ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1995
Seria: BUDOWNICTWO z. 81 Nr kol. 1292

Maciej GRYCZMAŃSKI

PRÓBA KLASYFIKACJI MODELI KONSTYTUTYWNYCH GRUNTÓW

Streszczenie. Referat zawiera propozycję ogólnej systematyki modeli konstytutywnych gruntów, opartą na kryterium ich wrażliwości na historie obciążenia w przestrzeni naprężeń lub odkształceń i zdolności do opisu deformacji nieodwracalnych. Szczegółowe klasyfikacje obejmują wszystkie ważniejsze modele kolejnych generacji ze wskazaniem źródłowych pozycji bibliograficznych.

AN ATTEMPT OF CLASSIFICATION OF CONSTITUTIVE MODELS FOR SOILS

Summary. The paper contains a proposal of the general systematics of constitutive models for soils, based on the criterion of their sensitivity to loading histories in the stress or strain space, as well as of their ability to description of irreversible deformations. Detailed classifications comprise all more important models of succesive generations, with refference to to the source positions of the bibliography.

L'ESSAI DE LA CLASSIFICATION DES MODÉLES CONSTITUTIES DESSOLS

Résumé. Ce rapport c'est une proposition de la systématique des modéles constitutifs des sous–sol. Elle s'appuie sur le critére de sensibilite des modéles á l'histoire des charges dans l'espace des contraintes ou des déformations, ainsique sur le critére de capacité de décrire les déformations irréversibles. Les classifications détaillées contierunent tous les modéles importants des générations successives avec l'indication des positions bibliographiques de source.

1. WSTĘP

Wiele czynników złożyło się na niebywały postęp, jaki dokonał się w ostatnich czterech dekadach w dziedzinie związków konstytutywnych, opisujących mechaniczne zachowanie się gruntów. Wymienić tu trzeba: rozwój mechaniki materiałów, teorii plastyczności i lepkoplastyczności, postęp w dziedzinie wyposażenia laboratoriów i badań doświadczalnych gruntów, jak również potrzeby praktyki geotechnicznej i rosnące szanse ich spełnienia dzięki osiągnięciom w zakresie metod numerycznych i informatyki.

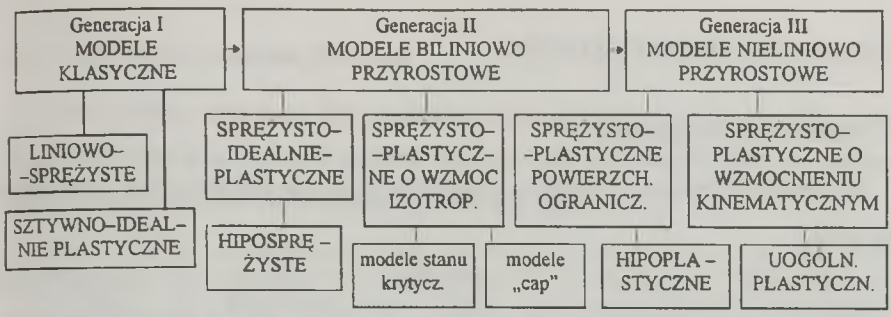
W efekcie, w końcu XX wieku można się doliczyć kilkudziesięciu, może nawet kilkuset propozycji modelowych. Modele są coraz bardziej wyrafinowane. Wraz z ich zaawansowaniem gwałtownie zwiększa się liczba parametrów. Ocena wartości poszczególnych propozycji staje się coraz trudniejsza [33]. Wiele z nich nie wychodzi zresztą poza implementację w warunkach jednorodnych stanów naprężenia i odkształcenia.

Istnieje w związku z tym potrzeba usystematyzowania istniejącego dorobku. Próby klasyfikacji sa nieliczne [8], [16], [30], [60], a ponadto ogólnikowe i fragmentaryczne. Systematyka przedstawiona w niniejszej publikacji jest kompromisem pomiędzy pożądaną kompletnością a ograniczoną objętością opracowania. Nacisk położony jest na samą klasyfikację. Formalizm matematyczny zredukowano do niezbędnego minimum. Poddano selekcji modele. Pozostawiono tylko ważniejsze modele kontynualne, niewrażliwe na skalę czasu, odsyłając Czytelnika w każdym przypadku do literatury. Analogiczną klasyfikację zastosować można do reologicznych praw konstytutywnych, zmieniając w zamieszczonych dalej schematach terminy „sprężysty" i „plastyczny" na „lepko-sprężysty" i „lepko-plastyczny".

2. OGÓLNA KLASYFIKACJA MODELI

Podstawę klasyfikacji stanowi podział modeli na trzy kategorie.

