

Jakob LIKAR
doc. dr., univ. dipl. inž. rud., Univerza v Ljubljani, Naravoslovno tehniška fakulteta

Vlado Vukadin,
univ. dipl. inž. geol, IRGO Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje

POVRATNA ANALIZA ČASOVNO ODVISNIH POMIKOV VEČKRAT SIDRANE STENE IZ UVRTANIH KOLOV

POVZETEK: Varovanje območij predvkopov predora Trojane je izvedeno z večkrat sidranimi stenami iz uvrtnih kolov premera 100 cm. Postopna gradnja teh podpornih konstrukcij je bila izvajana od zgoraj navzdol s preprečevanjem razvoja deformacij ob sproti geološki in geotehnični spremljavi. Merski podatki pridobljeni z geotehničnimi meritvami na teh območjih so pokazali, da je po zaključku posameznih faz gradnje sten iz uvrtnih kolov, še vedno prihajalo do manjših deformacij, ki so posledica časovno odvisnih sprememb hribinskega materiala. Ta pojav je analiziran s pomočjo modeliranja časovno odvisnih pomikov večkrat sidrane stene iz uvrtnih kolov, z uporabo programskega paketa PLAXIS 7.2, Soft-Soil-Creep (SSC) modela. Ta omogoča izračune deformacij in lezenja v hribinskih območjih ob upoštevanju modificiranih Cam Clay parametrov. SSC materialni model je razvit na osnovi 1D modela lezenja, ki opisuje edometrikske preizkuse in je bil razširjen za primere 3D napetostnih stanj, ob ohranjanju konceptov modificiranega Cam-Clay modela (MCC) in teorije viskoplastičnosti.

Glede na ugotovljeno geološko zgradbo območij predvkopov predora Trojane, je bil SSC materialni model uporabljen pri modeliranju časovnih odzivov plasti pregnetenega glinovca in pobočnega grušča, ki predstavljata litološka člena, kjer smo pričakovali največji razvoj deformacij in pojav lezenja. Ostale litološke člene, ki se pojavljajo na analiziranem območju, smo modelirani s pomočjo Hardening Soil (HS) materialnega modela.

BACK ANALYSIS OF TIME DEPENDENT DEFORMATIONS OF MULTI-ANCHORED PILE RETAINING WALL

SUMMARY: Securing the portal areas of Trojane tunnel, was achieved with constructing multi-anchored pile retaining walls, with piles diameter of 1m, in order to prevent soil displacement and activation of potentially unstable slopes above. Surveys were undertaken and measurements recorded throughout the construction of the retaining walls. Measured data showed that deformations occurred well beyond the end of certain construction phases, which can be explained with time dependent deformations or creep. This phenomena was analyzed with finite element code PLAXIS and use of Soft Soil Creep (SSC) model that accounts for creep. SSC model was developed on the basis of the oedometer tests with extension toward 3D states of stress and strain by incorporating concepts of Modified Cam Clay model and viscoplasticity.

On the basis of the geological, geotechnical survey and laboratory data, SSC material model was used for describing the layers of tectonically crushed shale and debris cover, where most of the creeping occurred. Other geological formations were modeled with Hardening Soil material model.

UVOD

Laboratorijske preiskave mnogokrat dajo le osnovne podatke o geomehanskih lastnostih posameznih geoloških materialov. Pravilna določitev geotehničnih karakteristik posamezne geološke formacije predstavlja, zaradi prostorskih variacij, lastnosti in razlike med naravnimi in laboratorijskimi pogoji še vedno velik problem. S povratnimi analizami največkrat preverjamo in umerjamo laboratorijsko dobljene geomehanske karakteristike posameznih materialov, na tako imenovanih »case studies« oz. »realnih primerih«, ter nenazadnje preverjamo uporabnost posameznih konstitutivnih materialnih enačb.

Večkrat sidrane stene iz uvrtnih kolov, na območju portalov predora Trojane, so glede na zahtevnost tovrstnih konstrukcij predmet povratnih geotehničnih analiz. Nadrobna spremljava gradnje, dobro poznavanje kompleksnih geoloških razmer, stalna merska spremljava deformacij pred, med in po izvedbi so bistveni dejavniki, ki so omogočili kvalitetno povratno stabilnostno analizo.

V tem prispevku prikazujemo povratno stabilnostno analizo značilnega prečnega profila, na območju zahodnega portala predora Trojane, kjer je so bile izmerjene največje deformacije stene iz uvrtnih kolov. Glede na kompleksne geološke razmere in izrazit časovni razvoj deformacij smo uporabili SSC (Soft Soil Creep) materialni model za plasti pregnetenega glinovca in pobočni grušč, v kombinaciji s HS (Hardening Soil) materialnim modelom za preostale geološke formacije.

Pri povratni analizi so bile upoštevane poleg faznosti izdelave stene iz uvrtnih kolov tudi konstrukcijske in geomehanske lastnosti konstrukcije vključno z geotehničnimi sidri. Rezultati so bili primerjani z izmerjenimi pomiki v inklinometriških ceveh in pomiki točk ugotovljenimi z geodetskimi meritvami.



