

Primljen / Received: 27.12.2024.

Ispravljen / Corrected: 27.4.2025.

Prihvaćen / Accepted: 25.6.2025..

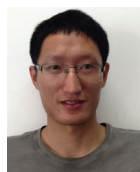
Dostupno online / Available online: 10.8.2025.

Kontrola deformacija pri iskopu dubine pet etaža

Autori:

¹Mr. sc. **Ping Chen**chenping@ziad.cn

Autor za korespondenciju

¹Dr. sc. **Xingwang Liu**liuxingwang@ziad.cn¹Mr. sc. **Guoqiang Cao**caoguoqiang@ziad.cn¹Dr. sc. **Yongxing He**heyongxing@ziad.cn²Mr. sc. **Anming Xu**22312247@zju.edu.cn¹ Institut za arhitektonski dizajn i istraživanje
Zhejiang Co. Ltd, Zhejiang, Kina² Sveučilište Zhejiang, Kina
Fakultet građevinarstva i arhitekture

Stručni rad

Ping Chen, Xingwang Liu, Guoqiang Cao, Yongxing He, Anming Xu

Kontrola deformacija pri iskopu dubine pet etaža

Zgrada Hang Lung Plaza u Hangzhouu obuhvaća pet etaža podzemnog prostora, smještenog uz istočnu granicu gradilišta, dugu 365 m, u neposrednoj blizini skupine starijih zgrada s plitkim temeljima koje su vrlo osjetljive na deformacije. Radi učinkovite kontrole deformacija, u tom su projektu uz uobičajenu krutu potporu izvedenu pomoću membranskih zidova i unutarnjih podupirača primijenjene i aktivne zaštitne tehnologije: fazni iskop, poprečni zidovi te servoupravljeni betonski podupirači s kontrolom aksijalne sile. Rezultati praćenja pokazali su da su navedene tehnologije znatno smanjile horizontalne deformacije potpornih zidova, s maksimalnim smanjenjem od približno 43 %, čime je omogućena kontrola deformacija iskopa i osigurana sigurnost susjednih građevina. Istraživanje potvrđuje učinkovitost faznog iskopa, poprečnih zidova i servoupravljenih podupirača u uvjetima mekih tala. Ipak, za njihovu širu primjenu potrebna su dodatna istraživanja radi optimiranja pojedinih parametara te integracije algoritama za dinamičko prilagođavanje.

Ključne riječi:

duboki iskop, kontrola deformacija, građevine s plitkim temeljima, fazni iskop, poprečni zidovi, servoupravljeni podupirači s kontrolom aksijalne sile

Professional paper

Ping Chen, Xingwang Liu, Guoqiang Cao, Yongxing He, Anming Xu

Deformation control for a five-story deep excavation

The Hangzhou Hang Lung Plaza features a five-story basement close to a cluster of old, shallow-founded buildings along its 365 m eastern side that are extremely sensitive to deformation. To address the challenges of deformation control, this project employed not only traditional rigid retaining structures of diaphragm walls combined with internal struts but also active protection technologies, such as zoned excavation, cross walls, and axial force servo-controlled concrete struts. The monitoring results indicated that the aforementioned technologies markedly reduced the horizontal deformation of the retaining walls, with a maximum reduction of approximately 43 %, thereby ensuring control of the excavation deformation and facilitating the safety of adjacent buildings. This study validated the effectiveness of zoned excavation, cross walls, and servo-controlled struts under soft soil conditions; however, further research is required to optimize specific parameters and integrate dynamic adjustment algorithms for broader adaptability.

Key words:

deep excavation, deformation control, shallow foundation buildings, zoned excavation, cross walls, axial force servo-controlled struts

1. Uvod

S intenzivnim razvojem podzemne izgradnje u Kini sve su češći iskopi velikih razmjera, osobito oni vrlo duboki i prostorno opsežni. U sklopu postupne urbane obnove uvjeti izvođenja iskopa postaju sve složeniji. Iskopi se sve češće izvode u neposrednoj blizini osjetljivih i zaštićenih objekata poput sustava željezničkog prometa, starijih građevina s plitkim temeljima te kulturno-povijesnih zdanja. Pri dubokim i opsežnim iskopima u složenim uvjetima, osim osiguravanja stabilnosti i sigurnosti iskopa, ključno je provesti učinkovitu i razumnu kontrolu deformacija kako bi se spriječili negativni utjecaji na okoliš i omogućilo neometano korištenje okolnih građevina i konstrukcija, što je važan predmet istraživanja.

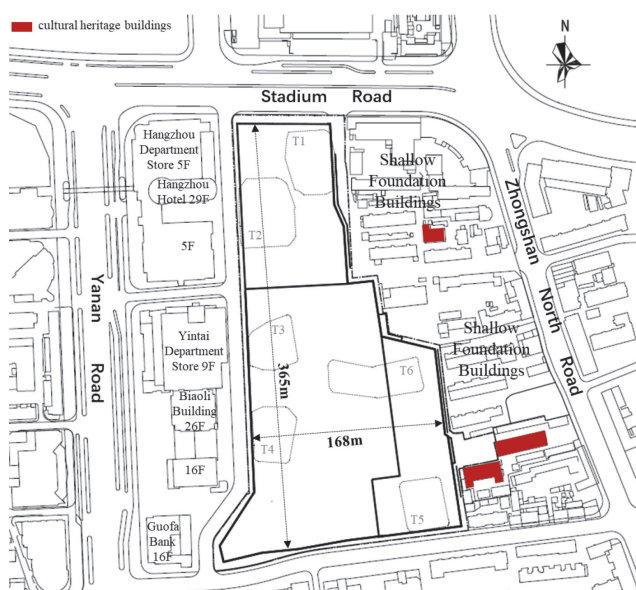
Zbog reoloških svojstava mekih tala kontrola deformacija ključna je tema istraživanja dubokih iskopa u takvim uvjetima. Iako se tradicionalne metode poput sidrenih zidova i hibridnih sustava podupiranja široko primjenjuju i pokazuju učinkovitost u većini projekata, duboki i veliki iskopi u mekim tlima, osobito u blizini osjetljivih građevina, često zahtijevaju robusnija rješenja. Ta rješenja uključuju membranske zidove u kombinaciji s višestrukim unutarnjim betonskim podupiračima te, u nekim slučajevima, opsežnu prethodnu sanaciju tla kako bi se deformacije zadržale unutar prihvatljivih granica [1–5]. Liu i suradnici, oslanjajući se na inženjersko iskustvo s projekta Hangzhou Center (šesterokatni iskop), predložili su niz tehnologija zaštite podzemne željezničke infrastrukture. Među njima ističu se kvantitativna kontrola prostorno-vremenskih učinaka dubokih iskopa u mekome tlu, aktivno ojačanje bočnih i donjih zona postojećih tunela te trodimenzionalno numeričko modeliranje temeljeno na hipoplastičnome modelu za strukturiranu meku glinu [6].

