



## Analiza numeryczna interakcji modelowej obudowy tunelowej z gruntem niespoistym

PAWEŁ SZKLENNIK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
ul. gen. W. Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, pawel.szklennik@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono numeryczną analizę interakcji modelowej obudowy tunelowej z otaczającym niespoistym ośrodkiem gruntowym. Analizy dokonano, przeprowadzając symulacje z wykorzystaniem autorskiego programu opartego na metodzie elementów dyskretnych. Wykorzystano model skalibrowany wcześniej na podstawie badań laboratoryjnych przez porównanie deformacji obudowy występujących w badaniu i symulacji numerycznej. Dla tak ustalonego modelu przeprowadzono szereg symulacji przy konstrukcji obudowy zarówno wiotkiej, jak i sztywnej. Badano obciążenia działające na obudowę, rozkład naprężeń w ośrodku gruntowym otaczającym konstrukcję oraz przemieszczenia jego cząstek. Analizy przeprowadzono przy działaniu ciężaru gruntu oraz obciążenia technologicznego zadawanego z powierzchni. Analizowano modele z nadkładem gruntu równym jednej średnicy i dwóm średnicom obudowy. Wartości uzyskiwanych numerycznie obciążeń obudowy porównano z obliczonymi według metody Hewetta. Wykazano, że obciążenia te oraz naprężenia w gruncie są istotnie powiązane ze sztywnością obudowy i w związku z tym mogą znacznie odbiegać od standardowo przyjmowanych dla takich konstrukcji sytuacji obciążeniowych.

**Słowa kluczowe:** budownictwo, metoda elementów dyskretnych, obudowa walcowa

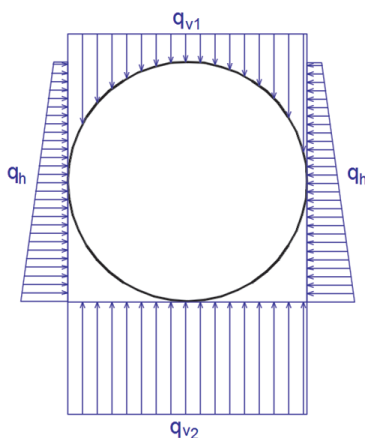
**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.1479

### 1. Wstęp

Wykonanie wyrobiska kołowo-tunelowego w ośrodku gruntowym wywołuje zmianę pierwotnego układu trajektorii naprężeń głównych. Zmieniony układ trajektorii ma wpływ na przekazywanie obciążeń na obudowę wyrobiska. W literaturze znaleźć można wiele propozycji uwzględnienia tego wpływu. W przypadku obudów

o konstrukcji sztywnej najbardziej rozpowszechniona jest metoda Hewetta [6]. Zakłada się tu, że układ obciążeń działa na obudowę w sposób pokazany na rysunku 1.

Omawiana schematyzacja obciążenia jest idealizacją, w której nie uwzględniono efektu górotworu powodującego powstanie nowego układu trajektorii naprężeń głównych i zmiany rozkładu oddziaływań na obudowę.

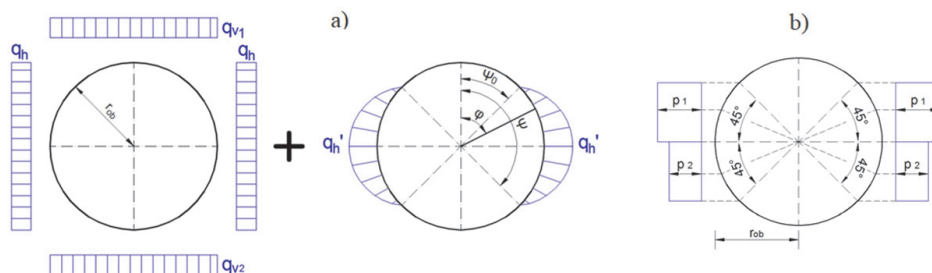


Rys. 1. Układ oddziaływań na obudowę według propozycji Hewetta

Inną z istniejących metod jest tak zwana metoda metra moskiewskiego (MM) zaproponowana przez Bodrową i Gorelika [13], [5], właściwa przy tunelowaniu głębokim. W schematyzacji obudowy rozważa się pierścień kołowy sprężycie podparty w sposób ciągły — z wyjątkiem części zwornikowej. Ortogonalne oddziaływanie sprężystego ośrodka gruntowego jest odporem typu Winklera. Do tego należy dodać metody górnicze. Projektowanie trwałych obudów korytarzowych w kopalniach jest regulowane normą PN-G-05020. Przy ustalaniu obciążeń przyjęte tam metody są jakościowo adekwatne do analiz właściwych budownictwu komunikacyjnemu. Należą do nich metody Protodiakonowa, Bierbaumera, Cymbariewiczza, Terzaghięgo, Sałustowicza i inne.

W przypadku obudów kołowo-pierścieniowych o małej sztywności pojawia się potrzeba uwzględnienia efektu deformacji konstrukcji obudowy. Konsekwencją ich wystąpienia jest wygenerowanie parcia biernego oraz zagęszczenie trajektorii naprężeń w części obszarów ociosowych. Wywołuje to zwiększenie obciążenia działającego na część ociosową obudowy w stosunku do obliczonego według podejścia Hewetta. Efekt ten jest uwzględniany w procedurach projektowych zwykle poprzez wprowadzenie współczynnika zwiększającego parcie poziome. Brakuje jednak w tym postępowaniu jednoczesnego zmniejszenia parcia i oporu pionowego, które wywołuje wzrost wyłączenia obudowy. Efekt intensyfikuje się również z powodu luzów technologicznych na styku obudowy z gruntem, na przykład w trakcie drażnienia wyrobiska.

Przedstawiona argumentacja stanowiła podstawę propozycji zawartych w pracy Pytowskiego [2] i Spanglera [1]. W obydwu pracach uwzględniano tylko deformacyjne efekty zginania z zaniedbaniem sił podłużnych. Ujęcie tego zagadnienia jest w nich jednak różne. Rozkład parcia biernego w podejściu Pytowskiego został przyjęty zgodnie z rysunkiem 2a.



Rys. 2. Schematyzacja oddziaływania parcia biernego na obudowę według: a) W. Pytowskiego, b) M.G. Spanglera

Parcie bierne typu deformacyjnego jest tu ortogonalne do obudowy i uzależnione od wartości wiodącej  $q'_h$ , która z kolei zależy od przemieszczenia poziomego określonego współrzędną  $\varphi = 0,5 \cdot \pi$ . Przemieszczenie to wyznacza się przy założeniu, że wspomniane parcie powstaje w ośrodku gruntowym o wskaźniku podatności sprężystej  $K$ , tożsamym ze współczynnikiem podatności podłoża Winklera. Analizy statyczne do wyznaczenia wspomnianego przemieszczenia prowadzi się przy założeniu obciążeń według Hewetta z uwzględnieniem poszukiwanego odporu sprężystego gruntu. Taki sposób rozwiązania zagadnienia może być uważany za analizę interakcji obudowy wiotkiej z ośrodkiem gruntowym.

W przypadku propozycji według M.G. Spanglera [1] rozkład bocznego parcia biernego jest proponowany zgodnie z rysunkiem 2b. Parcie to jest uzależnione od przemieszczeń poziomych obudowy  $h_1$  i  $h_2$  w punktach określonych współrzędnymi kątowymi:  $\phi_1 = 67,5^\circ$  oraz  $\phi_2 = 112,5^\circ$ . Przemieszczenia te są wyznaczone przy obciążeniach zgodnych z propozycją Hewetta, bez uwzględnienia dodatkowego potencjalnego parcia bocznego. Oznacza to, że w tej metodzie nie jest brana pod uwagę pełna interakcja obudowy wiotkiej z ośrodkiem gruntowym. Uwzględnia się tylko deformacje wywołane zginaniem obudowy w zakresie sprężystym.

