

NUMERYCZNA OCENA OBCIĄŻENIA PIONOWEJ ŚCIANY ZAGŁĘBIONEJ W GRUNCIE NA TERENIE GÓRNICZYM

JAN FEDOROWICZ*, MAGDA LUBECKA**

*Katedra Teorii Konstrukcji Budowlanych, Politechnika Śląska

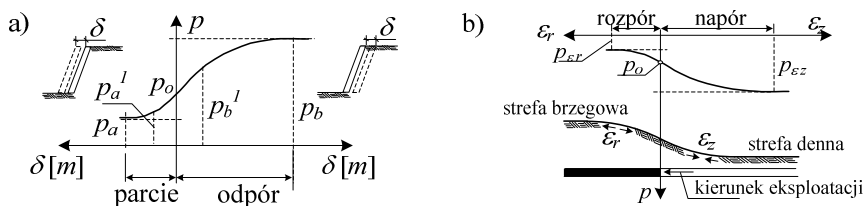
**Katedra Budowy Dróg i Mostów, Politechnika Śląska

e-mail: jan.fedorowicz@polsl.pl, magda.lubecka@polsl.pl,

Streszczenie. Na terenach spokojnych sposoby oddziaływania gruntu na budowlę w nim zagłębioną są ustalone i niezmiennie w okresie istnienia budowli. Na terenach górniczych natomiast uaktywnia się ośrodek gruntowy i zaczyna czynnie oddziaływać na budowlę, zmieniając napór gruntu w zależności od rodzaju i stanu gruntu, geometrii przeszkody, głębokości przeszkody, itp. W pracy przeprowadzono numeryczną analizę wpływu tych czynników na zmianę wartości i charakteru parcia gruntu w warunkach poziomego zagęszczenia podłoża.

1. WPROWADZENIE

Jednym z podstawowych problemów oceny współpracy budowli i podłoża jest zagadnienie określenia parcia gruntu na zagłębioną w nim budowlę. Na terenach spokojnych, nieobjętych eksploatacją kopalń, wielkości oddziaływania gruntu na budowlę w nim zagłębioną są dość dobrze rozpoznane. Rozpoznany jest również charakter tych zjawisk, a z uwagi na brak aktywności ośrodka gruntowego poszczególne sposoby oddziaływania gruntu są ustalone i w okresie istnienia budowli niezmiennie. Dobrze poznano i opisano graniczne wartości oddziaływań gruntu na konstrukcję, chociaż przedział zmian ilorazu wartości największej do najmniejszej jest dość duży, bo waha się w granicach od 5 do ok. 20 [1].



Rys.1. Rodzaje parcia a) na terenie spokojnym, b) na terenie górniczym

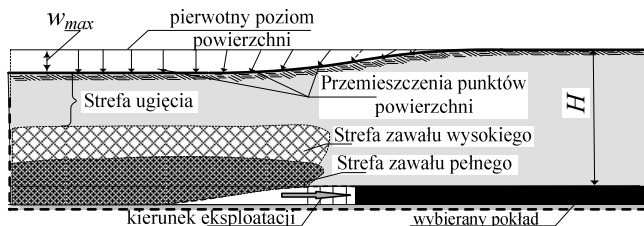
Wyróżnia się tu trzy podstawowe rodzaje parcia: parcie czynne p_a , parcie bierne p_b i parcie spoczynkowe p_o . W szczególnych przypadkach obciążenia konstrukcji dla celów projektowych wg [12] definiuje się dodatkowo dwa rodzaje parcia pośredniego p_a^i i p_b^i – rys. 1. Poszczególne rodzaje parcia są ściśle związane z określonymi warunkami pracy statycznej budowli w zależności od możliwości i kierunku przemieszczania się konstrukcji oporowej. Parciem czynnym są obciążone na ogół mury oporowe, parciem spoczynkowym

obciążone są ściany piwniczne budynków i tunele, parcie bierne z kolei pojawia się w konstrukcjach rozporowych.

