

Mariusz BIAŁY\*  
Politechnika Śląska

## TRÓJWYMIAROWE MODELOWANIE WSPÓLDZIAŁANIA CHŁODNI KOMINOWEJ Z PODŁOŻEM GRUNTOWYM

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

### 3-DIMENSIONAL 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 schematu punktowego obciążenia pierścienia fundamentowego od podpór powłoki chłodni oraz usztywniającego wpływu powłoki na pracę fundamentu. Modele te nie uwzględniają również momentów skręcających, jakie występują w fundamencie pierścieniowym.

Celem przedstawionego artykułu jest zbudowanie przestrzennego modelu numerycznego chłodni kominowej na podłożu gruntowym, uwzględniającego rzeczywistą geometrię budowli, a co za tym idzie, punktowe obciążenie pierścienia fundamentowego od podpór powłoki. Zaproponowany model numeryczny uwzględnia także wpływ sztywności powłoki

---

\* Opiekun naukowy: Prof. zw. dr hab. inż. Maciej Gryczmański.

chłodni na współpracę tej budowli z gruntem, opisanym zaawansowanym modelem gruntu, odwzorowującym nieliniową odkształcalność, plastyczność oraz prekonsolidację podłoża.

Utworzony w niniejszej analizie schemat obliczeniowy to odcinek fundamentu pierścieniowego o przekroju prostokątnym wraz z fragmentem powłoki chłodni kominowej opartej na fundamencie za pośrednictwem słupów ukośnych. Fundament pierścieniowy posadowiony jest na poziomo uwarstwionym podłożu, opisanym sprężysto-plastycznym modelem o wzmocnieniu izotropowym Modified Cam Clay, należącym do rodziny modeli stanu krytycznego. Dla porównania wartości i rozkładu naprężeń pod fundamentem analizę przeprowadzono również dla sprężystego modelu podłoża.

## 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 [5]:

- dostosowanie podziału na elementy skończone podłoża i fundamentu do przestrzennego podziału na elementy konstrukcji chłodni, tj. układu słupy-powłoka chłodni;
- wspólny podział na elementy podłoża i fundamentu;
- dostosowanie podziału na elementy układu do warstwowej budowy podłoża – brzegi elementów powinny pokrywać się z brzegami warstw;
- zagęszczenie siatki elementów skończonych w rejonie styku fundamentu z podłożem, gdzie występują największe zaburzenia w rozkładzie naprężeń.

Zastosowana dyskretyzacja została pokazana na rys. 2, a powiększenie na rys. 3.

W analizie zastosowano układ złożony z 22 286 izoparametrycznych, przestrzennych elementów ośmiowęzłowych. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem systemu MES Z\_Soil.PC. Należy pamiętać, że warunki na brzegu radialnym modelu są uproszczone.

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 (2):

$$p'_c = p'_{c0} \exp\left(\frac{\Delta e^p}{\lambda - \chi}\right) \quad (2)$$

$$p'_{c0} = \left[ \frac{1}{3}(1 + K_0) + \frac{3(1 - K_0)^2}{M^2(1 + 2K_0)} \right] + (\gamma' z + q_0) \quad (3)$$

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

$$v = const \quad (5)$$

$$OCR = 1 + \frac{q_0}{\gamma \times z} \quad (6)$$

$$M = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi} \quad (7)$$

gdzie:

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

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

$p'_{c0}$  – ciśnienie prekonsolidacji w danym punkcie podłoża pod fundamentem,

w momencie rozpoczęcia budowy obiektu,

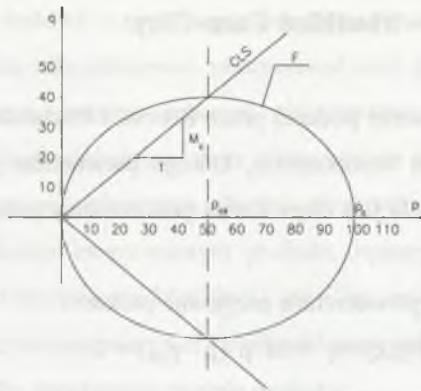
$\Delta e^p$  – całkowita plastyczna zmiana wskaźnika porowatości,