Wymienione metody wyznaczania obciążeń przejmowanych przez wiotkie obudowy uwzględniają ich deformacje, które są wywołane tylko jej zginaniem powodującym regularne spłaszczenie ustroju nośnego. Deformacje obudowy wyznaczone są z reguły dla przyjętego schematu statycznego zamkniętego pręta kołowego pod działaniem obciążeń zakładanych, a nie wyznaczanych w wyniku interakcji

z gruntem. Stąd nie jest uwzględniona pełna interakcja obudowy z odkształcającym się ośrodkiem gruntowym. W obciążeniu deformującej się obudowy zaniechano dodatkowo siły tarcia, które są wywoływane odkształceniami przyległego ośrodka gruntowego. Rozkład parcia biernego był przyjmowany a priori. Nie zawsze prawidłowo ustalano niekorzystną sytuację obciążeniową. Nieujmowane były imperfekcje kontaktu obudowy z gruntem oraz w samym gruncie.

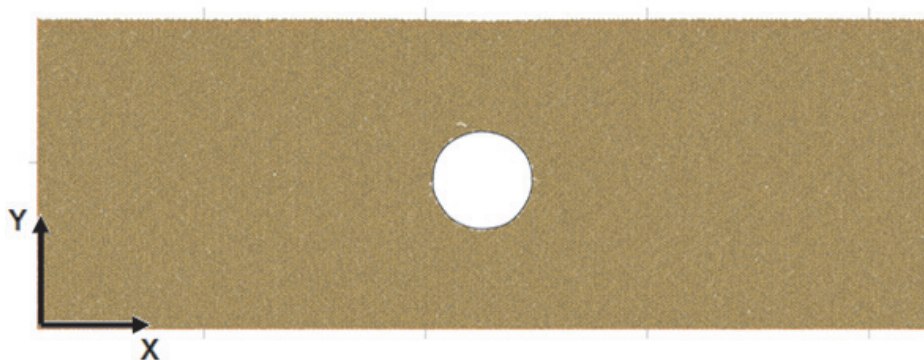
Ograniczenia wymienionych metod można niwelować, wykorzystując metody numeryczne. Tego typu modele pozwalają na pełne uwzględnienie interakcji w kontakcie obudowy z otaczającym gruntem. W przypadku gruntu niespoistego najlepsze rezultaty mogą być oczekiwane przy zastosowaniu tak zwanych metod dyskretnych. Opisują one ośrodek jako zbiór pojedynczych elementów — wzajemnie oddziałujących na siebie siłami wyznaczonymi zgodnie z założonym modelem konstytutywnym kontaktu. W ogólnym ujęciu uwzględnione są siły normalne, styczne (tarcie), opór toczenia oraz ewentualne tłumienie zewnętrzne i wewnętrzne ośrodka. Dodatkowym plusem jest fakt, że dzięki stosowaniu metody typu dyskretnego model numeryczny gruntu cechuje się pewnym stopniem nieregularności geometrycznych. Stąd uwzględnia on lokalne imperfekcje — pustki kontaktowe pomiędzy ziarnami gruntu oraz pomiędzy ziarnami a obudową. Imperfekcje te nie są traktowane jako stacjonarne, ale podlegają ewolucji w procesie deformacji. Celem pracy jest numeryczna ocena interakcji obudowy wyrobiska typu walcowo-tunelowego z niespoistym ośrodkiem gruntowym, przy uwzględnieniu czynników takich jak wiotkość konstrukcyjna obudowy i imperfekcje kontaktowe z ośrodkiem gruntowym, grubość nadkładu gruntu niespoistego nad zwornikiem obudowy, intensywność obciążeń technologicznych działających bezpośrednio na powierzchnię nadkładu. Analizy prowadzono z wykorzystaniem autorskiego programu opartego na metodzie elementów dyskretnych (ang. DEM).

## 2. Model numeryczny obudowy w gruncie

Istota i opis wykorzystanej w analizach metody przedstawione są między innymi w pracach [4], [12]. Szczegółowy opis autorskiego programu numerycznego, zawierający charakterystykę i sens fizyczny stosowanych parametrów modelu dyskretnego oraz ich identyfikację na podstawie porównania deformacji obudowy numerycznej z rzeczywistą, przedstawiono w pracy [14].

W niniejszej pracy analizie numerycznej poddano modelową obudowę wyrobiska walcowego w gruncie, zakładając różne wysokości nadkładu gruntu oraz sztywności obudowy. Grunt modelowany jest elementami walcowymi jako układ w płaskim stanie naprężenia. Rozpatrywano układy z nadkładem gruntu równym średnicy obudowy (dalej oznaczany jako N1D) oraz z nadkładem równym dwóm średnicom obudowy (dalej oznaczany jako N2D). W obu przypadkach wykonano symulacje

z zastosowaniem obudowy wiotkiej oraz obudowy idealnie sztywnej. Prezentowane będą wyniki dotyczące rezultatów obciążenia obudów ciężarem własnym nadkładu gruntowego oraz dodatkowo przyłożonym zewnętrznym obciążeniem technologicznym. Przykładowy model numeryczny przedstawiono graficznie na rysunku 3. Szerokość obszaru ośrodka gruntowego wzdłuż osi X wynosiła 80 cm. Wymiary elementów walcowych to  $\Phi_{el}^{DEM} = 2 \div 2,5 \text{ mm}$ . Liczba elementów dyskretnych modelujących żwir wyniosła 43756 w przypadku modelu o nadkładzie N1D oraz 58341 elementów w modelu o nadkładzie N2D. Krok czasowy w symulacji równy był  $\Delta t = 5,5 \cdot 10^{-7} \text{ s}$ . Maksymalna (końcowa) wartość wypadkowej obciążenia naziomu Q wynosiła 1250 N. Było ono przykładane jako obciążenie równomiernie rozłożone, symetryczne względem osi pionowej obudowy. Standardowa symulacja obejmowała 4 500 000 kroków czasowych. W procedurze numerycznej DEM stosowano jawny schemat całkowania równań równowagi względem czasu. Na podstawie analiz zachowania cząstek w okresie symulacji stwierdzono, że w ogólnym ujęciu model może być traktowany jako quasi-statyczny. Szczegółowe zestawienie parametrów materiałowych oraz kontaktu w modelu przedstawiono w tabelach 1 oraz 2.



Rys. 3. Model z nadkładem N1D

TABELA 1

Parametry materiałowe modelu numerycznego

Parametr materiałowy	Materiał	
	ośrodek gruntowy (żwir)	obudowa (HDPE)
Moduł Younga	$E_z = 9 \text{ MPa}$	$E_{ob} = 500 \text{ MPa}$
Gęstość właściwa	$\rho_z = 2550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_{ob} = 10000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

TABELA 2

Parametry kontaktu modelu numerycznego

Parametr kontaktu	Rodzaj kontaktu			
	żwir — żwir	obudowa — obudowa	obudowa — żwir	brzeg — żwir
współczynnik Poissona	$\nu_z^c = 0,15$	$\nu_{ob}^c = 0,45$	$\nu_{ob-z}^c = 0,3$	$\nu_{b-z}^c = 0,15$
współczynnik proporcjonalności do określania sztywności oporu toczenia	$\beta_z = 50$	nie występuje	$\beta_{ob-z} = 50$	$\beta_{b-z} = 50$
współczynnik tarcia suwnego	$\mu_z = 0,25$	nie występuje	$\mu_{ob-z} = 0,1$	$\mu_{b-z} = 0,1$
parametr do określania współczynnika tarcia tocznego	$\varepsilon_z = 0,4$	nie występuje	$\varepsilon_{ob-z} = 0,1$	$\varepsilon_{b-z} = 0,1$
współczynnik tłumienia lepkiego	$\alpha_{c,z} = 0,5$	nie występuje	$\alpha_{c,ob-z} = 0,5$	$\alpha_{c,b-z} = 0,5$

W programie komputerowym implementowano dodatkowo możliwość wyznaczania tak zwanych uśrednionych naprężeń w dowolnym punkcie modelowanego ośrodka. W ogólnym ujęciu jest to zagadnienie homogenizacji oraz uśredniania [8], [9], [11], polegające na wyznaczeniu pewnych wielkości w skali makro na podstawie znanych wyników w skali mikro. W analizowanym przypadku skala mikro dotyczy oddziaływań na poziomie poszczególnych elementów dyskretnych. Zastosowana metoda opiera się na koncepcji tak zwanego reprezentatywnego elementu objętościowego (ang. RVE) [10], [3]. Dla dowolnego punktu modelowanego ośrodka określa się otaczający go obszar o pewnej wielkości — objętość RVE — w której szukana wielkość będzie uśredniona (rys. 4). Objętość RVE oznaczono jako  $V_0$ .