Slika 1. Portalno območje Trojane zahod

MATERIALNI MODELI

HS (Hardening Soil) materialni model

HS materialni model je razvit na osnovi teorije plastičnosti in temelji na izračunu deformacij s pomočjo deformacijskih modulov, ki so odvisni od napetostnega stanja, v fazi primarnega obremenjevanja, kot v fazah ponovnega obremenjevanja in razbremenjevanja. Plastične deformacije so plod izračunanja z večploskovnimi ravninami popuščanja v napetostnem prostoru medtem, ko je utrjevanje materiala izotropno in odvisno tako od plastičnih strižnih kot od volumskih deformacij (Vermeer&Brinkgreve, 1998).

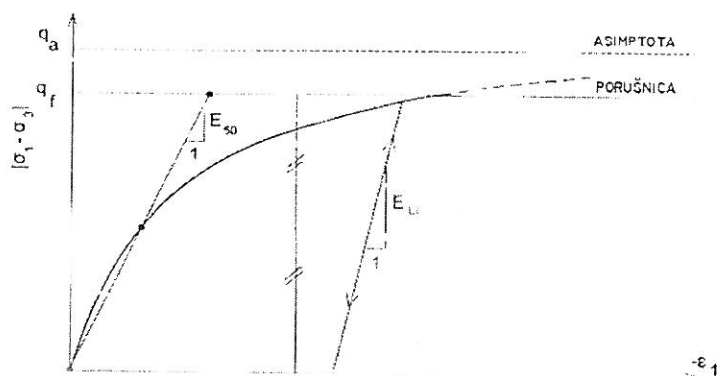
Vodilna ideja pri formulaciji HS materialnega modela je hiperbolična sovisnost med osno deformacijo ε_1 in distorzijsko invarianto q , pri standardnem triosnem dreniranem preizkusu (STDP). Ugotovljeno je, da se pri primarni distorzijski napetosti q in razvoju ireverzibilnih plastičnih deformacij (Konder& Zelasko, 1963), zemljinam zmanjša trdnost. Krivulje dobljene s standardnimi triosnimi dreniranimi preizkusi, lahko opišemo z naslednjimi enačbami:

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} \dots q < q_f \quad (1)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad q = (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (2)$$

$$q_f = \frac{6 \sin \varphi_p}{3 - \sin \varphi_p} (p + c \cot \varphi_p) \quad (3)$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \varphi_p}{\sigma^{ref} + c \cot \varphi_p} \right)^m \quad (4)$$



Slika 2. Hiperbolična sovisnost med deformacijo in napetostjo

V teh enačbah je pomen oznak naslednji:

q_f - končna distorzijska napetost, pri kateri pride do porušitve

q_a - asiptotična distorzijska napetost,

R_f - količnik porušitve,

ε_1 - osna specifična deformacija

φ_p - kot porušitve

c - kohezija

E_{50} - deformacijski modul pri 50 odstotni trdnostni kamnine

E_{50}^{ref} - referenčni deformacijski modul pri 50 odstotni trdnostni kamnine

$\sigma_{1,3}$ - glavne efektivne napetosti

σ^{ref} - referenčna efektivna napetost

m - materialna konstanta, ki določa vpliv normalnih napetosti

Ko $q_f = q$, nastopi plastično tečenje, razmerje med q_f in q_a , pa določa količnik porušitve R_f , ki mora biti manjši od 1. HS materialni model smo uporabili, ker se je na območju predvkopov predora Trojane, v primerjavi z Mohr-Coulombovim materialnim modelom izkazal kot bolj primeren. Zadovoljivo število laboratorijskih preiskav in merjeni podatki, so nam omogočili določitev vhodnih parametrov tudi za ta materialni model.

SSC (Soft Soil creep) materialni model

SSC materialni model je razvit na osnovi edometriških poskusov, kjer lahko pri večini zemljin opazujemo relativen hiter razvoj deformacij v fazi primarne konsolidacije, kateri sledi faza sekundarne konsolidacije ali lezenja, ki lahko traja veliko dlje in doprinese pomemben del k celotni deformaciji in lahko pripelje material do porušitve. Model je nadgradnja enodimenzionalnega logaritemskega zakona, ki je zapisan v inkrementni obliki in zajema tudi lezenje materiala, ki ga opazujemo pri edometriških preizkusih. Izdelan je za 3D napetostno stanje z upoštevanjem MCC (Modificiran Cam Clay) modela in konceptov viskoplastičnosti materialov, ki imajo te lastnosti (Vermeer&Neher, 1999).

