

Nikola Božović¹
Dr Mladen Ćosić¹
Dr Stevan Ćorluka¹

PRIMENA GEORADARA PRI PROCENI STANJA PRETHODNO NAPREGNUTNIH MOSTOVA

0352-2733, 57 (2025), p. 1-16
doi: 10.5937/GK25057001B

UDK: 624.21.012.46
621.396.9:624
STRUČNI RAD

Rezime

Rad razmatra međusobnu povezanost ispitivanja integriteta šipova i statičkog probnog opterećenja kroz analizu tri karakteristična primera iz inženjerske prakse. Poseban akcenat stavljen je na ograničenja ispitivanja integriteta kao nedestruktivne metode, kao i na značaj pravilne interpretacije rezultata u zavisnosti od geoloških uslova i primenjene tehnologije izvođenja. Prikazani primeri ukazuju da rezultati ispitivanja integriteta, posmatrani izolovano, mogu dovesti do pogrešnih zaključaka u pogledu stanja šipa, dok njihovo upotpunjavanje rezultatima statičkog probnog opterećenja omogućava pouzdaniju procenu nosivosti i ponašanja šipova. Takođe je pokazano da se pojedini fenomeni uočeni tokom statičkog opterećenja mogu objasniti analizom rezultata ispitivanja integriteta, čime se potvrđuje potreba za integrisanim i multidisciplinarnim pristupom kontroli kvaliteta šipova. Na osnovu dobijenih rezultata, zaključuje se da kombinovana primena više metoda ispitivanja, uz adekvatno definisan obim i broj testova, predstavlja ključni preduslov za smanjenje rizika, racionalizaciju projektnih rešenja i pouzdano donošenje inženjerskih odluka.

Ključne reči: šip, test, integritet, reflektogram, statičko probno opterećenje

¹ Institut za ispitivanje materijala IMS, Beograd, nikola.bozovic@institutims.rs

ANALYSIS OF PILE PERFORMANCE BASED ON COMBINED INTEGRITY AND STATIC LOAD TESTING

Summary

This paper examines the interrelationship between pile integrity testing and static pile load testing through the analysis of three representative case studies from engineering practice. Particular emphasis is placed on the limitations of pile integrity testing as a non-destructive method and on the importance of proper interpretation of results with respect to geological conditions and construction technology. The presented case studies demonstrate that pile integrity test results, when considered in isolation, may lead to misleading conclusions regarding pile condition, whereas their integration with static load test results enables a more reliable assessment of pile capacity and load–settlement behavior. Furthermore, the study shows that certain phenomena observed during static load testing can be effectively explained by the interpretation of pile integrity test results, highlighting the complementary nature of these methods. The findings confirm the necessity of an integrated and multidisciplinary approach to pile quality control, including an adequate number and scope of tests, in order to reduce uncertainty, optimize design solutions, and support sound engineering decision–making.

Keywords: pile, testing, integrity, reflectogram, static load test

1. UVOD

Sonic Integrity Test (SIT) je zvučna (eho) metoda koja se zasniva na teoriji jednodimenzionalne propagacije naponskog talasa. Udarcom čekića o vrh šipa (glava šipa) proizvodi se kompresioni talas koji se prostire kroz šip i reflektuje od baze šipa. Akcelerometar (senzor), pričvršćen na glavi šipa, registruje ubrzanja glave šipa izazvana refleksijom talasa unutar šipa. Svaka promena duž stabla šipa, kao što su proširenje i suženje poprečnog preseka, promena u kvalitetu materijala, izazivaju refleksiju talasa koju senzor registruje kao promenu ubrzanja. Integracijom ubrzanja dobija se zapis brzine u vremenu koji se digitalno prikazuje [3]. To je krajnji produkt koji donosi podatke o kvalitetu ugrađenog šipa. Ispitivanje integriteta šipova predstavlja prvi korak u kontroli kvaliteta izvedenih šipova i služi za detekciju mogućih nepravilnosti koje se mogu odnositi na geometriju šipa ili kvalitet ugrađenog betona. Tumačenje rezultata ispitivanja integriteta šipova, u određenoj meri je subjektivnog karaktera, pa shodno tome može da ima određeni nivo nepouzdanosti.

U ovom radu prikazana su tri praktična primera u kojima je ispitivanjem integriteta otkriveno odstupanje od očekivanog oblika reflektograma. Nepravilnosti su locirane u dubljim zonama stabla šipa, što je onemogućilo vizuelnu verifikaciju rezultata otkopavanjem terena u zoni glave šipa. U ovakvim slučajevima, sledeći korak u kontroli kvaliteta šipa je utvrđivanje projektovane nosivosti šipa statičkom ili dinamičkom metodom. Bitno je naglasiti da se ispitivanjem integriteta šipa ne može oceniti nosivost. Metode za određivanje nosivosti se posebno primenjuju za šipove kod kojih su uočene neregularnosti u integritetu radi procene da li identifikovana odstupanja imaju uticaj na nosivost šipa. Sa druge strane, ispitivanje nosivosti može bolje da objasni određene pojave u neregularnim signalima što će omogućiti lakše i sigurnije tumačenje u budućim projektima. Prvi primer iz prakse odnosi se na šip koji je klasifikovan kao PF (potential flaw) šip, bez prethodne informacije da je izveden u ojačanom tlu metodom jet grouting. Saznanje o jet grouting-u i primena statičkog ispitivanja šipa, kao najpouzdanijeg testa, omogućili su donošenje konačnog zaključka u pogledu integriteta izvedenog šipa. Drugi primer se odnosi na klasično bušeni šip kod koga je postojanje negativne refleksije zanemareno usled informacije da šip menja poprečni presek na određenoj dubini, usled razlike u prečnicima uvodne kolone i pribora za bušenje šipa. Ispostavilo se da efekat suženja, koji je detektovan u ispitivanju integriteta šipa, dovodi do specifične i ne tako česte pojave smanjenja priraštaja sleganja pri povećanju opterećenja prilikom statičkog ispitivanja šipa. U trećem primeru,

