

Primljen / Received: 16.6.2014.
 Ispravljen / Corrected: 10.10.2014.
 Prihvaćen / Accepted: 14.11.2014.
 Dostupno online / Available online: 10.12.2014.

Poboljšanje tla pomoću brzog udarnog zbijanja: studija slučaja u Dubaiju

Autori:



Doc.dr.sc. **Bashar Tarawneh**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Jordanu
 Odjel za građevinarstvo
btarawneh@ju.edu.jo



Mr.sc. **Mounir Matraji**, dipl.ing.građ.
 Menard Vibro Middle East
 Dubai, UAE
mmatracji@menard-vibro.ae

Stručni rad

Bashar Tarawneh, Mounir Matraji

Poboljšanje tla pomoću brzog udarnog zbijanja: studija slučaja u Dubaiju

Tijekom nekoliko proteklih godina brzo udarno zbijanje postalo je popularna metoda za poboljšanje tla. Da bi se procijenila korisnost te metode na području Perzijskog zaljeva, brzo udarno zbijanje primjenjeno je za poboljšanje tla površine 29.000 m² na gradilištu u blizini Dubaija, gdje je zabilježena visoka razina podzemne vode. Statički penetracijski pokus i proračuni slijeganja provedeni su prije i nakon poboljšanja tla. Ispitivanja su pokazala poboljšanje nosivosti tla i smanjenje očekivanih slijeganja.

Ključne riječi:

poboljšanje tla, brzo udarno zbijanje, dinamičko zbijanje, statički penetracijski pokus

Professional paper

Bashar Tarawneh, Mounir Matraji

Ground improvement using rapid impact compaction: case study in Dubai

In recent years, the Rapid Impact Compaction has gained popularity as a ground improvement technique. To evaluate the usefulness of this technique in the Arabian Gulf Region, the RIC is used to improve an area of 29,000 m² on a project site near Dubai, UAE, where the groundwater level is shallow. Cone Penetration Tests and settlement calculations were carried out before and after soil improvement. Test results show improvement in the soil bearing capacity and reduction in expected settlements.

Key words:

ground improvement, rapid impact compaction, dynamic compaction, standard penetration test

Fachbericht

Bashar Tarawneh, Mounir Matraji

Bodenverbesserung durch schnelle Schlagverdichtung: Fallstudie in Dubai

In den letzten Jahren ist die schnelle Schlagverdichtung eine beliebte Methode zur Bodenverbesserung. Um die Anwendungsfähigkeit dieses Verfahrens im Persischen Golf zu erfragen, ist die schnelle Schlagverdichtung zur Verbesserung von 29.000 m² Baugrund in der Nähe von Dubai angewandt worden, wo sich ein hoher Grundwasserstand zeigte. Statische Penetrationsversuche und die Berechnung von Setzungen sind vor und nach der Bodenverbesserung durchgeführt worden. Des Weiteren haben die Versuche eine erhöhte Tragfähigkeit des Bodens und eine Verminderung der erwarteten Setzungen vorgezeigt.

Schlüsselwörter:

Bodenverbesserung, schnelle Schlagverdichtung, dynamische Verdichtung, standard penetration test

1. Uvod

Brzo udarno zbijanje (eng. *Rapid Impact Compaction* - RIC) je inovativno dinamičko zbijanje koje se uglavnom primjenjuje za zbijanje pjeskovitog tla u kojem je mali udio praha i gline. Ova metoda pokriva područje između metoda za površinsko zbijanje (npr. zbijanje valjcima) i metoda za duboko zbijanje (npr. duboko dinamičko zbijanje) te omogućava poboljšanje srednje dubokog tla. RIC se koristi za tretiranje zrnatog tla [1] te prirodnih pješčanih ili glinovitih tala [2]. RIC sustav primjenjuje "kontrolirano udarno zbijanje tla" koristeći devetotonski čekić koji pada s visine između 0,3 m i 1,2 m na čelično postolje promjera 1,5 m, stvarajući energiju od 26,487 J do 105,948 J po udarcu. Brzo udarno zbijanje može se koristiti za zbijanje rahlog tla do dubine od približno 4 do 6 metara. RIC se provodi pomoću hidrauličnog čekića za zabijanje pilota koji je postavljen na bageru i udara kružnu ploču postavljenu na tlo. Čekić udara u ploču od 40 do 60 puta u minuti. Slika 1. prikazuje uređaj za brzo udarno zbijanje i udarnu stopu s kapom preko koje se prenosi udarno opterećenje.

RIC ispitivanje se može koristiti za poboljšanje nosivosti i smanjenje likvefakcijskog potencijala rastresitog tla. Slijed zbijanja tla se obavlja na način da se najprije zbija donja zona tla, a nakon toga gornje (površinske) zone tla. Promatranje i neposredan prikaz podataka u kabini rukovatelja tijekom zbijanja tla omogućuju kontrolu zbijanja, ekonomičnu primjenu alata za zbijanje i kontrolu kvalitete tog procesa. Ukupna dubina prodiranja, broj udaraca i ukupno slijeganje nakon udarca definiraju kriterij zaustavljanja.

