# NUMERYCZNA SYMULACJA NAPORU GRUNTU NA ŚCIANY OBIEKTÓW POSADOWIONYCH NA TERENIE GÓRNICZYM

# Magda Lubecka, Marek Bartoszek<sup>1a</sup>

Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska <sup>a</sup> marek.bartoszek@ polsl.pl

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono symulację komputerową przypadku zagłębienia budowli w podłożu poddanym wpływom podziemnej eksploatacji górniczej. Prezentowany model numeryczny opracowano w celu określania naporu gruntu na zagłębioną w nim ścianę w warunkach poziomych odkształceń podłoża zagęszczających grunt. Przeprowadzone obliczenia wykazały możliwość weryfikacji uzyskiwanych numerycznie wyników poprzez przyrównywanie granicznej wielkości naporu do wielkości parcia biernego. Na tej podstawie sprawdzana była zgodność obliczeń numerycznych z istniejącymi wzorcami będącymi rozwiązaniami zadania odporu gruntu.

Słowa kluczowe: napór gruntu, odpór gruntu, szkody górnicze, metoda elementów skończonych

# NUMERICAL SIMULATIONS OF THE LATERAL EARTH PRESSURE ON THE WALLS OF STRUCTURES FOUNDED IN MINING AREA

#### Summary

The paper describes numerical analysis of the ground embedded wall, founded in the area of underground mining. A numerical model was built to evaluate lateral earth pressure under compressive strains caused by mining exploitation. Simulations allowed to verify obtained results comparing calculated and passive earth pressures. On that basis precision and compliance with reference solutions of the lateral earth pressure problem for mining area was verified.

Keywords: ground embedded wall, lateral earth pressure, mining exploitation area, finite element method

### 1. WSTĘP

W wyniku górniczych deformacji przypowierzchniowej warstwy górotworu, współdziałająca z obiektem bryła gruntu ulega wraz z nim przemieszczeniom: pionowemu, poziomemu i obrotowi oraz wpływowi krzywizny i poziomego odkształcenia podłoża. Gdyby w tej bryle gruntu nie było posadowionego obiektu budowlanego, wystąpiłby w niej jednorodny stan odkształcenia i naprężenia. Obiekt budowlany wprowadza zakłócenia w swobodnym przemieszczaniu się cząstek gruntu w obrębie bryły. W efekcie powstaje w niej niejednorodny stan naprężenia i odkształcenia, powodujący zmianę oddziaływań pomiędzy podłożem a obiektem. W pracy rozpatrzono parcie gruntu na pionowe ściany budowli zagłębione w podłożu poddanym poziomym odkształceniom prowadzącym do zagęszczenia gruntu. W przypadku terenu wolnego od wpływów górniczych na zagłębioną, nieruchomą ścianę działa parcie geostatyczne  $p=p_o$ . Poziome zageszczanie gruntu podłoża  $\varepsilon$ powoduje wzrost parcia p, ograniczony wystąpieniem w nim stanu równowagi plastycznej  $p=p_{gr}$ . Zmieniający się wraz ze wzrostem odkształceń poziomych podłoża  $\varepsilon$ rozkład naprężeń poziomych w gruncie przy ścianie

prezentuje rys. 1. Linią przerywaną oznaczono wprowadzony do modelu numerycznego stan początkowy, równy parciu spoczynkowemu  $p=p_o$ . Krzywe oznaczone liniami ciągłymi uzyskano przy kolejnym, coraz większym zagęszczeniu gruntu w modelu podłoża górniczego.



