

NUMERIČKO MODELIRANJE DISKONTINUIRANOG STIJENSKOG MATERIJALA U ELASTIČNOM PODRUČJU

Biljana KOVAČEVIĆ-ZELIĆ, Davorin KOVAČIĆ i Slavko VUJEC

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6,
HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Glavne riječi: Numeričko modeliranje, Konstitutivni zakoni, Teorija elastičnosti, Stijenski materijal, Diskontinuiranost, Anizotropija, Ekvivalentni materijali, FLAC

Key-words: Numerical modelling, Constitutive laws, Theory of elasticity, Rock material, Discontinuity, Anisotropy, Equivalent material approach, FLAC

Konstitutivni odnosi stijenskih materijala predstavljaju važnu komponentu u numeričkom modeliranju. Zbog kompleksne prirode stijenskih materijala nije moguće izabrati opće prihvatljiv konstitutivni zakon. Ispitane su mogućnosti primjene nekih modela (konstitutivnih zakona) u okviru teorije elastičnosti: modeli izotropne i transverzalne izotropne elastičnosti, te modeli "ekvivalentnog" materijala. Proveden je i niz parametarskih analiza, kako bi se utvrdio utjecaj diskontinuiteta, odnosno njegovih svojstava, na svojstva "ekvivalentnih materijala". Usporedba navedenih konstitutivnih zakona načinjena je numeričkim modeliranjem pokusa direktnog smicanja uporabom programskog paketa FLAC.

Constitutive relationships of rock materials are an important component of the numerical modelling. It is not possible to find a generally acceptable constitutive law for rock materials, because of their complex nature. In this paper, the applicability of some models within the framework of theory of elasticity are examined. The analyses are carried out using next models: isotropic and transversely isotropic model, and 'equivalent' material approach. The parametric study is also made to examine the influence of discontinuities on the parameters of the equivalent materials. The comparison of above mentioned models is made through numerical modelling of the direct shear test. The analysis were performed with finite difference code FLAC.

Uvod

Mehaničko ponašanje stijenskih materijala u pravilu je vrlo kompleksno. Zbog toga nije moguće definirati opće prihvatljiv konstitutivni model, tj. vezu između naprezanja i deformacija. U rješavanju praktičnih zadataka trebalo bi odabrati takav model kojim se pojednostavljuje stvarni odnos naprezanja i deformacija, ali tako da još uvijek daje rezultate bliske stvarnim. Kod toga je važno utvrditi koji se parametri neizostavno moraju ugraditi u model a koji se mogu zanemariti. U tom kontekstu ideja o dominantnom utjecaju diskontinuiteta na mehaničko ponašanje stijenskih materijala već je dulje vrijeme prisutna u istraživanjima iz područja mehanike stijena.

Tako Singh (1973) tvrdi da prisutnost diskontinuiteta uzrokuje pojavu anizotropije deformabilnosti stijenskog materijala, te da lom u takvom materijalu značajno ovisi o orijentaciji i svojstvima diskontinuiteta. Zbog toga klasična teorija izotropne elastičnosti ne može dati zadovoljavajuće rezultate.

Wittke (1977) navodi da pojava diskontinuiteta uzrokuje smanjenje posmične i vlačne čvrstoće duž plohe diskontinuiteta, te anizotropiju čvrstoće stijenskog materijala. Ovisno o razmatranom problemu i tipu opterećenja odnos naprezanja i deformacija ovisit će više ili manje o intaktnoj stijeni ili o diskontinuitetima.

Deformabilnost diskontinuiteta je značajna komponenta u ponašanju stijenske mase pri promjenjivim uvjetima naprezanja. Na relativno

niskim razinama naprezanja deformacije na diskontinuitetima dominantne su u odnosu na elastične deformacije intaktne stijene. S povećanjem naprezanja, deformacije na diskontinuitetima opet će predstavljati znatan dio ukupne deformacije (B a n d i s et al., 1983).

Prema načinu pojavljivanja diskontinuiteta u stijenskom materijalu Wittke (1977) preporučuje korištenje dva konstitutivna modela. U slučaju kada u stijenskom materijalu postoji velik broj diskontinuiteta proizvoljne orijentacije, može se koristiti linearno elastičan izotropan model. Ako su međutim svi diskontinuiteti približno iste orijentacije odnosno paralelni, trebalo bi koristiti model anizotropne elastičnosti. Naravno, u oba slučaja pretpostavlja se da je naprezanje bitno manje od čvrstoće materijala odnosno da su sve deformacije elastične.