Rys. 4. Reprezentatywny element objętościowy

Średni tensor naprężenia dla  $i$ -tego elementu dyskretnego leżącego wewnątrz RVE przy założeniu quasi-statycznego zachowania elementów i pominięciu oddziaływań momentowych między nimi ma postać [7], [8], [12]:

$$\sigma_i = \frac{1}{V_i} \sum_{k=1}^{n_{ik}} \mathbf{F}^k \mathbf{r}_i^k \quad (1)$$

gdzie:  $V_i$  — objętość cząstki,  
 $n_{ik}$  — liczba cząstek w kontakcie z elementem  $i$ ,  
 $\mathbf{F}^k$  — wektor siły skupionej działającej na element,  
 $\mathbf{r}_i^k$  — wektor łączący środek masy elementu z punktem kontaktu.

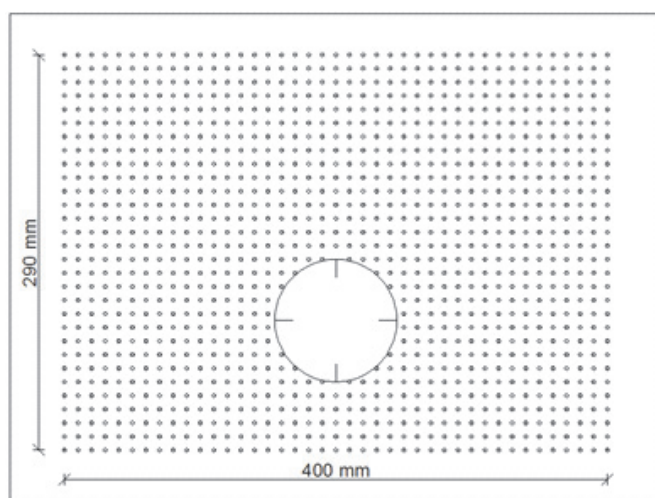
Występujące we wzorze mnożenie wektorów jest iloczynem tensorowym według zależności:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \mathbf{a}\mathbf{b}, \\ H_{ij} &= a_i b_j. \end{aligned} \quad (2)$$

Następnie na podstawie znanych tensorów naprężeń dla pojedynczych elementów określa się ostatecznie średni tensor naprężenia  $\bar{\sigma}$  w objętości  $V_0$ . Wyznaczany jest on według zależności

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V_0} \sum_{i \in V} \sum_{k=1}^{n_{ik}} \mathbf{F}^k \mathbf{r}_i^k, \quad (3)$$

bez uwzględniania, czy każdy element dyskretny leży w całości wewnątrz obszaru RVE.

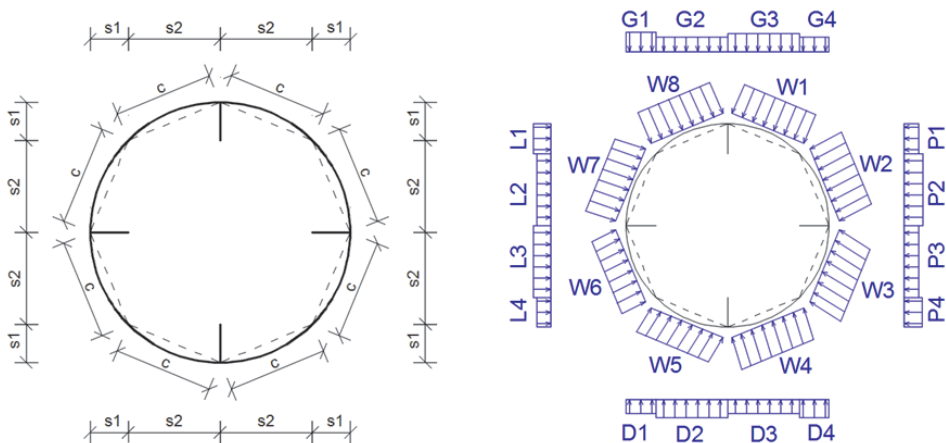


Rys. 5. Rozmieszczenie punktów pomiarowych do wyznaczenia uśrednionych naprężeń w ośrodku oraz przemieszczeń elementów dyskretnych

Przedstawiane w dalszej części pracy mapy naprężeń i przemieszczeń tworzone były poprzez określanie tych wielkości w każdym z punktów pomiarowych, których układ przedstawiono na rysunku 5. Do obliczania naprężeń przyjmowano średnicę RVE równą 1 cm.

### 3. Analiza wyników symulacji numerycznych

W rozdziale zaprezentowano uzyskane w symulacjach DEM wartości oddziaływań gruntu na obudowę wiotką oraz sztywną w zestawieniu z oddziaływaniami wyznaczonymi według metody Hewetta. Przy wyznaczaniu oddziaływań według Hewetta, ze względu na dużą intensywność obciążenia technologicznego i geometrię układu, zaniebdywano rozkład zewnętrznych obciążeń pionowych przy ich transmisji w głąb gruntu. Zastosowano model numeryczny o przedstawionych wcześniej parametrach. Analizowano oddziaływania na obudowę w kierunku pionowym oraz poziomym, jak również oddziaływania wypadkowe na poszczególne odcinki obwodu obudowy. Usytuowanie i długości odcinków oznaczono na rysunku 6. Wszystkie obciążenia podano jako uśrednione, równomiernie rozłożone na danym odcinku wraz z oznaczeniem kierunku ich działania (rys. 6). Dodatkowo przeanalizowano zaprezentowany w postaci map rozkład naprężeń i przemieszczeń w ośrodku gruntowym otaczającym obudowę. Naprężenia przedstawiane na mapach są wyłącznie naprężeniami ściskającymi.



Rys. 6. Oznaczenia długości odcinków i obciążeń



Wartości obciążeń zapisanych w globalnym układzie współrzędnych XY — opisane na rysunku 6 jako L, P, G, D — obliczano według następujących wzorów (oznaczenia według rys. 7):

— obciążenia pionowe:

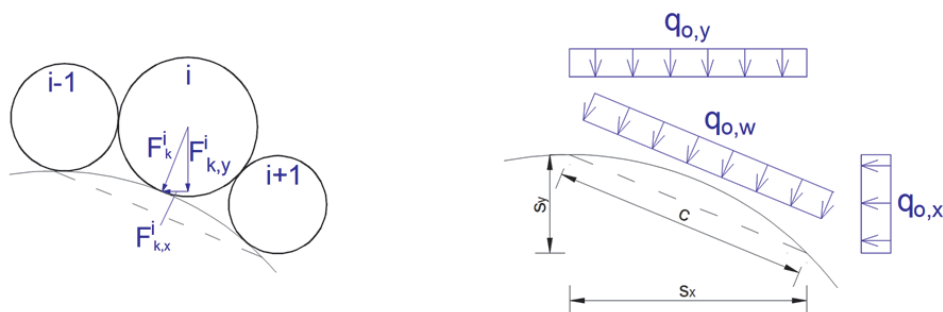
$$q_{o,y} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{k,y}^i}{s_x}, \quad (4)$$

— obciążenia poziome:

$$q_{o,x} = \frac{\sum_{i=1}^n F_{k,x}^i}{s_y}. \quad (5)$$

Wartość wypadkową  $W$  wyznaczano w odniesieniu do rzutu cięciwy długości  $c$  jako:

$$q_{o,w} = \frac{\sqrt{(q_{o,y} \cdot s_x)^2 + (q_{o,x} \cdot s_y)^2}}{c}. \quad (6)$$