Rys. 1. Przyrost parcia gruntu na ścianę w wyniku poziomych odkształceń podłoża zagęszczających grunt $\varepsilon$ 

Istniejące analityczne metody obliczeniowe nie dają jednoznacznej informacji o mobilizacji naporu gruntu na ścianę w wyniku poziomych odkształceń podłoża. Określając napór jako wielkość pośrednią pomiędzy parciem czynnym i biernym, zauważa się, że różnią się one między sobą co do opisu wzrostu parcia w zależności od odkształceń podłoża górniczego, wymiarów budowli czy cech gruntu. Przeprowadzone obliczenia wykorzystujące metodę elementów skończonych miały na celu dostosowanie modelu numerycznego do potrzeb postawionego problemu. Opierając się na doświadczalnie stwierdzonej możliwości osiągnięcia przez napór wielkości parcia biernego [1], w każdym z rozważanych zadań doprowadzano do wytworzenia się w zagęszczanym gruncie przed ścianą budowli klasycznego klina odłamu. Stosowanie dla gruntu sprężysto idealnie plastycznego modelu materiału – Coulomba Mohra pozwoliło z kolei na weryfikację uzyskanych wyników poprzez przyrównywanie ich do wartości otrzymywanych za pomocą metod analitycznych opartych na klasycznej teorii parcia. Ostatecznie prezentowane rozważania koncentruja się wokół prawidłowego określenia granicznych wartości naporu i odporu gruntu. Skupiono się w nich również na analizie tworzących się w gruncie przy ścianie stref uplastycznienia bezpośrednio wpływających na te wielkości.

#### 2. ZAKRES I METODYKA PRACY

W pracy napór ośrodka gruntowego na ścianę, poddanego poziomym odkształceniom zagęszczającym, traktowany był jako problem brzegowy stanu równowagi sprężysto-plastycznej. Obliczenia wykonywane były w płaskim stanie odkształcenia za pomocą pakietu programów metody elementów skończonych Abaqus. Wykorzystywany w obliczeniach układ budowla-podłoże górnicze (B)-(Pg) przedstawiono na rys. 2a.



Rys. 2. Schemat układu obliczeniowego budowla - podłoże;a) teren górniczy, przypadek naporu gruntu na ścianę (TG),b) teren niegórniczy, przypadek odporu gruntu (PB)

Podukład (B) reprezentował budowlę o szerokości 2bzagłębioną w podłożu (Pg) na wysokość h. Pracę materiału charakteryzującego budowlę (B) opisano sprężystym modelem konstytutywnym za pomocą parametrów: ciężar objętościowy =20 kN/m<sup>3</sup>, moduł sprężystości E=30 GPa oraz współczynnik Poissona =0,17. Podukład odpowiadający podłożu górniczemu (Pg) reprezentował z kolei pewien skończony podobszar podłoża współpracującego z budowlą (B) i deformującego się w wyniku eksploatacji górniczej. Poziome odkształcenia podłoża  $\varepsilon$  odtworzono w modelu za pomocą kinematycznych warunków brzegowych nałożonych na dolną i boczną prawą krawędź modelu w postaci przemieszczeń poziomych  $\varepsilon$  x. Grunt opisano sprężysto idealnie plastycznym modelem konstytutywnym o powierzchni plastyczności Coulomba Mohra. Układ obliczeniowy (B)-(Pg) uproszczono, zakładając jego pionową oś symetrii w połowie szerokości budowli (B). Przydatność opisanego modelu terenu górniczego (TG) do określania wielkości naporu sprawdzano, porównując uzyskiwane za jego pomoca rozwiązania z wynikami obliczeń analitycznych i numerycznych otrzymanych dla zadania odporu gruntu (PB). W przypadku analizy numerycznej rozwiązano zadanie odwrotne do tego, które zostało sformułowane dla sytuacji naporu. Tym razem to ściana (S) napierała na grunt podłoża (P), powodując jego odpór, nazywany parciem biernym (rys. 2b). W ten sposób odpór gruntu  $P_b$  jako reakcja warunkowany był przesunięciem ściany ku gruntowi d.

W obliczaniach analitycznych posłużono się metodami określania maksymalnego, granicznego odporu dostępnymi w literaturze dla ściany ciągłej sięgającej powierzchni gruntu. Klasyczna metoda wyznaczania odporu gruntu opracowana przez Coulomba zakłada uplastycznienie gruntu jedynie w powierzchni odłamu, która jest płaska i pochylona pod kątem  $45^{\circ}-\phi/2$  do poziomu. Klin odłamu jest w niej bryłą nieodkształcalną, której poślizg następuje po tej powierzchni. Korzystając z metody Coulomba, uzyskuje się wartości maksymalnego odporu, którego rozkład przyjmuje się według trójkąta prostokątnego o kącie wierzchołkowym leżącym przy gruntach sypkich w poziomie naziomu, a przy spoistych w pewnej odległości nad nim (rys. 3).