Stosowny schemat przedstawiony jest na rys.1. Modele generacji I są nieczułe na ścieżki obciążenia w przestrzeni naprężeń lub odkształceń. Stosuje się je od dawna, z różnym powodzeniem, w praktyce geotechnicznej.



Rys.1. Ogólny schemat klasyfikacji modeli konstytutywnych gruntów
Fig.1. General scheme of classification of constitutive models for soils

Modele generacji II dzielą się zasadniczo na hiposprężyste i sprężysto-plastyczne. Różnice między oboma podejściami nie są zbyt istotne [48]. Wygodniejsze, m.in. ze względu na możliwości interpretacyjne, okazuje się jednak podejście sprężysto-plastyczne i ono jest znacznie powszechniej stosowane w geomechanice. Odnosi się to w szczególności do modeli o wzmocnieniu izotropowym, rozwiniętych w ramach mechaniki stanu krytycznego [3], [74], [82], lub należących do rodziny „cap" [12]. Wrażliwość na historię obciążenia pojawia się tu, gdy ścieżka naprężenia osiągnie powierzchnię plastyczności, która pokrywa się z obwiednią obciążenia pierwotnego, identyfikującą stan normalnej konsolidacji gruntu. Odpowiedzi gruntu prekonsolidowanego (poddawanego odciążeniom i obciążeniom wtórnym) są sprężyste. Rozważania powyższe można przenieść do przestrzeni odkształceń [49]. Modele generacji II znajdują współcześnie coraz szersze zastosowanie w praktyce.

Zasadniczy podział w ramach generacji III przebiega między stricte nieliniowo-przyrostowymi modelami hipoplastycznymi [15], [41], [78] a zaawansowanymi modelami sprężysto-plastycznymi powierzchni ograniczającej [14], lub o wzmocnieniu izotropowo-kinematycznym. Podejścia sprężysto-plastyczne uwzględniają plastyczność (wrażliwość na historię obciążenia) również w obszarze prekonsolidacji (wewnątrz obwiedni obciążenia pierwotnego). Modele generacji III nie znalazły dotąd szerszego zastosowania w praktyce, choć w przypadkach dominujących obciążeń zmiennych nie ma dla nich alternatywy, jeśli nie liczyć kilku interesujących idealizacji (np. [72]).

3. KLASYCZNE MODELE GRUNTÓW

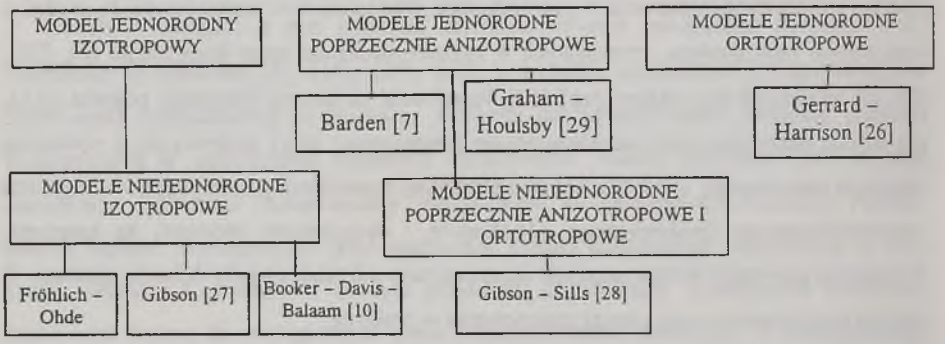
3.1. Modele liniowo–sprężyste

Równania konstytutywne można tu przedstawić w dobrze znanym zapisie wektorowym (np. [24])

$$\sigma' = D\varepsilon \tag{1}$$

gdzie σ' i ε są bieżącymi wektorami naprężenia efektywnego i odkształcenia, a D – macierzą sprężystości.

Klasyfikację modeli gruntów, zależną od specyfikacji D, przedstawia rys.2.

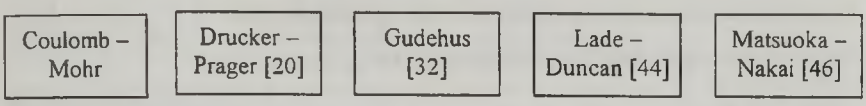


Rys.2. Schemat klasyfikacyjny modeli liniowo-sprężystych
Fig.2. Scheme of classification of linear elastic models

Uwzględnienie anizotropii [29] lub/i niejednorodności [10], [28] daje lepsze przybliżenia rzeczywistości. W świetle nowych badań (np.[11]) założenie liniowej sprężystości jest jednak ważne tylko w małych przedziałach zmian obciążenia. W przypadkach tzw. płytkich problemów geotechniki ograniczenie to dotyczy w znacznie mniejszym stopniu naprężeń w przypadku problemów głębokich - odwrotnie [5].

