

Jakob Likar

doc. dr., dipl. ing. rud., IRGO - Inštitut za rudarstvo geotehnologijo in okolje, Ljubljana

Franc Žigman

dipl. ing. fiz., IRGO - Inštitut za rudarstvo geotehnologijo in okolje, Ljubljana

Zvonimir Jamšek

dipl. ing. rud., IRGO - Inštitut za rudarstvo geotehnologijo in okolje, Ljubljana

Mitja Šuligoj

dipl. ing. rud., IRGO - Inštitut za rudarstvo geotehnologijo in okolje, Ljubljana

Goran Vižintin

dipl. ing. geol., IRGO - Inštitut za rudarstvo geotehnologijo in okolje, Ljubljana

PRIMERJAVA MED 2D IN 3D ANALIZAMI SEKUNDARNIH NAPETOSTNO DEFORMACIJSKIH STANJ V HRIBINAH OKROG NAPREDUJOČEGA ČELA PODZEMNEGA PROSTORA

IZVLEČEK: Analitični in numerični postopki izračunov napetostno deformacijskih stanj v ravnini (2D) v hribinah okrog napredujočih izkopnih del pri gradnji podzemnih prostorov slonijo na dokaj enostavnih transformacijah prostorskega v ravninski problem. Z vgradnjo ustreznih robnih pogojev do neke mere simuliramo prostorska dogajanja in raznos sekundarnih napetosti in deformacij še posebej takrat, ko izdelujemo povratne analize. V tovrstnih primerih moramo imeti na voljo dovolj zanesljive merske podatke, ki nam služijo za primerjavo z izračunanimi vrednostmi posameznih fizikalnih in mehanskih karakteristik, kakor tudi realne geometrijske podatke o legi, debelini in lastnostih posameznih hribinskih plasti. V prispevku prikazujemo rezultate primerjalnih izračunov, ki so bili izvedeni s pomočjo programskih paketov, ki imajo za osnovo MKE, ki so bili razviti na IRGO in izračuni, ki so bili narejeni s pomočjo dela komercialne programske opreme, ki jo je izdelala programska hiša ITASCA. Izračuni so bili narejeni z uporabo opreme, ki sloni na metodi končnih diferenc, kot sta FLAC^{2D} in FLAC^{3D}. Ugotovljene razlike v izračunanih parametrih vsekakor kažejo, da je za občutljive in pomembne probleme napovedovanja nenadnih porušitev hribinskih stebrov, potrebno vsestransko analizirati možne geometrijske in materialne kombinacije.

COMPARISON BETWEEN 2D AND 3D ANALYSIS OF SECONDARY STRAIN - STRESS STATES IN ROCKS AROUND THE ADVANCING UNDERGROUND EXCAVATION FACE

ABSTRACT: Analytical and numerical calculations of strain - stress states in plain (2D) in rocks around the advancing excavation during the construction of underground openings are based on rather simple transformation of spatial to plane problem. Incorporating suitable boundary conditions it is partly possible to simulate reactions in space and transfer of secondary stresses and deformations particularly for back analysis. In that case reliable measurements data should be available which are used for comparison to the calculated values of single physical and mechanical characteristics and also realistic geometrical data of position, thickness and properties of some rock layers. Results of the comparison calculations which were executed by software based on FEM are shown in this article and also calculations that were executed by a part of commercial software made by software company ITASCA. Calculations were made by using equipment that is based on Finite Difference method like FLAC 2D and FLAC 3D. Determined differences in calculated parameters have revealed that for delicate and important prognoses of sudden rock pillars fractures it is necessary to analyze possible geometrical and material combinations from all aspects.

UVOD

Geološke in geotehnične raziskave, ki jih izvajamo v okviru ocenjevanja pogojev izkopa in gradnje podzemnih prostorov, omogočajo izdelavo prognoznih ocen geotehničnih pogojev in drugih spremenljivih lastnosti, ki se pogostoma pojavljajo v hribinskih materialih. Lega in oblika anomalij, kakor tudi geomehanske lastnosti materialov, ki nastopajo v takšnih območjih so za ocene stabilnostnih razmer okrog napredujočega čela izkopa pomembne, saj pravočasna priprava na spremenjene pogoje gradnje omogoča uspešno izvajanje podpiralnih del.

V praksi se v mnogih primerih poslužujemo vizualnih ocen trenutnih stabilnostnih razmer na odprtih čelih, ki pa niso vedno primerne, niti optimalno postavljene glede na realne geotehnične pogoje, ki so prisotni na določenem območju.

Uporaba računalniških programov, izdelanih na osnovi numeričnih metod in upoštevanju nelinearnih odnosov med napetostmi in deformacijami, danes omogoča izvedbo različnih simulacijskih postopkov napredovanja izkopa podzemnega prostora v različnih hribinskih materialih in spremenljivih napetostno deformacijskih pogojih. Vsa dogajanja je smiselno obdelovati pri istočasnem upoštevanju sistemsko predvidenih podpornih ukrepov, z možnostjo vključevanja povečanja reaktivnih tlakov podporja, kar predstavlja osnovo za sprejem ustreznih, predvsem pa optimalnejših odločitev.

ODNOS HRIBINA - PODPORJE

Kot je že dolgo znano, so podatki o mehanskih in fizikalnih karakteristikah hribinskih materialov, ki jih ocenjujemo na določenih območjih v okviru priprav in načrtovanja izdelave podzemnih prostorov, izjemnega pomena za uspešno izvedbo postopkov izkopa in gradnje podzemnih prostorov.

Analize napetostno deformacijskih odnosov imajo vidno mesto v geotehničnem inženirstvu, saj jih pogosto izvajamo v okviru raziskav, ki obsegajo povratne analize, kakor tudi za potrebe dimenzioniranja podporja pred, med in po končani gradnji podzemnega prostora. Spremembe v širši kot ožji okolici, kakor tudi v hribinskih zlogih v neposredni okolici izkopa podzemnega prostora in posledično tudi v primarni oz. sekundarni oblogi, imajo poseben pomen, saj do neke mere omogočajo boljše razumevanje korelacij med posameznimi tipi hribin, ki so sistematično klasificirane v ustrezne hribinske kategorije in podpornimi ukrepi, s katerimi je zagotovljena zahtevana stabilnost prostora.

Pri praktičnem načrtovanju so podporni ukrepi, ki stroškovno močno vplivajo na uspešnost gradnje, v pretežni meri pogojeni z oceno hribinskih kategorij, slonečih na pripadajočih izkušnjah in opazovanjih.

Čeprav so bolj ali manj ustaljene razlage o vplivnih dejavnikih, ki se odražajo na absolutnih vrednostih in spremembah napetostno deformacijskih stanj, v katere vključujemo poleg fizikalno mehanskih lastnosti nastopajočih hribinskih zlogov, tudi primarne napetostne razmere, trdnostne in togostne lastnosti podporja ter časa njegove vgradnje, so še vedno odprte široke razvojne možnosti prirejanja primernih računskih nastavkov, ki omogočajo navedene analize.

Ker je praktično nemogoče v vsej popolnosti izračunati in zajeti vplivne parametre, so še vedno potrebni preizkusi modelov in povratne analize, ki prav tako omogočajo določitev nekaterih karakteristik hribin, ki še vedno predstavljajo enega od neznanih inženirskih materialov. Zato je razumevanje napetostno deformacijskih razmer okrog podzemnih prostorov tesno povezano z analizami medsebojnega delovanja sistema HRIBINA - PODPORJE.

OPIS NEKATERIH ZNAČILNIH METOD ANALIZ NAPETOSTNO DEFORMACIJSKIH RAZMER V HRIBINAH, KI SO V NEPOSREDNI OKOLICI IZKOPA PODZEMNIH PROSTOROV

Geotehnično inženirstvo, ki je sestavni del gradnje podzemnih prostorov, vključuje v načrtovalne postopke analize stabilnostnih razmer, obtežb na podporne elemente, vplive na precejanje in iztekanje vode v podzemni prostor, kakor tudi ocene in analize ponašanja hribin v ožji in širši okolici.