ispitivanjem nosivosti šipa nastupilo je granično stanje, što je zahtevalo naknadnu analizu mogućih faktora koji su proizveli granično stanje. Jedan od tih faktora koji se razmatra u ovakvim situacijama jeste rezultat ispitivanja integriteta šipa.

Iskustvo inženjera koji sprovodi ispitivanje od presudnog je značaja za ispravno tumačenje reflektograma. Ispitivanjem integriteta mogu se, na brz i ekonomičan način, u ranoj fazi projekta otkriti potencijalne neregularnosti koje bi ugrozile sigurnost i funkcionalnost objekta u eksploataciji. Međutim, njihova pojava ne mora nužno da znači da je šip oštećen, pa se zato vrlo često zahtevaju dodatna ispitivanja radi što tačnije ocene kvaliteta. Pristupanje problemu sa više strana, u ovim slučajevima, značajno je u pogledu sticanja kompetentnosti u tumačenju rezultata ispitivanja integriteta šipova.

2. ISPITIVANJE INTEGRITETA ŠIPOVA

Na osnovu pretpostavljene brzine propagacije zvučnog talasa kroz beton (c) i poznate dužine šipa iz pasoša šipa (L), može se odrediti vreme (t) za koje reflektovani deo talasa stigne do senzora. Dužina šipa se dobija na osnovu vremena potrebnog da se talas reflektuje i vrati nazad od baze šipa i brzine talasa kroz beton, prema jednačini (1) [3]:

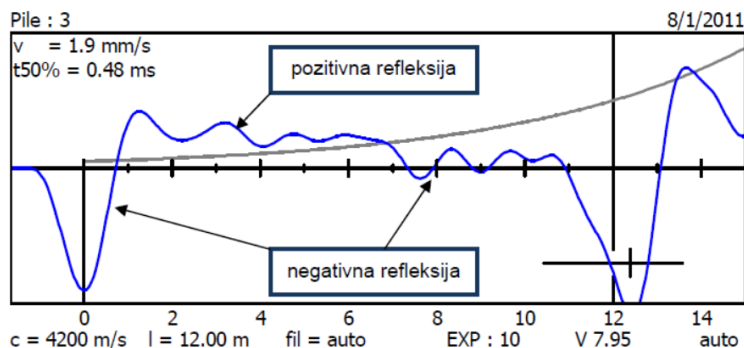
$$t = \frac{2L}{c}. \quad (1)$$

Na isti način mogu se odrediti položaji diskontinuiteta i varijacije u poprečnom preseku. Refleksija talasa uslovljena je promenom impedance (Z) koja zavisi od karakteristika šipa: modula elastičnosti betona (E) i površine poprečnog preseka šipa (A) [3]:

$$Z = \frac{EA}{c}. \quad (2)$$

Proširenje poprečnog preseka utiče na povećanje impedance i talas se reflektuje kao kompresioni, što se na reflektogramu vidi kao pozitivan zapis brzine (v). Suženje poprečnog preseka izaziva pad impedance, a talas se reflektuje kao tenzioni što se na reflektogramu vidi kao negativan zapis brzine (v) (slika 1). Svaka refleksija izazvana promenom impedance duž stabla šipa utiče na smanjenje energije talasa, pa je refleksija na mestu baze oslabljena. Tlo oko šipa deluje kao prigušenje koje smanjuje energiju longitudinalnog talasa pa je zbog toga neophodno vršiti amplifikaciju signala po eksponencijalnom zakonu. Trenje po omotaču manifestuje se

kroz promene impedance, koje su najčešće blage i linearne [1]. Ispitivanje integriteta šipova sprovodi se prema standardu ASTM D5882-16.



