

## METODE PREVENCIJE LIKVEFAKCIJE

### METHODS OF PREVENTING LIQUEFACTION

*Maja Martinec*

Stručni članak

**Sažetak:** Tektonske ploče koje čine, danas poznato, Zemljino lice neprestano se gibaju. Taj proces se ne može zaustaviti, pa tako ni međusobne interakcije ploča. Na granicama ploča neizbježni su potresi, neovisno o svom intenzitetu. Na neke posljedice potresa kao što likvefakcija ne možemo utjecati, osim preporukom da se na takvim mjestima ne gradi. Obzirom na to da je većina područja s likvefakcijskim potencijalom već gusto urbanizirana, u takvim se područjima potrebno oslanjati na mogućnosti tehnologije. Likvefakcija tla izazvana potresom je važan faktor urbane seizmičke opasnosti. Posljedice likvefakcije u izgrađenim područjima mogu biti iznimno štetne. Evoluiranjem tehnologije javljaju se raznovrsne nove mogućnosti preventivnog djelovanja u područjima ugroženim od likvefakcije, od kojih su najzastupljenije različite mogućnosti temeljenja, izvedbe drenova, izrade šljunčanih pilota, zbijanje tla i drugo.

**Ključne riječi:** Drenovi, likvefakcija, potresi, prevencija, šljunčani piloti, zbijanje tla

Professional paper

**Abstract:** Tectonic plates that make the face of Earth as we know it today are constantly moving. This process cannot be stopped just like mutual interactions of plates. At the plate boundaries earthquakes are inevitable, regardless of its intensity. We cannot influence some effects of earthquake, such as liquefaction, except by giving recommendation on avoiding building in such places. Since the most areas with liquefaction potential are already densely urbanized, in such areas we should rely on technology possibilities. Soil liquefaction caused by the earthquake is an important factor of urban seismic hazard. The effects of liquefaction in built-up areas can be extremely harmful. Technology evolvement presents a variety of new opportunities for preventive actions in areas endangered by liquefaction, of which the most common are various possibilities of foundations, drain performance, gravel piles, soil compaction, and other.

**Key words:** drains, earthquakes, gravel piles, liquefaction, prevention, soil compaction

## 1. UVOD

Likvefakcija, odnosno otekućenje, se javlja kao jedna od popratnih pojava jakih potresa. Možemo je definirati kao fenomen preobrazbe stabilnog i nosivog tla u stanje guste tekućine. Posmična čvrstoća i stabilnost nosivih saturiranih nekoherentnih tala smanjuje se sve do hidrauličnog sloma. Likvefakcija može nastati pod utjecajem potresa ili nekog drugog dinamičkog opterećenja u uvjetima visoke saturacije tla. Glavni faktori o kojima ovisi likvefakcijski potencijal tla su niski indeks zbijenosti i visoki stupanj saturacije, odnosno, zasićenosti vodom. Opasnost likvefakcije leži u prevrtanju zgrada što uzrokuje dodatne štete i u diferencijalnom slijeganju zgrada koje se događa zbog iznenadnog gubitka čvrstoće.

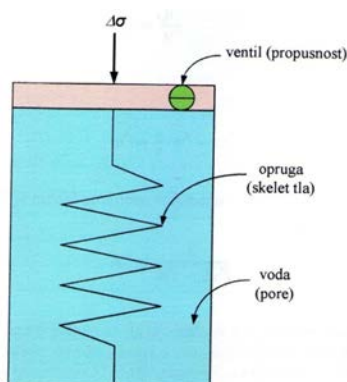
## 2. OPIS LIKVEFAKCIJE

Događa se samo u rahlim pješćanim ili prahovitim saturiranim tlima. Razlog tome je tendencija pijeska da smanji svoj volumen (preraspodjelom čestica u obujmu) prilikom primjene opterećenja, za razliku od zbijenog tla

