

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet

Dr Mirjana Vukićević
Dr Sanja Jocković

KONSTITUTIVNI MODELI ZA TLO II
ELASTO-PLASTIČNI MODELI SA
IMPLEMENTACIJOM U NUMERIČKOJ
ANALIZI

AKADEMSKA MISAO
Beograd, 2021.

Dr Mirjana Vukićević
Dr Sanja Jocković

KONSTITUTIVNI MODELI ZA TLO II
ELASTO-PLASTIČNI MODELI SA IMPLEMENTACIJOM
U NUMERIČKOJ ANALIZI

Recenzenti:

Dr Selimir Lelović
Dr Miroslav Živković
Dr Dragan Rakić

Izdavači

Univerzitet u Beogradu – Građevinski fakultet
AAkademski misao, Beograd

Štampa

Planeta print, Beograd

Tiraž

300 primeraka

ISBN 978-86-7466-881-8

NAPOMENA: Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige u celini ili u delovima - nije dozvoljeno bez saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača.

PREDGOVOR

Sadejstvo konstrukcije i tla postoji kod svih vrsta građevinskih objekata, bilo da su objekti saobraćajne infrastrukture, hidrotehnički objekti ili objekti visokogradnje. U kojoj meri i na koji način ponašanje tla utiče na ponašanje konstrukcije zavisi od vrste tla na kome (ili u kome) se gradi objekat, konstruktivnog sistema, vrste opterećenja kao i od načina izvođenja objekta. Uspostavljanje realnih veza između napona i deformacija, odnosno konstitutivno modeliranje tla, ima veliki značaj za ocenu nosivosti, upotrebljivosti i trajnosti objekata.

Razvoj računara i numeričkih metoda za proračun konstrukcija doprineli su ubrzanom razvoju i primeni složenijih i tačnijih konstitutivnih modela za tlo. Gotovo je nemoguće za sve vrste tla formirati jedinstven konstitutivni model, a da on istovremeno omogućava relativno jednostavnu primenu u projektantskoj inženjerskoj praksi.

U literaturi postoji veliki broj predloženih modela, koji se mogu svrstati u tri velike grupe: elastični, elasto-plastični i ostali modeli koji se zasnivaju na interakciji čestica, mehanici loma ili termodinamici. U praksi se još uvek najčešće koriste elastični modeli zbog njihove jednostavnosti, ali se sve više primenjuju elasto-plastični modeli koji su implementirani u komercijalne softverske pakete za proračun konstrukcija. Većina komercijalnih softvera ima u ponudi neke od više ili manje složenih konstitutivnih modela. Kod projekatata se vrlo često javlja dilema oko izbora modela za konkretan problem. Imajući to u vidu, postoji potreba da se domaća stručna javnost upozna sa teorijskim osnovama konstitutivnog modeliranja tla, vrstama modela i njihovom implementacijom.

U domaćoj literaturi je do sada objavljena samo jedna knjiga koja se bavi temom konstitutivnog modeliranja tla, *Konstitutivni modeli tla, I deo – Elastični modeli*, M. Lazović, M. Vukićević (1997) koja je obuhvatila klasu elastičnih modela (Cauchy-ev model, Green-ov "hiper" elastični model, linearno elastični modeli, hipoelastični modeli). Knjiga koja se bavi elasto-plastičnim modelima predstavlja logički nastavak najavljen u prethodnoj knjizi. Knjiga je namenjena građevinskim inženjerima koji se bave rešavanjem geotehničkih problema primenom numeričkih metoda i ima za cilj da pomogne u razumevanju kompleksne oblasti naponsko-deformacijskog ponašanja tla.