Tehnologije poput zoniranog iskopa, izolacijskih stupnih elemenata i čeličnih podupirača sa servoupravljanjem aksijalne sile uspješno su primijenjene pri izvođenju dubokih iskopa u neposrednoj blizini objekata podzemne željezničke infrastrukture [7–11]. Mehanizam djelovanja poprečnih zidova sličan je onome podupirača: visoka tlačna krutost ostvaruje se već prije početka iskopa, a nakon iskopa deformacije potpornog zida u zoni poprečnog zida ostaju ograničene, čime se znatno smanjuju njegovi vodoravni pomaci. Posljedično se smanjuju slijeganja tla izvan zone iskopa i postiže viši stupanj zaštite okoliša [12–15]. Nedavna istraživanja dubokih iskopa u složenim geotehničkim uvjetima istaknula su važnost prilagodljivih sustava potpore [16].

Taj se koncept u osnovi podudara s projektom filozofijom podupirača sa servokontrolom aksijalne sile, koji prednaprezanjem ne samo da eliminiraju vlastite deformacije, već smanjuju deformacije uporne konstrukcije te susjednih zaštićenih objekata. Uspješna primjena takvog sustava pri izvođenju dubokog iskopa u okrugu Hongkou (Šangaj) omogućila je neometan rad obližnjeg tunela podzemne željeznice [17–21]. Razuman slijed iskopa i informatizirana gradnja također su ključni za kontrolu deformacija pri dubokim i velikim iskopima

[22–24]. Važno je istaknuti da je većina istraživanja o kontroli deformacija dubokih iskopa provedena na temelju stvarnih projekata. Najčešći objekti zaštite okoliša jesu sustavi podzemne željeznice, što je povezano s ubrzanom razvojem željezničkog prometa posljednjih godina. Ipak, malo je istraživanja posvećeno zaštiti građevina s plitkim temeljima, iako su i one osjetljive na deformacije.

Predmet ovog istraživanja jest duboki iskop poslovnoga kompleksa Hang Lung Plaza u Hangzhouu, s pet etaža podzemnog prostora, na temelju kojeg se analiziraju metode zaštite starijih stambenih zgrada s plitkim temeljima: fazni iskop, poprečni zidovi i betonski podupirači sa servokontrolom aksijalne sile. Osim toga učinkovitost navedenih tehnologija analizirana je na temelju terenskih mjerenja. Dobiveni rezultati mogu poslužiti kao referenca za izvođenje dubokih i opsežnih iskopa u mekim tlima pod sličnim okolišnim uvjetima.



Slika 1. Opći plan iskopa

2. Pregled projekta

Hang Lung Plaza u Hangzhouu smješten je u središtu grada, na križanju Ulice Stadion (*Stadium Road*) i Sjeverne ulice Zhongshan (*Zhongshan North Road*), na zemljištu ukupne površine oko 52.100 m². Nadzemni dio kompleksa čine jedan neboder, pet visokih poslovnih zgrada i njihove zajedničke podne konstrukcije (podiji), dok podzemni dio obuhvaća pet etaža. Iскоп je pravokutnog oblika, približnih dimenzija 365 × 168 m, s općom dubinom iskopa od 28,4 do 29,7 m, dok jezgreni dio doseže dubinu od 4,6 do 6,4 m ispod te razine.

Okolni uvjeti gradilišta vrlo su složeni te zahtijevaju visok stupanj zaštite. Na sjevernoj strani iskopa nalazi se Ulica Stadion, važna gradska prometnica koja je pod velikim prometnim opterećenjem. Na zapadu je Dazhi Lane, gdje se preko ceste nalaze prepoznatljive zgrade poput robne kuće Intime i zgrade Biaoqi. Na jugu, nasuprot stambenoj zoni, jest Bai Jing Fang

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva slojeva tla

Sloj tla	Debljina [m]	Jedinična težina [kN/m³]	Konsolidirani brzi test smicanja	
			Kohezija [kPa]	Kut trenja [°]
1–0 razno punjenje	6,8 ~ 0,6	—	*3	*7
1–1 obično punjenje	4,7 ~ 0,6	16,80	*9	*6
1–2 prašnasta glina	4,8 ~ 0,7	18,52	27,5	16,4
1–3 glinoviti mulj	4,6 ~ 0,4	18,68	12,5	23,3
2–1 blatnjava glina	12,1 ~ 1,2	17,12	13,8	9,4
2–2 prašnaste gline protkane prašinom	10,9 ~ 0,7	18,26	17,6	17,7
3–1 muljevito-prašnasta glina	10,7 ~ 0,1	17,26	15,0	10,0
3–2 prašnasta glina	12,2 ~ 0,7	18,11	25,7	15,5
4 gline	15,3 ~ 1,8	18,48	46,7	21,0
6 prašnasta glina	15,0 ~ 0,9	19,06	46,8	21,5
7–1 prašnasta glina	10,5 ~ 1,2	18,84	40,1	20,4
7–2 prašnasti fini pijesak	5,5 ~ 0,6	19,34	6,2	30,6
7–3 okrugli šljunak	2,4 ~ 0,8	—	—	—

Lane. Istočno od iskopa, duž linije od 365 m u smjeru sjever-jug, nalazi se niz starijih zgrada s plitkim temeljima, izgrađenih u ranijim razdobljima. Najbliža zgrada udaljena je samo 5,5 m od potpornog zida. Među tim građevinama nalaze se i dva objekta kulturne baštine iz 17. stoljeća, koji su više puta obnavljani te imaju složene i osjetljive unutarnje konstrukcije. Zbog svoje izrazite osjetljivosti na deformacije skupina zgrada s plitkim temeljima na istočnoj strani iskopa bila je ključni objekt zaštite u tome projektu. Osim toga pod okolnim gradskim prometnicama nalazi se velik broj cjevovoda, od kojih su mnogi zastarjeli i zahtijevaju posebnu zaštitu tijekom iskopa.

Lokacija se nalazi na kvartarnoj jezerskoj i močvarnoj aluvijalnoj ravnici, a raspored slojeva tla te njihova fizikalna i mehanička svojstva prikazani su u tablici 1. Površinski nasip u zoni iskopa relativno je debeo. Sloj 2-1 čini glinoviti prah, sloj 2-2 glinoviti prah s međuslojevima mulja, a sloj 3-1 muljevito-glinoviti prah. Sve te slojeve karakteriziraju visoka stlačivost, niska razina čvrstoće i velika osjetljivost. Ispod dna iskopa nalaze se slojevi 7-2 (prašnasti fini pijesak) i 7-3 (zaobljeni šljunak) koji tvore vodonosnik, s razinom podzemne vode približno 6 m ispod površine, uglavnom u sjevernome dijelu lokacije. Potporni zid probija kroz vodonosnik, čime je izoliran od iskopa. Podloga stijene na većim dubinama sastoji se od različitih litoloških jedinica koje su valovite. Na sjeveru prevladava tuf, a na jugu glinoviti lapor (mjestimice s konglomeratnim sočivima). Takva geološka građa imala je znatan utjecaj na izvođenje dijafragmatskih zidova i temeljnih pilota.

3. Tehnologije aktivne zaštite za gradnju plitkih temelja

Sustav potpore iskopa sastojao se od dijafragmatskih zidova u kombinaciji s više razina betonskih horizontalnih podupirača.