3.2. Modele sztywno-idealnie plastyczne

Nadal szeroko stosowane jako podstawa teorii nośności granicznej, a tym samym oszacowań obciążeń granicznych podłoża, współczynnika stateczności skarp etc, różnią się między sobą geometrią powierzchni stanu granicznego (rys.3).



Rys.3. Podział modeli sztywno-idealnie plastycznych wg powierzchni stanu granicznego
Fig.3. Division of rigid-perfectly plastic models according to limit state surface

Model identyfikowany przez powierzchnię Coulomba-Mohra odgrywa wciąż rolę wiodącą. Kolejne pozycje schematu są coraz dokładniejszymi aproksymacjami tego modelu, wygładzającymi jego krawędzie plastyczne.

4. MODELE BILINIOWO PRZYROSTOWE

4.1. Uwagi wstępne

Równania konstytutywne modeli sprężysto–plastycznych mają postać [24]:

$$\begin{aligned} \delta\sigma' &= \boldsymbol{D}^{ep} \cdot \delta\varepsilon \qquad F = 0 \wedge dF \geq 0 \\ \delta\sigma' &= \boldsymbol{D} \cdot \delta\varepsilon \qquad F < 0 \vee (F = 0 \wedge dF < 0) \end{aligned} \tag{2}$$

gdzie $\delta\sigma'$ i $\delta\varepsilon$ są wektorami infinitezymalnych przyrostów naprężenia i odkształcenia, $\boldsymbol{D}^{ep}$ jest macierzą sprężysto-plastyczną, F = 0 – warunkiem (równaniem powierzchni) plastyczności. Relacja dF > 0 oznacza w teorii plastyczności obciążenie, dF < 0 - odciążenie, dF = 0 stan neutralny. Równaniom (2) odpowiadają związki hiposprężystości dla gałęzi obciążenia i odciążenia [48].

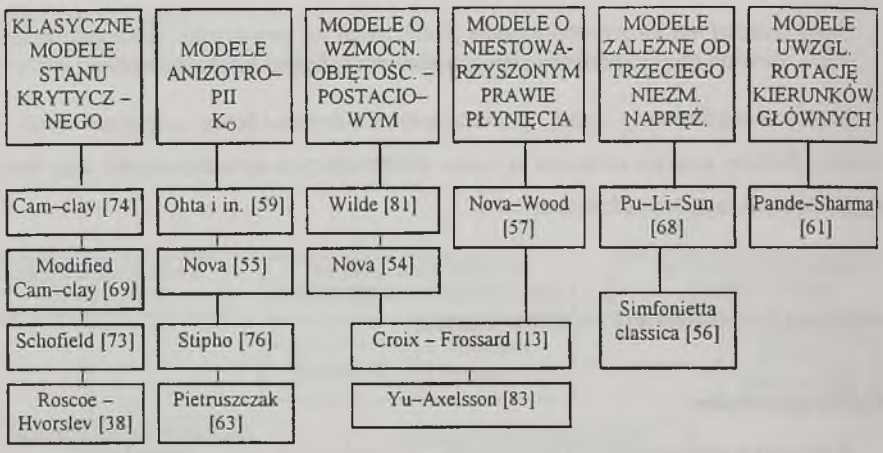
Klasyfikacja modeli sprężysto-idealnie plastycznych jest prostą kombinacją podziałów na rys.2 i 3 (np. jednorodny, izotropowy model sprężysto-plastyczny z powierzchnią stanu granicznego Coulomba-Mohra).

4.2. Modele stanu krytycznego (CSSM)

Wspólnymi cechami modeli mechaniki stanu krytycznego gruntów są:

- istnienie w przestrzeni naprężeń powierzchni zniszczenia (stanu krytycznego), która przecina zamknięte powierzchnie plastyczności, oddzielając strefy wzmocnienia i osłabienia,
- izotropowe wzmocnienie typu objętościowego (gęstościowego).

Różne ich koncepcje klasyfikuje schemat na rys.4.



