

Dobór i kalibracja praw konstytutywnych dla podłoża obiektów budowlanych

LUCYNA FLORKOWSKA, JAN WALASZCZYK, AGNIESZKA MAJ, JERZY CYGAN

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

W pracy przedstawiono metodykę doboru praw materiałowych dla podłoża budowlanego opracowaną pod kątem modelowania numerycznego. Zawarta w pracy problematyka związana jest z symulacją numeryczną oddziaływania podziemnej eksploatacji górniczej na obiekty budowlane. W zagadnieniach tego typu prawidłowe określenie właściwości podłoża ma szczególnie istotne znaczenie, z uwagi na fakt, że generowane przez procesy eksploatacji górniczej deformacje gruntu stanowią źródło dodatkowych obciążeń budowli.

Dobór i kalibrację modelu materiałowego omówiono na dwóch przykładach – piaskowca oraz gliny piaszczystej. Przedstawiono także analizę wpływu wybranych wartości parametrów materiałowych na wyznaczanie stanu naprężenia w gruncie pod ławą fundamentową.

Słowa kluczowe: mechanika materiałów geologicznych, mechanika skał, mechanika gruntów, modelowanie numeryczne

1. Wstęp

Prawidłowe posadowienie ma podstawowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa obiektu budowlanego (Rybak i in., 2009). W tym kontekście właściwe rozpoznanie podłoża i określenie jego parametrów fizycznych (głównie wytrzymałościowych) stanowi istotny element procesu projektowania a także wszelkich analiz dotyczących bezpieczeństwa istniejących już obiektów budowlanych. Trafne określenie właściwości podłoża ma bowiem zasadnicze znaczenie dla prawidłowego posadowienia obiektu.

Szczególną grupę zagadnień stanowią problemy, w których podłoże budowli ulega deformacjom, na skutek różnego typu procesów. W tym przypadku podłoże, którego rolą jest przejmowanie obciążeń z konstrukcji, samo staje się dla budowli źródłem dodatkowych oddziaływań. Z taką właśnie sytuacją mamy do czynienia w przypadku budowli posadowionych na terenach podlegających oddziaływaniu eksploatacji górniczej. Wywołane procesami eksploatacji deformacje górotworu stanowią zagrożenie dla istniejącej na terenach górniczych zabudowy i infrastruktury (Brząkała, 1998; Florkowska i in., 2000; Florkowska, 2001, 2010A).

Analiza oddziaływania eksploatacji górniczej na obiekty budowlane, prowadzona zarówno w kontekście ochrony istniejącej zabudowy, jak i w kontekście projektowania nowych obiektów, często opiera się na modelowaniu matematycznym (Florkowska, 2010B). Częścią modelu matematycznego rozważanego zagadnienia jest model materiałowy podłoża. Model ten powinien w możliwie dokładny sposób opisywać zachowanie się gruntów i skał tworzących warstwy podłoża obiektu. Aby spełniony został powyższy warunek konieczne jest prawidłowe rozpoznanie stanu rzeczywistego.

2. Rozpoznanie podłoża

Pierwszym etapem rozpoznania podłoża obiektu budowlanego jest zgromadzenie informacji na temat warunków geologicznych. Dane te dostarczają podstawowych wiadomości na temat spodziewanego rodzaju

gruntów, układu warstw, poziomu wód gruntowych i występowania ewentualnych zaburzeń tektonicznych. Informacje o geologii obszaru lokalizacji rozważanego obiektu mogą także świadczyć o możliwości wystąpienia ewentualnych problemów geotechnicznych. Jeśli analizowany obiekt posadowiony jest na terenie górniczym lub terenie zagrożonym innego typu ruchami masowymi gruntów, konieczne jest zgromadzenie możliwie szczegółowych danych na temat prognozowanych deformacji terenu oraz historii ruchów górotworu na danym obszarze.

Szczegółowe rozpoznanie podłoża przeprowadzane jest najczęściej poprzez wykonanie odpowiedniej liczby otworów badawczych. Odwierty te mają na celu wyznaczenie profilu geologicznego i geotechnicznego podłoża oraz pobranie próbek dla wykonania badań laboratoryjnych. Niezbędnym elementem prawidłowego rozpoznania jest w tym przypadku wiedza ekspercka, która pozwoli, na podstawie ogólnych danych geologicznych, ocenić zakres niezbędnych badań, przyjąć wyjściowe postacie praw materiałowych oraz opracować program niezbędnych badań laboratoryjnych.

Dobłą metodą określania właściwości podłoża są też badania prowadzone *in situ*. Pomiary deformacji gruntu poddawanego próbnym obciążeniami pozwalają obserwować zachowanie się podłoża, jako całości. Ze względu na rozważane zagadnienie tego rodzaju rozpoznanie dostarcza cennych informacji, jest jednak stosunkowo rzadko stosowane, głównie z uwagi na dość wysokie koszty.

3. Przykłady kalibracji praw materiałowych przyjmowanych dla podłoża

Rozpoznanie podłoża obiektu budowlanego prowadzi do sformułowania jego modelu materiałowego, stanowiącego element modelu matematycznego całego zagadnienia współpracy fundamentu z podłożem. Sformułowanie modelu materiałowego rozumiemy w tym przypadku jako przyjęcie postaci równań opisujących zachowanie się ośrodka gruntowego lub skalnego w określonych warunkach oraz wyznaczenie wartości parametrów tych równań. Ilustrację tego procesu stanowią zamieszczone poniżej przykłady. Przykłady te zaczerpnięte zostały z analiz prowadzonych dla potrzeb określania wpływu eksploatacji górniczej na budynki (Florkowska, 2010B).

