

Određivanje potencijala likvefakcije pomoću statičkog penetracijskog pokusa

Kristina Vulić¹, izv. prof. dr. sc. **Lovorka Librić²**

¹*Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, kristina.vulic@grad.unizg.hr*

²*Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, lovorka.libric@grad.unizg.hr*

Sažetak

U prosincu 2020. godine Sisačko-moslavačku županiju pogodio je potres magnitude 6.2 po Richteru. Taj potres uzrokovao je likvefakciju, prirodni fenomen u zasićenim zrnatim tlima, gdje pijesak ispod razine podzemne vode privremeno gubi svoju čvrstoću i ponaša se kao tekućina. Osjetljivost tla na likvefakciju određuje se kroz likvefakcijski potencijal. Rad se fokusira na područje ulica Milana Makanca i Slavka Kolara gdje je došlo do izbacivanja pijeska na površinu, koristeći rezultate statičkog penetracijskog pokusa za određivanje potencijala likvefakcije.

Ključne riječi: likvefakcija, CPT, likvefakcijski potencijal, potres

Determination of liquefaction potential using a static penetration test

Abstract

In December 2020, the Sisak-Moslavina County was struck by a 6.2 magnitude earthquake on the Richter scale. This earthquake caused liquefaction, a natural phenomenon in saturated granular soils, where sand below the groundwater level temporarily loses its shear strength and behaves like a liquid. The susceptibility of soil to liquefaction is determined through its liquefaction potential. The paper focuses on the area of Milana Makanca Street and Slavka Kolara Street, where sand was ejected to the surface, using the results of static penetration tests to determine the liquefaction potential.

Key words: kliquefaction, CPT, liquefaction potential, earthquake

1 Uvod

Na području sisačko-moslavačke županije u prosincu 2020. godine dogodio se potres magnitude 6.2 po Richteru, kojemu su prethodila dva potresa manjih intenziteta od 4.7, odnosno 5.2. Kao posljedica potresa, došlo je do pojave likvefakcije na širem području županije. Likvefakcija, kao proces u tlu, smatra se prirodnim fenomenom koji nastaje u zrnatim materijalima, zasićenim vodom, tijekom udara potresa. Pijesak ispod razine podzemne vode se trenutno i privremeno ponaša kao "gusta tekućina" te gubi svoju posmičnu čvrstoću, a time i sposobnost podupiranja temelja građevina. Kako bi se likvefakcija ostvarila na nekom području potrebno je istodobno ostvarenje dva faktora; materijal mora biti potpuno zasićen vodom i potres odgovarajuće magnitude koji se iskazuje vršnim seizmičkim ubrzanjem. Kako bi se mogla odrediti osjetljivost nekog tla na pojavu likvefakcije definira se likvefakcijski potencijal tla. Općenito se u praksi, prilikom određivanja likvefakcijskog potencijala, koriste empirijski, likvefakcijski dijagrami zasnovani na terenskim korelacijama pojave likvefakcije s rezultatima in-situ pokusa te se isti ažuriraju s vremenom [1]. U ovom radu razmatrat će se područje sisačko-moslavačke županije u kojem se ostvarila likvefakcija, točnije područje ulice Milana Makanca i ulice Slavka Kolara, gdje je došlo do izbacivanja pijeska na površinu tla. U radu će se prikazati određivanje likvefakcijskog potencijala pomoću rezultata statičkog penetracijskog pokusa (CPT).

