

Mariusz BIAŁY

Katedra Geotechniki
Politechnika Śląska

MODELOWANIE WSPÓLDZIAŁANIA CHŁODNI KOMINOWEJ Z PODŁOŻEM GRUNTOWYM

Streszczenie. W artykule przedstawiono symulację numeryczną współpracy fundamentu pierścieniowego chłodni kominowej z uwarstwionym podłożem gruntowym.

MODELLING OF INTERACTION OF COOLING TOWER WITH SUBSOIL

Summary. Numerical simulation of interaction of ring foundation of cooling tower with laminar subsoil is presented.

1. Wstęp

Dotychczasowe próby opisu współdziałania fundamentów pierścieniowych chłodni kominowych z podłożem gruntowym bazowały na jednowarstwowych, sprężystych modelach gruntu, przy założeniu uproszczonego schematu nieskończenie długiego fundamentu prostoliniowego, ze względu na małą wartość stosunku wymiaru poprzecznego fundamentu do jego promienia. Wadą takiego uproszczenia jest pomijanie usztywniającego wpływu powłoki na pracę fundamentu. Modele te nie uwzględniają również momentów skręcających, jakie występują w fundamencie pierścieniowym.

Celem przedstawionego artykułu jest zbudowanie modelu numerycznego chłodni kominowej na podłożu gruntowym, uwzględniającego wpływ sztywności powłoki na współpracę tej budowli z gruntem, opisanym zaawansowanym modelem, prezentującym nieliniowość odkształceń, plastyczność oraz stopień prekonsolidacji podłoża.

Utworzony w niniejszej analizie schemat obliczeniowy to fundament pierścieniowy o przekroju prostokątnym wraz z fragmentem powłoki chłodni kominowej, posadowionej na poziomo uwarstwionym podłożu, opisanym sprężysto-plastycznym modelem o wzmocnieniu izotropowym Modified Cam-Clay, należącym do rodziny modeli stanu krytycznego. W miejsce słupów ukośnych przekazujących obciążenia z powłoki na fundament pierścieniowy wprowadzono element o sztywności odpowiadającej parze tych słupów.

Zakładając, że obciążenie wiatrem może działać z każdego kierunku na powłokę chłodni i obciążenie pierścienia od ciężaru własnego konstrukcji jest symetryczne, na modelowanym fundamencie przyjęto obciążenie równomiernie rozłożone o wartości równej sumie tych obciążeń. Uproszczenia te są dopuszczalne ze względu na dużą sztywność powłoki i znaczną sztywność pierścienia fundamentowego o przekroju 1,3x4,5 m. Powyższe założenia pozwalają rozpatrywać zagadnienie współpracy chłodni z podłożem jako zadanie osiowo symetryczne. W przyszłości to sprowadzenie schematu 3D do 2D musi być zweryfikowane.

2. Numeryczny model układu

Realizacja postawionego celu na drodze obliczeniowej wymaga zastosowania metody elementów skończonych. Dyskretyzacja układu elementami powinna w tym przypadku być zgodna z zasadami podanymi w publikacji [4]:

- wykorzystanie osiowej symetrii polegającej na dyskretyzacji połówki pionowego przekroju środkowego chłodni wraz z podłożem,
- dostosowanie podziału na elementy układu do warstwowej budowy podłoża-brzegi elementów powinny pokrywać się z brzegami warstw,
- wspólny podział na elementy podłoża i fundamentu,
- zagęszczenie siatki elementów skończonych w rejonie styku fundamentu z podłożem, gdzie występują największe zaburzenia w rozkładzie naprężeń.

Zastosowana dyskretyzacja pokazana jest na rys. 3, a jego powiększenie na rys. 4.

W analizie zastosowano układ złożony z 1741 izoparametrycznych elementów czterowęzłowych. Analizę przeprowadzono programem Z_Soil.