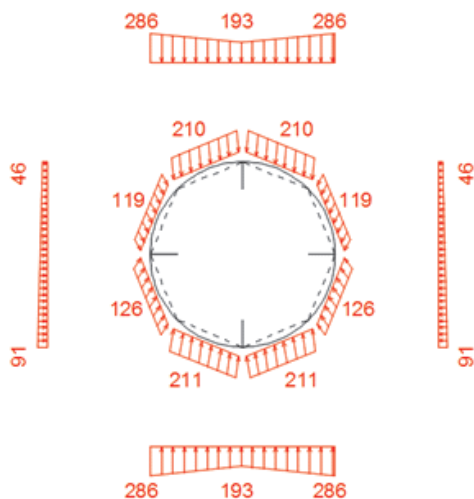


Rys. 7. Układ sił kontaktowych  $i$ -tego elementu ośrodka gruntowego z obudową i obciążenia ciągłe odcinkowe obudowy — w układzie globalnym oraz na odcinku cięciwy  $c$

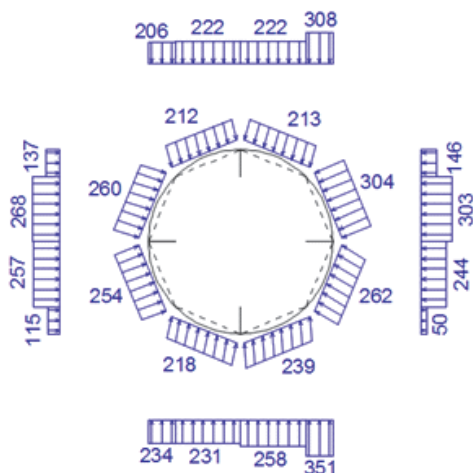
Ze względu na kształt obudowy w dalszych analizach skupiono się głównie na wymienionych wartościach odcinkowych obciążeń, a nie na wartościach wypadkowych. W opisach pod schematami obciążeń stosowano oznaczenia modeli dotyczące obciążeń obudowy — ciężarem własnym (CW) lub dodatkowo obciążeniem technologicznym ( $Q + CW$ ) oraz dotyczące rodzaju konstrukcji obudowy — sztywnej (OS) lub wiotkiej (OW).

### 3.1. Analiza oddziaływań wywołanych ciężarem własnym gruntu na obudowę

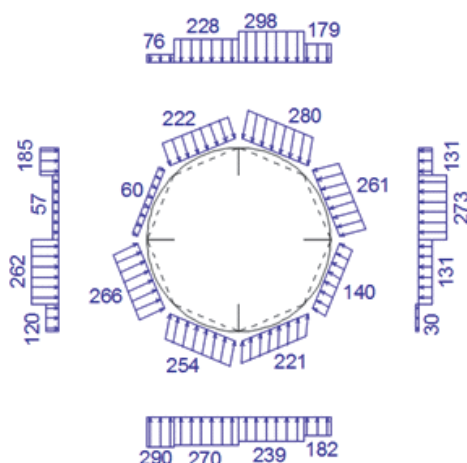
Oddziaływania przy nadkładzie gruntu równym średnicy obudowy (N1D) wyznaczone według metody Hewetta są przedstawione na rysunku 8, a uzyskane na podstawie DEM na rysunkach 9 i 10.



Rys. 8. Oddziaływania według metody Hewetta [N/m] — obciążenie CW, nadkład N1D

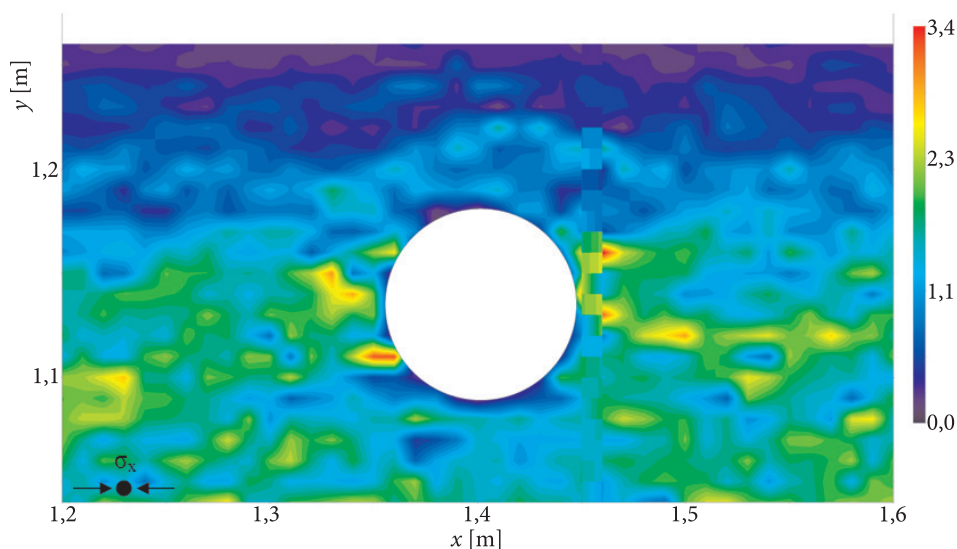


Rys. 9. Oddziaływania według DEM [N/m] — obciążenie CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)

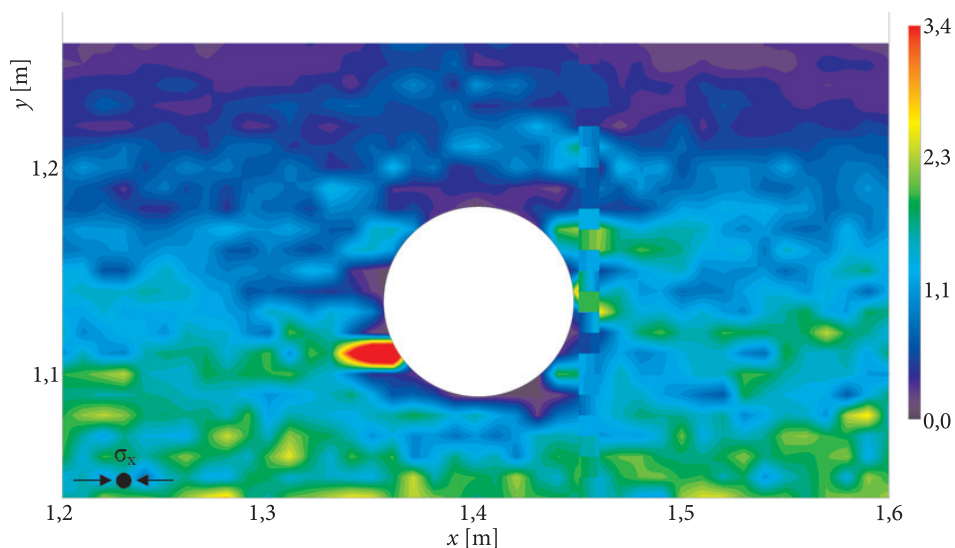


Rys. 10. Oddziaływania według DEM [N/m] — obciążenie CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)

Z porównania przedstawionych wyników widać, że wartości pionowych obciążeń  $G$  i reakcji  $D$  na obudowę w modelu DEM i metodzie Hewetta są zbliżone. Natomiast wyraźną różnicę obserwujemy w odniesieniu do parcia bocznego, które jest znacznie większe według analiz numerycznych w przypadku obudowy wiotkiej. Przekłada się to na znacznie większe obciążenia  $P2$ ,  $P3$  oraz  $L2$ ,  $L3$ . W przypadku obudowy sztywnej tak wyraźnego zwiększenia nie zaobserwowano (rys. 10).