2 Statički penetracijski pokus

Statički penetracijski pokus, CPT, vrlo je jednostavan, vremenski nezahtjevan i ekonomičan pokus, pomoću kojeg se mogu dobiti kontinuirani podaci o tlu po dubini. Izvođenje ispitivanja provodi se na način da se utiskuje posebna sonda u tlo (brzinom od 20 mm/s) istovremeno mjereći otpor utiskivanju na šiljku sonde, q_c , i trenje po plaštu sonde, f_s . U slučaju kada je sonda opremljena uređajem za mjerenje tlaka vode, radi se o CPTU ispitivanju, odnosno o statičkom penetracijskom ispitivanju s mjerenjem pornog tlaka. Uz prednosti ispitivanja kao što su brza, kontinuirana, ponovljiva i pouzdana mjerenja te ekonomičnost i dobra teoretska osnova za interpretaciju, postoje nedostaci CPT ispitivanja kao što su ograničenost u šljuncima i cementiranim tlima, zahtjevanje vještih rukovatelja, velika početna ulaganja u opremu te ne dobivanje uzorka tla. Zbog već spomenutih razloga, u geotehnici je učestalo korištenje statičkog penetracijskog pokusa, a osnovna primjena odražava se u određivanju profila tla i identifikaciji slojeva tla, određivanju mehaničkih i fizičkih svojstava tla te parametara tečenja i konsolidacije tla, ali i u pokazivanju osjetljivosti tla na likvefakciju [2]. Zbog svoje ponovljivosti, pouzdanosti i primjena CPT može prevladati probleme kašnjenja koji se često susreću kod bušenja i laboratorijskih ispitivanja tla.

3 Potencijal likvefakcije na temelju rezultata CPTU-a

Prilikom određivanja osjetljivosti tla na likvefakciju osnovu čini izračun koeficijenta cikličke otpornosti tla, CRR, kako bi se definirala otpornost tla na cikličko opterećenje, te koeficijent cikličkog naprezanja, CSR. Kada su poznati koeficijenti otpornosti i naprezanja, isti se uspoređuju te u slučaju kada je $CSR > CRR$ može se zaključiti da je tlo podložno likvefakciji [3].

Na Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu razvijen je algoritam u programskom jeziku Python za automatsko izračunavanje vjerojatnosti pojave likvefakcije tla [4]. Osim rezultata CPTU ispitivanja, ulazni parametri za proračun su magnituda potresa, maksimalno ubrzanje tla i razina podzemne vode.

Algoritam započinje klasificiranjem tla na temelju CPTU ulaznih podataka i određuje profil uslojenosti tla [5]. Za izračun potencijala likvefakcije, algoritam koristi lokalizirane CPTU korelacije za određivanje kontinuiranog profila zapreminske gustoće tla po dubini [6] i profila postotka sitnih čestica po dubini [7].

Proračun CRR-a i CSR-1 prikazan je u [3]:

$$CRR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = \exp\left(\frac{q_{C1Ncs}}{113} + \left(\frac{q_{C1Ncs}}{1000}\right)^2 - \left(\frac{q_{C1Ncs}}{140}\right)^3 + \left(\frac{q_{C1Ncs}}{137}\right)^4 - 2.80\right) \quad (1)$$

gdje je q_{C1Ncs} korigirana otpornost utiskivanju na šljku sonde za čisti pijesak i

$$CSR_{M=7.5, \sigma'_v=1atm} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d \frac{1}{MSF} \frac{1}{K_\sigma} \quad (2)$$

gdje je a_{max} maksimalno ubrzanje tla, r_d faktor redukcije naprezanja ovisan o dubini, MSF faktor skaliranja magnitude potresa i K_σ faktor korekcije nadsloja.

Nakon što je definirana ciklička otpornost tla i cikličko naprezanje, može se odrediti faktor sigurnosti tla na likvefakciju kao odnos ta dva parametra:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3)$$

Prema [8] predložena je klasifikacija tla koja se bazira na probablističkom pristupu obzirom na vjerojatnost pojave likvefakcije i faktoru sigurnosti. Vjerojatnost pojave likvefakcije može se odrediti determinističkim pristupom, a dana je izrazom:

$$PL = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{FS}{A}\right)^B\right]} \quad (4)$$

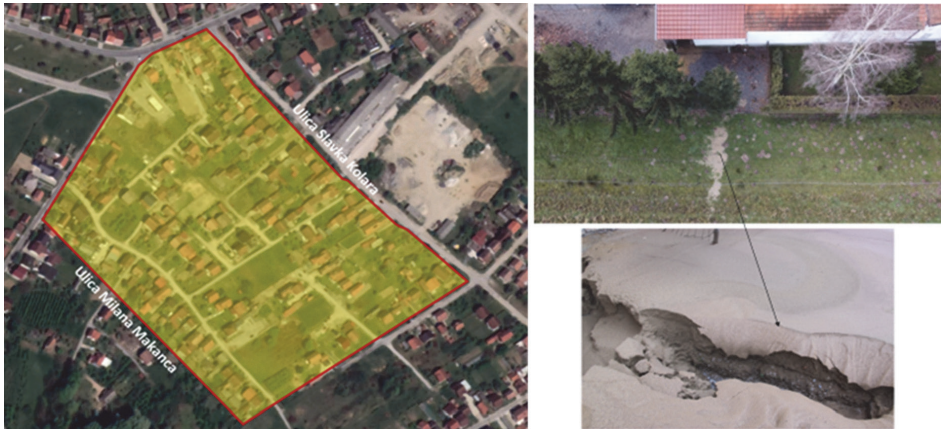
Gdje su $A = 1.0$ i $B = 3.3$ odabrani regresijski koeficijenti. Prema [8] dane su klase tla na temelju vjerojatnosti pojave likvefakcije prikazane u tablici 1.

