

Potresno djelovanje i geotecnika

Earthquake and geotechnical engineering

Tomislav Ivšić¹

¹ Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet

tomislav.ivsic@grad.unizg.hr

SAŽETAK

U radu se raspravlja geotehnička seizmička problematika te prikazuju primjeri i rezultati detaljnijih geotehničkih istraživanja za seizmičke geotehničke karakterizacije pojedinih lokacija u Hrvatskoj. Osim problema globalne stabilnosti lokacije, ukratko se opisuju i pojedini aspekti cikličkog ponašanja tla, prvenstveno za procjene tlaka porne vode u nedreniranim uvjetima, te pojave likvefakcije. Naglašava se da je u sadašnju geotehničku praksu potrebno u većoj mjeri uključiti terenska i laboratorijska dinamička ispitivanja temeljnog tla.

KLJUČNE RIJEČI seizmičko geotehničko inženjerstvo, dinamička karakterizacija, likvefakcija, seizmički odziv lokacije

ABSTRACT

In this paper, seismic geotechnical issues are discussed. Examples and results of detailed geotechnical investigations for seismic geotechnical characterization of specific sites in Croatia are presented. The problems of global site stability are shortly described, as well as particular aspects of cyclic soil behavior, such as the build-up of pore water pressures and liquefaction phenomena. It is strongly suggested that current geotechnical practice should include more extensive field and laboratory dynamic testing of ground profile.

KEYWORDS seismic geotechnical engineering, dynamic characterization, liquefaction, seismic site response

UVOD

Potresi su geohazardi velike razorne snage za prirodne i umjetne tvorevine na površini Zemlje. Oslobodena energija u velikim dubinama pomiče ploče Zemljine kore duž rasjeda, a generirani seizmički valovi do površine tla prolaze kroz razne geološke formacije. Geološke i geotehničke okolnosti na neposrednoj lokaciji predstavljaju rubne uvjete za specifično ponašanje i pojave u površinskim slojevima, te prijenos potresnog djelovanja iz dubina na površinu tla i građevine koje su na njoj temeljene.

Potresno geotehničko inženjerstvo pojavljuje se kao zasebna disciplina relativno

nedavno te intenzivniji razvoj doživljava u zadnjih pedesetak godina. Razvojem su obuhvaćeni postupci dinamičkih ispitivanja na terenu i u laboratoriju, teorijski i numerički modeli za opisivanje i prognoze dinamičkog ponašanja, te primjene geotehnologija za potrebe sigurne gradnje.

Većina prikupljenih teorijskih i praktičnih saznanja, te primjera iz prakse prikazana je u poznatoj svjetskoj literaturi (npr. Ishihara 1996, Kramer 1996, Towhata 2008), kao i u brojnim radovima u časopisima i na konferencijama.



Slika 1. Granešina, 1880 – srušena crkva na rasjedu (snimio Kirchner, J. J., ova i druge fotografije posljedica potresa 1880. godine u Zagrebu dostupne su u The Earthquake Engineering Online Archive, NISEE)

Unatoč tome, potresno inženjerstvo (a time i njegov geotehnički dio) je disciplina koja 'još uvijek uči', pa i u novije vrijeme svaki jači svjetski potres donosi nova saznanja, a često i promjene u inženjerskoj praksi i propisima.

Osim toga, povećani broj zapisa potresa i razvoj instrumenata, posebice u zadnjim dekadama, poboljšavaju baze podataka za određivanje seizmičnosti, te omogućuju objektivnije određivanje seizmičkog inputa za inženjerske aplikacije.

I Hrvatska je u području povišene seizmičnosti, pa procjena potresne opasnosti i djelovanja na građevine predstavlja obavezni dio građevinskog projektiranja. Iako u zadnjim dekadama kod nas nije bilo jačih potresa s većim štetama, nedavni jaki potresi u srednjoj Italiji ukazuju na vjerojatni scenarij koji nas može zadesiti u dogledno vrijeme.

Kako bi se postiglo smanjenje seizmičkog rizika preventivnom aseizmičkom gradnjom, potrebno je primijeniti novije istraživačke tehnologije i saznanja.

Geotehnički aspekti su bitni za bilo koju procjenu učinaka potresnih djelovanja na građevine, a u ovom se radu naglasak daje na geotehnička istraživanja koja su potrebna da se ti aspekti obuhvate u primjerenom opsegu.

GEOTEHNIČKA SEIZMIČKA PROBLEMATIKA

Geotehničke okolnosti na pojedinoj građevinskoj lokaciji koje tijekom istražnih radova treba odrediti ili ocijeniti su sljedeće:

- a) globalna stabilnost lokacije: pojava aktivnih rasjeda i nestabilne padine
- b) profil temeljnog tla:

- pojave dinamičke nestabilnosti tla (likvefakcija) i prekomjernih slijeganja
- odziv lokalnog tla pri širenju seizmičkih valova od osnovne stijene do površine terena (amplifikacija i modifikacija spektra odziva)

Rasjedi

Posljedice gradnje blizu aktivnog rasjeda ili na njemu ilustrira nam primjer crkve u Granešini koja je teško oštećena u zagrebačkom potresu 1880. godine (slika 1).