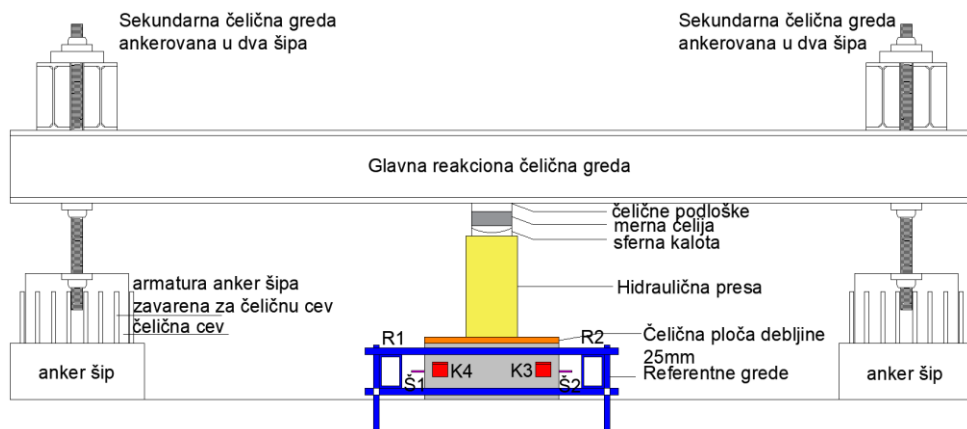
Slika 1. Primer reflektograma sa naznačenim refleksijama

3. STATIČKO PROBNO OPTEREĆENJE ŠIPOVA

Ispitivanje šipa pri statičkom probnom opterećenju sprovodi se postupnim povećanjem aksijalne sile u definisanim koracima. Kao početna merodavna vrednost usvaja se radna sila koja odgovara SLS kombinaciji dejstava koja deluju na konstrukciju, gde SLS predstavlja granično stanje upotrebljivosti. Nakon toga, opterećenje se povećava do vrednosti aksijalne sile koja predstavlja proizvod SLS sile i propisanog faktora uvećanja koji treba da bude definisan od strane projektanta konstrukcije ili nadzora. U zavisnosti od veličine faktora uvećanja, izvršilac ispitivanja određuje da li će se opit sprovoditi u jednom ili dva ciklusa, uz prethodno dostavljenu saglasnost naručioca radova. Ukoliko se ispitivanje sprovodi u dva ciklusa opterećenja, maksimalna sila u prvom ciklusu najčešće odgovara vrednosti radne sile, dok se u drugom ciklusu primenjuje maksimalna sila uvećana za odgovarajući faktor u odnosu na radnu silu. Minimalni broj inkremenata opterećenja u prvom ciklusu iznosi četiri, dok u drugom ciklusu iznosi osam [4]. Kriterijum brzine konsolidacije za prelazak na naredni inkrement u prvom ciklusu iznosi 0.1mm u trajanju od 20 minuta, dok u drugom ciklusu iznosi 0.1mm u trajanju od 5 minuta [4]. Rasterećenje šipa u prvom ciklusu sprovodi se u najmanje dva koraka, dok je u drugom ciklusu predviđeno rasterećenje u minimum četiri koraka [4].

Postupak ispitivanja šipa probnim opterećenjem podrazumeva postupno povećanje aksijalne sile u šipu do postizanja predviđene maksimalne aksijalne sile i merenje vertikalnih pomeranja vrha šipa za svaki inkrement povećanja aksijalne sile u njemu. Merenje vertikalnih pomeranja vrha šipa

vrši se u četiri fiksirane tačke komparaterima [4,5], koji se preko magnetnih nosača vezuju za referentne grede. Referentni sistem mora da bude nezavisan od reakcionog sistema i šipa tako da njegovi oslonci budu udaljeni minimalno 2.5m od bilo koje tačke reakcionog sistema ili šipa kako bi se formirao nepomerljiv sistem [4,5]. Vertikalno pomeranje vrha šipa određuje se kao aritmetička sredina vertikalnih pomeranja četiri fiksne tačke. Merenje deformacije referentnog sistema se vrši nivelirom, a zatim se sprovodi korekcija sleganja vrednosti izmerenih komparaterima. Kontrolno merenje sleganja glave šipa se vrši nivelirom na minimum 2 fiksne tačke [4,5]. Merenje sile koja se unosi u šip vrši se putem manometra na hidrauličnoj pumpi pri čemu je neophodno obezbediti dijagram baždarenja hidrauličnog sklopa pumpe i prese, koji predstavlja relaciju pritiska na manometru (u bar-ima) i sile koja se unosi u šip (u kN). Kontrolno merenje sile vrši se uz pomoć merne ćelije [4,5]. Reakcioni sistem zavisi od veličine maksimalne sile koju je potrebno aplicirati na šip. Za opterećenja manja od 700t, mogu se primeniti balasti od betonskih blokova i čelične podkonstrukcije. Za veća opterećenja, najčešće se primenjuju reakcioni sistemi koga čine reakcione betonske ili čelične grede ankerovane u zatezne–anker šipove. Šematski prikaz statičkog probnog opterećenja aksijalnom silom pritiska prikazan je na slici 2.

