

Primljen / Received: 19.12.2025.

Ispravljen / Corrected: 29.4.2026.

Prihvaćen / Accepted: 18.5.2026.

Dostupno online / Available online: 10.9.2026.

Mehaničke karakteristike i optimizacija parametara pri iskopu vrlo velikih i dubokih građevinskih jama na križnim presjednim postajama metroa

Autori:



⁴Izv.prof.dr.sc. **Zhennan Liu**, dipl.ing.građ.
759179282@qq.com

Autor za korespondenciju

¹**Zhiquan Wang**¹**Feng Tian**¹**Heng Zhang**¹**Mingliang Tao**¹**Ningxiang Luo**²**Zijian Wang**³**Chenyang Liu**⁴**Xingchao Tian**

¹Powerchina željeznička investicijska grupa
Peking, Kina

²Sinohydro inženjerski biro 4, Xining, Kina

³Sinohydro inženjerski biro 7, Chengdu, Kina

⁴Fakultet građevinarstva, prometa i vodne zaštite
Tehnološki institut Guizhou, Guiyang, Kina

Izvorni znanstveni rad

**Zhiquan Wang, Feng Tian, Heng Zhang, Mingliang Tao, Ningxiang Luo, Zijian Wang,
Chenyang Liu, Zhennan Liu, Xingchao Tian**

Mehaničke karakteristike i optimizacija parametara pri iskopu vrlo velikih i dubokih građevinskih jama na križnim presjednim postajama metroa

Stroga kontrola slijeganja tla i unutarnjih sila u potpornoj konstrukciji predstavlja ključni tehnički izazov pri iskopu vrlo velikih i dubokih građevinskih jama na križnim presjednim postajama metroa. Na temelju rezultata terenskog monitoringa na istraživanoj dionici i osnovnih geotehničkih parametara stijenske mase predložene su dvije fazne sheme iskopa, BZL1 i BZL2. Model je validiran usporedbom s podacima monitoringa. Analiziran je razvoj slijeganja tla i unutarnjih sila u potpornom sustavu za obje sheme iskopa te je odabrana optimalna shema. Rezultati su pokazali da je najveće odstupanje između numeričke simulacije i terenskih podataka o slijeganju tla za shemu iskopa BZL1 iznosilo 13,84 %, što upućuje na prihvatljivu pouzdanost uspostavljenog modela. Primjenom sheme BZL2 najveće kumulativno slijeganje površine može se smanjiti do 56,7 %, a najveća se aksijalna sila u poprečnim podupiračima može smanjiti do 48,14 %. Shema BZL2 pokazala se prikladnijim rješenjem za iskop vrlo velikih i dubokih građevinskih jama jer osigurava višu razinu sigurnosti i povoljniju ekonomičnost izvedbe. Dobiveni rezultati mogu poslužiti kao smjernice za izvođenje vrlo velikih i dubokih iskopa na križnim presjednim postajama metroa.

Ključne riječi:

križna presjedna postaja metroa, metro, vrlo velika i duboka građevinska jama, mehanička svojstva, slijeganje tla

Original research paper

**Zhiquan Wang, Feng Tian, Heng Zhang, Mingliang Tao, Ningxiang Luo, Zijian Wang,
Chenyang Liu, Zhennan Liu, Xingchao Tian**

Mechanical characteristics and parameter optimisation for extra-large deep foundation excavation at cross-transfer subway stations

Strict control of ground settlement and internal forces within the support structure represents a key technical challenge in the excavation of extra-large deep-foundation pits for cross-transfer metro stations. Based on the field monitoring results of the research section and fundamental geotechnical parameters of the rock mass, two-stage excavation schemes, BZL1 and BZL2, are proposed. The model was validated against the monitoring data. The evolution patterns of the ground settlement and internal forces within the support system for the two excavation schemes were analysed, and the optimal excavation scheme was selected. The results showed that the maximum error between the numerical simulation and field monitoring data of the ground settlement under the BZL1 excavation scheme was 13.84 %, indicating that the established model was reliable. When the BZL2 scheme for excavating foundation pits was employed, the peak cumulative surface settlement could be reduced by up to 56.7 %, whereas the peak axial force in the cross braces could be reduced by up to 48.14 %. The BZL2 scheme is the preferred option for excavating ultradeep large-scale foundation pits, offering superior safety and economic viability. These findings may serve as a reference for the construction of extra-large deep excavations at cross-transfer underground railway stations.

Key words:

cross-transfer, metro station, extra-large deep foundation, mechanical properties, ground subsidence

1. Uvod

Podzemni tračnički sustavi, kao što su metroi, predstavljaju važno moderno prometno rješenje za ublažavanje prometnih zagušenja u urbanim područjima te mogu znatno poboljšati uvjete površinskog prometa u gradovima. Postaja Banzhulin sustava Chongqing Rail Transit križna je presjedna postaja metroa izgrađena za linije 7 i 17. Površina iskopa građevinske jame na postaji Banzhulin veća je od 18.000 m², a najveća dubina iskopa iznosi 31,24 m. Sukladno Tehničkom pravilniku za uklanjanje zaštitnih konstrukcija supervelikh i dubokih građevinskih jama (T/LCH 030-2025), iskop se klasificira kao superduboka i velika građevinska jama. Pri takvim dimenzijama i dubinama mehaničko ponašanje stijenske mase i tla oko građevinske jame više ne zadovoljava osnovne pretpostavke homogenosti, kontinuiteta, malih deformacija i granične ravnoteže, zbog čega klasični mehanički modeli postaju neprimjenjivi [1–5]. Ostvarenje aktivne kontrole slijeganja površine tla i utjecaja na potporne konstrukcije u slučaju kombinacije "superduboke i velike građevinske jame + križne presjedne postaje" predstavlja hitan, ali još uvijek neriješen tehnički problem, stoga su istraživanje mehaničkih svojstava tla i stijenske mase pri iskopu iznimno dubokih građevinskih jama za križne presjedne postaje metroa te optimizacija metoda i parametara iskopa od presudne važnosti za sigurnu i učinkovitu izgradnju postaja metroa.

Brojna istraživanja bavila su se mehaničkim odzivom pri iskopu građevinskih jama za postaje metroa. Zhang i sur. [6] predložili su izraze unutarnjih sila za zidove pilota i spojeve dvonamjenskog zidnog konstrukcijskog sustava te analizirali njihova mehanička svojstva. Chen i sur. [7] analizirali su zakonitosti utjecaja iskopa u mehanim tlima na susjedna križanja podzemne željeznice na temelju podataka monitoringa. Wang i sur. [8] primijenili su numeričke simulacije za istraživanje zona utjecaja poremećaja i učinaka podzemnih voda povezanih s križno asimetričnim iskopima. Shi i sur. [9] proučavali su razvoj deformacija tla i potpornih konstrukcija te aksijalnih sila u podupiračima pri različitim metodama sekcijskog iskopa na primjeru postaje metroa u Wuhanu kako bi odredili sigurnu i ekonomičnu metodu iskopa. Li i sur. [10] predložili su primjenu odgođenog podupiranja tijekom iskopa dubokih građevinskih jama u tvrdoj stijeni, čime se u potpunosti iskorištava inherentna stabilnost stijenske mase i smanjuju troškovi izgradnje. Liang i sur. [11] istraživali su unutarnje mehanizme velikih deformacija koje nastaju tijekom iskopa dubokih jama podzemne željeznice metodom "tunnel-before-station". Li i sur. [12] ispitivali su sličnosti i razlike deformacijskih karakteristika između ultradubokih i konvencionalnih iskopa te istraživali pouzdane metode podupiranja. Ding i sur. [13] koristili su modelna ispitivanja i numeričke simulacije za analizu zaštitne učinkovitosti izolacijskih pilota tijekom iskopa podzemne željeznice te istraživali optimalne projektne parametre takvih pilota. Fu i sur. [14] predložili su metodu zbijenog injektiranja za kontrolu horizontalnih deformacija pri iskopima podzemne željeznice i optimizirali parametre injektiranja na temelju teorije

ekspanzije. Ge i sur. [15] razvili su novi aktivni spoj s vijcima visoke otpornosti na posmik koji može značajno povećati tlačnu i vlačnu otpornost građevinskih jama podzemne željeznice. Qi i sur. [16] koristili su numeričke simulacije za analizu mehaničkih karakteristika iskopa dubokih građevinskih jama u supervelikim projektima metroa te optimizirali potporni sustav na temelju analize potrošnje energije. Navedeni rezultati istraživanja pružaju značajne smjernice za optimizaciju planova iskopa i parametara potpore za građevinske jame podzemne željeznice. Križne presjedne postaje smještene na spojevima više podzemnih linija uključuju složenije procese iskopa i karakteristike mehaničkog odziva, što zahtijeva daljnja sustavna istraživanja.

Utjecaj iskopa podzemne željeznice na okolne zgrade i konstrukcije mora se strogo kontrolirati kako bi se osigurala sigurnost projekta. Chen i sur. [17] predložili su tehniku zaštite tijekom iskopa građevinske jame kojom je najveća horizontalna deformacija smanjena za 43 %. Zhao i sur. [18] analizirali su zakonitosti utjecaja asimetričnog iskopa duboke građevinske jame na susjedne postaje metroa te predložili optimalnu shemu iskopa. Zhang i sur. [19] razvili su model STdeep za precizno predviđanje slijeganja površine tla kod iskopa građevinskih jama za metro. Wu i sur. [20] predložili su inteligentni model evaluacije temeljen na višestrukoj fuziji izvora podataka kako bi se postigla sveobuhvatna višekriterijska procjena sigurnosnog stanja građevinskih jama za metro. Wei i sur. [21] primijenili su pokuse opterećenja u punom mjerilu za istraživanje karakteristika mehaničkog odziva tijekom iskopa građevinske jame metroa na primjeru metroa u Hangzhouu. Xu i sur. [22] koristili su projekt duboke građevinske jame metroa u Šangaju kao studiju slučaja za razvoj neuronskog modela dugoročne i kratkoročne memorije radi preciznog predviđanja slijeganja zgrada tijekom iskopa. Liu i sur. [23] koristili su numeričke simulacije za analizu slijeganja građevinskih jama za metro tijekom iskopa metodom "cut-and-cover" uz zatrpavanje na primjeru linije 12 metroa u Wuhanu. Xu i sur. [24] razvili su model za predviđanje deformacija potpornih konstrukcija u dubokim iskopima podzemne željeznice temeljen na modelu slučajne šume te utvrdili da dubina konstrukcije značajno utječe na predviđanje deformacija. Gao i sur. [25] razvili su trodimenzionalni nelinearni numerički model koji uključuje učinke tla, konstrukcije i njihove interakcije kako bi istražili utjecaj tipa konstrukcije i metode gradnje na seizmičko ponašanje građevinskih jama podzemne željeznice. Dong i sur. [26] uspostavili su model katastrofalnog horizontalnog pomaka temeljen na prilagođenoj log-periodičnoj funkciji, omogućujući preciznu identifikaciju i rano upozoravanje na kritične lokacije u potpornim pilotima građevinskih jama za metro.