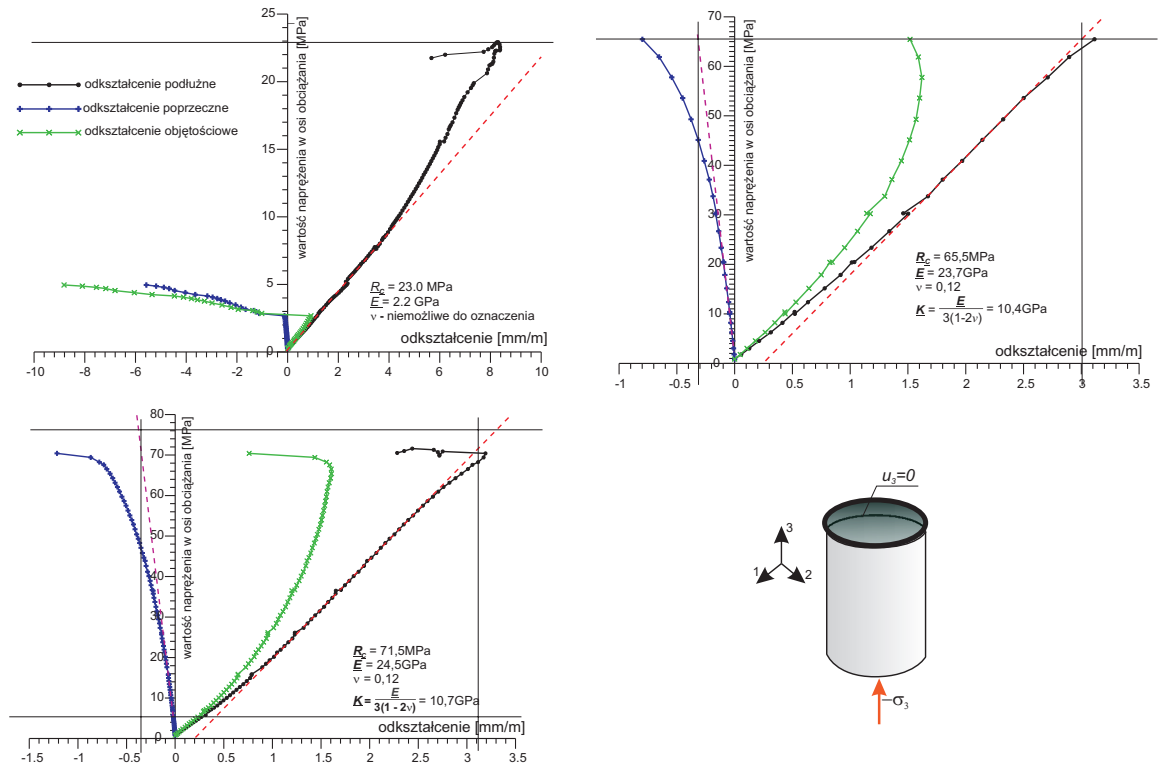
3.1. Określenie modelu materiałowego dla piaskowca

Poddany analizie piaskowiec pobrany został z odwiertu badawczego wykonanego w celu rozpoznania podłoża gruntowego obiektu narażonego na oddziaływanie eksploatacji górniczej. Na omawianym terenie strop piaskowca znajdował się już na głębokości 6 m pod powierzchnią gruntu. Pobrane podczas wykonywania odwiertów badawczych próbki poddano badaniom laboratoryjnym w zakresie eksperymentów: jednoosiowego i trójosiowego ściskania.