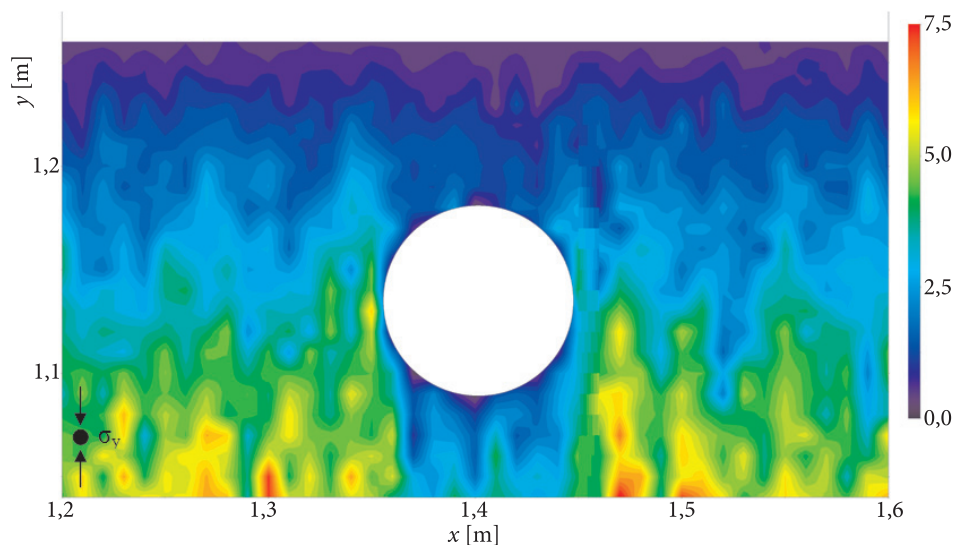
Rys. 11. Mapa  $\sigma_x$  [kPa] — obciążenie CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)



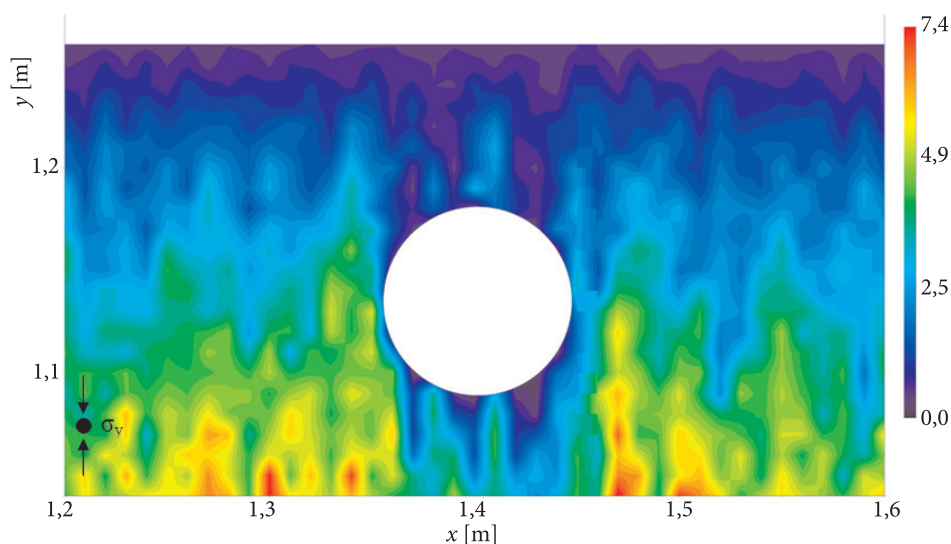
Rys. 12. Mapa  $\sigma_x$  [kPa] — obciążenie CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)

Zauważa się tylko dodatkowo silną asymetrię oddziaływań. Obserwacje te korespondują z mapami naprężeń poziomych uzyskanych w analizach numerycznych dla tych modeli obudów (rys. 11, 12). Na mapach tych stwierdzono znaczne koncentracje naprężeń poziomych na odcinkach bocznych przy obudowie wiotkiej, co nie ma miejsca przy obudowie sztywnej.

Rozkład naprężeń pionowych (rys. 13, 14) można w obu przypadkach uznać za podobny.



Rys. 13. Mapa  $\sigma_y$  [kPa] — obciążenie CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)



Rys. 14. Mapa  $\sigma_y$  [kPa] — obciążenie CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)

W przypadku nadkładu gruntu równego dwóm średnicom obudowy (N2D) obserwowano wyniki analogiczne do powyższych, dlatego nie są one prezentowane.

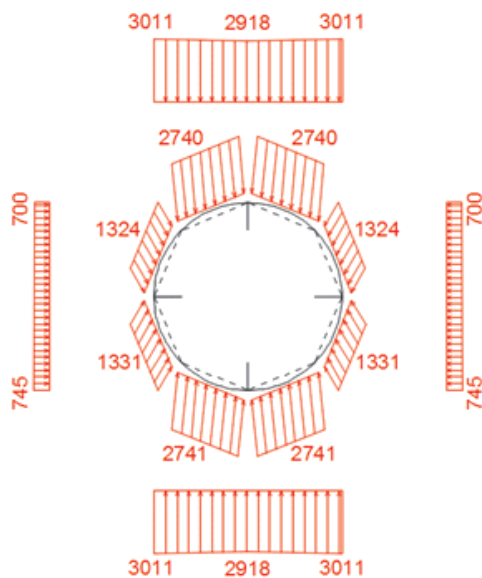
### 3.2. Analiza oddziaływań wywołanych ciężarem własnym gruntu i obciążeniem technologicznym Q na obudowę

Wartości oddziaływania pionowego i poziomego na obudowę według Hewetta są przedstawione na rysunku 15. Analogiczne oddziaływania uzyskane metodą DEM dla obudowy wiotkiej (rys. 16) wskazują zmniejszenie oddziaływań pionowych w części zwornikowej obudowy oraz wzrost oddziaływań poziomych na częściach ociosowych. W przypadku obudowy sztywnej (rys. 17) na kierunku pionowym oddziaływania są w dużym stopniu zgodne z metodą Hewetta. Występuje tu natomiast wyraźne zmniejszenie oddziaływania poziomego. Wynika ono z braku wyraźnego efektu parcia biernego — bocznego naporu obudowy na przyległy ośrodek gruntowy.

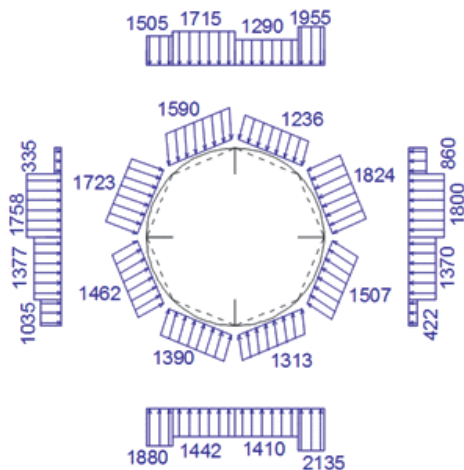
Obserwując mapy naprężeń poziomych przy obudowie wiotkiej (rys. 18), zauważa się znaczne koncentracje przy odcinkach bocznych obudowy sięgające 18 kPa. Przy obudowie sztywnej (rys. 19) nie przekraczają one 8 kPa.

Na mapach naprężeń pionowych przy obudowie wiotkiej (rys. 20) uwidacznia się ich koncentracja w obszarach bezpośrednio przyległych do części bocznej obudowy, co koresponduje z przebiegiem trajektorii naprężeń głównych omawianych

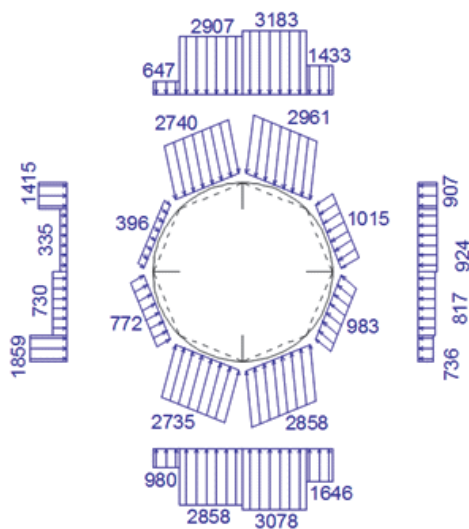
we wstępie. Ta obserwacja jest jakościowo zgodna również dla obudowy sztywnej (rys. 21). Naprężenia te w obu przypadkach sięgają rzędu 40 kPa, co stanowi ponad 200% naprężeń wywołanych na tej samej głębokości w obszarze oddalonym od obudowy.