Problem modeliranja diskontinuiteta vezan je također uz raspoloživost podataka o njima. Tako je za dominantne diskontinuitete moguće dobiti dovoljno točne podatke o njihovom položaju i orijentaciji. Nasuprot tome, pukotine se mogu poznavati samo statistički tj. njihova dominantna orijentacija i razmak mogu se utvrditi s određenom mjerom vjerojatnosti (G o o d m a n & S t. J o h n, 1977).

U numeričkom smislu, prva vrsta diskontinuiteta može se modelirati izravno korištenjem specijalne vrste elemenata. Druga se vrsta diskontinuiteta modelira posredno korištenjem različitih kvazikontinuum modela, koji u sebi sadrže prosječni

utjecaj diskontinuiteta (Singh, 1973; Carter et al., 1991).

Tema ovog članka upravo je ispitivanje mogućnosti numeričkog modeliranja diskontinuiranog stijenskog materijala nekom od posrednih metoda, kao i usporedba s rezultatima dobivenim uporabom linearno elastičnog izotropnog modela. Pri tome se ispituje samo područje elastičnih deformacija. Pojava trajnog deformiranja i plastifikacije materijala razmatra se u drugom članku (Kovačević-Zelić et al., 1995).

Modeliranje pokusa direktnog smicanja

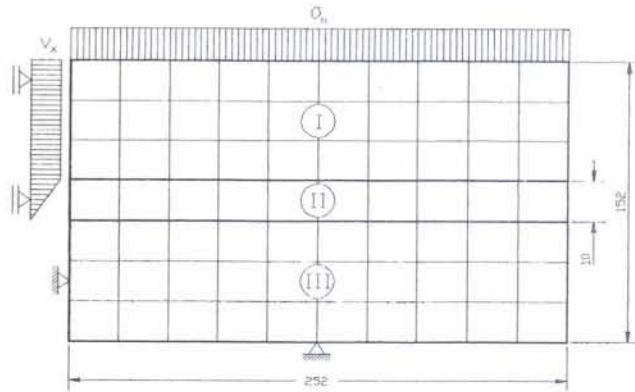
U svrhu ispitivanja primjenjivosti različitih konstitutivnih modela na stijenske materijale, proveden je niz numeričkih analiza pokusa direktnog smicanja (Kovačević-Zelić, 1994). U skladu s ograničenjem na elastične deformacije, za prikaz u ovom radu izdvojene su samo analize kod kojih iznos horizontalnog pomaka ne prelazi 2 mm.

Numerički proračuni provedeni su uporabom programskog paketa FLAC - *Fast Lagrangian Analysis of Continua* (1991). FLAC je specijalizirani kompjutorski program za numeričko rješavanje zadataka iz područja mehanike stijena i mehanike tla. Problem statičke ravnoteže formuliran je preko jednadžbi gibanja. Kvazistatičko rješenje dobiva se uvođenjem mehaničkog prigušenja u kojem su čvorne sile prigušenja proporcionalne veličinama neuravnoteženih čvornih sila (reziduala). Geometrijska i vremenska diskretizacija provedene su metodom konačnih razlika, uz korištenje eksplicitnog vremenskog algoritma. U program je ugrađen cijeli niz konstitutivnih odnosa, od kojih su u ovom radu korištena dva:

- model izotropnog materijala i
- model transversalno izotropnog materijala.

Osnovna mreža modela s graničnim uvjetima prikazana je na slici 1. Zone I i III predstavljaju gornji i donji dio uzorka ugrađen u pomičnu odnosno nepomičnu kutiju aparata za direktno smicanje, a zona II predstavlja posmičnu plohu. Prva faza pokusa (nanošenje vertikalne sile odnosno normalnog naprezanja σ_n) modelirana je preko početnog stanja naprezanja koje odgovara jednolikoj raspodjeli naprezanja za slučaj spriječenog bočnog širenja. Posmična sila (druga faza pokusa) zadana je u modelu pomoću brzina v_x u određenim točkama, što odgovara pokusu s kontroliranim prirastom deformacija. Sve analize provedene su za slučaj ravnog stanja deformacija.

Modelirane su dvije vrste uzoraka: uzorci bez diskontinuiteta (homogeni, izotropni elastični materijal) i uzorci koji sadrže jednu familiju paralelnih planarnih diskontinuiteta bez ispune. Usvojene vrijednosti svojstava intaktne stijene i diskontinuiteta prikazane su u tablici 1. Premda je primjer hipotetički, vrijednosti parametara koji opisuju geometriju i mehaničko ponašanje stijenske mase odgovaraju prirodnim uvjetima i materijalu.