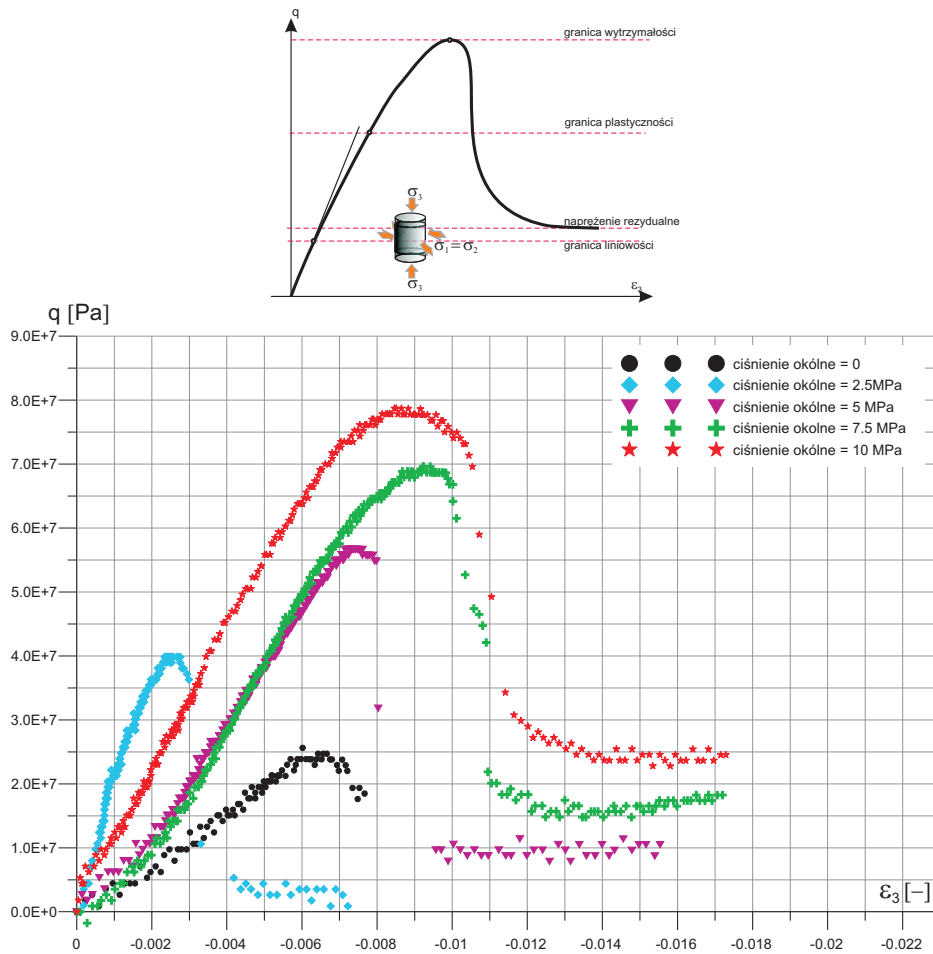
Na podstawie wyników jednoosiowego ściskania wyznaczono podstawowe parametry mechaniczne piaskowca: moduł sprężystości wzdłużnej E , współczynnik Poissona ν oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie R_c (Gustkiewicz i Nowakowski, 2004; Thiel, 1980). Wyniki trzech eksperymentów jednoosiowego ściskania przedstawiono na rysunku 1. Widoczne na rysunku wykresy przedstawiają zależność naprężenia (normalnego do powierzchni podstawy próbki w kierunku osi obciążania) od odkształcenia (liniowego w kierunku tworzącej oraz w kierunku promienia podstawy próbki). Widoczny jest znaczny rozrzut wyników, charakterystyczny dla badań prowadzonych na materiałach geologicznych. Dwa podstawowe źródła tego rodzaju rozbieżności to naturalna różnorodność materiału oraz naruszenie struktury materiału w trakcie pobierania próbek.

Uzyskane wyniki pozwoliły na określenie podstawowych parametrów materiałowych w zakresie sprężystego zachowania się materiału, kiedy zachowanie to opisane jest prawem Hooke'a. Granicę wejścia materiału w stan plastyczny, jego zachowanie plastyczne oraz granicę zniszczenia wyznaczono na podstawie eksperymentów ściskania trójosiowego, prowadzonych przy różnych wartościach ciśnienia okólnego. Na rysunku 2 przedstawiono zależność intensywności dewiatora naprężenia q od odkształcenia liniowego w osi tłoka ε_3 .

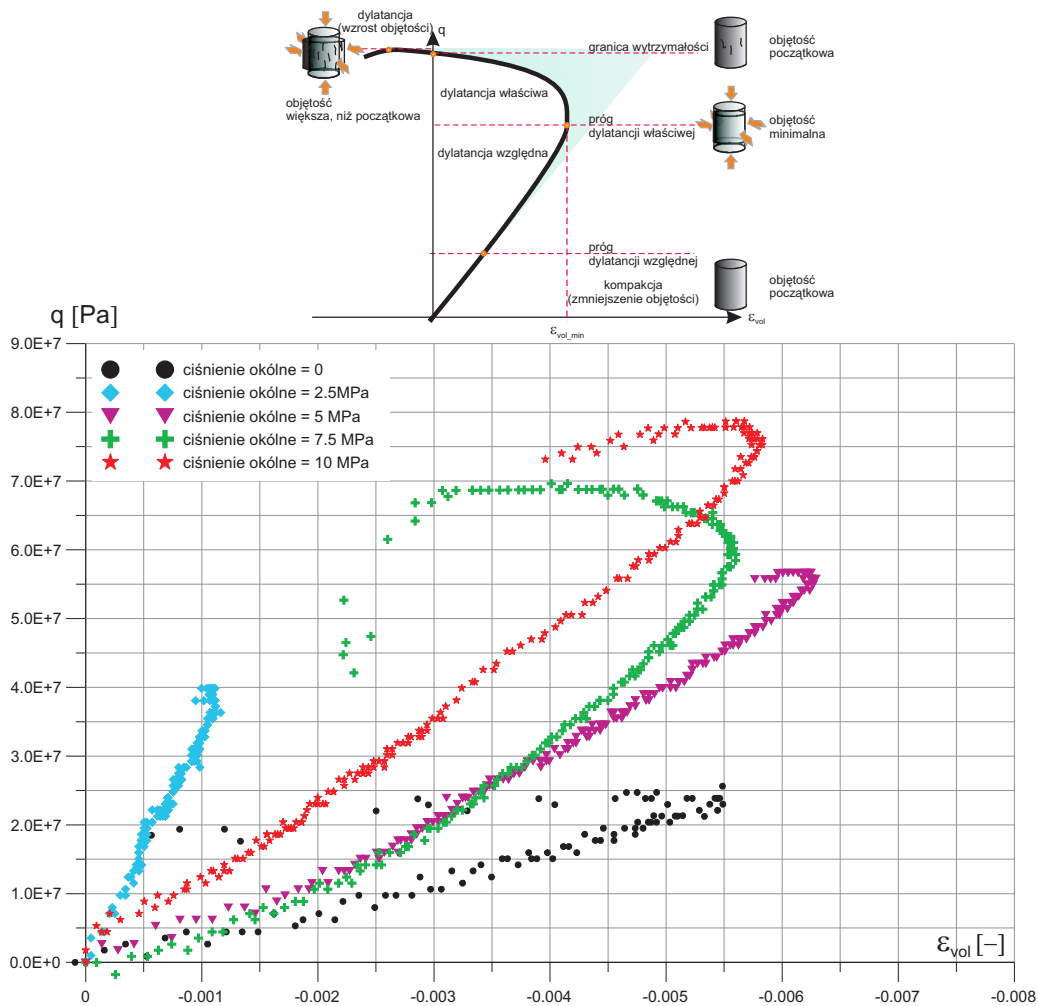
Przedstawiona na rysunku 3 zależność pomiędzy intensywnością naprężenia q a odkształceniem objętościowym ε_{vol} pozwala na określenie progu dylatacji względnej, progu dylatacji właściwej oraz wzrostu objętości. Kompakcyjne i dylatacyjne zmiany objętości pokazano także na wykresie zależności pomiędzy