Rys. 3. Klasyczne wykresy jednostkowego odporu  $p_b$ dla gruntu niespoistego c=0 i spoistego c=0

Wypadkowa siła odporu gruntu  $P_b$  równa sile naporu ściany  $P_{(S)}$  o kierunku działania przeciwnym do niej zaczepiona jest w 1/3 wysokości zagłębienia ściany h, tworząc z normalną do ściany kąt  $\delta_b=0$  (Rys. 4a)



Rys. 4. Analityczna metoda określania odporu gruntu

Z teorii stanów granicznych wiadomo, że takie założenia są słuszne tylko przy spełnieniu pewnych warunków brzegowych: poziomy naziom obciążony równomiernie i pionowo, a pionowa ściana gładka. Dla innych warunków brzegowych siła odporu jest odchylona o kąt  $\delta_b$  od normalnej do ściany, a linia poślizgu staje się krzywą. Kąt  $\delta_b$  zależy wprost od ukształtowania ściany oraz szorstkości jej powierzchni. Natomiast płaszczyzna poślizgu zależy głównie od powierzchni ściany, a wiec kąta tarcia gruntu o ścianę  $\delta$ . Uogólnione przez Ponceleta rozwiązanie Coulomba pozwala określić przybliżony liniowy rozkład odporu wzdłuż szorstkiej ściany ( $\neq 0$ ) odchylonej od pionu o kąt i przy naziomie nachylonym pod kątem (rys. 4b).

W miarę rosnącego kąta tarcia gruntu o ścianę $% {\rm e}$  , zgodność rzeczywistego maksymalnego odporu granicz-

nego z wartością odporu obliczonego na podstawie teorii Coulomba jest coraz mniejsza. Liczne eksperymenty wykazały, że odłam części gruntu przy szorstkiej ścianie następuje nie wzdłuż prostej linii (płaszczyzny), lecz krzywej. W praktyce w przypadku szorstkich ścian wartość współczynnika parcia biernego  $K_b$  koryguje się współczynnikiem zmniejszającym wynoszącym np.: 0,85 przy  $\delta=0.5\phi$  lub 0,7 przy  $\delta=\phi$ .

Ponieważ wartość granicznej siły odporu jest proporcjonalna do objętości bryły odłamu, na potrzeby pracy w środowisku programistycznym Scilab zaimplementowano dwie metody określania odporu na podstawie zakrzywionych powierzchni poślizgu. W pierwszej metodzie dotyczącej ośrodka niespoistego (SL) linia poślizgu składa się z: odcinka w postaci spirali logarytmicznej i odcinka prostego. W drugiej (ŁK), uwzględniającej spoistość gruntu, linia poślizgu składa się z wycinka okręgu i odcinka prostego. Poślizg wzdłuż tak założonych linii nie jest możliwy w całym obszarze, są to więc metody przybliżone. Zakładając poślizg iedvnie na odcinku prostym, nie można zapewnić ścięcia gruntu na odcinku krzywym, gdzie wytworzy się szczelina. W miejscu szczeliny nie powstanie oddziaływanie gruntu, co uniemożliwia zbudowanie wieloboku sił określającego wielkość odporu.

Numeryczna analiza czynników decydujących o wartości naporu wykazała istotny wpływ kąta tarcia gruntu o ścianę  $\delta$  na tę wielkość. Występujące na styku ściany i gruntu tarcie powodowało podobne jak w przypadku zdania odporu zakrzywienie powierzchni poślizgu (rys. 5). Na tej podstawie, prezentowane na rys. 2 schematy obliczeniowe zadania naporu i odporu gruntu wariantowano z uwagi na powierzchnie ściany. Przyjmując kąt tarcia gruntu o ścianę w zakresie od  $\delta=0$  do  $\delta=\phi$ , rozpatrzono przypadek od ściany gładkiej po możliwie najbardziej szorstką.