Še vedno je mnogo operativnih inženirjev, ki so prisotni na gradbiščih praktično vsak dan, odvisno od empiričnih analiz tovrstnih dogajanj ob upoštevanju meritev konvergence in drugih rezultatov opazovanj.

V veliko manjši meri uporabljajo bolj natančne in zahtevnejše analize, saj so postopki izračunov, predvsem pa priprava vhodnih podatkov, dokaj časovno zahtevna opravila. Samo od sebe se vsiljuje mnenje, da je to morda posledica tudi pomanjkanje zaupanja ob premalo natančni opredelitvi poenostavitvev, ki so uporabljene praktično pri vseh modelih.

Upoštevanje ustreznih matematičnih zapisov lastnosti razpokanih hribin prepriženih z vezanimi in posamičnimi odprtimi razpokami, kot osnovo za izračune napetostno deformacijskih odnosov v mehanskem sistemu hribina podporje, daje možnost sprejemljive uporabe kontinuuma tako v elastičnostnem, kot tudi elestoplastičnosnem območju.

Čeprav je tudi splošno znano, da so napetostno deformacijski odnosi v okolici čela podzemnega prostora dokaj zapleteni pri anizotropnih primarnih napetostnih stanjih, ki postanejo še bolj zapleteni, če je v izračunih upoštevana poleg napetostne še materialna anizotropija.

Iz ustreznih analitičnih izračunov lahko povzamemo, da je oblika plastičnostnega območja okrog čela podzemnega prostora odvisna od koeficienta λ_e , ki ga izračunamo s pomočjo Mohr - Coulombovega in Hoek - Brownovega kriterija plastičnostnega tečenja:

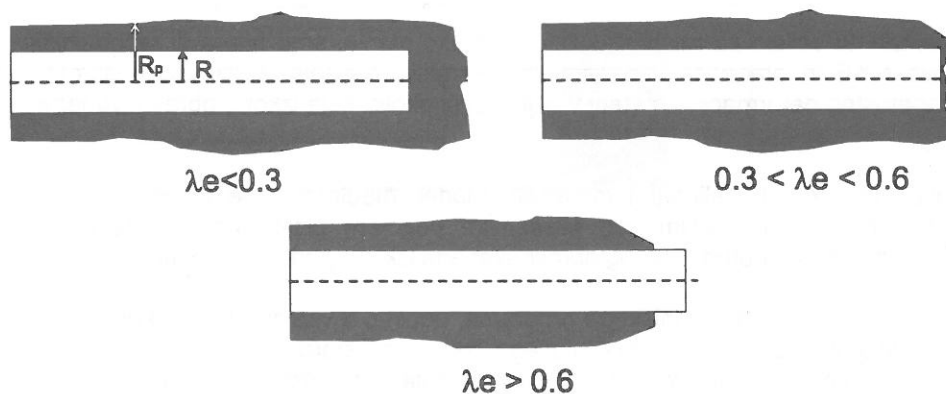
$$\lambda_e = \frac{1}{K_p + 1} \left[K_p - 1 + \frac{2}{N} \right]$$

$$\lambda_e = \frac{1}{4 \cdot N} \left[\left(m^2 + 8 \cdot m \cdot N + 16 \cdot s \right)^{\frac{1}{2}} - m \right]$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

$$N = \frac{2 \cdot \sigma_0}{\sigma_c}$$

φ - kot notranjega trenja
 σ_0 - primarno napetostno stanje
 σ_c - enoosna tlačna trdnost
 m, s - materialne konstante



Slika 1. Oblike plastičnih območij okrog čela podzemnega prostora za različne vrednosti λ_e .

Iz grafičnih prikazov je razvidno, da so preproste oblike plastičnih območij okrog čela podzemnega prostora za relativno enostavne primarne napetostne razmere, odvisne tako od geometrijskih, kot tudi materialnih lastnosti nastopajočih materialov. Prav tako kažejo, da je praktično neizogibna uporaba numeričnih metod za potrebe določanja plastičnih območij za bolj zapletene razmere z upoštevanjem trdnostnih in togostnih lastnosti podpornih elementov.

PRILAGODITEV METODE KONČNIH ELEMENTOV ZA IZRAČUNE NAPETOSTNO DEFORMACIJSKIH ODNOSOV OKROG ČELA IZKOPA PODZEMNEGA PROSTORA

Numerične metode, vsekakor pa metoda končnih elementov (MKE) omogočajo izračune bolj zapletenih napetostno deformacijskih razmer v hribinah okrog območja napredovanja čela izkopa podzemnega prostora. Še posebej je mogoče upoštevati poleg geometrijskih tudi materialne nelinearnosti in druge posebnosti, ki so značilne za naravne materiale.

V naslednjih razdelkih podajamo nekatere primere izračunov s pomočjo programskih paketov FINIT, FLAC^{2D} in FLAC^{3D}.

Potek izračuna napetostno deformacijskih razmer okrog čela izkopa podzemnega prostora

Pred izvedbo simulacije napredovanja čela izkopa za natančno določen primer izdelave podzemnega prostora v določenem območju, moramo določiti:

- primarno in sekundarno napetostno deformacijsko stanje na širšem območju, kjer je predvidena gradnja podzemnega prostora
- fizikalno mehanske lastnosti nastopajočih hribin na osnovi raziskav, statističnih analiz in ocen
- tektonske posebnosti hribinskega sestava na tem območju
- obseg že izvedenih podzemnih del na širšem območju in prognoziran razvoj izdelave novih objektov na obravnavanem območju.

S pomočjo meritev parametrov raziskovalnega vrtenja, ugotavljanja mehanskih lastnosti z elastmetrom in drugih opazovanj v raziskovalnih vrtnah določimo strukturne posebnosti in deformabilnostne kakor tudi trdnostne lastnosti hribinskih zlogov pred čelom izkopa podzemnega prostora.

Prav tako vnaprej določimo trdnostne in deformabilnostne lastnosti podpornih elementov, ki se jih vgrajuje po izkopu ali razstreljevanju na čelu proge in se uporabljajo za vzdrževanje potrebnih začasnih in trajnih stabilnostnih razmer.

S tem so podani osnovni geometrijski kot tudi materialni parametri za izvedbo simulacije napredovanja čela izkopa prostora.

Vhodni podatki, ki vsebujejo materialne lastnosti (trdnost, deformabilnost), so prav tako obdelani z ustreznim računalniškim programom, ki omogoča izvedbo hitre ocene njihovih vrednosti.

Ob predpostavkah, ki veljajo za ravninsko deformacijsko stanje, smo pripravili računalniški program, ki ima za osnovo MKE in omogoča v posameznih korakih izvajanje izračunov in sprotno ugotavljanje sprememb napetostno deformacijskih stanj v ožji in širši okolici čela izkopa obravnavanega podzemnega prostora.

Vanj je vključen in obdelan nelinearni materialni model, medtem ko je kriterij porušitve hribinskega materiala definiran z izpopolnjenim von Misesovim pogojem plastičnega tečenja, ki omogoča določitev širjenja porušenih območij okrog obravnavanega izkopa podzemnega prostora.

S pomočjo tako izdelanega računalniškega programa, dobimo v vsakem računskem koraku napetostno deformacijsko sliko v okolici čela napredujočega izkopa prostora. Prav tako program izračuna tudi varnostne količnike proti porušitvam hribinskega materiala. Varnostni količnik je definiran z razmerjem med invariantnim tenzorjem napetosti, izračunanim na osnovi trdnostnih lastnosti in invariantnim napetostnim tenzorjem, ki je izračunan na osnovi primarnega in sekundarnega napetostnega stanja.