Na terenach górniczych pojawia się natomiast nowy czynnik. W wyniku prowadzenia na pewnej głębokości eksploatacji górniczej uaktywnia się ośrodek gruntowy. W przypowierzchniowej warstwie górotworu, w której zagłębiona jest konstrukcja, poszczególne cząstki ośrodka gruntowego pod wpływem sił ciężkości doznają przemieszczeń i grunt zaczyna czynnie oddziaływać na budowlę, zmieniając w zasadniczy sposób istniejący, pierwotny stan naprężenia w gruncie. Jakkolwiek wymienione powyżej rodzaje parcia gruntu występują w dalszym ciągu w postaci klasycznej, to jednak wartości dodatkowego parcia są zmienne, zależne od wzajemnego położenia eksploatowanej ściany pokładu oraz analizowanej przegrody konstrukcji (rys.1b). Przykładowo, jak to stwierdzono doświadczalnie, w przypadku poziomego zagęszczania (a więc w strefie dennej górniczej niecki obniżen) parcie gruntu p_z przybiera wartości mieszczące się w przedziale między granicznym parciem czynnym p_a , a parciem biernym p_b . W literaturze technicznej opublikowano szereg sposobów obliczania naporu gruntu na budowlę w nim zagłębioną w warunkach występowania poziomych odkształceń podłoża górniczego, np. [4-8, 11, 12]. Bardziej szczegółowe omówienie tych metod zawarto w [9]. Są to głównie rozwiązania o charakterze teoretycznym, częściowo potwierdzone badaniami laboratoryjnymi lub obserwacjami w terenie. Wobec dużej rozbieżności w poglądach autorów na rozpatrywane zagadnienie, a także sporej różnicy w otrzymywanych przedstawianymi tam metodami wynikach, uzasadniona wydaje się potrzeba prowadzenia dalszych badań w zakresie metod określania parcia na ściany oporowe gruntu poziomo zagęszczanego na terenach górniczych. W pracy zaprezentowano rezultaty wstępnego etapu podjętych w tym zakresie badań numerycznych częściowo prezentowanych w [3]. Posługując się zbudowanym numerycznym modelem MES i wykorzystując trzy modele konstytutywne gruntu, przedstawiono analizę wpływu niektórych wybranych czynników na wielkość dodatkowego parcia gruntu na budowlę.

2. ZACHOWANIE SIĘ GRUNTU NA TERENIE GÓRNICZYM

Na terenach objętych eksploatacją kopalni w przypowierzchniowej warstwie górotworu, w której zagłębiona jest budowla, poszczególne cząstki gruntu pod wpływem sił ciężkości doznają przemieszczeń w kierunku wybranego pokładu i grunt zaczyna czynnie oddziaływać na budowlę.

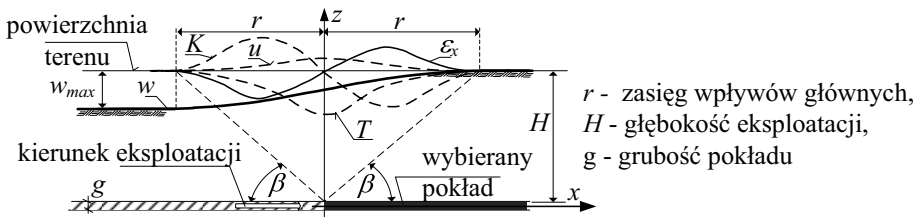


Rys. 2. Tworzenie się zbocza niecki obniżeniowej

W warstwie przypowierzchniowej grunt doznaje odkształceń zarówno w płaszczyźnie poziomej jak i w płaszczyźnie pionowej. Mechanizm procesu przemieszczania się cząstek gruntu ilustruje rys. 2.