koje se proširuje u volumenu. Kao reakcija na kompresiju tla, povećava se porni tlak koji tada pokušava teći u zonu nižeg tlaka koja je obično površina zemlje. Međutim, ako je opterećenje primijenjeno brzo te je dovoljno veliko ili je cikličko (nekoliko puta uzastopno primijenjeno), tako da voda ne stigne istjeći prije idućeg ciklusa opterećenja, voda može naći najkraći put kroz prostor između čestica tla koje su u međusobnom kontaktu. Ti kontakti su sredstva kojima se masa konstrukcije prenosi na stijene koje se nalaze na većim dubinama. Ovaj gubitak strukture uzrokuje gubitak čvrstoće, odnosno mogućnosti prenošenja opterećenja te se može promatrati kao otekućenje nosivog tla. S tehničkog gledišta, stanje likvefakcije nastaje kad su efektivna naprezanja smanjena gotovo do nule, što odgovara potpunom gubitku čvrstoće. To može biti inicirano bilo od naglog monotonog opterećenja ili cikličkog opterećenja. U oba slučaja tlo je saturirano i pri tome može generirati značajan porni tlak zbog promjene u opterećenju, te će se najvjerojatnije otekućiti. Navedena promjena se događa jer nevezana tla imaju sklonost stisnuti se pod naprezanjem, generirajući veliki višak porne vode kako se opterećenje prenosi iz temeljnog tla na susjedne porne vode prilikom

nedreniranog opterećenja. Kako tlak porne vode raste, javlja se progresivni gubitak čvrstoće tla. Za lakše objašnjavanje spomenutog nedreniranog i dreniranog stanja, poslužit ću se slikom 1. koja prikazuje mekanu oprugu koja predstavlja skelet čvrstih čestica, a voda u posudi predstavlja vodu u porama tla. Ventil na poklopcu posude ima uski otvor kroz koji voda može istjecati iz posude. Otpor brzom strujanju vode kroz ventil ekvivalentan je Darcyevom zakonu u realnom tlu, što znači da manje otvoren ventil znači manju vrijednost koeficijenta  $k$ . Podsjećam, Darcyev zakon je zakon slojevitog procjeđivanja podzemnih voda kroz homogenu i izotropno tlo, prema kojemu je srednja brzina proporcionalna hidrauličkom padu.

Kada se ovaj mehanički sustav optereti silom na čep posude, tada sila podijeljena s površinom čepa daje naprezanje  $\Delta\sigma$ . Dok je ventil zatvoren, u posudi vladaju nedrenirani uvjeti. To znači da voda, kao krući materijal od opruge, u potpunosti preuzima vanjsko opterećenje. Budući da opruga pri tome nije preuzela ni dio vanjskog opterećenja, onda se ne miče. Opruga se može skratiti samo ako odgovarajući volumen vode istječe iz posude kroz ventil. To se događa nakon što otvorimo ventil. Za sitnozrnata tla slijedi proces konsolidacije koji je ponekad vrlo dugotrajan. Taj proces traje sve dok opruga u potpunosti ne preuzme vanjsko opterećenje, pri čemu kažemo da u posudi vladaju drenirani uvjeti.



Slika 1. Model za objašnjavanje dreniranog i nedreniranog stanja

Konsolidacija je proces promjenjivih volumnih deformacija skeleta tla u vremenu, koje nastaju kao posljedica postupnog istjecanja vode iz tla nakon pojave viška tlaka vode, u nedreniranom stanju. Konsolidacija je prijelazna faza između nedreniranog i dreniranog stanja tla. Tijekom konsolidacije, kad voda istječe iz tla, vanjsko opterećenje se postupno prenosi s vode u porama tla na skelet tla, a efektivna naprezanja u svakom trenutku narastu upravo za vrijednost pada viška tlaka vode. Kako efektivna naprezanja rastu, tako se realizira i volumna deformacija tla. Konsolidacija je u dobro propusnim tlima, pijesku i šljunku toliko brza za uobičajene promjene opterećenja koje se susreću da ju niti ne primjećujemo.