$M$  – 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:

1) Dla podłoża opisanego modelem MCC:

- Grunt zasypowy wokół fundamentu grubość 1,3 m:  $\phi = 33$ ;  $K_0 = 0,4554$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 20$   $\text{kN/m}^3$ ;  $\lambda = 0,01$ ;  $\chi = 0,001$ ;  $p_{c0} = 23,4$  kPa;  $M_c = 1,33$ ;  $\text{OCR} = 1$ .
- Poduszka pod fundamentem grubość 0,3 m:  $\phi = 33$ ;  $K_0 = 0,4554$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 19$   $\text{kN/m}^3$ ;  $\lambda = 0,01$ ;  $\chi = 0,001$ ;  $p_{c0} = 28,8$  kPa;  $M_c = 1,33$ ;  $\text{OCR} = 1$ .
- Warstwa 1:  $\phi = 31$ ;  $K_0 = 0,4850$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $\gamma = 20$   $\text{kN/m}^3$ ;  $\lambda = 0,03$ ;  $\chi = 0,003$ ;  $p_{c0} = 285$  kPa;  $M_c = 1,24$ ;  $\text{OCR} = 5$ .
- Warstwa 2:  $\phi = 19$ ;  $K_0 = 0,6744$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 20$   $\text{kN/m}^3$ ;  $\lambda = 0,02$ ;  $\chi = 0,002$ ;  $p_{c0} = 384$  kPa;  $M_c = 0,7305$ ;  $\text{OCR} = 3$ .
- Warstwa 3:  $\phi = 19$ ;  $K_0 = 0,4554$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 20$   $\text{kN/m}^3$ ;  $\lambda = 0,02$ ;  $\chi = 0,002$ ;  $p_{c0} = 447$  kPa;  $M_c = 0,7305$ ;  $\text{OCR} = 2,37$ .

2) Dla podłoża sprężystego:

- Grunt zasypowy wokół fundamentu grubość 1,3 m:  $E = 120000$   $\text{kN/m}^2$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 20$   $\text{kN/m}^3$ .
- Poduszka pod fundamentem grubość 0,3 m:  $E = 120000$   $\text{kN/m}^2$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 19$   $\text{kN/m}^3$ .
- Warstwa 1,  $E = 13000$   $\text{kN/m}^2$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $\gamma = 20$   $\text{kN/m}^3$ .
- Warstwy 2 i 3,  $E = 1000000$   $\text{kN/m}^2$ ;  $\nu = 0,25$ ;  $\gamma = 20$   $\text{kN/m}^3$ .
- Warstwa kontaktowa:  $\phi = 20$ ;  $c = 2$  kPa.
- Beton fundamentu, podpór i powłoki:  $E = 30000000$   $\text{kN/m}^2$ ;  $\nu = 0,2$ ;  $\gamma = 25$   $\text{kN/m}^3$ .

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

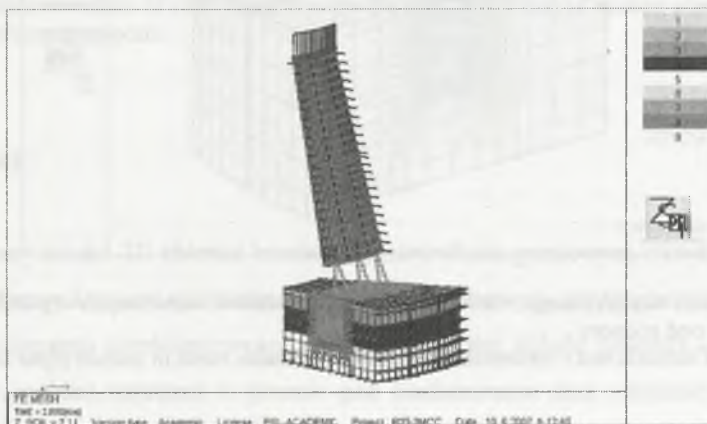
Wysokość chłodni kominowej od poziomu terenu wynosi 133,2 m. Średnica fundamentu pierścieniowego 47,2 m, a przekrój fundamentu 1,3 x 4,5 m.