Kako bi se omogućio siguran i ekonomičan iskop vrlo velikih i dubokih građevinskih jama na križnim presjednim postajama metroa, u ovom se istraživanju predlaže kombinirana metoda kontrole "zadržano jezgreno tlo + simetrični iskop". Temeljno načelo metode jest aktivno zadržavanje središnjeg stijenskog stupa radi smanjenja asimetričnih poremećaja u putanji rasterećenja okolne stijenske mase. Time se prevladavaju ograničenja tradicionalnog iskopa u kosinama i same primjene

The drawing consists of two main parts: a plan view of the station layout on the left and a vertical soil profile on the right.

Station Layout (Left):

- Central Structure:** A horizontal rectangular structure with a grid of blue lines inside, labeled "Metro linija 17" (Metro line 17) in red.
- Top Section:** A vertical extension of the central structure, labeled "Biotehnološka tvrtka" (Biotechnological company) in black. It has a red arrow pointing to it with the text "Duljina 245,5 m", "Širina 43,8 m", and "Maksimalna dubina 22,12 m".
- Bottom Section:** A vertical extension of the central structure, labeled "Zemljište za gradnju škole" (Land for school construction) in black. It has a red arrow pointing to it with the text "Duljina 197,5 m", "Širina 38,14 m", and "Maksimalna dubina 31,24 m".
- Left Section:** A horizontal extension of the central structure, labeled "Rezervirano prazno zemljište" (Reserved empty land) in black. It has a red arrow pointing to it with the text "Duljina 197,5 m", "Širina 38,14 m", and "Maksimalna dubina 31,24 m".
- Right Section:** A horizontal extension of the central structure, labeled "Zemljište za gradnju škole" (Land for school construction) in black.
- Labels:** "Metro linija 17" is in red. "Biotehnološka tvrtka" and "Rezervirano prazno zemljište" are in black. "Zemljište za gradnju škole" appears twice in black.

Soil Profile (Right):

- Top Layer:** A light brown, textured layer labeled "Mješoviti nasipni materijal" (Mixed fill material) in black.
- Second Layer:** A dark brown, textured layer labeled "Crvena glina" (Red clay) in black.
- Third Layer:** A light gray, textured layer labeled "Jako trošni pješčenjak" (Highly eroded sandstone) in black.
- Fourth Layer:** A dark brown, textured layer labeled "Pješčani muljeviti kamen" (Sandy silty stone) in black.
- Bottom Layer:** A light gray, textured layer labeled "Pješčenjak" (Sandstone) in black.

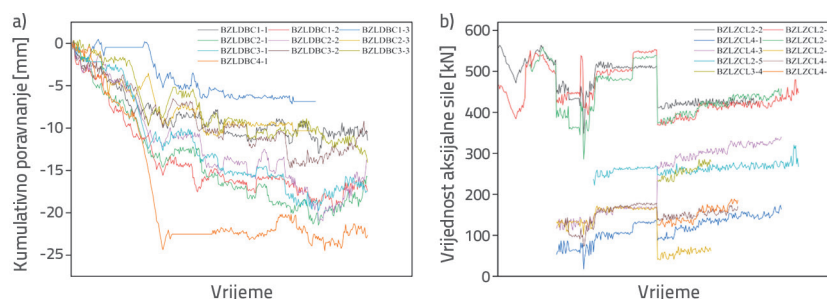
Caption: "Raspored stanice Banzhulin" (Station layout Banzhulin) in blue.

Slika 1. Tlocrt postaje Banzhulin i stratigrafsko-litološki uvjeti na lokaciji

2. Opis projekta

2.1. Opis lokacije i konstrukcije

Slika 2. Raspored mjernih točaka za površinsko slijeganje tla i unutarnje sile u čeličnim podupiračima na postaji Banzhulin

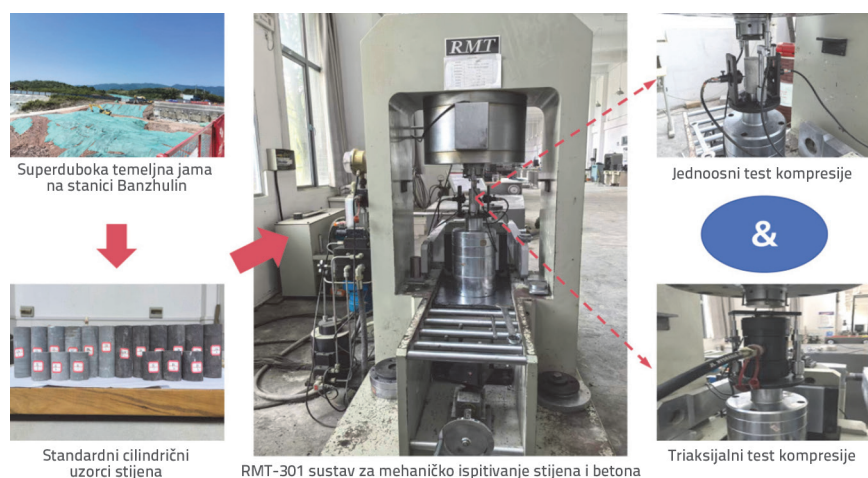


Slika 3. Rezultati monitoringa površinskog slijeganja tla i unutarnjih sila u čeličnim podupiračima na postaji Banzhulin: a) slijeganje tla; b) unutarnje sile u čeličnim podupiračima

Kao što je prikazano na slici 3., površinsko slijeganje tla bilo je posebno izraženo na lokacijama BZLDBC2-1 i BZLDBC4-1, pri čemu je kumulativno slijeganje prelazilo 20 mm. Unutarnje sile u čeličnim podupiračima na lokacijama BZLZCL2-1, BZLZCL2-2 i BZLZCL2-3 bile su znatne, s najvećim vrijednostima većima od 550 kN. Rezultati terenskog monitoringa upućuju na to da su pri postojećoj metodologiji iskopa unutarnje sile u potpornoj konstrukciji značajne, uz izraženo slijeganje u pojedinim rubnim područjima, stoga je potrebno optimizirati i prilagoditi postojeću tehnologiju dubokog iskopa kako bi se smanjila naprezanja u potpornoj konstrukciji, kontrolirale deformacije iskopa te osigurala sigurna i učinkovita izvedba.

2.2. Ispitivanje fizikalno-mehaničkih parametara tla i stijenske mase

Točno određivanje osnovnih mehaničkih parametara tla i stijenske mase na istraživanoj dionici lokacije Banzhulin preduvjet je za prilagodbu metodologije iskopa građevinske jame. Slojevi tla u istraživanom području pokazuju dobru izotropnost. Na uzorcima tla provedena su izravna posmična i troosna ispitivanja, pri čemu su u svakoj skupini ispitana tri uzorka. Osnovni mehanički parametri tla u istraživanom području određeni su na temelju geotehničkog istražnog izvješća za postaju Banzhulin i navedeni su u tablici 1.



Slika 4. Postupak statičkog ispitivanja uzoraka stijena

Tablica 1. Osnovni mehanički parametri geomaterijala

Litologija	Gustoća [g/cm ³]	Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [GPa]	Poissonov omjer	Kohezija [kPa]	Unutarnji kut trenja [°]
Mješoviti nasipni materijal	2,05	/	0,01	0,30	5,0	25,0
Crvena glina	2,01	/	0,03	0,35	20,6	12,0
Jako trošni pješčenjak	2,25	8,1	0,40	0,40	200,0	30,0
Pjeskoviti muljeviti kamen	2,56	18,5	1,21	0,38	564,0	29,2
Pješčenjak	2,49	25,0	3,87	0,22	1610,0	32,5

Stijenska masa u istraživanom području ima složenu i promjenjivu litološku građu s izraženim anizotropnim svojstvima. Kako bi se precizno odredili mehanički parametri stijene, uzorci jako trošnog pješčenjaka, pjeskovitog muljevitca i pješčenjaka obrađeni su u standardne cilindrične uzorke dimenzija 50 mm × 100 mm. Gustoće uzoraka stijene određene su pomičnim mjerilom i elektroničkom vagom. Jednoosna i troosna tlačna ispitivanja provedena su pomoću sustava RMT-301 za ispitivanje stijena i betona. Ispitivanja su provedena uz upravljanje pomakom pri konstantnoj brzini od 0,005 mm/s. Konfinirajući tlakovi pri troosnim tlačnim ispitivanjima iznosili su 0, 5, 10 i 15 MPa. Jednoosna tlačna ispitivanja provedena su u tri ponavljanja za svaku vrstu stijene, a troosna tlačna ispitivanja pri svakom konfinirajućem tlaku provedena su u dvama ponavljanjima. Konačni rezultati prikazani su kao srednje vrijednosti kako bi se smanjio utjecaj raspršenosti podataka. Postupak statičkog ispitivanja uzoraka stijene prikazan je na slici 4., a osnovni mehanički parametri različitih vrsta stijena navedeni su u tablici 1.

Stijenska masa sastoji se od stijene i diskontinuiranih strukturnih ploha, a njezina čvrstoća i krutost znatno su manje od onih kod intaktne stijene, stoga je potrebno dodatno reducirati osnovne mehaničke parametre stijena u odnosu na vrijednosti navedene u tablici 1. U ovom istraživanju primijenjeni su sustav geološkog indeksa čvrstoće (GSI) i Hoek-Brownov kriterij tečenja za

redukciju jednoosne tlačne čvrstoće, modula elastičnosti i kohezije [27–28].

Određivanje GSI vrijednosti i parametra poremećenosti D ključno je za primjenu Hoek-Brownova kriterija. Na temelju Standarda za inženjersku klasifikaciju stijenskih masa (GB/T 50218-2014) i podataka terenskih geoloških istraživanja stijenska masa na lokaciji klasificirana je kao stupanj IV. Prema kvalitativnom GSI dijagramu temeljenom na Hoek-Brownovu kriteriju, uzimajući u obzir blokovitu/zdrobljenu strukturu stijenske mase i opće stanje strukturnih ploha, vrijednost GSI-ja određena je na 45. Ta je vrijednost u skladu s empirijskim rasponom za stijenske mase stupnja IV.