Ukupna krutost potpornog sustava na istočnoj strani, gdje se nalazila skupina zgrada s plitkim temeljima, dodatno je ojačana: izveden je dijafragmatski zid debljine 1200 mm, u kombinaciji s TRD (*Trench cutting Re-mixing Deep wall*) zidom za poboljšanje tla; izvan iskopa ugrađeni su izolacijski piloti promjera 800 mm; unutar iskopa postavljeno je šest razina horizontalnih podupirača, a u zoni između dna trećeg podupirača i dna iskopa izvedeno je kontinuirano ojačanje cementnim tlo-miješajućim pilotima, širine 8,7 m.

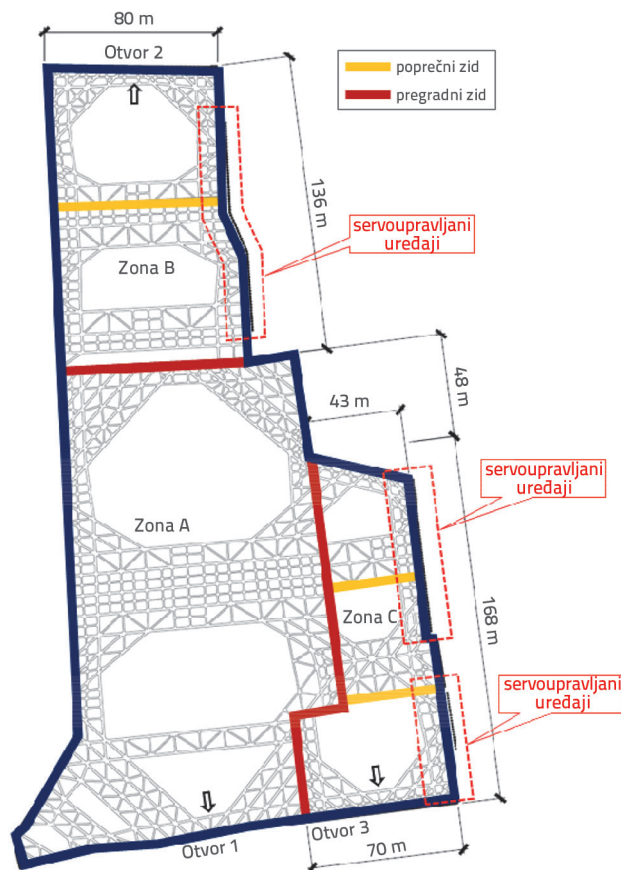
3.1. Zonirano iskopavanje

Kako bi se zaštitile osjetljive građevine na istočnoj strani, veliki iskop podijeljen je u manje zone, čime je kontrolirana veličina dijela iskopa uz postojeće zgrade. Istodobno je iskorišten prostorno-vremenski učinak za smanjenje utjecaja iskopa na okoliš. Podjela iskopa morala je biti usklađena s tlocrtom glavne zgrade i funkcionalnim zoniranjem podzemnih etaža kako bi se smanjila podjela glavnog objekta i očuvala cjelovitost funkcionalnih prostora. Osim toga pri definiranju podjele u obzir je uzeta i dinamika gradilišta, a planirani raspored morao je omogućiti dovršetak radova unutar zadanog roka.

Na temelju tih kriterija i oblika iskopa izvedena su dva unutarnja pregradna zida kojima je veliko gradilište, ukupne površine oko 44.650 m², podijeljeno u tri zone: A, B i C. Zone B i C, smještene uz zgrade s plitkim temeljima, imale su površinu od 11.000 m² i 7900 m². Istočna strana, duga 365 m, dodatno je podijeljena u tri dionice duljine 136 m, 48 m i 168 m, koje su iskapano zasebno. Prema projektu, prvo se izvodio iskop zone A, a po dovršetku njezine temeljne ploče istodobno su započeti iskopi zona B i C. Detaljan plan svake zone prikazan je na slici 2.

Zbog ograničenih mogućnosti uklanjanja materijala s istočne i zapadne strane lokacije izvedena su tri otvora u smjeru sjever-

jug. Budući da je iz zone A trebalo ukloniti najveće količine tla, sva tri otvora mogla su se koristiti za učinkovit odvoz materijala. Zone B i C koristile su zasebne otvore (2 i 3) tijekom faze iskopa, bez međusobnog ometanja, čime je ostvaren plan faznog iskopa. Zbog privremene obustave radova za vrijeme hangzhouških Azijskih igara zone B i C bile su iskapane istodobno nakon što je dovršena temeljna ploča zone A radi ubrzanja dinamike gradnje uz dodatno ojačanje sustava podupiranja i poboljšanje tla unutar iskopa. Na taj je način konačno postignut planirani vremenski cilj projekta.



Slika 2. Plan rasporeda za zoniranje iskopa

Tablica 2. Raspodjela tla i parametri modela

Sloj tla	e_0	E_{50}^{ref} [kPa]	E_{oed}^{ref} [kPa]	E_{ur}^{ref} [kPa]	G_0^{ref} [kPa]	$\gamma_{a,7}$
1–0 razno punjenje	0,500	7,0	7,0	34,8	121	$2 \cdot 10^{-4}$
1–2 prašnasta glina	0,893	7,0	4,9	32,0	120	$2 \cdot 10^{-4}$
2–1 blatnjava glina	1,294	3,4	2,3	15,9	33,3	$2 \cdot 10^{-4}$
2–2 prašnaste gline protkane prašinom	0,924	3,9	3,0	24,0	48	$2 \cdot 10^{-4}$
3–1 muljevito-prašnasta glina	1,202	3,2	2,4	19,2	31,9	$2 \cdot 10^{-4}$
3–2 prašnasta glina	0,987	5,2	4,0	32,0	64	$2 \cdot 10^{-4}$
4 gline	0,910	6,9	5,3	42,4	72,08	$2 \cdot 10^{-4}$
6 prašnasta glina	0,776	7,5	5,8	46,4	92,8	$2 \cdot 10^{-4}$
Jako istrošeni siltit	0,678	30,0	30,0	180,0	600,0	$2 \cdot 10^{-4}$
Umjereno istrošeni siltit	0,500	50,0	50,0	300,0	800,0	$2 \cdot 10^{-4}$

3.2. Poprečni zidovi

Nakon podjele iskopa dužine zona B i C na istočnoj strani, uz zgrade s plitkim temeljima, i dalje su iznosile 136 m i 168 m. Zona C bila je neposredno uz važan objekt kulturne baštine – katoličku crkvu, udaljenu samo 8 m od potpornog zida. Uzimajući u obzir raspored zgrada na istočnoj strani, zahtjeve zaštite i zabrinutost stanovnika, u zoni B izveden je jedan poprečni zid, a u zoni C dva, postavljena okomito na potporni zid. Za položaje potpore odabrani su središnji dijelovi, gdje je prostorno-vremenski učinak bio najmanji. Cilj je bio stvoriti kruti unutarnji oslonac koji ograničava bočne pomake potpornog zida i time smanjuje negativne učinke iskopa na okolne zgrade.

Svi poprečni zidovi izvedeni su istom metodom kao i dijafragmatski zid debljine 1000 mm. Dio od površine terena do pete razine podupirača izveden je kao armiranobetonski zid, dok je dionica od pete potpore do 10 m ispod dna iskopa dodatno ojačana.