Crkva je ponovo izgrađena na istom mjestu, a pukotine od tektonskih pomaka koje su se u međuvremenu pojavile na crkvi (i drugim zgradama u blizini) predmet su novijih geodetskih mjerenja u sklopu Geodinamičke studije prostora grada Zagreba (Pribičević i dr., 2008).

Sličan slučaj je i lokacija crkve u Gorici Svetojanskoj, gdje je u povijesti sagrađeno i srušeno nekoliko crkvi. Tek novijim istraživanjima (Ivšić i dr, 2013) otkriven je rasjed koji generira pomake u temeljnom tlu, a izazvao je i nestabilnosti na padinama.

Ponavljanje grešaka pri izboru lokacije u prošlosti se može opravdati nedostatkom spoznaja, no u današnje vrijeme to ne bi bilo dopustivo. No, ni danas stupanj istraženosti pojava i aktivnosti rasjeda nije jednak na svim lokacijama, pa te pojave treba sistematski istraživati i bilježiti pri svim većim istraživanjima širih područja npr. za potrebe mikrozoniranja ili infrastrukturnih objekata.

Padine

Ocjena stabilnosti padina je zahtjevan zadatak i u statičkim uvjetima, a potresi pogoršavaju stanje i potiču stvaranje nestabilnosti ili klizišta.

Uobičajena inženjerska mjera stabilnosti kosina je faktor sigurnosti (FS) koji se definira kao omjer posmične čvrstoće i djelujućih posmičnih naprezanja. Dodatno ubrzanje tla koje odgovarajućom inercijalnom silom kliznu masu tla dovodi u ravnotežno stanje (čemu odgovara faktor sigurnosti jednak jedinici) naziva se kritično ubrzanje (ili ubrzanje popuštanja, eng. *yielding acceleration*).

Prekoračenjem tog ubrzanja dolazi do pomaka klizne mase tla.

I to ubrzanje je također mjera otpornosti neke klizne plohe. Primjerice, za blok na kosini nagnutoj pod kutem β od horizontale i uz koeficijent trenja između bloka i podloge $\mu = \tan \phi$, dobije se statički faktor sigurnosti, FS , i kritično horizontalno ubrzanje, $k_y g$, kao

$$FS = \tan \phi / \tan \beta \quad k_y g = \tan (\phi - \beta)$$

U tablici 1 prikazane su vrijednosti FS i k_y za kosine nagnute $1V:2H$ i $1V:2.5H$ (što odgovara kutovima $\beta = 26.56^\circ$ i $\beta = 21.8^\circ$)

ϕ [°]	$\beta = 26.56^\circ$		$\beta = 21.8^\circ$	
	FS	k_y	FS	k_y
30	1.155	0.060	1.443	0.144
33	1.300	0.113	1.624	0.198
36	1.453	0.166	1.816	0.253
38	1.563	0.202		

Tablica 1. Faktori sigurnosti i kritično ubrzanje za blok na kosini nagnutoj pod kutom β od horizontale

U grubo se FS i k_y mogu povezati kroz odnos:

$$k_y = (FS - 1) / n$$

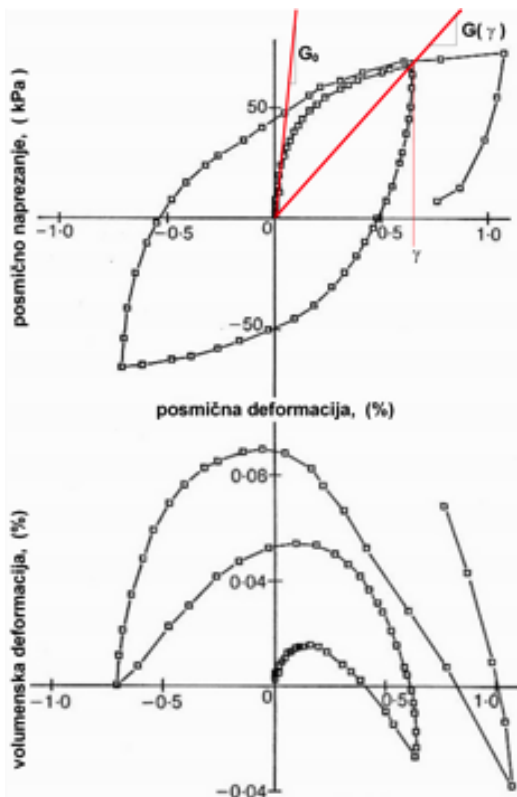
U tablici 1, n je oko 3, a može biti i veći za realne klizne plohe i kad su dijelovi kosine urognjeni ili voda niz nju struji (sve uz pretpostavku da su statičke i dinamičke čvrstoće iste).

Ova gruba procjena reda veličine kritičnog ubrzanja pokazuje da padine koje imaju statički faktor sigurnosti oko 1.5, 'potroše' tu zalihu sigurnosti za seizmička ubrzanja koja su uglavnom manja od projektnih ubrzanja tla u većini krajeva Hrvatske.

