

Mr. Dušan BERISAVLJEVIĆ, istraživač saradnik¹
Dr Nenad ŠUŠIĆ, naučni savetnik¹

DINAMIČKE METODE ZA ISPITIVANJE ŠIPOVA

0352-2733, 45 (2012),, p. 201-245

UDK: 624.154.042.8
STRUČNI ČLANAK

Rezime

U radu su opisane četiri metode za ispitivanje šipova. Dve metode, „Sonic integrity testing“ (SIT) i „Crosshole ultrasonic method“ (CHUM) orijentisane su ka ispitivanju integriteta šipova, a dve metode „Dynamic load testing“ (DLT) i „Rapid load testing“ (STN) za cilj imaju određivanje nosivosti šipova. U odnosu na svrhu ispitivanja prikazana je međusobna komparacija metoda. Svaku metodu prati primer.

Ključne reči: SIT, CHUM, DLT, STN, integritet, nosivost, komparacija

¹ Institut IMS, Bul. vojvode Mišića 43, Beograd
Rad primljen oktobra 2012.

DYNAMIC METHODS FOR PILE TESTING

Abstract:

Paper describes four methods for pile testing. Two methods, namely : “Sonic integrity testing“ (SIT) and „Crosshole ultrasonic method“ (CHUM) are oriented toward testing the integrity of piles, and two methods „Dynamic load testing“ (DLT) and „Rapid load testing“ (STN) are aimed at determining bearing capacity of piles. Comparisons of methods are made regarding their purpose. For each test method example is given.

Key words: SIT, CHUM, DLT, STN, integrity, bearing capacity, comparisons

1. UVOD

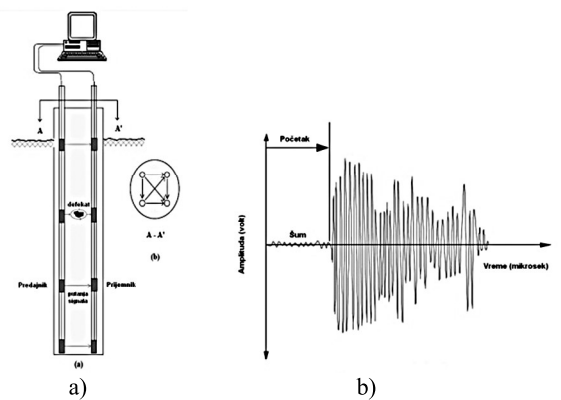
Jedini način da se stekne uvid u kvalitet izvedenog šipa jeste da se sprovedu dodatna ispitivanja, koja prema iskustvu autora gotovo da su obavezna na svim gradilištima širom naše zemlje. Statičko opterećenje je jedna od tih metoda, ali njegova cena, vreme trajanja izvođenja opita i potreba za kontra teretom čini je “neekonomičnom“ u poređenju sa dinamičkim metoda-
ma. U radu su opisane dve grupe metoda za ispitivanje kvaliteta šipova. U prvu grupu spadaju metode testiranja koje izazivaju male deformacije u šipu, kao što su “Sonic

integrity testing“ (SIT) i „Ultrasonic crosshole testing“ (CHUM). Ta grupa metoda orijentisana je samo ka ispitivanju integriteta šipa i zasniva se na principu merenja naponskih talasa direktnim prenošenjem ili refleksijom. Kod druge grupe metoda generisani naponski talas izaziva velike specifične deformacije u šipu, a mere se refleksije talasa generisanog na površini šipa. U drugu grupu metoda spada „Dynamic load testing“ (DLT) i „Rapid load testing“ (STN), čiji je osnovni zadatak procena nosivosti šipa sa mogućnošću procene i njegovog integriteta. Takođe, prema [15] navedene metode mogu da se podele na interne i eksterne u zavisnosti da li je unutrašnjost šipa dostupna ili ne.

2. ULTRASONIC CROSSHOLE TESTING (CHUM)

CHUM metoda koristi se za procenu homogenosti i integriteta betona bušenih šipova. Njena primena može da se proširi i na dijafragme i betonske brane. Postupak ispitivanja podrazumeva da se dve sonde (predajnik i prijemnik) spuste na dno para pristupnih PVC ili čeličnih cevi. Cevi treba da budu postavljene vertikalno za armaturni koš sa unutrašnje strane, a pre betoniranja pune se vodom. Uobičajen raspored cevi i princip ispitivanja prikazan je na slici 1a. Kada se spuste na dno sonde je potrebno dovesti u istu horizontalnu ravan. Predajnik generiše ultrazvučni puls (npr. 10 pulseva u sekundi) koje

registruje prijemnik u susjednoj cevi. Obe sonde se istovremeno podižu brzinom od oko 30 cm u sekundi sve do vrha šipa. Ovaj postupak se ponavlja za svaku moguću kombinaciju para cevi (po obimu i dijagonalno). Na slici 1a prikazano je šest mogućih kombinacija ispitivanja sa četiri ugrađene cevi. Šipovi većeg prečnika zahtevaju više cevi. Prema [3] potrebno je minimum tri cevi jednako raspoređene po obimu. Uobičajeno je da unutrašnji prečnik cevi iznosi 38 – 50 mm.



Slika 1. a) Princip ispitivanja i b) signal dobijen CHUM

Meri se vreme (t) putovanja ultrazvučnog talasa između cevi zajedno sa amplitudom signala. Slika 1b prikazuje tipičan zapis signala koji se dobija CHUM

ispitivanjem na jednoj mernoj poziciji. Na apcisi dato je vreme u milisekundama, a na ordinati amplituda signala u mikrovoltima. Tačka u kojoj amplituda počinje znatno da osciluje predstavlja vreme prvog nailaska signala do prijemnika (FAT - first arrival time). Sa poznatim rastojanjem (d) od centra do centra dve cevi može da se izračuna brzina talasa kroz beton između njih ($V=d/t$). Merenjem vremena prvog nailaska signala (FAT) na različitim pozicijama po dubini dobija se zapis prikazan na slici 2. Približno konstantno vreme prvog nailaska signala ukazuje da nema promena u kvalitetu betona između cevi duž šipa. Lokalno povećanje FAT-a ukazuje na moguće postojanje anomalije na toj dubini. Ukoliko postoji anomalija ultrazvučni talasi se prostiru ili kroz nju sa smanjenom brzinom ili je obilaze uz duže vreme putovanja do prijemnika. Brzina dobijena ispitivanjem (V) upoređuje se sa teorijskom brzinom (c) prostiranja longitudinalnog talasa za beskonačnu, homogenu, izotropnu i elastičnu sredinu datu jednačinom 1.

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1)$$

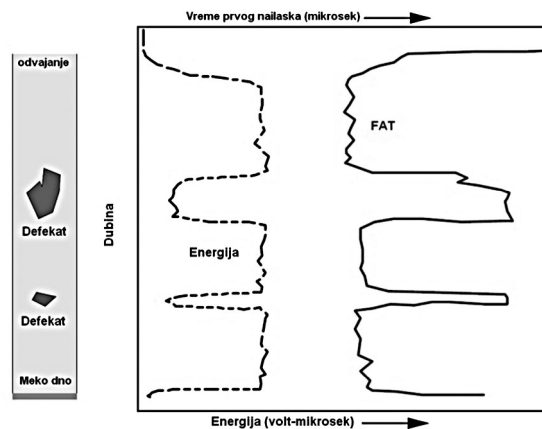
Pri čemu je E , ρ , ν - Jungov modul elastičnosti, gustina betona i Poasonov koeficijent.