Sl. 1. Osnovna mreža s graničnim uvjetima
Fig. 1. Basic mesh and boundary conditions

Pretpostavljeni razmak diskontinuiteta od 0,01 do 10,0 m smatra se dovoljnim rasponom s obzirom na dimenzije objekata koji se izvode u stijenskim

Tablica 1. Svojstva intaktne stijene i diskontinuiteta, (Crosta, 1993)
Table 1. Properties of intact rock and rock joint, (Crosta, 1993)

SVOJSTVO (PROPERTY)	STIJENA (INTACT ROCK)	DISKONTINUITET (ROCK JOINT)
gustoća (density), ρ (kg/m ³)	2,5	-
Young-ov modul (Young's modulus), E (GPa)	24,4-77,1	-
Poisson-ov koeficijent (Poisson's ratio), ν	0,3	-
modul volumne promjene (bulk modulus), K (GPa)	20-50	-
posmični modul (shear modulus), G (GPa)	9-30	-
normalna krutost (normal stiffness), k_n (GPa/m)	-	70-100
posmična krutost (shear stiffness), k_s (GPa/m)	-	5-10
kut anizotropije (angle of anisotropy), Θ (°)	-	0-180

materijalima (kosine, tuneli, temelji).

U svrhu usporedbe navedenih konstitutivnih modela promatrane su srednje vrijednosti posmičnih naprezanja u zoni smicanja (zona II) pri istoj posmičnoj deformaciji.

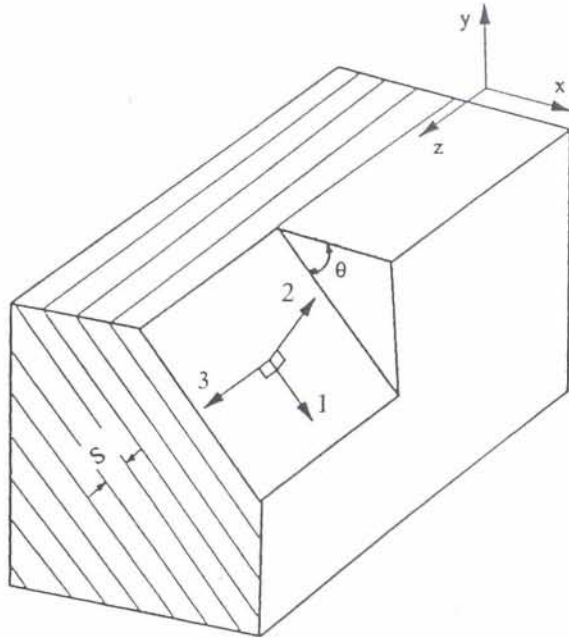
Konstitutivni zakoni

Ukratko će biti opisane osnove modela ekvivalentnog transversalno izotropnog materijala (specijalni slučaj anizotropije) i modela ekvivalentnog izotropnog materijala. Oba modela polaze od pretpostavke da stijenski materijal sadrži jednu familiju paralelnih diskontinuiteta, što je često prisutno u sedimentnim, a ponekad i u metamorfnim stijenama (sl. 2).

Pretpostavlja se još da je intaktna stijena izotropna linearno elastična, čije je mehaničko ponašanje opisano Youngovim modulom elastičnosti E i Poissonovim koeficijentom ν , odnosno posmičnim modulom G. Diskontinuiteti se nalaze na približno jednakom razmaku s , a njihovo ponašanje u elastičnom području opisano je konstantama k_n za normalnu i k_s za posmičnu krutost.

Takav materijal ima ova svojstva: kroz sve točke tijela prolaze paralelne ravnine elastične simetrije

(ravnine 1-3) u kojima su svim smjerovi elastično ekvivalentni, a nazivaju se još i ravnine izotropije. Os 2 postavljena je okomito na tu ravninu, a osi 1 i 3 proizvoljno su smještene u njoj. Koordinatni sustav razmatranog problema x-y-z može biti zakrenut u



Sl. 2. Fizički model diskontinuiranog stijenskog materijala
Fig. 2. Physical model of the discontinuous rock material

odnosu na koordinatni sustav 1-2-3 za kut Θ tzv. kut anizotropije.

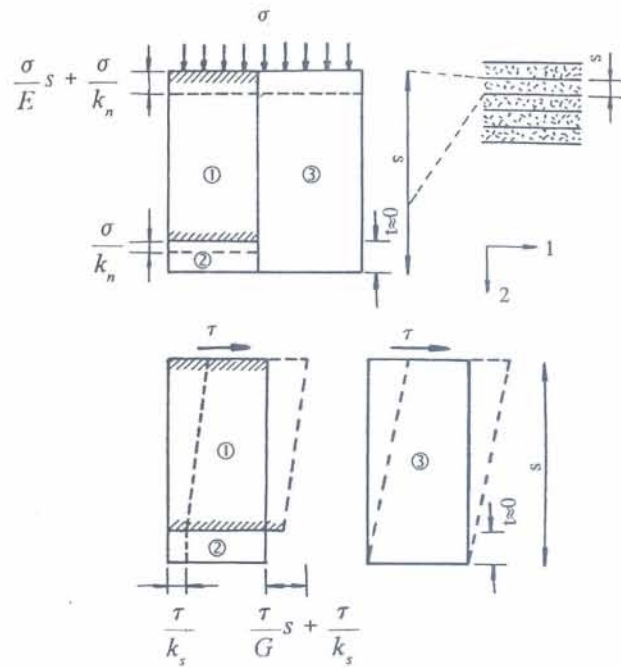
Oba navedena modela pretvaraju takav diskontinuirani stijenski materijal u kvazikontinuum pridjeljujući mu zamjenjujuće elastične konstante, koje u sebi sadrže utjecaj kako intaktne stijene tako i prisutnih diskontinuiteta. To je i razlog zbog kojeg se u nazivu ovih modela nalazi pridjev 'ekvivalentni'.