Tablica 2. Osnovni korigirani mehanički parametri stijenske mase i tla

Litologija	Gustoća [g/cm ³]	Jednoosna tlačna čvrstoća [MPa]	Modul elastičnosti [MPa]	Poissonov omjer	Kohezija [kPa]	Unutarnji kut trenja [°]
Mješoviti nasipni materijal	2,05	/	0,78	0,30	1,0	25,0
Crvena glina	2,01	/	2,34	0,35	4,0	12,0
Jako trošni pješčenjak	2,25	0,15	31,2	0,40	40,0	30,0
Pjeskoviti muljeviti kamen	2,56	0,34	94,4	0,38	113,0	29,2
Pješčenjak	2,49	0,46	302,0	0,22	322,0	32,5

Pri iskopima građevinskih jama za metro često se primjenjuje miniranje ili mehanički iskop, pa se za parametar poremećenosti D preporučuje vrijednost 0,7. Mehanički parametri stijena korigirani su u parametre stijenske mase uporabom formula koje preporučuje Hoek-Brown, prikazanih u izrazima (1) i (2):

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (1)$$

$$E_{rm} = E_i \cdot \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1+e^{(60+15D-GSI)/11}} \right) \quad (2)$$

gdje σ_{cm} i E_{rm} predstavljaju korigiranu tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti stijenske mase, a σ_{ci} i E_i predstavljaju tlačnu čvrstoću i modul elastičnosti intaktne stijene. Parametri s i a predstavljaju Hoek-Brownove konstante.

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

$$a = 1/2 + 1/6 \cdot (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

Za redukciju kohezije korišten je računalni program RocLab (Rocscience), pri čemu su uneseni parametri σ_{ci} , m_i , GSI i D . Korigirani mehanički parametri stijenske mase i tla navedeni su u tablici 2.

3. Izrada modela i validacija parametara

3.1. Izrada numeričkog modela

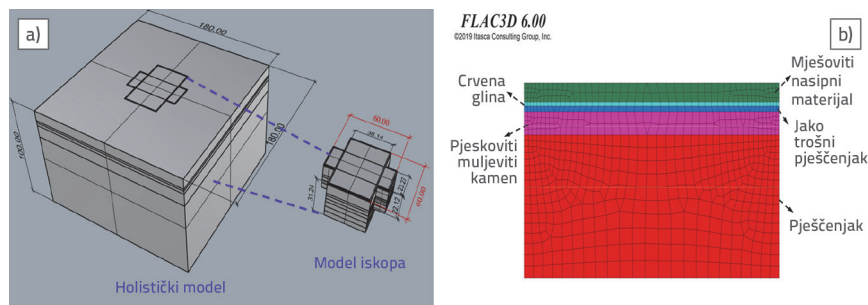
Za izradu trodimenzionalnog modela iskopa iznimno duboke građevinske jame na postaji Banzhulin korišten je program

FLAC3D, temeljen na metodi konačnih razlika. Optimalna shema iskopa odabrana je analizom razvoja slijeganja okolnog tla i unutarnjih sila u čeličnim poprečnim podupiračima pri različitim redosljedima iskopa i podupiranja. Omjeri duljine i širine građevinskih jama za linije 17 i 7 veći su od pet, što upućuje na izdužene građevinske jame. Geološki uvjeti duž iskopa građevinske jame uglavnom su jednaki. Na temelju pretpostavke ravninskog stanja deformacija za numeričku analizu odabran je tipični središnji odsječak duljine iskopa 60 m. Duljina, širina i dubina iskopa građevinske jame na postaji Banzhulin za liniju 17 iznose 60,00 m, 38,14 m i 31,24 m, a za liniju 7 iznose 60,00 m, 43,8 m i 22,12 m. Sukladno pravilima geotehničkog modeliranja, ukupne dimenzije modela trebaju biti najmanje tri do pet puta veće od raspona iskopa. Radi postizanja ravnoteže između računalne točnosti i učinkovitosti, duljina, širina i dubina modela postavljene su na 180 m, 180 m i 100 m, što odgovara 3,0, 4,1 i 3,2 puta većim vrijednostima od najvećih raspona. Donja ploha modela potpuno je fiksirana, površina modela definirana je kao slobodna granica, a na preostalom plohama primijenjeni su normalni rubni uvjeti. Svaki sloj stijene i tla modeliran je kao homogeni materijal, a proračuni su provedeni primjenom Mohr-Coulombova kriterija sloma. Krunska greda modelirana je SHELL elementima, a potporni su piloti i poprečni podupirači modelirani CABLE elementima. Mreža modela sastojala se od heksaedarskih elemenata te je sadržavala 124.252 elementa i 85.321 čvor. Parametri modela krunske grede, poprečnih podupirača i pilota navedeni su u tablici 3. Trodimenzionalni numerički model prikazan je na slici 5.

U nastavku se obrazlažu razlozi zanemarivanja vremenskih učinaka pri primjeni Mohr-Coulombova modela. Prvo, trajanje radova na građevinskim jamama znatno je kraće od uporabnog vijeka trajnih podzemnih konstrukcija, poput tunela. Razdoblje iskopa i podupiranja vrlo velikih i dubokih građevinskih jama za projekte metroa obično traje od 6 do 18 mjeseci, a za razvoj

Tablica 3. Parametri modela krunske grede, poprečnih podupirača i pilota

Materijali	Gustoća [g/cm ³]	Modul elastičnosti [GPa]	Poissonov omjer
Krunska greda	2,4	32	0,2
Betonski poprečni podupirač	2,4	32	0,2
Čelični poprečni podupirač	7,85	200	0,2
Pilot	2,4	25	0,2



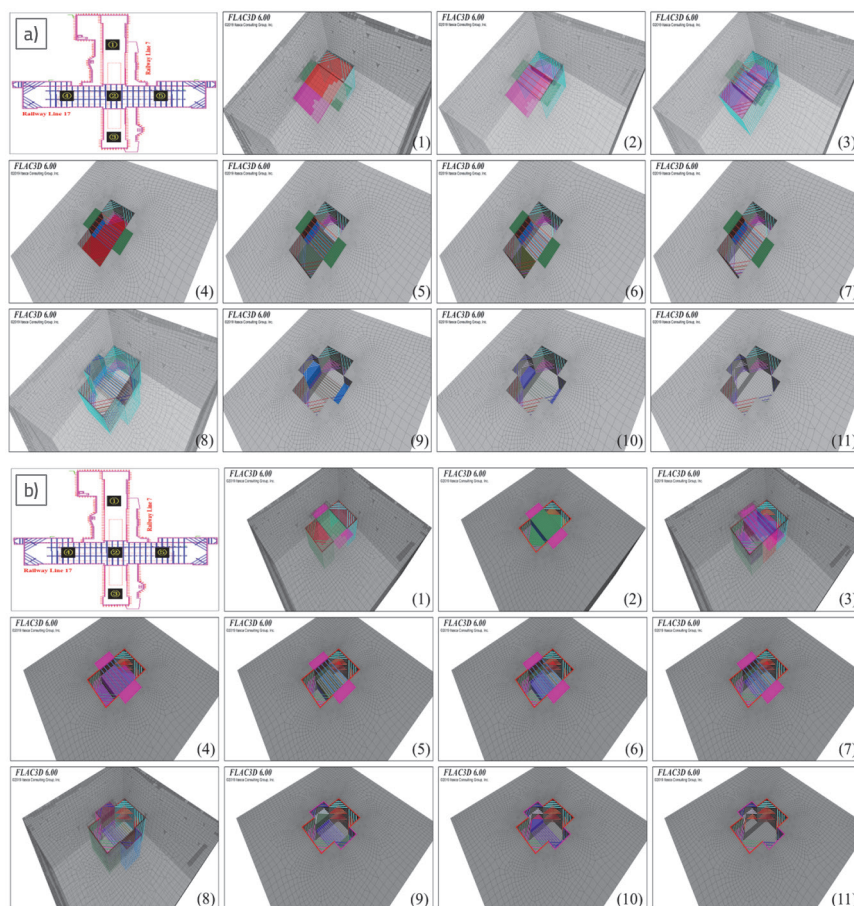
Slika 5. Trodimenzionalni numerički model: a) dimenzije modela; b) simulacijski model

značajnog puzanja pjeskovitog muljevitog kamena obično potrebno je nekoliko godina ili dulje. Drugo, iskop građevinske jame dinamičan je proces faznog rasterećenja, a ne stanje stalnog opterećenja. Za razliku od stalnog opterećenja u klasičnim ispitivanjima puzanja, putanja naprezanja okolne stijenske mase tijekom iskopa građevinske jame obilježena je faznim rasterećenjem, pri čemu se podupiranje izvodi neposredno nakon svake faze rasterećenja. U takvim ciklusima povremenog rasterećenja i podupiranja deformacije puzanja mogu se djelomično razviti tijekom zadržavanja pojedine faze opterećenja te biti prikrivene naknadnim poremećajima izazvanima iskopom. Treće, u ovom se istraživanju primjenjuje shema podijeljenog simetričnog iskopa u kombinaciji sa zadržanim jezgrenim tlom. Vremenski ovisne deformacije okolne stijenske mase učinkovito se ograničavaju aktivnom kontrolom putanje rasterećenja i pravodobnim podupiranjem, stoga se, iako muljevitac pokazuje reološka svojstva, utjecaj vremenskih učinaka može razumno zanemariti u specifičnim inženjerskim uvjetima razmatranima u ovom istraživanju: kratko trajanje izgradnje, fazno rasterećenje i pravodobno podupiranje.

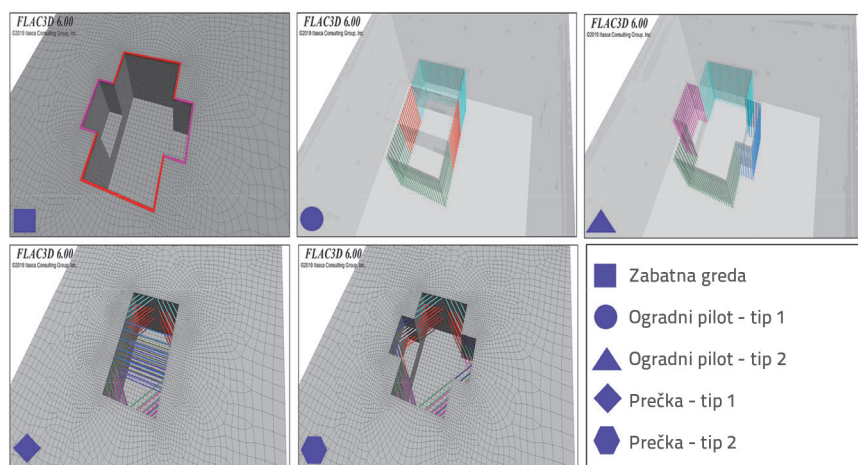
Redoslijed iskopa i podupiranja znatno utječe na deformacije i mehanički odziv vrlo velikih dubokih iskopa, stoga su izrađena dva simulacijska modela iskopa, BZL1 i BZL2, radi analize deformacija i mehaničkog odziva te optimizacije sheme iskopa.