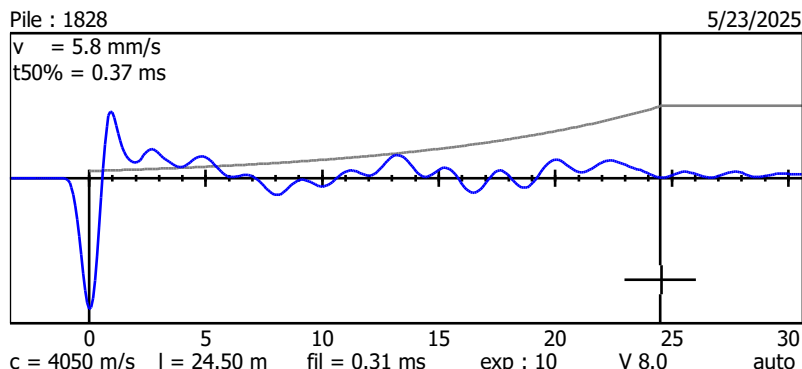


Slika 2. Reakcioni sistem od čeličnih reakcionih greda i ankernih šipova za izvođenje statičkog probnog opterećenja

Smatra se da je granično stanje nosivosti dostignuto kad se ostvari sleganje šipa u iznosu od 10% od prečnika šipa prema SRPS EN 1997–1:2004 [2]. Ispitivanje šipova statičkim probnim opterećenjem sprovodi se prema standardu SRPS EN ISO 22477–1.

PRIMER 1

Na slici 3 je prikazan reflektogram CFA šipa, kružnog poprečnog preseka prečnika $\varnothing 1000\text{mm}$. Dužina šipa iznosi 24.5 m.



Slika 3. Reflektogram ispitanog šipa metodom SIT

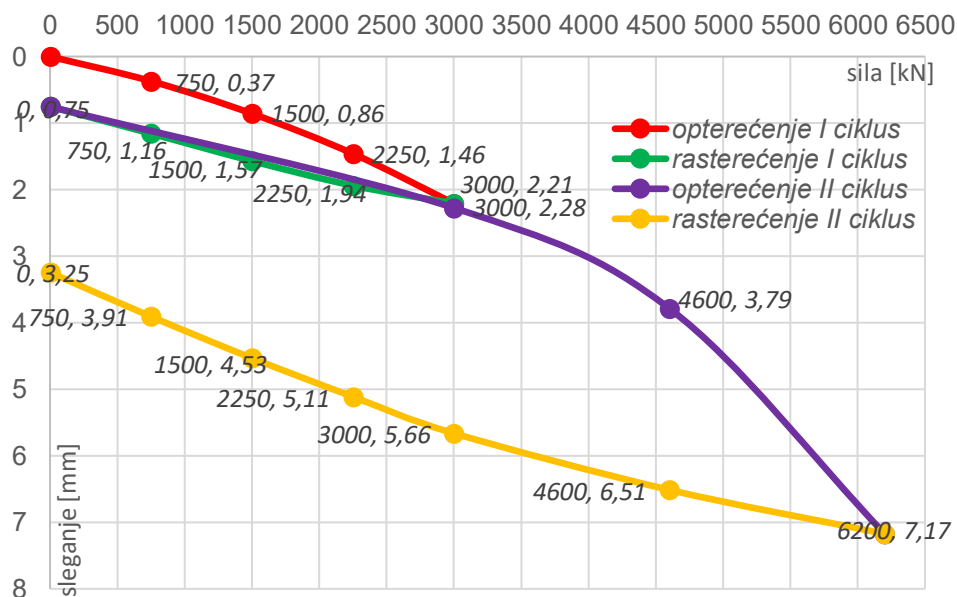
Predmetni šip je klasifikovan kao PF (potential flaw) šip. Negativna refleksija je zabeležena na cca 8 m mereno od vrha šipa i periodično se ponavlja. Intenzitet refleksije od baze šipa je umanjen usled utroška energije talasa pri propagaciji kroz nehomogene i neuniformne sredine. Pri tumačenju rezultata jedino su bili dostupni podaci iz pasoša šipa koji se odnose na opšte podatke o bušenju, podatke o betoniranju i armaturi šipa.

U cilju utvrđivanja nosivosti potencijalno oštećenog šipa, primenjen je test statičkog opterećenja. Statičko probno opterećenje na vertikalnu silu pritiska izvršeno je opitom u kome su kao potisno sredstvo upotrebljene dve hidraulične prese pojedinačnog kapaciteta 600 t. Prese se odupiru o čelični reakcioni sistem koga čine reaktivne čelične grede ankerovane u četiri ankerna zatezna šipa kako je prikazano na slici 4. Sleganje šipa ispraćeno je komparaterima i geodetskim merenjem.

Ispitivanje šipa sprovedeno je u dva ciklusa. Maksimalna sila u prvom ciklusu predstavlja proračunsko radno opterećenje i iznosi 3000 kN. Nanošenje sile u prvom ciklusu sprovedeno je u četiri jednaka inkrementa. Rasterećenje šipa sprovedeno je u dva koraka. Maksimalna sila u drugom ciklusu iznosi 6200 kN i naneta je u osam inkremenata. Rasterećenje šipa u drugom ciklusu je sprovedeno u četiri koraka. Rezultati statičkog probnog opterećenja šipa prikazani su na slici 5 u vidu dijagrama.



