

OSMATRANJE I PRORAČUN SLEGANJA PLITKIH TEMELJA NA OSNOVU TESTA STATIČKOG OPTEREĆENJA

PERFORMANCE MONITORING AND SETTLEMENT ANALYSIS OF SHALLOW FOUNDATIONS UNDER FULL-SCALE STATIC LOAD TESTING

Zoran Berisavljević

Originalni naučni rad
10.5937/IASPN25099B

Apstrakt: Nacionalni fudbalski stadion predstavlja objekat od kapitalnog značaja. S obzirom na kompleksnost i važnost same konstrukcije, postavljeni su visoki kriterijumi za projektovanje. Sleganje se mora predvideti u tlu promenljivih otporno-deformabilno-hidrauličkih karakteristika. Za ove potrebe su izvedena tri statička probna opterećenja temelja, dimenzija 5 x 5 x 0,5 m, kod kojih su pomeranja osmatrana geodetski, kao i ugradnjom magnetnih ekstenzometara u bušotine. Ovo je omogućilo da se izvrši povratna analiza sleganja, pri čemu su geotehnički parametri sredina „kalibrisani” kombinovanjem rezultata laboratorijskih i *in situ* opita.

Ključne reči: Sleganje, plitki temelj, povratna analiza, osmatranje, test statičkog opterećenja

Abstract: The National Football Stadium represents a project of strategic importance. Owing to the complexity and significance of the structure, strict design requirements were imposed. Prediction of settlement in soils with heterogeneous strength, deformability, and hydraulic properties was essential. For this purpose, three large-scale static load tests on shallow foundations with dimensions of 5 × 5 × 0.5 m were performed. Displacements were monitored by geodetic surveying and by magnetic extensometers installed in boreholes. The results enabled a back-analysis of foundation settlements, where the geotechnical parameters of the subsoil were calibrated through the integration of laboratory data and *in situ* test results.

Key Words: Settlement, Shallow foundation, Back-analysis, Monitoring, Zone load test

UVOD

Nacionalni fudbalski stadion je najznačajniji objekat koji se nalazi u okviru EXPO2027 kompleksa (Slika 1). Kapacitet od preko 50.000 mesta, kao i sama konstrukcija stadiona, uticali su na to da projektni kriterijumi budu veoma visoki. Dozvoljena diferencijalna sleganja su veoma mala, pri čemu se funkcionalnost objekta ne sme dovesti u pitanje. Posebna pažnja je stavljena na definisanje graničnog stanja upotrebljivosti, odnosno određivanja veličine sleganja.

Da bi se proverile projektne pretpostavke i izvršila kalibracija geotehničkih parametara, u domaćoj geotehničkoj praksi se često izvode testovi statičkog probnog opterećenja, ali su oni uglavnom ograničeni na ispitivanje šipova. Međutim, izvođenje testa probnog opterećenja na plitkom temelju nije tako čest slučaj. Prema saznanjima autora, bilo je svega nekoliko ispitivanja u prošlosti i to uglavnom za potrebe fundiranja temelja objekata u sklopu velikih termoelektrana.

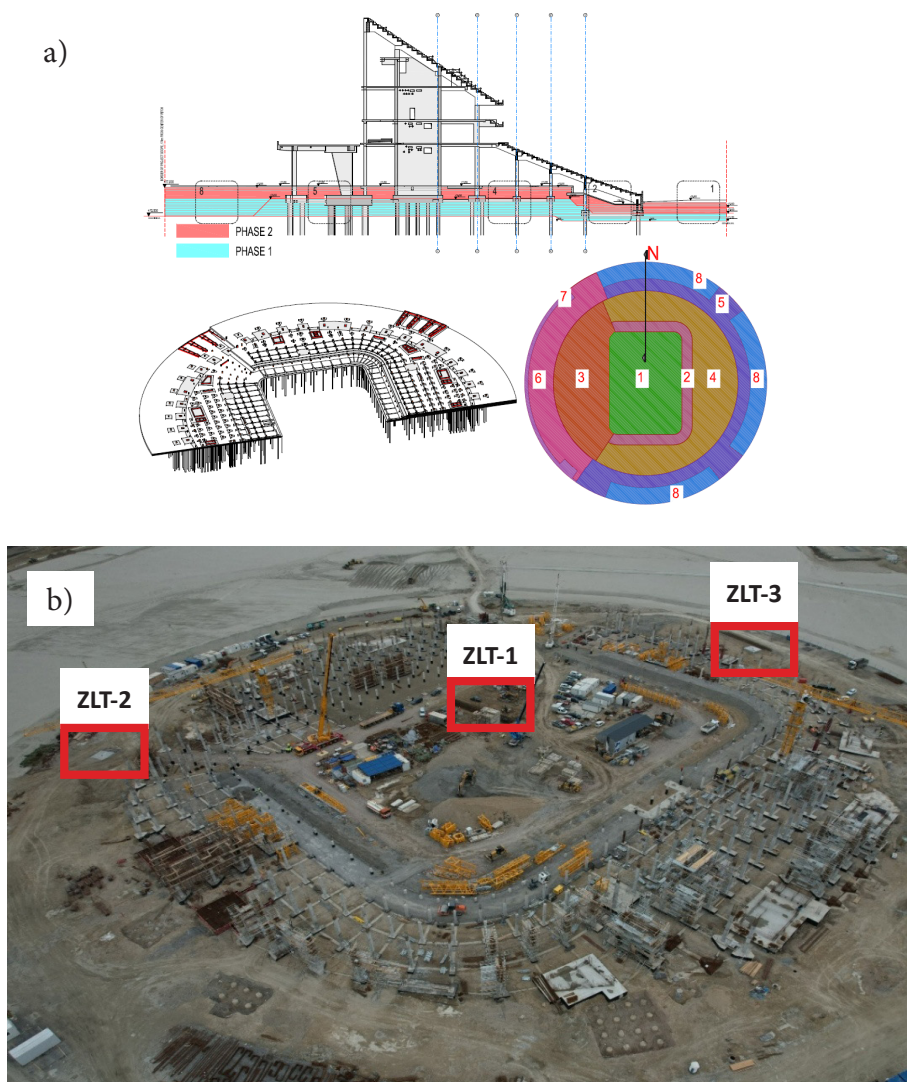
U zoni Nacionalnog stadiona izvedena su tri testa statičkog probnog opterećenja. Sama koncepcija izvođenja opita je intuitivna, međutim zbog veličine opterećene površine opit često prate određene poteškoće prilikom izvođenja. Test se izvodi tako što se na temelj sukcesivno dodaje opterećenje, obično sačinjeno od betonskih blokova. Nakon svake faze prate se sleganja u određenim vremenskim intervalima do punog iznosa opterećenja. Nakon dostizanja projektovanog opterećenja sa osmatranjima se može nastaviti u određenom vremenskom periodu da bi se odredila komponenta puzanja. Pored toga, tlu u zoni temelja moguće je dodati vodu, kako bi se simulirali efekti hidrokonsolidacije.

