

Marian ŁUPIEŻOWIEC*
Politechnika Śląska

LEPKOPLASTYCZNY MODEL KONSTITUTYWNY OŚRODKA GRUNTOWEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono trzy teorie opisu lepkoplastycznego zachowania się gruntów. Ponadto odpowiednie sformułowania zapisano w przypadku osiowej symetrii dla celów kalibracji modelu za pomocą badania w aparacie trójosiowego ściskania.

VISCOPLASTIC CONSTITUTIVE MODEL OF SOIL MEDIUM

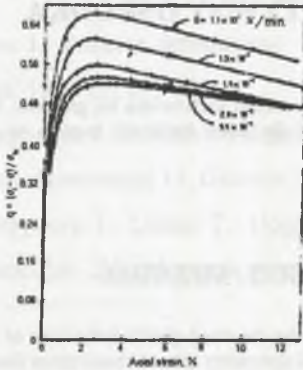
Summary. In the paper there are analysed three theories of describe the visco-plastic behaviour of the soil medium. Further there are written the appropriate equations in the axial symmetry case to characterise that model in the triaxial tests.

1. Wstęp

Uogólnienie lepkoplastyczne ma na celu opis takich procesów reologicznych zachodzących w gruntach (przede wszystkim spoistych), jak pełzanie objętościowe w warunkach swobodnego drenażu i odpowiadające mu pełzanie postaciowe, a także opóźnione zniszczenie w warunkach „bez drenażu”. Co zostało dowiedzione w eksperymentach [7], zależność naprężenie–odkształcenie dla gruntów jest funkcją historii obciążenia i deformacji. Zwykle obserwujemy, że wyniki testów zależą od prędkości przeprowadzania badania, szczególnie dotyczy to gruntów bardziej spoistych. Podobne efekty obserwujemy w przypadku pełzania, gdzie odnotowujemy przyrost deformacji pod stałym obciążeniem. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych przez autorów [7]. Pierwszy z nich pokazuje, że cała charakterystyka „naprężenie–odkształcenie”, w szczególności maksymalna wartość (pik) znormalizowanego dewiatora naprężenia (w stosunku do ciśnienia konsolidacji) zależy od prędkości odkształcenia próbki podczas przeprowadzania badania. Natomiast na drugim rysunku pokazano zależność czasu zniszczenia próbki gruntu wskutek pełzania w warunkach

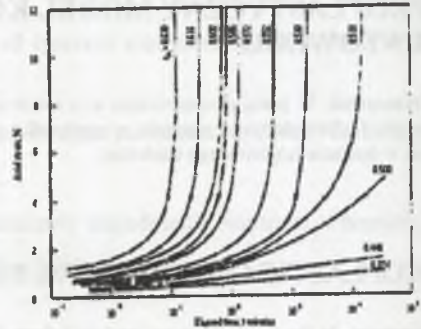
* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Maciej Gryczmański.

„bez drenażu”. Wartość stałego naprężenia wpływa na przebieg procesu pełzania oraz na czas, w którym następuje zniszczenie (znacznym wzrost deformacji postaciowych przy niezmienionej wartości dewiatora naprężenia). To zaobserwowane doświadczalnie zachowanie się gruntu nie może być poprawnie opisane przez istniejące dotąd teorie sprężysto-plastyczne, w których czas odgrywał co najwyżej rolę parametru (np. sformułowanie Zienkiewicza – Cormeau).



Rys. 1. Wpływ prędkości odkształceń na rozwój naprężeń

Fig. 1. Influence of rate of strain on the stress behavior



Rys. 2. Wyniki testów pełzania pod stałym naprężeniem gruntu spoiстого

Fig. 2. Results of constant stress creep tests on clay

Obecnie w mechanice gruntów stosowane są trzy koncepcje opisu lepkoplastycznego, które poniżej zostaną pokrótce omówione:

- nadwyżki naprężenia (model Perzyny [6]),
- izotropowego wzmocnienia lepkoplastycznego (model Dragona-Mroza [4]),
- dekompozycji odkształceń niesprężystych (model Borji-Kavazanjina [2]).