Model ekvivalentnog transverzalno izotropnog materijala

Osnove teorije elastičnosti anizotropnih tijela postavljene su još 1967. (L e k h n i t s k i i, 1981). Iako je poznato da su mnoge stijene anizotropne, češće se u mehanici stijena pri rješavanju problema uzimala pretpostavka izotropnosti materijala. Razlog tome jeste dijelom kompleksnost teorije anizotropnih tijela, a dijelom ograničenost eksperimentalnih podataka o svojstvima takvih materijala.

Međutim sadrži li stijena jednu familiju diskontinuiteta, moguće je dobiti indirektno za dvodimenzionalni slučaj konstante ekvivalentnog transverzalno izotropnog materijala (G o o d m a n, 1989).

Elastične konstante ekvivalentnog transverzalno izotropnog modela dobivaju se izjednačavanjem deformacija zamjenjujućeg transverzalno izotropnog modela i diskontinuiranog stijenskog materijala



Sl. 3. Prikaz jednoliko diskontinuirane stijene ekvivalentnim transverzalno izotropnim modelom

Fig. 3. Representation of uniformly discontinuous rock by equivalent transversely isotropic model
Legenda (Legend)

- ① Intaktna stijena (Intact rock)
- ② Diskontinuitet (Discontinuity)
- ③ Ekvivalentni materijal (Equivalent material)

(zanemarive debljine diskontinuiteta t) pri nanošenju posmičnog τ i normalnog napreznja σ (sl. 3).

Osi koordinatnog sistema 1 i 2 postavljene su paralelno i normalno na diskontinuitet. Prema dosada navedenom slijedi:

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{G} + \frac{1}{k_s s} \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{1}{E} + \frac{1}{k_n s} \quad (2)$$

$$\nu_{12} = \nu \quad (3)$$

$$E_1 = E \quad (4)$$

$$\nu_{21} = \frac{E_2}{E} \nu \quad (5)$$

Pri tome su E_1 i E_2 Youngovi moduli u smjeru osi 1 i 2; ν_{21} je Poissonov koeficijent za relativnu normalnu deformaciju u smjeru osi 1 u odnosu na relativnu normalnu deformaciju u smjeru osi 2, kada se jednoosno normalno napreznje nanosi u smjeru osi 2; Poissonov koeficijent ν_{12} analogno je definiran

za slučaj normalnog naprezanja u smjeru osi 1; G_{12} je modul smicanja u smjeru osi 1.

Model ekvivalentnog izotropnog materijala

U slučaju kada je stijenski materijal jako razlomljen tj. ima niz diskontinuiteta proizvoljne orijentacije, od kojih niti jedan nije dominantan po prostiranju ili svojstvima, može se koristiti model ekvivalentnog izotropnog materijala. Ovo se pokazuje naročito pogodnim ukoliko se svojstva intaktnog materijala i diskontinuiteta mjere u laboratoriju odvojeno (F o s u m, 1985).

Polazeći od transverzalno izotropnog modela Amadei-Goodman i procedure uprosječivanja Christensen-Waals (prema F o s s u m, 1985), Fossum je dobio slijedeće izraze za efektivne konstante ekvivalentnog izotropnog materijala:

$$K' = \frac{1}{9} E \left[\frac{3(1+\nu)s k_n + 2E}{(1+\nu)(1-2\nu)s k_n + (1-\nu)E} \right] \quad (6)$$

$$G' = \frac{1}{30} \left[\frac{E}{(1+\nu)} \frac{9(1+\nu)(1-2\nu)s k_n + (7-5\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)s k_n + (1-\nu)E} \right] + \frac{2}{5} \frac{E s k_s}{2(1+\nu)s k_s + E} \quad (7)$$

Pri tome je K' efektivni modul volumenske promjene, a G' efektivni modul smicanja. Iz ova dva izraza uočava se da za velike vrijednosti razmaka diskontinuiteta efektivni moduli K' i G' postaju identični modulima K i G izotropno elastičnog materijala. Drugim riječima, ako je razmak diskontinuiteta dovoljno velik stijenska masa ponaša se kao intaktna stijena.