W praktyce inżynierskiej zmiany zachodzące w warstwie przypowierzchniowej mierzy się odpowiednio zdefiniowanymi wskaźnikami. Są to: w – pionowe obniżenie powierzchni

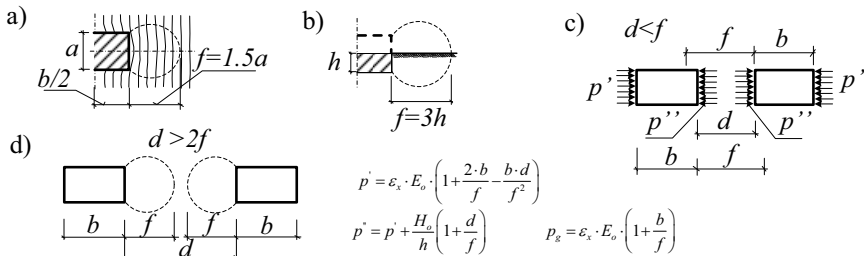
terenu, u – poziome przemieszczenie punktów powierzchni terenu, T – nachylenie powierzchni terenu, K i R – krzywizna i promień krzywizny wygięcia powierzchni terenu oraz ε_x – odkształcenie poziome powierzchni terenu. Wielkość tych wskaźników decyduje zarówno o intensywności dodatkowego obciążenia budowli jak również o przydatności terenu dla potrzeb zabudowy. Na rys. 3 przedstawiono schematycznie zmiany tych wskaźników w zależności od położenia frontu eksploatacji określone według najczęściej stosowanej teorii Budryka-Knothe'go. Dla potrzeb projektowania zdefiniowano sześć kategorii terenu górniczego, gdzie kategoria „0” przy $T < 5\text{mm/m}$, $R < 40\text{km}$, $\varepsilon < 0.3\text{mm/m}$ – to teren spokojny, a kategoria „V” przy $T > 15\text{mm/m}$, $R < 4\text{km}$, $\varepsilon > 9\text{mm/m}$ – to teren nieprzydatny do zabudowy.



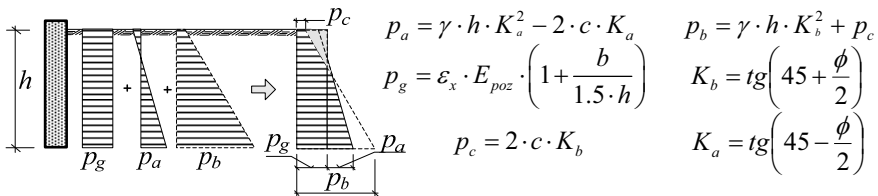
Rys. 3. Charakterystyka oraz zasięg odkształceń powierzchni terenu w obrębie wpływów eksploatacji górniczej opisywanych wskaźnikami ε , w , u , T , K .

3. PARCIE I ODPÓR GRUNTU

Jak pokazano w rozdziale 2, jednym z objawów prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej jest poziome zagęszczanie gruntu w przypowierzchniowej warstwie górotworu. Zagęszczanie to wywołuje w gruncie wzrost naprężeń poziomych, co bezpośrednio przenosi się na wzrost wielkości parcia gruntu na budowlę w nim zagłębioną. Według aktualnego stanu wiedzy [3-8, 10, 11] przystość tego parcia zależy w głównej mierze od spodziewanego zagęszczenia gruntu i jego modułu odkształcenia, co oznacza w analizie numerycznej istotny wpływ zastosowanego modelu konstytutywnego dla gruntu. Niezależnie od wymienionych czynników wpływ na wielkość dodatkowego parcia na terenie górniczym wywierają również inne czynniki, takie jak: geometria przegrody i głębokość posadowienia ścianki, istnienie lub nieistnienie sąsiedniej przegrody oraz jej odległość od analizowanej przegrody, obciążenie i nachylenie naziomu, uwarstwienia i grubość warstw gruntu, wartość współczynnika tarcia gruntu o ściankę, a także wielokrotność przejścia niecki górniczej. W analizach numerycznych zagadnień związanych z parciem gruntu dodatkowo ważnymi czynnikami będzie geometria modelu obliczeniowego. Analizując wzrost parcia na zagłębioną budowlę, wyróżnić trzeba budowle, na które parcie gruntu działa jednostronnie i nie jest równoważone parciem działającym z drugiej strony oraz budowle, na które działa ono dwustronnie. Pierwszy przypadek dotyczy różnego rodzaju ścian oporowych i przyczółków mostowych, drugi natomiast np. bocznych ścian tuneli, zbiorników podziemnych i fundamentów oraz ścian budynków. W pierwszym przypadku zwiększające się parcie jest ograniczone możliwością przesuwu bądź obrotu budowli i jej odkształceniem. W obu zaś przypadkach stan naprężenia w gruncie jest ograniczony możliwością wystąpienia w nim stanu plastycznego. Oznacza to, że nacisk gruntu na przeszkodę nie może przekroczyć nacisku wynikającego z przyjętego warunku plastycznego, natomiast wartość całkowitego parcia nie może przekroczyć parcia biernego.