Fundament posadowiony jest na poduszce żwirowej o grubości 30 cm. Przyjęte do analizy podłoże zbudowane jest z trzech warstw: słabszej, o grubości 3 m, która zalega na głębokości 1,6 m; mocnej, o grubości 3 m, zalegającej na głębokości 4,6 m i mocnej, o grubości 14,8 m, której strop zalega na głębokości 7,6 m.

Jak już wspomniano, tworzony w niniejszej analizie schemat obliczeniowy to odcinek fundamentu pierścieniowego wraz z fragmentem powłoki chłodni kominowej opartej na fundamencie za pośrednictwem słupów ukośnych. Powłoka chłodni została zamodelowana do poziomu 1/3 całkowitej wysokości analizowanej konstrukcji. Ciężar pozostałej części powłoki został zastąpiony przyłożonym do górnej części zamodelowanej powłoki obciążeniem równomiernie rozłożonym.

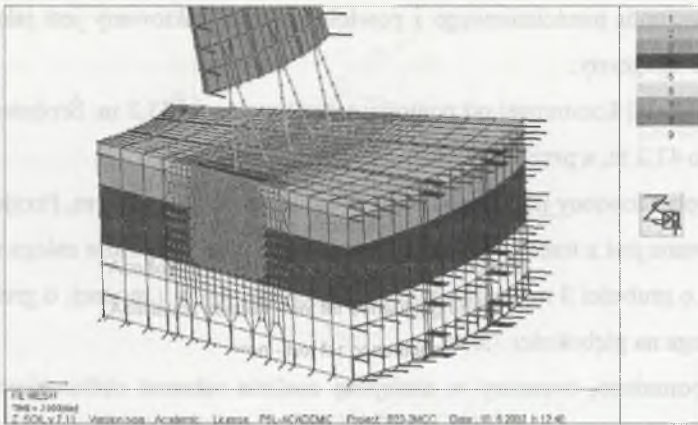
## 5. Analiza numeryczna

Analizę numeryczną przeprowadzono dla pokazanego na rysunkach 2 i 3 modelu 3D, którego siatka elementów skończonych zawiera 25 520 węzłów.



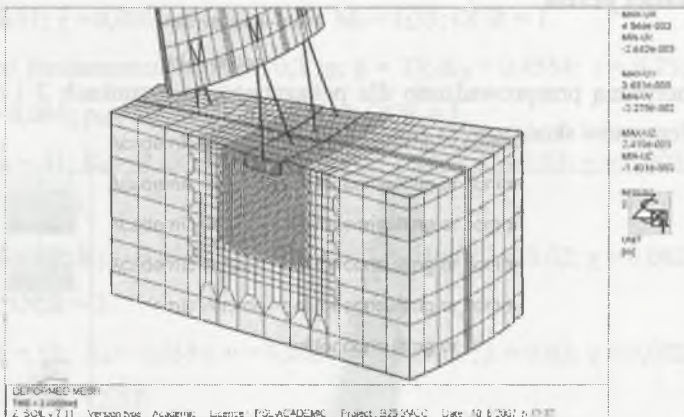
Rys. 2. Model MES układu fundament – podłoże

Fig. 2. The foundation – subsoil FEM mode



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

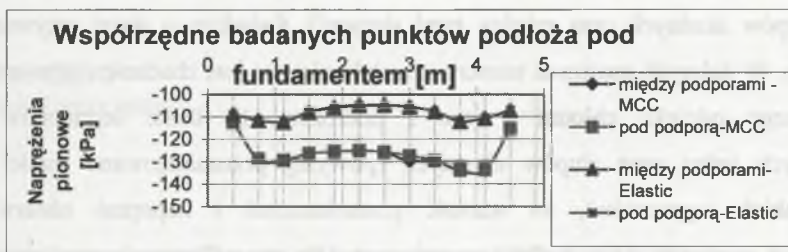
W analizie badano wartości osiadań i naprężeń pod fundamentem w punktach obserwowanych na dwóch płaszczyznach siecznych, prostopadłych do płaszczyzny podstawy modelu. Pierwsza z tych płaszczyzn siecznych przechodzi przez punkt oparcia słupa chłodni na pierścieniu fundamentowym, druga zaś przechodzi między parami tych słupów.