Knjiga je podeljena na pet poglavlja. U prvom poglavlju data su opšta razmatranja vezana za naponsko-deformacijsko ponašanje tla, u kome su na sažet način navedene sve bitne fizičko-mehaničke osobine tla kao specifičnog materijala i njihov uticaj na ponašanje tla. Osim toga, opisane su i teorijske postavke konstitutivnog modeliranja kojima se tlo tretira kao elasto-plastični kontinuum. U drugom poglavlju dat je istorijski pregled razvoja elasto-plastičnih konstitutivnih modela sa sažetim prikazom klasa modela u zavisnosti od vrste tla i uslova opterećenja. U trećem poglavlju detaljno su analizirani odabrani modeli sa aspekta primenljivosti za određene vrste tla, pogodnosti za primenu u numeričkim metodama i dostupnosti (pouzdanosti) ulaznih parametara. Čvrsto poglavlje se bavi primenom elasto-plastičnih modela u numeričkoj analizi metodom konačnih elemenata (MKE). Za primenu elasto-plastičnih modela u MKE neophodno je izvršiti numeričku

integraciju napona (konstitutivnih relacija), jer su u osnovnim jednačinama modela osnovne nepoznate veličine naponi, a u MKE deformacije, odnosno pomeranja. U ovom poglavlju prikazane su najpoznatije metode za integraciju napona, kao i primena pogodnih metoda na nekoliko odabranih modela. U petom poglavlju prikazan je postupak vrednovanja modela da bi se on koristio u numeričkoj analizi, koji se sprovodi postupkom validacije (slaganje ponašanja modela sa ponašanjem realnog tla) i verifikacije (utvrđivanje da li su svi parametri i relacije konstitutivnog modela tačno definisani i implementirani u program za numeričku analizu). Na kraju su u prilogu dati algoritmi numeričke integracije napona za dva konstitutivna modela, MCC (Modified Cam Clay) i HASP (originalni model autora), kao i kod napisan Fortran programskim jezikom za integraciju MCC i HASP modela.

Autori

dr Mirjana Vukićević, dipl. građ. inž.
dr Sanja Jocković, dipl. građ. inž.

Sadržaj

1. OPŠTA RAZMATRANJA NAPONSKO-DEFORMACIJSKOG PONAŠANJA TLA	1
1.1 UVOD.....	1
1.2 TEORIJSKE OSNOVE	3
1.2.1 Principi mehanike kontinuuma	5
1.2.2 Elasto-plastično ponašanje tla.....	9
1.2.3 Princip efektivnih napona	14
1.2.4 Koncept kritičnog stanja	14
1.2.5 Kriterijumi loma za tlo.....	17
1.3 PONAŠANJE PREKONSOLIDOVANIH GLINA I ZBIJENIH PESKOVA	19
1.4 ZAVISNOST KRUTOSTI TLA OD VELIČINE DEFORMACIJA	23
Reference	27
2. PREGLED RAZVOJA KONSTITUTIVNIH MODELA	30
2.1 UVOD.....	30
2.2 PRVA GENERACIJA KONSTITUTIVNIH MODELA	30
2.3 DRUGA GENERACIJA KONSTITUTIVNIH MODELA	32
2.4 TREĆA GENERACIJA KONSTITUTIVNIH MODELA	34
2.5 HIPERPLASTIČNI I HIPOPLASTIČNI MODELI.....	35
Reference	37
3. ELASTO-PLASTIČNI KONSTITUTIVNI MODELI ZA TLO	40
3.1 UVOD.....	40
3.2 MOHR-COULOMB-ov MODEL	40
3.2.1 Mohr-Coulomb-ov kriterijum loma.....	40
3.2.2 Generalisani Mohr-Coulomb-ov (MC) konstitutivni model	41
3.2.3 Parametri MC modela.....	42
3.3 DRUCKER-PRAGER-ov MODEL	44
3.3.1 Parametri Drucker-Prager-ovog modela.....	45
3.4 HARDENING SOIL (HS) MODEL	45
3.4.1 Smičući mehanizam ojačanja (zbijena i prekonsolidovana tla).....	47
3.4.2 Kompresioni mehanizam ojačanja (normalno konsolidovana tla).....	49