Opis modelu numerycznego dopełniają związki „naprężenie-odkształcenie” zdefiniowane w dowolnym punkcie obszaru. Jak już wspomniano, do opisu zachowania się podłoża przyjęto sprężysto-plastyczny model o izotropowym wzmocnieniu. Wybrano w tym celu zaproponowany przez Roscoe i Burlanda model Modified Cam-Clay, opisany w rozdziale 3.

3. Model materiałowy – Modified Cam-Clay

Modified Cam-Clay w wersji podanej przez Roscoe i Burlanda jest modelem sprężysto-plastycznym o izotropowym wzmocnieniu, którego parametrem jest plastyczny wskaźnik porowatości. Podstawą modelu jest elipsoidalna powierzchnia plastyczności, której przekrój pionowy pokazano na rys. 1. Równanie określające tę powierzchnię przyjmuje postać:

$$F(p,q) = q^2 + M^2 p' (p' - p'_{cs}) = 0. \quad (1)$$

Prawo wzmocnienia wyznacza równanie:

$$p'_e = p'_{e0} \exp\left(\frac{\Delta e^p}{\lambda - \chi}\right), \quad (2)$$

$$p'_{e0} = \left[\frac{1}{3}(1 + K_0) + \frac{3(1 - K_0)^2}{M^2(1 + 2K_0)} \right] (\gamma'z + q_0) \quad (3)$$

$$K_t = \frac{(1 + e_0)p'}{\chi} \quad v = \text{const} \quad (4)$$

$$\text{OCR} = 1 + \frac{q_0}{\gamma \times z} \quad (5)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (6)$$

gdzie:

q_0 – obciążenie erozyjne (np. obciążenie od lodowca),

p'_c – ciśnienie prekonsolidacji (parametr izotropowego wzmocnienia),

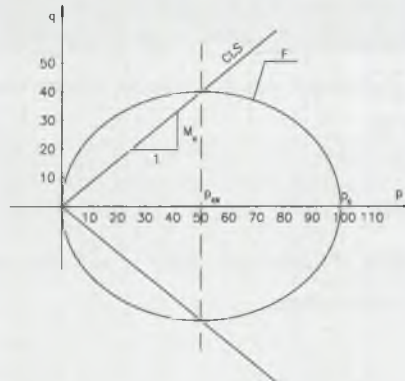
p'_{e0} – ciśnienie prekonsolidacji w danym punkcie podłoża pod fundamentem w momencie rozpoczęcia budowy obiektu,

Δe^p – całkowita plastyczna zmiana wskaźnika porowatości,

M – nachylenie linii stanu krytycznego,

K_t – sprężysty moduł ściśliwości (styczny),

G_t – sprężysty moduł ścinania (styczny).



Rys. 1. Przekrój powierzchni plastycznej modelu Modified Cam-Clay
Fig. 1. Section of yield surface of Modified Cam-Clay model

4. Dane do analizy

W symulacji przyjęto schemat podłoża złożonego z warstw o następujących parametrach:

Grunt zasypowy wokół fundamentu gr. 1,3 m

$\phi=33$; $K_0=0,4554$; $\nu=0,25$; $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda=0,01$; $\chi=0,001$; $p_{c0}=23,4 \text{ kPa}$; $M_c=1,33$; $\text{OCR}=1$

Poduszka pod fundamentem gr. 0,3 m

$\phi=33$; $K_0=0,4554$; $\nu=0,25$; $\gamma=19 \text{ kN/m}^3$; $\lambda=0,01$; $\chi=0,001$; $p_{c0}=28,8 \text{ kPa}$; $M_c=1,33$; $\text{OCR}=1$

Warstwa 1 – model 1

$\phi=31$; $K_0=0,4850$; $\nu=0,3$; $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda=0,03$; $\chi=0,003$; $p_{c0}=285 \text{ kPa}$; $M_c=1,24$; $\text{OCR}=5$