U radu su prikazani rezultati testa probnog opterećenja temelja i rezultati povratne analize. U radu će se za navedeni test koristiti skraćenica ZLT, od engleskih reči Zone Load Test.

METODOLOGIJA IZVOĐENJA ZLT TESTA

ZLT testovi su izvedeni na betonskim temeljima dimenzija $5 \times 5 \times 0,5$ m, klase čvrstoće C40/50. Temelji su postupno opterećivani do 500 t (200 kPa). Opterećenje je vršeno dodavanjem betonskih blokova u sledećim fazama: 25% (126,3 t), 50% (252,7 t), 75% (374,2 t) i 100% (500,1 t). U svakoj fazi opterećenja osmatrana su pomeranja u različitim vremenskim intervalima, sve do trenutka njihovog smirivanja, odnosno do dostizanja graničnih vrednosti koje su u ovom slučaju iznosile: za sleganja između 10 i 24 mm opterećenje se drži konstantnim sve dok veličina sleganja ne opadne na vrednost ≤ 0.15 mm/h; za sleganja veća od 24 mm opterećenje se drži konstantnim sve dok veličina sleganja ne opadne na ≤ 0.24 mm/h. Između pojedinih faza vreme osmatranja

iznosilo je 24 h (izuzev u zoni ZLT1, gde je opterećenje između 50% i 75% nanošeno nešto sporije), dok je pri 100% opterećenja u zoni temelja ZLT-1 i ZLT-2 vršeno osmatranje od 48 h. U zoni testa ZLT-3 je pri 100% opterećenja vršeno osmatranje pomeranja u periodu od deset dana, pri čemu je konstantno dodavana voda u zoni temelja. Temelj je „zalivan” počev od 25% opterećenja, što je imalo za cilj da se simuliraju uslovi koji vladaju u edometarskom opitu, odnosno hidrokonsolidacija tla. Napominje se da „zalivanje” temelja nije imalo značajnijeg uticaja na porast deformacija, kao i da su se temelji prilikom sleganja/deformisanja ponašali kao krute konstrukcije.



Slika 1: Izgled Nacionalnog stadiona a) u planu, 2D i 3D model, b) pogled iz ptičje perspektive s položajem testova statičkog opterećenja

Praćenje sleganja vršeno je geodetski (u svakom uglu temelja po jedan reper) i pomoću magnetnih ekstenzometara ugrađenih u bušotine (u kojima se nalaze magnetni prstenovi čiji se položaji u prostoru osmatraju spuštanjem sonde) koje su izvedene u centralnom delu svakog temelja (Slika 2).

Napominje se da bi u slučaju tla loših otporno-deformabilnih karakteristika moglo doći do loma, koji koji bi se ogledao u prekomernom sleganju ili rotaciji temelja. Osmatranja su vršena u periodu mart/april 2025. godine.



Slika 2: Izgled temelja izloženog statičkom opterećenju a) ZLT-3 s bušotinom u centralnom delu za osmatranje sleganja (pre izvođenja testa); b) bušotina u okolnom nasipu, pre izrade temelja u zoni ZLT-1; c) ZLT-1 u toku opterećenja s prostorom za fizički pristup bušotini; d) ZLT-2 nakon uklanjanja opterećenja, sa izgledom bušotine i geodetskim reperom R1

Izmerene vrednosti sleganja ZLT testova prikazane su u tabeli 1. U tabeli su prikazane samo konačne vrednosti sleganja za pojedine faze, osim u završnoj fazi (100% opterećenja), gde su prikazane vrednosti odmah nakon nanošenja opterećenja i pre početka rasterećenja.

Na slici 3 prikazan je fazni postupak opterećivanja temelja ZLT-1.



Slika 3: Fazno opterećenje ZLT-1, a) 13. 3. 2025 ($\approx 25\%$); b) 14. 3. 2025 ($\approx 50\%$); c) 19. 3. 2025 ($\approx 75\%$); d) 20. 3. 2025 (100%)

Opterećenje %	ZLT-1			ZLT-2			ZLT-3		
	datum	geod. (mm)	ekst. (mm)	datum	geod. (mm)	ekst. (mm)	datum	geod. (mm)	ekst. (mm)
25%	13.03.'25.	3.22	3.00	27.03.'25.	1.60	1.00	2.04.'25.	1.25	3.00
50%	14.03.'25.	8.05	7.25	28.03.'25.	4.30	3.25	2.04.'25.	3.22	3.75
75%	19.03.'25.	15.70	13.50	29.03.'25.	7.67	5.25	3.04.'25.	5.95	6.50
100%	20.03.'25.	23.62	23.00	29.03.'25.	10.70	8.50	4.04.'25.	10.22	13.75
100%	22.03.'25.	28.92	28.00	31.03.'25.	13.77	11.75	14.04.'25.	15.62	18.75

Tabela 1: Izmerene vrednosti sleganja pri površini terena u zoni ZLT testova

Nakon opterećenja izvršeno je postupno rasterećenje temelja. Rasterećenje je vršeno u fazama: 100%, 75%, 50%, 25% i potpuno rasterećenje. Rasterećenje, iako nije od značaja za proračun sleganja nasipa, može dati veoma korisne podatke o veličini povratne deformacije, odnosno o veličini modula rasterećenja. Bez ulaženja u detaljniju analizu, grubo se može zaključiti da su odnosi modula rasterećenja i opterećenja $E_{\text{rast.}}/E_{\text{opt.}} = 2-5$.