Brzo udarno zbijanje je proces koji djeluje "s vrha na dno", dok se dinamičko zbijanje (eng. *dynamic compaction* - DC) odvija "s dna prema vrhu". Prvim udarcima u brzom udarnom zbijanju stvara se klin zbijenog tla neposredno ispod stope za zbijanje. Svakim sljedećim udarcem čekića dopire klin do dubljih slojeva koji se zbijaju. Ovaj proces se nastavlja sve do trenutka kada se s povećanjem broja udaraca postiže vrlo malo prodiranje stope [3]. Falkner i suradnici [4] predstavili su teorijska istraživanja brzog udarnog zbijanja koja obuhvaćaju numeričke računalne

simulacije utjecaja udarnog zbijanja, prijenosa energije u tlo te širenja valova. Eksperimentalna ispitivanja na tlima različitim karakteristikama osiguravaju provjeru teorijskih analiza. Takva ispitivanja su temelj za optimiziranu i ekonomičnu primjenu u praksi. Studije slučajeva različitih građevinskih projekata pokazale su uspješnu primjenu brzog udarnog zbijanja na srednje duboko poboljšanje i zbijanje tla. Simpson [5] je prikazao studiju slučaja o primjeni brzog udarnog zbijanja (RIC) na području formiranom nasipavanjem (površine 1,21 km²) u Kaliforniji, SAD. Prikazani su rezultati CPT pokusa prije i poslije primjene ove metode, kao i razlike likvefakcijskog potencijala. U nastavku su obrazloženi rezultati zabilježenih vibracija tijekom zbijanja. Zaključeno je da je RIC održiva i ekonomična metoda poboljšanja tla i ublažavanja likvefakcije. U ovom se radu, metoda RIC primjenjuje za poboljšanje tla na gradilištu u blizini Dubajja, u Ujedinjenim Arapskim Emiratima kako bi se poboljšala nosivost tla i smanjilo slijeganje. Ciljevi ovog rada su:

- ocijeniti učinak ove metode na nosivost tla i slijeganje
- odrediti dubinu poboljšanog tla uzimajući u obzir postojeće karakteristike tla
- definirati postupak o tome kako primijeniti ovu metodu u slučaju visoke razine podzemne vode
- ocijeniti utjecaj vibracija od brzog udarnog zbijanja (RIC).

2. Opis projekta

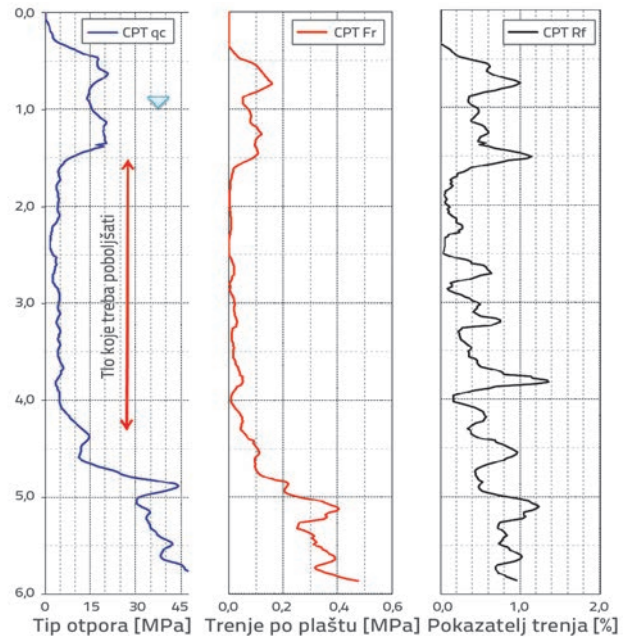
U sklopu razvojnog projekta Jumeirah Parka predložena je izgradnja 134 vile na području uz Ulicu Sheik Mohammed Bin Zayed u Dubajju, kao što je prikazano na slici 2. Na nekim mjestima na gradilištu na dubini od 1 m do 4,5 m nalazi se sloj vrlo rahlog do rahlog sitnog do srednjeg pijeska. Ove karakteristike tla mogu se odrediti primjenom standardnog penetracijskog pokusa (SPT) i statičkog penetracijskog pokusa (CPT) kao što je prikazano na slici 3. i tablici 1. Na gradilištu se nije naišlo na koherentno tlo. Razina podzemne vode nalazi se na dubini od 0,5 do 2 metra ispod razine tla.



Slika 1. a) stroj za brzo udarno zbijanje; b) stopa za zbijanje s udarnom kapom



Slika 2. Prikaz gradilišta na karti, Dubai, UAE (izvor: google map)



Slika 3. Profil tla predstavljen rezultatima statičkog penetracijskog pokusa (CPT)

Tablica 1. Profil tla predstavljen rezultatima standardnog penetracijskog pokusa (SPT)