Uz današnji trend smanjenja statičke sigurnosti kosina (ispod globalnog $FS = 1.5$), to znači da treba uzeti u obzir da će se pri pojavi projektnog potresa pojaviti određeni trajni pomaci ili lokalni slom dijela kosine. Od slučaja do slučaja treba procijeniti izazivaju li takvi pomaci posljedice na uporabivost kosina i građevina ili instalacija na njoj i bliskoj okolini.

Cikličko ponašanje tla

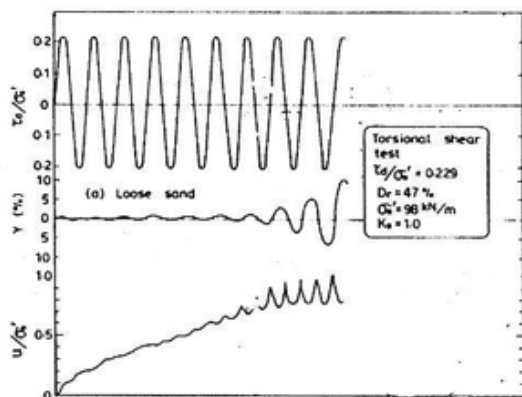
Druge navedene pojave povezane su s cikličkim (dinamičkim) ponašanjem tla koje je



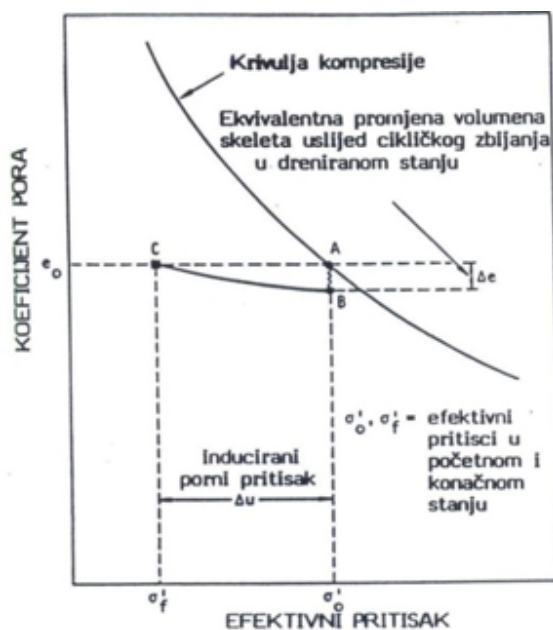
Slika 2. Ciklus smicanja na zrnatom materijalu

prikazano na slikama 2 i 3. Na slikama 2 a, b prikazan je jedan ciklus smicanja zrnatog nekoherentnog materijala koji pokazuje osnovne značajke koje će se dalje razmatrati:

- odnos posmičnog naprezanja i deformacija je izrazito nelinearan već za relativno male deformacije
- prilikom rasterećenja, promjene smjera i ponovnog opterećenja do ranije razine, formira se 'petlja' – histereza koja je mjera gubitka energije u ciklusu, tj. materijalnog prigušenja. Iz nelinearnih odnosa naprezanja i deformacija određuje se početni modul posmika, G_0 , pri malim deformacijama, i sekantni modul u funkciji posmične deformacije, $G(\gamma)$.
- u dreniranim pokusima se istodobno s posmičnim deformacijama pojavljuju i volumenske promjene, koje mijenjaju smjer od razrahljenja (ekspanzija, dilatacija) do zbijanja (kompresija). Nakon više ciklusa, zbog preslagivanja zrnaca,



Slika 3. Porast tlaka porne vode u nedreniranom pokusu



Slika 4. Shematski prikaz mehanizma porasta pornog tlaka tijekom cikličkog djelovanja

pojavljuje se rezidualna deformacija, u pravilu, akumulirano zbijanje.

- za cikličke pokuse u nedreniranom stanju (slika 3), posebice u rahlijim materijalima, nakon nekoliko ciklusa vidljiv je znatan porast pornog tlaka koji konačno dovodi do sloma uzorka.

Ova dva efekta (promjena volumena i porast pornog tlaka) posebno su važna jer su odgovorni za pojave gubitka čvrstoće (pri likvefakciji) ili za pojavu većih slijeganja tla.

Pojava likvefakcije odnosi se na nedrenirano stanje cikličkog opterećenja rahlih nekoherentnih materijala. Porast pornog tlaka tumači se kao posljedica spriječene promjene volumena u nedreniranom stanju (slika 4, Seed i Idriss, 1982)