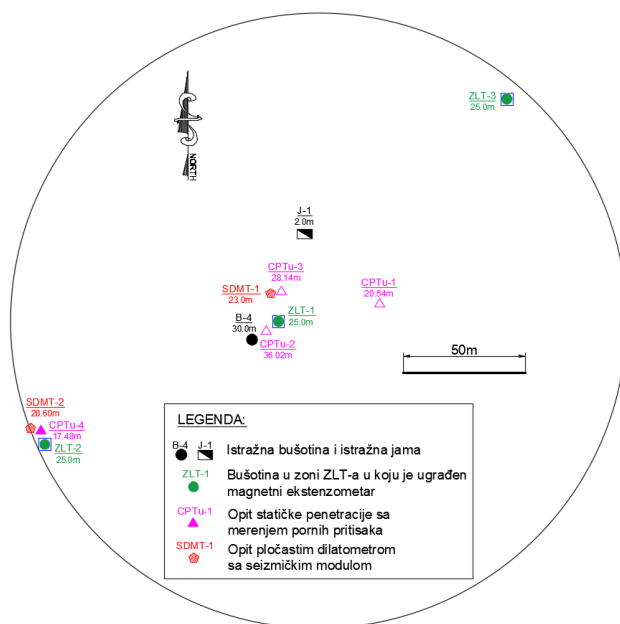
Temelj ZLT-1 je fundiran direktno na podlogu, temelj ZLT-2 na nasipu 2,1 m debljine i temelj ZLT-3 na nasipu 2,2 m debljine. Na ovaj način je u obzir uzet i efekat sleganja nasipa.

IN SITU I LABORATORIJSKA ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA

U neposrednoj blizini ZLT temelja izvedeni su sledeći istražni radovi: 4 istražne bušotine (od kojih su tri u centrima ZLT temelja), 4 CPTu opita, 2 SDMT opita, jedna istražna jama.

Na slici 4 je prikazana situacija s položajem istražnih radova. U zoni ZLT-3 opita zbog relativno velike debljine nasipa, te problema sa ankerisanjem penetrometra, nisu izvedeni dodatni *in situ* opiti. U zoni ZLT-2 terenski opiti su izvedeni iz jame, koja je iskopana do kote prirodnog terena. U bušotinama B-4 i ZLT-2 izvedena su ukupno 4 Menardova presiometarska opita.

Na slici 5 je prikazano izvođenje pojedinih *in situ* opita. Uzorci su iz jama uzimani utiskivanjem cilindra (debelozidni sa „sečivom” na donjoj strani, prečnika 150 mm) u dno jame, dok su uzorci iz bušotina uzimani utiskivanjem pistonu (koji sadrži unutrašnju plastičnu cev za uzorak). Napominje se da su uzorci s pistonom transportovani u laboratoriju, gde su istiskivani zajedno s plastičnom cevi, koja je na kraju rasečena po osovini radi vađenja neporemećenog jezgra.

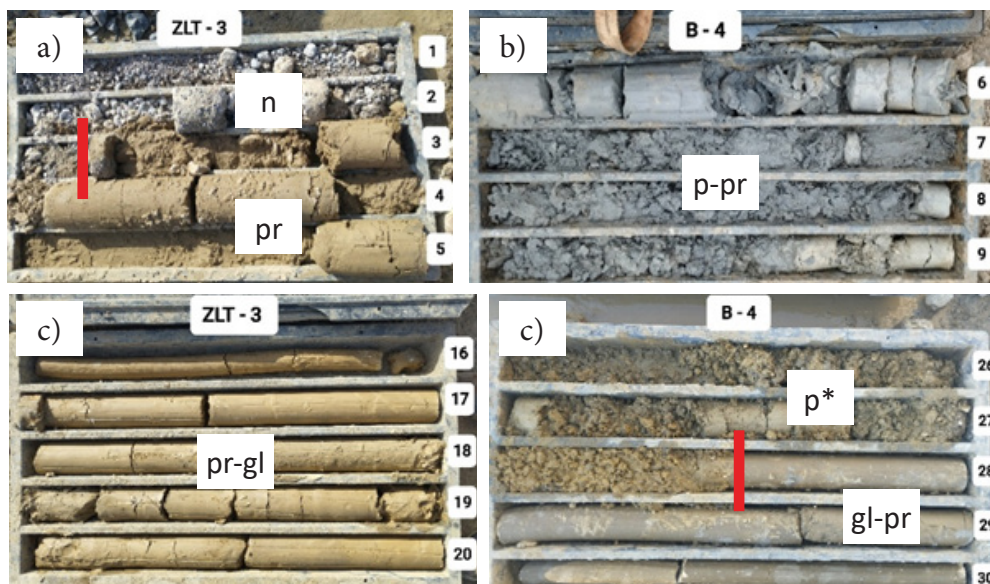


Slika 4: Situacija s položajem istražnih radova



Slika 5: Izvođenje „in situ“ opita a) CPTu u jami u zoni ZLT-2; b) SDMT opit u zoni ZLT-1; c) Menardov presiometarski opit u bušotini B-4

Tipičan izgled izvađenog jezgra, odnosno pojedinih litoloških članova, prikazan je na slici 6.