Kako bi se istražio utjecaj različitih rasporeda poprečnih zidova na deformacije potpornog zida, izrađen je trodimenzionalni numerički model zone C temeljen na stvarnim geotehničkim podacima, a rezultati su kalibrirani prema terenskim mjerenjima. Zatim su, na temelju istog modela, simulirani različiti scenariji rasporeda poprečnih zidova radi analize deformacijskih svojstava potpornog zida.

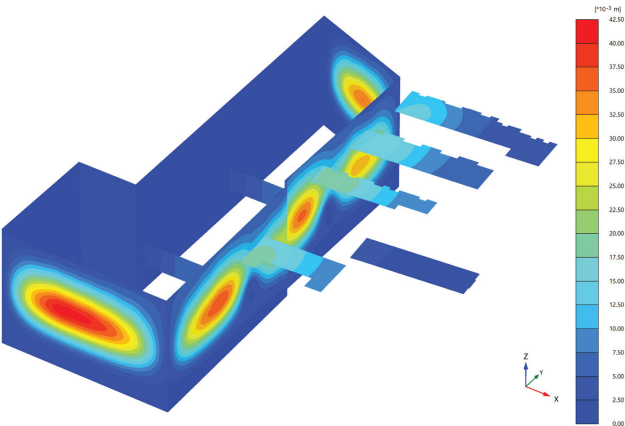
3.2.1. Izrada i verifikacija osnovnog modela

Dijafragmatski zid u zoni C doseže dubinu od 49 m. Za potrebe proračuna korišten je model visine 60 m, dimenzija 300 m (X) × 400 m (Y) × 60 m (Z). Tlo je pojednostavljeno podijeljeno na deset slojeva. Za modeliranje tla korišten je Hardening Soil Small-strain (HSS) model, a ključni parametri prikazani su u tablici 2. Konstrukcijski elementi pojednostavljeni su prema ekvivalentnoj krutosti: potporni zid modeliran je kao pločasti element određene debljine, a dio podupirača kao gredni elementi s elastičnim konstitutivnim modelom (parametri u tablici 3.). Granični uvjeti postavljeni su prema standardnim ograničenjima: horizontalni pomaci ($U_X = 0$, $U_Y = 0$) na bočnim ploham, a vertikalni pomak ($U_Z = 0$) na dnu modela. Utjecaj podzemne vode zanemaren je spuštanjem razine vode ispod dna iskopa.

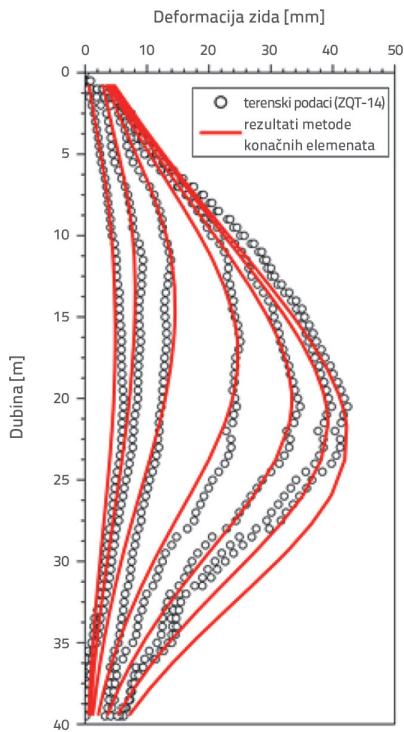
Kako bi se osigurala kvaliteta mreže, tlo je diskretizirano pomoću 15-čvornih trokutnih elemenata za stanje ravnine deformacije.

Tablica 3. Parametri izračuna konstrukcijskog materijala

Komponente	E ($\times 10^4$ MPa)	EA ($\times 10^7$ kN/m)	EI ($\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$)	ν
potporni zid	3,00	2,5	$1,6 \times 10^6$	0,2
betonski podupirači	3,00	3,00	—	0,2
konstrukcijske ploče	3,00	2,70	$1,82 \times 10^6$	0,2



Slika 3. Karta reljefa ukupne deformacije zone C

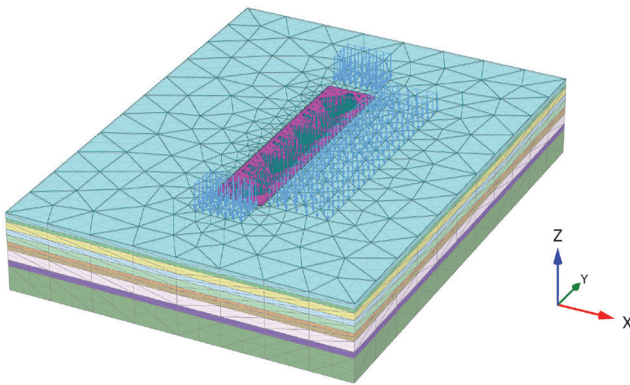


Slika 4. Izračunana deformacija zida u točki ZQT-14 i usporedba s terenskim mjerenjima

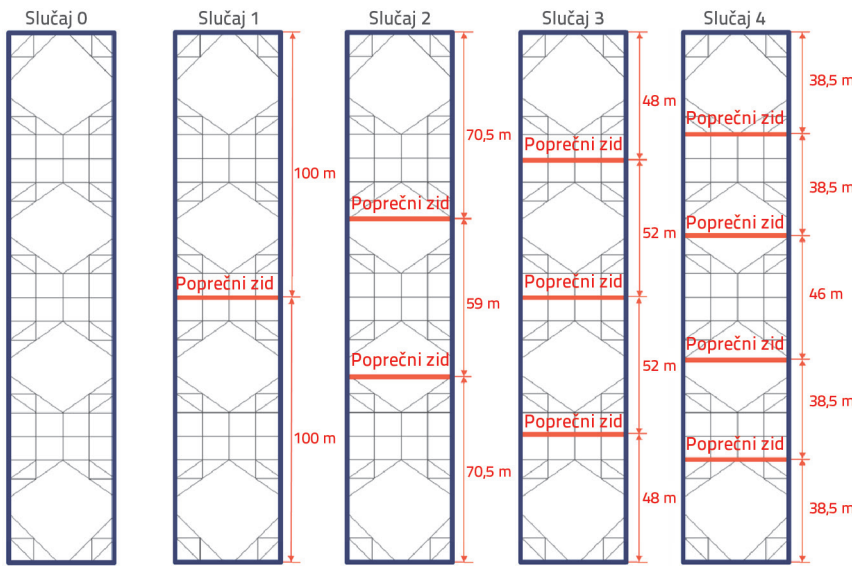
Deformacijska karta potpornog zida po završetku iskopa prikazana je na slici 3. Usporedba izračunanih i izmjerenih bočnih pomaka na mjernoj točki ZQT14 (istočna strana) prikazana je na slici 4. Rezultati modela dobro se podudaraju s terenskim mjerenjima, uz manja odstupanja u dubljim slojevima, što se pripisuje pretpostavci o homogenosti i izotropiji tla u modelu, koja ne može u cijelosti obuhvatiti stvarne heterogenosti i anizotropiju slojeva. Općenito, model je vjerodostojno opisao deformacijsko ponašanje potpornog zida tijekom iskopa.