Rys. 4. Zasady określania naporu gruntu na terenie górniczym wg [7]

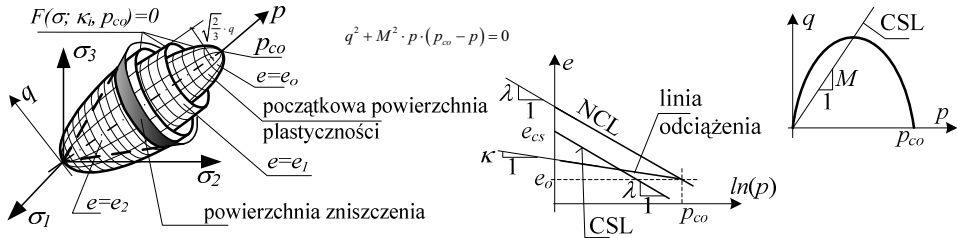
Rys. 5. Schemat określania dodatkowego naporu gruntu p_g w praktyce projektowej

W teorii budownictwa na terenach górniczych, w większości metod obliczania parcia gruntu przyjmuje się, że w przypadku poziomych odkształceń zagęszczających podłoże napór gruntu na pionową przeszkodę zależy przede wszystkim od wielkości obszaru f , w którym następuje zaburzenie procesu odkształcenia gruntu swobodnego (niezabudowanego). W literaturze wielkość tę szacuje się w sposób pokazany na rys. 4. Wartość naporu uzależnia się również od sytuacji pokazanych na rys. 4, uwzględniając tzw. efekt przesłaniania. Podstawą tego oszacowania były badania wykonane w latach 60. w ZSRR na ścianach zagłębionych tylko do głębokości 0.7m oraz założenie istnienia tzw. klina odłamu przed przegrodą. Późniejsze polskie badania laboratoryjne nie obejmują głębszych posadowień obiektów. W obliczeniach projektowych przyjmuje się, że podawane zależności dla oszacowania p_g dla posadowienia płytkiego są ważne również dla posadowienia głębszego bez ograniczenia jego wielkości. Zatem wykres dodatkowego naporu gruntu na ścianę znajdującą się na terenie podlegającym wpływom poziomego zagęszczania składa się z parcia czynnego p_a oraz dodatkowego naporu p_g lub p' lub p'' wywołanego w zależności od sytuacji, poziomym zagęszczeniem gruntu (rys. 4), gdzie H_o – jest pewną wielkością wyznaczaną na podstawie rozkładu naprężeń ścinających w podłożu fundamentu przy $d=0$. Sumaryczny napór nie może jednak przekroczyć wartości parcia biernego p_b (rys. 5). Metoda ta z niewielką korektą jest obecnie włączona do wytycznych [4], w których wartość parcia całkowitego obliczamy jako $p=p_a+p_g$ (rys. 5).