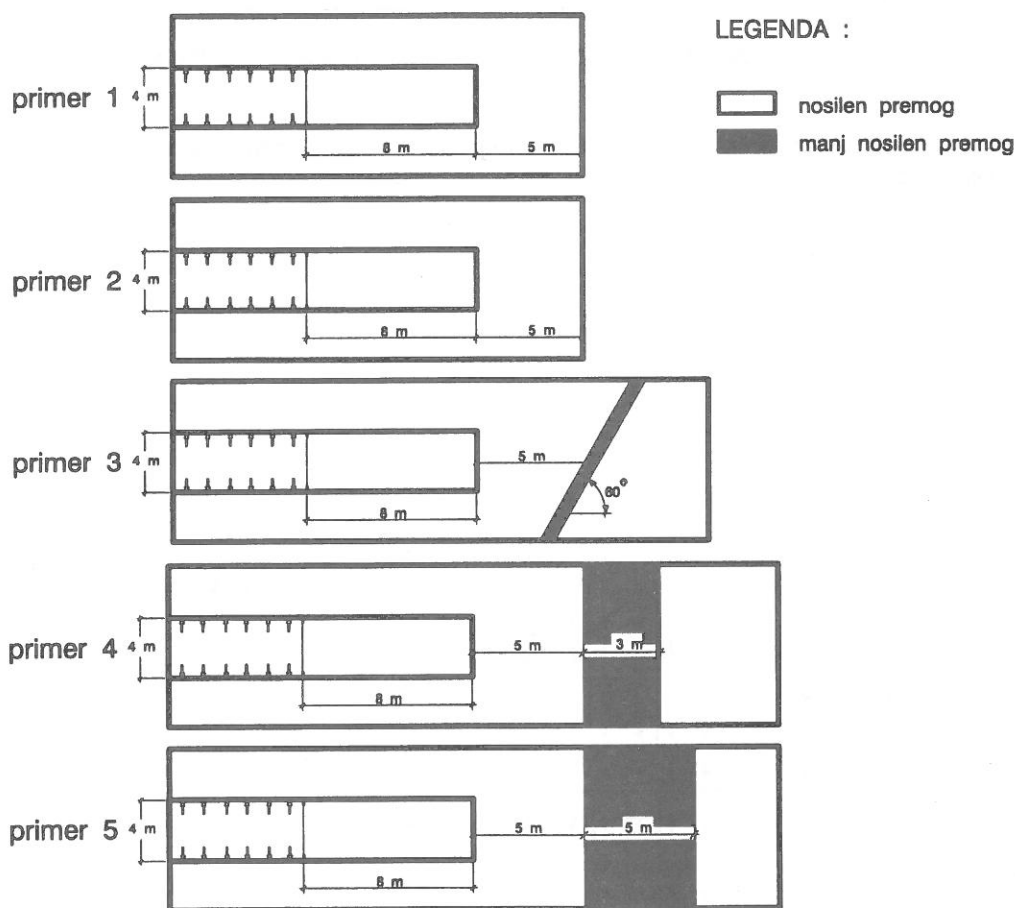
Sestavni del programskega paketa torej omogočajo pre- in post- procesiranje, kar bisveno pospeši pripravo vhodnih podatkov za simulacijo (cca. 30 min - 1 ure) ob vnaprej določeni velikosti koraka

napredovanja izkopa podzemnega prostora. Praktični primer prikazujemo v naslednjem razdelku tega prispevka.

PRIMER SIMULACIJE NAPREDOVANJA IZKOPA ČELA PODZEMNEGA PROSTORA Z RAČ. PROGRAMOM FINIT

Za potrebe ocene nevarnosti porušitve neposrednih hribinskih zlogov v okolici napredovanja izkopa čela jamske proge smo izbrali transpotno progo s premerom izkopa 4 m, ki je locirana 465 m pod zemeljskim površjem v lignitnem sloju, ki leži med nizko nosilnimi krovinskimi in talninskimi plastmi ter predstavlja v geotehničnem smislu trši vložek v relativno bolj deformabilnem okolnem hribinskem mediju. Meritve deformabilnostnih lastnosti nastopajočih hribinskih zlogov pred čelom proge v posebej za ta namen izvrtenih vrtnah je izvajal IGGG iz Ljubljane v sodelovanju s strokovnjaki Premogovnika Velenje.

Geometrična zasnova postopka simulacije je predstavljena na sliki 2, kjer je vidna meja med posameznimi makro in mikro hribinskimi zlogi. Ta je poenostavljena glede na znane podatke o določenem območju, vendar sam način vnosa in zastopanja posameznih hribinskih tipov ali kategorij ni omejen.



Slika 2. Primer geometrijske zasnove obravnave sprememb napetostno deformacijskih razmer za določen odsek podzemnega prostora.

Vhodne podatke za izračune za naveden primer prikazujemo v naslednji preglednici, kjer so predstavljene različne deformabilnostne in trdnostne lastnosti nastopajočih materialov (slika 3).

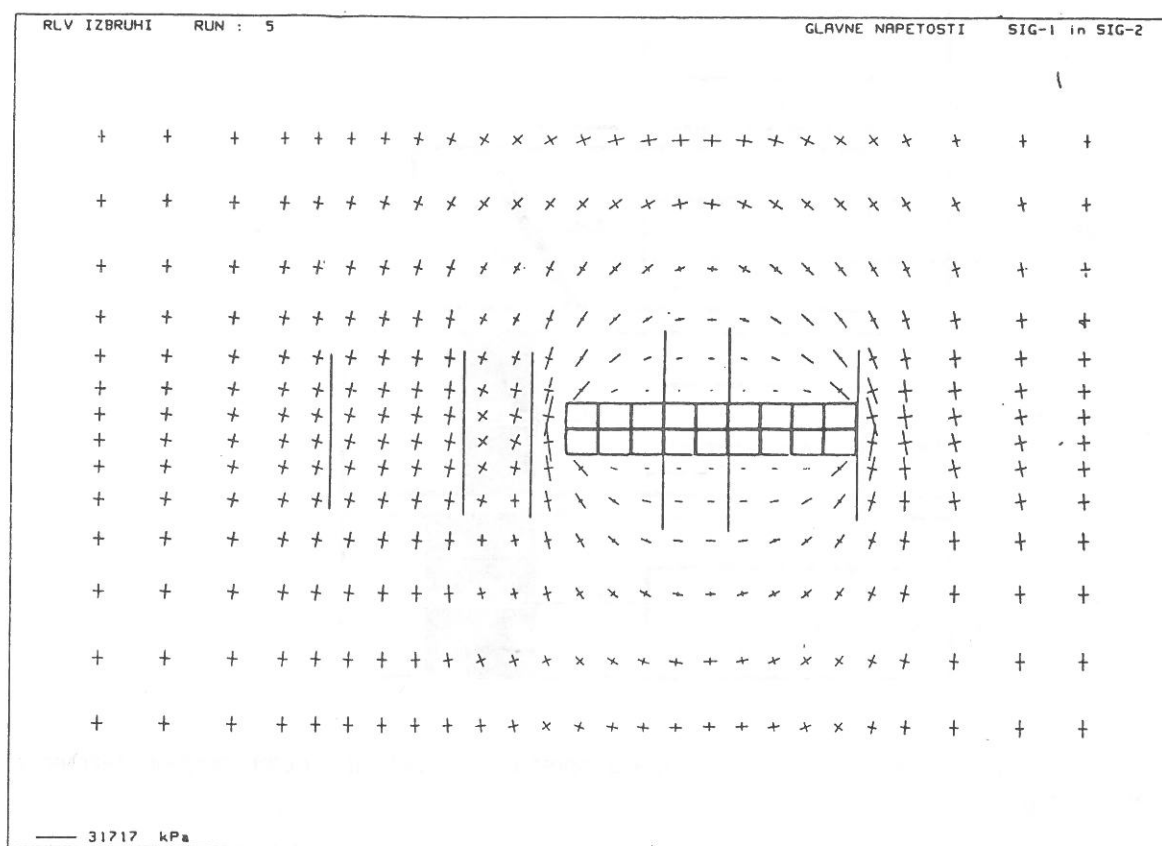
Napredovanje čela proge obravnavamo v ravnini, kar vsekakor predstavlja dokaj pomembno poenostavitev problema ob tem, da 3D učinek upoštevamo z ustreznimi pogoji. Togo podprt odsek je za dve višini proge za čelom, medtem ko je odsek za čelom popustljivo podprt z ekvivalentnimi reaktivnimi silami.