Tablica 1. Klasifikacija tla prema vjerojatnosti likvefakcije

Vjerojatnost likvefakcije	Klasa	Opis
$0.85 \leq PL$	5	Gotovo sigurno će tlo likvefirati
$0.65 \leq PL < 0.85$	4	Vrlo je izgledno da će tlo likvefirati
$0.35 \leq PL < 0.65$	3	Likvefakcija / ne-likvefakcija je jednako vjerojatna
$0.15 \leq PL < 0.35$	2	Nije izgledno da će tlo likvefirati
$PL < 0.15$	1	Gotovo sigurno tlo neće likvefirati

4 Primjer ostvarene likvefakcije u području Sisačko-moslavačke županije

Već spomenuti potres iz 2020. godine i svi popratni potresi uzrokovali su brojne štete na infrastrukturi diljem sisačko-moslavačke županije. Na dijelu županije, između ulice Milana Makanca i ulice Slavka Kolara (slika 1. lijevo), na nizu mikrolokacija došlo je do pojave likvefakcije, odnosno uočen je izbačeni pijesak na površini tla što je vidljivo na slici 1 (desno) [9].



Slika 1. Zona predmetne lokacije (lijevo), primjer pojave likvefakcije na površini (desno) [10]

Navedene ulice nalaze se u gradu Petrinji, u blizini rijeke Kupe. Od rijeke Kupe ulice su udaljene približno 1.4 km. Aluvij rijeke Kupe sastoji se pretežito od čistog pijeska, a djelomično i od praha ili šljunkovitog pijesaka. Vidljivo je da je riječ o prostoru grada Petrinje koji je naseljen obiteljskim kućama što dodatno naglašava važnost analiziranja likvefakcijskog potencijala lokacije, odnosno definiranja otpornosti na likvefakciju.

Kako bi se mogao odrediti potencijal likvefakcije i sastav temeljnog tla predmetne lokacije, provedeni su geotehnički istražni radovi [2]. Provedena su geotehnička istražna bušenja s kontinuiranim jezgrovanjem, SPT testom i uzimanjem uzoraka, ispitivanja statičkim penetracijskim testom s mjerenjem pornog tlaka (CPTU), laboratorijska ispitivanja uzorka i geofizička ispitivanja, točnije seizmička refrakcija i multikanalna analiza površinskih valova. Ispitivanje statičkim penetracijskim testom s mjerenjem pornog tlaka, CPTU, provedeno je na 10 mjernih mjesta predmetne lokacije dubine od 10 do 14 metara (slika 2).



Slika 2. Pozicije mjernih mjesta istražnih radova na lokaciji Ulica Milana Makanca i ulica Slavka Kolara [9]