4. STOSOWANE MODELE KONSTITUTYWNE I MODEL OBLICZENIOWY

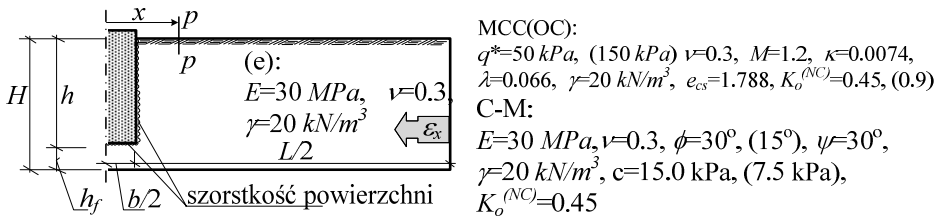
Jak wspomniano wcześniej, na terenie górniczym przyrost parcia zależy w głównej mierze od spodziewanego zagęszczenia gruntu i jego modułu odkształcenia, co oznacza w analizie numerycznej istotny wpływ zastosowanego modelu konstytutywnego dla gruntu. W pracy analizę numeryczną przeprowadzono metodą MES. W obliczeniach wykorzystano trzy rodzaje modeli konstytutywnych dla gruntu: powszechnie znane modele: sprężysty (e) i Coulomba-Mohra (C-M) przy stowarzyszonym i niestowarzyszonym prawie płynięcia oraz trzeci, mocniej rozbudowany, model stanu krytycznego Modified Cam-Clay (MCC).

Obliczenia wykonano w systemie ABAQUS¹⁾. Modele stanu krytycznego zbudowane są na fundamentalnym założeniu istnienia otwartej powierzchni stanu krytycznego nienależącej do rodziny zamkniętych powierzchni plastyczności. Są to modele o wzmocnieniu izotropowym i stowarzyszonym prawie płynięcia. Schematyczny widok powierzchni plastyczności w przestrzeni naprężeń głównych oraz jej równanie pokazano na rys. 6.



Rys. 6. Powierzchnie plastyczności i powierzchnia stanu krytycznego (zniszczenia) w przestrzeni naprężeń głównych modelu Modified Cam-Clay

W pracy analizowano wpływ niektórych, wybranych, czynników na wielkość i zmianę parcia gruntu w warunkach poziomego zagęszczania podłoża. Rozpatrzono mianowicie: wpływ zagłębienia pionowej przegrody, wpływ stanu gruntu i rodzaju gruntu, wpływ wielkości prekonsolidacji oraz wpływ intensywności poziomego zagęszczania gruntu.



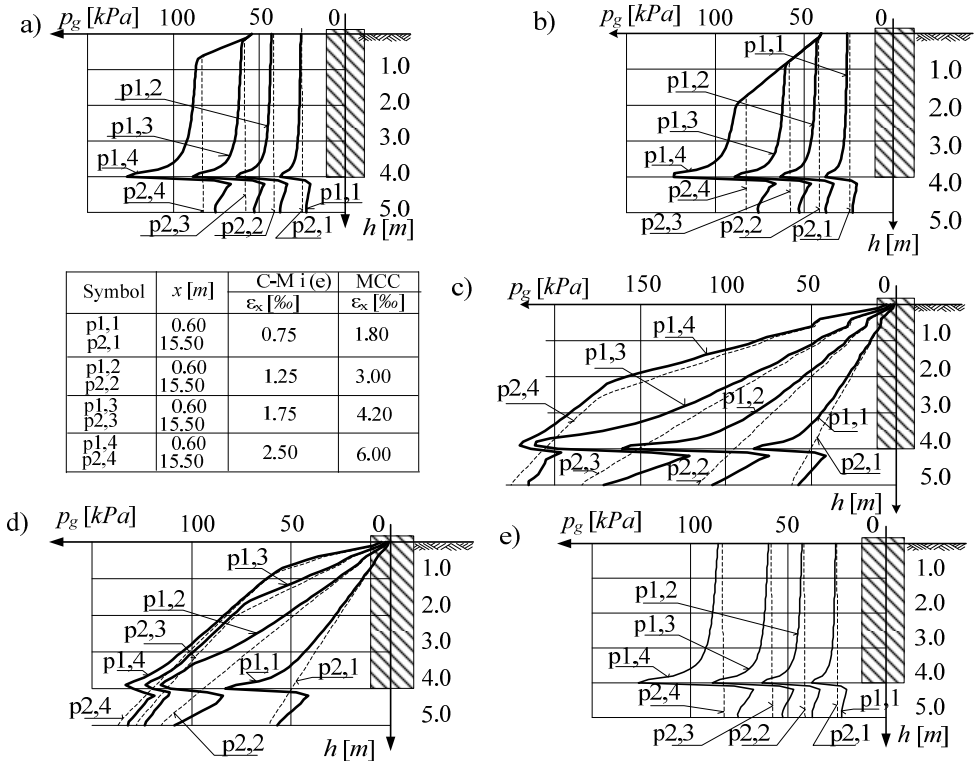
Rys. 7. Schemat modelu obliczeniowego i przyjęte do obliczeń parametry materiałowe