Rys. 5. Wpływ kąta tarcia gruntu o ścianę – na kształt i zasięg płaszczyzny poślizgu w zadaniu odporu gruntu.

# 3. NUMERYCZNA ANALIZA SYTUACJI NAPORU I ODPORU GRUNTU

Analizy numeryczne przyprowadzone według schematu przedstawionego na rys. 2a wykazały, że przyjęcie w modelu odpowiednio dużych odkształceń poziomych podłoża  $\varepsilon$  powoduje powstanie w gruncie przy ścianie charakterystycznego dla zjawiska odporu klina odłamu. W momencie przekroczenia w płaszczyźnie nachylonej do poziomu pod kątem mniejszym niż 45° wytrzymałości gruntu na ścinanie następowało oderwanie się i wypchniecie do góry trójkątnego obszaru gruntu przy ścianie. Na ścianę działało zatem parcie ziemi ograniczone płaszczyzną poślizgu. Ponieważ płaszczyzna ta w odpowiadających sobie zadaniach naporu i odporu była taka sama, graniczne wartości wypadkowej siły naporu i odporu gruntu były zbliżone.



Rys. 6. Stan równowagi granicznej w zadaniu naporu gruntu. Mapy odkształceń plastycznych PE oraz przemieszczeń: poziomych Ux i pionowych Uy

Podobny był też kształt krzywych opisujących przyrost siły naporu i odporu gruntu postępujący przy stopniowym przechodzeniu gruntu w otoczeniu konstrukcji ze stanu sprężystego w stan plastyczny. Wykres zależności P- $\varepsilon$  tak samo jak wykres zależności P-d składa się z odcinka prostego w granicach siły P wprost proporcjonalnej do wywołującego ją odkształcenia  $\varepsilon$  lub przemieszenia d, odcinka krzywoliniowego w granicach spreżysto-plastycznych odkształceń gruntu oraz prostego odcinka poziomego odpowiadającego stanowi granicznej równowagi (rys. 7).





Wielkość naporu warunkowana była wartością odkształceń poziomych podłoża  $\varepsilon$  i odległością narażonej na napór płaszczyzny ściany od osi spełzania równej szerokości budowli *b*. Im dalej od osi spełzania znajdowała się nieruchoma ściana, tym siła naporu *P* przy takim samym odkształceniu poziomym podłoża  $\varepsilon$  była większa. Przy czym wartość ta wahała się zawsze w granicach od wartości siły parcia spoczynkowego  $P_o$ działającej na ścianę przed odkształceniem podłoża do warności maksymalnej równej sile parcia biernego  $P_b$ . Na prezentowanych w pracy rysunkach w celu ujednolicenia jednostek zależności  $P \cdot \varepsilon$  sprowadzono do zależności pomiędzy siłą naporu i kompresją gruntu  $P \cdot \varepsilon b$ . W istniejących metodach określania naporu, w których wykorzystany został model R.A. Müllera [3], zakłada się równość (1).

$$d = \varepsilon \cdot b \tag{1}$$

Obliczenia numeryczne wykazały jednak, że tylko w niektórych przypadkach przyjęcie identycznych wartości kompresji gruntu  $\varepsilon$  x i przesunięcia ściany *d* prowadzi do identycznego rozwiązania zadania naporu i odporu gruntu (rys. 8). Różnice pomiędzy rozwiązaniami uzyskane przy założeniu równości (1) potwierdzają licznie stwierdzane niezgodności pomiędzy wynikami metod obliczeniowych utożsamiających klasyczne zjawisko odporu z przypadkiem naporu gruntu z wynikami badań oraz obserwacji obiektów rzeczywistych [2]. Na tej podstawie stwierdzono potrzebę sprawdzenia możliwości określania naporu za pomocą metod numerycznych wykorzystujących model obliczeniowy, w którym siła naporu doprowadzana jest do weryfikowalnej wartości granicznej równej sile parcia biernego ( $P_{gr}=P_b$ ).



