

Szymon DAWCZYŃSKI*
Politechnika Śląska

0 NUMERYCZNYM MODELOWANIU WSPÓŁPRACY BUDYNKU Z PODŁOŻEM GÓRNICZYM

Streszczenie. W pracy przedstawiono ogólną problematykę numerycznego modelowania współpracy budynku i podłoża gruntowego na terenach objętych podziemną eksploatacją górnictwem. Szczegółowo rozważono dobór sprężysto – plastycznego modelu materiałowego dla gruntu, betonu i elementów kontaktowych.

ON NUMERICAL MODELLING OF STRUCTURE AND MINING SUBSOIL INTERACTION

Summary. The paper presents general problem of numerical modelling of interaction of structure and subsoil in regions subjected to subterranean mining excavation. The assortment of the elasto – plastic material model of soil, concrete and contact elements has been considered in detail.

1. Wprowadzenie

Ocena i analiza wzajemnego oddziaływania budynku i podłoża gruntowego są zagadnieniami bardzo złożonymi i stosunkowo skomplikowanymi. Wynika to głównie z faktu, iż zarówno grunt, jak i beton (żelbet) są materiałami w dużej mierze niejednorodnymi i wielofazowymi. Skala trudności analizy współdziałania tych dwóch ośrodków rośnie niewspółmiernie, gdy budynek posadowiony jest na podłożu górnictwem (ze względu na dodatkowe obciążenia). Przez pojęcie podłoża górnictwem rozumie się podłoże podlegające wpływom podziemnej eksploatacji górnictwem. W Polsce można wyróżnić dwa główne obszary dotknięte taką eksploatacją. Są to:

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Marian Kawulok.

- Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW),
- Legnicko – Głogowski Okręg Miedziowy (LGOM).

Oczywiste jest, iż w codziennej praktyce inżynierskiej od wielu lat stosowane są różnego rodzaju modele uproszczone, odwzorowujące w lepszym lub gorszym stopniu charakter współpracy budynku z deformującym się podłożem [6]. W efekcie uogólnionej analizy takiego zjawiska częstokroć otrzymuje się rezultaty obarczone dużym błędem. Pośród różnych stosowanych modeli obliczeniowych wydaje się, że w zależności od stopnia zaawansowania można wyróżnić cztery główne grupy (zgodne z [4]):

- Dwuczęściowa, rozdzielna analiza, w ramach której osobno rozważa się statykę budowli (przy założeniu o wyidealizowanych podporach), a wyznaczonymi w ten sposób siłami wewnętrznymi obciąża się fundament i podłoże.
- Uproszczona analiza liniowo-sprężysta – związek konstytutywny dla gruntu i dla betonu określony jest jako liniowo-sprężysty, a ponadto grunt modelowany jest np. jako podłoże Winklera.
- Analiza liniowo-sprężysta – podstawowym tutaj założeniem (oprócz liniowo-sprężystych własności fizycznych wszystkich materiałów) jest modelowanie podłoża gruntowego jako półprzestrzeni.
- Analiza z zastosowaniem metody elementów brzegowych (MEB) lub metody elementów skończonych (MES) – za pomocą tych metod uzyskuje się bardzo dużą swobodę modelowania materiałowego (zarówno założenia teorii sprężystości, jak i teorii plastyczności czy nawet teorii lepkoplastyczności są stosunkowo łatwo aplikowalne numerycznie). Oczywiście, posługując się dokładniejszym modelem, można otrzymać wiarygodniejsze wyniki (lepiej odwzorowujące rzeczywisty charakter współpracy budynku z podłożem).

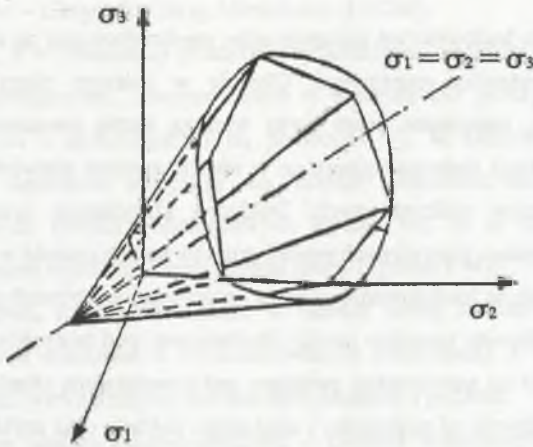
Biorąc pod uwagę aktualny stan rozwoju metod numerycznych oraz możliwości obliczeniowe coraz szybszych komputerów, wydaje się, że w najbliższych latach modele MEB/MES będą wypierać wszelkie starsze rozwiązania.