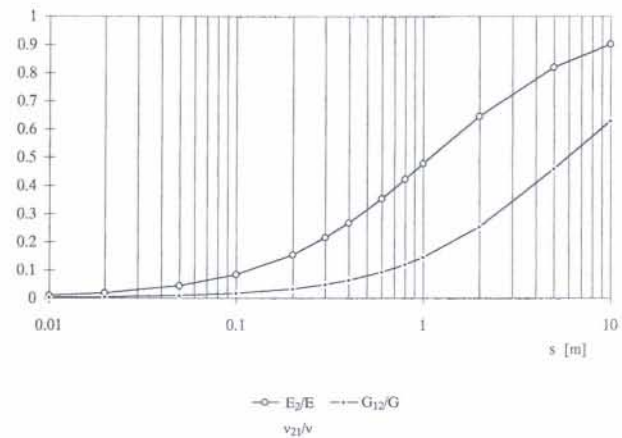
Parametarske analize

U prethodnom su poglavlju navedeni izrazi za elastične konstante ekvivalentnog transverzalno izotropnog i ekvivalentnog izotropnog materijala. Očigledno je da će pojava diskontinuiteta utjecati na veličine tih konstanti, pa time i na deformabilnost materijala pri vanjskom opterećenju. Nije međutim odmah jasno koje će od navedenih svojstava diskontinuiteta imati dominantan utjecaj. Da bi se to utvrdilo provedene su parametarske analize.

Utjecaj diskontinuiteta na vrijednosti elastičnih konstanti ekvivalentnog transverzalno izotropnog modela

Na temelju izraza (1), (2) i (5), za razne vrijednosti svojstva diskontinuiteta s , k_n i k_s dobivene su odgovarajuće vrijednosti svojstva ekvivalentnog transverzalno izotropnog modela G_{12} , E_2 i ν_{21} . Pokazalo se da razmak diskontinuiteta s ima najveći utjecaj na rezultate ove analize, pa je pripadajući dijagram prikazan na slici 4.

Utjecaj posmične i normalne krutosti diskontinuiteta pokazao se manje značajnim,



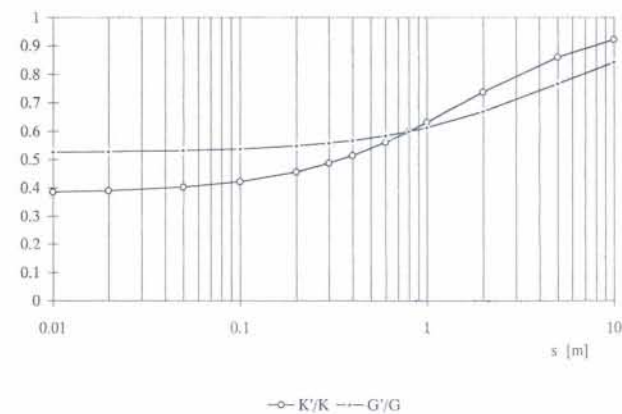
Sl. 4. Ovisnost elastičnih konstanti ekvivalentnog transverzalno izotropnog modela o razmaku diskontinuiteta
Fig 4. Relationship between elastic constants of equivalent transversely isotropic model and spacing of discontinuities

djelomično zbog malog raspona ovih svojstava navedenih u tablici 1. Utjecaj ovih parametara nije bilo moguće detaljnije ispitati zbog nedostatka valjanih eksperimentalnih ispitivanja (J i n g et al., 1992).

Utjecaj diskontinuiteta na vrijednosti elastičnih konstanti ekvivalentnog izotropnog modela

Kako se iz izraza (6) i (7) također uočava utjecaj diskontinuiteta na svojstva ekvivalentnog izotropnog materijala, provedena je parametarska analiza u kojoj su za razne vrijednosti svojstava diskontinuiteta s , k_n i k_s dobivene odgovarajuće vrijednosti efektivnih modula K' i G' .

Kao i kod prethodnog modela uočeno je da razmak diskontinuiteta ima najveći utjecaj na



Sl. 5. Ovisnost elastičnih konstanti ekvivalentnog izotropnog modela o razmaku diskontinuiteta
Fig 5. Relationship between elastic constants of equivalent isotropic model and spacing of discontinuities

efektivne module K' i G' , a rezultati ove analize prikazani su na slici 5. Utjecaj normalne i posmične krutosti diskontinuiteta pokazao se manje značajnim i u ovom slučaju.