Slika 4. Reakcioni sistem pri ispitivanju šipa SLT testom



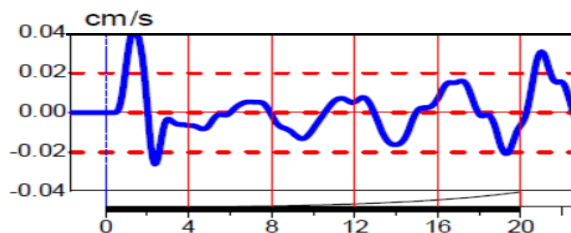
Slika 5. Dijagram sleganja šipa iz testa statičkog probnog opterećenja

Na osnovu prikazanog dijagrama može se zaključiti da je ponašanje šipa linearno elastično do nivoa radnog opterećenja sa ostvarenim sleganjem do 2 mm. Priraštaj sleganja se povećava nakon 4600 kN kada šip ulazi u nelinearnu zonu ponašanja. Maksimalna ostvarena sleganja na sili koja je dva puta veća od proračunske radne sile iznosi cca 7 mm. Ukoliko se kao kriterijum graničnog stanja usvoji sleganje jednako 10% prečnika šipa, može se zaključiti da šipovi poseduju znatno veći kapacitet, pri čemu je obezbeđen zadovoljavajući faktor sigurnosti temelja. Rezultati statičkog probnog opterećenja potvrdili su nosivost šipa sa značajnim faktorom sigurnosti što upućuje da refleksija na cca 8 m nije posledica oštećenja šipa i da se šip u pogledu integriteta ne može oceniti kao neregularan. Nakon što je izvršen test statičkog opterećenja, ponovno je sprovedena analiza dokumentacije koja se odnosi na izvođenje predmetnog šipa. Rešenje problema usledilo je nakon dobijanja informacije da je šip izveden u saniranom tlu primenom metode jet grouting-a. Jet grouting predstavlja metodu poboljšanja tla kojom se unapređuju njegove mehaničke karakteristike. Izostanak ovog podatka u početnoj dokumentaciji upućivao je na mogućnost donošenja pogrešne odluke o integritetu ispitanih šipova. Navedena informacija nije bila sadržana u pasošu šipa, iako taj dokument predstavlja jedan od ključnih elemenata za potpunu i pravilnu analizu integriteta.

Tumačenje rezultata ispitivanja integriteta šipova izvedenih u tlu, koje je prethodno ojačano jet grouting metodom, predstavlja složen proces zbog uticaja dodatnih heterogenosti u zoni oko šipa. Zone poboljšanog tla imaju različitu krutost i reflektivne karakteristike u odnosu na prirodno tlo, što može dovesti do pojave dodatnih anomalija na reflektogramu. Ove promene mogu otežati razlikovanje stvarnih nepravilnosti u šipu od refleksija izazvanih nehomogenostima poboljšanog tla, pa je za pravilnu interpretaciju često neophodno kombinovati rezultate ispitivanja sa geotehničkim podacima. Ovaj praktični primer ispitivanja integriteta šipa u ojačanom tlu metodom jet grouting-a potvrđuje tvrdnje o složenosti tumačenja reflektograma koje u velikoj meri zavisi od tehnologije izvođenja ojačanja, rasporeda ojačanih zona duž šipa, kao i odnosa granica slojeva tla prema zonama ojačanja. Kako bi se smanjio stepen neizvesnosti u interpretaciji, neophodno je izvršiti međusobno poređenje većeg broja signala i zaključke zasnivati na principu njihove ujednačenosti i sličnosti. Radi obezbeđenja dodatne sigurnosti, preporučuje se sprovođenje ispitivanja nosivosti šipa, bilo statičkom, bilo dinamičkom metodom, čime se postiže viši nivo pouzdanosti u oceni rezultata ispitivanja integriteta.

PRIMER 2

Na slici 6 prikazan je reflektogram kao rezultat ispitivanja integriteta šipa prečnika Ø1200 mm i dužine 20 m. Šip je izveden kao klasično bušeni šip u tlu koje se sastoji iz sloja šljunka do dubine 6m, zatim sledi naizmenično smenjivanje lapora i uglja do 11 m, dok u preostalom delu, šip prolazi kroz sloj lapora. Na prikazanom reflektogramu uočava se negativna refleksija na cca 6m, mereno od vrha šipa, koja se periodično ponavlja sve do baze šipa. Ova pojava ukazuje na promenu u strukturi šipa na cca 6m, koja uzrokuje stalno ‘odbijanje signala’, odnosno promenu brzine oscilovanja talasa u njegovom putu od glave do baze šipa. Postojanje refleksije može se objasniti činjenicom da je šip izveden sa zacevljenjem unutrašnjeg prečnika 1200mm u sloju šljunka dubine 6m, a zatim je dalje bušenje nastavljeno priborom koji je manjeg prečnika od uvodne kolone, tako da je prečnik nezacevljenog dela šipa za cca 10 cm uži od zacevljenog dela. Suženje poprečnog preseka šipa uzrokovalo je periodične promene u oscilacijama koje se prikazuju kao negativne refleksije, pri čemu je refleksija od baze šipa šipa niskog intenziteta.