zap. št.	Geološki opis materiala	Elastičnostni modul E (MPa)	Poissonov količnik ν	Strižni modul G (MPa)	Tlačna trdnost C (MPa)	Strižna trdnost R (kPa)	Natezna trdnost T (kPa)	Prostorska teža γ (kN/m ³)
1	nosilen premog	480	0.33	180	7000	1430	880	12.7
2	manj nosilen premog	180	0.30	70	3700	750	460	12.7
3	poševna prelomnica	100	0.30	38	900	170	100	12.7

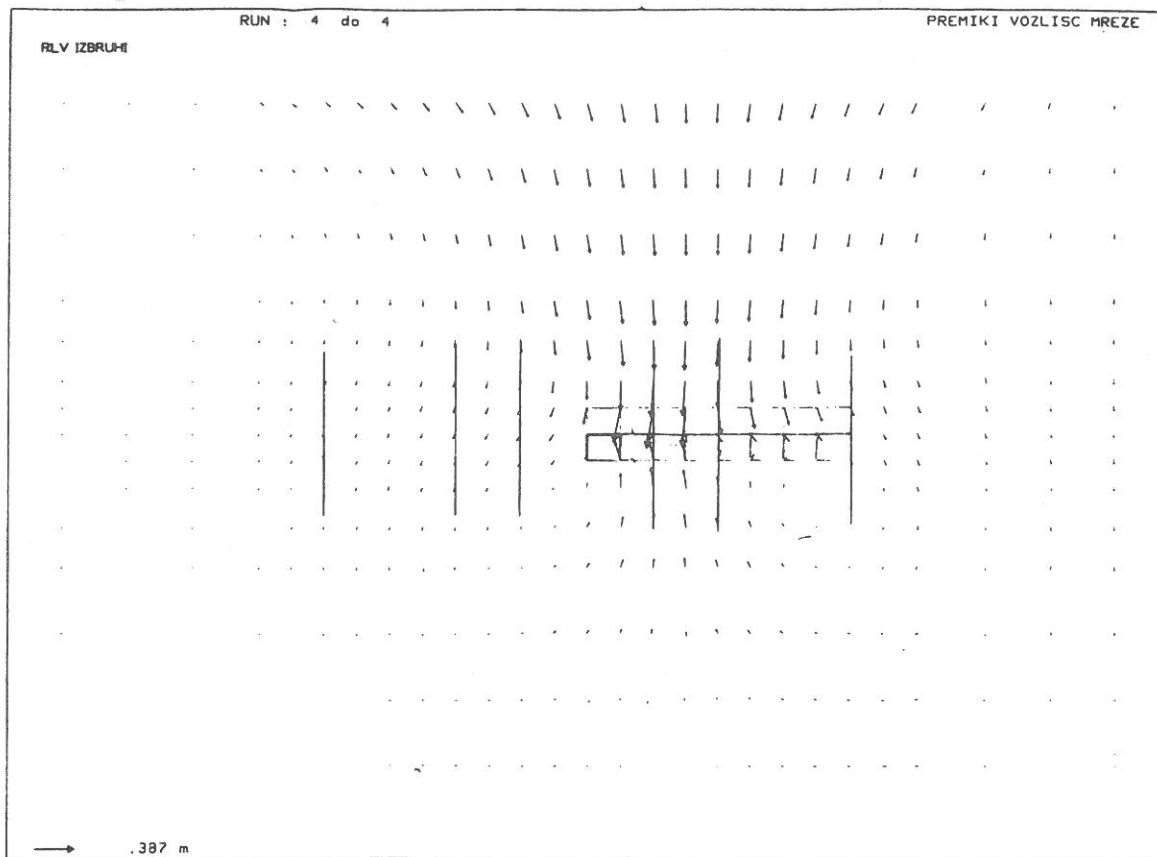
zap. št.	Geološki opis materiala	Elastičnostni modul E (MPa)	Poissonov količnik ν	Strižni modul G (MPa)	Tlačna trdnost C (MPa)	Strižna trdnost R (kPa)	Natezna trdnost T (kPa)	Prostorska teža γ (kN/m ³)
1	nosilen premog	480	0.33	180	9600	1400	610	12.7
2	manj nosilen premog	180	0.30	70	3700	750	460	12.7
3	poševna prelomnica	100	0.30	38	900	170	100	12.7

Slika 3. Preglednica z vhodnimi podatki za izračune določenega odseka podzemnega prostora.

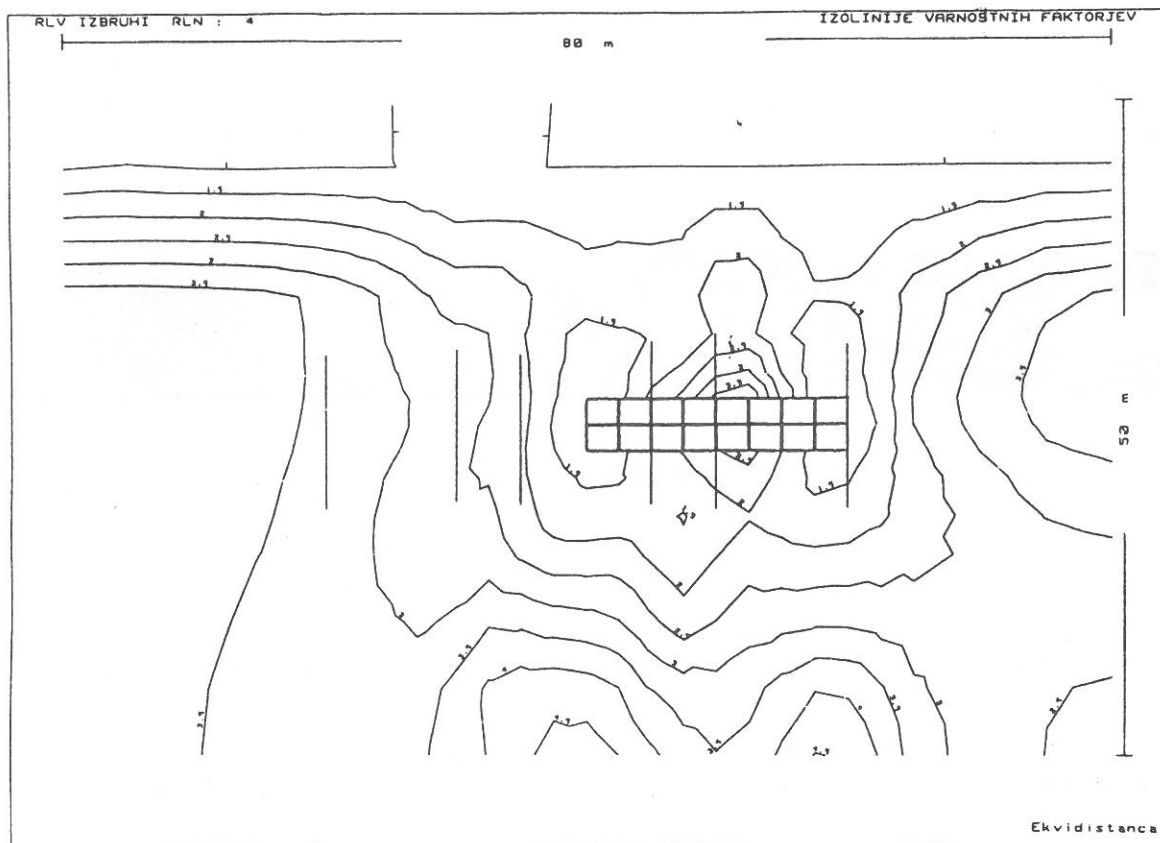
Primer simulacije napredovanja čela izkopa podzemnega prostora za določen presek stanja, prikazujemo na sliki 4, sliki 5 in sliki 6.



Slika 4. Sekundarno napetostno stanje v hribinah v neposredni okolici čela izkopa prostora.



Slika 5. Ravninsko polje pomikov v neposredni okolici čela izkopa prostora.