2. Model Perzyny

W tym modelu odkształcenie niesprężyste $\{\epsilon^{vp}\}$ pojawia się po przekroczeniu warunku plastyczności $F(\{\sigma\}, \kappa, \{\epsilon^{vp}\}) > 0$, gdzie $\{\sigma\}$ to wektor naprężenia, natomiast κ jest skalarowym parametrem wzmocnienia izotropowego. Odkształcenie to określone jest następującym prawem:

$$\{\epsilon^{vp}\} = \gamma \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \quad (1)$$

gdzie: $\langle \phi(F) \rangle = \begin{cases} 0 & \text{dla } F \leq 0 \\ \phi(F) & \text{dla } F > 0 \end{cases}$,

γ – współczynnik lepkości (wyznaczany doświadczalnie).

Powyższe oznacza, że prędkość lepkoplastycznego płynięcia jest proporcjonalna do funkcji nadwyżki ponad stan uplastycznienia $\phi(F)$ i zorientowana prostopadle do powierzchni plastyczności $F(\{\sigma\}, \kappa, \{\dot{\epsilon}^{vp}\}) = 0$ przechodzącej przez bieżący punkt naprężenia. Funkcja $\phi(F)$ dobierana jest w klasie funkcji elementarnych. Najczęściej stosuje się [6]:

$$\begin{aligned} \phi(F) = F^\delta, \quad \phi(F) = F, \quad \phi(F) = \exp F - 1 \\ \phi(F) = \sum_{\alpha=1}^N A_\alpha F^\alpha, \quad \phi(F) = \sum_{\alpha=1}^N B_\alpha [\exp F^\alpha - 1] \end{aligned} \quad (2)$$

W powyższych wyrażeniach lepkie współczynniki materiałowe powinny być wyznaczone doświadczalnie.

Analizując powyższy model zauważamy, że nie obowiązuje tutaj warunek zgodności, możliwe jest bowiem „wyjście” punktu w przestrzeni naprężeń poza powierzchnię ograniczającą, które warunkuje wystąpienie odkształceń niesprężystych – por. wzór (1). Okazuje się to sprzeczne z dotychczasowymi teoriami plastyczności, według których punkt w przestrzeni naprężeń po osiągnięciu warunku plastyczności przy dalszym procesie obciążania musi „pozostawać” na aktualnej powierzchni ograniczającej.

Dekomponując wektor całkowitego $\{\dot{\epsilon}\}$ odkształcenia na część sprężystą $\{\dot{\epsilon}^e\}$ i lepkoplastyczną $\{\dot{\epsilon}^{vp}\}$:

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}^e\} + \{\dot{\epsilon}^{vp}\}, \quad (3)$$

ponadto wykorzystując prawo sprężystości (3) oraz wzór (1) otrzymujemy związek konstytutywny wyrażający zależność naprężenie – odkształcenie (4).

$$\{\dot{\sigma}\} = [D] \{\dot{\epsilon}^e\}, \quad (4)$$

$$\{\dot{\sigma}\} = [D] \left[\{\dot{\epsilon}\} - \gamma \langle \phi(F) \rangle \frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right]. \quad (5)$$

W powyższym macierz $[D]$ jest macierzą sprężystości.

3. Model Dragona–Mroza

W drugim analizowanym modelu lepkoplastycznym zachowane są równania obowiązujące w teorii plastyczności. Wpływ reologii „wchodzi” do rozważanej teorii poprzez prawo wzmocnienia. Aby w skrócie przedstawić sformułowania omawianej teorii, rozważmy ciało sprężysto–lepkoplastyczne o wzmocnieniu izotropowym. Funkcję ograniczającą przyjmijmy w postaci:

$$F(\{\sigma\}, \kappa) = 0, \quad (6)$$

Prawo wzmocnienia izotropowego podane wzorem (7), jak to było wspomniane wcześniej, uwzględnia wpływ reologii. Istotne jest to, że w tym równaniu parametr wzmocnienia κ izotropowego występuje zarówno pod operacją pochodnej po czasie po lewej stronie, jak i jako zmienna po prawej stronie równości. Ponadto uwzględniono, że κ zależy od prędkości odkształcenia niesprężystego (takie podejście stosuje się najczęściej w mechanice gruntów) [4]:

$$\kappa = \{g_1\}^T \cdot \left\{ \begin{matrix} \cdot \\ \varepsilon \end{matrix} \right\} - g_2(\{\sigma\}, \kappa), \quad (7)$$