Slika 6. Reflektogram šipa iz primera 2 (reflektogram je rotiran u odnosu na uobičajenu proceduru prikazivanja)

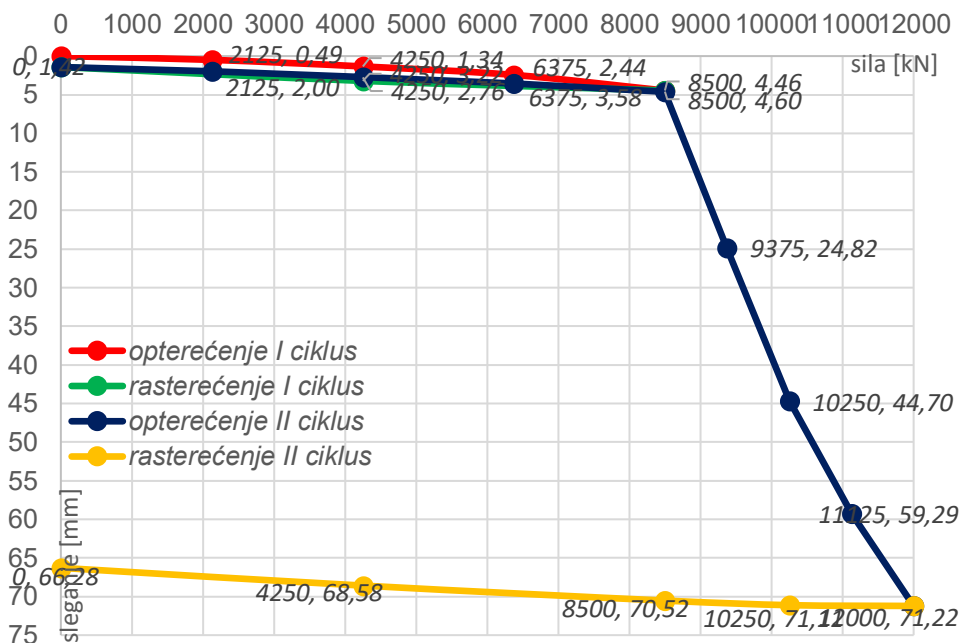
Na istom šipu sproveden je test statičkog opterećenja šipa. Statičko probno opterećenja na vertikalnu silu pritiska izvršeno je pomoću tri hidraulične prese, od kojih su dve prese pojedinačnog kapaciteta 600 t, dok je treća presa kapaciteta 400 t. Prese se odupiru o glavnu reakcionu gredu koja je preko sekundarnih reakcionih greda povezana sa četiri anker šipa. Glavna i sekundarne reakcione grede su od prednapregnutog betona (slika 7).



Slika 7. Reakcioni sistem za SLT test šipa

Sekundarne reakcione grede su pomoću čeonih ploča i brezona povezane sa čeličnom cevi koja je zavarena za armaturu ankernih šipova. Reakciona greda sa ankernim šipovima sačinjava reakcioni sistem za nanošenje sile na ispitni šip. Sleganje šipa ispraćeno je komparaterima i geodetskim merenjem. Ispitivanje šipa sprovedeno je u dva ciklusa. Prvi ciklus je sproveden u 4 inkrementa do sile u vrednosti od 8500 kN, dok je drugi ciklus sproveden do sile u vrednosti od 12000 kN u 8 inkrementa. Rezultati statičkog probnog opterećenja šipa prikazani su na slici 8 u vidu dijagrama.

U prvom ciklusu izraženo je linearno–elastično ponašanje šipa do nivoa opterećenje od 8500 kN. U drugom ciklusu, nakon sile od 8500 kN, odnosno na sili 9375 kN, dolazi do naglog priraštaja sleganja od cca 20 mm. Međutim pri daljem povećanju opterećenja, za inkremente 10250 kN, 11125 kN i 12000 kN priraštaji sleganja se smanjuju i iznose 20 mm, 15 mm i 10 mm respektivno. Smanjenje priraštaja sleganja sa povećanjem opterećenja nije čest slučaj u praksi i najčešće se, nakon naglog povećanja priraštaja sleganja, opit nastavi progresivnim povećanjem sleganja do loma koje se definiše kao proklizavanje šipa u bazi. Međutim, u ovom slučaju, nagli porast, a zatim smanjenje priraštaja sleganja upućuje na nedostatak u stablu šipa pošto je u daljem procesu opterećenja usledila stabilizacija sleganja i brže dostizanje uslova brzine konsolidacije.



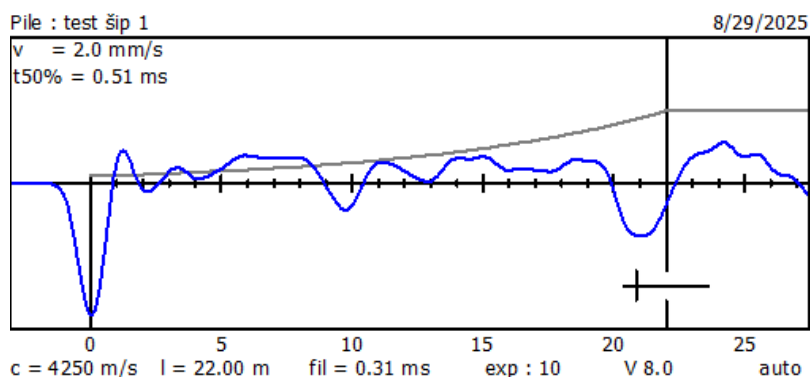
Slika 8. Dijagram sila sleganje iz testa statičkog probnog opterećenja