3.2.2. Analiza različitih varijanti tlocrtnog rasporeda poprečnih zidova

Zona C pojednostavljena je u pravokutnik dimenzija 40×200 m. Okolne konstrukcije, odnosno zgrade na istočnoj strani, privremeni objekti kulturne baštine na sjeveru i prometnice na jugu, modelirane su kao ekvivalentna opterećenja. Raspored mreže prikazan je na slici 5. Prema metodologiji iz poglavlja 3.2.1. analizirano je pet scenarija: bez poprečnih zidova te s jednim, dvama, trima i četirima poprečnim zidovima (slika 6.).



Slika 5. Ukupna podjela mreže

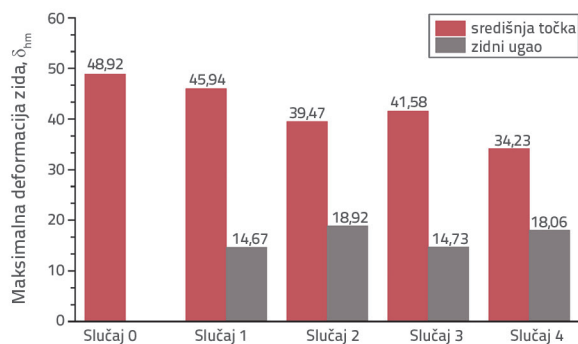


Slika 6. Plošni raspored poprečnih zidova za različite varijante numeričkog modela

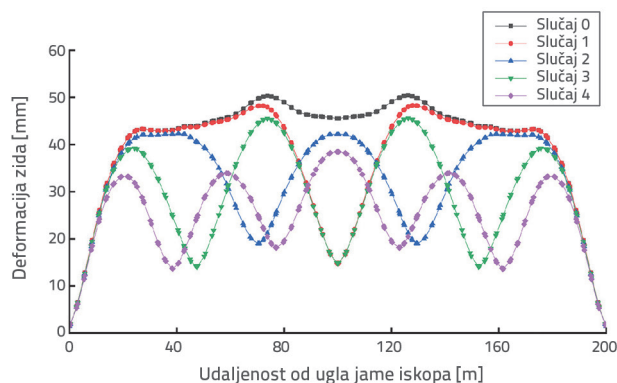
3.2.3. Rezultati i analiza

U odnosu na slučaj bez poprečnih zidova (0), postavljanje jednog, dvaju, triju i četiriju poprečnih zidova smanjilo je deformacije istočnoga potpornog zida za 6,1 %, 19,3 %, 15,0 % i 30,0 %. Znatno smanjenje deformacija postignuto je u slučaju s dvama zidovima, dok je kod triju zidova došlo do blagih povećanja deformacija zbog preklapanja podupirača i poprečnih zidova, što je smanjilo njihovo zajedničko djelovanje. Uvođenje četvrtog zida dodatno je smanjilo deformacije, ali je prirast koristi bio znatno manji. Dodavanje dvaju zidova (od slučaja 0 do 2) smanjilo je deformacije za 19,4 %, dok su dva dodatna zida (od slučaja 2 do 4) donijela samo dodatno smanjenje od 10,2 %.

Na slici 7. prikazani su maksimalni pomaci na rubovima (u zonama poprečnih zidova) i u sredini raspona (između poprečnih zidova) za svaki scenarij, dok je raspodjela deformacija istočnog zida prikazana na slici 8. Deformacije zida pokazuju izrazito neujednačen raspored. U slučaju s jednim zidom (1) maksimalni pomak na rubu iznosio je samo 14,67 mm, što je za 68,1 % manje od najvećeg pomaka u sredini raspona (45,94 mm), što potvrđuje izražen učinak poprečnih zidova na lokalno ograničavanje deformacija.



Slika 7. Najveće vrijednosti deformacija u kutovima i sredini raspona potpornog zida



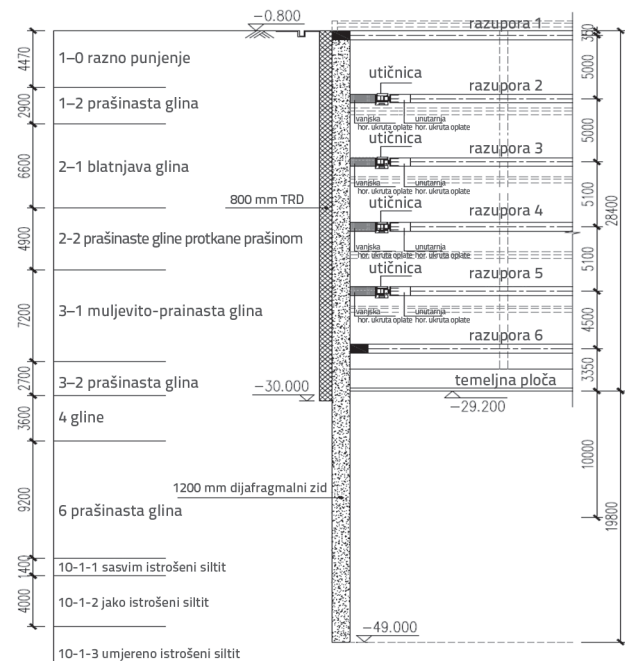
Slika 8. Dijagram raspodjele deformacije istočnog zida

Analiza pokazuje da postoji jasna točka optimiranja rasporeda poprečnih zidova. Kada razmak između zidova padne ispod 1,6 puta širine iskopa (oko 65 m), tada dodatno povećanje broja

zidova rezultira sve manjim učinkom smanjenja maksimalnih deformacija. U slučaju s trima zidovima preklapanje njihovih oslonaca s podupiračima dovelo je do nepotpunog iskorištavanja krutosti sustava, stvarajući efekt zasjenjenja. Kako bi se izbjegla koncentracija krutosti, preporučuje se da razmak između poprečnih zidova i podupirača iznosi najmanje 15 m.

3.3. Servoupravljeni betonski podupirači aksijalnom silom

U zonama B i C postavljeno je šest razina horizontalnih betonskih podupirača, od kojih su drugi do peti podupirač opremljeni servosustavom za kontrolu aksijalne sile. Tradicionalno se ta tehnologija primjenjuje na čelične podupirače. Međutim, zbog njihove ograničene krutosti i velikih prostornih zahtjeva njihova je primjena često ograničena na velike ili nepravilno oblikovane iskope. U tom je projektu osmišljen dvostruki nosački sustav (*double wale*) koji je omogućio ugradnju servoupravljanog sustava u betonske podupirače, čime su iskorištene prednosti njihove visoke ukupne krutosti i prilagodljivosti. To je prva velika primjena servoupravljanih betonskih podupirača s kontrolom aksijalne sile u dubokome iskopsu tih dimenzija.



Slika 9. Shema dijela podupirača sa servoupravljanjem aksijalnom silom

Servosustav s kontrolom aksijalne sile sastoji se od glavnoga upravljačkog modula, numerički upravljane hidrauličke pumpe te servoaktuatora koji omogućuju primjenu aksijalne sile u stvarnome vremenu i automatsko podešavanje. Aktuatori su postavljeni na istočnoj strani: u zoni B po 54 komada po razini, a u zoni C po 60 komada, grupirani po tri i smješteni između unutarnjeg i vanjskog nosača. Njihov je raspored prikazan na slici 2.