3.4.3 Parametri HS modela	51
3.5 HARDENING SOIL SMALL (HSS) MODEL	52
3.5.1 Parametri HSS modela	53
3.6 CAM CLAY (CC) MODEL.....	54
3.6.1 Zakon tečenja	54
3.6.2 Zakon ojačanja	55
3.6.3 Elastične karakteristike	55
3.7 MODIFIKOVANI CAM CLAY (MCC) MODEL	55
3.7.1 Zakon tečenja	56
3.7.2 Zakon ojačanja	56
3.7.3 Parametri MCC modela.....	58
3.8 HASP MODEL	62
3.8.1 Zakon ojačanja za površ tečenja.....	64
3.8.2 Koncept parametra stanja	67
3.8.3 Parametar stanja za imaginarnu tačku	69
3.8.4 Stepen prekonsolidacije.....	71
3.8.5 Parametar stanja i ponašanje prekonsolidovanih glina.....	73
3.8.6 Koeficijent ojačanja ω	74
3.8.7 Karakteristike HASP modela u dreniranim uslovima	75
3.8.8 Karakteristike HASP modela u nedreniranim uslovima.....	78
3.8.9 Parametri HASP modela	80
3.9 MODEL ZA CIKLIČNA OPTEREĆENJA.....	81
3.9.1 Granična površ i površ tečenja	82
3.9.2 Zakon tečenja	83
3.9.3 Kinematičko ojačanje	83
3.9.4 Izotropno ojačanje	84
3.9.5 Promena plastičnog modula	84
3.9.6 Elastične karakteristike	86
3.9.7 Parametri modela	86
3.10 “BUBBLE” MODEL	87
3.10.1 Granična površ i površ tečenja.....	87
3.10.2 Zakon tečenja	87
3.10.3 Zakon ojačanja	88
3.10.4 Elastične karakteristike	89
3.10.5 Parametri “Bubble” modela	89

3.11 PROŠIREN SEKIGUCHI-OHTA MODEL	89
3.11.1 Površ tečenja	90
3.11.2 Zakon tečenja	90
3.11.3 SMP kriterijum i transformisani naponski prostor.....	91
3.11.4 Parametri Sekiguchi-Ohta modela	94
Reference	95
4. INTEGRACIJA KONSTITUTIVNIH RELACIJA ELASTO-PLASTIČNIH MODELA KOD REŠAVANJA MATERIJALNO NELINEARNIH PROBLEMA METODOM KONAČNIH ELEMENATA	99
4.1 UVOD	99
4.2 EULER-ova INTEGRACIJA UNAPRED.....	102
4.3 METODA GENERALIZOVANOG TRAPEZNOG PRAVILA.....	103
4.4 METODA GENERALIZOVANOG PRAVILA SREDNJE TAČKE.....	104
4.5 METODA POVATNOG PRESLIKAVANJA.....	105
4.6 IMPLICITNE METODE	107
4.6.1 Metoda vodećeg parametra (GPM metoda).....	108
4.7 PRIMENA METODE VODEĆEG PARAMETRA NA ODABRANIM KONSTITUTIVNIM MODELIMA	111
4.7.1 Integracija konstitutivnih relacija Modifikovanog Cam Clay modela.....	111
4.7.2 Integracija konstitutivnih relacija modela za ciklična opterećenja (Mroz, Norris i Zienkiewicz)	118
4.7.3 Integracija konstitutivnih relacija HASP modela	123
Reference	132
5. VALIDACIJA I IMPLEMENTACIJA HASP MODELA	133
5.1 UVOD	133
5.2 VALIDACIJA HASP MODELA	133
5.2.1 Materijali korišćeni za validaciju.....	134
5.3 IMPLEMENTACIJA HASP MODELA.....	139
5.3.1 Verifikacija postupka numeričke integracije metodom GPM.....	139
5.3.2 Primer primene HASP modela – Konsolidacija sloja gline.....	146
Reference	157

Prilog 1. ALGORITAM NUMERIČKE INTEGRACIJE HASP I MCC	
MODELATLA	158
A.1 Algoritam za proračun napona i funkcije tečenja u konfiguraciji $t+\Delta t$ za poznati vodeći parametar	158
A.2 Algoritam za numeričku integraciju HASP modela.....	159
A.3 Algoritam za numeričku integraciju MCC modela.....	160
UMAT for Abaqus – Fortran code for HASP model.....	161
UMAT for Abaqus – Fortran code for MCC model	171
DICTIONARY for Fortran code.....	181
LISTA SIMBOLA	183