V splošni obliki je materialni model zapisan v sledeči obliki:

$$\dot{\varepsilon} = \bar{D}^{-1} \dot{\sigma} + \frac{\dot{\varepsilon}_v^c}{\alpha} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \bar{\sigma}} = \bar{D}^{-1} \dot{\sigma} + \frac{\mu^*}{\alpha \tau} \left(\frac{p^{eq}}{p_p^{eq}} \right)^{\frac{\lambda^* - \kappa^*}{\mu^*}} \frac{\partial p^{eq}}{\partial \bar{\sigma}}, \quad (5)$$

kjer je

$$p_p^{eq} = p_{p0}^{eq} e^{\left(\frac{\varepsilon_v^c}{\lambda^* - \kappa^*} \right)}, \quad (6)$$

oziroma

$$\varepsilon_v^c = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \frac{p_p^{eq}}{p_{p0}^{eq}}. \quad (7)$$

\bar{D}	matrika elastičnosti
p_p^{eq}	prekonsolidacijska napetost
p^{eq}	ekvivalentna napetost oz. funkcija plastičnega potenciala
λ^*	modificiran kompresijski indeks
κ^*	modificiran nabrekalni indeks
μ^*	modificiran indeks lezenja
ε_v^c	specifična deformacija zaradi lezenja (creep)
$\dot{\sigma}$	vektor napetosti
$\dot{\varepsilon}$	vektor specifične deformacije

Pri porušitvi pa velja Mohr-Coulombov porušitveni kriterij. Osnovni vhodni podatki so pridobljeni iz edometrskih poskusov, končni vhodni podatki pa so dobljeni s povratnimi analizami.

OPIS KONSTRUKCIJE

Območje zahodnega porta predora Trojane sestavljajo različne podporne in oporne konstrukcije.

Na levi brežini desne in leve predorske cevi ter na čelni steni leve predorske cevi, so zgrajene sidrane stene iz uvrtnih kolov premera 100 cm. v medosni razdalji 150 cm oz. ob levi cevi 200 cm. Noge kolov segajo 5D pod nivoletu AC. Glave kolov so povezane med seboj z AB krovno gredo dimenzij 1.2 m × 0.5 m, poleg tega pa kole povezujejo AB sidrne grede, skozi katere so vgrajena sidra z delovno nosilnostjo 450 kN.

Med koli so vgrajene vertikalne drenažne cevi, ki so spojene s horizontalnimi drenažami vgrajenimi v zaledje, ki služijo odvodnjevanju hribin za steno iz uvrtnih kolov. Iztok iz vertikalnih drenaž je izveden v muldo pod spodnjo sidrno gredo, ter nato v zaključek stene iz uvrtnih kolov v levi cevi, oziroma po vkopani cevi na platoju pred steno desne cevi. Pred pričetkom izdelave sten iz uvrtnih kolov bilo potrebno pripraviti delovne platoje in urediti odvodnjevanje zaledja desne cevi. Takoj po izkopu vsakega kola do predpisane globine, je sledila vgradnja armaturnega koša in nato vgradnja cementnega betona kvalitete MB 30. Izdelavi kolov je sledila izdelava krovne vezne grede in ureditev neposrednega zaledja stene iz uvrtnih kolov, izdelava pohodne poti in odvodnega sistema površinskih vod ter ureditev brežine nad muldami, kot je prikazano na sliki 3.

Pri obravnavani konstrukciji, horizontalne sidrne grede iz armiranega cementnega betona MB 30 služijo za prenos obtežbe v okolno hribino, ki jo povzročajo geotehnična prednapeta vrвна sidra skupaj z uvrtnimi AB koli. Prednapeta pramena v vrvnih sidrih so izdelana iz jekla s trdnostjo 1570/1770 N/mm².

Vhodni podatki za steno iz uvrtnih kolov in geotehnična sidra, uporabljeni v programu PLAXIS, so podani v preglednici 1.

Preglednica 1. Vhodni podatki za steno iz uvrtnih kolov in geotehnična sidra

Stena iz uvrtnih kolov	Geotehnična sidra		
d_{eq} ekvivalentni premer stene iz uvrtnih kolov, ki predstavlja povprečno debelino sten	0,5 m	E elastični modul za jeklo	207000 MPA
E elastični modul za armiran beton	30000 MPA	A površina prereza sidra	556 m ²
EA osna togost stene iz uvrtnih kolov	1,575E+07 kN/m	EA osna togost sidra	1,151E+05 kN
EI upogibna togost stene iz uvrtnih kolov	3,281E+05 kNm ² /m	L _s razdalja med posameznimi sidri	3 m
M _p maksimalni upogibni moment	700 kNm/m	F _{max} maksimalna dopustna sila v sidru	984 kN

INŽENIRSKO GEOLOŠKE RAZMERE NA OBMOČJU ZAHODNEGA PORTALA

Geološke razmere na območju zahodnih predvkopov karakterizira bližina narivnega kontakta dolomita na grōdenske in karbonske plasti. Zahodni predvskopi se sicer nahajajo v celoti znotraj karbonskih plasti. Zaradi bližine nariva in močne prelomne cone, ki se nahaja v predelu stene iz uvrtnih kolov vzdolž desne cevi, pa so te plasti močno pregnetene in zdrobljene.