Shema BZL1 prikazana je na slici 6.a. Specifični postupak iskopa je sljedeći: iskopava se 1,3 m stijene i tla u području ① linije 7, izvode se piloti, krunske grede i betonski poprečni podupirači. Iskopava se 8,37 m stijene i tla u području ① linije 7 te se ugrađuju čelični poprečni podupirači. Istodobno se iskopava 1,3 m stijene i tla u području ② te se izvode

se iskopava 7,95 m stijene i tla u području ② i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Istodobno se iskopava 8,37 m stijene i tla u području ③ linije 7 i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Iskopava se preostalih 9,12 m stijene i tla u području ① linije 7. Istodobno se iskopava 4,5 m stijene i tla u području ② i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Istodobno se iskopava 7,95 m stijene i tla u području ③ linije 7 i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Iskopava se preostalih 9,12 m stijene i tla u području ②. Istodobno se iskopava 4,5 m stijene i tla u području ③ linije 7 i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Iskopava se preostalih 9,12 m stijene i tla u području ③ linije 7. Istodobno se iskopava 1,3 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 uz izvođenje



Slika 6. Procesi iskopa za programe BZL1 i BZL2: a) program BZL1; b) program BZL2



Slika 7. Trodimenzionalni simulacijski model krunske grede i poprečnih podupirača

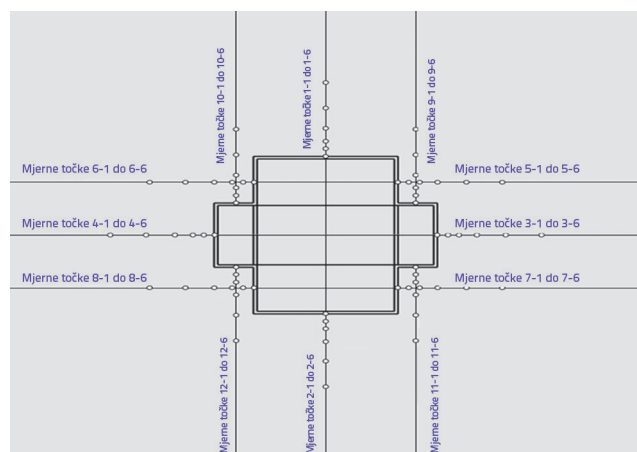
pilota, krunskih greda i betonskih poprečnih podupirača. Uklanja se prvi sloj betonskih poprečnih podupirača u području ②. Istodobno se iskopava 8,37 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 uz ugradnju čeličnih poprečnih podupirača. Uklanja se drugi sloj čeličnih poprečnih podupirača u području ②. Istodobno se iskopava 7,95 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 uz ugradnju čeličnih poprečnih podupirača. Uklanja se treći sloj čeličnih poprečnih podupirača u području ②. Istodobno se iskopava preostalih 4,5 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 uz ugradnju čeličnih poprečnih podupirača. Uklanja se četvrti sloj čeličnih poprečnih podupirača u području ②. Shema BZL2 prikazana je na slici 6(b). Specifični postupak iskopa je sljedeći: istodobno se iskopava 1,3 m stijene i tla u područjima ① i ③ linije 7 uz izvođenje pilota, krunskih greda i betonskih poprečnih podupirača. Iskopava se 8,37 m stijene i tla u područjima ① i ③ linije 7 te se ugrađuju čelični poprečni podupirači. Iskopava se 7,95 m stijene i tla u područjima ① i ③ linije 7 te se ugrađuju čelični poprečni podupirači. Istodobno se iskopava 1,3 m stijene i tla u području ② te se izvode piloti, krunske grede i betonski poprečni podupirači. Iskopava se 4,5 m stijene i tla u područjima ① i ③ linije 7 te se ugrađuju čelični poprečni podupirači. Istodobno se iskopava 8,37 m stijene i tla u području ② i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Iskopava se preostalih 9,12 m stijene i tla u područjima ① i ③ linije 7. Istodobno se iskopava 7,95 m stijene i tla u području ② i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Iskopava se 4,5 m stijene i tla u području ② i ugrađuju čelični poprečni podupirači. Iskopava se preostalih 9,12 m stijene i tla u području ③ linije 7. Istodobno se iskopava 1,3 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 uz izvođenje pilota, krunskih greda i betonskih poprečnih podupirača. Uklanja se prvi sloj betonskih poprečnih podupirača u području ②. Istodobno se iskopava 8,37 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 uz ugradnju čeličnih poprečnih podupirača. Uklanja se drugi sloj čeličnih poprečnih podupirača u području ②. Istodobno se iskopava 7,95 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 te se ugrađuju čelični poprečni podupirači. Uklanja se treći sloj čeličnih poprečnih

podupirača u području ②. Istodobno se iskopava preostalih 4,5 m stijene i tla u područjima ④ i ⑤ linije 17 te se ugrađuju čelični poprečni podupirači. Uklanja se četvrti sloj čeličnih poprečnih podupirača u području ②. Trodimenzionalni simulacijski model krunske grede i poprečnih podupirača prikazan je na slici 7.

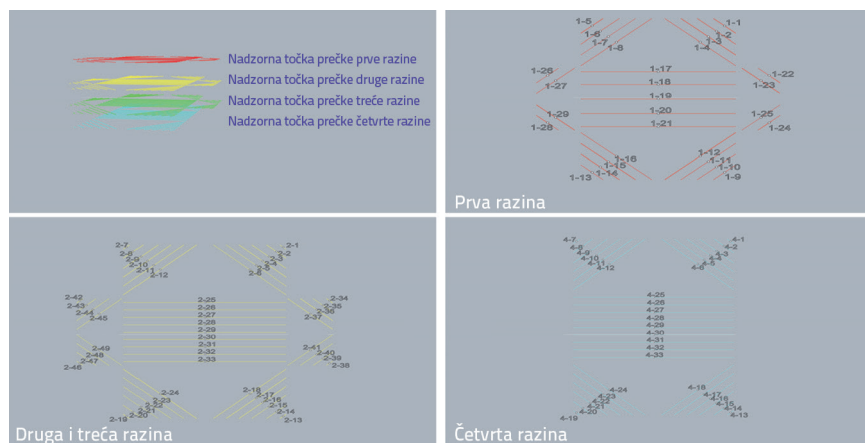
Primarna razlika između programa iskopa BZL1 i BZL2 odnosi se na različitu sekvencu iskopa od područja ① do područja ③. U shemi BZL1 iskop se izvodi sekvencijalno redoslijedom područje ①, područje ② i područje ③, uz odgovarajuće podupiranje. U shemi BZL2 stijena i tlo u zadržanom području

② iskopava se tek nakon završetka iskopa i podupiranja područja ① i ③.

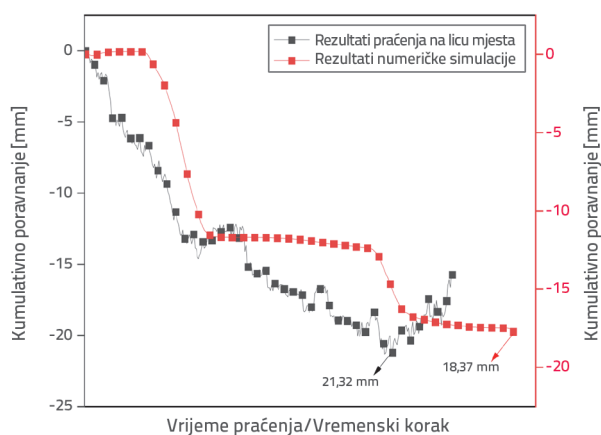
Radi usporedne analize mehaničkog odziva za obje sheme iskopa određuju se slijeganje tla oko ruba iskopa i aksijalne sile u poprečnim podupiračima. Treba napomenuti da se naprezanja analizirana u ovom istraživanju odnose na efektivna naprezanja. Rasporedi mjernih točaka prikazani su na slikama 8 i 9. Na slici 8. prikazano je 12 mjernih linija za praćenje slijeganja tla, pri čemu je duž svake linije postavljeno šest mjernih točaka. Razmaci između mjernih točaka iznosili su 3, 3, 5, 8 i 10 m. Kao primjer može se uzeti mjerna linija 1. Razmak između mjernih točaka 1-1, 1-2 i 1-3 iznosio je 3 m, razmak između točaka 1-3 i 1-4 iznosio je 5 m, razmak između točaka 1-4 i 1-5 iznosio je 8 m, a razmak između točaka 1-5 i 1-6 iznosio je 10 m. Na slici 9. prikazane su aksijalne sile u četirima razinama poprečnih podupirača. Prva razina sadržavala je 25 mjernih točaka, a druga, treća i četvrta razina sadržavale su po 33 mjerne točke. Položaj mjernih točaka za praćenje aksijalnih sila u trećoj razini poprečnih podupirača bio je jednak položaju u drugoj razini.



Slika 8. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za površinsko slijeganje oko građevinske jame



Slika 9. Shematski prikaz rasporeda mjernih točaka za aksijalne sile u poprečnim podupiračima



Slika 10. Rezultati validacije modela i parametara

3.2. Validacija modela i parametara

Kako bi se provjerila pouzdanost modela i parametara, provedena je usporedba rezultata numeričke simulacije s podacima terenskog monitoringa. U obje sheme iskopa, BZL1 i BZL2, najprije se iskopava stijena i tlo u području ① linije 7. Međutim, shema BZL2 zahtijeva istodobni iskop stijene i tla u području ③, stoga su za validaciju modela korišteni rezultati monitoringa dobiveni tijekom iskopa područja ① linije 7 prema shemi BZL1. Rezultati numeričke simulacije i terenskog monitoringa prikazani su na slici 10. Trendovi promjene kumulativnog slijeganja dobiveni numeričkom simulacijom i terenskim monitoringom uglavnom su usklađeni. Najveće kumulativno slijeganje dobiveno terenskim monitoringom iznosilo je 21,32 mm, a numeričkom simulacijom 18,37 mm, pri čemu je odstupanje iznosilo 13,84 %. Navedeni

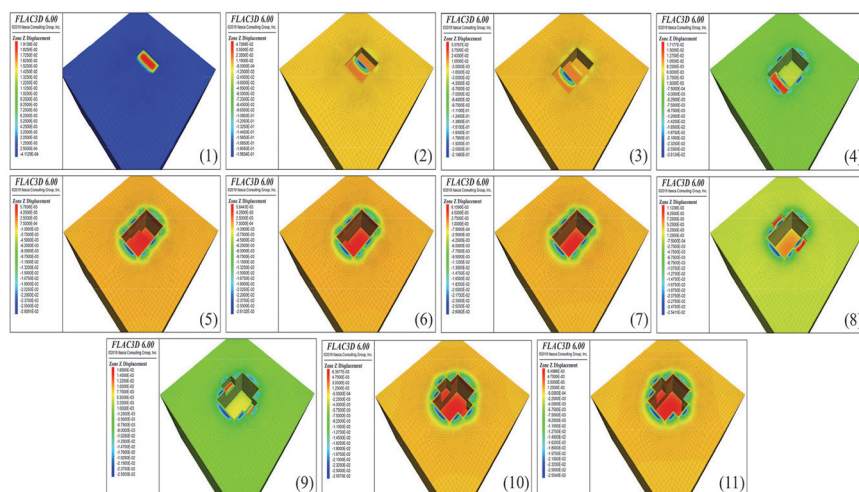
rezultati upućuju na to da su model i njegovi parametri prihvatljivo pouzdani za predviđanje slijeganja površine tla u uvjetima iskopa prema shemi BZL1 [29]. Provedena je dodatna analiza radi utvrđivanja uzroka relativno većih odstupanja rezultata numeričke simulacije. Prvo, tijekom izvođenja radova promjene razine podzemne vode izravno mijenjaju efektivna naprezanja u tlu, što može uzrokovati dodatno slijeganje okolnih konstrukcija. Budući da učinak promjena tlaka vode na slijeganje površine tla nije uzet u obzir u numeričkoj simulaciji, dobivene numeričke vrijednosti manje su od stvarnih terenskih mjerenja.