Slika 6. Izračunani varnostni količniki proti porušitvi v hribinah v neposredni okolici čela izkopa.

S tako postavljenim modelom in popisanim postopkom ugotovimo nevarna območja, kar omogoča pravočasno izvajanje preventivnih ukrepov v času napredovanja izkopa in s tem zmanjšano verjetnost nastanka porušitve in večjih zruškov, ki bistveno uplivajo na uspešnost izdelave podzemnega prostora.

Primer simulacije napredovanja izkopa čela podzemnega prostora z rač. programom FLAC^{2D}

Podobno tudi s programom FLAC^{2D}, ki je značilen predstavnik praktične uporabe metode končnih diferenc, ki omogoča eksplicitno reševanje konstrukcij, simuliramo dogajanja v neposredni okolici čela izkopa podzemnega prostora.

Bistvena prednost reševanja problemov po eksplicitnem postopku je v tem, da omogoča uporabo nekaterih materialnih modelov, za katere so značilne t.i. velike deformacije (pomiki materialnih točk). Pojavi povečanih pomikov določenih območij v geotehnični praksi so dokaj pogosti predvsem v primerih, ko imamo opravka z lokalnimi hribinskimi porušitvami.

Slaba stran tega programskega paketa je pa, da ne omogoča upoštevanja večjega števila materialov z različnimi lastnostmi.

Podobno kot smo s poenostavitvami obravnavali prostorski problem napetostno deformacijskega stanja pri simulaciji razmer okrog čela izkopa podzemnega prostora z MKE, podajamo v naslednjih točkah tega prispevka rezultate izračunov s pomočjo programa FLAC^{2D}.

Simulacija izdelave proge je potekala z naslednjimi vhodnimi podatki:

- globina podzemnega prostora pod površino terena $H = 500$ m
- povprečna prostorninska teža hribin $\gamma = 18,7$ kN/m³
- premer podzemnega prostora 4m
- začetna vertikalna napetost na robu računskega območja 9350 kPa

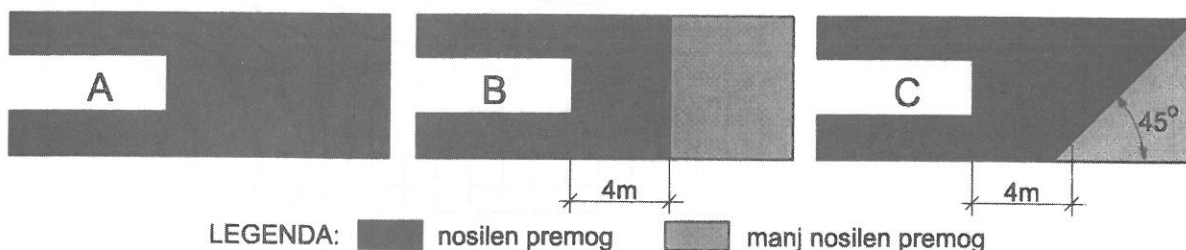
Nosilna hribina:

- strižni modul $G = 700$ MPa
- kompresijski modul $K = 450$ MPa
- prostorninska teža 12,7 kN/m³
- kot notranjega trenja 28
- kohezija $c = 3$ MPa

Manj nosilna hribina

- $G = 180$ MPa
- $K = 150$ MPa
- prostorninska teža 12,7 kN/m³
- kot notranjega trenja 18
- kohezija $c = 1,3$ MPa

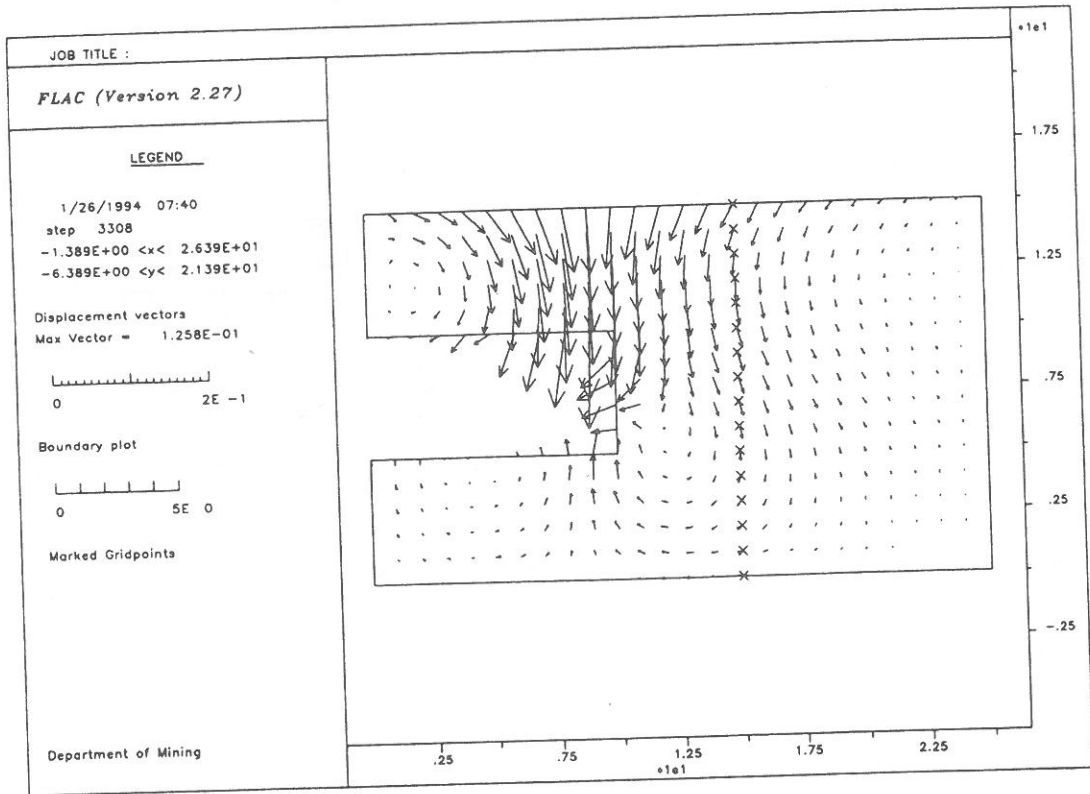
Posamezni koraki v postopku simulacije so omogočili zasledovanje spreminjanja začetnih napetostno deformacijskih razmer, ko se je čelo proge v korakih po 1 m približevalo območju z manj nosilno hribino, kot je razvidno s slike št 7.



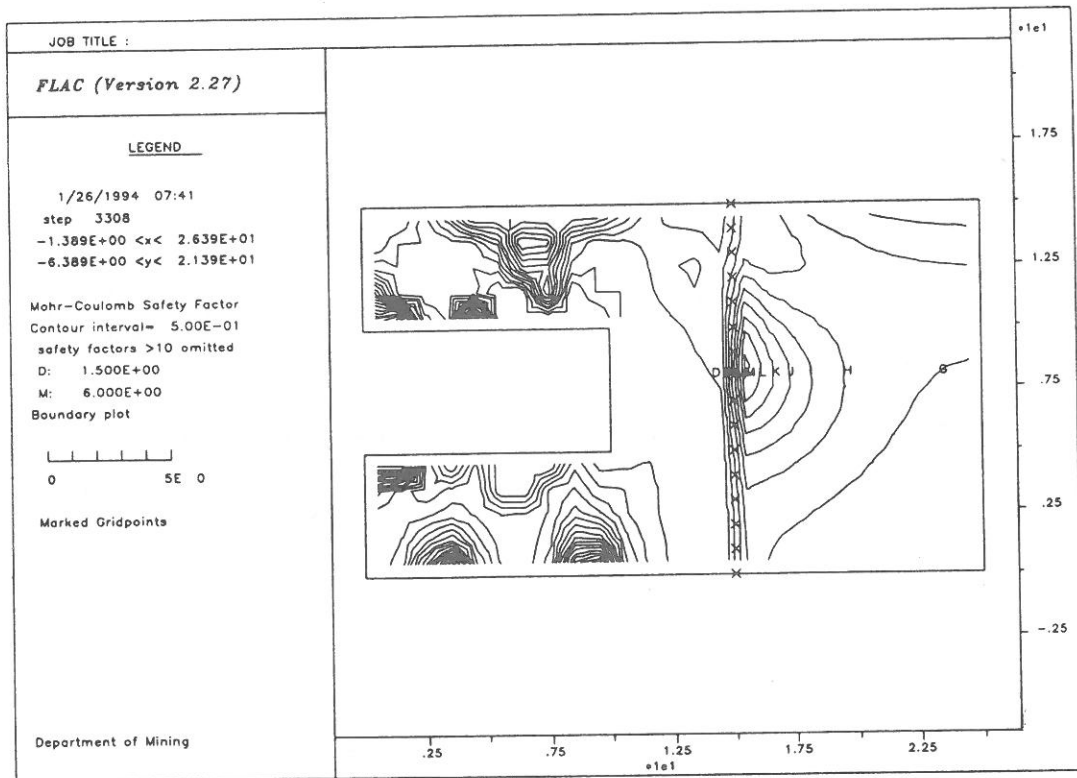
Slika 7. Geometrična zasnova različnih obtežilnih primerov.