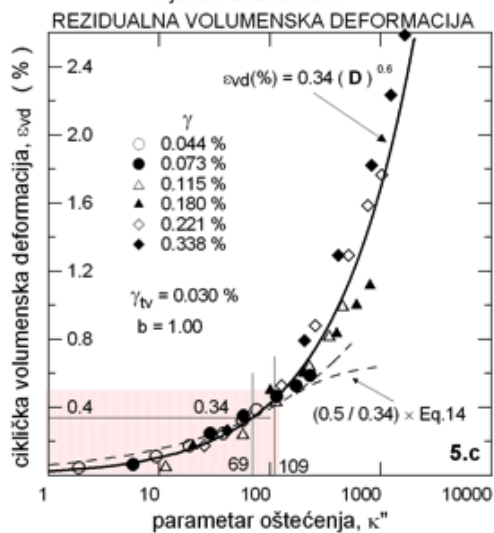
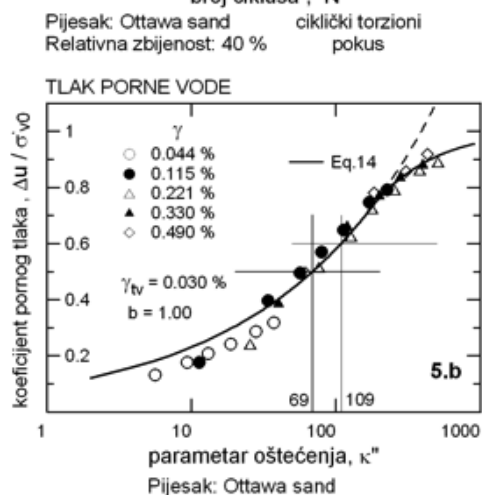
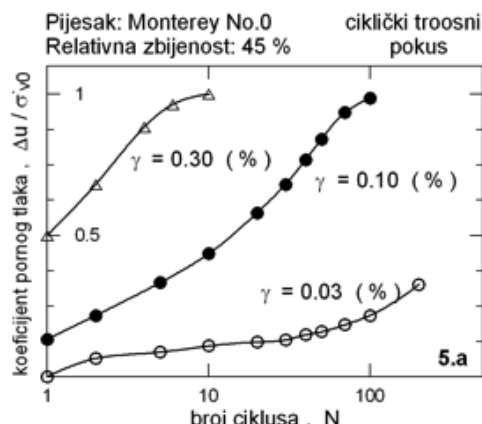
Zbijanje pri cikliranju i porast pornog tlaka određuju se eksperimentalno u cikličkim dreniranim ili nedreniranim pokusima s kontroliranim posmičnom deformacijom, γ , (slika 5a) ili kontroliranim posmičnim naprezanjem (slika 6a) izraženim kroz tzv. *cyclic stress ratio* (CSR ili SR), tj. omjer primijenjenog posmičnog i srednjeg naprezanja. Osnovni kumulativni parametar za različite razine deformacija ili naprezanja je broj ciklusa potrebnih da dođe do pada efektivnih naprezanja na nulu.

Pri malim primijenjenim deformacijama nema volumenskih promjena ili porasta pornog tlaka, a posmična deformacija, γ_{tv} , ispod koje se više ne primjećuju te pojave, naziva se 'deformacijski prag' (*threshold strain*), i njen red veličine je $10^{-2} \%$ (Vučetić, 1994)

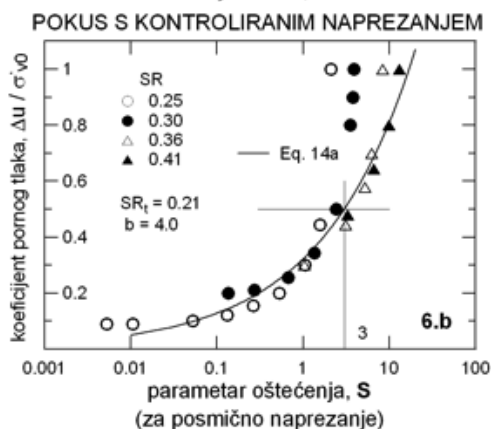
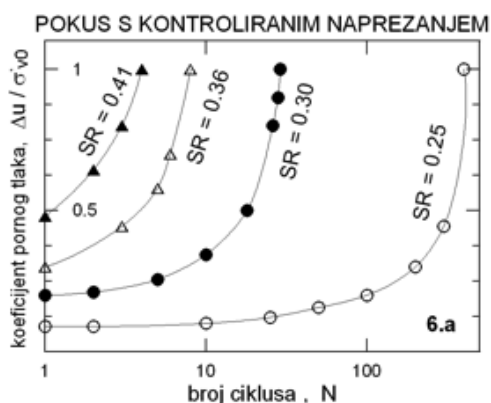
Na slici 5b prikazana je jedinstvena krivulja porasta pornog tlaka u funkciji akumulirane deformacije izražene tzv. parametrom oštećenja, koji u svojoj definiciji prijedeno putu deformacija koristi i navedeni deformacijski prag (Ivšić, 2006). Isti model primijenjen na rezultate paralelnih dreniranih pokusa (slika 5c) pokazuje da je povezanost nakupljenih rezidualnih volumenskih deformacija i porasta pornog tlaka ograničena. Naime, porni tlak nakon nekog broja ciklusa teži k maksimalnoj mogućoj vrijednosti (efektivnom naprezanju), dok volumske deformacije nemaju tih ograničenja za sličan prijedeni put.

Pojam deformacijskog praga je posebno interesantan, budući da iz krivulja naprezanje-deformacija slijedi da postoji i prag posmičnog naprezanja ispod kojeg nema porasta pornog tlaka.