Warstwa 1 – model 2

$\phi=31$; $K_0=0,4850$; $\nu=0,3$; $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda=0,06$; $\chi=0,006$; $p_{c0}=285 \text{ kPa}$; $M_c=1,24$; $\text{OCR}=5$

Warstwa 2

$\phi=19$; $K_0=0,6744$; $\nu=0,25$; $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda=0,02$; $\chi=0,002$; $p_{c0}=384 \text{ kPa}$; $M_c=0,7305$; $\text{OCR}=3$

Warstwa 3

$\phi=19$; $K_0=0,4554$; $\nu=0,25$; $\gamma=20 \text{ kN/m}^3$; $\lambda=0,02$; $\chi=0,002$; $p_{c0}=447 \text{ kPa}$; $M_c=0,7305$;

$\text{OCR}=2,37$

Warstwa kontaktowa: $\phi=20$; $c=2 \text{ kPa}$

Beton fundamentu: $E=30000000 \text{ kN/m}^2$; $\nu=0,2$; $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$

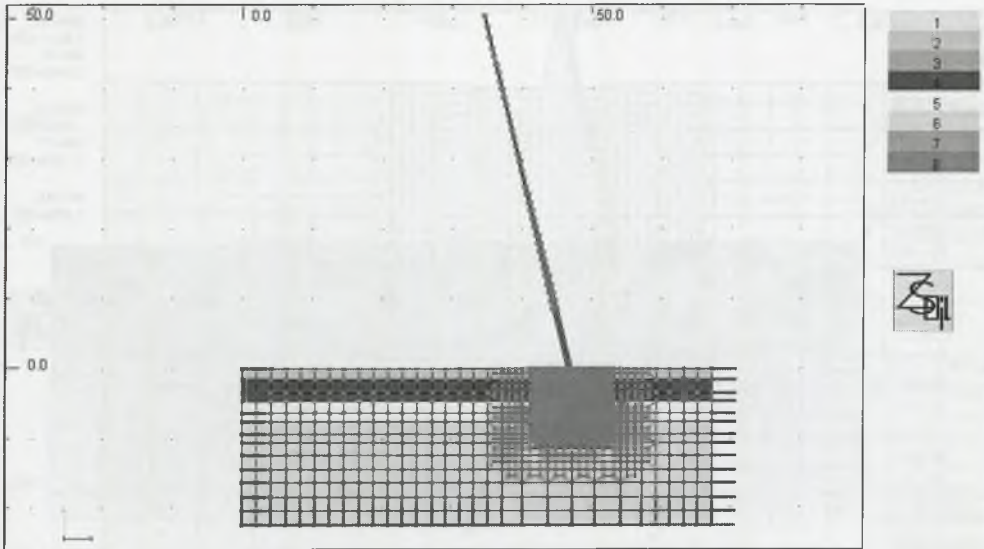
Beton podpory powłoki: $E=15000000 \text{ kN/m}^2$; $\nu=0,2$; $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$

Żelbet fundamentu pierścieniowego i powłoki chłodni traktowany jest jako izotropowy materiał liniowo sprężysty.