Rys. 8. Przyrost siły naporu (TG) i oporu (PB) na ścianę zagłębioną w gruncie na wysokość h umieszczoną w zadaniu naporu w odległości b od osi spełzania

## 4. KSZTAŁT LINII POŚLIZGU A WIELKOŚĆ NAPORU I ODPORU GRUNTU

Gdy grunt przesuwa się wzdłuż szorstkiej ściany, to ruchowi temu przeciwstawia się tarcie zewnętrzne (tzw. tarcie gruntu o ścianę), a gdy grunt jest spoisty, także i jego przyczepność (adhezja). Znajomość tarcia zewnętrznego jest potrzebna nie tylko do wyznaczenia wartości odporu czy naporu gruntu, lecz także dla określenia kierunku działania tych sił. W modelu TG, uwzględniając tarcie pomiędzy gruntem a ścianą, obser-

wowano tendencje do podnoszenia się budowli wraz z wypieranym gruntem, co, jeśli następowało, likwidowało częściowo lub całkowicie tarcie i jego wpływ na wielkość naporu. W przypadku uniemożliwiania pionowego ruchu budowli, siły te działały na ścianę pod katem  $\delta$  mierzonym od normalnej do jej powierzchni. Napór i odpór gruntu działa prostopadle do ściany tylko w przypadku jej gładkich powierzchni $\delta\!\!=\!\!0.$  W pozostałych przypadkach pochyły kierunek tych oddziaływań (minimalnych naprężeń głównych) związany jest z wartością tarcia występującego w płaszczyźnie pionowej miedzy ścianą a gruntem. Na rys. 9 prezentowane jest pionowe pasmo gruntu wycięte z modelu zadania TG przy ścianie, szerokości jednego elementu skończonego. Widoczne w każdym elemencie skończonym wektory ilustruja kierunek i pogladowo wartość minimalnej wartości głównej tensora naprężenia, a wiec jednostkowego naporu gruntu na ścianę, w zależności od stosunku kąta tarcia gruntu o ścianę  $\delta$ do kąta tarcia wewnętrznego gruntu  $\phi$ .



Rys. 9. Kierunek działania jednostkowej siły naporu gruntu na ścianę przy różnych kątach tarcia gruntu o ścianę  $\delta$ 

Metody analityczne [3] zakładają powstanie w bryle odłamu dwóch stref plastycznych rozdzielonych płaszczyzną przechodzącą przez wierzchołek ściany i pochyloną do poziomu pod katem ( $45^{\circ}$ - $\phi/2$ ). Powyżej tej płaszczyzny występuje strefa Rankine'a, a poniżej Prandtla. Pierwszy rodzaj obszaru uplastycznienia odznacza się tym, że linie poślizgu tworzą dwie rodziny prostych równoległych (lub w ogólniejszym wypadku krzywych równoległych do siebie) krzyżujących się wzajemnie pod katem 90°± $\phi$ . Przypadek biernego stanu uplastycznienia prezentowany jest na rys. 10a. Drugim rodzajem jest obszar, w którym jedną rodzinę linii poślizgu tworzą spirale logarytmiczne o wspólnym biegunie, drugą zaś proste przechodzące przez biegun, który jest punktem osobliwym (rys. 10b).



Rys. 10. Linie poślizgu obszarów uplastycznionych [2]: a) obszar Rankine'a – stan uplastycznienia bierny, b) obszar Prandtla dla **#=0** 

Na rys. 11 rozwiązanie zadania naporu w postaci płaszczyzny poślizgu prezentowanej za pomocą mapy odkształceń plastycznych zestawiono z rozwiązaniami odpowiadającego mu zadania odporu uzyskanymi za pomocą rozpatrywanych w pracy metod: numerycznych i analitycznych. Zarówno w zadaniu naporu jak i odporu rozróżniono dwa przypadki powierzchni ściany: gładką =0 (rys.11a) i szorstką =2/3 (rys.11b). W przypadku gładkiej ściany =0 można stwierdzić że w odpowiadających sobie zadaniach naporu i odporu gruntu, niezależnie od zastosowanej metody obliczeniowej, klin odłamu miał taki sam kształt i zasięg. Od strony gruntu ograniczała go płaszczyzna poślizgu nachylona po poziomu pod katem  $45^{\circ}-\phi/2$ . Metoda Coulomba nie uwzględnia tarcia pomiędzy gruntem a ścianą, dlatego pominięto ją w przypadku szorstkiej ściany (rys. 11b). Pozostałe metody przy założeniu szorstkiej ściany nadal dawały podobne wyniki. W porównaniu do wcześniejszego przypadku gładkiej ściany określały co prawda mniejszy zasięg klina odłamu  $x_{gr}$ , jednak wyznaczona linia poślizgu była dłuższa. Było to związane z obserwowanym w każdej z metod zakrzywieniem linii poślizgu w dolnej jej części, w pobliżu ściany.