Analogna obrada pokusa s kontroliranim naprezanjem (slika 6b) omogućuje da se odredi ciklički omjer posmičnog naprezanja (CSR) u funkciji akumuliranog naprezanja izraženog također kroz adaptirani parametar oštećenja koji sadrži i prag cikličkog posmičnog naprezanja (odnosno omjera SR_t).



Slika 5. Ciklički pokus s kontroliranom posmičnom deformacijom (Ivšić, 2006) a) rezultati pokusa (Monterey sand); b) zajednički prikaz porasta pornog tlaka u funkciji akumulirane deformacije (Ottawa sand); c) prikaz rezidualne volumske deformacije u cikličkom dreniranom pokusu (Ottawa sand)



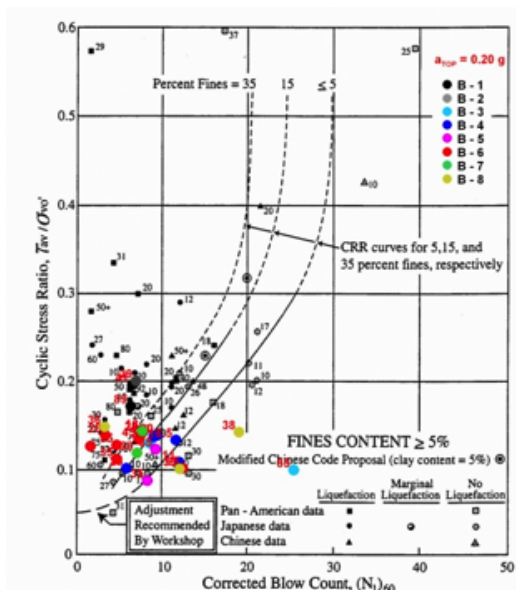
Slika 6. Ciklički pokus s kontroliranim posmičnim naprežanjem (Ivšić, 2006) a) rezultati pokusa; b) zajednički prikaz porasta pornog tlaka u funkciji akumuliranog naprežanja.

U empirijskim postupcima (npr. Seed i Idriss, 1971, Idriss i Boulanger 2006) taj ciklički omjer naprežanja povezan je s razinom djelujućeg seizmičkog ubrzanja, pa se time mogu povezati eksperimentalni laboratorijski podaci s terenskim podacima na kojima su zasnovani empirijski postupci.

Za praktičnu primjenu problem je povezati podatke o projektnom potresu (maksimalno ubrzanje, iregularni slijed i trajanje ubrzanja) s rezultatima cikličkih pokusa (ekvivalentni broj ciklusa, modelski kumulativni parametri...).

Ciklički nedrenirani pokusi koriste se za određivanje likvefakcijskog potencijala ili za prikupljanje i određivanje parametara tla za složene numeričke modele u efektivnim naprežanjima.

Kumulativni modeli razvoja pornog tlaka razvijaju se i dalje (npr. Park i dr 2015), a



Slika 7. Luka Ploče. Ocjena likvefakcijskog potencijala prema broju $N(SPT)$ za površinsko ubrzanje od $0.20g$

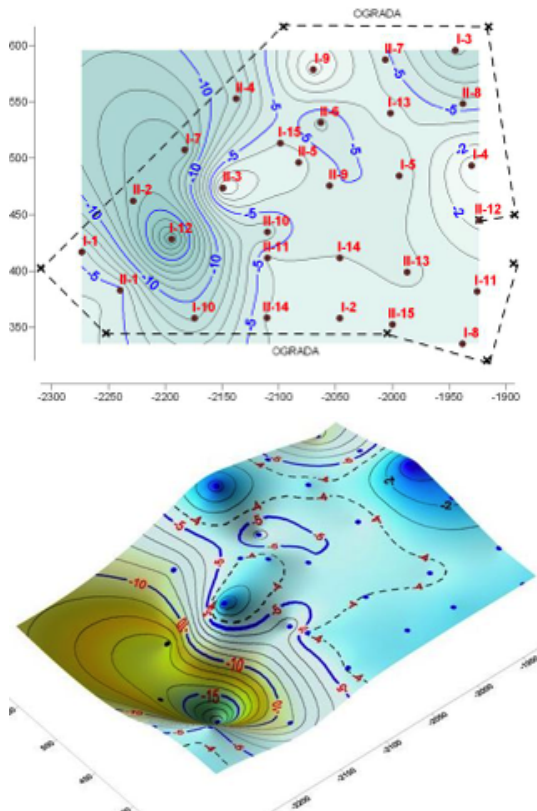
također se i povećava eksperimentalna baza podataka o deformacijskom pragu (npr. Hsu i Vučetić 2004, 2006).