Vpad plasti se zaradi nagubanosti spreminja, v splošnem pa prevladujejo glinovci s polami meljevcev. Večje debeline peščenjakov se nahajajo že v območju predora oziroma višje v pobočju. Zlasti v območju stene iz uvrtnih kolov ob desni cevi je bila prognozirana povečana debelina pobočnega grušča oz. preperine. Po rezultatih inklinometriških meritev so bili v tem območju na globini 6 m že registrirani premiki, ko še ni bilo nobenega izkopnega posega, ki so nedvoumno potrdili, da je zaglinjen pobočni grušč počasi plazel po pobočju navzdol. Neizraziti premiki pa so se nakazovali tudi na globini 17 m, to je v območju do kjer se pojavlja tektonsko zgnetena hribina. Do te globine so se pojavljali tudi dotoki vode.

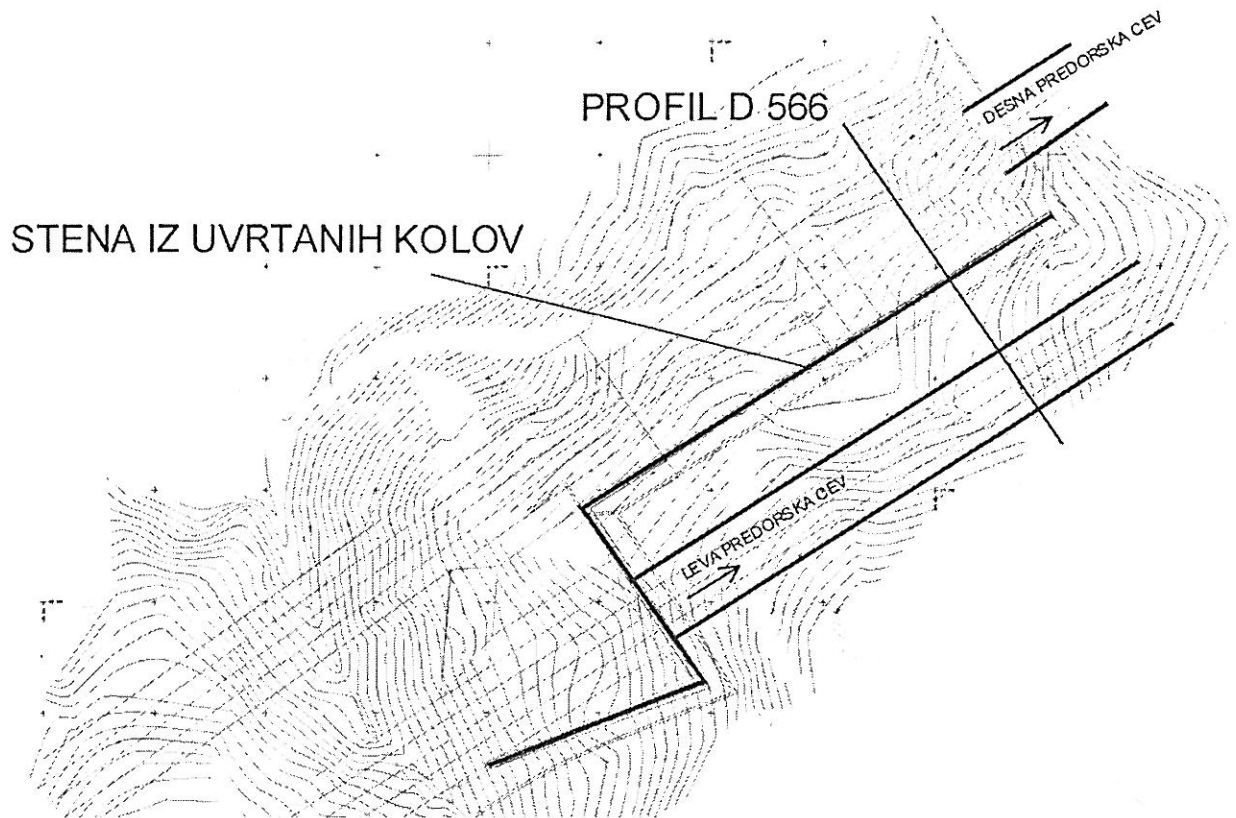
Debelina zaglinjenega pobočnega grušča s tektonsko glino in pregnetenim glinovcem vzdolž desne predorske cevi znaša do 10 m (slika 4). Maksimalna debelina 7 m do 10 m pa nastopa v pasu širine 20 do 25 m kjer poteka tudi aktivni plaz. V ostalem delu stene iz uvrtnih kolov, debelina preperine oziroma pobočnega grušča ne presega 5 m. Vzdolž stene ob desni cevi prevladuje v podlagi, pod pobočnim gruščem, skrilav glinovec. Ta je ponekod tektonsko zgneten v celotni višini izkopa kolov s tem, da se vmes pojavljajo bloki manj pretrte oziroma nepretrte kamnine.