Poniżej podano ogólne związki konstytutywne znane w sprężysto–plastyczności – warunek zgodności (8), prawo addytywności (9), prawo sprężystości (10) oraz prawo płynięcia (w ogólności niestowarzyszone) (11):

$$\left[\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right]^T \left\{ \dot{\sigma} \right\} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \dot{\kappa} = 0, \quad (8)$$

$$\left\{ \dot{\varepsilon} \right\} = \left\{ \dot{\varepsilon}^e \right\} + \left\{ \dot{\varepsilon}^{vp} \right\}, \quad (9)$$

$$\left\{ \varepsilon^e \right\} = [D]^{-1} \left\{ \sigma \right\}, \quad (10)$$

$$\left\{ \dot{\varepsilon}^{vp} \right\} = \Lambda \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}}, \quad (11)$$

W powyższym: $G(\{\sigma\}, \kappa) = 0$ – funkcja potencjału.

Aby móc wyznaczyć zależność $\sigma - \varepsilon$ podstawmy do wzoru (7) wyrażenie na prędkość odkształceń niesprężystych (11), a następnie tak przekształcone wyrażenie na $\dot{\kappa}$ wstawiamy do (8). W ten sposób możemy wyznaczyć wielkość Λ :

$$\left[\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right]^T \{\dot{\sigma}\} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \{g_1\}^T \Lambda \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}} - \frac{\partial F}{\partial \kappa} g_2(\{\sigma\}, \kappa) = 0,$$

$$\Lambda = \frac{-\left[\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right]^T \{\dot{\sigma}\} + \frac{\partial F}{\partial \kappa} g_2(\{\sigma\}, \kappa)}{\frac{\partial F}{\partial \kappa} \{g_1\}^T \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}}} = -\frac{\left[\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right]^T \{\dot{\sigma}\}}{K_{pl}} + \frac{g_2(\{\sigma\}, \kappa)}{\{g_1\}^T \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}}}, \quad (12)$$

gdzie $K_{pl} = \frac{\partial F}{\partial \kappa} \{g_1\}^T \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}}$ – moduł wzmocnienia plastycznego.

Obliczoną powyżej wartość Λ wstawiamy do (11), następnie prędkość odkształcenia lepko-plastycznego z (11) oraz prędkość odkształcenia sprężystego z (10) podstawimy do (9):

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \left[[D]^{-1} + \frac{1}{K_{pl}} \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}} \left[\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right]^T \right] \{\dot{\sigma}\} + \frac{g_2(\{\sigma\}, \kappa)}{\{g_1\}^T}, \quad (13)$$

Jeżeli oznaczymy:

$$[D^{ep}]^{-1} = [D]^{-1} + \frac{1}{K_{pl}} \frac{\partial G}{\partial \{\sigma\}} \left[\frac{\partial F}{\partial \{\sigma\}} \right]^T, \text{ gdzie } [D^{ep}] - \text{macierz sprężysto-plastyczna,}$$

otrzymamy poszukiwaną formę związku konstytutywnego:

$$\{\dot{\sigma}\} = [D^{ep}] \{\dot{\varepsilon}\} + \frac{g_2(\{\sigma\}, \kappa)}{\{g_1\}^T}. \quad (14)$$

Powyzsza zależność jest rozszerzeniem znanych związków dla sprężysto-plastyczności.

Wpływ czasu na przebieg procesu jest uwzględniony poprzez drugi człon w równaniu (14).