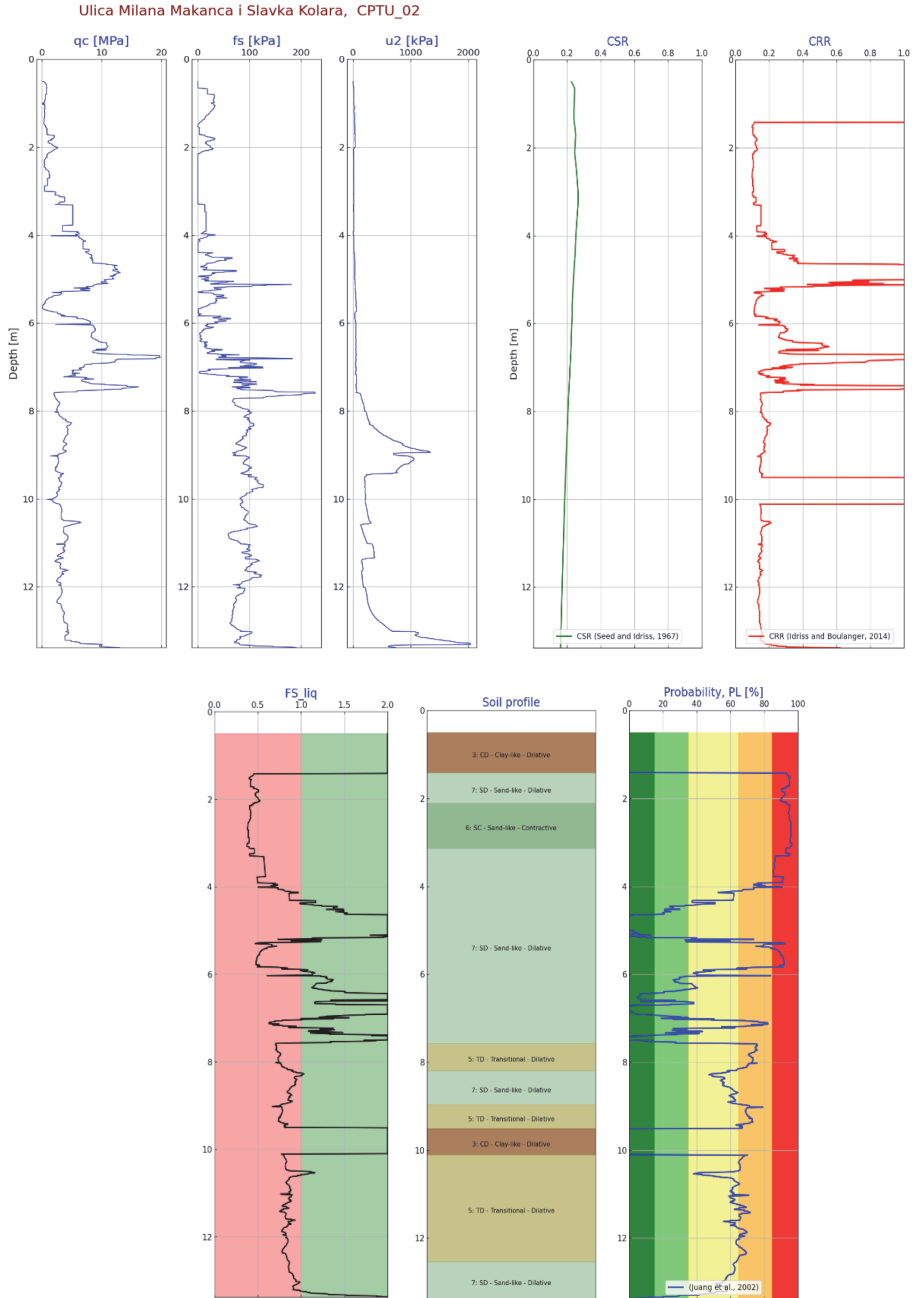
Profil tla se sastoji od izmjene slojeva sitnozrnih i pjeskovitih materijala. Uz navedeno određen je kontinuirani profil zapreminske težine po dubini i profil postotka sitnih čestica. Za predmetnu lokaciju proračunate su vrijednosti koeficijenta cikličke otpornosti, CRR, i cikličkog naprezanja, CSR, na temelju odabrane magnitude potresa i horizontalnog ubrzanja tla od 0.15g što odgovara projektnom

ubrzanju tla na razini temeljne stijene predmetne lokacije. Prilikom određivanja navedenih parametara, razina podzemne vode je postavljena na površini terena. Iz tablice 2. je vidljivo kako se za određene potresne uvjete, odnosno za određeno potresno opterećenje koje odgovara 475-godišnjem povratnom periodu predmetne lokacije, bez uzimanja u obzir amplifikacije potresne pobude na putu prema površini terena, može očekivati ponovna pojava likvefakcije i to s izrazito visokom vjerojatnošću.

