i iłem w stanie półzwartym, zalegających w warstwie IVa o grubości 2,63 m, warstwy iłowca o grubości 3,4 m o module sztywności $E = 10$ MPa, warstwy iłowca o grubości 5,25 m i module sztywności

$E = 11$ MPa, warstwy iłowca o grubości 2,25 m i module $E = 6$ MPa oraz warstwy piaskowca o grubości 5,7 m i module sztywności $E = 422$ MPa. Pod fundamentem wykonano poduszkę dolomitową o grubości 0,75 m. Podłoże zbadano otworem nr 3 oraz sondowaniem statycznym w otworach nr 37 i 39. Parametry modelu FC+MCC przyjęto na podstawie badań laboratoryjnych przeprowadzonych na próbkach NNS w aparacie trójosiowego ściskania i w edometrze. Parametry fizykomechaniczne skał zalegających w niższych warstwach podłoża oraz poduszek dolomitowych wyznaczono podobnie jak w przypadku reperu nr 3.

Przyjęty model geometryczny podłoża pokazano na rys. 7. Warstwę gliny pylastej zwięzłej oznaczono nr 3, iłowiec o module sprężystości $E = 10$ MPa nr 4, iłowiec o module $E = 11$ MPa nr 5, iłowiec o module 6 MPa nr 10, a piaskowiec o module $E = 422$ MPa numerami 11 i 12. Materiał poduszki dolomitowej oznaczony jest numerami 6 i 13.



Rys. 7. Model MES – dyskretyzacja podłoża w symulacji osiadań fundamentu dla reperu 11

Fig. 7. FEM model – discretisation of subsoil in simulation of settlements for bench-mark 11

6. Parametry modeli gruntu w symulacjach numerycznych osiadań fundamentu w miejscach mocowania reperów 3 i 11

W analizach zastosowano trzy modele gruntu: MCC, FC+MCC i model sprężysty. Konstrukcję żelbetową chłodni opisano modelem sprężystym. Ten sam model zastosowano przy opisie skał występujących w podłożu w zasięgu oddziaływania fundamentu. Podłoże normalnie skonsolidowane opisano modelem MCC, zaś w przypadku podłoża prekonsolidowanego użyto komplementarnego modelu FC+MCC zaproponowanego przez Gryczmańskiego i Uliniarza [9]. Efektywność stosowania modeli MCC i FC+MCC w analizach współpracy chłodni z jednorodnym podłożem o różnych współczynnikach prekonsolidacji OCR przedstawiono i wykazano w publikacji [4]. Poniżej podano parametry warstw opisanych ww. modelami w symulacjach osiadań fundamentów w miejscach mocowania reperów badawczych.

Parametry betonu konstrukcji chłodni i modeli gruntów warstw podłoża w symulacjach osiadań reperu nr 3 (podłoże prekonsolidowane):

Fundament, podpory ukośne, powłoka: $E = 30\,000\,000$ kPa; $\nu = 0,2$; $\gamma = 25$ kN/m³

Warstwa 2 (grunt zasypowy fundamentu) – pył piaszczysty (FC+MCC):

$\phi = 31^\circ$; $K_0 = 0,4850$; $\nu = 0,3$; $\gamma = 20$ kN/m³; $e_0 = 0,52$; $M_c = 1,24$; $k = 0,7075$; $\lambda = 0,005398$; $\kappa = 0,001321$; $p_{c0} = 103,8$ kPa; OCR = 8,69; $c = 10$; $K^* = 6000$; $n = 0,6$; $p_a = 1$; $f = 0,9$; $g = 0,6$.

Dla głębszych warstw pyłu piaszczystego, oznaczonych na rys. 6 numerami 3 i 4, przyjęto wartości współczynnika prekonsolidacji i wartości początkowej ciśnienia prekonsolidacji równe odpowiednio: OCR = 2,67 i $p_{c0} = 146,7$ kPa oraz $p_{c0} = 244$ kPa i OCR = 2,29. Pozostałe parametry modelu FC+MCC warstw 3 i 4 przyjęto jak dla warstwy 2.