Podobno kot pri analizah z MKE, smo tudi tu s kombinacijo dvojne dolžine premera proge popustljivo podprtega in togo podprtega odseka proge, aproksimativno določili robne pogoje, ki omogočajo simulacijo tega problema v ravnini.

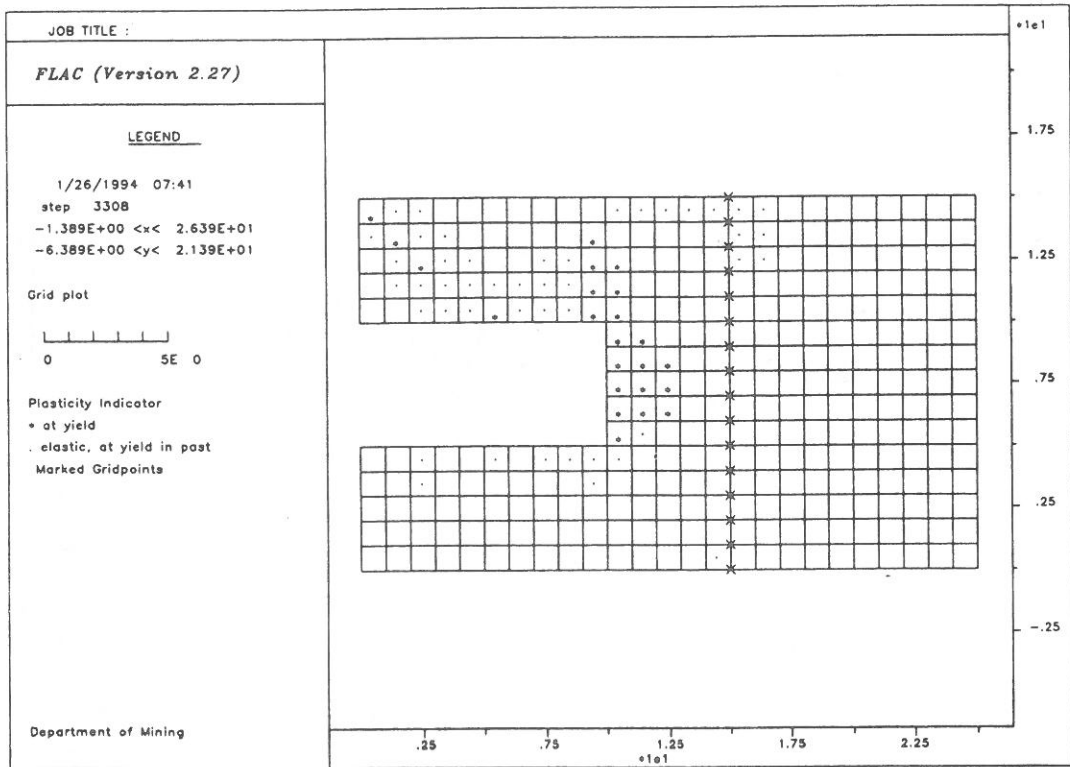
Za vsak shematsko prikazan primer na sliki 7, so bile izračunane napetostno deformacijske razmere za korake napredovanja 1 m, ki jih za zadnji računski korak podajamo na sliki 8, sliki 9, sliki 10 in sliki 11.



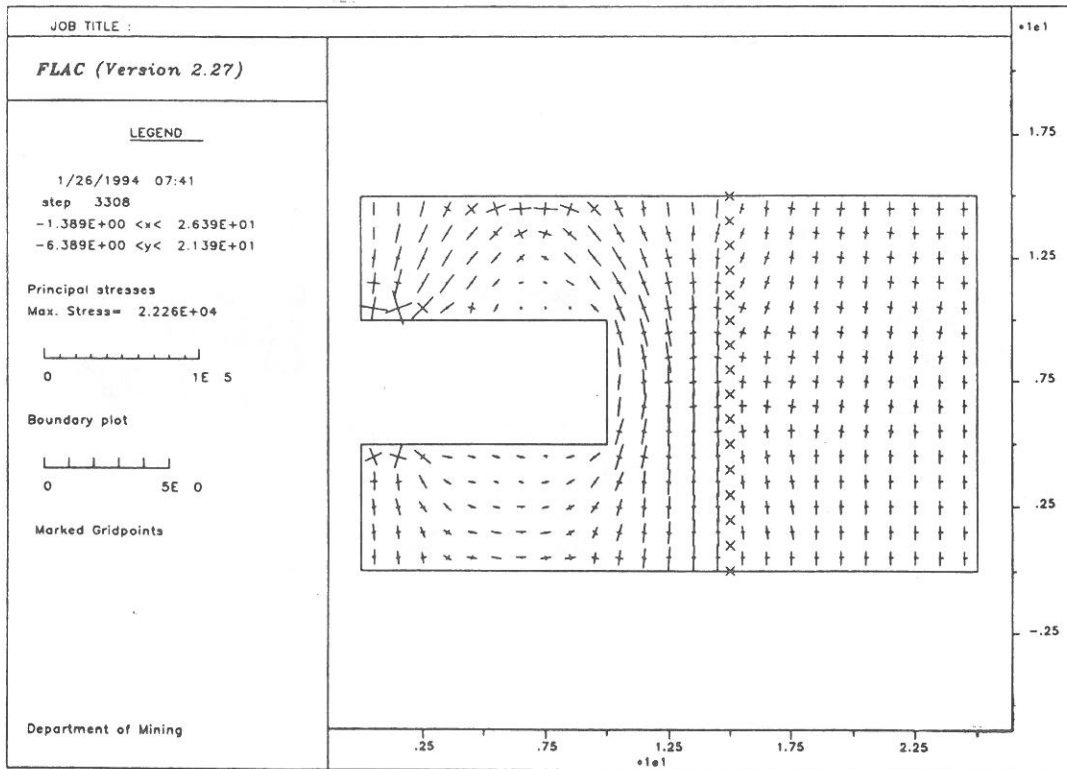
Slika 8. Polje pomikov vozlišč mreže.



Slika 9. Izolinije varnostnih količnikov.



Slika 10. Območja prekoračitve trdnosti.



Slika 11. Lege in velikosti glavnih napetosti.

SIMULACIJA NAPREDOVANJA IZKOPA ČELA PODZEMNEGA PROSTORA S PROGRAMOM FLAC^{3D}

Numerična metoda končnih diferenc, ki je uporabljena v računalniškem programu FLAC^{3D} sloni na numerični analizi mehanskih lastnosti kontinuuma kot tridimenzionalnega medija z upoštevanjem zakonitosti plastičnega tečenja. Kot je znano, mehanski princip obravnave medija temelji na splošnih osnovah, ki med seboj povezujejo specifične deformacije, napetosti in gibalne veličine ter konstitutivnih enačbah, ki določajo lastnosti idealnega materiala. Diferencialne enačbe popisujejo medsebojne odnose mehanskih (statičnih) in kinematičnih spremenljivk, ki so rešene za ustrezne geometrijske, robne in začetne napetostno deformacijske pogoje. Z vgrajenimi enačbami gibanja v programskem paketu FLAC^{3D} je možno popisati primarne napetostno deformacijske razmere v materialu, ki se ujemajo s stanjem, ki je praktično enako ravnotežnemu stanju.