Modeli u efektivnim naprezanjima su u ograničenoj praktičnoj upotrebi u rutinskim slučajevima evaluacija lokacija. U praksi se uglavnom, kao jedina ocjena likvefakcijskog potencijala, koriste postupci zasnovani na terenskim korelacijama pojave likvefakcije s rezultatima *in situ* pokusa (prvenstveno SPT, u novije vrijeme i CPT) te odgovarajući dijagrami ('likvefakcijske karte') koji se povremeno ažuriraju (npr. Boulanger i dr 2012, Idriss i Boulanger, 2015). Iako ih propisi i norme (npr. EN1998-5 2004) navode kao minimum, daljnji sofisticiraniji postupci i intenzivniji eksperimentalni dio prepušteni su pojedinačnim odlukama istraživača, projekatanta ili investitora.

Na slici 7 prikazani su rezultati obrade za ocjenu likvefakcijskog potencijala lokacije terminala za rasute terete u Luci Ploče. Rezultati s lijeve strane graničnih linija predstavljaju tlo koje likvefira, a s desne strane – likvefakcije nema (tj. FS veći od 1). Na slici su prikazani rezultati za površinsko ubrzanje od $0.20g$ (osjetno niže od projektnog ubrzanja) jer se ispitivalo za koje seizmičko ubrzanje je generalno znatan dio profila na 'granici pojave likvefakcije'. Za projektno ubrzanje od preko $0.3g$ praktički cijeli ispitani profil likvefira.

Ocjene likvefakcijskog potencijala (zbog heterogenosti profila, pa i rasapa SPT rezultata po dubini unutar iste bušotine), mogu pokazati da faktor sigurnosti znatno varira po dubini (ispod i iznad 1), pa se likvefakcija doseže u pojedinim tanjim slojevima (a rijetko po cijeloj dubini profila). Takav slučaj bio je i na lokaciji *Shopping City Zaprešić* (danas *Westgate*), gdje su na istim dubinama varirali faktori sigurnosti po susjednim bušotinama, pa je bila otežana ocjena likvefakcijskog potencijala.

Za tu lokaciju provedena je i procjena slijezanja induciranih potresom. Naime, oscilacije tijekom potresa izazivaju dodatne volumenske deformacije zrnatih materijala, koje se manifestiraju kao dodatna slijezanja. Za suhe pijeske ove deformacije znatno ovise



Slika 8. Procjena slijezanja induciranih potresom a) tlocrt, b) prikaz plohe slijezanja

o zbijenosti, dok se kod saturiranih pijesaka pojavljuje likvefakcija i s njom povezane naknadne deformacije. Približna granica pojave likvefakcije je kod volumenske deformacije oko 1%.

Procjene ovih deformacija i slijeganja su relativno grube i zasnovane su uglavnom na cikličkim pokusima na čistim pijescima. Korišten je dijagram iz rada Tokimatsu i Seed 1987, koji procjenjuje deformacije za slojeve gdje je faktor sigurnosti između 1 i 1.2, a zasnovan je na (korigiranom) broju udara SPT. Tako određena volumenska deformacija na nekoj dubini integrirana je po visini relevantnog sloja tla, uzetog kao razmak između dva mjerenja SPT.

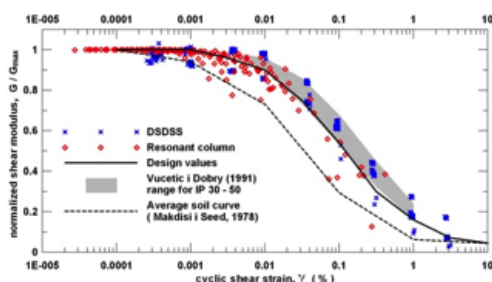
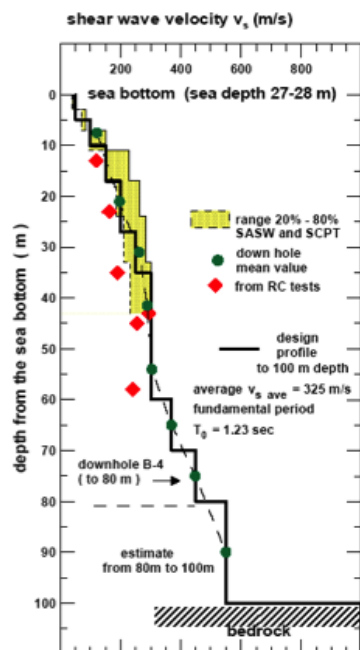
Procijenjena približna slijeganja inducirana potresom predstavljaju integralni indikator slabijih slojeva tla (heterogenosti) u svakoj bušotini do dubine od cca 15 m.

Rezultati procijenjenog slijeganja na slici 8 su zbirno prikazani kao izolinije i ploha procijenjenih slijeganja na površini terena, određenih obradom svake bušotine. Ovakav prikaz omogućio je 'zoniranje' budući da se pokazuje nepovoljna zona povećanih slijeganja, ali i povoljniji dijelovi lokacije. Provedena geofizička površinska ispitivanja na lokaciji indicirala su da se u zoni povećanih slijeganja vjerojatno nalazi stari, zatrpani meandar rijeke Krapine.