Warstwa 5, 10 i 11 – Piaskowiec: $E = 1\,091\,000$ kPa, $\nu = 0,263$, $\gamma = 21$ kN/m³

Warstwa 12 – Piaskowiec: $E = 1\,929\,000$ kPa, $\nu = 0,263$, $\gamma = 21$ kN/m³

Warstwa 13 – Poduszka dolomitowa: $E = 165\,000$ kPa, $\nu = 0,25$, $\gamma = 20$ kN/m³

Warstwa kontaktowa: $\phi = 20^\circ$; $c = 2$ kPa

Numeracja materiałów elementów chłodni i warstw gruntu odpowiada oznaczeniom użytym na schemacie modelu geometrycznego (rys. 6).

Parametry modeli gruntów warstw podłoża w symulacjach osiadań reperu nr 11 (podłoże normalnie skonsolidowane) są następujące:

Warstwa 2 (grunt zasypowy fundamentu) – glina pylasta zwięzła przewarstwiona pyłem piaszczystym i iłem (MCC):

$\phi = 29^\circ$; $K_0 = 0,5152$; $\nu = 0,3$; $\gamma = 20$ kN/m³; $e_0 = 0,675$; $M_c = 1,16$; $\lambda = 0,006554$; $\kappa = 0,003414$; $p_{c0} = 30,09$ kPa; OCR = 2,54

Warstwa 3 – glina pylasta zwięzła przewarstwiona pyłem piaszczystym i iłem (MCC):

$\phi = 31^\circ$; $K_0 = 0,4850$; $\nu = 0,3$; $\gamma = 20$ kN/m³; $e_0 = 0,52$; $M_c = 1,24$; $\lambda = 0,005398$; $\kappa = 0,001321$; $p_{c0} = 73$ kPa; OCR = 1,33

Warstwa 4 – Iłowiec: $E = 1\,248\,000$ kPa, $\nu = 0,275$, $\gamma = 20$ kN/m³

Warstwa 5 – Iłowiec: $E = 10\,000$ kPa, $\nu = 0,275$, $\gamma = 20$ kN/m³

Warstwa 10 – Iłowiec: $E = 6000$ kPa, $\nu = 0,275$, $\gamma = 20$ kN/m³

Warstwy 11 i 12 – Piaskowiec: $E = 422\,000$ kPa, $\nu = 0,263$, $\gamma = 21$ kN/m³

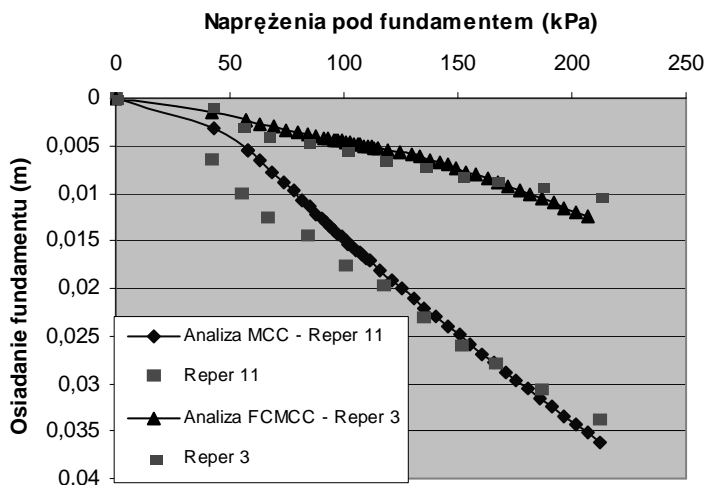
Warstwa 6 – Poduszka dolomitowa: $E = 165\,000$ kPa, $\nu = 0,25$, $\gamma = 20$ kN/m³

Warstwa kontaktowa: $\phi = 20^\circ$; $c = 2$ kPa

Numeracja warstw gruntu odpowiada oznaczeniom użytym na schemacie modelu geometrycznego (rys. 7).