Procentualno smanjenje računске brzine u odnosu na teorijsku brzinu može da se izrazi preko parametra VR koji se dobija iz jednačine 2.

$$VR = (1 - \frac{v}{c})100\% \quad (2)$$

Na osnovu parametra VR može da se proceni kvalitet betona na sledeći način: VR od 0 do 10% ukazuje na dobar kvalitet betona. VR od 10 do 20 % ukazuje da postoje manje anomalije. $VR > 20\%$ ukazuje da je beton lošeg kvaliteta.

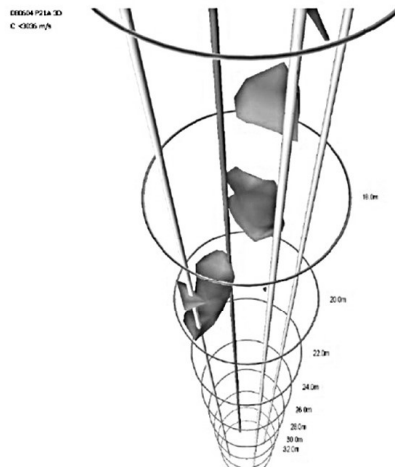
Pored FAT-a energija je drugi koristan parametar koji se dobija ultrazvučnim ispitivanjem. Obično se upoređuju zapis energije i FAT-a po dubini, slika 2. Zone slabijeg kvaliteta betona povećavaju vreme nailaska talasa i istovremeno apsorbuju određenu količinu energije, tako da talas stiže oslabljen do prijemnika. [1] navodi da FAT nema jedinstvenu vrednost već da zavisi od algoritma koji se koristi za njegovu determinaciju, a da je energija praktično nepromenljiva. Tako na primer, ako na određenoj dubini postoji lokalno povećanje FAT-a bez odgovarajućeg smanjenja energije velika je verovatnoća da je odabran loš algoritam za određivanje FAT-a.



Slika 2. Prikaz rezultata CHUM ispitivanja FAT i E po dubini (preuzeto iz [14])

Postoje različite varijacije CHUM metode. Jedna od njih je **Tomografska** metoda koja se koristi za određivanje zapremine anomalije, odnosno omogućuje da se dobije prostorni položaj anomalije, slika 3. Princip obe metode je isti, stim što kod tomografske metode prijemnik i predajnik nisu u horizontalnoj ravni već se nalaze na različitim visinama. Kada se utvrdi postojanje anomalije CHUM metodom sonde se zaustavljaju na oko 1 m iznad anomalije i sonda (A) ostaje fiksirana na toj dubini, a druga sonda (B) se spušta dok signal ne postane veoma

slab. Zatim se sonda A spušta za recimo 10 cm, a sonda B podiže dok signal ne oslabi. Ovaj postupak se ponavlja nekoliko puta dok se ne dobije pun prikaz anomalije na monitoru.



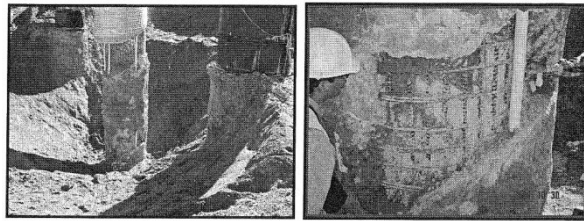
Slika 3. 3D prikaz anomalije u šipu [1]

Još jedna varijacija CHUM metode je **Single-hole testing** koja je korisna u sledećim situacijama: kada su sve cevi izuzev jedne predviđene za CHUM oštećene pa se ispitivanje sprovodi u toj jednoj cevi, kod šipova bez cevi kod kojih je izvedeno kernovanje i kod šipova manjeg prečnika. Kod ove metode sonde postavljene

jedna iznad druge spuštaju se u istu cev. Ako su sonde na malom rastojanju FAT odgovara vremenu nailaska talasa koji se kreće kroz vodu. Povećanjem rastojanja između sonde talas koji putuje kroz beton pre stiže do prijemnika zbog veće brzine. U svakom slučaju osnovni podatak za interpretaciju su FAT i energija. Single-hole metoda može da detektuje defekte veličine 3 cm ako se nalaze neposredno uz cev ili defekte veličine 10 cm ako se nalaze na rastojanju 7 cm od cevi [2].

Prednost CHUM metode u poređenju sa drugim metodama (npr. SIT) ispitivanja integriteta šipa je ta što sa opremom za ispitivanje može direktno da se pristupi potencijalnoj anomaliji. Takođe, CHUM ima bolju rezoluciju od SIT metode kod koje su talasne dužine oko 2 m, nasuprot CHUM koja upotrebljava ultrazvučne frekvencije sa talasnim dužinama od 50 do 100 mm. S obzirom da je rezolucija zavisna od talasne dužine, CHUM nam omogućuje da utvrdimo znatno manje defekte od SIT metode [1]. Nedostatak CHUM metode je potreba da se postave čelične ili PVC cevi na armaturni koš sa unutrašnje strane što dodatno poskupljuje ispitivanje. Prednost čeličnih cevi u odnosu na PVC je ta što su čelične cevi praktično neosetljive na visoke temperaturne gradijente koji se javljaju u postupku očvršćavanja betona. S druge strane prednost PVC cevi je mogućnost da se one iskoriste kao putanje za saniranje anomalija jer mogu da se preseku na bilo kojoj dubini

odgovarajućim alatom (najčešće vodom pod pritiskom). ASTM preporučuje da se koriste čelične cevi. Glavni nedostatak CSL metode je nemogućnost da se potvrdi stanje betona izvan armaturnog koša, odnosno stanje zaštitnog sloja betona. Na slici 4 prikazan je defekat otkriven sa spoljne strane armaturnog koša na jednom projektu u Tuscon-u (SAD). U ovom slučaju cevi su postavljene sa spoljne strane armaturnog koša, a prema [15] ovaj defekat ostao bi neotkriven da su cevi bile postavljene sa unutrašnje strane. Nije praksa da cevi budu postavljene sa spoljne strane jer je interpretacija znatno otežana s obzirom da talas na svom putu prolazi i kroz čelik.



Slika 4. Defekat otkriven sa spoljne strane armaturnog koša
(preuzeto iz [15])

3. SONIC INTEGRITY TESTING (SIT)

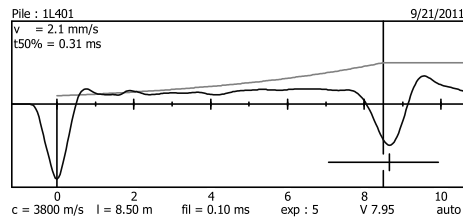
Postupak ispitivanja SIT metodom znatno je jednostavniji i brži u poređenju sa CHUM metodom. Potrebno je da se postavi senzor (obično akcelerometar) na vrh šipa i izazove kompresioni talas udarom o vrh šipa ručnim čekićem, slika 5. Kompresioni talas se prostire kroz šip i reflektuje se od baze šipa (kontakt betona i prirodne sredine). Reflektovani talas može biti ili kompresioni ili tenzioni, zavisno od odnosa krutosti betona i prirodne sredine. Ukoliko postoje promene poprečnog preseka ili pukotine, one takođe izazivaju refleksiju. Akcelerometar registruje ubrzanje glave šipa pri udaru, kao i svako sledeće ubrzanje izazvano refleksijom talasa unutar šipa, koji dostiže do njegovog vrha. Signal prikupljen akcelerometrom u analognoj formi se digitalizuje i integriše da bi se dobio zapis brzine (v) pomeranja glave šipa u vremenu. Tipičan zapis brzine (v) u vremenu (t) prikazan je na slici 6. Ovakav zapis zove se reflektogram i predstavlja osnovu za procenu integriteta šipa.