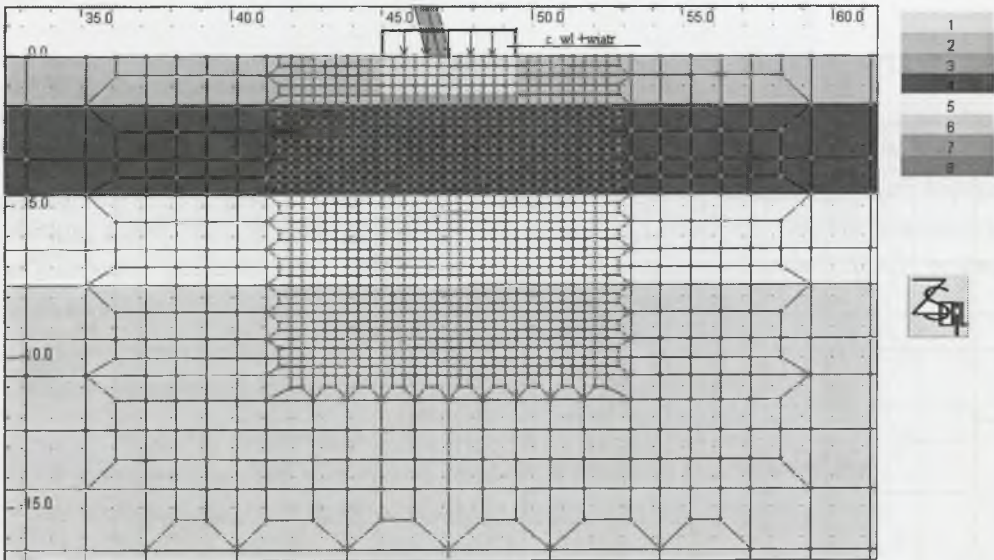
Wysokość chłodni kominowej od poziomu terenu wynosi 133 m. Średnica fundamentu pierścieniowego 47,2 m, przekrój fundamentu 1,3x4,5 m. Fundament posadowiony jest na poduszce żwirowej o grubości 30 cm. Przyjęte do analizy podłoże zbudowane jest z trzech warstw. Pierwsza, słabsza warstwa o grubości 3 m zalega na głębokości 1,6 m, druga mocna warstwa o gr.3 m zalega na głębokości 4,6 m i trzecia mocna warstwa o gr.14,8 m, której strop zalega na głębokości 7,6 m.

5. Analiza numeryczna

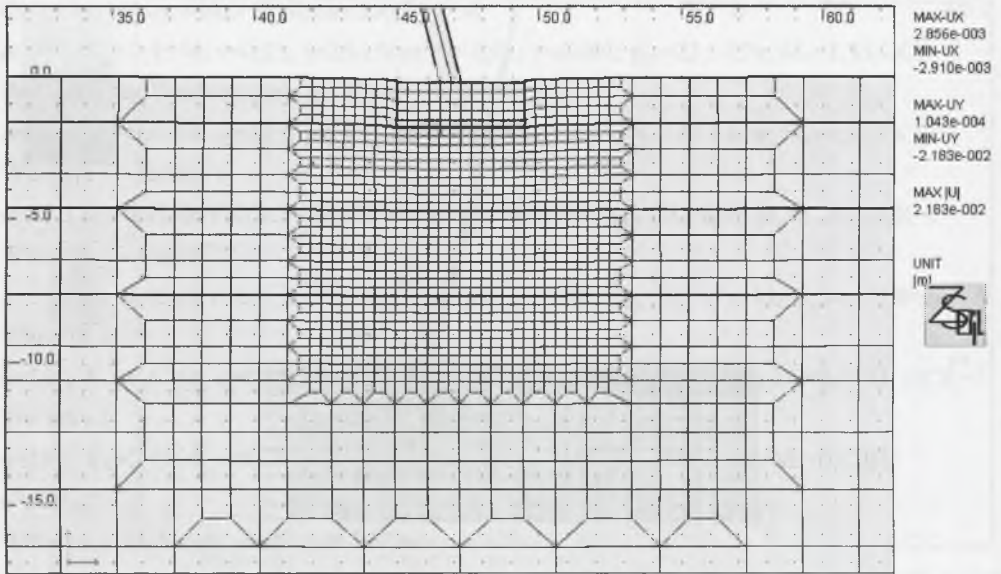
Przeanalizowano dwa modele obliczeniowe chłodni, różniące się parametrami pierwszej-słabej warstwy podłoża pod fundamentem.