Wykazaną na rys. 11 zgodność rozwiązań uzyskanych numerycznie (PB, TG) i analitycznie (C, SL, ŁK) potwierdzają zestawione na kolejnych rysunkach wartości granicznej siły odporu i naporu gruntu  $P_{gr}$  oraz zasięg klina odłamu  $x_{gr}$ .

Ilościowa analizę porównawczą numerycznych i analitycznych rozwiązań zadania odporu gruntu przedstawiono na rys. 12. Wyniki obliczeń były zgodne przy założeniu gładkiej powierzchni ściany. Uwzględnienie tarcia gruntu o ścianę w metodach wykreślnych (SL, ŁK) powodowało zmianę kształtu i zasięgu klina odłamu oraz jednakowe dla obu metod zwiększenie wypadkowej siły odporu  $P_{gr}$  (rys. 12a i rys. 13a). Metoda Coulomba, (C) zakładająca płaską powierzchnię poślizgu, już przy niewielkim kącie tarcia  $\delta$  dawała znacząco większe wartości sił odporu (rys. 12a). Różnica pomiędzy wynikami szybko rosła wraz ze zwiększaniem się kąta  $\delta$  (rys. 13a). W przypadku  $\delta = \phi = 30^{\circ}$  wynosiła ona 55%. Ponieważ podobne zależności można znaleźć w literaturze przedmiotu, powyższa analiza potwierdza poprawność wykonywanych obliczeń.

Stosunkowo zgodne co do wartości siły  $P_{gr}$  metody wykreślne: spirali logarytmicznej SL i łuku kołowego ŁK w przypadku zasięgu klina odłamu  $x_{gr}$  wykazały niewielkie różnice (do 4,5%) ujawniające się przy większym kącie tarcia gruntu o ścianę  $\delta$  (rys. 12b). Numeryczne rozwiązania zadania PB były podobne do wyników uzyskanych za pomocą metod wykreślnych (rys. 12). Zauważono jednak tendencję do pomniejszania się wielkości określanych numerycznie, szczególnie przy większych wartościach kąta tarcia wewnętrznego  $\phi$  i kąta tarcia gruntu o ścianę  $\delta$ . Większe różnice występują w przypadku zasięgu klina odłamu (rys. 12b), gdzie przy kącie tarcia wewnętrznego wynoszącym  $\phi=30^{\circ}$  wynosiły one 5%, a przy  $\delta=\phi=45^{\circ}$  dochodziły do 20%.



Otrzymane wartości granicznego naporu gruntu na ścianę budowli (TG) były identyczne z wynikami odpowiadającego mu zadania odporu (PB, SL, ŁK) (rys. 13a). Przyjęte w obliczeniach różne szerokości budowli 2b nie wpłynęły na graniczną wielkość naporu, ale decydowały o szybkości osiągnięcia w gruncie przed ścianą stanu plastycznego (rys. 13b). Pomimo, iż nie stwierdzono założonej przez Müllera równości (1), podobną zależność zauważono dla granicznej wielkości siły przy kompresji gruntu przed ścianami szerokich budowli  $(2b \ 20 \ m).$ 

Z szerokością budowli *b* związany był również zasięg płaszczyzny poślizgu  $x_{gr}$ . W przypadku obiektu o szerokości 2b=20 m (TG, b=10 m) kształt i zasięg klina odłamu był identyczny jak w odpowiadającym mu zadaniu parcia biernego (PB). Zwiększenie lub zmniejszenie tej szerokości powodowało proporcjonalną zmianę zasięgu klina odłamu  $x_{gr}$ . Wyznaczona numerycznie zależność  $x_{gr}$ - $\delta$  jest inna od określonej za pomocą metod wykreślnych (rys. 15b). Stwierdzono jedynie porównywalny zakres otrzymanych wielkości.