4. Model Borji–Kavazanjianiana

Trzecia omawiana tutaj koncepcja ujęcia lepkoplastyczności polega na dekompozycji odkształceń całkowitych na część sprężystą, plastyczną (doraźną) i „lepką” (opóźnioną), która opisana jest wzorem:

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \{\dot{\varepsilon}^e\} + \{\dot{\varepsilon}^p\} + \{\dot{\varepsilon}^c\}. \quad (15)$$

W tym modelu przyjmuje się, że dwa pierwsze składniki odkształcenia opisane są związkami teorii sprężysto-plastyczności, natomiast odkształcenia związane z pełzaniem opisywane są funkcjami empirycznymi, które wynikają z dopasowania do krzywych uzyskanych doświadczalnie. Rozwiązanie tego problemu przedstawili Borja i Kavazanjianian [3]. W tej metodzie

rozwiązania jako model sprężysto–plastyczny został przyjęty bardzo prosty i popularny w mechanice gruntów model MCC. Funkcja ograniczająca dana jest wzorem [1]:

$$F(p, q, p_c) = q^2 + M^2 p(p - p_c) = 0, \quad (16)$$

gdzie: $p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$, $q = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{0.5}$ to nie-

zmienniki naprężenia, σ_1 , σ_2 , σ_3 są naprężeniami głównymi, a p_c – ciśnieniem prekonsolidacji, które pełnią rolę parametru wzmocnienia. Ponadto znane są inne funkcje charakterystyczne dla opisu sprężysto–plastycznego [1]:

prawo wzmocnienia:
$$p_c = p_{c0} \exp\left(\frac{\Delta e^p}{\lambda - \kappa}\right), \quad (17)$$

prawo sprężystości:
$$\Delta e^e = \kappa \ln \frac{p_c}{p_{c0}}, \quad (18)$$

prawo addytywności:
$$\Delta e = \Delta e^e + \Delta e^p. \quad (19)$$

W powyższych wyrażeniach e oznacza wskaźnik porowatości, który z odkształceniem objętościowym jest związany zależnością:

$$\delta \varepsilon_v = -\frac{\delta e}{1 + e}. \quad (20)$$

Odształcenie objętościowe, jak i postaciowe są niezmiennikami odkształcenia uzależnionymi od odkształceń głównych w następujący sposób:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3, \quad \varepsilon_s = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]. \quad (21)$$

Odształcenia powodowane przez pełzanie przyjmuje się w postaci [3]:

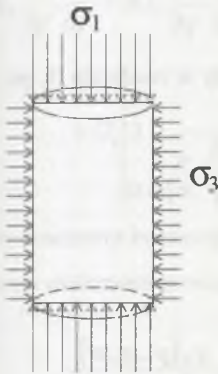
$$\varepsilon_v = \frac{\psi}{3(1+e)t_v}, \quad \varepsilon_s = \sqrt{\frac{3}{2}} A \exp\left(\alpha \frac{q}{q_f}\right) (t_s)^{-m} \quad (22)$$

Powyżej q i q_f oznaczają aktualne i graniczne naprężenie ścinające, ψ , A , α i m to stałe materiałowe, a t_v i t_s – względne czasy uzyskiwane na podstawie badań w aparacie trójwym. Sposób wyznaczania omawianych czasów względnych podano w [7]:

$$t_v = \left(\frac{p_c}{p + \frac{q^2}{M^2 p}} \right)^{(\lambda - \kappa)/\psi}, \quad t_s = \exp\left(\frac{q_0 - q}{\frac{1 - m}{\alpha} q_f} \right) \quad (23)$$

5. Doświadczalne wyznaczanie funkcji materiałowych

Najczęściej stosowanymi obecnie badaniami doświadczalnymi gruntów są testy trójosiowe. W aparacie tym możemy inicjować różne ścieżki obciążenia regulując ciśnienie w komorze oraz nacisk przekazywany przez tłok z góry. Daje to rozkład naprężeń pokazany na poniższym rysunku. Ponadto możemy mierzyć ciśnienie wody w porach u (w badaniach bez drenażu). Podczas takiego badania stan naprężenia opisujemy za pomocą niezmienników naprężeń (efektywnych) p' i q' . Zachodzą przy tym następujące związki [1]:



Podczas takiego badania stan naprężenia opisujemy za pomocą niezmienników naprężeń (efektywnych) p' i q' . Zachodzą przy tym następujące związki [1]:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p' = p - u \quad q' = q \quad (24)$$

$$\frac{\partial p'}{\partial \sigma_1} = \frac{1}{3} \quad \frac{\partial q'}{\partial \sigma_1} = 1 \quad \frac{\partial p'}{\partial \sigma_3} = \frac{1}{3} \quad \frac{\partial q'}{\partial \sigma_3} = -\frac{1}{2}$$