Napetosti v izbrani točki so določene s simetričnim tenzorjem napetosti σ_{ij} , prav tako so tudi specifične deformacije in zasuki oziroma rotacije izražene v tenzorski obliki.

Enačbe gibanja in ravnotežja so izpeljane z upoštevanjem principa ohranjanja energije, tako, da je v matematičnem zapisu hitrost gibanja elementarnega volumna posledica učinkovanja sil, ki delujejo nanj. V primeru ničnega pospeška dobimo statične enačbe ravnotežja.

Robni začetni pogoji so določeni z mejnimi ploskvami in/ali hitrostmi (ki so posledica danih pomikov) ter masnimi silami, če je to potrebno. To pomeni, da je treba začetno napetostno stanje vnaprej predpisati oziroma ga eksplicitno določiti.

Konstitutivne enačbe so sestavljene iz devetih enačb hitrosti, skupaj z enačbami, s katerimi so popisane specifične deformacije in zasuki. Skupaj torej nastopa petnajst neznank, od katerih jih dvanajst (6+6) pripada komponentam napetostnega in deformacijskega tenzorja, tri pa komponentam vektorja hitrosti.

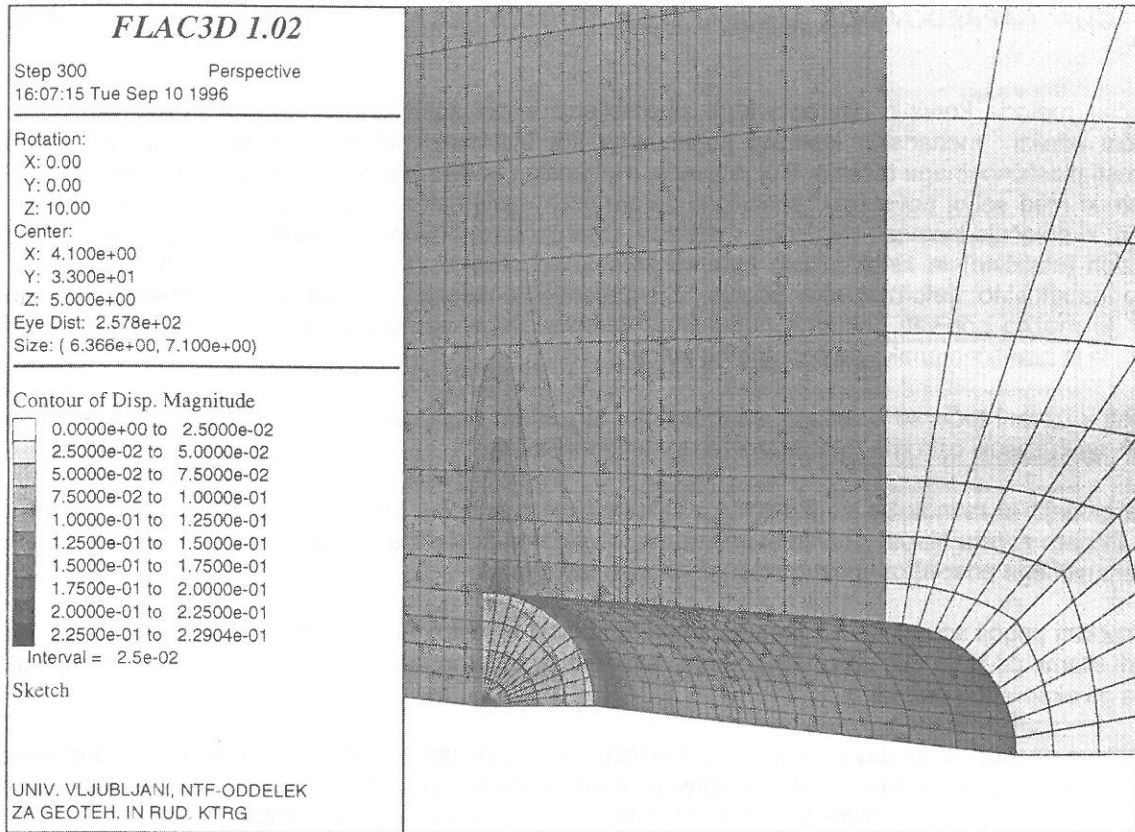
Podobno kot predhodnik tega programskega paketa FLAC 2D imamo tudi v tem tridimenzionalnem postopku reševanja možnost uporabe velikih in majhnih deformacij. Uporaba bloka, ki upošteva majhne deformacije, je prirejena postopkom, ki ne omogočajo geometričnih korekcij postavljenih mreže, ampak izhajajo iz prvotne zasnove.

Postavitev prostorskega modela, ki ga sestavljajo osemvozliščni prostorski elementi, zahteva posebno obdelavo, kakor tudi simulacija izkopa čela podzemnega prostora z aktiviranjem in deaktiviranjem določenih elementov.

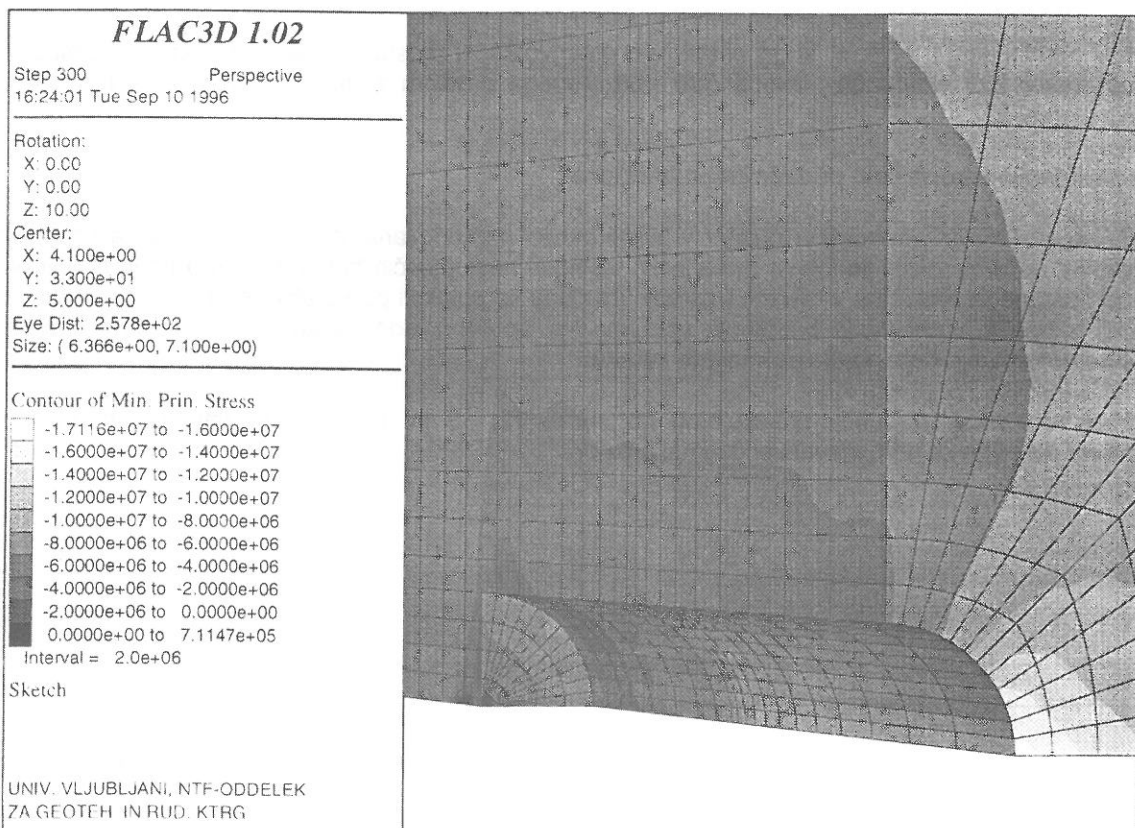
Primer simulacije izkopa čela podzemnega prostora

Izračune napetostno deformacijskih razmer v bližnji okolici napredovanja izkopa podzemnega prostora smo izvedli z upoštevanjem podobnih materialnih lastnosti nastopajočih hribin, kot smo jih uporabili pri obravnavi tovrstnega problema v ravnini. Postopki izračuna so potekali po korakih, skladno s predvideno simulacijo izkopa in vgrajevanja podpornih ukrepov. Vsi so bili izvedeni postopoma, z upoštevanjem napetostno deformacijskega stanja po vsakem koraku.