Przystępując do modelowania numerycznego współpracy budynku z podłożem, należy zdefiniować podstawowe dane wejściowe, tj. schemat statyczny konstrukcji, obciążenie – zarówno działające na budynek „od góry” (śnieg, wiatr, ciężar własny itp.), jak i „od dołu” (czyli obciążenia pochodzące od zmiany stanu naprężeń i odkształceń w deformującym się podłożu górnym), a także parametry modelu lub modeli materiałowych uwzględnianych w obliczeniach. Poniżej przedstawiono krótkie charakterystyki poszczególnych sprężysto – plastycznych modeli materiałowych.

2. Modelowanie podłoża górniczego

W wyniku rozwoju budownictwa nastąpiło silne zapotrzebowanie na stworzenie modelu obliczeniowego dla ośrodka gruntowego. Obecnie w dalszym ciągu powstają nowe, dokładniejsze modele, opisywane przez coraz większą liczbę parametrów (tym samym trudniejsze do weryfikacji doświadczalnej), co w efekcie zamiast ułatwień powoduje wręcz komplikację algorytmów obliczeniowych. Dokładną klasyfikację oraz charakterystykę poszczególnych sprężysto – plastycznych modeli gruntów można znaleźć w [1].

Skupiając się jednak na modelowaniu podłoża gruntowego na terenach górniczych, należy wziąć pod uwagę całkowite przejście niecki obniżeniowej pod budynkiem. Powstawanie i przesuwanie się niecki na powierzchni związane jest z podziemną eksploatacją wyrobiska górniczego i zależy głównie od głębokości i miąższości pokładu oraz szybkości prowadzenia robót. W początkowej fazie kształtowania się niecki obniżeniowej mamy do czynienia z powstawaniem rozluźniających odkształceń poziomych (rozpełzanie) i wypukłej krzywizny terenu. Rozpatrując problem zabezpieczenia budynku na powyższe wpływy, zazwyczaj przyjmuje się dwa oddzielne liniowo-sprężyste modele gruntu [2]. Dla określenia wpływu rozpełzania przyjmuje się, iż bezpośrednio pod fundamentem zalega rozluźniana warstwa podłoża, z której poziome siły przekazywane są na budynek. Natomiast wpływ krzywizny terenu zostaje wyznaczony poprzez funkcję ugięcia szeregu sprężyn symbolizujących podłoże Winklera. Na podstawie już tylko tego przykładu można stwierdzić, że oba te uproszczone modele (powszechnie stosowane w praktyce inżynierskiej) nie mogą w pełni odwzorowywać złożoności zjawiska współpracy budynku z podłożem górniczym. Dodatkowo, w trakcie przyrostu rozluźniających odkształceń poziomych może zostać przekroczona granica plastyczności w gruncie i powstaną odkształcenia trwałe. Stąd też wydaje się za słuszne wprowadzenie do opisu gruntu modeli sprężysto–plastycznych. Najbardziej podstawowymi modelami z tej grupy są modele Coulomba – Mohra i Druckera – Pragera (oba sprężysto-idealnie plastyczne). Interpretacją przestrzenną powierzchni plastyczności tych modeli są odpowiednio dla modelu Coulomba – Mohra ostrosłup o podstawie sześciokąta, a dla modelu Druckera – Pragera stożek (rys.1). Po wykonaniu przekroju w płaszczyźnie dewiatorowej (tj. prostopadłej do osi hydrostatycznej) otrzymano sześciobok różnokątny (model Coulomba – Mohra) i okrąg (model Druckera – Pragera).



Rys. 1. Powierzchnie plastyczności modelu Coulomba – Mohra i Druckera – Pragera
 Fig. 1. Yield surface of the Coulomb – Mohr model and Drucker – Prager model

Powyższe powierzchnie plastyczności można zapisać wzorami:

- powierzchnia Coulomba – Mohra:

$$F(p', q, \theta) = p' \sin \phi - \frac{1}{3} q (\sqrt{3} \cos \theta + \sin \theta \sin \phi) + \cos \phi = 0 \quad (1)$$

- powierzchnia Druckera – Pragera:

$$F(p', q, \theta) = \alpha \cdot p' - q + \beta = 0 \quad (2)$$

gdzie: p' – naprężenie średnie,

q – intensywność naprężenia,

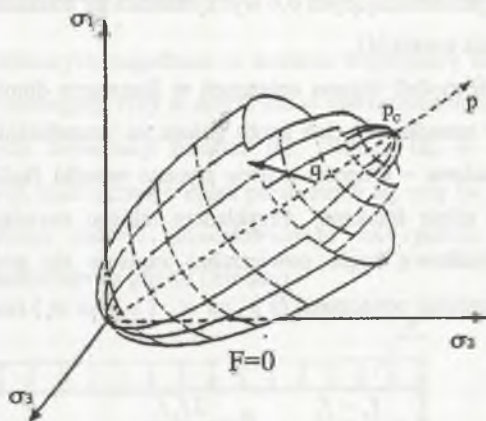
θ – kąt Lodego,

ϕ – kąt tarcia wewnętrzznego,

c – współczynnik kohezji,

$$\alpha = \frac{6 \sin \phi}{3 - \sin \phi}, \quad \beta = \frac{6c \cos \phi}{3 - \sin \phi} \quad (3)$$