Rys. 1. Wyniki eksperymentów jednoosiowego ściskania piaskowca



Rys. 2. Wyniki eksperymentów ściskania trójosiowego piaskowca. Zależność intensywności dewiatora napężenia q od odkształcenia liniowego w osi tłoka ϵ_3



Rys. 3. Zależność intensywności naprężenia q od odkształcenia objętościowego ε_{vol}

odkształceniem objętościowym ε_{vol} a odkształceniem osiowym ε_3 (rys. 4). Na rysunku tym widoczny jest obszar wzrostu objętości wywołanej procesami zniszczenia struktury materiału.

Przyjęto, że pozasprężyste zachowanie się omawianego piaskowca opisane zostanie modelem Druckera-Pragera. Model ten sformułowany jest w przestrzeni naprężeń, a zmiennymi są niezmienniki stanu naprężenia: naprężenie średnie p oraz intensywność dewiatora naprężenia q . Ścieżki zachowania się materiału w płaszczyźnie niezmienników p - q przedstawiono na rysunku 5. Wyznaczona na podstawie tych ścieżek powierzchnia zniszczenia materiału pokazana została na rysunku 6.

Spośród trzech postaci modelu Druckera-Pragera, jako najlepiej opisującą badany materiał wybrano postać hiperboliczną, w której przekrój powierzchni plastyczności F płaszczyzną p - q opisuje równanie:

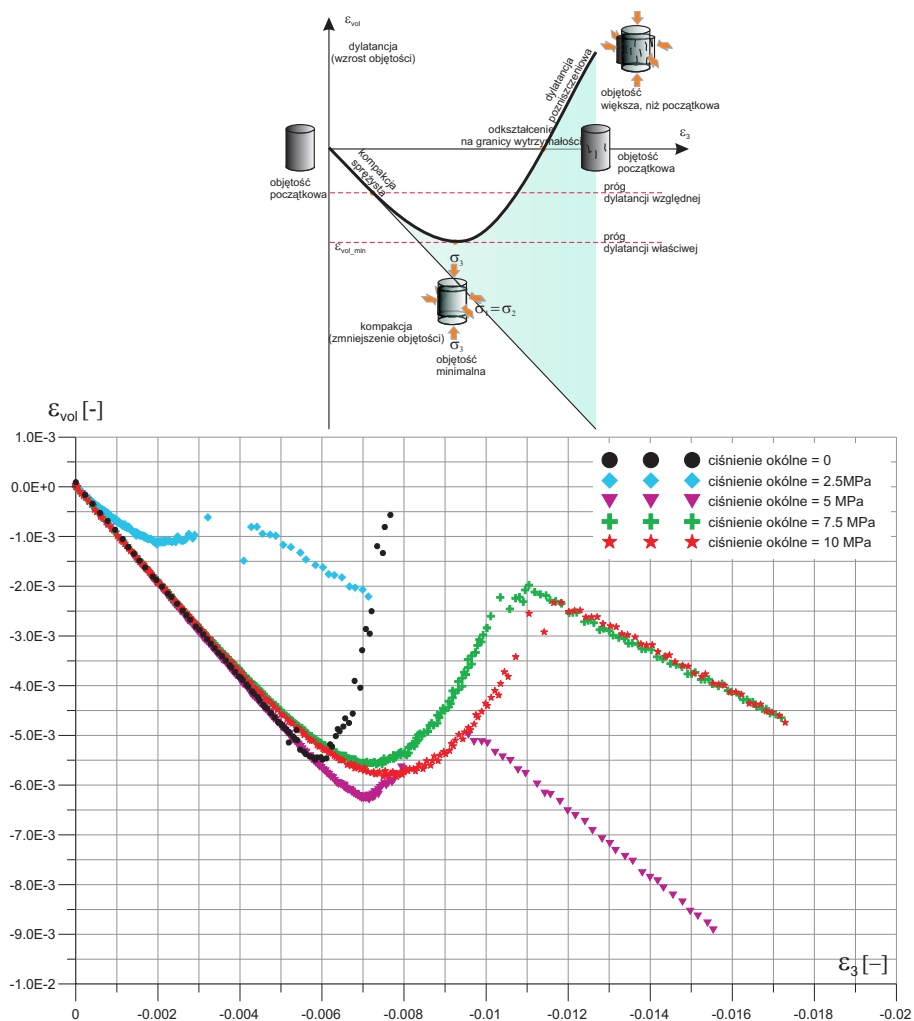
$$F: \sqrt{l_0^2 + q^2} - p \cdot \operatorname{tg} \beta - d$$