Drugo, iako su stijenska masa i tlo u numeričkoj simulaciji modelirani slojevito, materijalni model i parametri unutar svakog sloja bili su jednoliki. U prirodnom stanju stijenska masa i tlo pokazuju anizotropiju i heterogenost, što je također važan izvor odstupanja. Osim toga, metoda iskopa u numeričkoj simulaciji bila je statička, a stvarni građevinski radovi često su praćeni dinamičkim poremećajima. U takvim uvjetima površina tla obično pokazuje veća slijeganja.

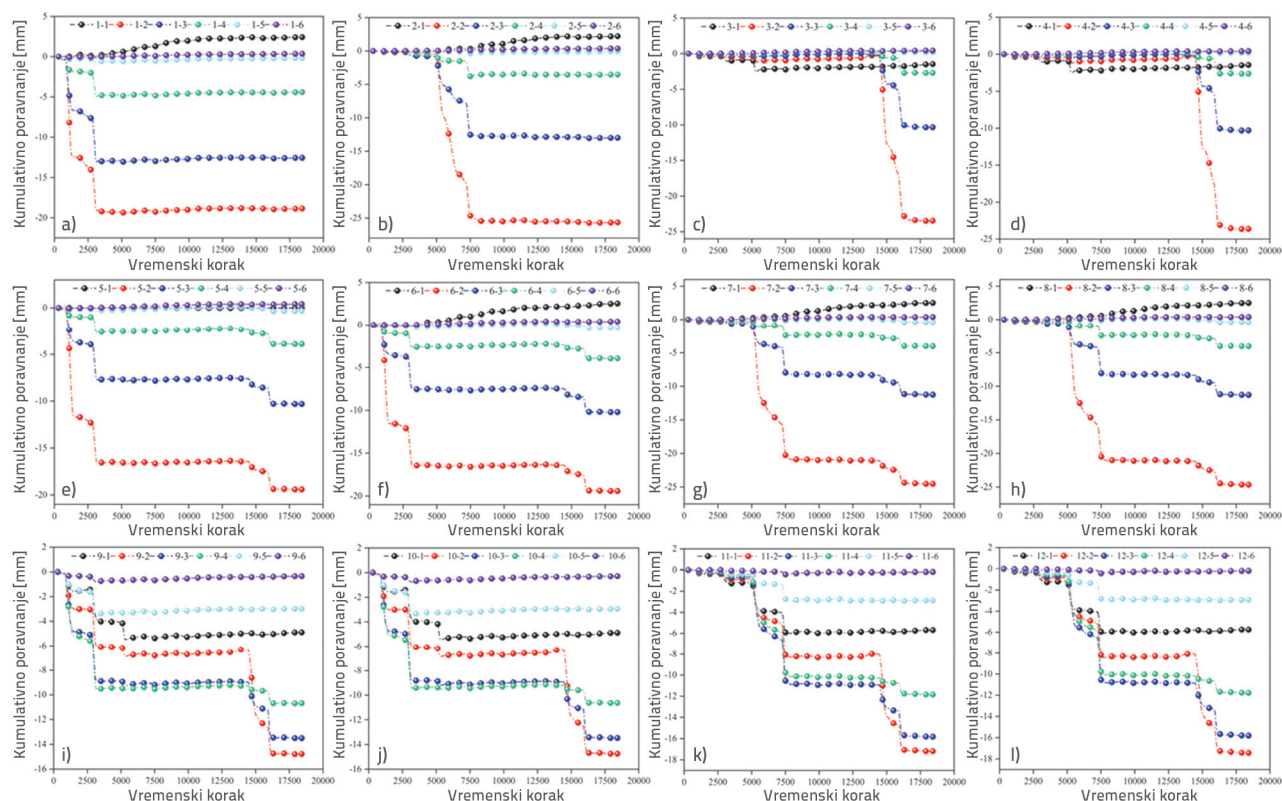
4. Analiza rezultata

4.1. Slijeganje tla

Konture pomaka za svaku fazu iskopa nakon završetka iskopa i podupiranja prema shemi BZL1 prikazane su na slici 11., a obrasci kumulativnog slijeganja na pojedinim mjernim točkama prikazani su na slici 12. Analiza rezultata prikazanih na slici 12. pokazuje da je slijeganje najizraženije na mjernim točkama 2 i 3 duž svake mjerne linije, što upućuje na to da ova shema iskopa utječe na konstrukcije unutar udaljenosti od 11 m od ruba iskopa. Slijeganje na mjernoj točki 1 duž većine mjernih linija



Slika 11. Konture pomaka za svaki korak iskopa

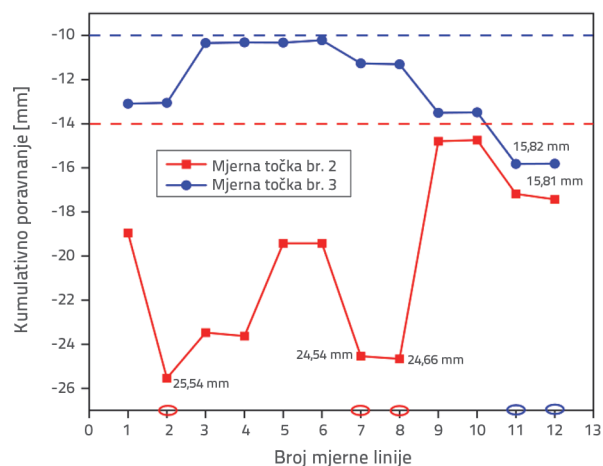


Slika 12. Obrasci kumulativnog slijeganja na različitim mjernim točkama za shemu BZL1

nije bilo značajno, a ponegdje je zabilježena i blaga tendencija izdizanja. Razlog tomu jest činjenica da se mjerna točka 1 nalazila na čelu iskopa. Budući da je potporni sustav ugrađivan neposredno nakon iskopa, došlo je do zbijanja stijene i tla u području mjerne točke, što je rezultiralo malim slijeganjem ili čak izdizanjem uslijed zbijanja. Međutim, slijeganje na mornoj točki 1 duž mjernih linija 9 – 12 bilo je relativno izraženo. Razlog je taj što tijekom sekvencijalnog iskopa područja ① i ③ linije 7 stijena i tlo u području mjerne točke 1 još nisu bili poduprti. Nakon završetka iskopa i podupiranja slijeganje se prestalo povećavati. Nadalje, u usporedbi s ostalim mjernim linijama, slijeganje na mornoj točki 4 duž mjernih linija 9 – 12 pokazalo je trend povećanja. To je posljedica položaja mjerne točke 4 u području križanja, gdje su stijena i tlo bili izloženi ponovljenim poremećajima uzrokovanim iskopom, što je dovelo do blagog povećanja slijeganja.

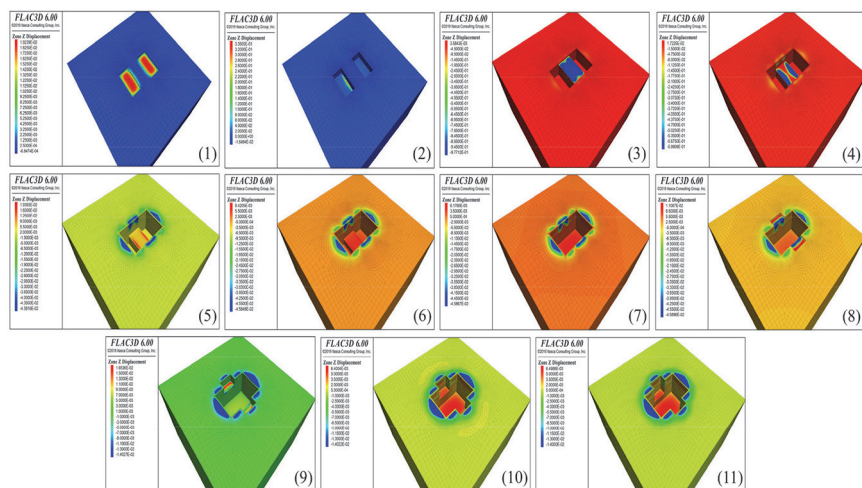
Radi daljnje analize položaja najvećih slijeganja za shemu BZL1 analizirane su vršne vrijednosti kumulativnog slijeganja na mjernim točkama 2 i 3 duž svake mjerne linije, kako je prikazano na slici 13. Kumulativno slijeganje na mornoj točki 2 duž svih mjernih linija prelazilo je 14 mm, pri čemu je najveće kumulativno slijeganje iznosilo 25,54 mm. Kumulativno slijeganje na mornoj točki 3 svakog profila prelazilo je 10 mm, uz najveću vrijednost od 15,82 mm. Najveće kumulativno slijeganje na mornoj točki 2 zabilježeno je duž mjernih linija 2, 7 i 8, a najveće je kumulativno slijeganje na mornoj točki 3 zabilježeno duž mjernih linija 11 i

12. Pri iskopu građevinske jame prema shemi BZL1 dolazi do značajnog slijeganja površine tla oko područja ③ linije 7, zbog čega je potrebno pojačati monitoring i mjere ranog upozoravanja.