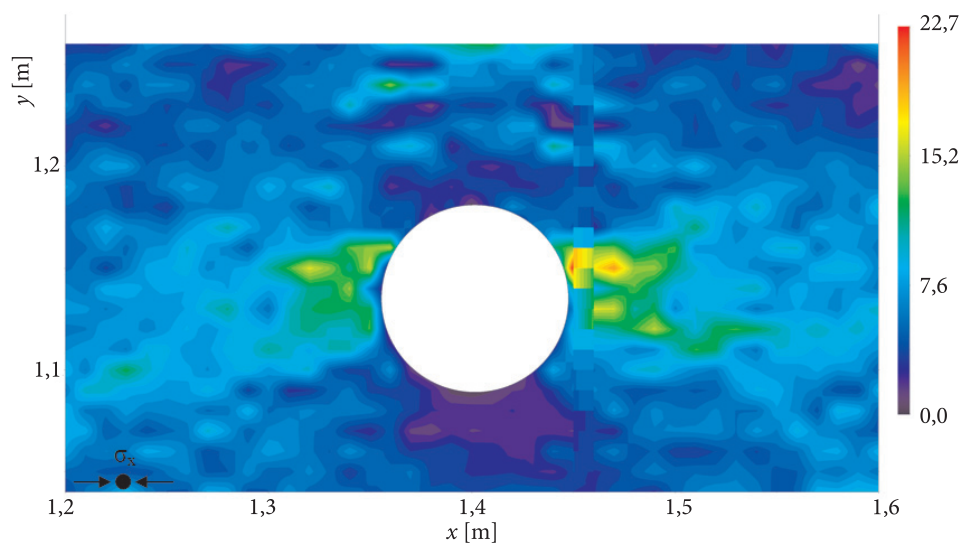
Rys. 15. Oddziaływania według metody Hewetta [N/m] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D



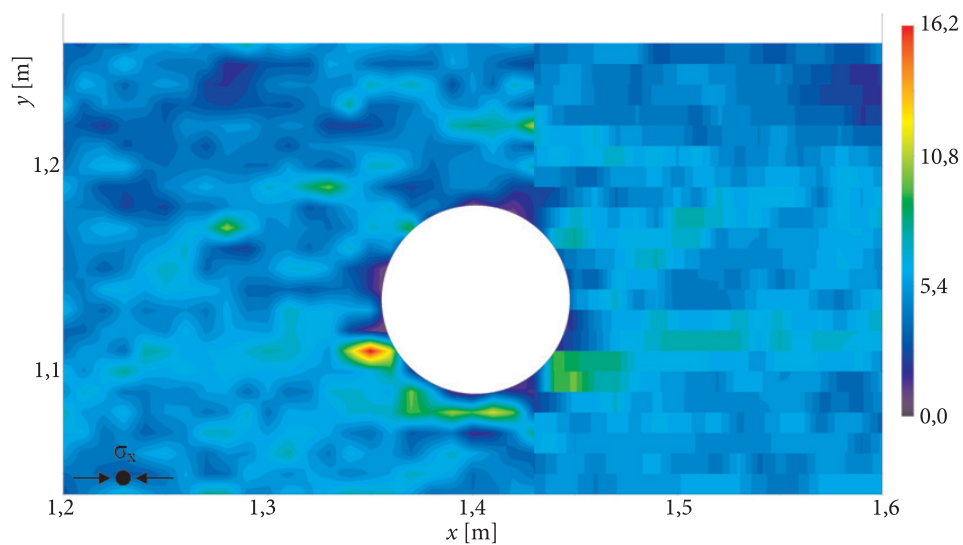
Rys. 16. Oddziaływania według DEM [N/m] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)



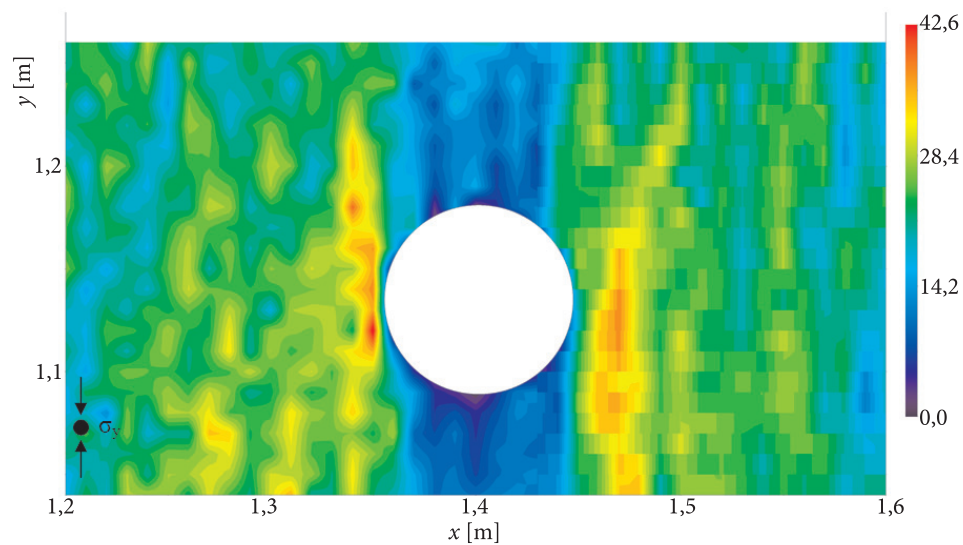
Rys. 17. Oddziaływania według DEM [N/m] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)



Rys. 18. Mapa  $\sigma_x$  [kPa] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)

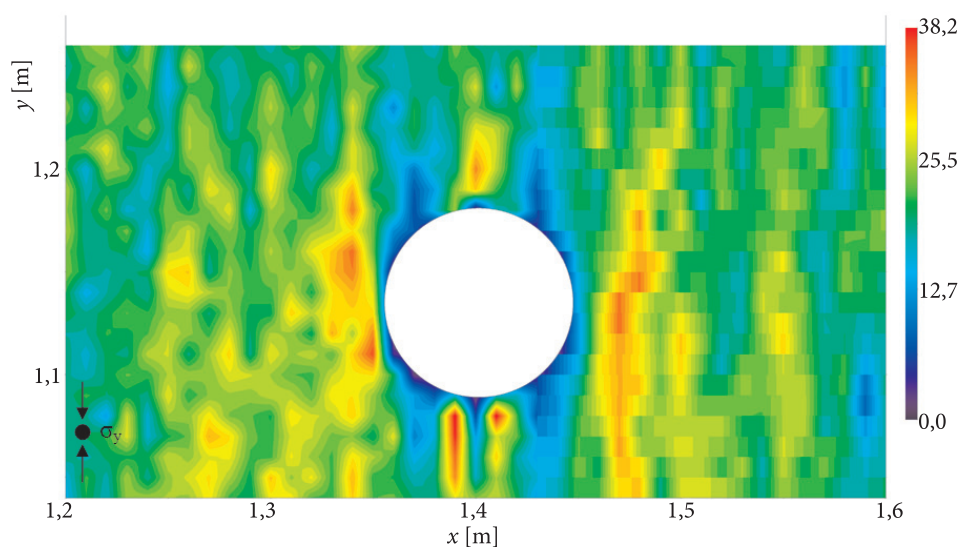


Rys. 19. Mapa  $\sigma_x$  [kPa] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)



Rys. 20. Mapa  $\sigma_y$  [kPa] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)