Parametrami tego równania są:

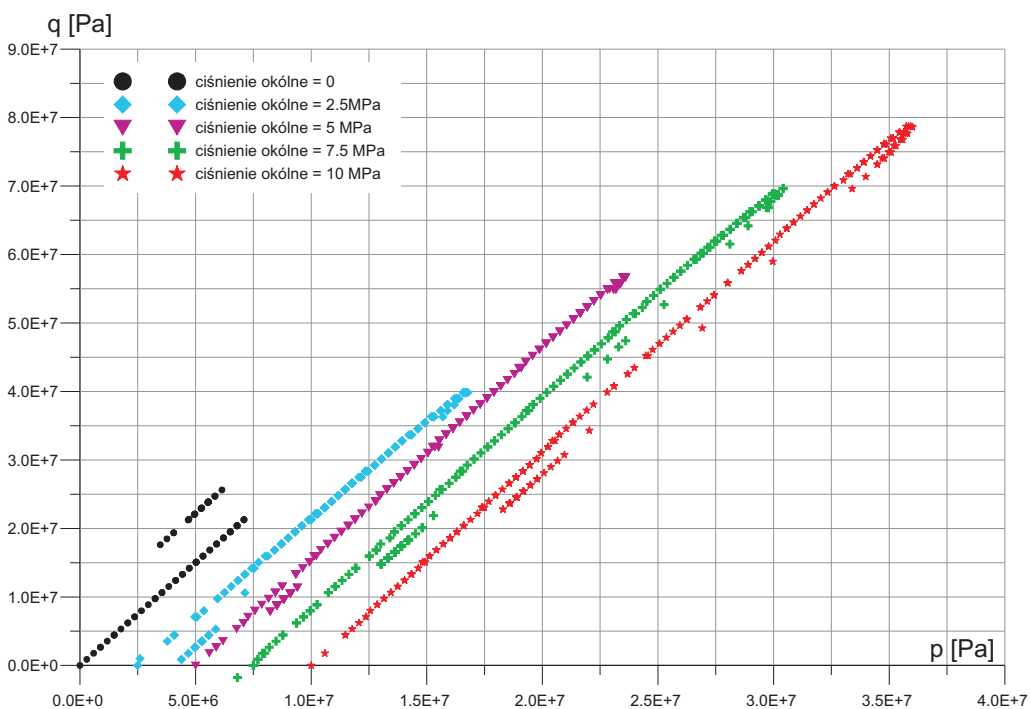
- kąt tarcia wewnętrzznego β , którego wartość wyznaczono na $\beta = 64^\circ$,
- kohezja d , której wartość wyznaczono na $d = 6,8$ MPa
- $l_0 = d|_0 - p_{t|0} \cdot \operatorname{tg} \beta$ (gdzie: $d|_0$ jest początkową kohezją, $p_{t|0}$ jest początkową, hydrostatyczną wytrzymałością na rozciąganie); którego wartość wyznaczono na $l_0 = 4$ MPa.

Prawo plastycznego płynięcia sformułowano na podstawie eksperymentu ściskania jednoosiowego. Parametrem plastycznego wzmocnienia/osłabienia jest wówczas parametr d' :

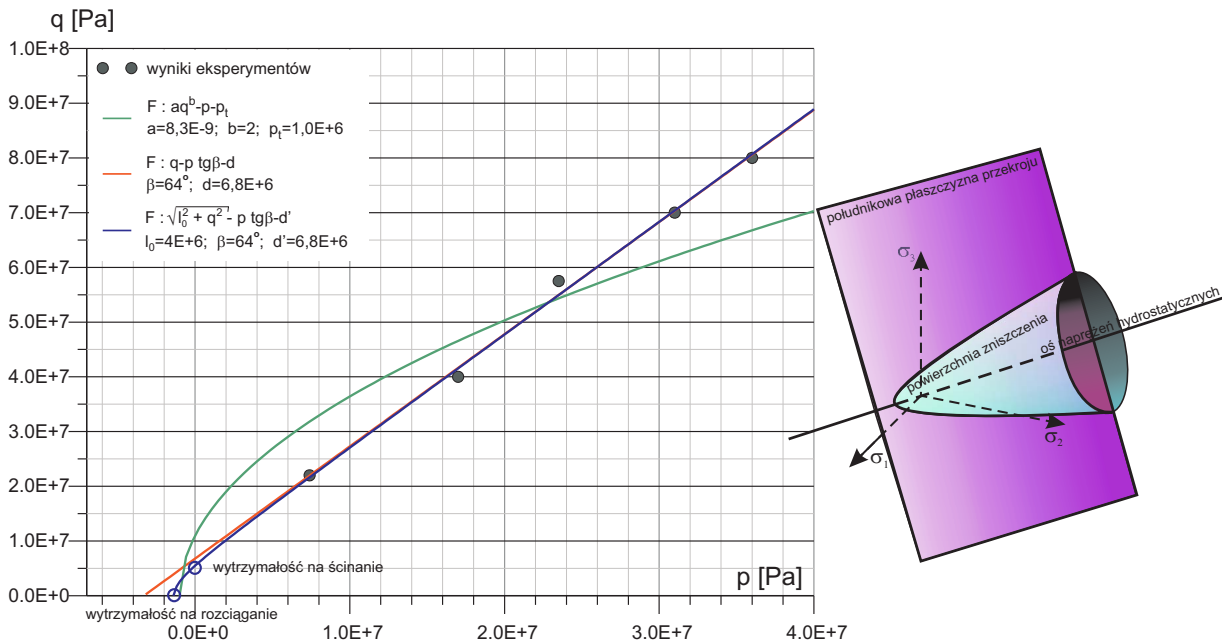
$$d' = \sqrt{l_0^2 + \sigma_3^2} - \operatorname{tg} \beta \cdot \frac{\sigma_3}{3}$$