Do obliczeń numerycznych zbudowano model, którego połowę pokazano na rys. 7, gdzie przyjęto $L=30\text{m}, b=1\text{m}, H=5\text{m}, h=1,2,3 \text{ i } 4\text{m}$. Założono, że długość przeszkody jest większa niż 5.0 m i możliwe jest wykorzystanie płaskiego stanu odkształcenia (PSO). Przeszkodę modelowano jako sztywną, sprężystą. Parametry materiałowe gruntu dla poszczególnych modeli konstytutywnych oraz schemat modelu pokazano na rys. 7. Współczynniki tarcia pomiędzy gruntem a pionową ścianą wynosiły: $\rho=0.4$ i $\rho=0.0$, a obciążenie naziemu $p=0 \text{ kPa}$. Do budowy modelu MES użyto czterowzłowych, kwadratowych elementów PSO o wymiarach $10 \times 10 \text{ cm}$.

5. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

Wybrane wyniki przeprowadzonych analiz przedstawiono na rys. 8, 9 i 10. Położenie przekroju pionowego $p-p$ obszaru, w którym przedstawiono wykresy parcia gruntu, określano odległością $x \text{ [m]}$ mierzoną od osi ściany (rys. 7).

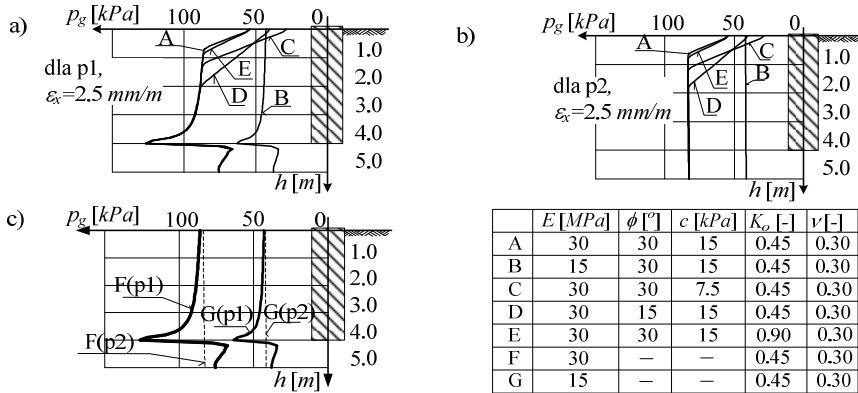
¹⁾ Obliczenia numeryczne wykonano w ACK CYFRONET, Kraków, w ramach grantu MNiSW/SG13700/PŚląska/060/2010.