Slika 6: Izgled pojedinih litoloških članova u bušotinama a) slojevi *n* i *pr* u bušotini ZLT-3; b) sloj *p-pr* u bušotini B-4; c) sloj *pr-gl* u bušotini ZLT-3; d) slojevi *p** i *gl-pr* u bušotini B-4

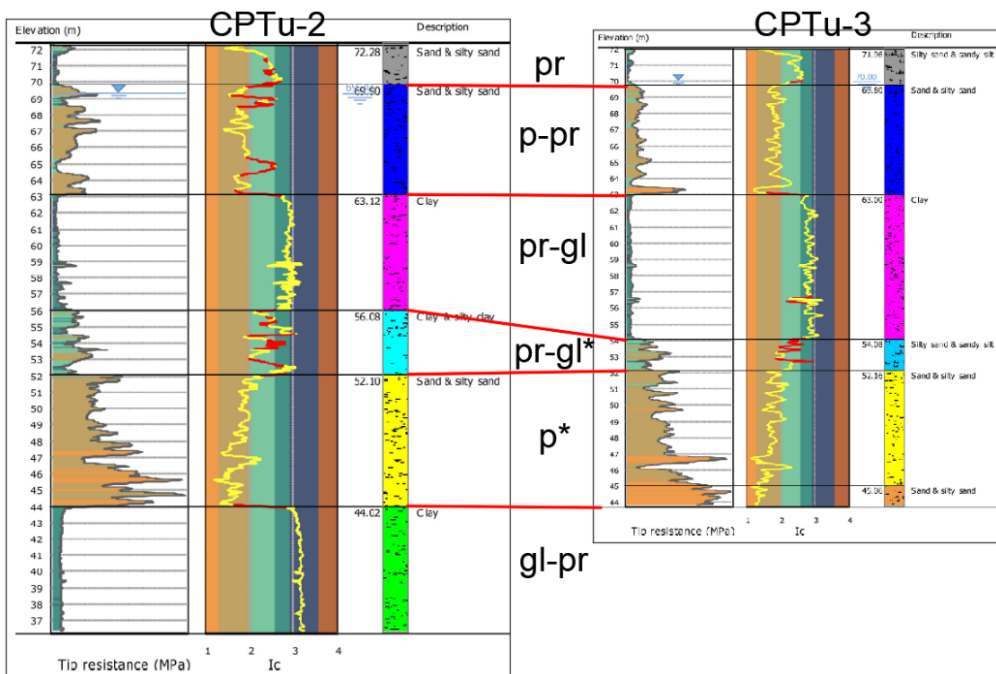
U zoni EXPO kompleksa rađeni su i terenski opiti vodopropusnosti (opit sa opadajućim nivoom, tj. opit nalivanja u otvorenoj bušotini) u slojevima *pr* i *pr-gl*. U bušotini B-4 urađen je jedan opit u intervalu od 10–12.5 m dubine, u sloju *pr-gl*. Potrebno je napomenuti da je u sloju *pr-gl* u zoni čitavog EXPO kompleksa izvedeno ukupno šest opita nalivanja, te da se ti podaci moraju sagledati sveobuhvatno kako bi se doneli zaključci o veličini koeficijenta filtracije.

KARAKTERIZACIJA TLA NA OSNOVU TERENSKIH I LABORATORIJSKIH OPITA

U ovom poglavlju će biti prikazan princip karakterizacije tla na osnovu izvedenih istraživanja i ispitivanja na primeru opita ZLT-1. Lokacija ovog opita je pogodna jer je uz sam temelj izveden i najveći broj opita. Isti princip u pogledu interpretacije rezultata može se primeniti i za lokacije testova ZLT-2 i ZLT-3.

Na slici 7 prikazan je model terena u zoni ZLT-1 opita. Model je napravljen na osnovu indeksa ponašanja materijala (I_c) iz CPT_u-2 i CPT_u-3 opita. Može se videti da su debljine sredina relativno ujednačene, kao i da se podinski deo sredine *pr-gl* razlikuje u odnosu na povlatu, pa je označen sa *pr-gl**. U sredini *pr-gl** je povećano učešće peskovite frakcije, što znatno utiče na mehanička svojstva i vodopropusnost te sredine. Sa aspekta konsolidacionog sleganja značajno je napomenuti da je debljina *pr-gl** promenljiva u zoni stadiona. U

sredini p^* na kontaktu s laporovitim glinama $gl-pr$, lokalno mogu da budu povećane penetracione otpornosti. U neposrednoj blizini CPT_u-3 opita izveden je SDMT-1 opit, koji je omogućio merenje brzine smičućih talasa u tlu (V_s). Ova merenja su značajna iz razloga što V_s predstavlja nezavisan parametar, koji se meri pri jako malom nivou smičuće deformacije kada se mehaničko ponašanje tla znatno razlikuje u odnosu na ponašanje tla pri velikim smičućim deformacijama koje nastaju prilikom utiskivanja konusa, odnosno sečiva u tlo. U tom smislu V_s je osetljiviji na prisustvo mikrostrukture u tlu (cementaciju).



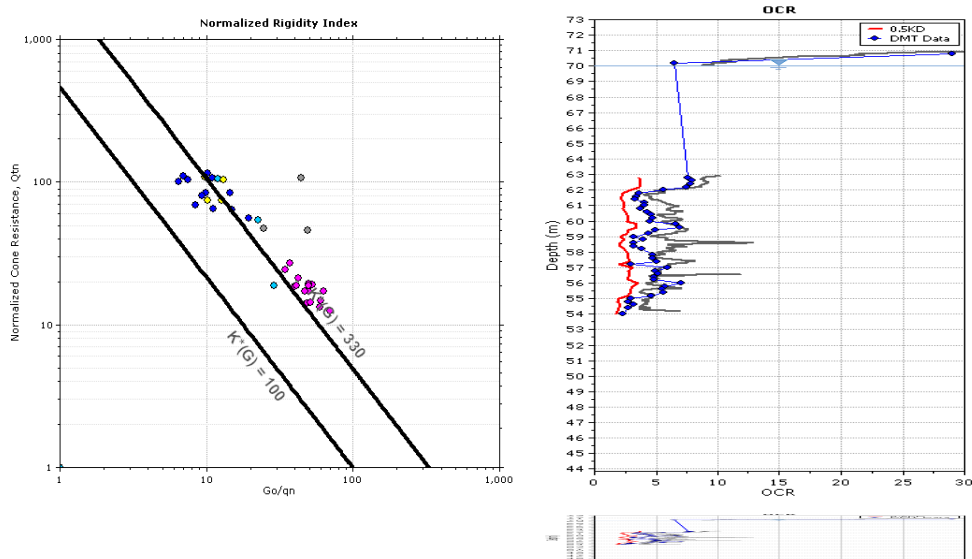
Slika 7: Model terena u zoni ZLT-1 opita