Rys. 4. Zależność odkształcenia objętościowego od odkształcenia liniowego w osi tłoka ϵ_3 dla różnych poziomów ciśnienia okólnego



Rys. 5. Zależność intensywności tensora naprężenia q od naprężenia średniego p

Rys. 6. Przekrój p - q powierzchni zniszczenia piaskowca

Potencjał plastycznego płynięcia L ma na płaszczyźnie p - q przekrój hiperboliczny:

$$L = \sqrt{(z\bar{\sigma}|_0 \cdot \operatorname{tg}\psi)^2 + q^2} - \operatorname{tg}\psi \cdot p$$

$$L: -\frac{p^2}{(z\bar{\sigma}|_0)^2} + \frac{q^2}{(z\bar{\sigma}|_0 \cdot \operatorname{tg}\psi)^2} = 1$$

gdzie:

- ψ – jest kątem dylatacji mierzonym na płaszczyźnie p - q przy najwyższym poziomie ciśnienia okólnego, (kątem nachylenia asymptoty hiperboli do osi p);
- $\bar{\sigma}|_0$ – jest naprężeniem odpowiadającym początkowi procesu uplastycznienia (granicy plastyczności);
- z – jest parametrem odpowiadającym zbliżeniem hiperboli do jej asymptoty (jest to mała liczba).

W płaszczyźnie dewiatorowej powierzchnia potencjału płynięcia ma kształt okręgu Misesa. Przyjęto stowarzyszone prawo plastycznego płynięcia.

3.2. Określenie modelu materiałowego gliny piaszczystej

Gлина piaszczysta stanowiła bezpośrednie podłoże budynku wielorodzinnego. Zalegała na głębokości 1,5-3,20 m tworząc dwie warstwy różniące się wilgotnością (mw i w) i stanem (tpl i pl). Podczas wykonywania odwiertów rozpoznawczych pobrane zostały próbki gruntu, który poddany został następnie badaniom laboratoryjnym. W laboratorium wykonano eksperymenty trójosiowego ściskania dla trzech różnych wartości ciśnienia okólnego. Uwzględniając wartości naprężeń głównych obliczone dla warunków panujących w momencie zniszczenia wkreślono obwiednię kół Mohra stanowiącą powierzchnię zniszczenia materiału (rys. 7) (Wiłun, 1969).

Na podstawie wyników badań przyjęto, że opis plastycznego zachowania się gruntu stanowić będzie model Coulomba-Mohra. Parametry tego modelu wyznaczono jako:

- kąt tarcia wewnętrznego $\beta = 26^\circ$,
- kohezja $d = 0,75$ kPa.

Przyjęto stowarzyszone prawo plastycznego płynięcia.