Innym modelem gruntu, który jest obecnie bardzo często stosowany w obliczeniach numerycznych MES, jest model Modified Cam – Clay (MCC). Należy on do grupy modeli sprężysto–plastycznych o izotropowym wzmocnieniu. Na rysunku 2 przedstawiono elipsoide będącą przestrzenną interpretacją powierzchni plastyczności tego modelu, a poniżej podano równanie tej powierzchni (4).



Rys. 2. Powierzchnia plastyczności modelu Modified Cam – Clay

Fig. 2. Yield surface of the Modified Cam – Clay model

$$F(p', q) = q^2 + \alpha^2 \cdot p' \cdot (p' - p'_c) = 0 \quad (4)$$

gdzie: p'_c – ciśnienie prekonsolidacji, α – parametr materiałowy,

pozostałe oznaczenia jak we wzorach (1) i (2).

Opis modelu Modified Cam – Clay sprowadza się do zdefiniowania pięciu stałych materiałowych [5], stąd też popularność tego modelu w różnych geotechnicznych aplikacjach numerycznych MES (m.in. programy CRISP czy Z_Soil).

3. Modelowanie betonu

Oprócz doboru modelu obliczeniowego ośrodka gruntowego najważniejszym etapem numerycznego modelowania współpracy budynku z podłożem górnym jest przyjęcie właściwego modelu materiałowego dla betonu. W wyniku podziemnej eksploatacji górniczej na fundamenty budynku mogą działać zarówno siły ściskające, jak i rozciągające. Ważne, więc jest, by tak dobrać model, aby zarówno w strefie rozciąganej, jak i o wiele większej strefie ściskanej, kryterium zniszczenia jak najwierniej odpowiadało rzeczywistej pracy betonu pod obciążeniem. Jeżeli w rozpatrywanym układzie budynek – podłoże górnicze grunt został zamodelowany jako materiał sprężysto–plastyczny, to konsekwencją takiego podejścia będzie zamodelowanie betonu jako materiału również sprężysto–plastycznego. Tym bardziej

że przy naprężeniach przekraczających 0,6 wytrzymałości na ściskanie można zaobserwować w betonie odkształcenia trwałe [4].

Wśród wielorakich modeli betonu opisanych w literaturze dominują głównie modele z grupy „cap” (modele nasadkowe). Ich istota polega na uzupełnieniu znanych powierzchni granicznych (np. Druckera – Pragera) o dwie styczne nasadki (kuliste lub elipsoidalne) w strefie rozciąganej i silnie ściskanej. Przykładem takiego rozwiązania jest m.in. model Majewskiego [3]. Stożkową część powierzchni zapisuje się podobnie jak dla gruntu równaniem (2) – zmieniając oznaczenia (z p' na σ_m i z q na σ_t) oraz zmieniając parametry materiałowe α i β :

$$\alpha = \frac{f_c - f_t}{f_c + f_t}, \quad \beta = \frac{2f_c f_t}{f_c + f_t} \quad (5)$$

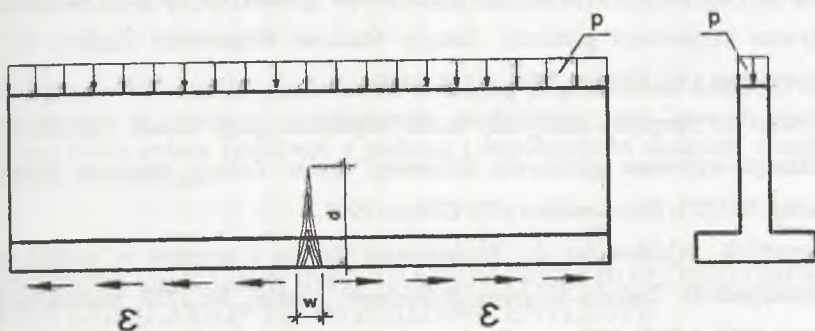
Oczywiście podobnie jak w gruntach tak i w betonie zachodzi konieczność uwzględnienia zmiany rozmiaru powierzchni plastyczności w przestrzeni naprężeń, związanej ze wzmocnieniem lub osłabieniem materiału. Uzyskuje się to poprzez założenie stowarzyszonego lub niestowarzyszonego prawa płynięcia (w modelu Majewskiego prawo stowarzyszone o wzmocnieniu dwuparametrowym).