Dubina [m]	R.L. [m DMD]	Log	Stratigrafija	N	Dubina	
					od [m]	do [m]
1,00	3,460	▼	Srednje zbijen, smeđi, prašnasti, šljunčani, sitni do srednji, gipsani, silikatni karbonatni pijesak. Šljunci su sitni do srednji od gipsanog silikatnog kalkarenita.	15	0,00	0,45
				16	0,00	0,40
1,30	3,160	☺☺☺	Smeđi, blago prašnasti, vrlo pjeskoviti, sitni do srednji ŠLJUNAK od kristala gipsa.	4	1,00	1,45
2,00	2,460		Rahli, smeđi, vrlo šljunkoviti, prašnasti, sitni do srednji, gipsani, silikatni, karbonatni PIJESAK	6	1,50	1,95
					1,70	2,00
4,00	0,690		Rahli do srednje zbijeni, smeđi, prašnasti, šljunčani, sitni do srednji, gipsani, silikatni, karbonatni PIJESAK. Šljunci su sitni do srednji od silikatnog kalkarenita.	9	2,00	2,45
				11	2,50	2,95
				10	2,70	3,00
				11	3,00	3,45
5,15	-0,690		Srednje do vrlo zbijeni, smeđi, prašnasti, sitni do srednji gipsani silikatni karbonatni PIJESAK.	19	3,50	3,95
				32	4,00	4,45
6,00	-1,540		Srednje zbijeni, smeđi, prašnasti, vrlo šljunkoviti, sitni do srednji silikatni, karbonatni PIJESAK. Šljunci su sitni do srednji od gipsani, silikatnog kalkarenita.	32	4,50	4,95
				30	4,70	5,00
				28	5,00	5,45
			kraj bušotine u 6,00 m		5,50	5,95
					5,70	6,00
					5,80	

R.L. - smanjena razina (eng. Reduced Level); DMD - referentna točka za područje Dubaija (eng. Dubai Municipality Datum); N - broj udaraca

2.1. Regionalna geologija

Na regionalnu geologiju Ujedinjenih Arapskih Emirata znatno su utjecali morski nanosi koji su povezani s kontinuiranim promjenama razine mora u relativno nedavnom geološkom razdoblju. Bez obzira na postojeći brdoviti predio koji se prostire kroz Emirate, zemlja se smatra nizinskim područjem. Geološki uvjeti u Dubajju se uglavnom sastoje od pravocrtne obale presječene zaljevima. Površinski nanosi sastoje se od pješčanih dina sastavljenih od morskog pijeska i praha. Nadalje, erozija, kapilarno penjanje te isparavanje doveli su do taloženja praha u nekim područjima, posebice u blizini zaljeva. Ove površinske naslage sastoje se od naizmjeničnih slojeva kalkarenita, karbonatnog pijeska, pijeska i cementiranog pijeska.

2.2. Projektni kriteriji za temeljenje

Projektanti su predložili da se temeljna stopa izgradi metar ispod postojeće razine zemlje. Temeljna stopa nalazi se na nultoj CPT razini. Projektni kriterij za temeljenje je korištenje kvadratnih temelja samaca (2,5 m x 2,5 m), nosivost temeljnog tla od 200 kPa, a slijeganje ne smije biti veće od 25 mm kako bi se smanjilo diferencijalno slijeganje. Preporučuje se Schmertmannova metoda za proračun slijeganja. Kriteriji nosivosti i slijeganja nisu ispunjeni na temelju postojećih uvjeta tla za 58 vila. Kako bi se poboljšali postojeći uvjeti tla, izvođač je morao istražiti različite opcije koje su ocijenjene na osnovi troškova i vremena izgradnje, jer je završetak izgradnje temelja kritična aktivnost u rasporedu projekta. Razmatrane su slijedeće opcije za poboljšanje nosivosti tla:

- primjena dubokih temelja kao što su piloti umjesto plitkih temelja
- povećanje mase temelja da bi se smanjio kontaktni pritisak
- poboljšanje tla primjenom naprednih tehnologija za nekoherentne materijale kao što su vibracijsko zbijanje (VC), dinamičko zbijanje (DC) i brzo udarno zbijanje (RIC).

3. Ograničenja drugih tehnologija poboljšanja tla

Uzimajući u obzir profil tla koji se sastoji od vrlo rahlog do rahlog sitnog do srednjeg pijeska, razmatrane su tri metode za poboljšanje tla: vibracijsko zbijanje, dinamičko zbijanje i brzo udarno zbijanje. Ti postupci su razmatrani jer su pogodni za nekoherentna tla i dostupni su na domaćem tržištu.

Tablica 2. Ograničenja vibracijskog zbijanja i dinamičkog zbijanja

Metoda	Ograničenja metode za projekt	Učinkovitost [m ² / smjena / stroj]	Troškovi [dolari / m ²]
Vibracijsko zbijanje (VC)	Sadržaj finih čestica u tlu ne smije biti veći od 5 %	700	40
Dinamičko zbijanje (DC)	Oštećenja okolnih konstrukcija zbog velikih vibracija	1,000	30
Brzo udarno zbijanje (RIC)	Bez ograničenja	2,500	15

3.1. Vibracijsko zbijanje

Vibracijsko zbijanje i njegova primjena objašnjeni su u geotehničkoj literaturi, primjerice Massarsch i Fellenius [6] i Massarsch [7, 8]. Ova metoda je efikasna u udjela finih čestica (ne više od 5 %). Vibronabijač prodire do željene dubine uz pomoć mlaza vode koji izlazi iz vrha stošca. Kada dođe do odgovarajuće dubine, vodeni mlaz se smanjuje prije nego što se vibronabijač ukloni, s pauzama u intervalima kako bi se osigurala zadovoljavajuća razina zbijanja na svakoj dubini. Vibronabijač se vadi na površinu, gdje se formira zona zbijenog tla oko točke umetanja. U ovom postupku, čestice tla stvaraju gušću konfiguraciju zbog radijalnih vibracija, što rezultira tlom koje ima veću gustoću i poboljšana mehanička svojstva (čvrstoća na smicanje, krutost i nosivost).