POVRATNA STABILNOSTNA ANALIZA V PROFILU D566

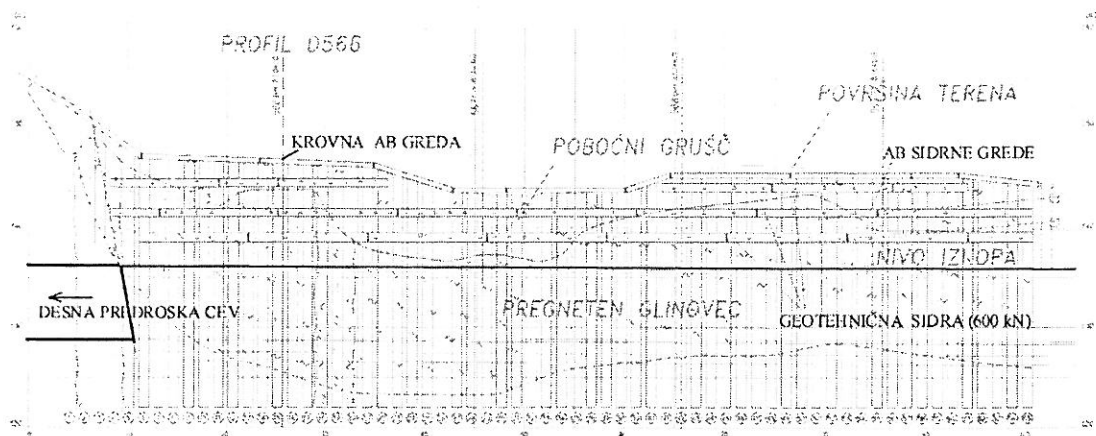
Prečni profil D566 poteka med koloma 15 in 16, kjer je debelina pobočnega grušča 3 m, pod njim pa se pojavlja pregneten skrilav glinovec, ki je po globini vedno manj pregneten, zadnje tri metre do nivoja noge uvrtnega kola, pa sta v menjavanju meljevec in glinovec, ki sta tektonsko praktično nepoškodovana. Vertikalne cone tektonske gline predstavljajo nadaljevanje subvertikalnih prelomov, ob katerih so se kamnine mestoma zdrobile in pregnetle. Višje v hribu pa se začeta pojavljati peščenjak in meljevec. Glede na inženirsko geološke razmere smo pri modeliranju uporabili naslednje geomehanske enote:

- menjavanje peščenjaka in meljevca
- meljevec
- glinovec
- tektonska glina
- pobočni grušč
- pregneten glinovec
- močno pregneten glinovec.

Pregneten glinovec smo razdelili na višje ležečega, močno pregnetenega in nižje ležečega, ki postopoma prehaja v neporušeno kamnino. V bližini profila sta bila vgrajena dva inklinometra in sicer v uvrtnem kolu 17 (TINC-ZD-17) in v zaledju obravnavane stene (TINC10), pri čemer je za primerjavo bolj primeren prvi. Situacija profila in čelni pogled na steno iz uvrtnih kolov sta prikazana na slikah 3 in 4.



Slika 3. Tlorisna situacija stene iz uvrtnih kolov na zahodnem portalu predora Trojane



Slika 4. Čelni pogled na steno iz uvrtnih kolov in profil D566

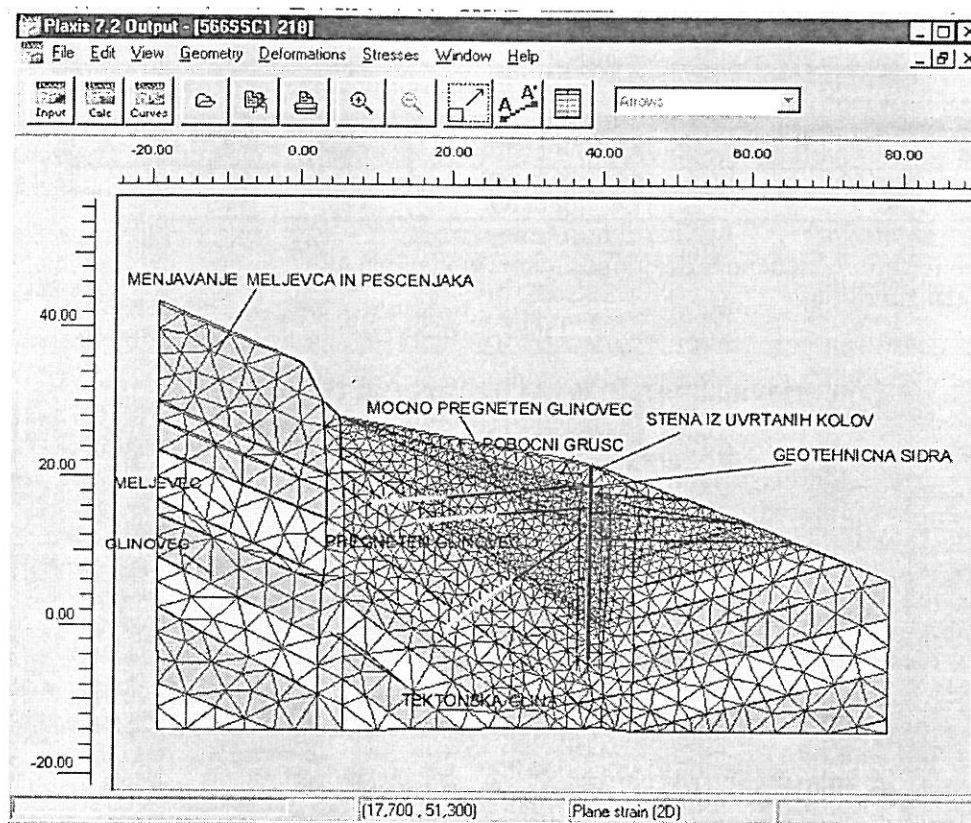
Pravilna določitev časovnega zaporedja izdelave stene iz uvrtnih kolov, je pomembna pri uporabi SSC materialnega modela. Za nično stanje je privzet čas, ko so bili izvrtani, zabetonirani in povezani s krovno gredo vsi koli na tem odseku. Aktivnosti, kot so faze izkopov, izdelave sidrnih gred, vrtnja za geotehnična sidra in sidranje, so potekale v različnih časovnih intervalih. Pri povratni stabilnostni analizi je bil upoštevan dejanski časovni vrstni red izdelave stene iz uvrtnih kolov.