Teorijsko razmatranje talasa u čvrstoj sredini zavisi od preovlađujuće talasne dužine [8]. Ukoliko je talasna dužina veća ili jednaka prečniku šipa, problem postaje jednodimenzionalan, to jest važi teorija jednodimenzionalnog prostiranja naponskog talasa. To je uobičajeno za naponske talase izazvane udarom ručnog čekića kao kod SIT metode. Kada je talasna dužina mala u poređenju s

prečnikom šipa, problem postaje trodimenzionalan. To je karakteristično za ultrazvučna CHUM ispitivanja. Zainteresovani čitalac se upućuje na radove [5,6] u kojima je detaljnije opisana teorija jednodimenzionalnog prostiranja naponskih talasa na čijim osnovama se zasniva SIT metoda.



Slika 5: Oprema za ispitivanje



Slika 6: Reflektogram

U vremenu $2L/c$, gde je L dužina šipa, a c brzina naponskog talasa kroz beton, talas se reflektuje i vrati do vrha šipa, gde ga registruje akcelerometar. Na taj način, dobija se podatak o dubini i mestu na kome postoji promena poprečnog preseka ili materijala u šipu. Odnosno, refleksije nastaju na mestu promene impedance šipa (Z). Karakteristike šipa koje definišu impedancu jesu brzina talasa (c), modul elastičnosti betona (E) i površina poprečnog preseka (A), kako je prikazano u jednačini 3.

$$z = \frac{EA}{c} \quad (3)$$

Iz jednačine 3 vidi se da na moguće promene impedance utiče promena poprečnog preseka ili modul elastičnosti betona. Prema [7] modul elastičnosti i gustina betona variraju u vrlo uskim granicama i zato je promena impedance najčešće posledica promene poprečnog preseka.

Kod SIT metode od suštinske važnosti je poznavati brzinu prostiranja talasa (c) kroz beton u trenutku ispitivanja. Napominje se da se brzina c opisana kod CHUM metode i kod SIT metode razlikuju. Kada se talas prostire kroz štap, kao što je to slučaj kod SIT metode prilikom ispitivanja šipova, jednačina 1 može da se pojednostavi. U tom slučaju brzina talasa c data je jednačinom 4.

$$c^2 = \frac{E}{\rho} \quad (4)$$

Poređenjem jednačine 1 i 4 vidi se da se kompresioni talas brže kreće kroz beskonačnu sredinu nego kroz štap (šip). Tako na primer, za uobičajenu vrednost Poasonovog koeficijenta betona od 0.2 brzina talasa kroz beskonačnu sredinu je oko 10 % veća od brzine talasa kroz štap. Prema iskustvu autora brzina talasa kod SIT metode kreće se od 3500-4200 m/s, a zavisi i od proteklog vremena od betoniranja do ispitivanja šipa i marke betona.

Glavna prednost SIT metode u poređenju sa CHUM metodom je njena ekonomičnost i brzina ispitivanja. CHUM metodom može da se ispita nekoliko šipova za jedan radni dan, dok SIT metodom može da se ispita preko 50 šipova za isto vreme. Jedan od najtežih zadataka pri interpretaciji reflektograma je razlikovanje refleksija od defekta u šipu od refleksija od otpornih sila tla. Zato je potrebno razumeti da se kod SIT metode traže signali koji odstupaju od karakterističnog signala za jednu grupu šipova (npr. na jednom gradilištu) izgrađenim u sličnim geološkim uslovima. SIT metoda ne daje uvid u kvalitet betona ispod potpunog prekida stabla šipa, za razliku od CHUM metode kod koje je to moguće.

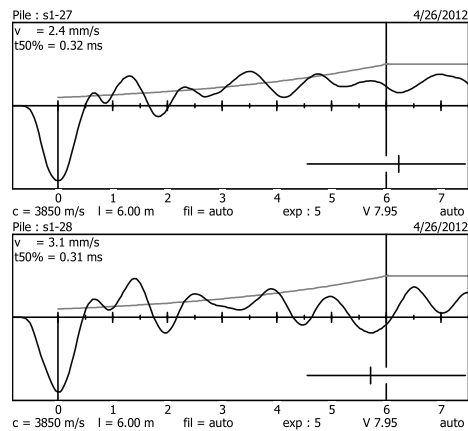
Da bi se rezultati ispitivanja približili njihovom korisniku potrebno je svaki reflektogram (šip) klasifi-

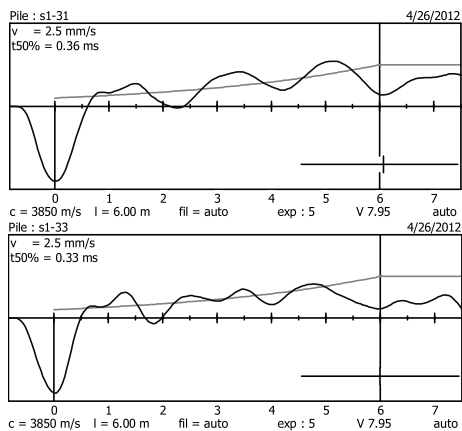
kovati i dodeliti odgovarajući simbol, broj koji ukazuje na određenu klasu. Jedan jednostavan klasifikacioni sistem preporučuju Nemačke norme [7] koje izdvajaju četiri klase, međutim autori ovog rada prednost daju klasifikaciji publikovanoj u [10] jer preciznije “opisuje integritet šipa”.

3.1 Primeri SIT metode

Na slici 6 prikazan je reflektogram dobijen ispitivanjem bušenog šipa sa kontinualnim zacevljenjem bušotine dužine 8,5 m, prečnika $\varnothing 600$ mm u naselju „Stepa Stepanović”. Reflektogram ukazuje da je šip uniformnog poprečnog preseka, dobrog kvaliteta betona i dužine prema Projektu. Slika 7 prikazuje reflektograme dobijene ispitivanjem bušenih šipova $\varnothing 600$ mm sa kontinualnim zacevljenjem bušotine. Planirana dužina šipova iznosi 6,0 m. Defekat kod svih šipova uočljiv je na cca 2,0 m od vrha šipa, što se na signalu vidi kao negativna refleksija na tom mestu. Pored prikazanih šest reflektograma još kod nekolicine reflektograma primećen je isti problem. Treba zapaziti da refleksija od baze ne postoji. Da je reč o defektu ukazuje i činjenica da na istom gradilištu (isto stubno mesto) postoje šipovi čiji reflektogrami ukazuju na uniforman šip. Međutim, očigledno je da je kod ovih šipova došlo do problema prilikom njihovog građenja. Verovatno da je došlo do

urušavanja okolnog tla u bušotinu prilikom vađenja čeličnih cevi. Prema pasošu šipova i u razgovoru sa izvođačem šipovi su fundirani oko 3,0 m u sive lapore iznad kojih se nalazi 2 - 3 m nasutog materijala koji je sklon obrušavanju. Otežavajuća okolnost prilikom građenja ovih šipova bila je pojava podzemne vode koja je odvođena drenažnim sistemom izvan područja izvođenja građevinskih radova. Verovatno da su jake filtracione sile uticale na ispiranje betona na pomenutoj dubini od 2,0 m.