Brzine V_s izmerene po principu *down-hole* metode, u SDMT-1 opitu iskorišćene su za određivanje normalizovanog indeksa krutosti pri jako malim deformacijama (K_G^*) primenom jednačine 1:

$$K_G^* = (G_0/q_n)(Q_{tn})^{0.75} \quad (1)$$

Pri čemu je: G_0 – inicijalni smičući modul (određen preko V_s kao: $G_0 = \rho \cdot V_s^2$), ρ – zapreminska masa tla, q_n – neto otpor konusa i Q_{tn} – normalizovani otpor konusa.

K_G^* je empirijski parametar koji se koristi za određivanje prisustva mikrostrukture u tlu prema dijagramu prikazanom na slici 10. Robertson (2016) je pokazao da je za mlado tlo bez znatnog prisustva mikrostrukture $K_G^* < 330$. Ukoliko je K_G^* veći od 330, tlo je cementirano (Slika 8).



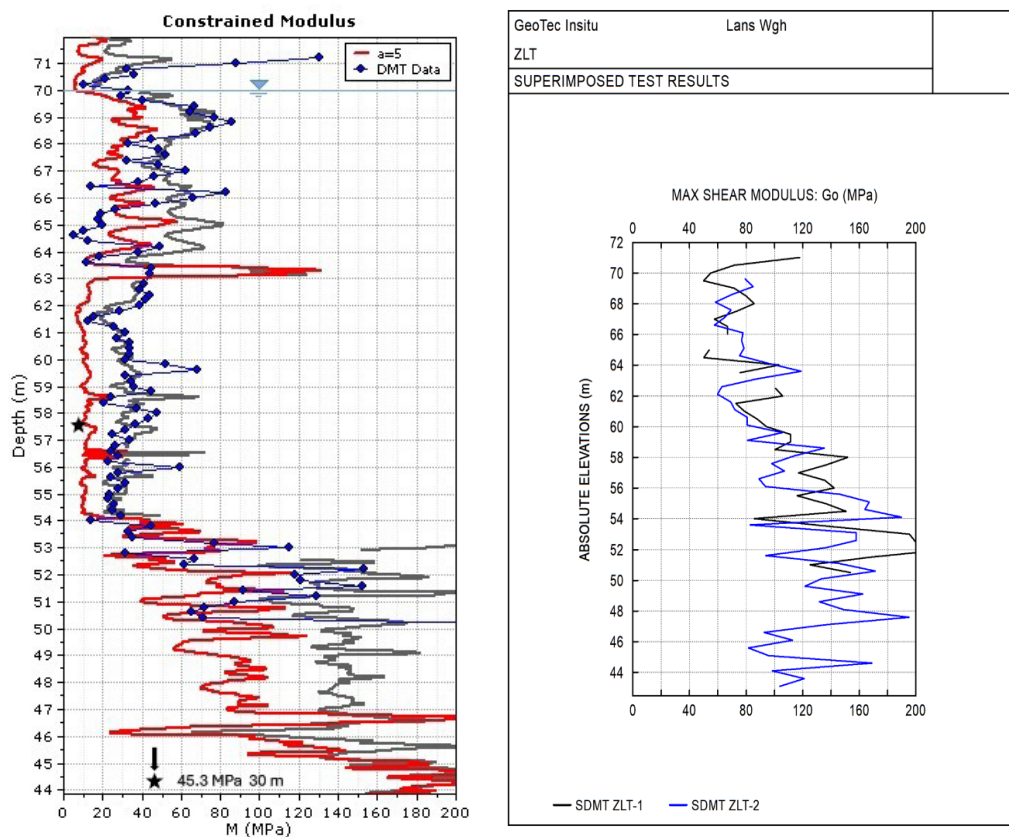
Slika 8: a) Dijagram za određivanje mikrostrukture u tlu s rezultatom za ZLT-1 opit; b) OCR po dubini iz terenskih opita sivo – Robertson (2016), plavo – Marchetti (1980) i crveno – Mayne (2001)

Sa Slike 8a može se videti da tlo na lokaciji ZLT-1 ima određenu mikrostrukturu za koju se pretpostavlja da je posledica prisustva cementacije na kontaktu između čestica tla karbonatnog porekla. Mikrostruktura je najizraženija u sredini *pr-gl*. Mikrostruktura u tlu povećava čvrstoću i smanjuje deformabilnost u uslovima malih do umerenih veličina naprezanja. Takođe, prividna prekonsolidacija može da se objasni prisustvom mikrostrukture koja povećava oblast elastičnog ponašanja tla.

Na slici 8b prikazan je profil OCR po dubini interpretiran iz SDMT-1 i CPT_u-3 opita.

OCR je interpretiran u sredini slojeva *pr* i *pr-gl*. U sredini sloja *pr* profil OCR naglo opada sa dubinom, što je karakteristično za površinske sedimente tzv. isušene kore i dovodi se u vezu sa sukcijom, koja s vremenom može da se menja u zavisnosti od promene vlažnosti. Sredina *pr-gl* je blago do umereno prekonsolidovana sa $OCR = 1.7-3.6$.

Uporedni prikaz modula stišljivosti po dubini prikazan je na slici 9a. Na slici 9b prikazana je raspodela smičućeg modula pri malim deformacijama G_0 određenog iz izmerenih brzina V_s talasa.