Izhodiščne vhodne podatke smo pridobili iz laboratorijskih poskusov, medtem ko so v preglednici 2 predstavljene geotehnične karakteristike dobljene s pomočjo povratne analize.

Preglednica 2. Geomehanske karakteristike dobljene s pomočjo povratne analize

	Materialni model	c (kPa)	$\Phi(^{\circ})$	E_{so}^{ret} (MPa)	E_{ur}^{ret} (MPa)	m	κ'	λ'	μ'
Peščenjak-meljavec	HS	40	32	220	660	0,8	/	/	/
meljavec	HS	30	32	150	450	0,8	/	/	/
glinovec	HS	30	26	95	285	0,8			
tektonska glina	HS	10	27	220	660	0,8	/	/	/
pobočni grušč	SCC	5	24	/	/	/	0,01	0,001	0,000285
močno pregneten glinovec	SCC	8	12	/	/	/	0,005	0,001	0,0002
pregneten glinovec	SCC	10	14	/	/	/	0,004	0,0004	0,00016

Na sliki 5 pa je prikazana vhodna mreža za izračun po metodi končnih elementov (MKE).



Slika 5. Prečni prežez z vrisanimi geomehanskimi enotami in vhodno mrežo za izračun po MKE

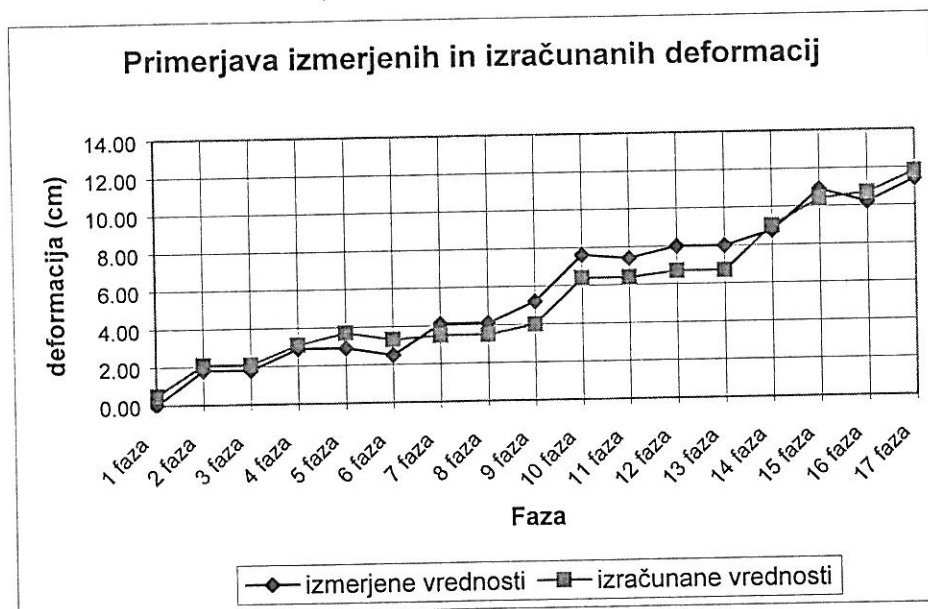
REZULTATI

Rezultate dobljene s povratno analizo profila D566, smo primerjali z merjenimi pomiki stene iz uvrtnih kolov v inklinometru TINC-ZD-17. V preglednici 3 je prikazana primerjava merjenih in izračunanih pomikov s programom PLAXIS z upoštevanjem realnega časa in posameznih konstrukcijskih faz.