Tablica 4. Vrijednosti prednaprezanja poprečnih podupirača

Podupirač	Zona B		Zona C	
	Jedan cilindar [kN]	Po metru [kN/m]	Jedan cilindar [kN]	Po metru [kN/m]
Podupirač 2	1500	750	1800	900
Podupirač 3	2300	1150	3000	1500
Podupirač 4	2600	1300	3200	1600
Podupirač 5	2600	1300	3200	1600

Put prijenosa sila bez prednaprezanja jest sljedeći: tlak tla i vode izvan iskopa → potporni zid → vanjski nosač → prijenosni pilon → unutarnji nosač → podupirač. Nakon primjene prednaprezanja put prijenosa sila postaje: tlak tla i vode izvan iskopa → potporni zid → vanjski nosač → aktuator → unutarnji nosač → podupirač. Kako bi se poboljšala koordinacija deformacija sustava podupirača, u području poprečnih podupirača i istočnoga rešetkastog nosača izvedena je betonska ploča debljine 200 mm.

Povećanje prednaprezanja podupirača na većim dubinama bilo je neophodno za ograničavanje deformacija potpornog zida te za osiguravanje maksimalne predkompresijske deformacije betonskih podupirača. Osim toga naizmjenično kretanje potpornog zida (pozitivni i negativni pomaci) moglo bi ponavljano remetiti tlo izvan iskopa, što bi ugrozilo dugoročnu stabilnost okolnih građevina. Zato je u tome projektu primijenjen jednofazni postupak prednaprezanja, gdje je vrijednost prednaprezanja uzeta kao 80 % projektirane aksijalne sile za svaki podupirač. Tijekom izvođenja vrijednosti su prilagođavane prema stvarnim deformacijama, ali bez prekoračenja dopuštene tlačne nosivosti poprečnog presjeka podupirača.

Kako su zone B i C bile obuhvaćene različitim ugovorima, korištene su dvije vrste hidrauličkih aktuatora, nazivnih nosivosti 350 t i 500 t. Konačne vrijednosti prednaprezanja u poprečnim podupiračima prikazane su u tablici 4. S obzirom na nižu krutost podupirača u zonama kutnih oslonaca i bočnih rešetkastih nosača, primijenjeno prednaprezanje iznosilo je 50 % vrijednosti prednaprezanja poprečnih podupirača.

Nakon što je čvrstoća betona u svakome podupiraču dosegla razinu C30, opterećenje je primijenjeno postupno, u koracima od 40 %, 60 %, 80 % i 100 % projektirane vrijednosti. Svaka faza opterećenja započela je tek nakon što se pomak hidrauličkog cilindra stabilizirao u odnosu na prethodnu fazu. Aksijalna sila u podupiračima tijekom iskopa prolazila je kroz četiri faze promjene:

1. početno razdoblje opterećenja: Betonski podupirači pod tlakom prolaze kroz postupne deformacije, pri čemu dolazi do gubitka prednaprezanja koje se automatski nadoknađuje, što uzrokuje povećane pomake hidrauličkih cilindra.
2. razdoblje uravnoteženja naprezanja: Aksijalna sila u podupiračima postiže ravnotežu s vanjskim tlakom tla i vode, a zatim fluktuiira unutar normalnog raspona, ovisno o promjenama temperature.
3. razdoblje kompenzacije prednaprezanja: Tijekom vremena između iskopa sljedećeg nosača i ponovnog opterećenja ponovno dolazi do gubitka prednaprezanja, što zahtijeva

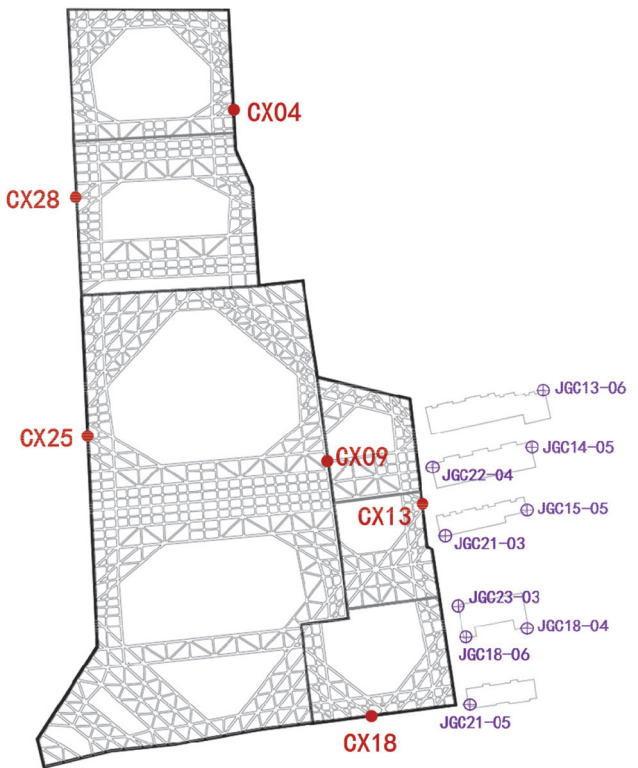
automatsku kompenzaciju i uzrokuje dodatne pomake hidrauličkih cilindra.

4. razdoblje ponovnog uravnoteženja naprezanja: Nakon što aksijalna sila u podupiračima i vanjski tlak tla i vode ponovno uspostave ravnotežu, aksijalna sila nastavlja kolebati unutar normalnog raspona zbog temperaturnih promjena.

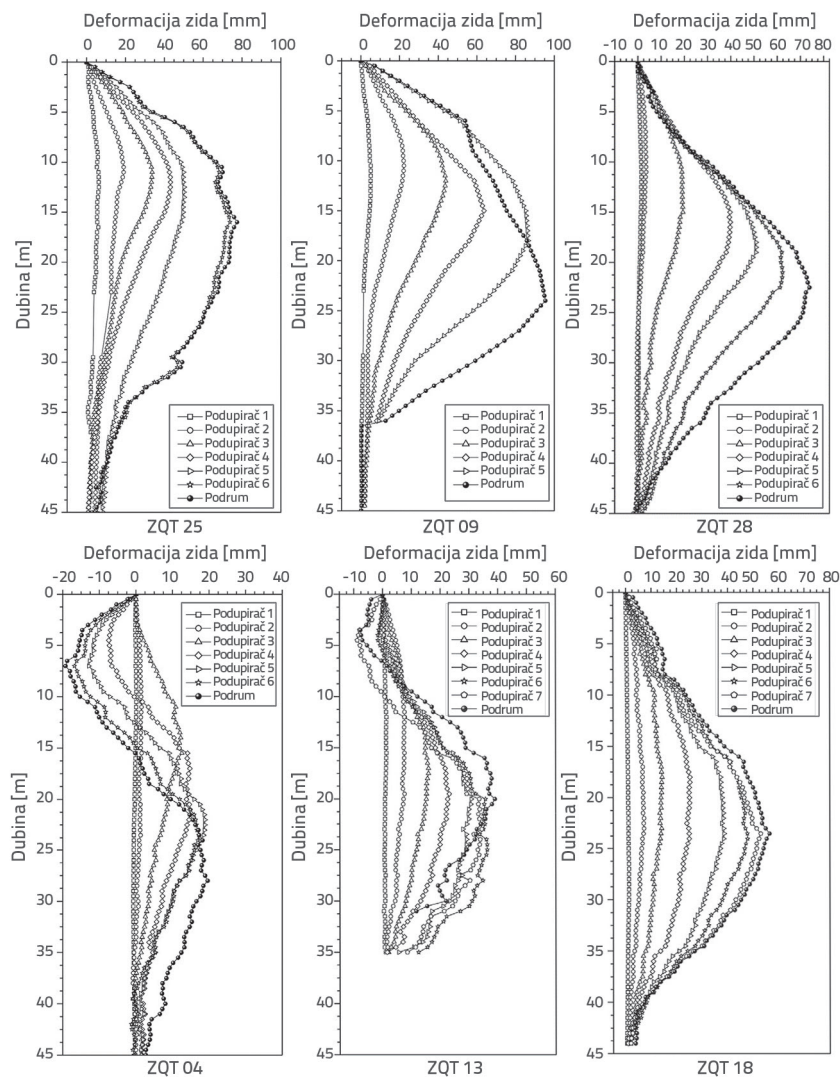
Iako se u tome sustavu prednaprezanje primjenjuje u jednom koraku, buduće verzije mogle bi uključivati dinamičke algoritme u stvarnome vremenu, integrirane s automatiziranim praćenjem i tehnologijama umjetne inteligencije za automatsko podešavanje aksijalnih sila na temelju pragova pomaka zida – pristup koji se već primjenjuje u inženjerstvu tunela [25].