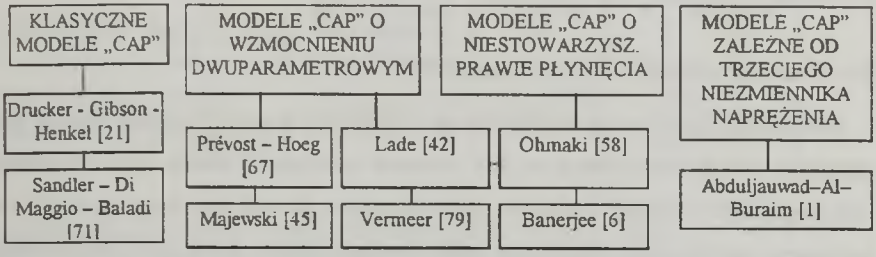
Rys.4. Klasyfikacja modeli stanu krytycznego.
Fig.4. Classification of critical state models

W schemacie, obok klasycznych modeli „Cambridge", występują ich rozwinięcia idące w kierunku lepszej zgodności z eksperymentem. Uwzględniają one wpływy: jednoosiowej historii obciążenia (anizotropii K_0), wzmocnienia postaciowego, odchylenia od zasady normalności, trzeciego niezmiennika naprężenia, a nawet rotacji kierunków głównych.

4.3. Modele nasadkowe (cap)

Z modelami stanu krytycznego wiąże je wspólne prawo wzmocnienia objętościowego, różni od nich - koncepcja powierzchni zniszczenia. W przypadku szeroko rozumianej rodziny „cap" jest to obwiednia realnych stanów naprężenia, niekiedy także skrajna powierzchnia

plastyczności. Kształtu nasadki nie uznaje się natomiast za wyróżnik. Może być elipsoidalna, kulista, stożkowa a nawet płaska. Tak zdefiniowane modele „cap" zestawione są w schemacie na rys.5.



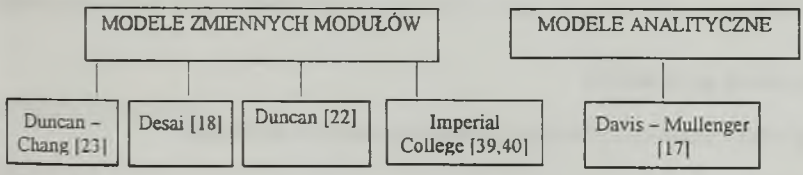
Rys.5. Klasyfikacja modeli nasadkowych
Fig. 5. Classification of cap models

4.4. Inne modele o wzmocnieniu izotropowym

Są modele, których nie można przypisać żadnej z dwóch powyższych klas. Należą do nich bardzo ogólne modele Desai'a i Faruque'a [19] i Lade'a [43] oraz dylatacyjne modele Rowe'a [70], Mc Dermotta [47] i Frossarda [25], oparte na rozważaniach na poziomie struktury.

4.5. Modele hiposprężyste

Wśród hiposprężystych można wyróżnić klasę półempirycznych, prostych modeli zmiennych modułów, która znajduje wciąż szerokie zastosowanie w praktyce, oraz modele wyprowadzone z rozwinięcia Cayley'a-Hamiltona (rys.6).



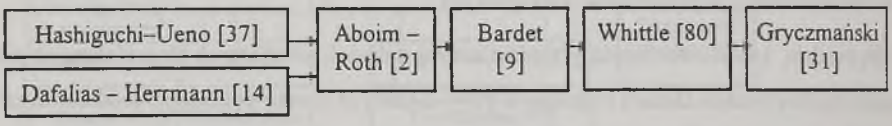
Rys.6. Klasyfikacja modeli hiposprężystych
Fig.6. Classification of hypoelastic models

Związki hiposprężyste stosowane są jako kompletny opis bądź w kombinacji z modelami stanu krytycznego [40], lub „cap" [45].

5. MODELE TRZECIEJ GENERACJI

5.1. Modele powierzchni ograniczającej (BSSP)

Uwzględniają plastyczność wewnątrz powierzchni ograniczającej (w stanie prekonsolidacji), określając moduł wzmocnienia w tym obszarze za pomocą zasady tzw. odwzorowania radialnego. Jądro sprężyste zredukowane jest do punktu. Klasyfikacja obejmująca podstawową koncepcję opublikowaną niezależnie przez Hashiguchiego i Ueno [37] oraz Dafaliasa i Herrmanna [14] oraz jej modyfikacje przedstawiona jest na rys.7. Dwie ostatnie pozycje uwzględniają nieliniowość w zakresie małych deformacji.