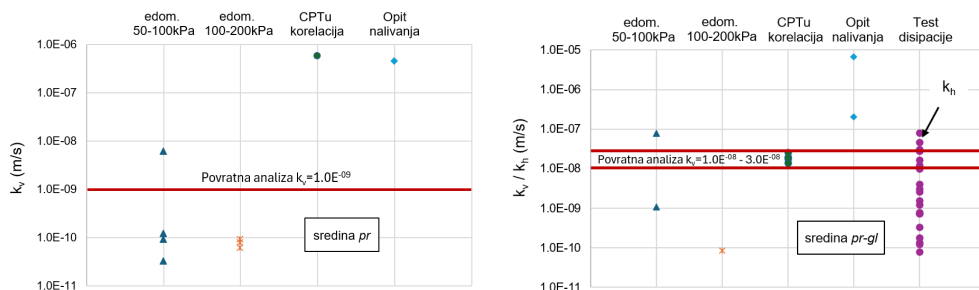
Slika 9: a) Moduli stišljivosti iz „in situ“ opita (predstavlja rezultat Menardovog opita); b) G_0 određen iz V_s talasa

Da bi se odredilo vreme potrebno za konsolidaciju glinovitog tla pod nanetim opterećenjem, potrebno je definisati koeficijent konsolidacije (odnosno koeficijent vodopropusnosti). Parametri vodopropusnosti izmereni su na nekoliko različitih načina. Svaki od ovih načina razmatra određenu zapreminu tla i podrazumeva određivanje koeficijenta vodopropusnosti direktnim merenjem na terenu ili u laboratorijskim uslovima.

U laboratoriji je vertikalni koeficijent filtracije (k_v) određen u edometarskim uslovima, preko koeficijenta konsolidacije (c_v) i krutosti uzorka. Opšte je poznato da je ovakav način određivanja vodopropusnosti konzervativan, odnosno da daje suviše niske vrednosti koeficijenta vodopropusnosti.

U terenskim uslovima koeficijenti vodopropusnosti određeni su na dva načina: testom disipacije iz CPT_u opita (na ovaj način određen je horizontalni koeficijent vodopropusnosti k_h) i opitom nalivanja u otvorenoj bušotini.

Veoma je važno istaći činjenicu da reprezentativna zapremina merenja ima uticaja na veličinu ovog koeficijenta. Tako se, na primer, test disipacije radi praktično u jednoj tački na željenoj dubini, pri čemu raspodela pornih pritiska oko u_2 filtera u trenutku merenja može biti veoma složena i neujednačena, što dodatno dovodi do problema oko realizacije i interpretacije ovog opita. Zatim, ovaj opit se uglavnom izvodi do vremena t_{50} , pa se na osnovu empirijskih korelacija određuje vodopropusnost u horizontalnom pravcu. Ukoliko je tlo prekonsolidovano i nezasićeno, prilikom prodora CPT_u sonde može doći do desaturacije pornog filtera u_2 , što dodatno narušava pouzdanost merenja. U laboratorijskim uslovima merenju je izložen uzorak tla, koji je zbog načina uzorkovanja gotovo uvek bar delimično poremećen. Dimenzije uzorka su obično nekoliko centimetara. U terenskim uslovima je obuhvaćen interval merenja od 2,0–2,5 m. Ovo je vrlo važno uzeti u obzir s obzirom na to da se glinovita prašina često smenjuje s peskovitim proslojcima, pri čemu po pravilu s povećanjem dubine peskovita frakcija raste. Nedostatak merenja vodopropusnosti opitom nalivanja u otvorenoj bušotini ogleda se u tome što merenje nije vršeno u piježometarskoj cevi, pa je uticaj poremećenosti etaže na rezultat ispitivanja nepoznat. Na slici 10 su prikazani rezultati merenja vodopropusnosti različitim metodama.



Slika 10: Koeficijenti vodopropusnosti utvrđeni različitim opitima
a) sredina pr; b) sredina pr-gl

Laboratorijskim ispitivanjima obuhvaćeni su uzorci glinovitog tla. Od značaja za povratnu analizu sleganja, te kalibraciju parametara naročito izdvajamo sledeće parametre: napon prekonsolidacije (p_c'), koeficijente c_v , c_r i c_a , koji predstavljaju indeks kompresije, indeks rekompresije i indeks sekundarne kompresije – puzanja, respektivno. Navedeni parametri prikazani su u tabeli 2.

	pr	pr-gl
p_c – napon prekonsolidacije (kPa) (7 opita)	206,0 min; 304,7 max 235,21 srednja vrednost 229,1 mediana	235,1 247,9
c_c – indeks kompresije (7 opita)	0,142 min; 0,374 max 0,217 srednja vrednost 0,214 mediana	0,111 0,175
c_r – indeks rekompresije (7 opita)	0,008 min; 0,053 max 0,02 srednja vrednost 0,012 mediana	0,012 0,033
c_a – indeks puzanja (50–100 kPa)	0,000647; 0,000186 0,000338; 0,000417	0,000521 0,000404
c_a – indeks puzanja (100–200 kPa)	0,003622; 0,000514; 0,000479	0,000355
Parametri iz povratne analize ZLT-a	$C_c = 0,2$; $C_r = 0,015$; $C_a = 0,0005$	$C_c = 0,175$; $C_r = 0,035$; $C_a = 0,001$

Tabela 2: Parametri određeni na osnovu laboratorijskih opita

REZULTATI POVROTNE ANALIZE ZLT TESTOVA

U nastavku su prikazani rezultati analize sleganja ZLT testova.