3.2. Dinamičko zbijanje

Dinamičko zbijanje (eng. *dynamic compaction* - DC) metoda je poboljšanja tla koja je postala poznata zbog svoje jednostavnosti, ekonomske isplativosti i primjene do velikih dubina, a popularizirao ju je Menard [9]. Primjenom ove metode tlo se može više puta zbijati teškim teretom težine od 6 do 40 tona, koji udara o tlo na unaprijed određenim točkama, slobodnim padom s visine od 10 do 40 m, kako bi se povećao stupanj zbijenosti i nosivost te kako bi se smanjio potencijal kolapsibilnosti lesa na određenim dubinama poboljšanja [10]. Tablica 2. prikazuje ograničenja vibracijskog zbijanja i dinamičkog zbijanja u usporedbi s brzim udarnim zbijanjem. Vibracijsko zbijanje nije pogodno zato što je udio finih čestica u tlu veći od 5 %. Dinamičko zbijanje se u ovom slučaju ne može koristiti jer se gradilište nalazi u blizini drugih konstrukcija koje bi se mogle oštetiti zbog vibracija. Također, brzo udarno zbijanje je produktivnija i ekonomski isplativija metoda u usporedbi s druge dvije navedene metode. Treba uzeti u obzir da su učinkovitost i ekonomska isplativost procijenjeni za ovaj projekt te mogu varirati za ostale projekte, ovisno o profilu i potrebnoj dubini poboljšanog tla.

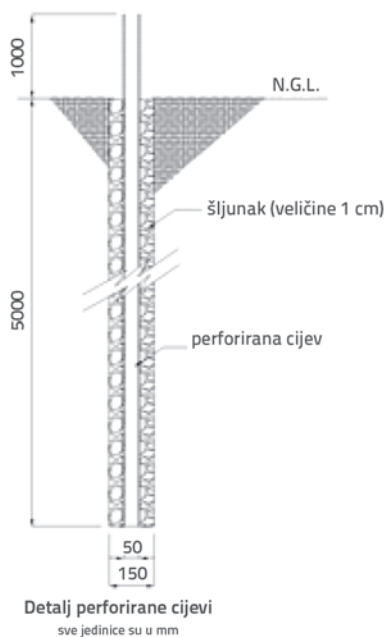
4. Poboljšanje tla primjenom brzog udarnog zbijanja

Uzimajući u obzir cijenu i rokove projekta, izvođač je zaključio kako je primjena brzog udarnog zbijanja (RIC metoda) uz

upotrebu predloženih projektnih kriterija optimalna alternativa. Od analiziranih metoda za poboljšanje tla, odabran je RIC jer ima manje troškove i vrijeme izvođenja. Na gradilištu je primjenom RIC metode poboljšana površina tla od 29 000 m² za 3 tjedna. Statički penetracijski pokus (SPT) proveden je na lokaciji svake buduće vile prije početka zbijanja tla, kako bi se procijenile karakteristike tla i odredio potrebnii stupanj zbijenosti kojim bi se ispunili projektni kriteriji.

4.1. Utjecaj podzemne vode

Razina podzemne vode bitan je faktor kada se razmatra primjenjivost brzog udarnog zbijanja. Visoka razina podzemne vode može djelovati kao hidraulična barijera smanjujući učinkovit prijenos energije na tlo. Prema rezultatima CPT pokusa, razina podzemne vode je visoko, na dubini od 0,5 do 2 m ispod površine. Dakle, energija zbijanja ne može doprijeti dovoljno duboko kako bi poboljšala tlo, zbog razvijanja pornog tlaka tijekom zbijanja. Da bi se smanjio porni tlak tijekom zbijanja, postavljene su četiri iglofilitarske perforirane PVC cijevi promjera 5 cm u blizini svake vile. Otvori promjera 15 cm su izbušeni do dubine 5 m. Slika 4. prikazuje detalje perforiranih cijevi koje služe za oslobađanje pornog tlaka kako bi energija zbijanja mogla dublje prodrijeti.



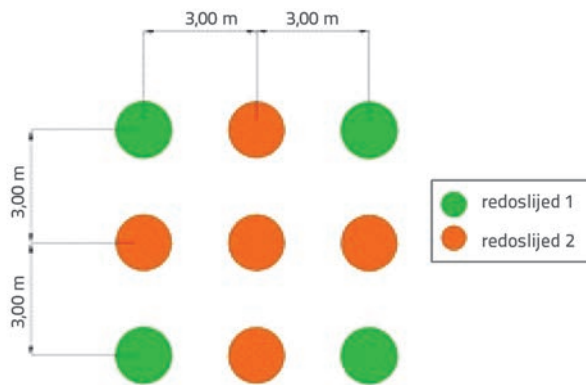
Slika 4. Iglifilitarska perforirana cijev; N.G.L. - Razina prirodnog terena (eng. Natural Ground Level)

4.2. Pokusno ispitivanje brzog udarnog zbijanja

Prethodna ispitivanja su od ključne važnosti ako se planira izvođenje opsežnog brzog udarnog zbijanja, jer pružaju projektantu potrebne informacije za usavršavanje procedure zbijanja. Dvije vile su služile kao pokusno polje za određivanje

kriterija za projektiranje. Osim toga, dok traje glavni dio procesa zbijanja, potrebno je promatranje i nadziranje kako bi se osigurao dobar prijenos energije na tlo i da se ispune izvedbeni zahtjevi. Pokusno zbijanje je važno za procjenu odgovora tla. Optimalni broj udaraca u jednom prolasku obično se uzima kao vrijednost iznad koje je daljnje zbijanje tla neznatno.