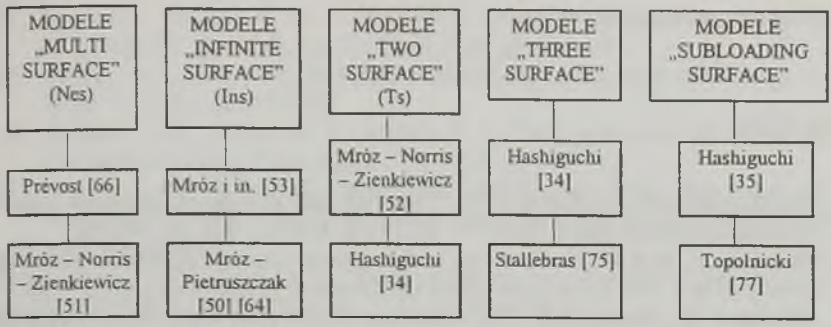
Rys. 7. Klasyfikacja modeli powierzchni ograniczającej
Fig. 7. Classification of bounding surface models

5.2. Modele o wzmocnieniu izotropowo-kinematycznym

Kilka różnych podejść do opisu modułu wzmocnienia i prawa translacji sklasyfikowane jest na rys.8. Hashiguchi [36] analizował zdolności poszczególnych koncepcji do opisu procesów cyklicznych.

5.3. Nowe trendy generacji III

Rozwój modeli generacji III zmierza zasadniczo w dwóch kierunkach:



Rys.8. Klasyfikacja modeli o wzmocnieniu izotropowo-kinematycznym
Fig.8. Classification of isotropic-kinematic hardening models

1. modeli uogólnionej plastyczności [62], [84] (bez definiowania powierzchni charakterystycznych),
2. różnych modeli powierzchni ograniczającej (rys. 7), o kinematycznym wzmocnieniu (rys.8) i uogólnionej plastyczności, lecz z więcej niż jednym mechanizmem deformacji plastycznych (np. [4]).

Niezależnie od tego notuje się tendencję do opisu plastyczności piasków za pomocą modeli o dwóch otwartych powierzchniach [65].

5.4. Modele hipoplastyczne

Stricte nieliniowo-przyrostowe modele dzielą się na racjonalne (wyprowadzone z rozwinięcia Cayleya-Hamiltona) - np. [41], oraz półempiryczne, konstruowane na bazie badań elementowych (np. [15]). Zalicza się do nich często także podejście endochroniczne (np. [79]).

6.PODSUMOWANIE

Celem pracy było usystematyzowanie ogromnej liczby bardzo zróżnicowanych koncepcji opisu konstytutywnego gruntów. Bardzo ograniczona objętość referatu uniemożliwiła szerszy komentarz i oceny, jak też matematyczne ujęcie i interpretację poszczególnych praw

konstytutywnych. Jest więc ta praca pewnego rodzaju przewodnikiem, umożliwiajacym racjonalne studia literaturowe.

LITERATURA

[1] Abduljauwad S. N., Al-Buraim I. M.: Study on soil - foundation interaction using the three inwariants cap model. Proc. 10th ECSMFE, Firence 1991, pp. 179-182

[2] Aboim C. A., Roth W. H.: Bounding surface plasticity theory applied to cyclic loading of sand. Proc 1st Int. Symp. Num. Models in Geomech., Zurich 1982, pp. 334-343.

[3] Atkinson J. H., Bransby P. L.: The mechanics of soils. An introduction to critical state soil mechanics. Mc Graw-Hill, London 1978.

[4] Aubry D., Hujeux J. C., Lassoudière F., Meimon Y.: A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behaviour. Proc.1st Int. Symp. Num. Models in Geomech. Zurich 1982, pp. 3-13.

[5] Baligh M. M.: Strain path method. J. Geotech. Eng., ASCE, 111, No 9, 1985, pp. 1108-1136.

[6] Banerjee S., Davis R. O., Sribalaskandarajah K.: Simple double-hardening model for geometrials. J. Geotech. Eng., ASCE, 118, No 6, 1992, pp. 889-901.

[7] Barden L.: Stresses and displacements in a cross-anisotropic soil. Geotechnique, 13, No 3, 1963, pp. 198-210.

[8] Bardet J. P.: Application of plasticity theory to soil behaviour : a new sand model. Ph. D. Thes, California Inst. of Technology, Pasadena 1984.

[9] Bardet J. P.: Modelling of sand behaviour with bounding surface plasticity. Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models in Geomech., Ghent 1986, pp. 79-90.

[10] Booker J. R., Davis E. H., Balaam N. P.: The behaviour of an elastic non homogeneous half-space. Part I. Line and point loads. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 9, 1985, pp. 353-367.

[11] Burland J. B.: Small is beautiful - the stiffness of soil at small strains. Canad. Geotech. J., 26, 1989, pp. 499-516.