Na slici 3. su na mjernom mjestu CPTU-02 prikazani izmjereni otpor na šiljku q_c , trenje na plaštu f_s i porni tlak u_2 , te izračunati koeficijenti CSR i CRR, profil tla, faktor sigurnosti na likvefakciju i vjerojatnost pojave likvefakcije po dubini. U tablici 2. su za odabrane magnitudo potresa prikazane maksimalne vjerojatnosti pojave likvefakcije i pripadna klasifikacija tla.

Tablica 2. Rekapitulacija rezultata ocjene likvefakcijskog potencijala za mjerno mjesto CPT-02

CPTU lokacija	M	a_g	max PL [%]	Klasa
CPTU 2	6.0	0.15	95	5
			95	5
			80	4
			70	4
	5.0	0.15	95	5
			95	5
			70	4
			60	3
	4.0	0.15	95	5
			90	5
			60	3
			45	3
			60	3
			45	3



Slika 3. Rezultati CPT ispitivanja i procjene vjerojatnosti pojave likvefakcije na mjernom mjestu CPTU-02

5 Zaključak

Ovim radom dan je detaljan uvid u pojednostavljenu metodu određivanja potencijala likvefakcije temeljene na cikličkom naprezanju, u korelaciji sa statičkim penetracijskim pokusom, CPT. Navedena metoda je dugo godina u primjeni, ali se tek nakon potresnog događaja, na području Sisačko-moslavačke županije, pojačala implementacija iste za analizu osjetljivosti tog područja na likvefakciju tla. Procjena osjetljivosti na likvefakciju zahtjeva detaljnu karakterizaciju lokacije kroz provedbu opsežnih geotehničkih laboratorijskih i terenskih istraživanja kako bi se dobio što detaljniji uvid u sastav tla koji igra značajnu ulogu u procjeni likvefakcije. U radu je prikazan primjer likvefakcije na području pogođenom potresom, točnije između Ulice Milana Mikanca i Ulice Slavka Kolara. Zaključeno je kako je to područje podložno ponovnoj pojavi likvefakcije prilikom potresnog djelovanja koje odgovara 475-godišnjem povratnom periodu i to bez razmatranja amplifikacije potresne pobude čime se zaključuje kako neka lokacija pogođena likvefakcijom nije oslobođena od ponovne pojave iste.

Literatura

- [1] Bačić, M., Ivšić, T., Kovačević, M. S.: Geotehnika kao nezaobilazan segment potresnog inženjerstva, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 10, pp. 923-936
- [2] Librić, L., Jurić-Kačunić, D., Kovačević, M. S.: Primjena rezultata statičkog penetracijskog pokusa za klasifikaciju tla, *GRAĐEVINAR*, 69 (2017) 1, pp. 11-20
- [3] Boulanger, R.W., Idriss, I.M.: *CPT and SPT based liquefaction triggering procedures*, No. UCD/CGM-14/01, University of California, Davis, California, 2014.
- [4] Librić, L., Bačić, M. Kovačević, M.S.: Utilization of CPTU for evaluation of liquefaction probability below the flood protection embankment in Croatia, *3rd International Conference on Natural Hazards and Infrastructure*, Athens, 2022.
- [5] Kovačević, M.S., Bačić, M., Librić, L., Žužul, P., Gavin, K., Reale, C.: A novel algorithm for vertical soil layering by utilizing the CPT data, *6th International Conference on Road and Rail Infrastructure - CETRA 2020*, Zagreb: University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering, 2020, pp. 327-334
- [6] Kovačević, M.S., Gavin, K.G., Reale, C., Librić, L.: The use of neural networks to develop CPT correlations for soils in northern Croatia, *4th International Symposium on Cone Penetration testing*, Delft, The Netherlands: CRC Press, 2018. pp. 377-382
- [7] Kovačević, M.S., Gavin, K., Reale, C., Librić, L., Jurić Kačunić, D.: Developing correlations between the soil fines content and CPT results using neural networks, *Proceedings of the XVII ECSMGE-2019*, Reykjavik 2019.244, 8

- [8] Juang, C.H., Jiang, T., Andrus, R.D: Assessing probability-based methods for liquefaction evaluation, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128 (2002)7, pp. 580-589
- [9] Geotehnički elaborat, GEL-14/2021, Centar građevinskog fakulteta, Zagreb, 2021.