Slika 13. Vršne vrijednosti kumulativnog slijeganja na mjernim točkama 2 i 3 duž svake mjerne linije

Konture pomaka za svaku fazu iskopa nakon završetka iskopa i podupiranja prema shemi BZL2 prikazane su na slici 14., a obrasci kumulativnog slijeganja na pojedinim mjernim točkama prikazani su na slici 15. Obrasci kumulativnog slijeganja za



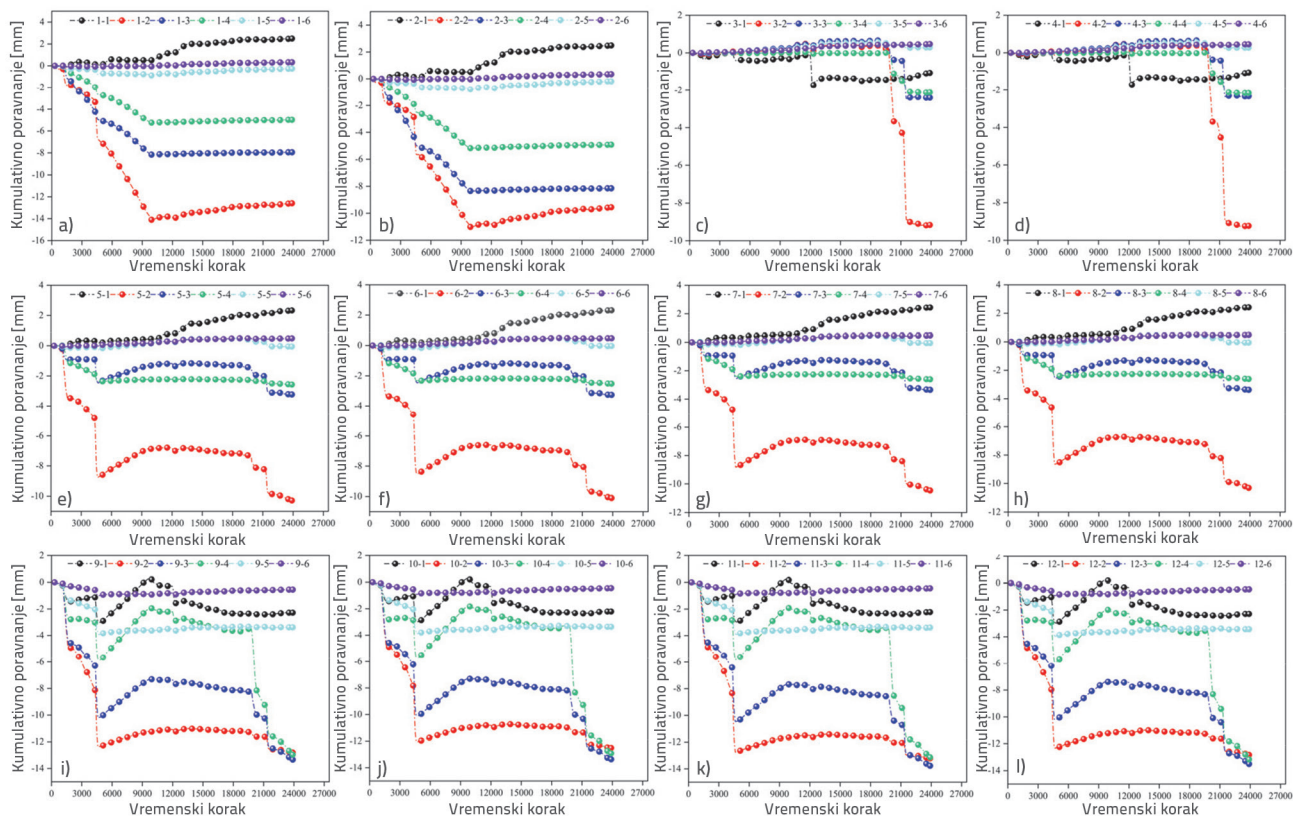
Slika 14. Konture pomaka za svaku fazu iskopa

mjerne linije 1 i 2, 3 i 4, 5 do 8 te 9 do 12 bili su uglavnom slični. To se može pripisati činjenici da shema BZL2 primjenjuje simetričan iskop uz zadržavanje stijensko-tlačnih segmenata u području križanja. Analiza rezultata prikazanih na slici 15. pokazuje da je slijeganje najizraženije na mjernoj točki 2 duž svake mjerne linije, što upućuje na to da ova shema iskopa utječe na konstrukcije unutar udaljenosti od 6 m od ruba iskopa. U usporedbi sa shemom BZL1, shema BZL2 uzrokuje manje poremećaje u

okolini građevinske jame. Slijeganje na mjernoj točki 3 duž mjernih linija 1 i 2 te 9 – 12 bilo je relativno značajno. Razlog tome jest velika površina iskopa za liniju 7. Tijekom iskopa stijene i tla u područjima ① i ③ došlo je do značajnog rasterećenja, što je uzrokovalo izraženo slijeganje na mjernoj točki 3. Značajno slijeganje na mjernoj točki 3 duž mjernih linija 9 do 12 uzrokovano je nedostatkom potpore na toj lokaciji tijekom iskopa područja ① i ③ linije 7. Stijenska masa i tlo na mjernim linijama 1 i 2 te na mjernoj točki 1 duž mjernih linija 5 do 8 pokazivali su blagu tendenciju izdizanja. Razlog je neposredno podupiranje nakon iskopa područja ① i ③, što je dovelo do zbijanja stijene i tla. Nasuprot tome, slijeganje na

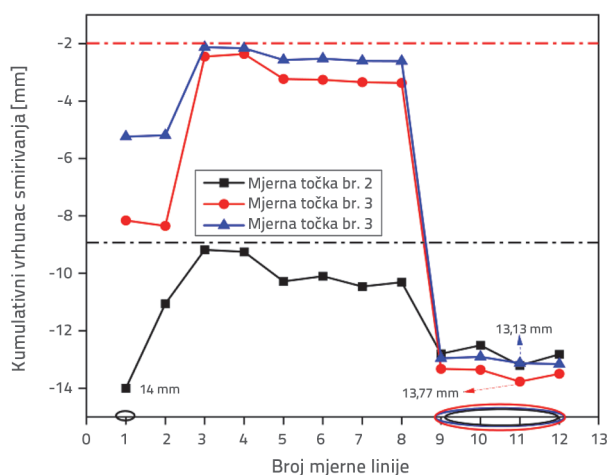
mjernoj točki 1 duž mjernih linija 3 i 4 te 9 do 12 bilo je izraženije jer stijenska masa i tlo na tim lokacijama tijekom iskopa još nisu bili poduprti. Nakon završetka podupiranja slijeganje se prestalo povećavati. Dodatno, slijeganje na mjernoj točki 4 duž mjernih linija 1 i 2 te 9 do 12 pokazalo je trend povećanja u usporedbi s ostalim mjernim linijama.

Kako bi se dodatno analizirali položaji najvećih slijeganja za shemu BZL2, analizirane su vršne vrijednosti kumulativnog

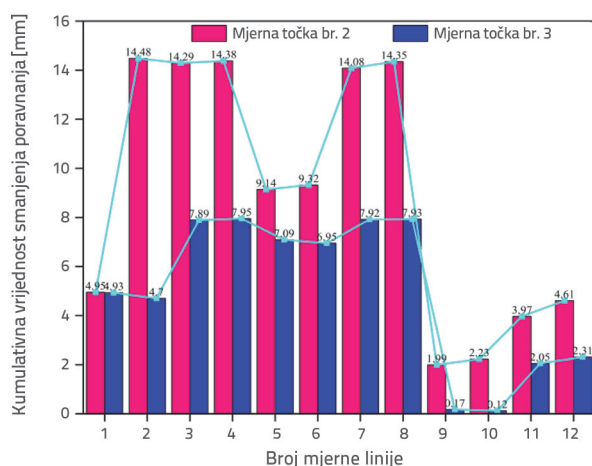


Slika 15. Obrasci kumulativnog slijeganja na različitim mjernim točkama za shemu BZL2

slijeganja na mjernim točkama 2 – 4 duž svake mjerne linije, kako je prikazano na slici 16. Kumulativno slijeganje na mjernoj točki 2 duž svih mjernih linija premašilo je 9 mm, pri čemu je najveće kumulativno slijeganje iznosilo 14 mm. Kumulativna slijeganja na mjernim točkama 3 i 4 duž svakog profila premašila su 2 mm, s najvećim vrijednostima od 13,77 mm odnosno 13,13 mm. Najveće kumulativno slijeganje na mjernoj točki 2 pojavilo se duž mjernih linija 1 i 9 – 12. Najveća kumulativna slijeganja na mjernim točkama 3 i 4 pojavila su se duž mjernih linija 9 – 12. Pri iskopu građevinske jame prema shemi BZL2 došlo je do značajnog slijeganja površine tla u područjima ① i ③ linije 7, zbog čega je bilo potrebno pojačati monitoring i mjere ranog upozoravanja.



Slika 16. Vršne vrijednosti kumulativnog slijeganja na mjernim točkama 2 do 4 duž svake mjerne linije



Slika 17. Vrijednost smanjenja kumulativnog slijeganja sheme BZL2 u odnosu na BZL1

Usporedna analiza vršnih vrijednosti kumulativnog slijeganja za mjerne linije 2 i 3 prema shemama BZL1 i BZL2 prikazana je na slici 17. Okomita os prikazuje smanjenje kumulativnog slijeganja pri shemi BZL2 u odnosu na shemu BZL1. Primjenom sheme