[12] Chen W. F., Baladi G. Y.: Soil plasticity. Theory and implementation. Elsevier Sci. Publ., Amsterdam 1985.

[13] Croix P. D., Frossard E.: Triadh: a constitutive model and its application to the prediction and analysis of embankment dam performance. Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models in Geomech., Ghent 1986, pp. 605-615.

[14] Dafalias Y. F., Herrmann L. R.: A bounding surface soil plasticity model. Proc. Int. Symp. Soils under Cycl. Trans. Loading, Swansea 1980, pp. 335-345.

[15] Darve F.: An incrementally non-linear constitutive law: assumptions and predictions. Results Int. Workshop on Constitutive Relations for Soils, Grenoble 1982, pp 385-403.

[16] Darve F., Dendani H., Chau B.: Different classes of constitutive equations and their characteristics. Proc. Int. Workshop on Constitutive Equations for Granular Non-Cohesive Soils, Cleveland 1988, pp. 11-17.

[17] Davis R. O., Mullenger G.: A simple rate-type constitutive representation for granular media. Proc. 3rd Int. Conf. Num. Meth. Geomech., Aachen 1979, pp. 415-421.

[18] Desai C. S.: Nonlinear analyses using spline functions. J. Soil Mech. Found., ASCE, 97, SM10, 1971, pp. 1461-1480.

[19] Desai C. S., Faruque M. O.: A simplified yet general model for constitutive behavior of soils. Proc. 11th ICSMFE. San Francisco 1985, pp. 433-436.

[20 Drucker D. C., Prager W.: Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Q. Appl. Math., 10, 1952, pp. 157-165.

[21] Drucker D. C., Gibson R. E., Henkel D. J.: Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity, Trans. ASCE, 122, 1957, pp. 338-344.

[22] Duncan J. M.: Hyperbolic stress-strain relationships. Proc. Workshop on Limit Equilibrium, Plasticity and Generalized Stress-Strain in Geomech., Mc Gill University 1980, pp. 443-468.

[23] Duncan J. M., Chang C.-Y.: Nonlinear analysis of stress and strain in soils. J. Soil Mech. Found., ASCE, 96, SM5, 1970, pp. 1629-1653.

[24] Dungar R.: Piecewise linear, equivalent linear and elastoplastic solution methods. Geomechanical Modelling in Engineering Practice, Balkema, Rotterdam 1986, pp. 65-99

[25] Frossard E.: Une équation d'ecoulement simple pour les matériaux granulaires. Geotechnique, 33, No1, 1983, pp. 21-29.

[26] Gerrard C. M., Harrison W. J.: Stresses and displacements in a loaded orthorombic half-space. C.S.I.R.O. Austral. Div. Appl. Geomech, 9, 1970.

[27] Gibson R. E.: Some results concerning displacements and stresses in non-homogeneous elastic half-space. Geotechnique, 17, No 1, 1967, pp. 58-67.

[28] Gibson R. E., Sills G. C.: Settlement of a strip load on a non-homogeneous orthotropic in compressible elastic half-space. Q. J. Mech. Appl. Math., 28, 1975, pp. 233-243.

[29] Graham J., Houlsby G. T.: Anisotropic elasticity of a natural clay. Geotechnique. 33, No 2, 1983, pp. 165-180.

[30] Gryczmański M.: Teoretyczne i numeryczne podstawy geotechniki. Ref. Gen., Mat. Pokonferencyjne VIII Kraj. Konf. Mech. Grunt. i Fund., Wrocław 1989, s. 38-52.

[31] Gryczmański M.: A bounding surface soil plasticity model with a small deformation nonlinearity, Compt. Rend. 6eme Colloque Franco-Polonais de Mechanique des Sols Appliquée. Douai 1993, pp. 146-155.

[32] Gudehus G.: Elastoplastische stoffgleichungen für trockenen sand. Ing. Arch., 42, No 3, 1973, pp. 151-169.

[33] Gudehus G.: Requirements for constitutive relations for soils. Mechanics of Geomaterials, J. Wiley, New York 1985, chap. 4, pp. 47-63.

[34] Hashiguchi K.: Two and three surface models of plasticity. Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Geomech., Nagoya 1985, pp. 285-292.

[35] Hashiguchi K.: Elastoplastic constitutive model with a subloading surface. Proc. Int. Conf. Comput. Mech., Tokyo 1986, pp. 65-70.

[36] Hashiguchi K.: Theoretical assessments on basic structures of elastoplastic constitutive models. Proc. Int. Workshop on Const. Equat. for Gran. Non-Cohesive Soils, Cleveland 1988, pp. 699-715.