Proces zbijanja na pokusnom području počinje zbijanjem u krajnjim točkama na rasteru na udaljenosti od 6 m, a zatim se ubacuju točke na udaljenosti od 3 m, kako bi se osiguralo duboko poboljšanje. Slika 5. prikazuje slijed zbijanja.



Slika 5. Raspored točaka zbijanja

Zbijanje se provodilo u svakoj točki dok nisu zadovoljeni sljedeći kriteriji:

- maksimalni broj udaraca: 60
- maksimalan pomak stope: 800 mm
- maksimalno slijeganje stope: 8 mm.

Treba napomenuti da je maksimalni broj udaraca ograničen na 60 zbog ograničavajućeg očitavanja podataka sustava za prikupljanje podataka. Najveći pomak stope iznosi 800 mm zbog ograničavajuće dubine koju dopušta krak RIC uređaja. Minimalno slijeganje stope je ograničeno na 8 mm jer je dosegnuto nakon trećeg prolaska, gdje je zadovoljen kriterij slijeganja. Također se može primijetiti da se smanjenjem slijeganja na 7 ili 6 mm dobiva veća energija zbijanja koja nije potrebna jer je već ispunjen zadani kriterij. Zbog toga optimalno slijeganje stope iznosi 8 mm.

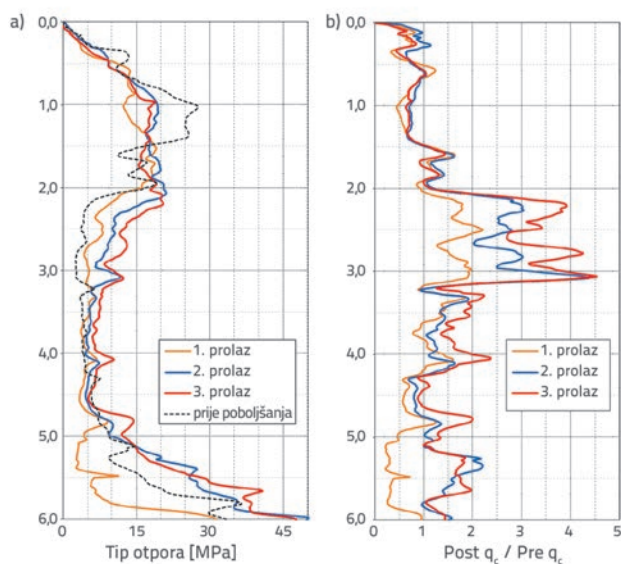
Tablica 3. prikazuje primjer podataka dobivenih RIC sustavom praćenja. Podaci sadrže koordinate točaka, datum i vrijeme procesa, ukupan broj udaraca, konačno slijeganje, konačnu duljinu pomaka stope, prosječnu visinu pada i ukupnu energiju. Raster zbijanja od 3 m i 6 m smatra se jednim prolaskom (redoslijed 1 i 2). Iza svakog prolaska, za vile se provodi jedan statički penetracijski pokus. Kriteriji za projektiranje (slijeganje i nosivost) ispunjeni su nakon trećeg prolaska. Nakon završenog pokusnog ispitivanja, zaključeno je da su potrebna tri prolaska kako bi se ispunio navedeni kriterij zbijanja. Slijed aktivnosti brzog udarnog zbijanja uključuje sljedeće:

- prvi korak: iskop do razine temelja
- drugi korak: ispitivanje statičkim penetracijskim pokusom (CPT) prije poboljšanja

Tablica 3. Primjer zapisa podataka (RIC)

Točka	Koordinate		Datum	Vrijeme	Ukupni broj udaraca	Ukupno slijeganje [mm]	Ukupna dubina [m]	Prosječna visina pada čekića [mm]	Ukupna energija [kJNm]
	Istok	Sjever							
1	483460	2770184	23.10.2013.	14:31:43	17	8	0,553	1130	1728,6
2	483456	2770179	23.10.2013.	14:32:42	21	8	0,207	1176	2223,5
3	483452	2770174	23.10.2013.	14:33:34	13	8	0,118	1164	1362,1
4	483448	2770170	23.10.2013.	14:34:30	19	8	0,186	1175	2008,5
5	483445	2770165	23.10.2013.	14:35:24	18	8	0,182	1155	1870,8
6	483441	2770160	23.10.2013.	14:36:24	18	8	0,196	1147	1858,2
7	483437	2770156	23.10.2013.	14:37:19	20	8	0,213	1159	2086,1
8	483433	2770151	23.10.2013.	14:38:19	23	8	0,258	1143	2366,2
9	483429	2770147	23.10.2013.	14:39:41	21	8	0,205	1147	2168,5
10	483425	2770150	23.10.2013.	14:41:02	15	8	0,147	1110	1499,1
11	483429	2770155	23.10.2013.	14:41:50	16	8	0,199	1132	1630,1

- treći korak: prvi prolaz RIC-a, niveliranje
- četvrti korak: drugi prolaz RIC-a, niveliranje
- peti korak: treći prolaz RIC-a, niveliranje
- šesti korak: ispitivanje tla nakon završenog zbijanja.