4. Mjerenje i analiza terena

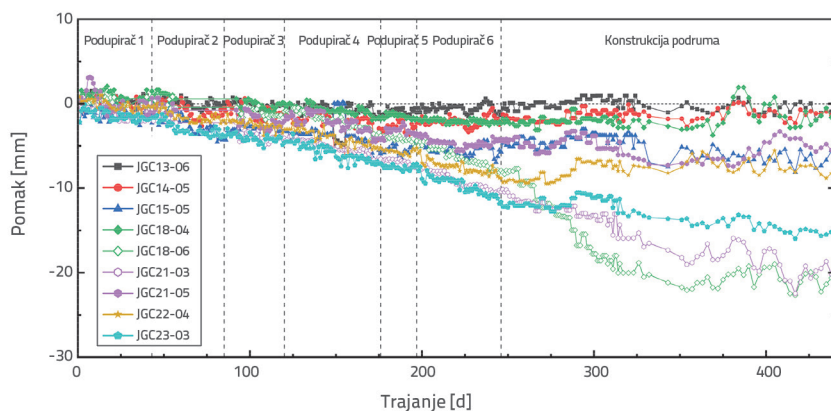
Projekt je započeo u srpnju 2019. izgradnjom temelja na šipovima.



Slika 10. Plan rasporeda glavnih točaka praćenja



Slika 11. Horizontalna krivulja pomaka potpornog zida



Slika 12. Vremenska krivulja slijezanja zgrada s plitkim temeljima na istočnoj strani

Temelji u zoni A dovršeni su u studenome 2020., nakon čega je započeo iskop, dok su radovi na temeljnim šipovima u zonama B i C nastavljeni paralelno. Do veljače 2022. u zoni A dovršena

na temelju mjerenja, kako bi se izbjegle deformacije zida u oba smjera (prema unutra i prema van iskopa) koje bi mogle uzrokovati dodatne poremećaje u okolnome tlu.

je temeljna ploča, a istodobno je započela uzdignuta izgradnja podzemne konstrukcije, paralelno s iskopima u zonama B i C. Cijela podzemna konstrukcija dovršena je u svibnju 2023. pa su se u različitim fazama u zonama A, B i C istodobno izvodili radovi na izradi šipova, iskapanju i uklanjanju podupirača. Maksimalni horizontalni pomak potpornog zida u zoni A iznosio je 100,60 mm, a zabilježen je na istočnoj strani u sredini (točka CX09). Na zapadnoj strani, u sredini (točka CX25), najveći pomak iznosio je 77,47 mm. Razlika u deformacijama između tih točaka povezana je s nepovoljnim uvjetima iskopa u zoni A. Naime, dok su trajali zemljani radovi i izgradnja temelja na šipovima u zoni C, izvan zone iskopa nastalo je dodatno preopterećenje koje je utjecalo na istočni zid. Nadalje, prema krivuljama pomaka za posljednje dvije faze na točki CX09, iznad dna iskopa zabilježeno je kretanje zida prema natrag, što upozorava na to da je tijekom izgradnje podrumске konstrukcije u zoni A, a dok su u zoni C trajali zemljani radovi i postavljanje podupirača, pregradni zid blago oscilirao zbog različitih uvjeta s obje strane.

Usporedba krivulja horizontalnog pomaka potpornog zida u zonama B i C pokazala je različite obrasce deformacija. Zidovi bez servoupravljenih uređaja za kontrolu aksijalne sile imali su karakterističan oblik deformacije koji podsjeća na trbuh, s najvećim pomakom u sredini visine. Nasuprot tomu, istočni zid opremljen servoupravljenim podupiračima pokazao je krivulju u obliku slova "S", s pomakom gornjeg dijela u suprotnome smjeru i znatnim pomicanjem točke maksimalnog pomaka prema dnu. Takav oblik krivulje potvrđuje da servoupravljeni betonski podupirači s kontrolom aksijalne sile mogu učinkovito kontrolirati deformaciju zidova. Ipak, prekomjerno prednaprezanje može uzrokovati pomak zida prema van (negativni pomak) pa se takvo prednaprezanje mora pažljivo dozirati, po mogućnosti uz dinamičko podešavanje u stvarnome vremenu

Na slici 10. prikazan je raspored glavnih točaka praćenja, a na slici 11. horizontalne krivulje pomaka potpornog zida.

Na slici 12. prikazan je razvoj slijeganja zgrada s plitkim temeljima na istočnoj strani tijekom cijelog razdoblja gradnje. Kako je iskop napredovao, tako su se slijeganja postupno povećavala, osobito nakon iskopa do razine trećeg podupirača, kada je brzina slijeganja porasla, što se vjerojatno povezuje s dosezanjem sloja prašinate gline. Nakon što je temeljna ploča izlivena, slijeganja su se postupno stabilizirala. Do završetka izgradnje podrumске konstrukcije maksimalna slijeganja zgrada uglavnom su bila ograničena na 20 mm, uz minimalna diferencijalna slijeganja, čime je postignut cilj očuvanja sigurnosti i funkcionalnosti stambenih objekata.

5. Zaključak

S razvojem korištenja urbanoga podzemnog prostora, iskopi postaju sve veći, dublji i složeniji. Pri kontroli deformacija dubokih i velikih iskopa u zahtjevnim uvjetima mekih tala samo povećanje krutosti potpornih konstrukcija ne donosi željene rezultate, već dovodi do neekonomične potrošnje resursa. Ovaj rad analizira duboki iskop s pet podzemnih etaža poslovnoga kompleksa Hang Lung Plaza u Hangzhouu te prikazuje primjenu tehnologija faznog iskopa, poprečnih zidova i servoupravljanih betonskih podupirača s kontrolom aksijalne sile. Terenska mjerenja potvrđuju da sustavna primjena tih aktivnih mjera

zaštite rezultira izvrsnom kontrolom deformacija potpornih zidova i susjednih građevina s plitkim temeljima, čime je osigurana neometana izvedba projekta.