Preglednica 3. Prikaz posameznih konstrukcijskih faz in primerjava izmerjenih in izračunanih pomikov

FAZA	Merjenji pomiki (cm)/ čas meritve	Izračunani pomiki (cm)
1 nično stanje (vgradnja kolov in povezava kolov s krovno grede): marec 99	0	0,5
2 stanje mirovanja del na steni iz uvrtnih kolov: 120 dni	1,8 (31.05.99)	2,1
3 pričetek izkopa 1. grede: 4.06.99	1,8 (31.05.99)	2,1
4 konec izkopa 1.grede: 14.06.99	2,9 (28.06.99)	3,1
5 izdelava sidrne grede in vrtanje vrtin za sidra: 10.7.99	/	3,7
6 sidranje 1. grede : 10.7.99	2,5 (14.07.99)	3,3
7 stanje mirovanja del na steni iz uvrtnih kolov: 70 dni	4,1 (24.09.99)	3,5
8 pričetek izkopa 2. grede: 20.09.99	4,1 (24.09.99)	3,5
9 konec izkopa 2.grede:01.10.99	5,2 (30.09.99)	4,0
10 izdelava sidrne grede in vrtanje vrtin za sidra: 10.11.99	7,6 (09.11.99)	6,4
11 sidranje 2. grede : 10.11.99	7,4 (12.11.99)	6,4
12 stanje mirovanja del na steni iz uvrtnih kolov: 20 dni	8,0 (03.12.99)	6,7
13 pričetek izkopa 3. grede: 08.12.99	8,0 (03.12.99)	6,7
14 konec izkopa 3.grede:18.12.99	8,75 (16.12.99)	9,0
15 izdelava sidrne grede in vrtanje vrtin za sidra: 06.01.00	10,9 (05.01.00)	10,4
16 sidranje 3. grede : 06.01.00	10,2 (08.01.00)	10,7
17 končno stanje :200 dni	11,4 (07.07.00)	11,8

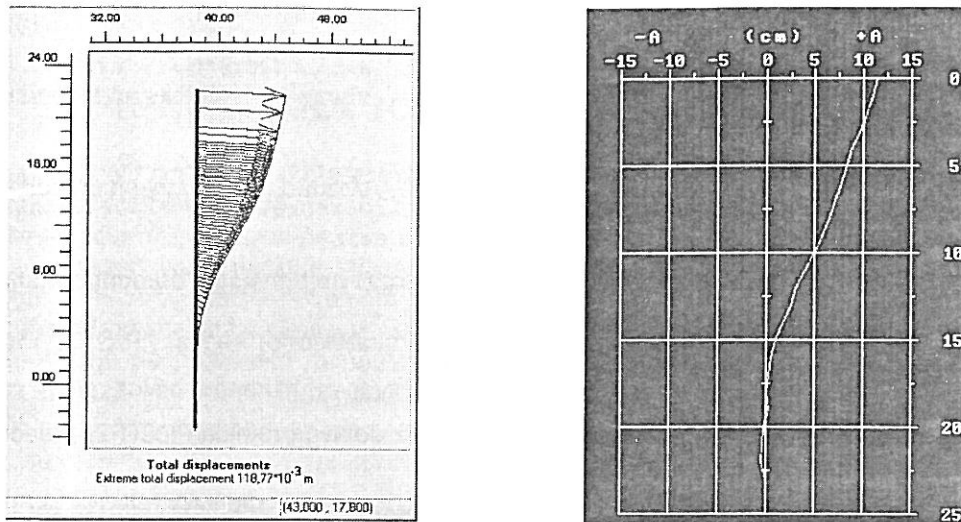
Primerjava izmerjenih in izračunanih deformacij stene iz uvrtnih kolov je grafično predstavljena po posameznih fazah na sliki 6.



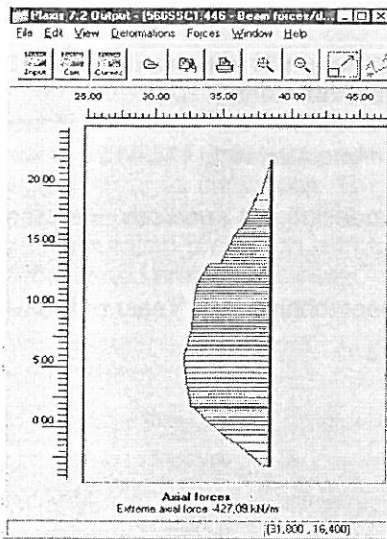
Slika 6. Primerjava med izračunanimi in izmerjenimi horizontalnimi pomiki v odvisnosti od tehnoloških faz

Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi parametri kaže večinoma na dobro ujemanje. Nekoliko večje odstopanje lahko opazimo le med izkopom 2. in 3. grede (med 8 in 14 fazo), kjer so izračunane deformacije nekoliko nižje od izmerjenih. Na diagramu so jasno izražene posamezne faze izvedbe konstrukcije, še posebej izkopi posameznih gred. Pri izračunu smo upoštevali tudi višji nivo talne vode, kot posledico povečanih padavin. Vpliv vode smo upoštevali od 11 faze naprej, pri čemer je ob koncu 14 faze upoštevano tudi obdobje, ko je voda v drenažah zamrznila in je bila stena iz uvrtnih kolov izpostavljenja dodatnemu hidrostatskemu pritisku.