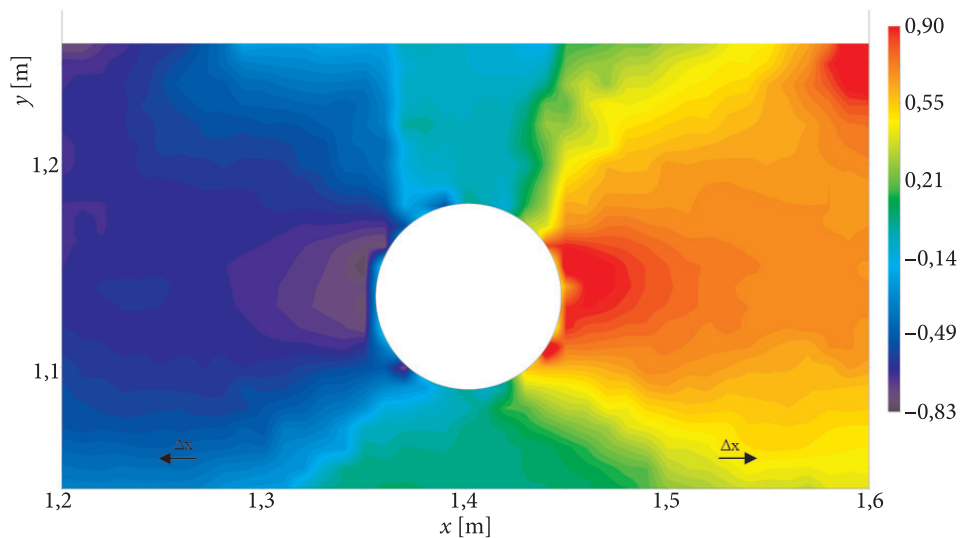
Rys. 21. Mapa  $\sigma_y$  [kPa] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)

Duże różnice naprężeń występują w części zwornikowej obudów, co jest spowodowane deformacjami obudowy wiotkiej i brakiem tych deformacji w obudowie sztywnej. Deformacje te w przypadku obudowy wiotkiej powodują zmniejszenie naprężeń pionowych w gruncie nad wyrobiskiem, z czego wynika zmniejszenie obciążeń obudowy na tym kierunku. Takie efekty nie są obserwowane w przypadku obudowy sztywnej. W części zwornikowej naprężenia pionowe są tu rzędu 30 kPa, podczas gdy nad obudową wiotką wynoszą około 12 kPa. Analogiczne wartości naprężeń występują pod częścią spągową.

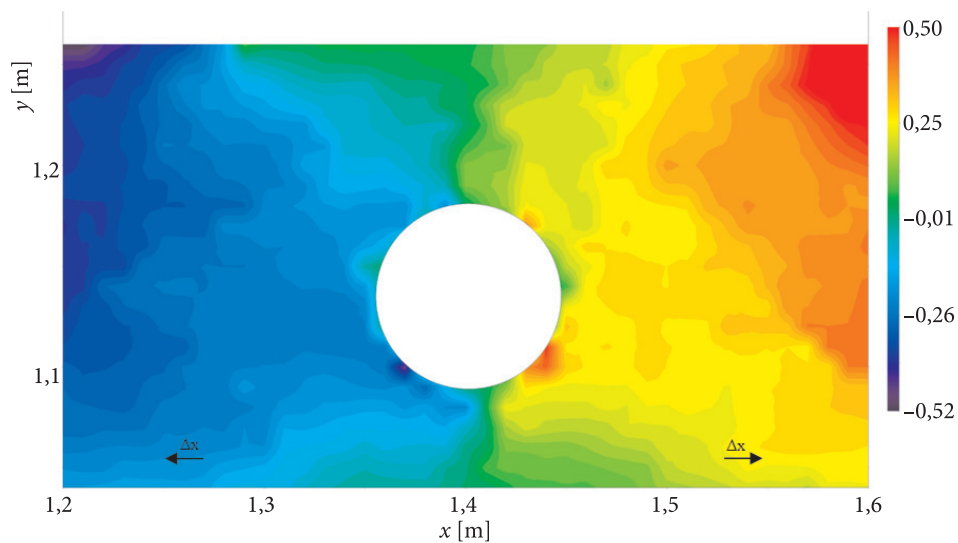
Tak więc posługując się metodą Hewetta, niezależnie od sztywności obudowy uzyskujemy mniejsze wartości obciążeń poziomych: L2 + L3 oraz P2 + P3. Zasadne jest w przypadku tej metody zwiększanie parcia poziomego poprzez wprowadzenie odpowiedniego współczynnika. Wiotkość obudowy wpływa ogólnie na zmniejszenie obciążeń pionowych przekazywanych na jej część zwornikową — obciążenie G2 i G3 oraz reakcje D2 i D3. Te same oddziaływania odcinkowe dla obudowy sztywnej i według Hewetta można uznać za zgodne.

Analizując mapy przemieszczeń poziomych  $\Delta x$  w gruncie w otoczeniu części bocznych obudów (rys. 22, 23), stwierdza się ich stosunkowo małe wartości w sąsiedztwie obudowy sztywnej — około 0,2 mm. Naturalną koncentrację tych przemieszczeń obserwujemy w przypadku obudowy wiotkiej — wynoszą one tu około 0,8 mm. Na mapach przemieszczeń pionowych  $\Delta y$  gruntu (rys. 24, 25) uwidaczniają się różne kształty niecek powstających w powierzchni naziomu. Przy obudowie wiotkiej występują koncentracje tych przemieszczeń spowodowane przez

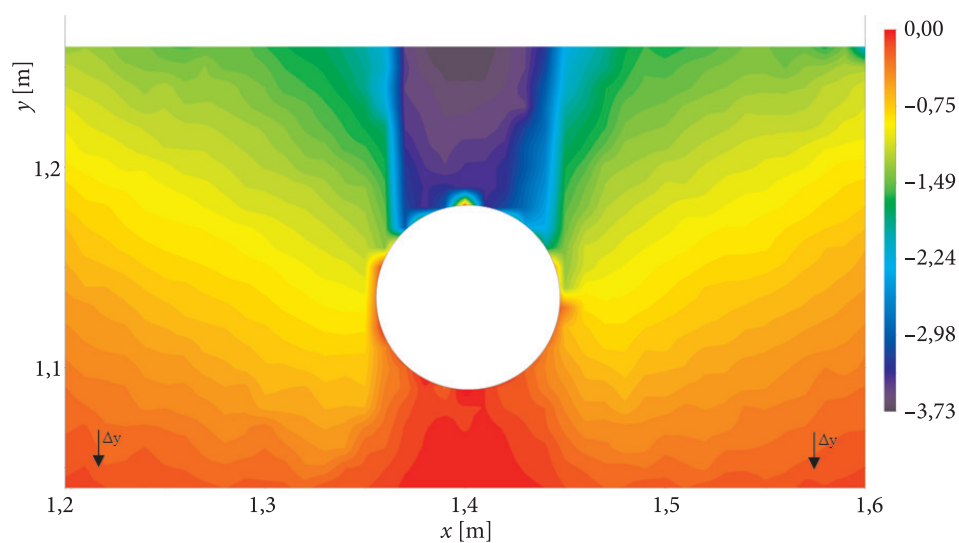
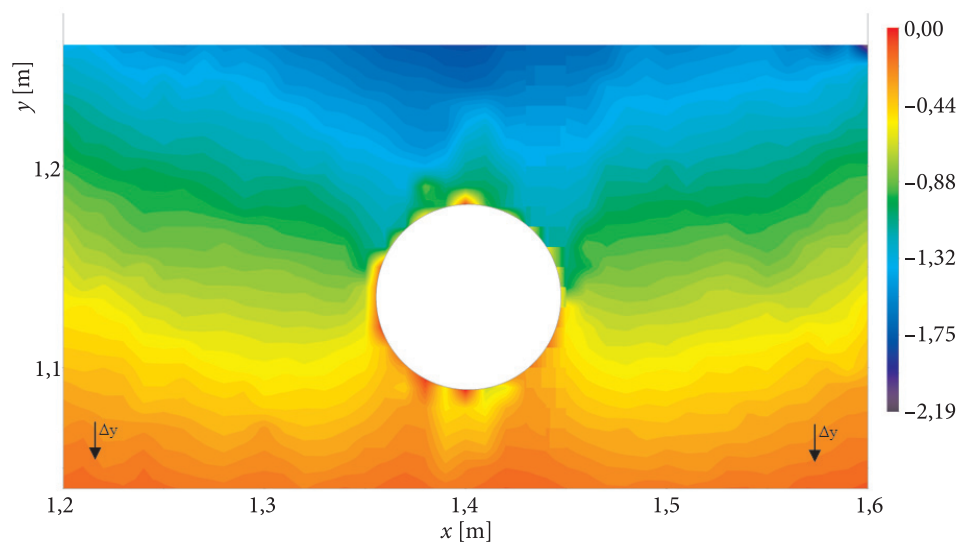
deformacje części zwornikowej obudowy. W przypadku obudowy sztywnej niecka w naziemie cechuje się znaczną rozległością i znacznie mniejszymi zagłębieniami.