4. Modelowanie elementów kontaktowych

Wykonując analizę numeryczną współpracy budynku z podłożem gruntowym poddanym deformacjom górnicy, zachodzi konieczność zamodelowania fikcyjnego materiału warstwy kontaktowej pomiędzy dwoma różnymi fizycznie ośrodkami. Warstwę kontaktową powinno modelować się jako elementy o zerowej grubości lub elementy cienkowarstwowe [3]. W przypadku pełnego przechodzenia pod budynkiem górnicy niecki obniżeniowej bardzo ważne jest zastosowanie specjalnych elementów kontaktowych w płaszczyźnie styku dolnej powierzchni fundamentu z gruntem. Ze względu na powstającą krzywiznę terenu oraz rosnące odkształcenia poziome elementy te muszą umożliwić odrywanie fundamentu od podłoża oraz poślizg w płaszczyźnie styku. Dlatego też jako model materiałowy można przyjąć tu jeden z powyższych modeli sprężysto–plastycznych (np. Druckera – Pragera lub Majewskiego).

5. Cel numerycznego modelowania

Jednym z bardziej złożonych zagadnień w analizie współpracy fundamentu i podłoża górniczego jest problem propagacji rysy w murze lub w niezbrojonym elemencie betonowym pod wpływem poziomych deformacji podłoża (ϵ). Dlatego też w literaturze brak jest jednoznacznych propozycji analitycznego opisu parametrów tej rysy (w , d). Temu celowi ma służyć analiza numeryczna modelu przedstawionego na rysunku 3 (uwzględniająca odpowiednie parametry materiałowe gruntu i betonu).



Rys. 3. Przewidywany schemat zastosowania
Fig. 3. Anticipated scheme of application

6. Podsumowanie

Ze względu na ilość potrzebnych parametrów jednoznaczne odwzorowanie rzeczywistej współpracy budynku z podłożem poddanym deformacjom górniczym jest zagadnieniem jak najbardziej aktualnym i trudnym. W analizach numerycznych przy zastosowaniu algorytmów MES lub MEB problem ten sprowadza się przede wszystkim do wyboru modelu obliczeniowego dla poszczególnych materiałów. Należy jednak pamiętać o tym, iż nadmierne skomplikowanie modelu czasami może wpłynąć tylko na wydłużenie czasu obliczeń, a nie zawsze na poprawienie dokładności otrzymanych wyników. Dlatego też obecnie projektant, mając w ręku szeroki wachlarz aplikacji komputerowych wspomagających analizy numeryczne, częstokroć stoi przed koniecznością dokonania doboru optymalnego. Dobór ten dotyczy nie tylko przyjęcia modelu materiałowego (dostosowanego do rodzaju problemu i celu analizy [4]), ale także dopasowania schematu statycznego i działających obciążeń tak, by

cały wzajemnie oddziałujący na siebie układ: budynek – podłoże górnicze był jak najlepszym odzwierciedleniem rzeczywistości i zachodzących w niej zjawisk.

LITERATURA

1. Gryczmański M.: Wprowadzenie do opisu sprężysto–plastycznych modeli gruntów. Studia z zakresu inżynierii nr 40. KILiW PAN, Warszawa 1995.
2. Majewski S.: Niektóre problemy modelowania gruntu na terenach podlegających wpływom eksploatacji górniczej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 1288, Budownictwo z.80, Gliwice 1995, s. 131 – 140.
3. Majewski S.: Sprężysto–plastyczny model współpracującego układu budynek–podłoże poddanego wpływom górniczych deformacji terenu. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 1271, Budownictwo z.79, Gliwice 1995.
4. Majewski S., Ajdukiewicz A.: Modelowanie żelbetu i gruntów w analizie układu budynek/podłoże. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 1230, Mechanika z.115, Gliwice 1994, s. 225 – 231.
5. Sękowski J.: Analiza sprężysto–plastyczna podłoża wzmocnionego poduszką piaskową. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Nr 1288, Budownictwo z.80, Gliwice 1995, s. 77 – 92.
6. Wytyczne projektowania budynków o ścianowym układzie nośnym podlegających wpływowi eksploatacji górniczej. Instrukcja Instytutu Techniki Budowlanej nr 286/89, Warszawa 1989.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek

Abstract

The problem of structure – soil interaction in regions subjected to the mining subsidence is very intricate. In order to solve it properly, the Finite Elements Method in numerical analysis should be involved. When using computational methods it is very important to make an optimal choice of material model for each medium. The elasto – plastic models seem to be reflecting the matter of fact to the greatest extend.