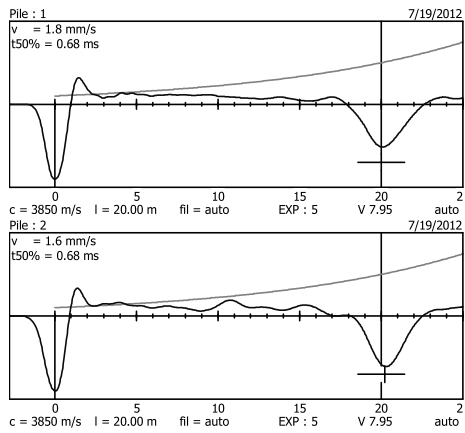


Slika 7. Reflektogrami koji ukazuju na postojanje defekta na cca 2.0 m

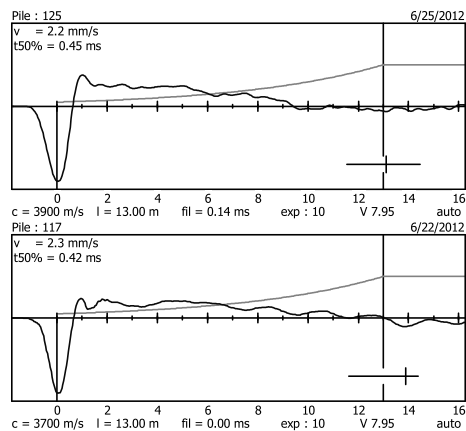
SIT metoda pokazala se kao veoma uspešna i kod ispitivanja šipova većih prečnika (npr. $D \geq 1,2$ m). Na slici 8 prikazana je grupa reflektograma dobijena ispitivanjem šipova prečnika $\varnothing 1500$ mm dužine 20 m. Ti šipovi izvedeni su za potrebe fundiranja obalnih stubova „Novog Žeželjevog mosta“ u Novom Sadu. Utvrđeno je da je većina šipova uniformnog poprečnog preseka i da je beton dobrog kvaliteta. Manji broj šipova ima proširenja stabla šipa, što je potvrđeno povećanim utroškom betona u odnosu na planiranu količinu. Ispitano je ukupno 14

šipova i svi su izvedeni do projektom predviđene dužine. Interesantno je da je prvobitno planirano da se umesto SIT metode radi CHUM metoda na oko 10 % od ukupnog broja šipova, ali se na kraju od nje odustalo jer je Nadzor zahtevao da se dostavi dokaz o kvalitetu svakog pojedinačnog šipa. Na kraju se ispostavilo da je SIT metoda bila optimalno rešenje.

U praksi nije redak slučaj da se susretnemo sa reflektogramom prikazanim na slici 9. Ovde se radi o pobijenim šipovima $\varnothing 520$ mm, $L=13,0$ m, Simplex tehnologije izrade, čiji je postupak izrade sledeći: dizel maljem pobija se čelična cev sa zatvorenim donjim krajem do projektovane kote, zatim se postavlja armaturni koš i cev se puni betonom uz sukcesivno izvlačenje cevi vibriranjem. Postupak izvlačenja odvija se sa otvorenim donjim krajem cevi. Kod tih šipova često ne postoji jasan odziv od baze. Posmatrajući problem sa teorijskog aspekta veliki deo energije koji sadrži talas apsorbuje okolno nabijeno tlo, odnosno sile trenja po omotaču. S druge strane proces pobijanja povećava impedancu tla neposredno ispod baze šipa što dodatno utiče na smanjenje amplitude reflektovanog talasa. Interesantno je da su statičkim probnim opterećenjem ostvarena jako mala sleganja pri radnom i maksimalnom opterećenju u opitu što ukazuje na znatnu nosivost okolnog tla.



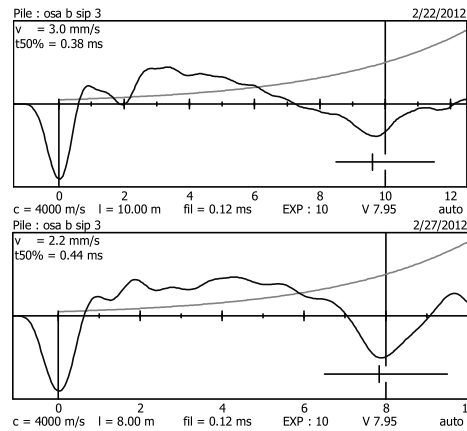
Slika 8. Reflektogrami šipova $\varnothing 1500 \text{ mm}$ za "Novi Žeželjev most" u N.Sadu.



Slika 9. Reflektogrami pobijenih šipova sa slabim odzivom od baze

Integritet i dužina nekoliko decenija starih šipova može da se utvrdi SIT metodom. Na slici 10 prikazani su reflektogrami šipa koji je ispitan u dva navrata, pre i nakon krajcovanja AB nastavka kvadratnog poprečnog preseka dužine 2,0 m prikazanog na slici 11. Na slici 10 (gore) jasno se vidi da na cca 2,0 m postoji negativna refleksija, koja je posledica generisanog tenzionog talasa od mesta kontakta nastavka i šipa. Taj reflektogram ukazuje da je ukupna dužina šipa i nastavka 9,6 m. Reflektogram prikazan u donjem delu slike dobijen je

nakon uklanjanja nastavka. Vidi se da je dužina samo šipa 7,8 m. Takođe, signal dobijen ispitivanjem šipa bez nastavka daje jaču refleksiju od baze.



Slika 10. Reflektogrami šipa dobijeni pre i posle krajcovanja AB nastavka

Pored prikazanih još nekolicina interesantnih primera može da se pronađe u [18].

4. DINAMIČKO PROBNO OPTEREĆENJE (DLT)

Poslednjih nekoliko godina u našoj zemlji DLT metoda intenzivno se koristi za određivanje nosivosti šipova

kao alternativa statičkom probnom opterećenju. Glavna prednost DLT metode u odnosu na statičku je ušteda u novcu i vremenu Investitora koji ne mora da obezbedi skupoceni kontra teret. Princip ispitivanja sličan je kao kod SIT metode, s tim što su kod DLT metode težine tega znatno veće (nekoliko tona), Slika 12. Teg udarom u šip indukuje naponski talas, a ubrzanja i deformacije u šipu nastale generisanim talasom registruju akcelerometri i ekstenziometri postavljeni na rastojanju 1,5 do 2 prečnika od vrha šipa, Slika 13. Za ispitivanje treba imati najmanje dva para ekstenziometara i akcelerometara postavljena dijametralno suprotno u odnosu na osu šipa kako bi mogla da se kontroliše ekcentričnost udara. Iz izmerenih deformacija i ubrzanja računa se sila i brzina u funkciji vremena koji čine osnovu za interpretaciju.