**Consolidated Undrained Triaxial Compression Test
with measurement of Pore Pressure**

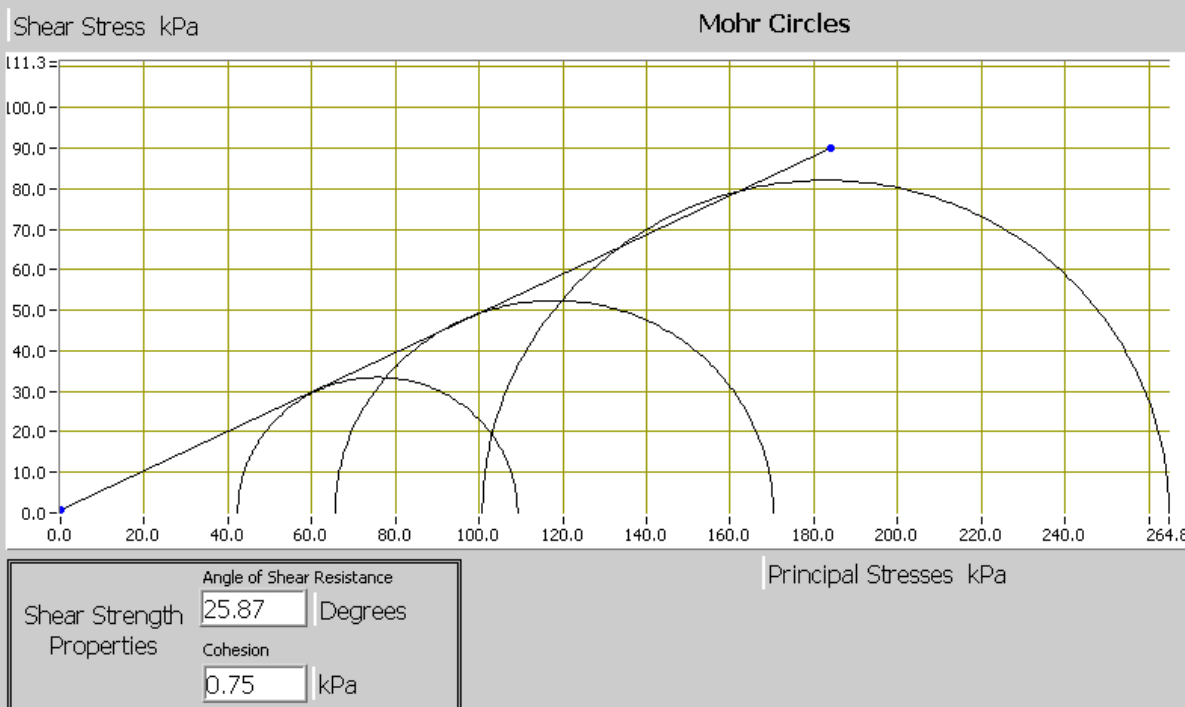


Client	PAN	Lab Ref	
Project		Job	
Borehole	1	Sample	NNS1

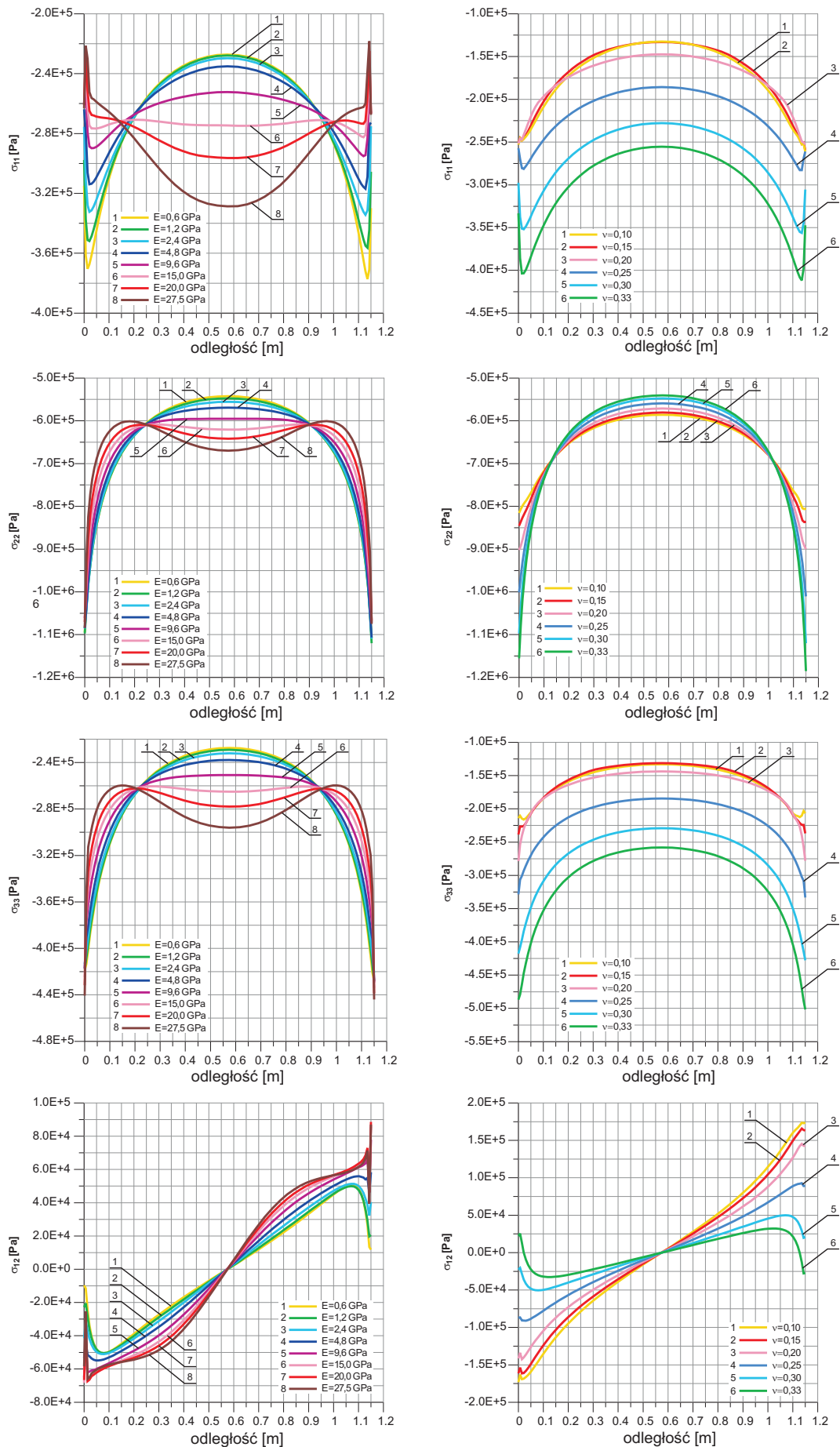
SUMMARY

Test Details	
Standard	PKN-CEN ISO/TS 17892-9:2009

Specimen Details		
Specimen Reference	Effective Minor Principal Stress (σ_3')	Effective Major Principal Stress (σ_1')
A	42.3kPa	109.2kPa
B	65.6kPa	170.3kPa
C	100.8kPa	264.8kPa



Rys. 7. Wyznaczenie obwiedni kół Mohra dla gliny piaszczystej na podstawie eksperymentów trójosiowego ściskania



Rys. 8 Wpływ zmiany parametrów materiałowych E i ν na stan naprężenia pod ławą fundamentową. Eksperymenty numeryczne w płaskim stanie odkształcenia

4. Wpływ wartości parametrów materiałowych na wyznaczanie stanu naprężeń w gruncie

Omówione powyżej metody formułowania modelu materiałowego gruntów i skał oraz wyznaczania parametrów przyjętych praw materiałowych znajdują zastosowanie w analizie współdziałania budowli z podłożem. Prawidłowe przyjęcie praw konstytutywnych dla podłoża ma istotne znaczenia dla wyznaczania stanu gruntu pod fundamentem budowli.