Zonirano iskapanje uobičajeno je kod velikih i dubokih iskopa te je potkrijepljeno bogatim praktičnim iskustvom i teorijskim istraživanjima. Poprečni zidovi dokazano su učinkovita metoda kontrole deformacija, no njihov raspored mora biti pažljivo optimiran kako bi se postigla ravnoteža između krutosti konstrukcije i ekonomske isplativosti. Preporučuje se da, u nedostatku detaljnog iskustva, razmak između poprečnih zidova iznosi približno 1,6 puta širinu iskopa. Buduća istraživanja trebala bi biti usmjerena na analizu osjetljivosti ključnih parametara, razvoj kombiniranih metoda ojačanja te izradu prostorno-vremenskih modela predviđanja učinaka, čime bi se unaprijedila standardizacija primjene poprečnih zidova.

Za optimiranje projektnih rješenja servoupravljeni betonski podupirači s kontrolom aksijalne sile zahtijevaju daljnju analizu u pogledu broja podupirača i raspodjele opterećenja po elementima. Taj projekt predstavlja prvu znatnu primjenu takvih podupirača u dubokim iskopima u provinciji Zhejiang. Inovativni dvostruki nosivi sustav omogućio je učinkovitu prijenosnu vezu između potpornog zida i sustava podupirača, integrirajući koncept servoupravljanja s tradicionalnim betonskim elementima te pružajući učinkovitu i pouzdanu strategiju kontrole deformacija za velike i duboke iskope u mekim tlima.

LITERATURA

- [1] Jing, Y., Li, L., Li, J., Chen, H.: Performances of a large-scale deep excavation with multi-support types and zoned excavation technique in Shanghai soft soil. *Canadian Geotechnical Journal*, 62 (2025), pp. 1-20.
- [2] Chiu, H.W., Hsu, C.F., Tsai, F.H., Chen, S.L.: Influence of different construction methods on lateral displacement of diaphragm walls in large-scale unsupported deep excavation. *Buildings*, 14 (2024) 14, Paper No. 23.
- [3] Tang, Y., Zhao, W., Zhou, J.: The deformation of retaining piles and ground surface under various support systems during deep excavation. *Geoenvironmental Disasters*, 4 (2017), Paper No. 22.
- [4] Maher, T., El-Nimr, A., Basha, M., Abo-Raya, M.M., Zakaria, M.H.: General deformation behavior of deep excavation support systems: A review. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 10 (2022) 1, pp. 039-057.
- [5] Gong, X.N.: Deep excavation engineering design and construction manual. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.
- [6] Liu, X.W., Li, B.H., Chen, W.L.: Control technology of influence on adjacent metro tunnels by deep and large excavation of 6 Basements in Thick Soft Soil. *Building Structure*, 52 (2022) 15, Paper No. 137.
- [7] Xu, C., Chen, Q., Wang, J., Hu, W., Fang, T.: Dynamic deformation control of retaining structures of a deep excavation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30 (2016) 4, Paper No. 04015071.
- [8] Gordon, T.C., Kung, C., Juang, H., Hsiao, E.C.L., Hashash, Y.M.A.: Simplified model of wall deflection and ground surface settlement caused by braced excavation in clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133 (2007) 6, pp. 731-747.
- [9] Yang, X.L., Cao, G.Q., Zhou, P.H.: Design of retaining structure for five-story basement deep excavation of Hangzhou Guoda City Plaza. *Building Structure*, 42 (2012) 8, Paper No. 94.
- [10] Yin, Y.H.: Design and practice of deep and large excavations adjacent to metro in thick soft soil strata. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 41 (2019) Suppl.1, Paper No. 129.
- [11] Hou, S.N., Yue, J.Y., Zhou, Y.: Design and practice of deep and large excavation for a sports building in a complex environment. *Journal of Building Science and Engineering*, 38 (2021) 6, Paper No. 119.
- [12] Ou, C.Y., Hsieh, P.G., Lin, Y.L.: Performance of excavations with cross walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137 (2011) 1, Paper No. 94.
- [13] Hsieh, P.G., Ou, C.Y., Lin, Y.L.: Three-dimensional numerical analysis of deep excavations with cross walls. *Acta Geotechnica*, 8 (2013), pp. 33-48.
- [14] Ou, C.Y., Hsieh, P.G., Lin, Y.L.: Performance of excavations with cross walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137 (2011) 1, pp. 94-104.

- [15] Zeng, C.F., Wang, S., Song, W.W., et al.: Control effect of inner partition wall on deformation of soft soil area metro deep excavation induced by groundwater extraction before excavation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40 (2021) 6, Paper No. 1277.
- [16] Nangulama, H., Zhou, J.: Deformation control monitoring of basement excavation at field construction site: A case of hydraulic servo-controlled steel enhancement geotechnology. *Advances in Civil Engineering*, 2022, Paper No. 6234581.
- [17] Lapčević, R., Vojnović, B., Lokin, P., Bogdanović, S.: Realization and protection of deep flysch excavations in complex geotechnical conditions. *Građevinar*, 1 (2015), pp. 33-42.
- [18] Chen, B., Yan, T., Song, D., Luo, R., Zhang, G.: Experimental investigations on a deep excavation support system with adjustable strut length. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 115 (2021), Paper No. 104046.
- [19] Li, M.G., Demeijer, O., Chen, J.J.: Effectiveness of servo-controlled struts in controlling excavation-induced wall deflection and ground settlement. *Acta Geotechnica*, 20 (2020).
- [20] Zhao, S.M., Cui, Y.G., Chen, W.D.: Finite element analysis of deep excavation considering creep of concrete support. *Building Science*, 25 (2009) 11, Paper No. 46.
- [21] Wei, J.H., Lu, C.L., Luo, C.H.: Design and practice of prestressed concrete servo-controlled support in deep excavation of soft soil. *Geotechnical Engineering Technology*, 37 (2023) 6, Paper No. 737.
- [22] Zou, W.J.: Analysis of the influence of prestressed reinforced concrete supports on the deformation of adjacent metro tunnels by deep excavation in soft soil areas. *Foundation Treatment*, 5 (2023) 2, Paper No. 152.
- [23] Tabaroei, A., Sarfarazi, V., Pouraminian, M., Mohammadzadeh, D.S.: Evaluation of behavior of a deep excavation by three-dimensional numerical modeling. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66 (2022) 3, pp. 967-977.
- [24] Hsu, C.F., Kuan, C.F., Chen, S.L.: Three-dimensional numerical analysis on the influence of buttress wall removal timing on the lateral deformation of diaphragm walls during deep excavation. *Buildings*, 13 (2023), Paper No. 2678.
- [25] Shen, J.: Analysis and countermeasures of mutual influence of ultra-large scale excavation group excavation. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 34 (2012, Suppl.1, Paper No. 272.
- [26] Lv, J., Zheng, B., Liu, Z., Huang, J.: Controlled shaped-charge blasting technology for deep underground tunnel engineering, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 10, pp. 997-1011, <https://doi.org/10.14256/JCE.3768.2023>