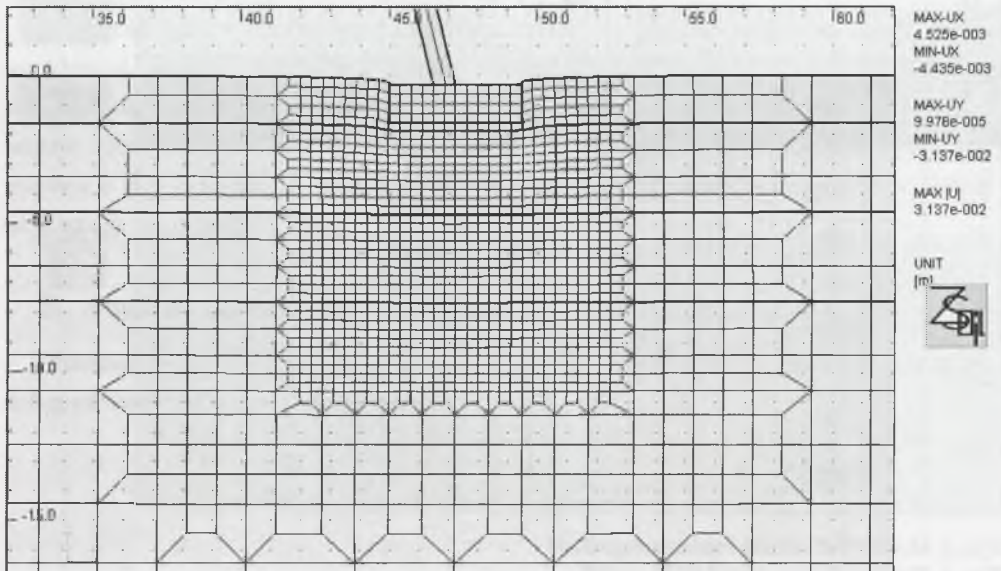
Rys. 2. Model MES układu fundament-podłoże
 Fig. 2. The foundation-subsoil FEM model



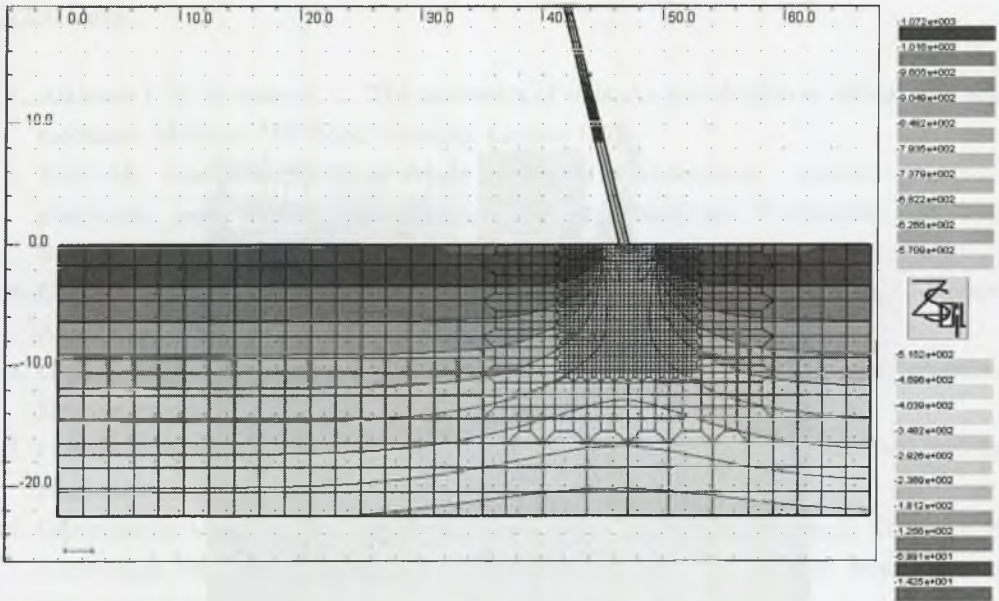
Rys. 3. Model MES układu fundament-podłoże
 Fig. 3. The foundation-subsoil FEM model



Rys. 4. Wynik testu numerycznego-deformacja siatki elem.skończonych dla punktu bad.nr 2
 Fig. 4. Result of numeric test-deformation of infinite elements mesh for measuring point nr 2