Rys. 22. Mapa  $\Delta x$  [mm] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)



Rys. 23. Mapa  $\Delta x$  [mm] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)

Rys. 24. Mapa  $\Delta y$  [mm] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa wiotka (OW)Rys. 25. Mapa  $\Delta y$  [mm] — obciążenie Q + CW, nadkład N1D, obudowa sztywna (OS)

Tak samo jak w przypadku obciążania ciężarem własnym, dla nadkładu N2D obserwowano analogiczne wyniki do wyżej przedstawionych, dlatego nie są one prezentowane.

## 4. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych analiz wyciągnąć można szczególnie wnioski o charakterze jakościowym, dotyczące zachowania wiotkich i sztywnych obudów walcowych z nadkładem o grubości do dwóch średnic. Wykazano, że na obciążenia przejmowane przez model obudowy silny wpływ mają jego deformacje oraz górotwór, którego skuteczność uwidacznia się wyraźnie już przy nadkładzie gruntu równym średnicy obudowy. W przypadku konstrukcji wiotkiej zmniejsza się oddziaływanie pionowe przekazywane na jej część sklepieniową pochodzące od zewnętrznego obciążenia technologicznego. Jednocześnie zwiększają się naprężenia pionowe w gruncie w obszarze ociosów wyrobiska, co znacząco intensyfikuje parcie boczne na obudowę. Ogólnie akceptowana w postępowaniach projektowych schematyzacja rozkładu obciążenia według propozycji Hewetta może nie tworzyć najniekorzystniejszej sytuacji obciążeniowej, nawet jeżeli wprowadzimy korektę zwiększającą obciążenie boczne na skutek koncentracji trajektorii naprężeń pionowych w obszarach ociosowych, ale nie zmniejszymy jednocześnie obciążenia pionowego przekazywanego na część sklepieniową obudowy. Oczywiście dotyczy to w szczególności analiz obudów wiotkich. Ponadto stwierdzono, że obciążenia przejmowane przez obudowę nie były tylko obciążeniami do niej ortogonalnymi. Grunt przekazywał je również za pomocą sił stycznych do obudowy. Na podstawie wykonanych analiz można również wnioskować o samej naturze wzajemnej interakcji obudowy i ośrodka. Ośrodek gruntowy ma szkielet wewnętrzny, który nie tworzy ograniczeń i nie przekazuje obciążeń na obudowę, gdy ta deformuje się do swego wnętrza, lokalnie występują wówczas odciążenia w gruncie. Natomiast deformacje obudowy ze zwrotem do gruntu wywołują w nim opory bierne, które superponują się z istniejącymi stanami parć bocznych. Z tego powodu, w przypadku schematyzacji wiotkiej, niekotwionej obudowy właściwe byłoby stosowanie sprężystych podpór Winklera traktowanych jako więzy jednostronne, wrażliwe na zwrot ich działania. Takie poprawne koncepcyjnie postępowanie istotnie utrudniłoby wówczas przeprowadzenie analiz statycznych sposobami analitycznymi. Ustalenie wiarygodnych obciążeń do tak przyjętej schematyzacji jest praktycznie niemożliwe. Uzasadnia to analizę pełnej interakcji obudowy i ośrodka gruntowego metodami numerycznymi. Dodatkowym plusem w tym przypadku jest możliwość stosunkowo łatwego uwzględnienia niestacjonarnych imperfekcji ośrodka gruntowego, które w prezentowanych wynikach uwidoczniły się silnie w asymetrii oddziaływań przekazywanych na obudowę.

Praca powstała w ramach pracy badawczej statutowej nr 934 realizowanej w Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej.

Artykuł wpłynął do redakcji 18.06.2018 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 9.10.2018 r.

Paweł Szklennik <https://orcid.org/0000-0001-9383-858X>

## LITERATURA

- [1] ABBETT R.W., *American Civil Engineering Practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1956.
- [2] BARTOSZEWSKI J., LESSAER S., *Tunele i przejścia podziemne w miastach*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1971.
- [3] CHRISTENSEN R., *Mechanics of composite materials*, John Wiley, New York, 1979.
- [4] CUNDALL P.A., STRACK O.D.L., *A discrete numerical model for granular assemblies*, Géotechnique, 29, 1, 1979, 47-65.
- [5] DAWYDOW S.S., *Obliczanie i projektowanie konstrukcji podziemnych*, MON, Warszawa, 1954.
- [6] HEWETT B.H.M., JOHANNESON S., *Schild und Druckluft Tunnelbau*, Werner Verlag, Düsseldorf, 1964.
- [7] KRUYT N.P., ROTHENBURG L., *Micromechanical definition of strain tensor for granular materials*, ASME Journal of Applied Mechanics, vol. 118, 1996, 706-711.
- [8] LÄTZEL M., *From microscopic simulations towards a macroscopic description of granular media*, PhD thesis, University of Stuttgart, Stuttgart, 2003.
- [9] MIEHE C., SCHRÖDER J., BECKER M., *Computational homogenization analysis in finite elasticity: Material and structural instabilities on the micro- and macro-scales of periodic composites and their interaction*, Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., vol. 191, 2002, 4971-5005.
- [10] NEMAT-NASSER S., HORI M., *Micromechanics: overall properties of heterogeneous materials*, North Holland, Amsterdam, 1993.
- [11] RAMM E., D'ADDETTA G.A., LEUKART M., *Interrelations between continuum and discontinuum models for geomaterials*, VII International Conference on Computational Plasticity COMPLAS, Barcelona, 2003.
- [12] ROJEK J., *Modelowanie i symulacja komputerowa złożonych zagadnień mechaniki nieliniowej metodami elementów skończonych i dyskretnych*, IPPT PAN, Warszawa, 2007.
- [13] STAMATELLO H., *Tunele i miejskie budowle podziemne*, Arkady, Warszawa, 1970.
- [14] SZKLENNIK P., *Identification of numerical model parameters of tunnel lining in non-cohesive soil*, Biuletyn WAT, 67, 4, 2018, 41-58, DOI: 10.5604/01.3001.0012.8484.

P. SZKLENNIK

### Numerical analysis of interaction between a model tunnel lining and non-cohesive soil

**Abstract.** The paper presents an analysis and assessment of an interaction between a model tunnel lining and surrounding non-cohesive soil. The analysis was conducted with numerical simulations using the author's program based on an algorithm of the discrete element method. Previously calibrated numerical model was used in the calculations. Calibration was based on comparison of the construction deformations observed in the laboratory tests and during the simulation. Numerous simulations, performed in the calibrated numerical model, included calculations for a flexible and rigid construction of the lining. The tunnel construction loads, stress distribution in the surrounding soil, and soil particles' displacements were investigated. Analyses were conducted in two variants — when only soil weight is acting on the tunnel construction and when the external load transmitted from the surface is present. Also two variants of the backfill height were investigated — they were equal to one and two diameters of the tunnel. The values of tunnel loads, which were numerically calculated, were compared with the corresponding values, calculated by the Hewett's method. It is shown that distribution of tunnel loads and stresses in the surrounding soil is strongly linked with the tunnel construction stiffness, thus it can be significantly different from standard load situations for such constructions.

**Keywords:** civil engineering, discrete element method, tunnel lining

**DOI:** 10.5604/01.3001.0013.1479