Pretpostavke povratne analize ogledaju se u sledećem:

– Na osnovu praćenja sleganja temelja ustanovljeno je da se oni ponašaju kao krute konstrukcije, ali su analize urađene pod pretpostavkom fleksibilnog temelja, s obzirom na to da se u proračun uvodi vremenski faktor za analizu konsolidacionog sleganja. Zbog toga je merodavna veličina sleganja određena za karakterističnu tačku krutog temelja (Kanijeva tačka);

b)

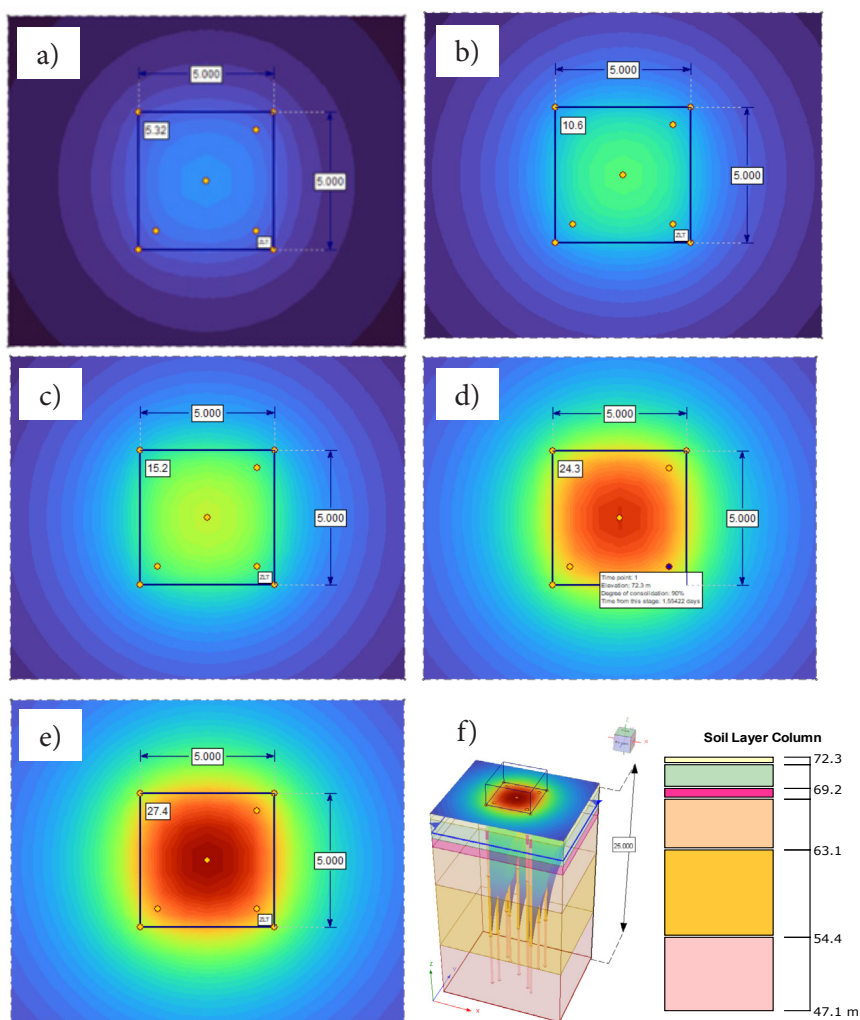
- Prilikom proračuna inicijalnog sleganja u obzir je uzet uticaj horizontalnih napona, preko srednjeg glavnog napona;
- Prilikom proračuna napona od dopunskog opterećenja korišćeno je Westergardovo rešenje (Westergaard, 1938), koje je pogodno za višeslojne sredine;
- Za svaki ZLT test uvedene su faze: 25%, 50%, 75%, 100% i 100% nakon dva, odnosno deset dana. Na ovaj način simulirana je kratkoročna konsolidacija/puzanje temelja nakon nanošenja ukupnog opterećenja;
- Debljine pojedinih litoloških članova i nivoi podzemne vode su u svemu preuzeti iz rezultata istražnog bušenja;
- Sloj gline *pr* je razdvojen na sloj iznad i sloj ispod nivoa podzemne vode. Iznad nivoa podzemne vode ovaj sloj ima samo inicijalnu komponentu sleganja, dok ispod nivoa podzemne vode ima inicijalnu, konsolidacionu

i sekundarnu komponentu sleganja. Sloj gline *pr-gl* sadrži sve tri komponente sleganja. Inicijalno sleganje u oba glinovita sloja ispod nivoa podzemne vode odvija se u nedreniranim uslovima. Inicijalno sleganje u sloju *pr* iznad nivoa podzemne vode odvija se u nezasićenoj sredini;

- Peskovita tla poseduju samo inicijalnu komponentu sleganja;
- Dublji sloj gline *gl-pr* se ne nalazi se pod uticajem ZLT testa.