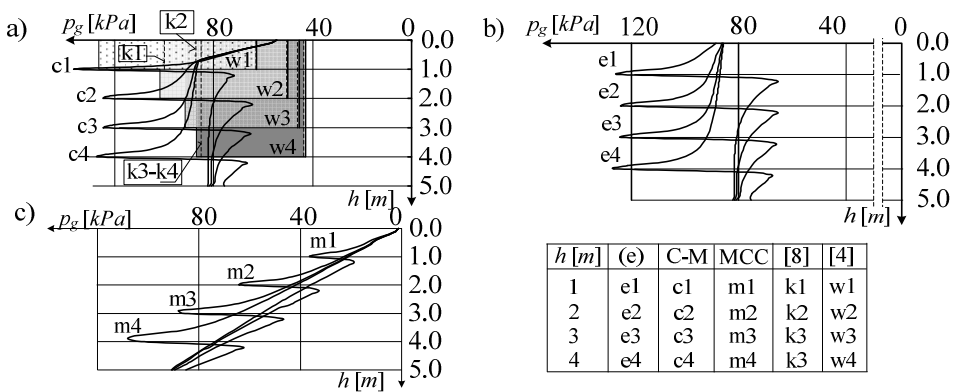
Rys. 8. Rozwój zmian rozkładu dodatkowego naporu gruntu p_g na ścianę o $h=4m$ w miarę wzrostu poziomego odkształcenia ε_x gruntu: a) model C-M dla $\phi=30^\circ$, b) model C-M dla $\phi=15^\circ$, c) model MCC dla $q^*=150$ kPa, d) model MCC dla $q^*=50$ kPa, e) model (e)

Na rysunkach 8, 9, 10 przedstawione są wyniki dla przekroju $p1$ przy $x=0.6m$ oraz dla $p2$ przy $x=15.5m$. Na rys. 8 dla ściany zagłębionej do poziomu $h=4m$ przedstawiono narastanie naporu gruntu na ścianę, w miarę jak wzrasta odkształcenie podłoża od wartości $\varepsilon_x=0$ do $\varepsilon_x=2.5$ mm/m dla modeli: C-M i (e) oraz od $\varepsilon_x=0$ do $\varepsilon_x=6.0$ mm/m dla modelu MCC. Na rys. 8a podano wyniki dla modelu C-M przy $\phi=30^\circ$, a na rys. 8b dla modelu C-M przy $\phi=15^\circ$. Wyniki dla modelu MCC w zależności od obciążenia prekonsolidacji $q^*=150$ kPa lub $q^*=50$ kPa zamieszczono odpowiednio na rysunkach 8c i 8d.

Na rys. 9 przedstawiono końcowe wykresy naporu gruntu na ścianę pionową $h=4m$ w zależności od wartości niektórych parametrów materiałowych dla modeli C-M (rys. 10a, b) i (e) (rys. 10c), a na rys. 10 - zmianę naporu gruntu na pionową ścianę w zależności od zagłębienia ściany. Jako tło dla uzyskanych wyników podano możliwe obszary oszacowań parcia gruntu na ścianę na podstawie metod podawanych w literaturze i omówionych w pracy w rozdziale 3.



Rys. 9. Rozkład dodatkowego naporu gruntu p_g na ścianę o $h=4m$ w zależności od wartości parametrów modelu C-M i modelu (e) dla $\varepsilon_x=2.5$ mm/m



Rys. 10. Zestawienie naporu gruntu na ścianę w zależności od zagłębienia ściany na tle oszacowania naporu wg [4] i [7]: a) dla modelu C-M, b) dla modelu (e), c) dla modelu MCC