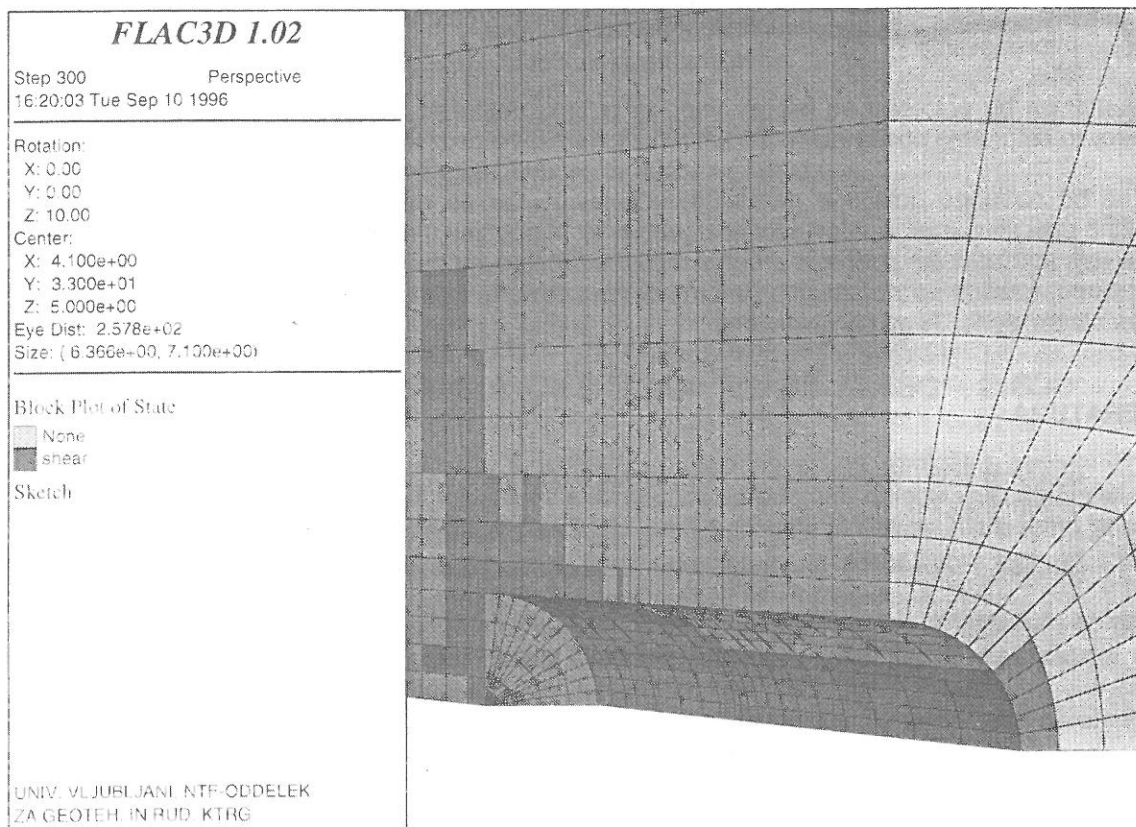
Kot primer rezultatov izračunov prikazujemo na slikah 12, 13 in 14 pomike, glavne napetosti in plastificirana območja za obravnavani podzemni prostor.



Slika 12. Pomiki območja okrog napredovanja izkopa čela podzemnega prostora



Slika 13. Glavne napetosti okrog čela izkopa podzemnega prostora



Slika 14. Plastificirana in porušena območja v okolici podzemnega prostora

Iz prikazanih grafičnih predstavitev povzemamo, da segajo strižne porušitve v neposredni okolici čela izkopa okrog 4 m globoko v material in največji izračunani pomiki v stropu prostora za čelom izkopa okrog 23 cm. Največje tlačne napetosti so pa izračunane na obodu prostora pod kotom okrog 40° , merjeno od vertikalne ravnine.

V splošnem lahko ugotovimo, da je izračunan primer primerljiv z drugimi predhodno navedenimi rezultati, ki so bili dobljeni na osnovi ravninskih modelov ob pripombi, da so s prostorskim modelom pomiki in napetosti v absolutnem iznosu manjši od vrednosti, kot so bile dobljene z drugimi računskimi metodami. Učinek geometrijske zasnove prostorskega modela, če drugih materialnih in tehnoloških parametrov ne upoštevamo, daje jasno sliko o razporedu in koncentracijah napetosti in pomikov v analiziranem prostoru.

POVZETKI

Napetostno deformacijske razmere v hribinskih zlogih v neposredni okolici in širšem območju okrog napredovanja čela izkopa podzemnega prostora so odvisne od geometrijskih, materialnih in tehnoloških parametrov.

S prilagoditvijo numerične metode (MKE) danim pogojem in zahtevam ob vključevanju poenostavitvev, ki se nanašajo na obravnavo dvodimenzionalnega problema, je izdelan programski paket, ki omogoča tovrstne simulacije.

Postopek vključuje pripravo geometrijskih in materialnih parametrov, ki so ugotovljeni z in situ in drugimi meritvami za določeno območje, kar omogoča izvedbo simulacije napredovanja izkopa čela podzemnega prostora.

Naveden postopek simulacije je prikazan na praktičnem primeru izdelave podzemnega prostora z določitvijo porušeni in kritičnih območij.

Narejena primerjava med računskimi rezultati simulacije z uporabo programskih paketov FLAC 2D in FLAC 3D je pokazala, da je relativno enostavna aproksimacija danega problema v ravninski model

sprejemljiva ob tem, da so z določenimi predpostavkami možne zadovoljive prognoze geotehničnih pogojev napredovanja.

Vsekakor pa bo potrebno še precej dela, da bi tudi prostorski model (FLAC 3D) omogočal hitro in učinkovito računanje posameznih faz napredovanja izkopa podzemnega prostora.

Vedno bo potrebno določene parametre ocenjevati, kar do neke mere onemogoča ali zmanjšuje direktno uporabnost pri izdelavi prognoz geotehničnih pogojev gradnje podzemnih prostorov. Trenutno je na tem aplikativnem področju prednost tridimenzionalnega modela v tem, da lahko dokaj natančno ugotovimo, kakšne so napetostno deformacijske razmere v natančno določenem geometrijskem in materialnem okolju, ki ga obravnavamo.

LITERATURA

- (1) Brady, B.H.G., Brown, E.T. (1985), Rock Mechanics for Underground Mining, George Allen & Unwin, London
- (2) Cundall, P.A. (1990). Numerical Modelling of Jointed and Faulted Rock, Mechanics of Jointed and Faulted Rock, pp 11 - 18, Rotterdam: A.A. Balkema
- (3) Goodman, R.E. (1980). Introduction to Rock Mechanics, New York: John Wiley & Sons
- (4) Hoek, E., Brown, E.T. (1980). Underground Excavation in Rock, London IMM
- (5) Likar, J. (1995). Analiza mehanizmov nenadnih izbruhov premoga in plina v premogovnikih, Univerza v Ljubljani, FNT, doktorska dizertacija
- (6) Itasca Consulting Group Inc. (1995), FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua Version 3.3, User's manual
- (7) Itasca Consulting Group Inc. (1994), FLAC 3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, User's Manual