Nedrenirano stanje tla javlja se u slučajevima kada je opterećenje na tlo nanoseno tako brzo da u vremenu nanošenja opterećenja samo zanemariv volumen vode može napustiti tlo. Nedrenirano stanje tla određeno je uvjetom da je volumna deformacija jednaka nuli, što u

tlu znači da nije došlo do porasta efektivnih naprezanja i da je tlak porne vode porastao za veličinu promjene ukupnog naprezanja  $\Delta\sigma$ . Porast tlaka vode uslijed promjene ukupnog naprezanja u nedreniranim uvjetima naziva se viškom tlaka vode. Nasuprot tome, drenirano stanje tla može se definirati kao stanje tla pri mirnoj vodi ili pri stacionarnom strujanju vode kroz tlo (nema promjene tlaka vode u vremenu). Za primjer opruge u posudi s vodom sa slike 1., ovo stanje se ostvaruje kada opruga preuzme ukupno vanjsko opterećenje, skratiti se do svoje konačne duljine i više se ne miče.

### 3. SMANJENJE OPASNOSTI OD LIVKEFAKCIJE

U osnovi postoje tri mogućnosti za smanjenje opasnosti od likvefakcije pri projektiranju i izgradnji nove zgrade ili drugih objekata kao što su mostovi, tuneli i ceste. Ponajprije, valjalo bi izbjegavati tla podložna likvefakciji, odnosno tla koja imaju likvefakcijski potencijal. Prije same gradnje, poželjno je ispitati tlo te prema određenim kriterijima utvrditi da li ono ima likvefakcijski potencijal i da li je pogodno za željenu građevinu.

Iduća mogućnost koja se nameće je gradnja otporne građevine. U slučaju da je gradnja građevine na tlu s likvefakcijskim potencijalom potrebna zbog ograničenja prostora, povoljnog položaja ili zbog sličnih razloga, možda je moguće izvesti otpornu građevinu dizajniranjem temeljnih elemenata koji se mogu oduprijeti efektu likvefakcije.

Treća opcija uključuje ublažavanje likvefakcije poboljšanjem čvrstoće, gustoće i/ili drenažnih karakteristika tla. To se može postići korištenjem raznih metoda poboljšanja tla.

Kriteriji na koje je potrebno obratiti pažnju su slijedeći:

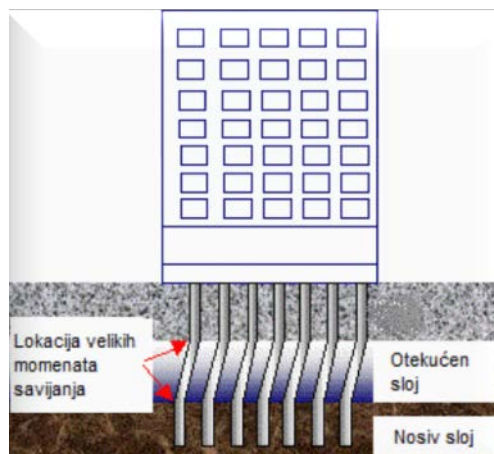
Povijesni kriteriji – Zapažanja iz ranijih potresa mogu pružiti mnoštvo informacija o likvefakcijskoj osjetljivosti pojedinih tala i područja. Tlo koje je otekućeno u prošlosti, može se ponovo otekućiti kod potresa. Ukoliko se počinje sa gradnjom građevine u seizmički aktivnom području ili okolici takvog područja, bilo bi dobro provjeriti da li je dotično područje podložno likvefakciji na kartama koje tome služe.

Geološki kriteriji – Vrsta geološkog procesa koji je stvorio koji je stvorio naslagu tla ima utjecaj na njezin likvefakcijski potencijal. Saturirani depoziti tla nastali taloženjem u rijekama i jezerima (fluvijalni ili aluvijalni nanosi), depoziti nastali taloženjem erodiranog materijala i depoziti formirani nanosima vjetra mogu biti podložni likvefakciji. Ovi procesi sortiranja čestica u jednolično granulirane depozite pridonose gubitku čvrstoće prilikom potresa. Tendencija za zbijanjem dovodi do povećanja tlaka porne vode i gubitka čvrstoće.