Utjecaj diskontinuiteta na mehaničko ponašanje stijenskog materijala u pokusu direktnog smicanja

Prethodne parametarske analize ukazale su na značaj prisutnosti diskontinuiteta unutar stijenskog materijala. Uočeno je da će na mehaničko ponašanje u elastičnom području dominantno utjecati veličina razmaka diskontinuiteta, bilo da u analizama koristimo model ekvivalentnog transverzalno izotropnog materijala ili model ekvivalentnog izotropnog materijala.

S obzirom na karakteristike modela transverzalno izotropije u modeliranju pokusa direktnog smicanja osim utjecaja razmaka diskontinuiteta s promatran je još i utjecaj promjene kuta anizotropije Θ . Kut anizotropije jeste kut između ravnina elastične izotropije (ravnina 1-3) i osi x koordinatnog sustava razmatranog problema, a uzima se u smjeru obrnuto od kretanja kazaljke na satu (sl. 2).

Konstante ekvivalentnog transverzalno izotropnog i ekvivalentnog izotropnog modela izračunate su za slučaj slijedećih svojstava intaktne stijene i diskontinuiteta: $E=77,1$ GPa; $\nu=0,3$; $k_s=5$ GPa/m; $k_n=70$ GPa/m; $\Theta=0^\circ-180^\circ$, (intervali od 10°); te za razmake diskontinuiteta 0,1; 1 i 10 metara. Promatrajući tablicu 1 može se uočiti da je za

Tablica 2. Ulazni podaci za numeričke analize
Table 2. Input data for numerical analysis

	s , (m)	0,1	1,0	10,0
transverzalno izotropan model (transversely isotropic model)	E_v , (GPa)	77,1	77,1	77,1
	E_2 , (GPa)	6,4	36,7	69,5
	ν_{12}	0,3	0,3	0,3
	ν_{21}	0,025	0,143	0,27
	G_{12} , (GPa)	0,5	4,3	18,6
ekvivalentan izotropan model (equivalent isotropic model)	K' , (GPa)	27,0	40,5	59,1
	G' , (GPa)	15,9	18,2	24,9

intaktnu stijenu izabrana maksimalna vrijednost konstante E , dok su za diskontinuitete izabrane minimalne vrijednosti svojstva k_n i k_s . Ovo je učinjeno s namjerom da se naglasi utjecaj diskontinuiteta. Dobivene elastične konstante transverzalno izotropnog i ekvivalentno izotropnog modela prikazane su u tablici 2.

Početo stanje naprezanja

Početo stanje naprezanja u uzorku transverzalno-izotropnog materijala za slučaj spriječenog bočnog širenja, dobiveno je prema:

$$\sigma_h = \frac{\nu_{21} E_1}{(1-\nu_{12})E_2} \sigma_v \quad (8)$$

gdje su σ_h i σ_v normalna naprezanja u smjerovima osi 1 i 2.

Početo naprezanje u uzorku ekvivalentnog izotropnog materijala dobiveno je kao:

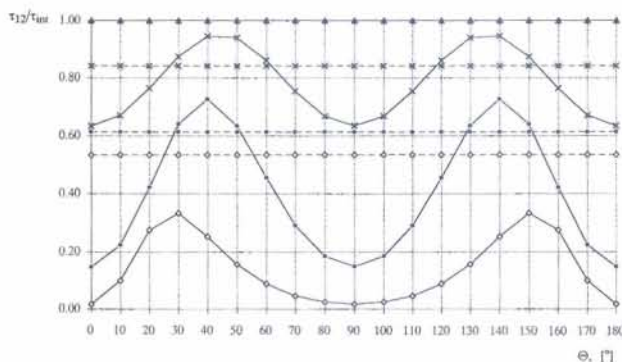
$$\sigma_h = \frac{\nu'}{(1-\nu')} \sigma_v \quad (9)$$

pri čemu je ν' dobiven pomoću izraza:

$$\nu' = \frac{3K' - 2G'}{2(3K' + G')} \quad (10)$$

Rezultati pokusa direktnog smicanja

Usporedba rezultata modeliranja pokusa direktnog smicanja načinjena je pomoću srednjih vrijednosti posmičnih naprezanja u zoni smicanja pri istoj posmičnoj deformaciji. Dijagram (sl. 6) prikazuje ovisnost posmičnog naprezanja u zoni smicanja o razmaku i orijentaciji diskontinuiteta za navedena dva modela. Kod toga je korišten bezdimenzionalni odnos τ_{12}/τ_{int} . τ_{12} je prosječno posmično naprezanje za odgovarajući model, a τ_{int} je prosječno posmično naprezanje intaktne stijene. Osim toga, na istoj slici su za usporedbu prikazani i rezultati za elastičan izotropan model.