6. PODSUMOWANIE

Analiza wyników wykonanych badań numerycznych pozwoliła na stwierdzenie, że intensywność dodatkowego parcia p_g pojawiającego się na terenie górniczym mocno zależy od wartości modułu odkształcenia E gruntu oraz intensywności odkształcenia poziomego ε_x . Pozostałe parametry wytrzymałościowe gruntu, tj. kąt tarcia wewnętrznego ϕ i spójność c , mają wpływ znacznie mniejszy. Równie mocno wielkość parcia p_g zależy od historii obciążenia gruntu w przeszłości. Ten sam grunt obciążony wcześniej do wartości raz 50 kPa, a drugi raz do 150 kPa, generuje wzrost ekstremalnej wartości parcia p_g prawie o 67%, czyli w analizowanym przypadku parcie wzrasta z wartości 133 kPa do wartości 220 kPa. Odnosząc poziom otrzymywanego parcia dodatkowego do wartości określanych metodami inżynierskimi, widać, że w analizie numerycznej zasadniczym czynnikiem regulującym wartości parcia p_g jest przyjęty model konstytutywny materiału (rys.10). Przyjmując nawet model sprężysto-plastyczny Coulomba-Morha, rozbieżności w otrzymywanych wynikach są znaczne (rys. 10).

LITERATURA

1. Dembicki E.: *Parcie, odpór i nośność gruntów*. Warszawa: Arkady, 1979.
2. Fedorowicz, J.: *Zagadnienie kontaktowe budowla – podłoże gruntowe. Część II: Kryteria tworzenia i oceny modeli obliczeniowych układów konstrukcja budowlana – podłoże górnicze*. Zesz. Nauk. Pol. Śl., s. "Budownictwo", nr 1805, z. 114. Gliwice 2008.
3. Fedorowicz J., Lubecka M.: *Problemy numerycznej analizy naporu gruntu na budowlę zagłębioną na terenie górniczym*. 50 Sympozjon „Modelowanie w mechanice”, 26.02-02.03 2011, Wisła 2011.
4. *Instrukcje, Wytyczne, Poradniki 416/2006, Projektowanie budynków na terenach górniczych*. Wydawnictwo ITB, Warszawa 2006.
5. Kłosek K.: *Wpływ poziomych odkształceń podłoża górniczego na konstrukcje podporowe*. Praca doktorska. Politechnika Warszawska, IBDiM, Warszawa 1979.
6. Kowalczyk A.: *Wpływ rozpełzania podłoża na pionowe ściany zagłębione w gruncie*. Praca doktorska. Katowice: Główny Instytut Górnictwa, 1974.
7. Król W.: *Zabezpieczenie budowli przed uszkodzami górniczymi*. W: *Budownictwo Betonowe*, t.12, cz.1. Warszawa: Wyd. Arkady, 1970.
8. Kwiatek J.: *Parcie na budowlę gruntu zagęszczanego poziomo*. „Inżynieria i Budownictwo” 1978, nr 6, s. 212-215.
9. Lubecka M.: *Metody oceny naporu gruntu na ścianę pionową na terenie górniczym*. W: *XI konferencja naukowa doktorantów Wydziałów Budownictwa*. Szczyrk 2010, s. 105-112.
10. PN-83/B-03010 - *Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*.
11. Rosikoń A.: *Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych uszkodzami górniczymi*. Warszawa: WKŁ, 1978.
12. *Wytyczne techniczno-budowlane projektowania i wykonywania obiektów mostowych na terenach eksploatacji górniczej*. Opracowanie IDiM Pol. Śl. (pod red. A. Rosikonnia). Warszawa: WKiŁ, 1977.

NUMERICAL EVALUATION OF LOAD ACTING ON WALLS EMBEDDED IN THE SOIL IN MINING AREA

Summary. When the soil has not been subjected to the impact of mining the phenomenon of the lateral earth pressure has already been widely recognized. The subterranean exploitation of mines has a negative impact on the surface and the structures erected on it, which results in e.g. displacements of an orogen. In such situations values of the lateral earth pressure depend upon number of variables including soil type, soil condition and geometrical parameters of the construction. This paper presents the results of numerical analysis of the influence of these factors on the value of the lateral earth pressure caused by horizontal deformations of subsoil.