Suženje poprečnog preseka utvrđeno ispitivanjem integriteta, a potvrđeno informacijom o primenjenoj tehnologiji izvođenja šipa, može se dovesti u vezu sa fenomenom ojačanja prikazanim kroz smanjenje priraštaja sleganja pri povećanju opterećenje šipa. Naime, predpostavlja se da je pri povećanju opterećenja preko 8500 kN došlo do lokalnog proklizavanja pri pucanju prstena širine cca 10 cm na mestu prelaska šipa sa većeg na manji prečnik. Do 8500 kN veći deo sile prihvatao je deo šipa do 6m oslonjen na sloj lapora koji ima krta svojstva, dok se sa daljim povećanjem opterećenja aktivirao preostali deo šipa. Ovaj primer takođe ukazuje na značaj multidisciplinarnog pristupa pri analizi kvaliteta šipa u pogledu njegovog integriteta i nosivosti. Jedan test ne može zameniti drugi, ali mogu pomoći jedan drugom u tumačenjima, naročito usled retkih pojava koje zahtevaju dodatnu analizu. Zato je prilikom ispitivanja šipova od izuzetnog značaja sprovesti različite testove radi smanjanja nepouzdanosti koja je sveprisutna kada je u pitanju interakcija tla i šipa.

PRIMER 3

Na slici 9 prikazan je reflektogram šipa prečnika Ø1200 mm i dužine 22 m sa izraženom negativnom refleksijom bez prethodno pozitivne refleksije

na cca 10m mereno od vrha šipa. Šip je izveden za potrebe ispitivanja statičkog probnog opterećenja, radi verifikacije računskog modela, pre izvođenja projektom predviđenih šipova. Pošto je ispitivanje obavljeno samo na jednom šipu, nije bilo moguće izvršiti međusobnu uporednu analizu većeg broja uzoraka. Negativne refleksije koje se ponavljaju na reflektogramima više ispitanih šipova, mogu se tumačiti kao posledica geoloških promena ili drugih specifičnih karakteristika lokacije dok se u slučaju pojedinačnog šipa ova refleksija tumači kao potencijalno suženje stabla šipa.



Slika 9. Reflektogram ispitivanog šipa iz primera 3

Statičko probno opterećenje na vertikalnu silu pritiska izvršeno je opitom u kome su kao potisno sredstvo upotrebljene dve hidraulične prese pojedinačnog kapaciteta 600 t. Prese se odupiru o kontrateret, tj. balast izgrađen od betonskih blokova. Balast od betonskih blokova oslanja se na čeličnu podkonstrukciju koju čini krov od udvojenih I profila i linijski oslonci u vidu prostornih rešetki od cevnih profila (slika 10). Ispitivanje šipa sprovedeno je u dva ciklusa. Prvi ciklus je sproveden u 4 inkrementa do sile u vrednosti od 4700 kN, dok je drugi ciklus sproveden do sile u vrednosti od 7100 kN u 8 inkrementa. Dijagram sila–sleganje, kao krajnji rezultat statičkog probnog opterećenja, prikazan je na slici 11. Nakon prvog inkrementa, u prvom ciklusu, šip ima izraženo nelinearno ponašanje. Ostvareno sleganje za silu od 4700 kN, koja ujedno predstavlja i radno opterećenje u šipu, iznosi 47.07 mm. Na maksimalnoj sili, u drugom ciklusu, šip je dostigao granično stanje razvojem sleganja u iznosu do približno 10% prečnika šipa, odnosno 120 mm. Dostizanje graničnog stanja se ne može okarakterisati kao proklizavanje šipa, s obzirom da razvoj deformacija, nakon radnog opterećenja u drugom ciklusu, nije progresivnog karaktera. Bez obzira na nivo ostvarenih sleganja, tek za poslednji

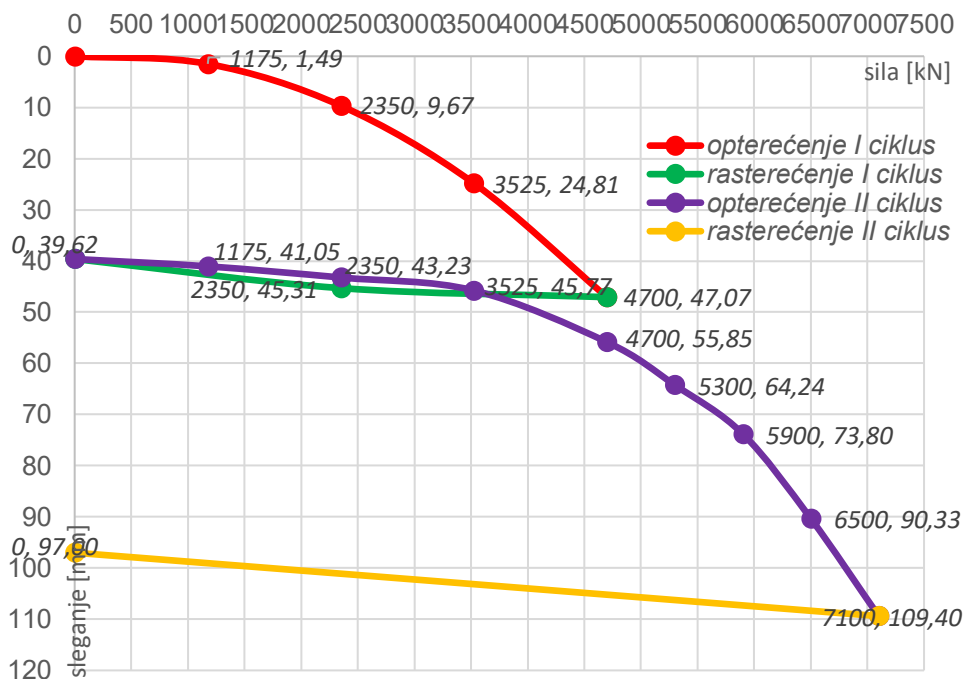
inkrement opterećenja nije dostignut uslov konsolidacije za propisani vremenski interval.