Dla zilustrowania wpływu wartości parametrów materiałowych na obliczony stan naprężeń panujących w podłożu przeprowadzono serię eksperymentów numerycznych. W eksperymentach tych dla tej samej postaci modelu materiałowego zmieniano wartości modułu sprężystości E oraz współczynnika Poissona ν . W zakresie sprężystym zachowanie gruntu opisane było modelem Hooke'a natomiast w zakresie plastycznym – modelem Coulomba Mohra, w którym przyjęto kąt tarcia wewnętrznego $\beta = 36^\circ$, kohezję $d = 1$ kPa oraz kąt dylatacji $\psi = 30^\circ$. Obliczano składowe stanu naprężenia pod ławą fundamentową, której szerokość w poziomie posadowienia wynosiła 1,2 m. Obliczenia wykonywano w płaskim stanie odkształcenia.

Wyniki symulacji przedstawia rysunek 8. Analiza wyników prowadzi do wniosków, że zmiana wartości parametrów E i ν powoduje powstanie istotnych różnic w rozkładach i wartościach naprężeń obliczonych dla gruntu pod podstawą fundamentu. Przy przyjętych właściwościach materiałowych szczególnie wrażliwe na zmiany modułu sprężystości okazały się naprężenia normalne w kierunku poziomym (σ_{11}). Stosunkowo małą wrażliwość na zmiany współczynnika Poissona zauważyć można dla naprężeń normalnych działających w kierunku pionowym (σ_{22}).

5. Podsumowanie

Tematykę pracy stanowi zagadnienie doboru i kalibracji praw materiałowych opisujących zachowanie materiałów geologicznych. Zagadnienie to przedstawiono w aspekcie zastosowania w modelowaniu matematycznym współpracy konstrukcji obiektu budowlanego z podłożem.

W odniesieniu do bezpieczeństwa oraz prawidłowego funkcjonowania obiektu budowlanego zapewnienie należytych warunków posadowienia ma podstawowe znaczenie. Dlatego też prezentowana w pracy tematyka wydaje się szczególnie istotna w odniesieniu do budowli narażonych na różnego typu deformacje podłoża. Przedstawione metody prowadzenia rozpoznania podłoża budowlanego oraz formułowania modelu materiałowego w oparciu o program badań terenowych i laboratoryjnych wydają się być interesującą propozycją mogącą znaleźć zastosowanie nie tylko w analizach naukowych ale również w praktycznych zagadnieniach inżynierskich.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Bibliografia

- Brząkała W. (1998): *Modelowanie i analiza współdziałania budowli z gruntem : Mechanika podłoża. Współpraca budowli z podłożem gruntowym*. I Problemowa Konferencja Geotechniki, Białystok-Wigry, 18-20 czerwca 1998. Referaty Dział Wydaw. Poligraf. Białystok. s. 51-56.
- Florkowska L., Walaszczyk J., Nowakowski A. (2000): *Deformacje terenu związane z eksploatacją górnictwem oraz ich wpływ na fundamenty budynków*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 2, Nr 3-4, s. 287-198, Kraków.
- Florkowska L. (2001): *Fundamenty budynków podlegających wpływowi eksploatacji górnictwem*. W: Geotechnika górnictwa i budownictwo podziemne na początku XXI wieku. Praca pod red. D. Łydźby i J. Rybaka. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej. Nr 73. Seria: Konferencje. Nr 40. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, s. 193-190, Wrocław.
- Florkowska L. (2010a): *Land subsidence due to Mining Operations in Disturbed Rock Mass, on the Example of Ruda Śląska (Poland)*. Archives of Mining Sciences, Vol. 55, No 3, p. 691-701.
- Florkowska L. (2010b): *Zastosowanie numerycznej mechaniki nieliniowej w zagadnieniach ochrony budynków na terenach górniczych*. Archives of Mining Sciences. Monografia. Nr 11. Kraków.
- Gustkiewicz J., Nowakowski A. (2004): *Deformacje i pękanie skał w warunkach laboratoryjnych*. Archives of Mining Sciences, Vol. 49 spec. iss.

Rybak C., Puła O., Sarniak W.(2009): *Fundamentowanie : projektowanie posadowień*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław.

Thiel K., (1980): *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. PWN Warszawa.

Wiłun Z. (1969): *Mechanika gruntów i gruntoznawstwo drogowe*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.

Selection and calibration of constitutive laws for building foundations

Abstract

The article describes the selection methods of material laws for a building foundation, developed with respect to numerical modelling. The issues presented concern the numerical simulation of the impact of underground mining activity on buildings. In such cases, it is particularly important to properly determine the properties of the foundation, due to the fact that soil deformations generated by the processes connected with mining activity cause further strain to building structures. The selection and calibration of the material model was discussed with regard to two examples, i.e. sandstone and sandy clay. Additionally, the paper provides an analysis of the effect of selected values of the material parameters on determining strain in the soil underneath the continuous footing.

Keywords: mechanics of geological materials, rock mechanics, soil mechanics, numerical modelling