Slika 6. a) otpor šiljka prije poboljšanja, nakon prvog, drugog i trećeg prolaska; b) omjer otpora poslije i prije poboljšanja tla

Slika 6. prikazuje otpor šiljka prije poboljšanja, nakon prvog, drugog i trećeg prolaska na pokusnom području. Možemo zaključiti kako je energija prvog prolaska upotrijebljena za razbijanje postojećeg tvrdog sloja na površini (kora) dok su drugi i treći prolasci poboljšali tlo. Slika 6.a prikazuje pad otpora šiljka na dubini 5 - 6 m, nakon prvog prolaska. Do pada dolazi zbog

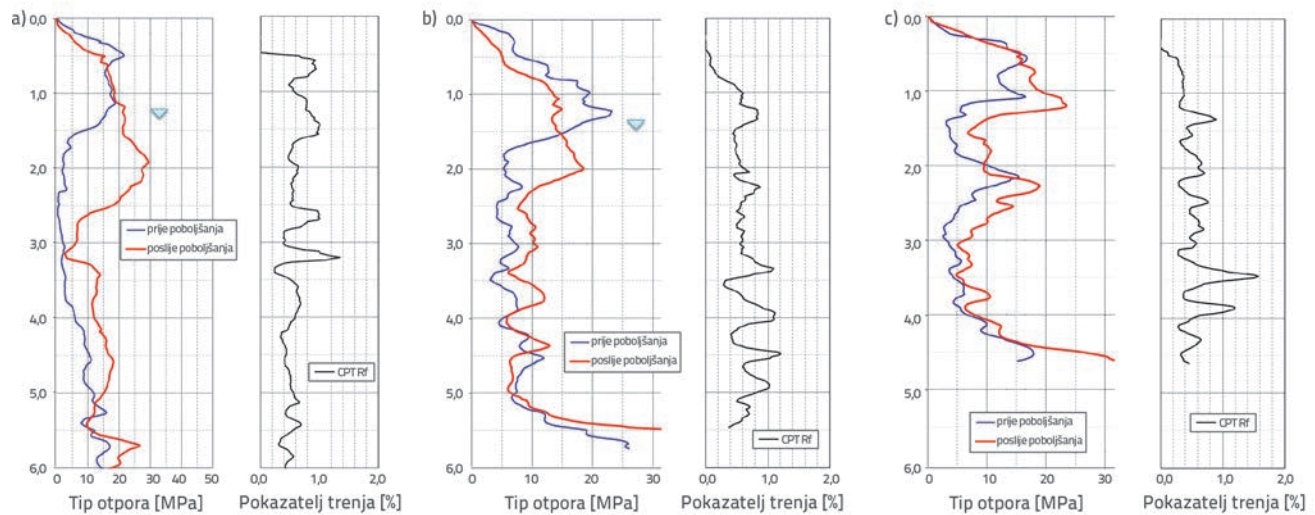
toga što se tlo gura prema dolje nakon što je rahlo tlo zbijeno. Tlo je poboljšano nakon drugog i trećeg prolaska na toj dubini. Slika 6.b prikazuje omjer poslije i prije poboljšanja q_c kako bi se dobio točan uvid u postotak poboljšanja nakon svakog prolaska. Može se primijetiti da treći prolazak ima najveći omjer poboljšanja u usporedbi s prvim i drugim prolaskom. Projektni kriteriji za temeljenje su ispunjeni (slijeganje i nosivost) nakon trećeg prolaska. Stoga je donesen zaključak da su u brzom udarnom zbijanju potrebna tri prolaska kako bi se ispunili projektni kriteriji.

4.3. Faza izvedbe i ispitivanje nakon poboljšanja tla

Nakon završetka pokusnog ispitivanja, zbijanje je obavljeno na gradilištu uzimajući u obzir projektne kriterije koji su navedeni ovom radu (u poglavlju 4.2.), a plan i raspored točaka u kojima se provodi zbijanje prikazan je na slici 5. Ispitivanje je nužno da bi se osigurala potrebna količina energije koja se prenosi na tlo te da bi se zadovoljili svi izvedbeni zahtjevi. Stupanj zbijenosti tla ocjenjuje se usporedbom rezultata statičkih penetracijskih pokusa poboljšanja te proračunom očekivanih slijeganja.

Po jedno CPT ispitivanje je provedeno za svaku od vila da bi se dobili rezultati poboljšanja tla nakon brzog udarnog zbijanja. Nakon izvedenog poboljšanja slijedilo je CPT ispitivanje do dubine od približno 6 m otprilike dva dana nakon završetka brzog udarnog zbijanja, da bi se omogućila disipacija pornog tlaka. Odgovarajući rezultati CPT ispitivanja nakon poboljšanja pokazuju povećanje otpora šiljka na istim dubinama.