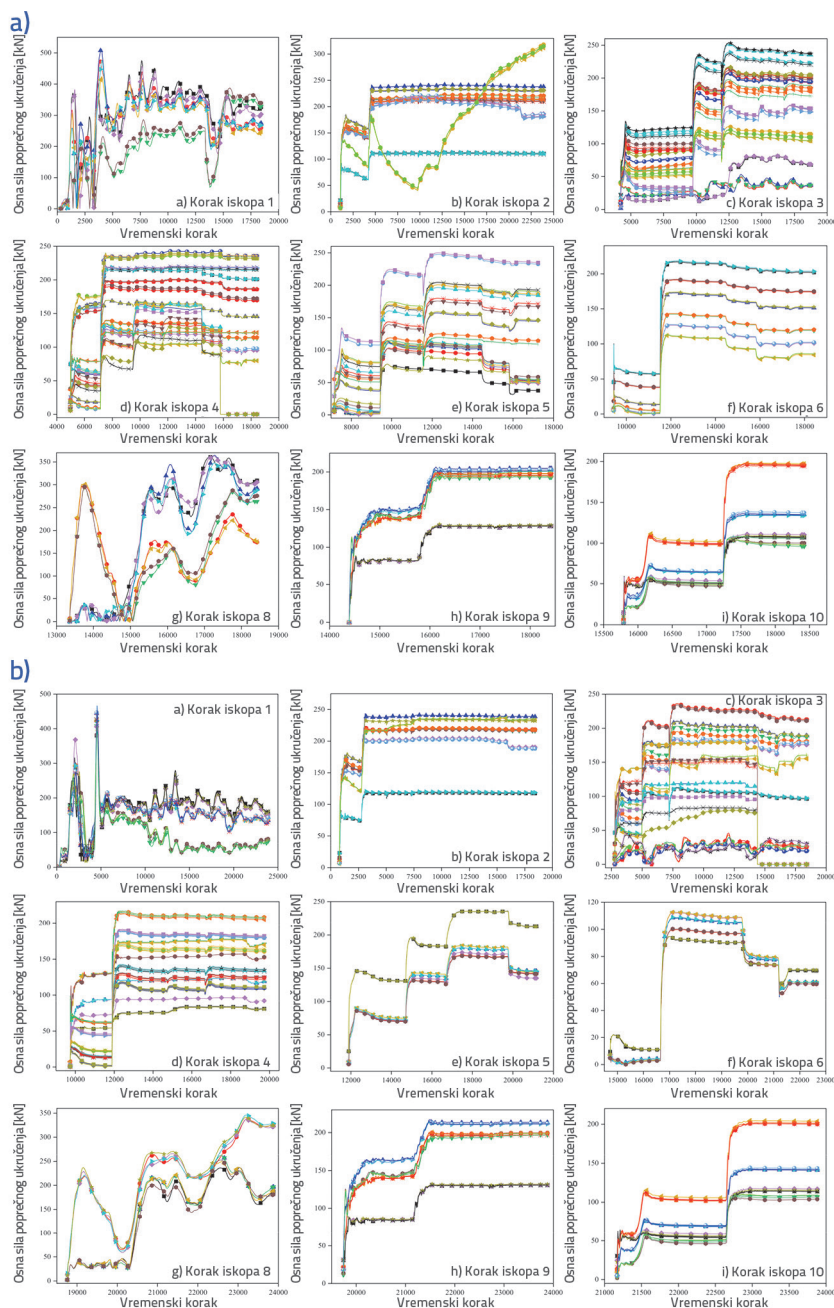
BZL2 za iskop građevinske jame moguće je smanjiti vršno kumulativno slijeganje za najviše 56,7 % u odnosu na shemu BZL1, što pokazuje bolju kontrolu deformacija građevinske jame. Kada je za iskop građevinske jame primijenjena shema BZL2, slijeganje površine tla u blizini mjernih linija 2 – 8 bilo je značajno smanjeno.

4.2. Unutarnje sile u potpornim konstrukcijama

Obrasci promjene aksijalnih sila u poprečnim podupiračima na pojedinim mjernim točkama, dobiveni nakon završetka iskopa i podupiranja, prikazani su na slici 18. za obje sheme. Kako iskop napreduje, aksijalna sila u poprečnim podupiračima općenito najprije raste, a zatim se stabilizira. Koraci 1 – 7 u obje sheme iskopa uključuju iskop stijene i tla oko linije 7, a koraci 8 – 11 uključuju iskop stijene i tla oko linije 17. Nakon početnog iskopa izvedeni su piloti, krunske grede i betonski poprečni podupirači. U toj je fazi aksijalna sila u betonskim poprečnim podupiračima dosegla najveću vrijednost. Stijena i tlo oko linije 7 iskopavali su se do šestog koraka, pri čemu je aksijalna sila u poprečnim podupiračima bila najmanja. Kada je u osmom koraku započeo iskop oko linije 17, aksijalna sila u poprečnim podupiračima povećala se zbog njihova pridržavanja okolne stijenske mase i tla. Budući da su postupci iskopa u koracima 8 – 11 jednaki za obje sheme, obrasci promjene aksijalne sile u poprečnim podupiračima bili su uglavnom slični. Kao što je prikazano na slici 18.a, najveća aksijalna sila u poprečnim podupiračima prema shemi BZL1 pojavila se tijekom prve faze iskopa te je iznosila 512,14 kN. Najmanja aksijalna sila u poprečnim podupiračima pojavila se tijekom desete faze iskopa i iznosila je 198,1 kN. Kao što je prikazano na slici 18.b, najveća aksijalna sila u poprečnim podupiračima prema shemi BZL2 također se pojavila tijekom prve faze iskopa te je iznosila 466,46 kN. Najmanja aksijalna sila u poprečnim podupiračima pojavila se tijekom šeste faze iskopa i iznosila je 112,8 kN. Razlika u aksijalnim silama između dviju shema posljedica je uloge zadržanog jezgrenog tla.

Usporedna analiza vršnih aksijalnih sila u poprečnim podupiračima prema shemama BZL1 i BZL2 prikazana je na slici 19. Kada je za iskop građevinske jame primijenjena shema BZL2, aksijalna sila koju su preuzimali poprečni podupirači bila je manja. Ta je prednost bila vidljiva tijekom prve do šeste faze iskopa. Razlog je činjenica da su postupci iskopa u koracima 8 – 11 jednaki u objema shemama, pa su i vršne aksijalne sile u poprečnim podupiračima bile uglavnom podudarne. Primjenom sheme BZL2 vršna aksijalna sila u poprečnim podupiračima smanjena je za najviše 48,14 % u odnosu na shemu BZL1. Nadalje, primjenom sheme BZL2 povećana je stabilnost potporne konstrukcije.

Provedena je dodatna analiza radi razumijevanja mehanizma smanjenja aksijalnih sila u podupiračima pri shemi BZL2, pri čemu zadržano jezgreno tlo ima ključnu ulogu. Prvo, zadržano jezgreno tlo izravno preuzima dio opterećenja i djeluje kao tlačni stup. Kao prirodna privremena potpora, jezgreno tlo vlastitom tlačnom čvrstoćom preuzima dio horizontalnog tlaka tla, čime



Slika 18. Obrasci promjene aksijalnih sila u poprečnim podupiračima na svakoj mjernoj točki: a) program BZL1; b) program BZL2

se smanjuje udio opterećenja koji se prenosi na poprečne podupirače. Drugo, zadržano jezgreno tlo ograničava širenje plastične zone. Jezgreno tlo osigurava bočno pridržavanje okolne stijenske mase s obje strane, smanjuje ukupne deformacije okolne stijenske mase te time smanjuje ukupni tlak koji djeluje na potporni sustav. Treće, zadržano jezgreno tlo prekida put prijenosa naprezanja. Postojanje jezgrenog tla dijeli kontinuirano čelo iskopa na odvojene neovisne zone te prekida ili slabi izravne kanale prijenosa naprezanja iz okolne stijenske mase prema

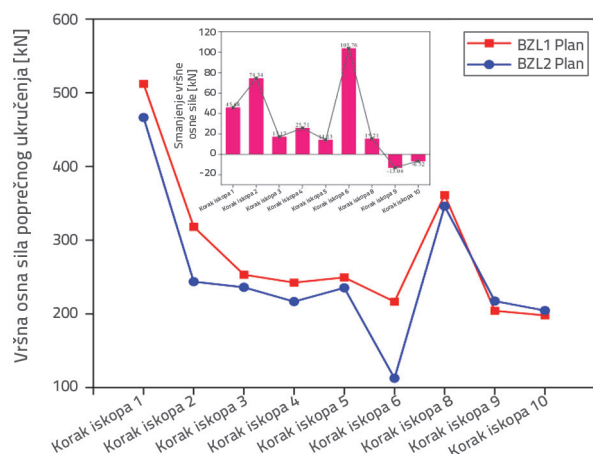
poprečnim podupiračima, što rezultira raspršenijim i lokaliziranim opterećenjima na podupiračima. Konačno, zadržano jezgreno tlo usporava razvoj vremenski ovisnih deformacija. Jezgreno tlo smanjuje brzinu oslobađanja naprezanja u okolnoj stijenskoj masi, učinkovito ograničava puzanje i relaksacijske deformacije tijekom razdoblja prije ugradnje potpore te sprječava kontinuirano povećanje naknadnih opterećenja.

Na temelju sveobuhvatne analize slijevanja tla i aksijalnih sila u poprečnim podupiračima može se zaključiti da je shema iskopa BZL2, u uvjetima ovog istraživanja, pokazala bolji učinak kontrole opterećenja. Međutim, potrebno je raspraviti primjenjivost i ograničenja metode zadržanog jezgrenog tla.

S obzirom na uvjete primjene, metoda zadržanog jezgrenog tla prikladna je za stijenske mase ili kruta tla s određenom samonosivošću. Jezgreno tlo mora imati dovoljnu tlačnu čvrstoću kako bi moglo preuzeti bočna opterećenja. U slojevima tla vrlo slabe samonosivosti, kao što su fluidno-plastična meka tla, zasićeni pijesci i meke gline s visokim sadržajem vode, zadržano jezgreno tlo možda neće moći održati stabilnost te može postati potencijalna sigurnosna opasnost. U takvim okolnostima potrebno je primijeniti poboljšanje temeljnog tla ili druge metode gradnje.

S obzirom na ograničenja dimenzija iskopa, shema sa zadržanim jezgrenim tlom zahtijeva odgovarajuću širinu građevinske jame. Kada je širina premala, primjerice manja od 10 m, dimenzije jezgrenog tla ograničene su, pa je teško postići željeni učinak. Kada je širina prevelika, primjerice veća od 60 m, razmak između površina iskopa s obje strana jezgrenog tla postaje prevelik, što slabi učinak sjene naprezanja.

Širina, visina i nagib zadržanog jezgrenog tla izrazito su osjetljivi parametri u pogledu učinka kontrole. U praktičnoj primjeni potrebno je izraditi optimalno rješenje na temelju geoloških uvjeta i geometrijskih značajki građevinske jame. Osim toga, primjena zadržanog jezgrenog tla povećava broj građevinskih postupaka i može produljiti trajanje izgradnje. Stoga je u praktičnim inženjerskim primjenama potrebno provesti tehno-ekonomsku usporedbu na temelju konkretnih uvjeta.



Slika 19. Usporedba smanjenja aksijalne sile poprečnih podupirača između shema BZL2 i BZL1

5. Zaključak

Pouzdanost modela i njegovih parametara preduvjet je za validaciju rezultata numeričkih simulacija. Na temelju dostupnih podataka monitoringa odstupanje u predviđanju slijeganja površine tla za shemu BZL1, izračunano primjenom numeričkog modela, iznosilo je 13,84 %, što upućuje na prihvatljivu sposobnost modela za predviđanje u razmatranim uvjetima. Predložena je kombinirana metoda kontrole "zadržano jezgreno tlo + simetrični iskop" (shema BZL2). Aktivnim zadržavanjem središnjeg stijenskog stupa smanjuju se asimetrični poremećaji u putanji rasterećenja okolne stijenske mase. Analiza inženjerskog rizika pokazuje da se pri primjeni konvencionalne sheme iskopa (BZL1) plastična zona okolne stijenske mase u potpunosti razvija, a naprezanje u potpornoj konstrukciji približava kritičnoj granici tečenja, što dovodi do znatnog rizika od nestabilnosti. Nasuprot tomu, pri iskopu građevinske jame prema shemi BZL2 vršno kumulativno slijeganje površine tla smanjeno je do 56,7 %. Slijeganje

površine tla u blizini mjernih linija 2 – 8 bilo je značajno smanjeno, čime je inženjerski rizik učinkovito zadržan unutar sigurnosnih granica.