Rys. 4. Wynik testu numerycznego – deformacja siatki elementów skończonych w płaszczyźnie siecznej pod podporą  
 Fig. 4. Result of numeric test – deformation of infinite elements mesh in section plane under support

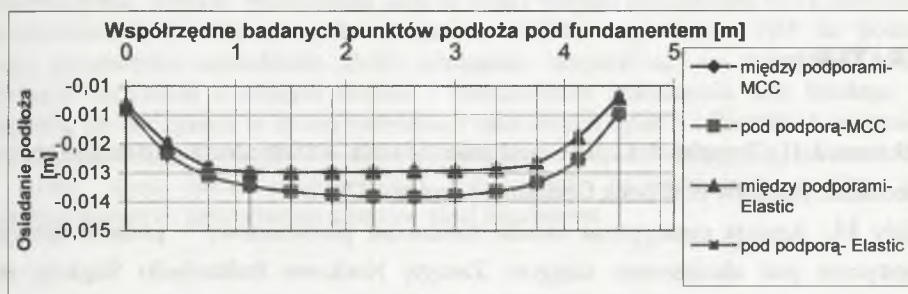


## 6. Wyniki analizy numerycznej



Rys. 5. Porównanie wartości naprężeń  $\sigma_{yy}$  w podłożu pod fundamentem w płaszczyznach sieciach pod podporą powłoki i między podporami

Fig. 5. Comparison values of stress  $\sigma_{yy}$  in subsoil under foundation in section plane under support and between supports



Rys. 6. Porównanie wartości osiadań UY podłoża pod fundamentem w płaszczyznach sieciach pod podporą powłoki i między podporami

Fig. 6. Comparison values of settlement of subsoil under foundation in section plane under support and between supports

## 7. Wnioski

Zbudowany model 3D chłodni kominowej na podłożu gruntowym wiernie obrazuje charakter współpracy konstrukcji obiektu z podłożem gruntowym, uwzględniając punktowe obciążenie fundamentu pierścieniowego, wpływ sztywności układu powłoka – słupy ukośne – pierścieni na rozkład naprężeń w gruncie pod fundamentem oraz wielkość osiadań fundamentu. 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 małe różnice wartości osiadań, wyznaczone pod fundamentem w dwóch wybranych płaszczyznach siecznych modelu podłoża (pod punktami oparcia słupów skośnych oraz między tymi słupami), świadczą o dużej sztywności tego fundamentu. W dalszych analizach numerycznych konieczne jest zbadanie wpływu wielkości modelowanego odcinka chłodni wraz z podłożem, tj. ilości segmentów modelu zawierających jedną parę słupów ukośnych (powyżej przeanalizowano model złożony z trzech takich segmentów), na wartość przemieszczeń i naprężeń obserwowanych w wybranych punktach tego podłoża gruntowego. Dla zweryfikowania przyjętego modelu obliczeniowego chłodni kominowej na podłożu gruntowym niezbędne jest przeprowadzenie monitoringu osiadań fundamentu pierścieniowego rzeczywistego obiektu w trakcie jego budowy.

## 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, seria: Budownictwo, zeszyt: 102, Gliwice 2004, s. 107 - 114.
3. Biały M.: Modelowanie współdziałania chłodni kominowej z podłożem gruntowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria: Budownictwo, zeszyt: 111, Gliwice 2007, s. 91 - 99.
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, Instytut Inżynierii Budowlanej Politechniki Białostockiej, Sekcja Geotechniki PAN i PKG, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Wigry 1998.
8. Ledwoń J., Golczyk M.: Chłodnie kominowe i wentylatorowe. Arkady, Warszawa 1967.