Slike 7.a do 7.c prikazuju uspoređene rezultate statičkog penetracijskog pokusa prije i nakon poboljšanja. Rezultati prije poboljšanja pokazuju da se na dubinama između 1,5 i 3,5 m nalazi rastresito tlo. Cilj je poboljšati taj sloj tla i ispuniti projektne uvjete. Očito je da je otpor šiljka znatno povećan na dubinama između metra i 5 metara ispod površine. Kao što je

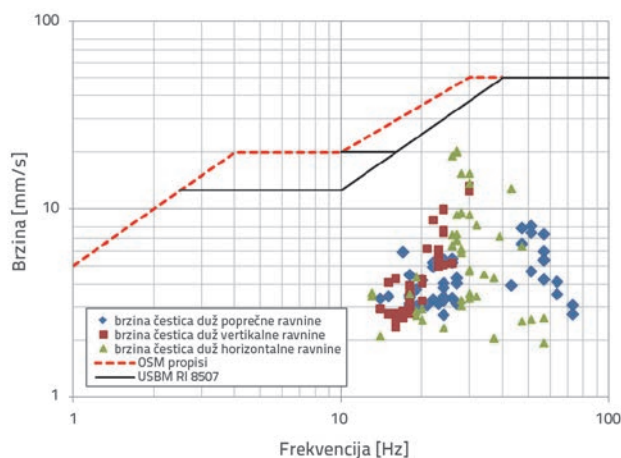


Slika 7. Otpor šiljka prije i nakon poboljšanja

prikazano na slikama, značajno poboljšanje je postignuto kad je pokazatelj trenja (R_f) manji od 1 %. Umjereno poboljšanje tla postiže se kad je R_f između 1 % i 2 %.

4.4. Mjerenje vibracija

Tijekom procesa zbijanja na pokusnom području bilježe se vibracije kako bi se procijenila mogućnost oštećenja cesta, konstrukcija i ostalih objekata koji se nalaze u blizini gradilišta. Seizmografi su bili postavljeni na udaljenosti od 8,5 metara od točke zbijanja kako bi se dobila vršna brzina lebdećih čestica (eng. *peak particle velocity* - PPV), parametar koji se najčešće koristi za procjenu učinaka vibracija na konstrukcije. Maksimalna PPV brzina tijekom zbijanja iznosila je 20 mm/s. Prema propisima *Building Research Establishment* [11], PPV brzine koje prelaze 50 mm/s uzrokuju oštećenja armiranobetonskih i okvirnih konstrukcija. Zabilježene PPV brzine i frekvencije su ispod najvišega dopuštenog praga, koji je dan propisima U.S. Bureau of Mines (USBM), Office of Surface Mining (OSM) u "Izveštaju o ispitivanju (RI) 8507" [12] kao što se vidi na slici 8.



Slika 8. Zabilježene vibracije u usporedbi sa USBM RI8507 standardima

4.5. Proračun slijeganja

Schmertmann [13, 14] je proučavao raspodjelu vertikalnog napreznja unutar linearnoelastičnog poluprostora pod jednolikim tlakom te je razvio metodu za procjenu slijeganja temelja primjenom rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT), a formula glasi:

$$S_e = C_1 C_2 q \sum_0^{\Delta z} \left(\frac{I_z}{E_s} \right) \Delta z \quad (1)$$

gdje S_e predstavlja trenutačno slijeganje (u metrima), C_1 faktor korekcije dubine, C_2 faktor puzanja tla, q predstavlja primjenjeni tlak (200 kPa), $\Delta z = q_c$ razmak mjerenja (0,02 m), I_z je faktor utjecaja deformacije, E_s je modul elastičnosti. Jednadžba (2) daje faktor korekcije za dubinu temelja. Jednadžba (3) određuje faktor korekcije za izračun puzanja tla, a vrijeme (t) za izračun slijeganja je 10 godina. Jednadžba se temelji na sugestijama investitora jer ne postoje dostupne informacije o puzanju tla u ovom projektnom području.

$$C_1 = 1 - 0.5 \left(\frac{\gamma D_f}{q} \right) \quad (2)$$

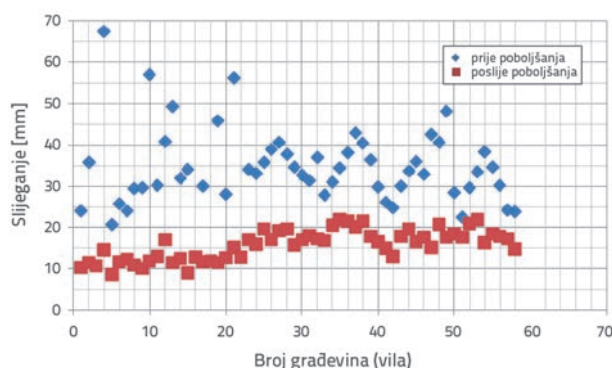
$$C_2 = 1 + 0.2 \log \left(\frac{t}{0.1} \right) \quad (3)$$