7. Wyniki analizy numerycznej

W analizach badano wartości osiadań i naprężeń podłoża pod fundamentem w węzłach i elementach obserwowanych na płaszczyźnie siecznej, prostopadłej do płaszczyzny podstawy modelu. Płaszczyzna ta przechodzi przez punkt oparcia słupa chłodni na pierścieniu fundamentowym. Wyniki symulacji numerycznych w postaci charakterystyk naprężenie pod fundamentem–osiadanie fundamentu pokazano na rys. 8.



Rys. 8. Porównanie charakterystyk naprężenia–osiadania podłoża normalnie skonsolidowanego i prekonsolidowanego

Fig. 8. Comparison of settlement–stresses characteristics for normally consolidated and overconsolidated subsoil

Z porównania osiadań przewidywanych i pomierzonych, przedstawionych na rys. 8 wynika, że osiadań podłoża silnie prekonsolidowanego (reper 3) są trzykrotnie mniejsze od tych na podłożu normalnie skonsolidowanym (reper 11).

8. Wnioski

Wyniki obliczeń i monitoringu osiadań chłodni w Łagiszy są zbieżne, co potwierdza skuteczność stosowania lokalnych modeli przestrzennych i zaawansowanych praw konstytutywnych w analizach współpracy chłodni z uwarstwionym, normalnie skonsolidowanym i silnie prekonsolidowanym podłożem.

Wpływ prekonsolidacji podłoża od obciążenia starą, wyburzoną chłodnią na wielkości osiadań nowobudowanej chłodni w Łagiszy jest wyraźnie widoczny (rys. 8), co świadczy o tym, że historia obciążenia podłoża powinna być dokładnie analizowana w procesie projektowania posadowienia tych obiektów.

Lokalne, trójsegmentowe modele przestrzenne współpracy chłodni z podłożem gruntowym, bazujące na zaawansowanych prawach konstytutywnych, uwzględniających wpływ prekonsolidacji podłoża i duże zmiany sztywności w zakresie małych odkształceń, mogą być z powodzeniem analizowane w obliczeniach prowadzonych w systemie Z_Soil.PC na komputerach przenośnych typu laptop o pamięci operacyjnej 2 GB. Pozwala to wykonywać obliczenia dla potrzeb projektantów i wykonawców tych budowli w dowolnym miejscu i czasie.

Literatura

- [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., *Analiza numeryczna układu fundament pierścieniowy–podłoże sprężysto-plastyczne pod obciążeniem ciągłym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 102, Gliwice 2004, 107-114.
- [3] Biały M., *Modelowanie współdziałania chłodni kominowej z podłożem gruntowym*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 1756, Gliwice 2007, 91-99.
- [4] Biały M., *Zastosowanie modelu FC+MCC w analizie numerycznej współpracy chłodni kominowej z podłożem gruntowym*, Czasopismo Techniczne, z. 3-Ś/2008, z. 20, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008, 21-29.
- [5] Boleński M., *Osiadanie nowo wznoszonych budynków w zależności od podłoża gruntowego*, ITB, Warszawa 1973.
- [6] 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, 1993, 348-362.
- [7] Gercek H., *Poisson's ratio values for rocks*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44, 2007, 1-13.
- [8] Gryczmański M., *Analiza statyczna dowolnie uwarstwionego podłoża budowli metodą elementów skończonych*, rozprawa doktorska, Gliwice 1973.
- [9] Gryczmański M., Uliniarz R., *A simple critical state model with small strain nonlinearity overconsolidation soils*, Foundations of Civil and Environmental Engineering, Poznań 2008.
- [10] Ledwoń J., Golczyk M., *Chłodnie kominowe i wentylatorowe*, Arkady, Warszawa 1967.
- [11] Z_Soil.PC 2003, User Manual, ZACE Services Ltd., Lausanne 2003.