Seizmički odziv lokacije

Analize seizmičkog odziva provode se radi određivanja utjecaja lokalnog tla iznad osnovne stijene na površinske (*free field*) seizmičke parametre. Postupak za određivanje utjecaja lokalnog tla uključuje uspostavljanje geotehničkog seizmičkog modela (projektni seizmički profil), izbor seizmičke pobude i jednodimenzionalnu analizu rasprostiranja posmičnih valova. Rezultati su često predstavljeni dinamičkim amplifikacijskim faktorom (DAF), određenim kao omjer vršnog ubrzanja na površini profila tla na lokaciji i vršnog ubrzanja ulaznog akcelrograma. Alternativno se iskazuju i neposredne vrijednosti projektnog vršnog ubrzanja na površini tla ili razini temeljenja.

Za određivanje geotehničkog seizmičkog

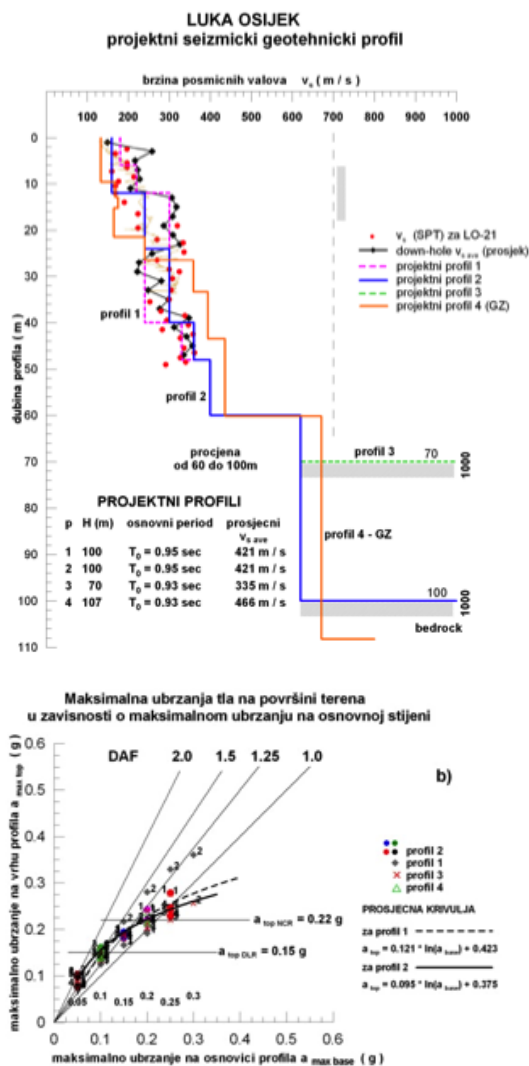


Slika 9 Dinamička ispitivanja na lokaciji mosta Pelješac a) seizmički profil; b) određivanje redukcije modula posmika s posmičnom deformacijom

profila potrebne su brzine posmičnih valova karakterističnih slojeva, gustoće tla i nelinearni odnosi modula posmika i prigušenja s posmičnom deformacijom. Također treba odrediti dubinu profila do (modelskog) poluprostora.

Određivanje ovih veličina zahtijeva opsežan program geotehničkih istraživanja s raznovrsnim geofizičkim mjerenjima do većih dubina, te primjerena laboratorijska ispitivanja.

Na slici 9 prikazan je uspostavljen seizmički profil na lokaciji budućeg mosta Pelješac (Ivšić i dr 2009), kao i rezultati dinamičkih pokusa za određivanje nelinearnih odnosa modula posmika i posmične deformacije za više uzoraka po dubini profila. Ovako opsežna



Slika 10. Dinamička ispitivanja na lokaciji Luke Osijek. a) projektni seizmički geotehnički profil; b) analiza seizmičkog odziva

ispitivanja korištenjem više eksperimentalnih tehnika su provedena za ovu važnu građevinu, ali uglavnom predstavljaju izuzetak u našoj geotehničkoj praksi. Laboratorijska dinamička ispitivanja provedena su u inozemnim laboratorijima.

Ispitivanja profila za određivanje brzina posmičnih valova, v_s , na lokaciji budućeg terminala za rasute terete Luke Osijek prikazana su na slici 10.

Za određivanje brzina posmičnih valova u profilu korištene su različite metode mjerenja

(*downhole*, ReMi), kao i korelacije sa SPT i CPT. Rasap rezultata i dubina bušenja od 50m, koja nije dosegla duboke krute slojeve tla/stijene, rezultirali su s više pretpostavljenih varijanti projektnog seizmičkog profila do velikih dubina.

Za ocjenu maksimalnog površinskog ubrzanja provedene su parametarske jednodimenzionalne analize programom SHAKE. Na slici 10b prikazani su odnosi maksimalnih ubrzanja na površini tla i na osnovici profila. Zbog nelinearnog ponašanja tla, amplifikacijski faktor za viša početna ubrzanja osnovice profila je manji nego za manja početna seizmička ubrzanja. Ovakva analiza omogućuje da se dobiju racionalnije vrijednosti površinskih ubrzanja za daljnje seizmičke analize konstrukcija.