Odabir odgovarajuće težine tega je od suštinskog značaja za uspešno ispitivanje bušenih šipova [9]. Težina, visina pada i detalji vezani za materijal koji se postavlja između tega i šipa treba da budu odabrani tako da udar tega omogući dovoljno pomeranje (penetraciju) šipa za mobilizaciju tražene otpornosti tla, a da pri tome dinamički naponi nastali udarom ne prekorače čvrstoću na pritisak i zatezanje šipa. Visina sa koje teg pada varira od 0,3 m do 3,0 m. Veće težine malja zahtevaju manje visine pada i obratno. Hussein i dr. [9] simulirali su test dinamičkog opterećenja bušenih šipova različitih prečnika i dužine pomoću GRLWEAP softvera na osnovu kojih

daju opštu preporuku da težina tega treba da iznosi 1,5 % statičke nosivosti koju treba dokazati ispitivanjem.



Slika 11. Ispitivanje šipa bez AB nastavka

Postoji nekoliko načina pripreme šipa za ispitivanje, a cilj je da se omogući postavljanje senzora na stablo šipa na dovoljnom rastojanju od vrha i da teg bude centrično postavljen u odnosu na osu šipa. Ukoliko su unapred određeni šipovi koje treba ispitati onda je poželjno da se stablo šipa izvede duže 1-2 prečnika šipa u odnosu na planiranu dužinu i zatim se okrajcuje (npr. 0,5 m) da bi beton pri vrhu bio što boljeg kvaliteta. Drugi način je da se napravi iskop oko šipa dubine 1-2 prečnika šipa i

dovoljne širine da radnik može bezbedno da postavi senzore. Treći način je najbolji za šipove neuniformnog poprečnog preseka i betonske mešavine čiji kvalitet varira po dužini šipa (npr. bušeni šipovi sa bentonitskom isplakom), a podrazumeva da se uradi produžetak na izvedeni šip, Slika 14.



Slika 12. Dispozicija dinamičkog ispitivanja šipa $\varnothing 600$ mm, dužine $L=11,6$ m u okviru fabrike Zorka Šabac



Slika 13. *Senzor za merenje deformacije i ubrzanja šipa*

Betonski produžetak treba da bude ojačan unutrašnjom armaturom ili spoljnim ojačanjem u vidu tanke čelične cevi. Senzori se direktno postavljaju na beton (kod čelične cevi potrebno je napraviti kvadratne otvore stranice približno 200 mm).

Površina na koju naleže teg treba da bude ravna, glatka i upravna na osu šipa zbog optimalnog prenosa energije tega na šip. Posebnu pažnju treba obratiti na mesto na kome se postavljaju ekstenziometri jer su u lošijem betonu izmerene deformacije veće, što direktno utiče na rezultate ispitivanja.



Slika 14. *AB nastavak MB 35*

Kontinualno merenje deformacija (ε) i ubrzanja (a) u vremenu (t) omogućuje da se izračunaju sile i brzine u šipu. Sila se računa kao proizvod deformacije, dinamičkog modula elastičnosti (E) i površine poprečnog preseka šipa u nivou merenja (A), jednačina 5.

$$F = \varepsilon EA \quad (5)$$

Deformacija se meri sa dva ekstenziometra na osnovu kojih se računaju dve sile F_1 i F_2 i odgovarajuća srednja vrednost sile kao $F = (F_1 + F_2) / 2$.

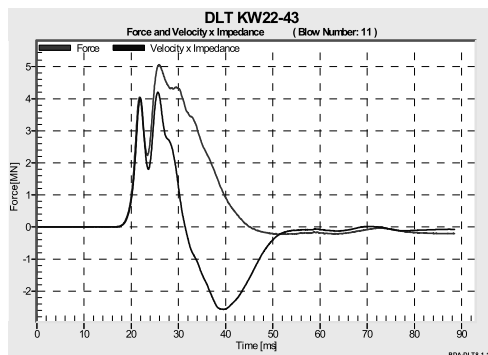
Integriranjem ubrzanja po vremenu (t) dobija se brzina pomeranja šipa (v) u nivou merenja, jednačina 6.

$$v = \int a dt \quad (6)$$

Ubrzanje se meri sa dva akcelerometra na osnovu kojih se računaju brzine v_1 i v_2 i odgovarajuća srednja vrednost brzine $v = (v_1 + v_2) / 2$.

Integriranjem rezultujuće osrednjene brzine dobija se pomeranje šipa u vremenu.

Osnovu za analizu rezultata dinamičkog ispitivanja šipova čini signal sile (F) i brzine pomnožene impedancom šipa ($v \times Z$), Slika 15. Svi podaci (naponi u šipu, nosivost...) dobijaju se na osnovu ta dva signala.



Slika 15. Izmereni signal sile i brzine u funkciji vremena

Teorijske postavke mehanike talasa ukazuju da je sila koja deluje na poprečni presek štapa (šipa) proporcionalna brzini kretanja posmatranog dela štapa, a konstanta proporcionalnosti predstavljena je impedancom šipa (Z), jednačina 7.

$$F = Zxv \quad (7)$$

Impedanca može da se izračuna iz jednačine 3. Sa slike 15 vidi se da su signali u početku identični (preklapaju se) sve dok nema refleksija od okolnog tla ili od diskontinuiteta u šipu. Nakon početnog dela dolazi do razdvajanja signala i ako je razlika između dva signala velika reč je o šipu koji prenosi opterećenje na tlo trenjem po omotaču, u suprotnom ako je razlika između signala sile i brzine mala radi se o šipu koji najveći deo opterećenja na tlo prenosi preko baze.

Postoje različite metode određivanja nosivosti iz izmerenih signala, a mogu se podeliti na direktne i indirektne.

Direktne metode omogućuju određivanje statičke otpornosti tla direktno na terenu iz merenih ubrzanja (brzina) i deformacija (sila) u trenutku pobijanja šipa. Iz ove grupe metoda izdvajaju se CASE, Impedance i TNO metoda [7]. Direktne metode izvedene su pod pretpostavkom: da je šip uniformnog poprečnog preseka, da je materijal u šipu linearno elastičan i 1-D propagacije na-

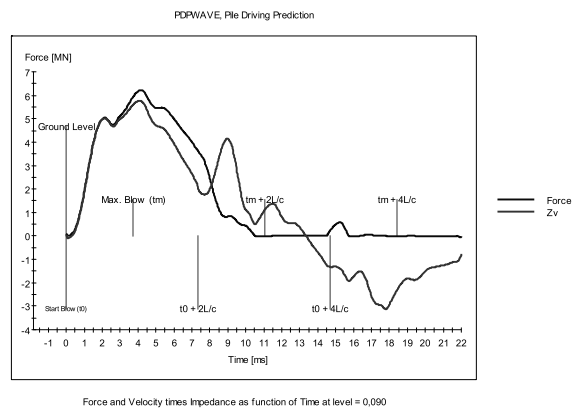
ponskih talasa. Pretpostavka da je poprečni presek šipa uniforman otežava primenu direktnih metoda za određivanje nosivosti bušenih šipova jer oni najčešće nisu uniformnog poprečnog preseka. Široku primenu direktne metode imaju kod pobijenih prefabrikovanih betonskih i čeličnih šipova. Kod bušenih šipova treba koristiti indirektnu metodu, odnosno tzv. "Signal Matching" (SM) proceduru kod koje mogu da se uzmu u proračun i različite dimenzije poprečnog preseka šipa.