Pri iskopu građevinske jame prema shemi BZL2 vršna aksijalna sila u poprečnim podupiračima može se smanjiti do 48,14 % u odnosu na shemu BZL1. To pokazuje da su aksijalne sile u poprečnim podupiračima prema shemi BZL1 znatno veće nego prema shemi BZL2. Shema BZL2 učinkovito smanjuje razinu opterećenja potporne konstrukcije. Na temelju sveobuhvatne analize slijeganja površine tla i aksijalnih sila u poprečnim podupiračima utvrđeno je da shema iskopa BZL2, u uvjetima ovog istraživanja, omogućuje bolju kontrolu opterećenja. Međutim, za osjetljiva područja, kao što su zone ① i ③ linije 7, potrebno je uspostaviti sustav monitoringa u stvarnom vremenu radi provedbe projektiranja s povratnom analizom i informacijskog upravljanja gradnjom, kako bi se dodatno smanjili inženjerski rizici. I dalje je potrebna kvantitativna provjera koja uključuje projektnu nosivost i faktor sigurnosti kako bi se utvrdilo približavaju li se poprečni podupirači graničnom stanju nosivosti te kako bi se odredile njihove sigurnosne rezerve.

Metoda numeričke simulacije primijenjena u ovom istraživanju ima određena ograničenja koja zahtijevaju daljnje istraživanje. Primjerice, model i njegove parametre potrebno je provjeriti sveobuhvatnije i sustavnije. Također je potrebno dodatno istražiti utjecaj promjena tlaka vode, anizotropije stijenske mase i tla te dinamičkih poremećaja na slijeganje površine tla i unutarnje sile u potpornim konstrukcijama.

Zahvala

Ovo istraživanje provedeno je uz potporu projekta "Istraživanje ključnih tehnologija za zeleno i inteligentno upravljanje izgradnjom vrlo velikih i dubokih građevinskih jama na križnim presjednim postajama metroa linije 17 sustava Chongqing Rail Transit" (DJTL-YBXM-2024-03).

LITERATURA

- [1] Han, M., Chen, X.S., Jia, J.Q.: Analytical solution for displacement-dependent 3D earth pressure on flexible walls of foundation pits in layered cohesive soil, *Acta Geotechnica*, 19 (2024) 8, pp. 5249–5275, <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02226-x>.
- [2] Wang, Y.X., Guo, S.M., Tong, H.Z., Guo, P.P., Wu, W.B., Lu, M.M., Li, H.: Stability and failure probability analysis of super-large irregularly shaped deep excavation in coastal area considering spatial variability in soil properties, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 24 (2025) 6, pp. 5203–5219, <https://doi.org/10.1080/13467581.2024.2409787>.
- [3] Hong, L., Wang, X.Y., Zhang, W.A., Li, Y.Q., Zhang, R.H., Chen, C.X.: System reliability-based robust design of deep foundation pit considering multiple failure modes, *Geoscience Frontiers*, 15 (2024) 2, pp. 101761, <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101761>.
- [4] Ma, A.Y., Wang, W.Y., Zhu, W.X., Xu, Z.H., Ye, G.L.: Sensitivity analysis and application of the Shanghai model in ultra-deep excavation engineering, *Geotechnics*, 5 (2025) 1, <https://doi.org/10.3390/geotechnics5010006>.
- [5] Zhang, Y., Zeng, Y.: Symmetric and asymmetric failure mechanism of deep tunnel excavation under complex environmental conditions, *Symmetry*, 17 (2025) 3, <https://doi.org/10.3390/sym17030416>.
- [6] Zhang, B., Xu, J., Shi, X., Chen, N., Dong, Y., Wei, H., Wang, P.: Analysis of force characteristics of "pile-wall" structure based on elastic foundation beam method, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 12, pp. 1201–1212, <https://doi.org/10.14256/JCE.4134.2024>.

- [7] Chen, G., Zhang, X.H., Zhang, S.J., Huang, F., Xiao, H., Ma, H.Z., Luo, L.N., Bao, H.: Response monitoring and analysis in deep foundation pit excavation: A case study in soft soil at subway tunnel intersections, *Buildings*, 13 (2023) 5, pp. 1286, <https://doi.org/10.3390/buildings13051286>.
- [8] Wang, S.H., Yang, B., Dong, F.R., Maxim, M., Zhang, Z.: Determination of the influence of the disturbance caused by traversing cross-type deep foundation pit excavations, *Sustainability*, 15 (2023) 2, pp. 1130, <https://doi.org/10.3390/su15021130>.
- [9] Shi, H., Jia, Z.L., Wang, T., Cheng, Z.Q., Zhang, D., Bai, M.Z., Yu, K.: Deformation characteristics and optimization design for large-scale deep and circular foundation pit partitioned excavation in a complex environment, *Buildings*, 12 (2022) 9, pp. 1292, <https://doi.org/10.3390/buildings12091292>.
- [10] Li, Y., Ma, Z.G., Gao, F.R., Gong, P., Gong, Z.Q., Li, K.L.: Deformation characteristics of a deep subway foundation pit in hard rock strata under a delayed supporting condition, *Shock and Vibration*, (2023), pp. 5155504, <https://doi.org/10.1155/2023/5155504>.
- [11] Liang, J.M., Su, W.J., Liu, T.J., Wu, H.F., Lu, L.L., Zhong, H.S., Zhou, S.Y.: Analysis of large deformation characteristics of deep foundation pit at a subway station constructed by the tunnel-before-station method, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29 (2025) 16, pp. 3800-3827, <https://doi.org/10.1080/19648189.2025.2527412>.
- [12] Li, G.C., Li, Q.M., Wang, J., Dong, J.M., Sun, Q.: The deformation characteristics of a 40-m-deep excavation supported by a suspended diaphragm wall in rock and soil composite ground, *KSCSE Journal of Civil Engineering*, 26 (2022) 3, pp. 1040-1050, <https://doi.org/10.1007/s12205-021-1810-2>.
- [13] Ding, H.B., Wang, X.P., Tong, L.H., Lu, Q., Xu, C.J., Guang, L.X.: Performance of isolation piles in protecting subway tunnels adjacent to foundation pits: Experimental and numerical investigations, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 156 (2025), pp. 106221, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106221>.
- [14] Fu, Y.B., Wang, B.L., Wu, H., Chen, X.S., Sun, X.H., Bian, Y.W., Shen, X.: Theoretical analysis on horizontal rectification of tunnel near deep foundation pit by grouting, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 133 (2023), pp. 104977, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104977>.
- [15] Ge, C.H., Li, P.F., Zhang, M.J., Ze, L.: Bearing capacity of High Bolt-Screw (HBS) active joints for prestressed internal bracing in subway excavations, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 157 (2025), pp. 106251, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106251>.
- [16] Qi, Y.C., Jia, F., Li, W.J., Shi, L., Qin, X.C., He, Y.W., Li, S.Y.: Optimization and energy consumption analyses of the support system of a super large deep foundation pit in the Xi'an Metro, *Environmental Earth Sciences*, 83 (2024) 5, pp. 140, <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11459-8>.
- [17] Chen, P., Liu, X., Cao, G., He, Y., Xu, A.: Deformation control for a five-story deep excavation, *GRAĐEVINAR*, 77 (2025) 7, pp. 699-708, <https://doi.org/10.14256/JCE.4224.2024>.
- [18] Zhao, J.P., Wang, X.Y., Tan, Z.S., Zhang, X.B., Xiao, X.: Excavation optimization for asymmetrical deep foundation pits adjacent to subway stations: Deformation control and safety enhancement, *International Journal of Geomechanics*, 25 (2025) 12, pp. 05025010, <https://doi.org/10.1061/IJGNALGMENG-11305>.
- [19] Zhang, W.S., Yuan, Y., Long, M., Yao, R.H., Jia, L., Liu, M.: Prediction of surface settlement around subway foundation pits based on spatiotemporal characteristics and deep learning models, *Computers and Geotechnics*, 168 (2024), pp. 106149, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106149>.
- [20] Wu, B., Wan, Y.J., Xu, S.X., Zhao, C.X., Liu, Y., Zhang, K.: A multi-source intelligent fusion assessment method for dynamic construction risk of subway deep foundation pit: A case study, *Sustainability*, 15 (2023) 13, pp. 10162, <https://doi.org/10.3390/su151310162>.
- [21] Wei, G., Feng, F.F., Cui, Y.L., Wang, X.Q., Diao, H.G., Wu, Y.: Research on the influence of foundation pit excavation on the lateral force and deformation of side shield tunnels based on full-scale experiments, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 140 (2023), pp. 105236, <https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105236>.
- [22] Xu, S.T., Xu, J.M.: Prediction of buildings' settlement induced by metro station deep foundation pit construction, *Applied Sciences*, 14 (2024) 5, pp. 2143, <https://doi.org/10.3390/app14052143>.
- [23] Liu, Y., Huang, L., Tang, X.L., Xue, Y.B., Ke, W.B., Luo, Y., Guan, L.X.: Analysis of influence of cut-and-cover method on retaining structures and differential settlement in subway foundation pit construction, *Applied Sciences*, 15 (2025) 13, pp. 7520, <https://doi.org/10.3390/app15137520>.
- [24] Xu, Y.Q., Zhao, Y.X., Jiang, Q.Q., Sun, J., Tian, C.X., Jiang, W.: Machine-learning-based deformation prediction method for deep foundation-pit enclosure structure, *Applied Sciences*, 14 (2024) 3, pp. 1273, <https://doi.org/10.3390/app14031273>.
- [25] Gao, S., Zhao, W.G., Zhao, G.T., Wang, S.P., Xie, K.Z.: Numerical study on seismic performance of a prefabricated subway station considering the influence of construction process, *Structures*, 69 (2024), pp. 107218, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107218>.
- [26] Dong, Y., Luan, Y.Z., Wang, F., Luan, H.X., Jia, Z., Luan, H.X.: Monitoring and prediction of horizontal displacement of underground enclosure piles in subway foundation pits, *ACS Omega*, 8 (2023) 26, pp. 23389-23400, <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00582>.
- [27] Hoek, E.: Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition, *Proceedings of the Fifth North American Rock Mechanics Symposium*, 1 (2002), pp. 18-22.
- [28] Sonmez, H., Ulusay, R.: Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36 (1999) 6, pp. 743-760, [https://doi.org/10.1016/S0148-9062\(99\)00043-1](https://doi.org/10.1016/S0148-9062(99)00043-1).
- [29] Yang, Y.M., Jiang, N., Yao, Y.K., Zhou, C.B., Meng, X.Z., Zhao, X.: Characteristics of stress concentration distribution in layered surrounding rock tunnels under dynamic and static loads, *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, (2025), pp. 1-14.