U EN 1998 predviđeno je korištenje linearnih spektara odziva kao input za seizmičke proračune konstrukcija. Izbor odgovarajućeg spektra provodi se za različite tipove tla koji se 'kompromisno' ocjenjuju na osnovi podataka u gornjih 30 m profila. Neki od opisa tih tipova profila su nedovoljno precizni npr. glede ukupne dubine slojeva tla ili za profile koji imaju izmjene vrsta tla po dubini. Standardna praksa to uglavnom ignorira i najčešće se koristi samo prosjek brzina v_s u gornjih 30m. Takav pojednostavljeni formalni pristup ne ostvaruje potpunu geotehničku karakterizaciju slojeva tla na lokaciji u dinamičkim uvjetima, posebice kad su prisutni slojevi rahlih ili mekših tala.

ZAKLJUČAK

Potresi kao posebno nepovoljno djelovanje na građevine i temeljno tlo zahtijevaju detaljnije karakterizacije i ocjene geotehničkih okolnosti na pojedinim lokacijama. Problemi globalne stabilnosti lokacija, kao i specifičnih značajki dinamičkog ponašanja pojedinih vrsta tla u profilu, trebali bi biti utvrđeni opsežnijim geotehničkim istraživanjima i odgovarajućim in-situ i laboratorijskim pokusima.

Suvremeno vrijeme obilježava i povećanje baze seizmičkih podataka, pa procjene seizmičnosti na lokacijama imaju veću vjerodostojnost. Posljedica toga je i generalni trend

povećanja seizmičkih ubrzanja, kao glavnog ulaznog podatka za sve seizmičke analize (Towhata 2008). S druge strane, svojstva materijala tla se ne mijenjaju, pa će uskoro pojednostavljeni projektni postupci davati neracionalna projektna rješenja za zahtijevani stupanj pouzdanosti. Zaokret prema racionalnijim postupcima inženjerskih ocjena seizmičke opasnosti dovest će do korištenja sofisticiranijih metoda, ali i potrebe za pouzdanijim ulaznim podacima.

Stoga bavljenje seizmičkim geotehničkim inženjerstvom, i u teorijskom i u eksperimentalnom dijelu, predstavlja i bitnu komponentu razvoja pojedinaca inženjera-geotehničara, kao i njihovih laboratorija, poduzeća ili institucija.

REFERENCES

- Boulanger, R., Wilson, D., Idriss, I., 2012. Examination and Reevaluation of SPT-Based Liquefaction Triggering Case Histories. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138 (8) pp. 898-909
- EN 1998-5, 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. European Committee for Standardisation, Brussels.
- Hsu C., Vucetic M., 2004. Volumetric Threshold Shear Strain for Cyclic Settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130 (1) pp. 58-70
- Hsu, C., Vucetic, M., 2006. Threshold Shear Strain for Cyclic Pore-Water Pressure in Cohesive Soils. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 132(10) pp. 1325-1335.
- Idriss, I.M., Boulanger, R.W., 2006. Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 26 (2006) pp. 115-130
- Idriss, I., Boulanger, R., 2015. 2nd Ishihara Lecture: SPT- and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 68 pp. 57-68
- Ishihara, K. 1996. *Soil Behavior in Earthquake Engineering*. Clarendon Press, Oxford, Great Britain, 350 pages.
- Ivšić, T., 2006. A model for presentation of seismic pore water pressures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26(2-4) pp.191-199
- Ivšić, T., Vrkljan, I., Zlatović, S., Mavar, R. 2009. Dynamic testing of marine sediments at the Pelješac bridge site. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Alexandria, Egypt, October 2009, M. Hamza et al. (Eds.), paper CR-2, pp. 344-347
- Ivšić, T., Ortolan, Ž., Kavur, B. 2013. Applicability of the RNK-method for geotechnical 3D-modelling in soft rocks. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, France, Vol.1, pp. 551-554
- Kramer S.L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall Civil Engineering and Engineering Mechanics Series. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ; 653p
- NISEE, The Earthquake Engineering Online Archive, <https://nisee.berkeley.edu/elibrary/list?e=5288&start=1>
- Park, T., Park, D., Ahn, J., 2015. Pore pressure model based on accumulated stress. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13 (7) pp. 1913-1926
- Pribičević B., Medak D., Prelogović E., Đapo A. 2008. Utjecaj geodinamičkih procesa na izgradnju objekata i infrastrukture na području grada Zagreba. *Zbornik radova konferencije Razvitak Zagreba, SECON HDGK, Zagreb*, pp.109-115
- Seed H.B., Idriss I.M., 1971. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *J Soil Mech Found Div, ASCE* 97(SM9) pp.1249-73.
- Seed, H.B, Idriss, I.M., 1982. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. monograph series, EERC, Berkeley, California
- Tokimatsu K., Seed, H.B., 1987. Evaluation of settlements in sand due to earthquake shaking. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, Vol. 113, No.8, pp. 861-878
- Towhata I., 2008. *Geotechnical earthquake engineering*. Berlin Heidelberg: SpringerVerlag; 698 p
- Vucetic, M., 1994. Cyclic threshold shear strains in soils. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol.120, no.12, pp.2208 -2228