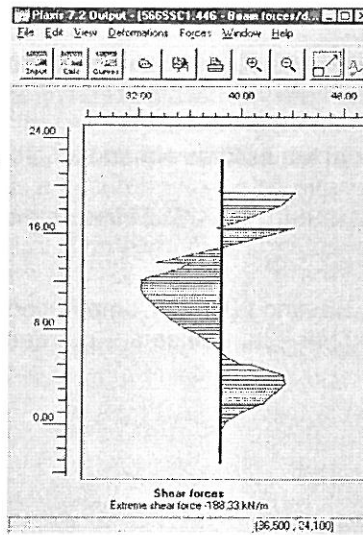
Na slikah 7-10 so prikazane deformacije stene po koncu zadnje faze (faza 17. - 200 dni), osne, strižne sile in upogibni momenti v modeliranem profilu.



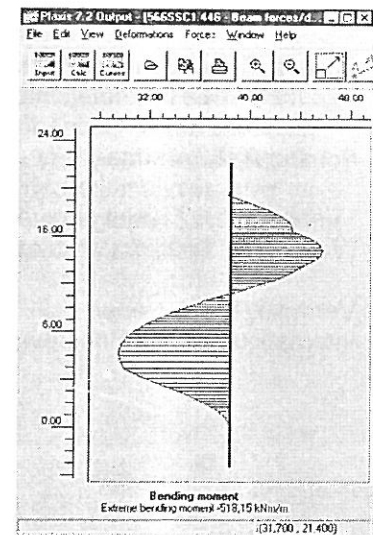
Slika 7. Primerjava izračunanih in izmerjenih deformacij z inklinometrom ob koncu zadnje faze



Slika 8. Osne sile



Slika 9. Strižne sile



Slika 10. Upogibni momenti

Izračunani največji upogibni momenti, strižne in osne sile so, preračunani na posamezni kol, še vedno v dopustnih mejah, ki so določene s projektom.

ZAKLJUČEK

Vhodni podatki za izdelavo geotehničnih analiz, ki so bili pridobljeni s predhodnimi raziskavami so bili dovolj kvalitetni za izdelavo geostatičnih izračunov. Vprašanje primernosti laboratorijsko dobljenih parametrov lezenja pa glede na heterogenost kamninske zgradbe ostaja odprto. Ugotovimo lahko, da bi bile in situ raziskave z dilatometrom bolj primerne za pridobitev realnih časovno odvisnih karakteristik.

Povratna analiza je potrdila primernost programskega paketa PLAXIS, za detaljne študije in analize dogajanj v zaledju podpornih konstrukcij. Rezultati so pokazali dobro ujemanje računskih in izmerjenih pomikov stene iz uvrtenih kolov v vseh fazah izvedbe konstrukcije.

Z izračuni je bil potrjen potek zahtevnega tehnološkega postopka gradnje vključujoč pomembnost zaporedja izvajanj določenih faz ob pravočasnem preprečevanju razvoja deformacij.

LITERATURA

- Chen, W. (1994), *Constitutive Equations for Engineering Materials- Volume 1: Elasticity and Modeling*, Elsevir, Amsterdam
- Chen, W. (1994), *Constitutive Equations for Engineering Materials- Volume 2: Plasticity and Modeling*, Elsevir, Amsterdam
- Čadež, F. et al, (1999), Geološko-geotehnično poročilo o izkopu pilotov na prevkopih predora Trojane
- Kondner, R.L. & Zelasko, J.S. (1963) A hyperbolic stress strain formulation for sands, Proc. 2nd Pan. Am. ICOSFE Brazil 1, 289-394
- Likar, J. et al, (1998), Zaključno geološko-geotehnično poročilo za izdelavo projekta PGD-PZI predora Trojane na AC Vransko-Blagovica
- Likar, J. et al, (1999-00), Geološko-geotehnična spremljava gradnje prevkopov predora Trojane, delna poročila, št 0 – 44
- Likar, J. et al, (1998), PZI za predor Trojane na AC Vransko-Blagovica
- Schanz, T. & Vermeer, P.A. & Bonnier P.G., (1999), Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of Plaxis International, (Ed. Brinkgreve, R.B.J), 281-296, Balkema, Rotterdam
- Schanz, T. & Vermeer, P.A. (1996), On the stiffness of sands, *Geotechnique* 48, No.1, 145-151
- Vermeer, P.A. & Brinkgreve, R.B.J., (1998), PLAXIS: Finite element code for soil and rock analyses (Version 7), Balkema, Rotterdam
- Vermeer, P.A. & Neher, H.P. (1999), Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of Plaxis International, (Ed. Brinkgreve, R.B.J), 249-262, Balkema, Rotterdam