Rys. 13. Rozwiązania zadania naporu i odporu gruntu w zależności od kąta tarcia gruntu o ścianę  $\delta$  w postaci wartości granicznych: a) siły naporu (TG) lub odporu (PB, C, SL, ŁK), b) przesunięcia ściany (PB) lub kompresji gruntu (TG)



Rys. 14. Zasiąg klina odłamu  $x_{gr}$  określony numerycznie w zadaniu naporu (TG) i odporu (PB) gruntu oraz analitycznie w zadaniu odporu (SL, ŁK, A.A)

Naniesiona na rys. 14 aproksymacja wielkości  $x_{gr}$ (A.A) na podstawie wyników metody spirali logarytmicznej (SL) i łuku kołowego (ŁK) była możliwa z uwagi na dużą zgodność wyników oraz pomijalnie mały wpływ spójności gruntu *c* na wielkość  $x_{gr}$  (rys. 15). Nieznacznie większy zasięg klina odłamu w przypadku modelu gruntu niespoistego *c*=0 oraz liniowa zależność tej wielkości od zagłębienia ściany w gruncie *h* obserwowane w każdej z rozpatrywanych metod obliczeniowych widoczne są na rys. 15.



Rys. 15. Zasięg klina odłamu  $x_{gr}$ w zależności od wysokości zagłębienia ściany hi spójności gruntu c

#### PODSUMOWANIE

Dokonane porównania potwierdzają, że zastosowany model symulacji komputerowej jest zgodny z ogólną teorią równowagi granicznej parcia gruntu i może być wykorzystany do dalszej analizy mającej na celu dostosowanie go do określania naporu ośrodka gruntowego na ścianę w czasie narastania poziomych odkształceń górniczych gruntu.

W pracy omówiono wyniki komputerowej symulacji naporu gruntu na ściany budowli zagłębione w podłożu poddanym poziomym odkształceniom zagęszczającym. Na ich podstawie stwierdzono wielokrotnie już sygnalizowane niezgodności, jakie uzyskuje się, utożsamiając napór gruntu w warunkach deformacji terenu z klasycznym zjawiskiem odporu. Przeprowadzona analiza rozwiązań zadania naporu i odporu gruntu na ścianę wykazała jednak możliwość weryfikacji uzyskiwanych numerycznie wyników poprzez przyrównywanie granicznej wielkości naporu do wielkości parcia biernego. Na tej podstawie sprawdzana była dokładność i zgodność obliczeń z istniejącymi wzorcami, będącymi rozmazaniami zadania odporu gruntu. Porównanie wyników obliczeń numerycznych i tych uzyskanych za pomocą analitycznych metod wymagało założenia sprężysto idealnie plastycznej pracy gruntu. Tak stworzony model obliczeniowy nie rozwiązuje w pełni postawionego problemu, ale poprzez potwierdzenie wiarygodności uzyskiwanych za jego pomocą wyników stanowi podstawę do dalszych poszukiwań.

#### Literatura

- Błaszczyk M., Kwiatek J.: Parcie gruntu sypkiego poziomo zagęszczanego na ściany oporowe. "Ochrona terenów górniczych" 1981, nr 55, s. 18 - 21.
- 2. Dembicki E.: Parcie, odpór i nośność gruntu. Warszawa: "Arkady", 1982.
- Kłosek K.: Napór gruntu na konstrukcję w warunkach górniczych ruchów terenu. W: Materiały konf. nauk. tech. KILiW PAN pt.: "Budownictwo na terenach górniczych. Kamień k/Rybnika, 1985, s. 140 - 154.
- Śliwa J., Cisek T.: Parcie gruntu na budowle zagłębione w gruncie. "Ochrona terenów górniczych" 1974, nr 28, s. 21-25.