Sl. 6. Ovisnost posmičnog naprezanja o orijentaciji i razmaku diskontinuiteta

Fig. 6. Shear stress depending on orientation and spacing of discontinuities

- Legenda (Legend):
 Model izotropne elastičnosti (Elastic isotropic model) —▲—
 Model ekvivalentnog transverzalno izotropnog materijala (Model of equivalent transversely isotropic material)
 —◇— $s = 0,1$ m
 —●— $s = 1,0$ m
 —×— $s = 10,0$ m
 Model ekvivalentnog izotropnog materijala (Model of equivalent isotropic material)
 —◇— $s = 0,1$ m
 —●— $s = 1,0$ m
 —×— $s = 10,0$ m

Model ekvivalentnog transverzalno izotropnog materijala

Očigledna je zavisnost između posmičnog naprezanja i orijentacije diskontinuiteta u odnosu na smjer horizontalne sile u direktnom smicanju. Dobivaju se dva maksimuma naprezanja i to za

kuteve približno jednake 30° - 45° i 135° - 150° i dva minimuma za kuteve 0° i 90° . Veličine maksimalnih i minimalnih napreznja zavise još i od razmaka diskontinuiteta, pa tako za veći razmak dobivamo i veće iznose napreznja koji se približavaju onima za intaktni materijal. Također, kako se povećava razmak diskontinuiteta, tako se smanjuje utjecaj anizotropije materijala.

Iz prethodnog također slijedi, da će u uvjetima direktnog smicanja pri istom opterećenju deformacije biti najveće za uzorke čiji je kut nagiba diskontinuiteta u odnosu na smjer horizontalne sile jednak 0° ili 90° , a najmanje za kuteve u intervalima 30° - 45° i 130° - 150° .

Model ekvivalentnog izotropnog materijala

Model ekvivalentnog izotropnog materijala uvodi također na indirektan način diskontinualnost stijenske mase u razmatrani problem. Usporedbom posmičnih napreznja sa onima dobivenim za intaktni materijal, koji ne sadrži u sebi diskontinuitete, uočava se značajna redukcija njihove veličine. Ta redukcija naravno zavisi o razmaku diskontinuiteta, pa je najveća za najmanji razmak diskontinuiteta, i obrnuto. To odgovara onome što bismo i očekivali za tako oslabljenu stijenu.

Sve dosada izloženo ukazuje na slijedeće: što materijal ima više diskontinuiteta, to će mu i deformabilnost biti veća. Dakle, za jako diskontinuiranu stijensku masu, gdje je nemoguće modelirati svaki diskontinuitet posebice, koncept ekvivalentnog izotropnog materijala može se primijeniti kao prva aproksimacija. Ovaj model osim toga uprosječuje rezultate dobivene ekvivalentnim transverzalno izotropnim modelom. To je stoga što u modelu nije definiran nagib diskontinuiteta Θ .

Zaključak

S namjerom, da se uoče značajke modeliranja diskontinuiranosti stijena u elastičnom području, načinjena je usporedba rezultata parametarskih analiza uporabom dva modela kvazikontinuumata:

- model ekvivalentnog transverzalno izotropnog materijala i

- model ekvivalentnog izotropnog materijala.

Pri tome je ispitan utjecaj diskontinuiteta na vrijednost elastičnih konstanti navedenih modela kao i na ponašanje diskontinuiranog stijenskog materijala u pokusu direktnog smicanja.

Usporedbom tih rezultata s onima dobivenim za intaktni stijenski materijal (model izotropne elastičnosti) zaključeno je da se na indirektan način može u model uvesti pojava diskontinuiteta. S obzirom na mogućnosti praktične primjene oba ispitana modela naglašava se važnost dva parametra i to razmaka i orijentacije diskontinuiteta.

U eksperimentalnom radu, trebalo bi dodatno izmjeriti svojstva diskontinuiteta k_s i k_n , kako bi se mogli provoditi točniji numerički proračuni. Također treba napomenuti, da se in-situ mjeri položaj diskontinuiteta u odnosu na smjer sjevera, te da bi takav podatak trebalo prilagoditi zahtjevima modela.

Prilikom provođenja numeričkih proračuna nije primijećena razlika u brzini izvođenja. Zbog toga i zbog ranije navedenih zaključaka preporučuje se češća primjena ispitanih modela: ekvivalentnog transverzalno izotropnog i ekvivalentnog izotropnog. Budući primjena ovdje prikazanih konstitutivnih modela omogućit će raspoznavanje specifičnosti u ponašanju diskontinuiranih u odnosu na intaktne stijenske materijale u području elastičnih deformacija.

Primljeno: 25. I. 1995.

Prihvaćeno: 20. VI. 1995.