Signal Matching procedura predstavlja postupak kompjuterskog traženja signala koji se sa izmerenim signalom najbolje poklapa. Prethodno je potrebno usvojiti odgovarajući model šipa i tla. Izmereni signal sile zadaje se softveru kao početni uslov na vrhu šipa (poziciji senzora) i zajedno sa formiranim modelom šipa i tla računa se signal koji treba da se podudara sa izmerenim signalom.

Posebna prednost SM procedure u odnosu na direktne metode je mogućnost simulacije testa statičkog probnog opterećenja. To omogućuje da se dobije grafik zavisnosti sleganja od opterećenja kako za bazu tako i za omotač šipa. Tako dobijena zavisnost može da se uporedi sa zavisnošću dobijenom iz statičkog probnog opterećenja. Na taj način mogu da se kalibrišu parametri tla korišćeni pri SM proceduri čime je njihova pouzdanost znatno veća pa se mogu primeniti i na drugim šipovima izgrađenim u sličnom tlu.

4.1 Primer određivanja nosivosti bušenog šipa DLT metodom

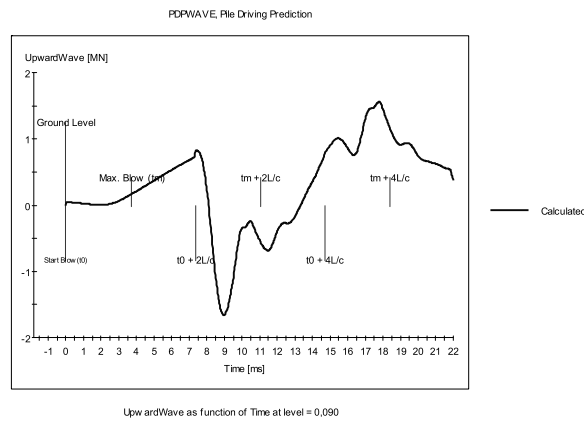
Primer je urađen primenom softvera DLTWAVE [19], koji omogućuje da se kompjuterski simulira opit dinamičkog probnog opterećenja, odnosno da se dobije odgovor šipa na dinamičke udare. Šip je dužine $L=15,0$ m, $\varnothing 600$ mm i izgrađen od betona. Konstrukciju za nanošenje opterećenja čine: teg težine $W=5,5$ t sa visinom slobodnog pada $h=1,5$ m; bazna čelična ploča koja prenosi opterećenje na šip debljine $d=15$ cm; drvena podloška debljine 10 cm koja se postavlja na baznu ploču. Ponašanje tla aproksimirano je Smith-ovim modelom [17]. Pretpostavljena je uniformna raspodela trenja na dužini 90 % stabla šipa. Konstante viskoznosti za omotač i bazu iznose $J=0,3$ s/m, $J'=0,5$ s/m. Granična elastična deformacija (quake- q) za omotač iznosi $q=2,5$ mm, a za bazu D/120 ($q=5$ mm) za ciklus opterećenja i $q=2,5$ mm za rasterećenje. Za prikazane ulazne podatke dobijen je signal F i $v \times Z$ prikazan na slici 16.



Slika 16. Simulacija testa dinamičkog probnog opterećenja DLTWAVE softverom

Sa dijagrama se uočava nagli porast brzine u nivou baze šipa što ukazuje da je reflektovani (tenzioni) talas suprotnog znaka od talasa (kompresionog) koji je generisan udarom tega. Ovo se jasnije vidi na dijagramu datom na slici 17, koji prikazuje promenu sile u vremenu za talas koji se kreće na gore (upward wave). U početku sila linearno raste što je posledica pretpostavke uniformne raspodele trenja po omotaču, da bi u trenutku pristizanja reflektovanog talasa od baze naglo opala. Nadalje signal je posledica udruženog delovanja sila otpora baze i omo-

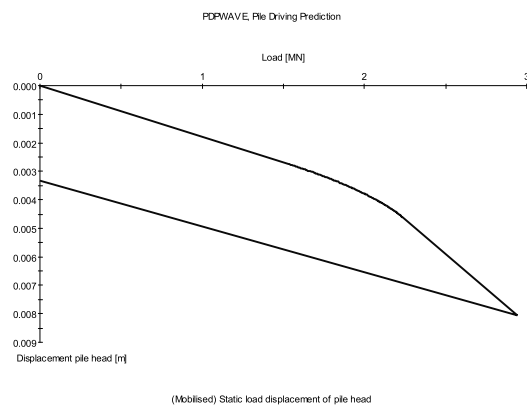
tača. Trajno sleganje šipa (permanent set) iznosi 7,1 mm što ukazuje da je mobilisana granična nosivost šipa.



Slika 17. Sila u funkciji vremena za talas koji se kreće na gore – ovaj talas nosi informacije o otpornim silama tla

Dobijeni signali koriste se za simulaciju testa statičkog probnog opterećenja, što omogućuje da se dobije zavisnost sleganja šipa od opterećenja, Slika 18.

Dobijeno je da je ukupna nosivost 2940 kN, pri tom nosivost baze je 1410 kN, a omotača 1530 kN.



Slika 18. *Dijagram pomeranja glave šipa u zavisnosti od opterećenja*

Kod ispitivanja šipova DLT metodom treba voditi računa da se ne prekorače dozvoljeni naponi zatezanja i kompresije u šipu. U ovom primeru naponi zatezanja iznose -3 MPa, a kompresije 19 MPa što je ispod vrednosti dozvoljenih napona za armirani beton koji se koristi za bušene šipove. Postoje i drugi podaci koji se dobijaju DLT metodom (dinamička otpornost, efikasnost tega, itd.), ali su malog praktičnog značaja za Investitora kome je od najvećeg značaja podatak o graničnoj nosivosti šipa.

5. TEST BRZOG OPTEREĆENJA

Test brzog opterećenja (Rapid load testing) omogućuje da se odredi nosivost šipova, a u odnosu na DLT razlikuje se po dužem vremenu trajanja opterećenja, oko 150 ms. Sušitna testa je da se na vrh šipa nanese dinamičko opterećenje koje je dovoljno sporo da omogućí da se šip ponaša kao kruto telo, bez uticaja propagacije talasa koja je izražena kod DLT-a. Ovaj test posmatrano u svetlu teorije propagacije talasa predstavlja kvazi-statički test, što je prikazano na slici 19. Na slici su upoređene tri metode statičko probno opterećenje (SLT), dinamičko probno opterećenje (DLT) i test brzog opterećenja (STN). Prikazana je promena napona, brzina i pomeranja duž šipa za različite vrste opterećenja.

Kod DLT zbog relativno kratkog vremena trajanja udara (oko 7 ms) naponi znatno variraju duž šipa. Neki delovi šipa mogu da budu u stanju kompresije, dok su drugi delovi u stanju tenzije. Slično je i sa brzinama u stablu šipa. Pomeranja se razlikuju od nivoa do nivoa šipa i u vremenu.