Slika 10. Balastna konstrukcija za SLT test

Ovakvo ponašanje šipa koje se može nazvati puzanjem, odnosno sporim razvijanjem sleganja do dostizanja graničnog stanja u testu statičkog probnog opterećenja, ne može se direktno prepisati integritetu šipa. Rezultat statičkog probnog opterećenja je uobičajen za šipove koji nemaju odgovarajuće geometrijske karakteristike da pruže potreban otpor sa propisanim faktorom sigurnosti. Može biti da detektovana negativna refleksija ima izvestan uticaj na smanjenje kapaciteta šipa, ali svako značajnije oštećenje manifestovalo bi se izraženijim i progresivnijim razvojem deformacija do dostizanja graničnog stanja. Da bi se došlo do

konkretnijeg zaključka poželjno je ispitati još jedan šip istih geometrijskih karakteristika, ali sa regularnim integritetom šipa. Iako je ponovno izvođenje testa operativno i ekonomski zahtevno, krajnje mišljenje koje bi proizvelo ponavljanje testa može da ima ishod u racionalizaciji projekta u odnosu na mišljenje formirano na osnovu postojećih rezultata za jedan šip. Ne treba zanemariti činjenicu da se veća ulaganja u istražne radove mogu samo pozitivno reflektovati na celokupni projekat, kako sa aspekta sigurnosti, tako i sa aspekta ekonomičnosti i dinamike izvođenja radova.



Slika 11. Dijagram sila sleganje iz testa statičkog probnog opterećenja

4. ZAKLJUČAK

Ispitivanje integriteta šipova predstavlja osnovni i metodološki najjednostavniji postupak kontrole njihovih geometrijskih karakteristika. Radi pouzdane interpretacije rezultata, od presudnog je značaja raspolagati što potpunijim informacijama o izvedenom šipu, a naročito o geološkim uslovima i primenjenoj tehnologiji izvođenja. U inženjerskoj praksi često dolazi do nedostatka relevantnih podataka koji mogu imati ključni uticaj na ocenu integriteta šipa. Neadekvatna interpretacija reflektograma može

rezultirati nepredviđenom preraspodelom sila u temelju u odnosu na projektovani statički model, pri čemu pojedini šipovi mogu preuzeti veći deo opterećenja od predviđenog. Sa druge strane, pogrešno tumačenje rezultata može dovesti do odluke o nepotrebnoj sanaciji temelja, što za posledicu ima povećanje troškova i produženje roka realizacije projekta. U slučajevima kada se dobiju nepovoljni ili nejasni rezultati ispitivanja integriteta šipa, kada postoji sumnja u njihovu interpretaciju ili kada sam ispitivač nije u mogućnosti da donese nedvosmislen zaključak, preporučuje se sprovođenje testova opterećenja šipa, statičkih ili dinamičkih, radi što preciznije procene stvarne nosivosti i ponašanja šipa. Prikazani primeri potvrđuju da ispitivanje integriteta šipova ne treba posmatrati kao samostalan kriterijum za donošenje konačnih zaključaka, već kao deo šireg, multidisciplinarnog pristupa kontroli kvaliteta, koji uključuje poznavanje geoloških uslova, tehnologije izvođenja, kao i rezultate ispitivanja nosivosti. Takav pristup omogućava pouzdaniju procenu ponašanja šipova i smanjenje rizika u projektovanju i izvođenju temelja.

Zahvalnost

Ovaj rad je deo istraživanja u okviru projekta 451-03-136/2025-03/200012 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

5. LITERATURA

- [1] Božović, N., Božović, M., Kavarić, K., Ćosić, M., Đoković, K., & Ćorluka, S. (2025). Analysis of pile integrity performed in jet grouting. U *Geotechnical aspects of civil engineering and seismic engineering* (Zbornik radova konferencije, Vrnjačka Banja, Srbija).
- [2] Institut za standardizaciju Srbije. (2017). *Evrokod 7: Geotehničko projektovanje — Deo 1: Opšta pravila (SRPS EN 1997–1:2017)*.
- [3] ASTM International. (2016). *Standard test method for low strain impact integrity testing of deep foundations (ASTM D5882–16)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D5882–16>
- [4] Institut za standardizaciju Srbije. (2019). *Geotehnička istraživanja i ispitivanja — Ispitivanje šipova — Deo 1: Statičko probno opterećenje aksijalno opterećenih šipova (SRPS EN ISO 22477–1)*.
- [5] ASTM International. (2020). *Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load (ASTM D1143/D1143M–20)*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1143_D1143M–20