[37] Hashiguchi K., Ueno M.: Elastoplastic constitutive laws of granular materials. Proc. 9th ICSMFE, Tokyo 1977, Spec. Ses. 9, pp. 73-82.

[38] Houlsby G. T., Wroth C. P., Wood D. M.: Predictions of the results of laboratory tests on a clay using a critical state model. Results Int. Workshop on Const. Rel. for Soils, Grenoble 1982, pp. 99-121.

[39] Jardine R. J., Potts D. M., Fourie A. B., Burland J.B.: Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction. Geotechnique, 36, No 3, 1986, pp. 377-396.

[40] Jardine R. J., Potts D. M., St.John H. D., Hight D. W.: Some practical applications of a non-linear ground model. Proc. 10th ECSME, Firence 1991, pp. 223-228.

[41] Kolymbas D.: Eine konstitutive theorie für boden und andere körnige stoffe. Veröffentl. Inst. Bodenmech. Felsmech., Univ. Fridericiana, Karlsruhe 1988, No 109.

[42] Lade P. V.: Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. Int. J. Solids and Struct., 13, 1977, pp. 1019-1035.

[43] Lade P. V.: Single-hardening model with application to NC clay. J. Geotech. Eng., 116, No 3, 1990, pp. 394-414.

[44] Lade P. V., Duncan J. M.: Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil. J. Geotech. Eng., ASCE, 101, GT10, 1975, pp. 1037-1053

[45] Majewski St.: Elastoplastic double-cap model for structure-subsoil interaction problems. Arch. Inż Ląd., 40, No3-4, 1994, pp. 399-418.

[46] Matsuoka H., Nakai T.: A new failure condition for soils in three-dimensional stresses. Proc. IUTAM Conf. Deform. Fail. Granul. Mat., Delft 1982, pp. 253-263.

[47] Mc Dermott R. J. W.: The constant stress ratio elastic model for sand. Proc. Int. Symp. Soils under Cycl. Trans. Loading, Swansea 1980, pp. 353-376.

[48] Mróz Z.: On hypoelasticity and plasticity approaches to constitutive modelling of inelastic behaviour of soils. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech. 4, 1980, pp. 45-55.

[49] Mróz Z., Norris V. A.: Elastoplastic and viscoplastic constitutive models for soils with application to cyclic loading. Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads, J. Wiley, New York 1982, Chap. 8, pp. 173-217.

[50] Mróz Z., Pietruszczak St.: A constitutive model for sand with anisotropic hardening rule. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 7, 1983, pp. 305-320.

[51] Mróz Z., Norris V. A., Zienkiewicz O. C.: An anisotropic hardening model for soils and its application to cyclic loading. Int. J. Num. Anal.Meth. Geomech., 2, 1978, pp. 203-221.

[52] Mróz Z., Norris V. A., Zienkiewicz O. C.: Application of an anisotropic hardening model in the analysis of elasto-plastic deformation of soils. Geotechnique, 29, No 1, 1979, pp. 1-34.

[53] Mróz Z., Norris V. A., Zienkiewicz O. C.: An anisotropic critical state model for soils subject to cyckic loading. Geotechnique, 31, No 4, 1981, pp. 451-469.

[54] Nova R.: On the hardening of soils. Arch. Mech. Stos., 29, No 3, 1977, pp. 445-458.

[55] Nova R.: A constitutive model for granulars media. Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models Geomech., Ghent 1986, pp. 123-130.

[56] Nova R.: Sinfonietta classica: an exercise on classical soil modelling. Proc. Int. Workshop on Const. Equat. for Gra. Non-Cohesive Soils, Cleveland 1988, pp. 501-519.

[57] Nova R., Wood D. M.: A constitutive model for sand in triaxial compression. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 3, 1979, pp. 255-278.