Kompozicijski kriteriji – Osjetljivost na likvefakciju ovisno je o vrsti tla. Glinasta tla, osobito osjetljiva, mogu pokazivati ponašanje slično likvefakciji, ali se ne otekućuju kao pjeskovita tla. Tla sačinjena od čestica približno iste veličine imaju veći potencijal za otekućenje od tala koje imaju veći raspon veličina čestica. U tlima sačinjenim od različitih veličina čestica, manje čestice popunjavaju praznine između većih te se na taj način

sprečava povećanje pornog tlaka prilikom potresa. Također, trenje između nepravilnih čestica je veće nego između oblikih čestica, stoga je tlo s nepravilnijim česticama čvršće i manje osjetljivo na likvefakciju.

Konstrukcija koja posjeduje svojstvo duktilnosti (žilavosti), odnosno može prihvatiti velike deformacije prije samog sloma, i ima posebno dizajnirane temelje može ublažiti štetu na konstrukciji uzrokovanu pojavnom likvefakcije. Za postizanje takvih značajki u konstrukciji, postoji nekoliko aspekata koje treba uzeti u obzir. Jedan od njih je plitko temeljenje. Kod plitkog temeljenja, važno je da su svi temeljni elementi povezani kako bi se omogućilo ravnomjerno pomicanje i ravnomjerno slijeganje čime se smanjuje količina poprečnog naprezanja inducirano u konstrukcijskim elementima koji se oslanjaju na temelje. Pogodna je upotreba temeljnih ploča pri plitkom temeljenju jer ona može prenijeti opterećenja s lokalno otekućenog tla na susjedno, čvrsto tlo kao što je prikazano na idućoj slici.



Slika 3. Opterećenje pilota pri dubokom temeljenju

#### 4. METODE PREVENCIJE

Najznačajnija metoda smanjenja štete prouzročene likvefakcijom je, već spomenuto, poboljšanje svojstava tla. Glavni cilj većine tehnika poboljšanja svojstava tla zbog likvefakcije je izbjegavanje velikih povećanja pornog tlaka prilikom potresa. To se može postići zbijanjem tla i/ili poboljšanjem drenažnih sposobnosti. U nastavku ću navesti i opisati neke metode za poboljšanje svojstava tla.

##### a) Vibroflotacija

Ovaj način poboljšanja temeljnog tla je učinkovitiji od zbijanja s površine. Vrlo je koristan za tla sklona likvefakciji (rahli pijesci jednolikog granulometrijskog sastava), kao i za ojačanje hidrotehničkih nasipa nastalih refuliranjem pijeska. Hidrotehnički nasipi su osnovne građevine za pasivnu zaštitu od poplava. Regulacijske su građevine, smještene izvan korita vodotoka sa svrhom zaštite područja od poplava. Da su nasipi nastali refuliranjem pijeska znači da se pijesak zajedno s vodom odložio na određenu površinu gdje se voda ocjedia, a pijesak je stvorio novu površinu. Postupak je prvi puta primijenjen 70-tih godina 20. stoljeća u Njemačkoj. Relativno je jeftin i vremenski brz. Pokazalo se da je