Rys. 5. Wynik testu numerycznego-deformacja siatki elem.skończonych dla punktu bad.nr 10
 Fig. 5. Result of numeric test-deformation of infinite elements mesh for measuring point nr 10



Rys. 6. Wynik testu numerycznego-izobary naprężeń σ_{yy}
 Fig. 6. Result of numeric test-isobars of normal stresses σ_{yy}

6. Weryfikacja modelu obliczeniowego

Dla zweryfikowania przyjętego modelu obliczeniowego chłodni kominowej na podłożu gruntowym niezbędne jest zbadanie profilu i oszacowanie osiadania podłoża rzeczywistego obiektu przed jego realizacją. W miejscu planowanej budowy chłodni kominowej, na poziomie posadowienia fundamentu pierścieniowego, wykonano dwa próbné wielkowiarmowe obciążenia gruntu w dwóch punktach badawczych nr 2 i 10.

Oszacowane na podstawie tych badań osiadania fundamentu chłodni wyniosły:

- w punkcie badawczym nr 2 $s=23$ mm,
- w punkcie badawczym nr 10 $s=37$ mm.

Wyznaczone w analizie numerycznej osiadania fundamentu chłodni wyniosły:

- dla podłoża w punkcie badawczym nr 2 $UY=21,8$ mm,
- dla podłoża w punkcie badawczym nr 10 $UY=31,4$ mm.



Rys. 7. Badanie w punkcie pomiarowym nr 10

Rys. 7. Test in measuring point nr 10

7. Wnioski

Po analizie zaprezentowanego w pracy modelu oraz wyników testu numerycznego można stwierdzić, że przyjęty model materiałowy Modified Cam-Clay w wyżej zaprezentowanym ujęciu może efektywnie uwzględniać nieliniowość odkształceń, plastyczność oraz stopień prekonsolidacji podłoża dla wybranego układu fundament-podłoże.

Uzyskane w analizie numerycznej wartości osiadań fundamentu odpowiadają wartościom osiadań, oszacowanych na podstawie obciążeń wielkowymiarowych. Pokazują one jednocześnie wpływ sztywności zamodelowanej powłoki na współpracę fundamentu chłodni z podłożem, a także obrazują wyraźnie wpływ prekonsolidacji podłoża na wielkość osiadań fundamentu.

Literatura

1. Atkinson J. H., Bransby P. L.: The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanic. McGraw–Hill Book Company, London 1978.
2. Biały M.: Analiza numeryczna układu fundament pierścieniowy – podłoże sprężysto-plastyczne pod obciążeniem ciągłym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Budownictwo, z. 102, Gliwice 2004, 107-115.
3. Chen W.F., Baladi G.Y.: Soil plasticity theory an implementation. Elsevier, Amsterdam 1985.
4. Gryczmański M.: Wprowadzenie do opisu sprężysto–plastycznych modeli gruntów. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 1995.
5. Gryczmański M.: Analiza statyczna dowolnie uwarstwionego podłoża budowli metodą elementów skończonych. Praca doktorska, Gliwice 1976.
6. Gryczmański M.: Podstawy teoretyczne w geotechnice – referat w ramach XI Krajowej Konferencji Mechaniki Gruntów i Fundamentowania – Geotechnika w Budownictwie i Transporcie, Gdańsk 1997.
7. Gryczmański M.: Współpraca budowli z podłożem gruntowym – referat w ramach I Problemowej Konferencji Geotechniki – IIB Politechniki Białostockiej, Sekcja Geotechniki PAN i PKG, Wigry 1998.
8. Ledwoń J., Golczyk M.: Chłodnie kominowe i wentylatorowe. Arkady, Warszawa 1967.
9. Wiłun Z.: Zarys geotechniki. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.

Recenzent: Dr hab. inż. Jan Gaszyński, prof. Politechniki Krakowskiej