Rys. 3. Stan naprężenia podczas badań w aparacie trójosiowym

Fig. 3. State stress in triaxial tests

Stan odkształcenia podaje się za pomocą odkształcenia objętościowego ε_v oraz odkształcenia postaciowego ε_s

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad \varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3).$$

Poniżej przedstawimy sposób doświadczalnego wyznaczenia funkcji materiałowych dla modelu Dragona–Mroza. Analogicznie do (9) wyrazimy dekompozycję naprężeń na część sprężystą i niesprężystą:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^{vp} \quad \varepsilon_s = \varepsilon_s^e + \varepsilon_s^{vp}$$

Funkcję ograniczającą oraz potencjału podamy w postaci:

$$F(p', q', \kappa) = 0, \quad G(p', q', \kappa) = 0, \quad (25)$$

natomiast prawo wzmocnienia analogicznie do (7):

$$\kappa = C_1 \varepsilon_v^{vp} + C_2 \varepsilon_s^{vp} - g_2(p', q', \kappa), \quad (26)$$

Biorąc pod uwagę prawo zgodności (8) oraz wykonując odpowiednie przekształcenia korzystając z (24) otrzymamy [5]:

$$\frac{\partial F}{\partial p'} p' + \frac{\partial F}{\partial q'} q' + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \kappa = 0. \quad (27)$$

Analogicznie do wzorów podanych w rozdziale 4 zapiszemy prawa sprężystości (28) (wg [1]) oraz prawa plastycznego płynięcia (29):

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{1}{K_t} \dot{p}', \quad \dot{\varepsilon}_s = \frac{1}{3G_t} \dot{p}'. \quad (28)$$

$$\varepsilon_v^{vp} = \Lambda \frac{\partial G}{\partial p'}, \quad \varepsilon_s^{vp} = \Lambda \frac{\partial G}{\partial q'}. \quad (29)$$

Powyżej K_t – moduł ściśliwości, G_t – moduł ścinania.

Wykonując przekształcenia analogiczne do przeprowadzonych w rozdziale 3, po podstawieniu do równania zgodności otrzymujemy równanie:

$$\frac{\partial F}{\partial p'} \dot{p}' + \frac{\partial F}{\partial q'} \dot{q}' + \frac{\partial F}{\partial \kappa} \Lambda \left(C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'} \right) - \frac{\partial F}{\partial \kappa} g_2(p', q', \kappa) = 0,$$

z którego możemy wyznaczyć wartość współczynnika Λ :

$$\Lambda = \frac{-\frac{\partial F}{\partial p'} \dot{p}' - \frac{\partial F}{\partial q'} \dot{q}' + \frac{\partial F}{\partial \kappa} g_2(p', q', \kappa)}{\frac{\partial F}{\partial \kappa} \left(C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'} \right)} = -\frac{\frac{\partial F}{\partial p'} \dot{p}' + \frac{\partial F}{\partial q'} \dot{q}'}{K_{pl}} + \frac{g_2(p', q', \kappa)}{C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'}}. \quad (30)$$

gdzie $K_{pl} = \frac{\partial F}{\partial \kappa} \left(C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'} \right)$ nazywamy modułem wzmocnienia lepkoplastycznego.

Podstawiając powyższe do praw sprężystości oraz addytywności, analogicznie do (13) dostajemy poszukiwane związki konstytutywne:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_v &= \left(\frac{1}{K_t} + \frac{\frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'}}{K_{pl}} \right) \dot{p}' + \frac{\frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial p'}}{K_{pl}} \dot{q}' + \frac{g_2(p', q', \kappa)}{C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'}}, \\ \dot{\varepsilon}_s &= \left(\frac{1}{3G_t} + \frac{\frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'}}{K_{pl}} \right) \dot{q}' + \frac{\frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial q'}}{K_{pl}} \dot{p}' + \frac{g_2(p', q', \kappa)}{C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'}}. \end{aligned} \quad (31)$$

lub po odwróceniu [5]:

$$\dot{p}' = K_t \left(1 - \frac{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'}}{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'} + 3G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'} + K_{pl}} \right) \dot{\varepsilon}_v + \frac{3K_t G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'}}{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'} + 3G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'} + K_{pl}} \dot{\varepsilon}_s +$$

$$\begin{aligned}
 & + K_t \left(1 - \frac{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'}}{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'} + 3G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'} + K_{pl}} \right) \frac{g_2(p', q', \kappa)}{C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'}}, \\
 q' = & \frac{3K_t G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'}}{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'} + 3G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'} + K_{pl}} \varepsilon_v + G_t \left(1 - \frac{G_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'}}{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'} + 3G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'} + K_{pl}} \right) \varepsilon_s, \\
 & + G_t \left(1 - \frac{G_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'}}{K_t \frac{\partial F}{\partial p'} \frac{\partial G}{\partial p'} + 3G_t \frac{\partial F}{\partial q'} \frac{\partial G}{\partial q'} + K_{pl}} \right) \frac{g_2(p', q', \kappa)}{C_1 \frac{\partial G}{\partial p'} + C_2 \frac{\partial G}{\partial q'}}
 \end{aligned} \quad (32)$$

Po wyznaczeniu interesujących nas ścieżek naprężenia za pomocą dowolnej procedury poszukiwania ekstremum powinniśmy znaleźć taki zestaw parametrów, aby:

$$\sum_{i=1}^n (x_i^* - x_i)^2 = \min. \quad (33)$$

gdzie: x^* – porównywana wielkość (np. naprężenie) obliczone dla przyjętych parametrów wyznaczanych funkcji materiałowych,

x – porównywana wielkość uzyskana z badań.

66. Wnioski

Po przesłedzeniu podanych w pracy teorii łatwo zauważyć, że w teorii Perzyny nie mamy spełnionego warunku zgodności, co stanowi jej uchybienie przy formułowaniu równań opisujących problem. Pozostałe dwie teorie stanowią rozszerzenie znanej i często przywoływanej w publikacjach teorii plastyczności. Teoria Borji–Kavazanjianiana stanowi rozwinięcie bardzo popularnego w mechanice gruntów modelu Cam–Clay przez uzupełnienie równań o składniki odkształcenia pełzania. Jednak te dodatkowe wielkości są przyjęte w sposób empiryczny. Dlatego najbardziej spójną z omawianych tutaj metod wydaje się model Dragona–Mroza, w którym wpływ czasu na przebieg procesu został uwzględniony w prawie wzmocnienia. Na dzień dzisiejszy teoria ta została zastosowana w mechanice skał [4], nie jest znane zastosowanie jej w mechanice gruntów.

LITERATURA

1. Atkinson J. H., Bransby P. L.: *The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics*, McGraw-Hill Book Company, London 1978.
2. Borja R. I.: Generalized creep and stress relaxation model for clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, **118**, 11, 1992, str. 1765-1786.
3. Borja R.I., Kavazanjian E. Jr.: A constitutive model for the stress-strain-time behaviour of „wet” clays, *Geotechnique*, **35**, 3, 1985, str. 283-298.
4. Dragon A., Mróz Z.: A model for plastic creep of rock-like materials accounting for the kinetics of fracture, *Int. J. Rock Mech. Sci & Geomech.*, **16**, 1979, str. 253-259.
5. Gryczmański M.: *Wprowadzenie do opisu sprężysto-plastycznych modeli gruntów*, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Warszawa 1995.
6. Perzyna P.: *Teoria lepkoplastyczności*, PWN, Warszawa 1966.
7. Vaid Y. P., Campanella R. G.: Time-dependent behaviour of undisturbed clay, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977 p. 693-709.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Ryszard Izbicki

Abstract

In the paper there are presented three conceptions of the description viscoplastic behaviour of the soil medium. The first model created by Perzyna [6] assumes that the inelastic strains appear after exceeding the yield condition. In the Borja-Kavazanjian model [3] the constitutive equations are completed by the empirical functions of creep strains. That theory bases on Modified Cam Clay model. The third viscoplastic model [4] is a generalisation of the basic plasticity theory. In this article there is showed the equations needed by evaluating (in the triaxial apparatus) the values of the material constants occurred in the equations in this model.