LITERATURA

- Bandis, S. C., Lumsden, A. C. & Barton, N. R. (1983): Fundamentals of Rock Joint Deformation. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 20, No. 6, 249-268*, Pergamon Press, Oxford.
- Carter, J., P., Alehossein, H., Luo, S. Q., Choi, S. K. & Mühlhaus, H.-B. (1991): Analysis of open excavations in jointed rock masses using finite and distinct element methods. 7th International Congress on Rock Mechanics - Aachen, Vol. 1., 683-687. Rotterdam, A. A. Balkema.
- Crosta, G. (1993): Joint patterns and anisotropic rock mass deformational behavior. Eurock'93, Ribeiro e Sousa & Grossmann (eds), 63-70. Balkema, Rotterdam.
- Fossom, A. F. (1985): Technical Note: Effective Elastic Properties for a Randomly Jointed Rock Mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 22, No. 6, 467-470*, Pergamon Press, Oxford.
- Goodman, R. E. & St. John, C. (1977): Finite Element Analysis for Discontinuous Rocks. In: Desai, C. S. & Christian, J. T. (editors): Numerical Methods in Geotechnical Engineering, McGraw-Hill, 148-175, New York.
- Goodman, R. E. (1989): Introduction to Rock Mechanics, Sec. Ed. John Wiley & Sons, 562 pp, New York.
- Jing, L., Nordlund, E. & Stephansson, O. (1992): An Experimental Study on the Anisotropy and Stress-dependency of the Strength and Deformability of Rock Joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 29, No. 6, 535-542*, Pergamon Press, Oxford.
- Kovačević-Zelić, B. (1994): Numeričko modeliranje ponašanja stijenskih materijala pri provođenju radova u rudarstvu. Magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- Kovačević-Zelić, B., Kovačić, D. i Vuječić, S. (1995): Numeričko modeliranje diskontinuiranog stijenskog materijala u području plastičnosti. *Rud.-geol.-naft. zb. 7, 45-52*, Zagreb.
- Lekhnitskii, S. G. (1981): Theory of Elasticity of an Anisotropic Body. Mir Publishers, 430 pp, Moscow.
- Singh, B. (1973): Continuum Characterisation of Jointed Rock Masses, Part I: The Constitutive Equations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 10, No. 4, 311-335*, Pergamon Press, Oxford.
- Wittke, W. (1977): Static Analysis for Underground Openings in Jointed Rock. In: Desai, C.S. & Christian, J.T. (editors): Numerical Methods in Geotechnical Engineering, McGraw-Hill, 589-638 pp., New York.
- (1991). FLAC, Users Manual, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.

Numerical Modelling of Discontinuous Rock Mass in the Elastic Domain

B. Kovačević - Zelić, Kovačić, D. and Vujec, S.

The mechanical behaviour of a rock mass is influenced by the mechanical characteristics of intact rock and discontinuities. Therefore, a unique stress-strain relationship (constitutive law) cannot be established for all practical problems. The rock mechanical model oriented toward application must simplify the real stress-strain relationship in a manner that still gives results sufficiently close to reality.

In the paper, the applicability of some constitutive laws within the framework of the theory of elasticity is examined. The analyses are performed with the next models: transversely isotropic equivalent material and isotropic equivalent material. Isotropic elastic model is also used for comparison of the results.

The comparison of above mentioned models is conducted by the numerical modelling of the direct shear test. The analyses are performed using finite difference code FLAC. Basic mesh and boundary conditions are shown in fig. 1. Two types of samples are used: samples of intact rock (homogenous, isotropic material) and samples that contain one set of parallel planar discontinuities. The assumed properties of the intact rock and discontinuities are presented in Table 1.

The basic principles of the 2-D transversely isotropic equivalent material and isotropic equivalent material are also presented. Both

models are based on the idealised representation of a rock mass traversed by one set of aligned discontinuities (Figs. 2 and 3). The discontinuous rock mass is converted to quasicontinuum model through the new elastic constants dependent on the properties of intact rock and discontinuities (Eq. 1-7).

The parametric analyses are performed to examine the influence of discontinuities on the elastic constants of equivalent materials. It is concluded that the spacing of discontinuities plays a dominant role (Figs. 4 and 5).

The results of the numerical analysis of the direct shear test are shown in the Fig. 6. The comparison of the above mentioned constitutive models was made by the stress ratio τ_{12}/τ_{int} (τ_{12} and τ_{int} are average shear stresses for equivalent materials and intact material, respectively). In addition, the results for the ideal elastic isotropic material is shown for comparison.

It is concluded that both equivalent models indirectly introduce the influence of the discontinuities on the rock mechanical behaviour. For the practical purposes, two parameters are of primary importance: the orientation and spacing of discontinuities. Following the previous conclusions it is recommended to apply equivalent models more frequently.