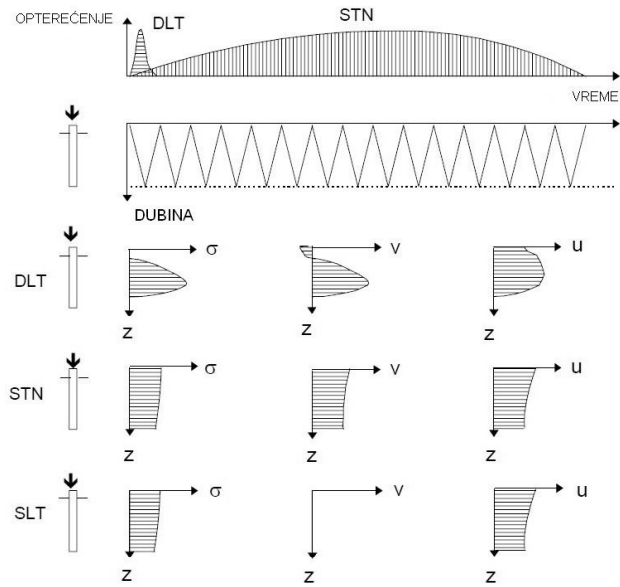
Kod testa brzog opterećenja (STN), opterećenje se nanosi relativno sporo na šip. Naponi kompresije postepeno se menjaju, a šip je u stanju kompresije. Nema napona zatezanja. Različiti nivoi šipa pomeraju se približno istom brzinom i za približno isti iznos.

Kod probnog statičkog opterećenja (SLT) opterećenje se nanosi u određenom broju koraka. Vreme trajanja opterećenja u jednom koraku iznosi nekoliko minuta ili sati. Naponi kompresije u šipu postepeno se menjaju i nema pojave napona zatezanja. Brzina pomeranja šipa gotovo je jednaka nuli. Pomeranja su postepena duž stabla šipa.

Ovo poređenje ukazuje da je STN bliži SLT-u, nego DLT. Osnovna razlika između STN i SLT je razlika u brzini pomeranja šipa. Brzine kod STN kreću se u rasponu od 0,1-2 m/s, dok su kod SLT gotovo jednake nuli [13].

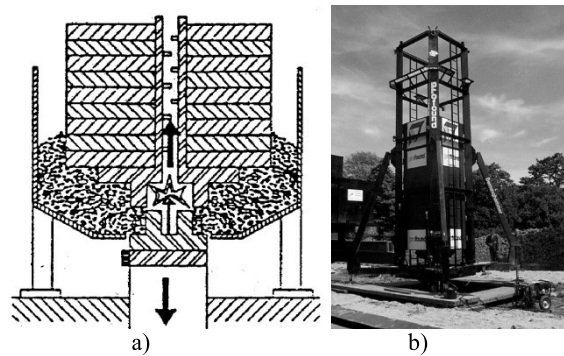
Danas su u upotrebi dva principa za nanošenje opterećenja na vrh šipa. Prvi princip (tzv. Statnamic – **static, dynamic**) potiče od Patrika Bermingham-a (1988) i prikazan je na slici 20 a. Taj princip koristi silu nastalu usled lansiranja reakcione masa na gore uz pomoć eksplozivnih gasova. Kada se reakciona masa ubrza na gore sa, npr. 20 g, na šip deluje sila 20 puta veća od reaktivne mase. Kada svo gorivo sagori reaktivna masa pod dejstvom gravitacije pada ka šipu. Da bi se sprečilo da masa udari u šip postavlja se mehanizam za hvatanje. Ranije se takav mehanizam sastojao od kontejnjera sa šljunkom, koji nakon lansiranja mase upada u prostor iznad šipa i prenosi udar na okolno tlo. Ovakav sistem pokazao se kao veoma spor, a da bi se ispitao jedan šip bilo je potrebno oko 2 dana. Pritom, nije bilo moguće da se test izvede više puta uzastopno na jednom šipu.

Savremeni sistemi za hvatanje, npr. sa hidrauličkim mehanizmom, omogućuju višestruko ispitivanje jednog šipa i čak ispitivanje do 4 šipa dnevno, Slika 20 b.



Slika 19. Poređenje napona, brzina i pomaranja za DLT, STN i SLT [13]

Opterećenje koje može da se nanese na šip testom brzog opterećenja kreće se od 1 do 40 MN. Veliki deo troškova nosi mobilizacija opreme, tako prema [12] za transport opreme koja je sposobna da nanese opterećenje od 4 MN potrebno je dve kamionske prikolice a ukupna masa opreme i reakcione mase iznosi 27 000 kg.



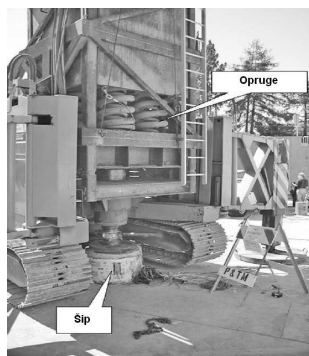
Slika 20. Statnami test sa mehanizmom za hvatanje sa a) šljunkom b) hidrauličnim mehanizmom

Drugi princip nanošenja opterećenja oslanja se na silu gravitacije, odnosno masivan teg pušta se da slobodno pada na sistem namotanih opruga (slika 21) koje prenose opterećenje na šip u trajanju od oko 150 ms (videti [16]). Posebna privlačnost tog sistema (važi za manje mase) je mogućnost da se oprema postavi na garnituru koja izvodi

šip. Prvo je u Japanu test brzog opterećenja standardizovan, a nekoliko različitih institucija proizvode opremu uglavnom sa padajućim teretom. Po ugledu na Japan i druge zemlje su standardizovale ovaj opit, a često je u upotrebi američki standard ASTM D7383.

Međusobno razlikovanje DLT i metode brzog nanošenja opterećenja, prema Japanskim propisima [11], vrši se na osnovu relativne dužine trajanja udara (T_r), koje se definiše kao:

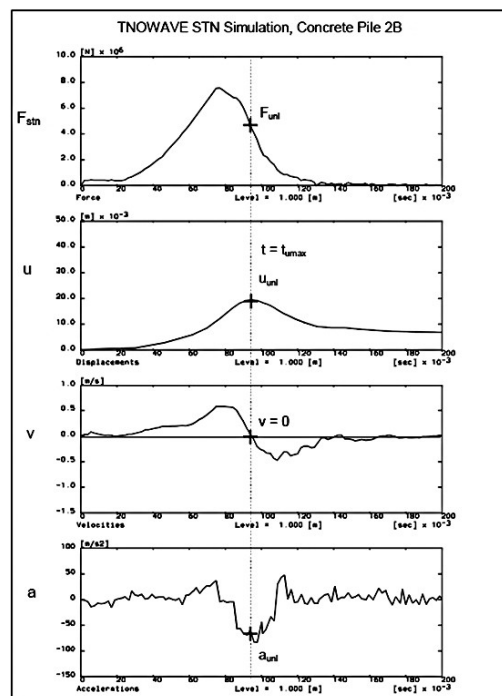
$$T_r = t_L / (2L/c) \quad (8)$$



Slika 21. Fundex-ova oprema za test brzog opterećenja [20]

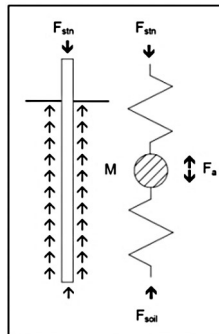
Pri čemu je t_L dužina trajanja udara, L dužina šipa i c brzina naponskog talasa. Da bi se test okarakterisao kao

brzi test potrebno je da $T_p \geq 5$. Za vrednosti $T_p \leq 5$ test spada u DLT i fenomen propagacije talasa ne može da se zanemari.