[58] Ohmaki S.: A mechanical model for the stress-strain behaviour of normally consolidated cohesive soil. Soils and Foundations, 18, No 3, 1979, pp. 29-44.
[59] Ohta H., Yoshitani S., Hata S.: Anisotropic stress-strain relationship of clay and its application to finite element analysis. Soils and Foundations 15, No 4, 1975, pp.61-79.
[60] Pande G. N., Pietruszczak St.: A critical look on constitutive models for soils. Geomechanical modelling in engineering practice, Balkema, Rotterdam 1986, chap. 16, pp. 369-395.
[61] Pande G.N., Sharma K. G.: Multilaminate model for clays a numerical evaluation of the influence of rotation of the principal stress axes. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 7, 1983, pp. 397-418.
[62] Pastor M., Zienkiewicz O. C.: A generalized plasticity hierarchical model for sand under monotonic and cyclic loading. Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models in Geomech., Ghent 1986, pp. 131-150.
[63] Pietruszczak St.: Problemy brzegowe dla sprężysto-plastycznych modeli gruntów. Rozpr. dokt., IPPT PAN, Warszawa 1979.
[64] Pietruszczak St., Mróz Z.: On hardening anisotropy of K_o-consolidated clays. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 7, 1983, pp. 19-38. .
[65] Poorooshasb H. B., Pietruszczak St.: On yielding and flow of sand: a generalized two-surface model. Computers and Geotechnics, 1, 1985, pp. 33-58.
[66] Prévost J.-H.: Mathematical modelling of monotonic and cyclic undrained clay behaviour. Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., 1, 1977, pp. 195-216.
[67] Prévost J.-H., Höeg K.: Effective stress-strain-strength model for soils. J. Geotech. Eng., ASCE, 101, GT3, 1975, pp. 259-278.
[68] Pu J.-L., Li G.-X., Sun Y.-S.: A three-dimensional elasto-plastic model for sands. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco 1985, pp. 621-624.
[69] Roscoe K. H., Burland J. B.: On the generalized stress–strain behaviour of „wet" clay. Engineering Plasticity, Cambridge Univ. Press, Oxfordshire 1968, pp. 539-609.
[70] Rowe P. W.: Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soil. Roscoe Mem. Symp., Cambridge Univ. 1971, pp. 143-192.
[71] Sandler I. S., Di Maggio F. L., Baladi G. Y.: Generalized cap model for geological materials. J. Geotech. Eng., ASCE, 102, GT7, 1976, pp. 683-699.
[72] Sawicki A.: Mechanika gruntów dla obciążeń cyklicznych. Wyd. IBW PAN, Gdańsk 1991.
[73] Schofield A. N.: Cambridge geotechnical centrifuge operations. Geotechnique, 30, No 3, 1980, pp. 227-268.
[74] Schofield A. N., Wroth C. P.: Critical state soil mechanics. Mc Graw-Hill, London 1968.
[75] Stallebrass S. E.: Modelling the effects of recent stress history on the deformation of overconsolidated soils. Ph. D. Thesis, City Univ., London 1990.
[76] Stipho A. S.: Extended critical state model for anisotropically consolidated clays. Proc. 1st Int. Symp. Num. Models in Geomech., Zurich 1982, pp. 183-188.
[77] Topolnicki M.: An elasto-plastic subloading surface model for clay with isotropic and kinematic mixed hardening parameters. Soils and Foundations, 30, No 2, 1990, pp. 103-113.

[78] Valanis K. C., Read H. E.: A new endochronic plasticity model for soils. Soils Mechanics - Transient and Cyclic Loads, J. Wiley, London 1982, chap 14, pp. 357-417.
[79] Vermeer P. A.: A double hardening model for sand. Geotechnique, 28, No 4, 1978, pp. 413-433.
[80] Whittle A. J.: Evaluation of a constitutive model for overconsolidated clays. Geotechnique, 43, No 2, 1993, pp. 289-313.
[81] Wilde P.: Two invariants-dependent models of granulars media. Arch. Mech. Stos., 29, No 6, 1977, pp. 799-809.
[82] Wood D. M.: Soil behaviour and critical state soil mechanics. Cambridge Univ. Press, New York 1990
[83] Yu Y., Axelsson K.: A plasticity model for silt. Proc. 4th Int. Symp. Num. Models in Geomech., Swansea 1992, pp. 37-45.
[84] Zienkiewicz O. C., Mróz Z.: Generalized plasticity formulation and applications to geomechanics. Mechanics of engineering materials, J. Wiley, New York 1984, Chap. 33, pp. 655-679.

Recenzent: Dr hab. Zbigniew Sikora
prof. Politechniki Gdańskiej

Wpłynęło do Redakcji: 07.06.1995 r.

Abstract

There exist many constitutive models describing mechanical soil behaviour nowadays. To facilitate a proper selection of stress–strain relations for a geotechnical problem sol - d some their systematics becomes simply necessary. There is not yet any complete soil model classification in the world literature.

A proposal presented in the paper is based on the division of all constitutive soil models into three generations comprising classical, incrementally bilinear and incrementally non-linear ones.

More important model families: linear elastic, rigid – perfectly plastic, critical state soil mechanics, cap, hypoelastic, bounding surface soil plasticity and isotropically – kinematics hardening ones, belonging to various generations are classified in detail (Fig. 1–8). At each of 72 models taken into account in the classification (except two cases) the reference to the literature is inserted.