Zrnati slojevi tla do dubine od $2B$ ispod temelja podijeljeni su u nekoliko slojeva primjenom podataka iz CPT ispitivanja za odnos otpora šiljka (q_c) i dubine. Unutar svakog sloja tla vrijednost otpora šiljka (q_c) treba biti približno ista. Vrijednosti faktora utjecaja deformacije, dobivene za omjer $L/B = 1$, prikazane su u tablici 4. (L - duljina temelja, B - širina temelja). Nakon što su određeni slojevi i profil tla, može se odrediti vrijednost I_z na sredini svakog sloja. Za osnosimetrične temelje ($L/B = 1.0$) koristi se jednadžba (4) za određivanje modula elastičnosti E_s iz q_c :

$$E_s = 2,5 q_c \quad (4)$$

Tablica 4. Referentne vrijednosti faktora utjecaja deformacije I_z

(L/B) omjer	I_z vrijednost	Dubina z
1	0,1	0
	0,5	0,5 B
	0,0	2 B



Slika 9. Vrijednosti slijeganja prije i nakon provedenog CPT pokusa

Treba napomenuti da se jednadžba (4) koristi za izračun modula elastičnosti E_s , primjenom električnog CPT šiljka za mjerenje vrijednosti otpora vrha šiljka. Proračun slijeganja proveden je za zemljišta budućih 58 vila, primjenom rezultata CPT ispitivanja prije i nakon poboljšanja tla. Schmertmannova metoda primijenjena je za izračun slijeganja za tlak od 200 kPa te temeljnu stopu dimenzija (2,5 m x 2,5 m). Slika 9.

prikazuje usporedbu slijeganja prije i očekivana slijeganja nakon poboljšanja tla za 58 vila. Očito je kako je brzo udarno zbijanje smanjilo očekivana slijeganja, u prosjeku za 45 %, čime je ispunjen projektni kriterij za sve vile (25 mm).

5. Zaključak

Brzo udarno zbijanje je ekonomski isplativa tehnologija za poboljšanje tla. U radu je predstavljena učinkovita uporaba takve tehnologije uz ispunjavanje projektnih kriterija za smanjenjem troškova temeljenja i potrebnog vremena izgradnje. Rezultati na terenu prije i nakon poboljšanja tla pokazuju poboljšanje na dubini do 5,0 m. Proračuni slijeganja pokazali su da metoda brzog udarnog zbijanja smanjuje očekivano slijeganje u prosjeku za 45 %, što je značajno. Znatno poboljšanje tla se postiže kada je pokazatelj trenja R_f manji od 1 %. Blago poboljšanje događa se kad je omjer trenja između 1 % i 2 %. Brzo udarno zbijanje (RIC) je jeftinija i efikasnija varijanta u odnosu na ostale metode poboljšanja tla, kao što su dinamičko zbijanje i vibracijsko zbijanje. Također ima manji učinak vibriranja nego dinamičko zbijanje. Tijekom brzog udarnog zbijanja niti jedan objekt u blizini gradilišta nije oštećen. Razina podzemne vode također je vrlo važan faktor kad govorimo o prikladnosti RIC metode. Visoka razina podzemne vode može djelovati poput hidraulične barijere smanjujući prijenos efektivne energije na tlo. Instalacijom iglofiltra oslobađa se porni tlak nastao izgradnjom te se omogućava bolji prijenos energije zbijanja do potrebne dubine.

LITERATURA

- [1] Watts, K., Charles, J.: Initial Assessment of a New Rapid Impact Ground Compactor, *Proceedings of the Conference on Engineered Fills*, London, pp. 399-412, 1993.
- [2] Braithwaite, E., DuPreez, R.: Rapid impact compaction in southern Africa, *Proceedings of the Conference on Geology for Engineering, Urban Planning and the Environment*, South African Institute of Engineering Geologists, 1997.
- [3] Serridge, C., Synac, O.: Application of the Rapid Impact Compaction (RIC) Technique for Risk Mitigation in Problematic Soils, *The 10th IAEG International Congress*, Nottingham, pp. 294, 2006.
- [4] Falkner, F., Adam, C., Paulmich, I., Adam, D., Fürpass, J.: Rapid impact compaction for middle-deep improvement of the ground – numerical and experimental investigation. *The 14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering "From Research to Design in European Practice"*, Bratislava, pp. 10, 2010.
- [5] Simpson, L., Jang, S., Ronan, C., Splitter, L.: Liquefaction Potential Mitigation Using Rapid Impact Compaction, *Proceeding of the Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, Sacramento, pp. 1-10, 2008.
- [6] Massarsch, K., Fellenius, B.: Vibratory Compaction of Coarse-Grained Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 39 (2002) 3, pp. 695-709.
- [7] Massarsch, K.: Deep Soil Compaction Using Vibratory Probes, *American Society for testing and Material, ASTM, Symposium Deep Foundation Improvements: Design, Construction, and Testing*, 1991.
- [8] Massarsch, K.: Effects of Vibratory Compaction, *TransVib 2002 – International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction*, Louvain-la-Neuve. Keynote Lecture, pp. 33-42, 2002.
- [9] Menard, L., Broise, Y.: Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation, *Geotechnique*, 25 (1975) 1, pp. 3-18.
- [10] Lutenegeger, A.: Dynamic compaction in friable loess, *Journal of Geotechnical Engineering*, 112 (1986) 6, pp. 663-667.
- [11] BRE Report BR458, *Specifying Dynamic Compaction*, Building Research Establishment, Garston, 2003.
- [12] Siskind, D., Stagg, M., Kopp, J., Dowding, C.: Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting, *RI 8507 U.S. Bureau of Mines*, Washington, D.C., (1980)
- [13] Schmertmann, J.: Static Cone to Compute Static Settlement over Sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96 (1970) 3, pp. 1011-1043.
- [14] Schmertmann, J., Hartman, J., Brown, P.: Improved Strain Influence Factor Diagrams, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE 104 (1978) GT8, pp. 1131-1135.