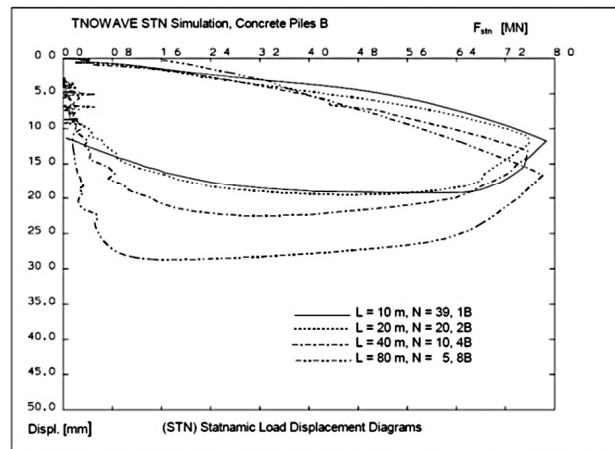
Slika 22. Signal sile, pomeranja, brzine i ubrzanja u vremenu

Pre ispitivanja na vrh šipa postavlja se merna ćelija koja meri naneto opterećenje. Na stablo šipa, blizu njegovog vrha mogu da se postave i akcelerometri, a pomeranje šipa meri se optičkim uređajem postavljenim na stativ na udaljenosti oko 10 m od šipa. Poželjno je meriti vibracije stativa u toku testa. Iz testa brzog opterećenja dobijaju se signali prikazani na slici 22. Činjenica da se različiti nivoi šipa kreću približno istom brzinom omogućuje da se šip predstavi sistemom opruga i koncentrisane mase, Slika 23. Statička nosivost dobija se direktno iz izmerenih signala i jednaka je veličini opterećenja u trenutku kada se ostvari maksimalno pomeranje šipa. Ovo je opravdano jer su u trenutku maksimalnog pomeranja šipa dinamički efekti jednaki nuli, odnosno $V=0$ za $u=u_{\max}$.



Slika 23. Model šipa

Opisana metoda za određivanje nosivosti šipa iz testa brzog opterećenja zove se Unloading Point Method – UPM [12] i do sada je izašlo nekoliko modifikacija te metode. Krajnji rezultat testa je kriva opterećenje-sleganje prikazana na slici 24.



Slika 24. Dijagram opterećenje-sleganje (preuzeto iz [13])

6. ZAKLJUČAK

Opisane metode, isključujući test brzog opterećenja, imaju široku primenu na gradilištima širom naše zemlje. U poređenju sa statičkim probnim opterećenjem prikazane metode za određivanje nosivosti šipova (DLT i STN) znatno su finansijski pristupačnije i vremenski manje zahtevne. DLT metoda razlikuje nosivost baze i omotača, ali efekat propagacije naponskih talasa čini rezultat testa složenim, pa samo iskusni inženjeri mogu da interpretiraju rezultate.

Sonic integrity testing metoda omogućuje da se na ekonomičan, brz i pouzdan način stekne opšti utisak o kvalitetu izvedenog šipa. Kao najveće ograničenje ovoj metodi se pripisuje poteškoća u razlikovanju refleksija od anomalija u šipu od refleksija izazvanane otpornim silama tla. Crosshole ultrasonic metoda daje uvid u integritet šipa, međutim priprema šipa koja prethodi ispitivanju je složenija i skuplja od SIT metode. Prednost CHUM metode je bolja rezolucija (vide se manje anomalije) i mogućnost da se pristupi unutrašnjosti šipa, odnosno potencijalnoj anomaliji.

7. LITERATURA

- [1] AMIR J.M. (2009). *Pile Integrity testing*.
- [2] AMIR J.M. (2002): *Single-Tube Ultrasonic Testing of Pile Integrity*. ASCE Deep Foundation Congress, Vol 1 str. 836-850, Orlando.
- [3] ASTM Standard D 6760. (2002). *Standard Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing*.
- [4] ASTM Standard D 5882 (2000). *Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations*.
- [5] BERISAVLJEVIĆ D., ŠUŠIĆ N. (2012). *Osnove ispitivanja integriteta šipova s primerima iz prakse*. Građevinski materijali i konstrukcije, vol. 55, str. 55-64.
- [6] BERISAVLJEVIĆ D., ŠUŠIĆ N., ČAKI L. (2011). *Teorijske osnove ispitivanja integriteta šipova*. Četvrto naučno-stručno savetovanje-Geotehnički aspekti građevinarstva, ed. Radomir Folić, Srbija.
- [7] German Society for Geotechnique. Recommendations for Static and Dynamic Pile tests.
- [8] HOLEYMAN A.E. (1992). *Key note lecture: Technology of pile dynamic testing*. Proc. of the 4th International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles, Rotterdam, str. 195-215.

- [9] HUSSEIN M.H., LIKINS G. E., RAUSCHE F. (1996). *Selection of a Hammer for High-Strain Dynamic Testing of Cast-in-Place Shafts*. Proc. of the Fifth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles, FL, str. 759-772.
- [10] LIQUIN L., Rausche. F. (2011). *Quality assesment procedure and classifications of cast-in place shafts using low strain dynamic test*. Proc. from DFI 36th Annual Conference; str, 553-562.
- [11] MATSUMOTO T. (2008). Practice of rapid load testing in Japan, Rapid Load Testing on Piles, Hölscher, P., van Tol, A.F. (eds), Francis Taylor, September 2008.
- [12] MIDDENDORP P. (2000). *Statnamic, the engineering of art*. Proc. of the 6th International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles, Orlando, Sao Paulo.
- [13] MIDDENDORP P., DANIELS B. (1996). *The influence of stress wave phenomena during statnamic load testing*. Fifth Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Orlando, Florida.
- [14] PAIKOWSKY S.G. i CHERNAUSKAS L.R. (2003). *Review of Deep Foundations Integrity Testing Methods and Case Histories*. Bscs-geo-institute deep foundation seminar p1.

- [15] SAMTANI C.N., JALINOOS F., i POLAND M.D. (2005). *Integrity testing of drilled shafts- existing and new techniques*. Proc. of the GEO Construction Quality Assurance/Quality Control Conference – International Association of Foundation Drilling, ed. D.B. Bruce and Cadden, A.W. Dallas, TX, str. 329-340.
- [16] SCHELLINGERHOUT A.J.G. and REVOORT E. (1996). Pseudo static pile load tester, Proc. 5th Int. Conf. Appl. Stress-Wave Theory to Piles, Orlando, Sept. 1996, str. 1031–1037.
- [17] SMITH E.A.L. (1960). *Pile driving analysis by wave equation*. Journal of the Soil mechanics and Foundation division, ASCE, vol 80, str. 1145-1171.
- [18] ŠUŠIĆ N., BERISAVLJEVIĆ D., RAKIĆ D. (2011). *Nekoliko primera iz prakse kontrole kvaliteta šipova SIT metodom*. Četvrto naučno-stručno savetovanje-Geotehnički aspekti građevinarstva, ed. Radomir Folić, Srbija.
- [19] TNO-Report. (1996). *TNOWAVE, Dynamic Load Testing Signal Matching*, Users Manual.
- [20] WANG G., KASALI G., i SITAR N. (2011). *Static and Dynamic Axial Response of Drilled Piers. I: Field Tests*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 137, No. 12, str. 1133-1142.