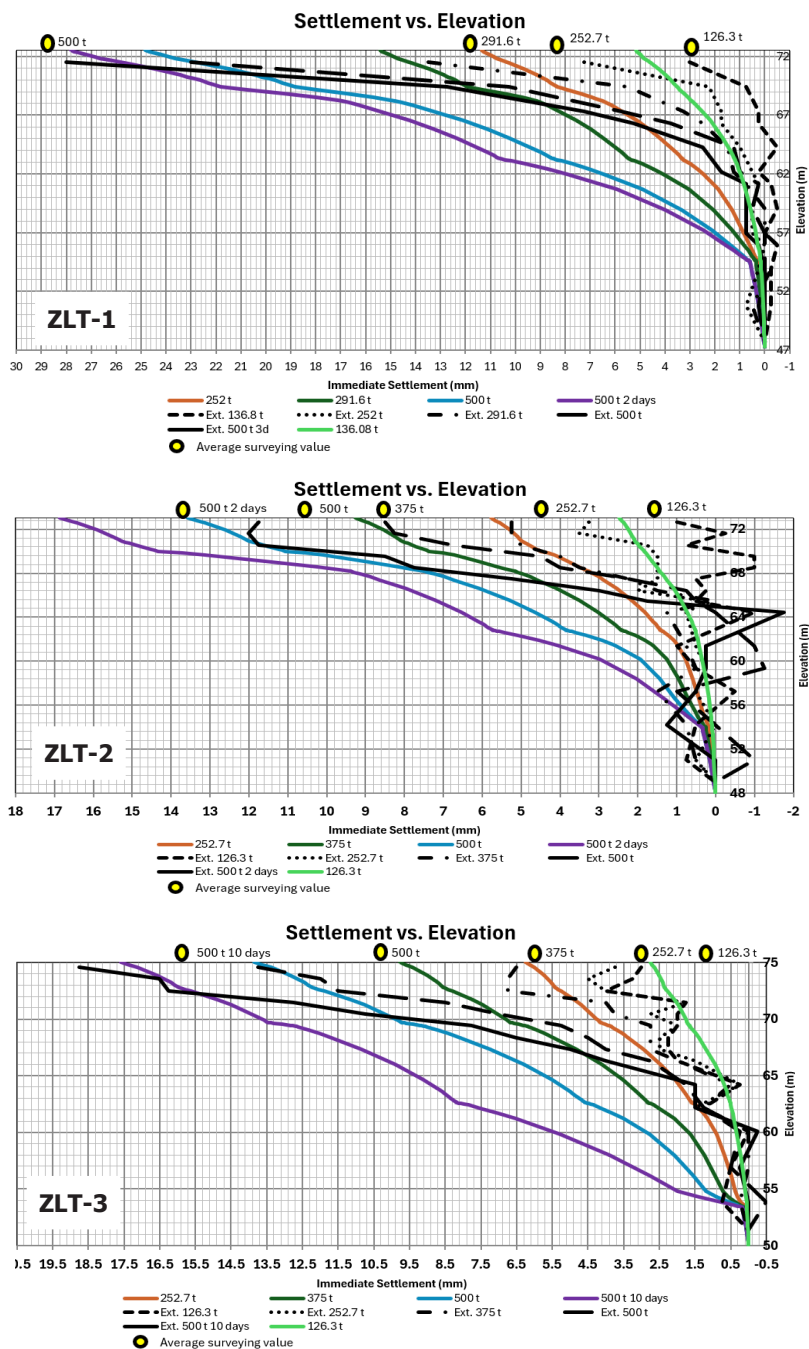
Dubina modela je ograničena na cca. 25 m, u skladu s dubinama bušotina u koje su ugrađeni ekstenzometri.

Rezultati sleganja za pojedine faze opterećenja ispod karakteristične tačke temelja u zoni testa ZLT-1 prikazani su na slici 11.



Slika 11: Rezultati sleganja za ZLT-1 test a) 136.08t; b) 252t; c) 291.6t; d) 500t; e) 500t (nakon 2 dana); f) geotehnički model za proračun

Na slici 12 su prikazane preklapljenе krive sleganja izmerene magnetnim ekstenzometrima i one dobijene proračunom.



Slika 12: Preklapljenе merene i modelske krive sleganja po dubini za pojedine faze ZLT testova (Ext. – ekstenzometar)

Prvi magnetni prstenovi unutar bušotina u koje su ugrađeni ekstenzometri nalazili su se na dubinama 0,50–1,0 m od površine terena. Treba napomenuti da trenutak merenja magnetnim ekstenzometrom nije uvek odgovarao trenutku kada je vršeno geodetsko osmatranje.

Vremenski tok sleganja za prosečnu izmerenu vrednost pomeranja geodetskih repera i sračunate vrednosti sleganja za pojedine faze opterećenja prikazan je dijagramima na slici 13.



Slika 13: Sleganje u vremenu s fazama opterećenja

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se konačne vrednosti izmerenih sleganja prilično dobro poklapaju sa sračunatim vrednostima, ali je potrebno primetiti delimična neslaganja u središnjem delu krivih. Razlog za ovo treba tražiti u činjenici da su merena sleganja *mm* reda veličine, što je u rangu merne greške magnetnog ekstenzometra, kao i u nesavršenosti modela za proračun i ostalih detalja koji mogu uticati na rezultate proračuna.

ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana metodologija statičkog probnog opterećenja i izvršena je detaljna analiza sleganja plitkih temelja (ZLT testova).

Cilj analize je bio da se na osnovu povratne analize sleganja temelja odrede i „kalibrišu” parametri svake geotehničke sredine.

U tom pogledu, u analizu su uključene sve tri komponente sleganja: inicijalno (elastično sleganje), primarna kompresija (konsolidacija) i sekundarna kompresija (puzanje). Rezultati povratne analize dobro se poklapaju sa izmerenim vrednostima. S tim u vezi, veoma je važno istaći činjenicu da se povratnom analizom simuliraju relativno složeni uslovi u terenu. Oni se ogledaju u prisustvu četiri/pet sredina (pod uticajem ZLT testova), koje se sa mehaničkog stanovišta ponašaju potpuno različito. Sredine su izložene različitim uslovima dreniranja/konsolidacije, pri čemu u proračunu figurira više od pet „ključnih” parametara, koji su vrlo osetljivi i utiču na rezultate proračuna. Zbog toga je bilo veoma važno izvršiti dopunska istraživanja terena, kako bi se stekla realna slika o opsegu vrednosti bitnih parametara.

S parametrima dobijenim iz povratne analize može se izvršiti analiza sleganja nasipa ispod Nacionalnog stadiona. S obzirom na to da opterećenje od ZLT testova nema uticaja na dubinama većim od cca. 15 m, terenskim istražnim radovima je potrebno okarakterisati dublji sloj laporovite gline *gl-pr*, koji povratnom analizom nije uzet u razmatranje.

LITERATURA

- [1] Marchetti, S. (1980). In situ tests by flat dilatometer. J. Geotech. Eng. 106 (3), 299–321.
- [2] Mayne, P. W. 2001. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. Proc. Intl. Conf. on In-Situ Measurements of Soil Properties and Case Histories, Bali, Indonesia: 27–48.

- [3] Robertson, P. K. (2016). Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update. Canadian Geotechnical Journal, 53(12), 1910–1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- [4] Westergaard, H. M. (1938). A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics. Harvard University, Graduate School of Engineering, Soil Mechanics Series, No. 7.

Rad broj 8, kategorija Pregledni rad

Zoran Berisavljević,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet,
Beograd, Dušina 7,
zoran.berisavljevic@rgf.bg.ac.rs,
ORCID 0000-0003-3148-9825, str. 99