učinkovit do dubine od oko 4,0 m. Može se izvoditi bez ili sa dodavanjem nekoherentnog tla u podtemeljno tlo. Postupak se temelji na pobudi čestica nevezanog tla, koje se premještaju iz rahlog u zbijeniji položaj. Na taj se način postiže veća relativna zbijenost i poboljšavaju se fiziko-mehanička svojstva tla. Postupak vibroflotacije se u krupnozrnatim tlima vrši isključivo vibriranjem dok se u koherentnim tlima u prostor nastao vibriranjem i spuštanjem sonde, dodatno puni šljunkom i tako nastaju uspravni drenovi koji ubrzavaju proces disipacije (lat. dissipatio – rasipanje, razbacivanje, raspršavanje) pornog tlaka u bližoj okolini. U koherentnom tlu nije moguće vibriranjem pokrenuti čestice tla. Za korištenje ove metode nema izravnih teoretskih rješenja. Do danas postoje praktična iskustva koja su dostupna korisnicima najčešće na način da ih izvođači stavljaju korisnicima na raspolaganje. Postoje i razrađeni modeli za proračune s pripadajućim računalnim programima. Pored svega bitno je provesti strogu provjeru učinkovitosti postupka.

##### b) Dinamička kompakcija

Dinamička kompakcija, odnosno, dinamičko zbijanje se vrši ispuštanjem određene mase čelika ili betona s određene visine. To pruža ekonomičan način za poboljšanje tla i ublažavanje likvefakcijskog potencijala. Prilikom postupka, lokalno otekućenje se može pojaviti ispod ispuštene mase što omogućava lakše zbijanje čestica tla. Kad se višak tlaka porne vode iz dinamičkog opterećenja rasprostrani, događa se dodatno zbijanje.

##### c) Stabilizacija dubokih slojeva tla dodacima

Današnja tehnologija omogućuje dodavanje veziva i miješanje s tlom u dubokim slojevima. Pribor se vrti i razrahljuje tlo do potrebne dubine. Zatim se kroz središnju cijev pod pritiskom ubacuje vezno sredstvo, pribor ubrzano rotira i miješa tlo i vezivo, a istovremeno se pribor programirano podiže.

##### d) Zbijanje i zamjena tla miniranjem

Ova metoda je poznata dugi niz godina. Korištena je u Rusiji za zamjenu lošeg, površinskog sloja tla, naročito treseta, pri gradnji prometnica. Postupak se sastoji u tome da se u tlu izvedu bušotine u koje se ugradi eksploziv, a zatim se prostor prekrije određenom količinom šljunka tako da nakon eksplozije šljunak utone u novonastali prostor. Tijekom vremena se ova tehnika zamjene tla i poboljšanja temeljnog tla usavršila. Danas se na tržištu mogu naći izvođači specijalizirani za ove vrste radova. Tehnologija je usavršena tako da se danas koristi u dva pravca: miniranje s površine i miniranje u bušotini. Miniranjem se pobuđuju potresni valovi unutar mase tla. Oni izazivaju flotaciju čestica. Koristi se za površinsko i dubinsko zbijanje rahlih, nekoherentnih tala, najčešće rahlih pijesaka sklonih likvefakciji.

##### e) Izvedba drenova

Sustav drenova služi za odvodnju vode iz tla, čime se smanjuje likvefakcijski potencijal tla na nekom području. U današnje doba postoji nekoliko vrsta drenova koji se mogu primijeniti. Šljunčani drenovi su vrlo slični šljunčanim pilotima. Izvode se tako da se strojno napravi bušotina u koju dolazi šljunak veće propusnosti od okolnog tla. Postoje i već predgotovljeni drenovi od

prirodnih vlakna koji su savitljivi, ali postoje i plastični. Slika u nastavku prikazuje polje s ugrađenim plastičnim drenažnim cijevima.

#### f) Ugradnja šljunčanih pilota

Ugradnja šljunčanih stupova, pilota je odavno poznati način poboljšanja podtemelnog tla. Izvodili su se nekom od tehnika za izvođenje pilota, s tim da je umjesto betona u tlo ugrađen šljunak. Nove tehnologije znatno su proširile mogućnosti izvedbe šljunčanih stupova kao i njihovu učinkovitost. Danas se izvode uz vibriranje, što je jedna od prvih mjera za ublažavanje posljedica likvefakcije. Šljunčani stupovi imaju dvostruki učinak. Kada se izvode nekom od metoda opisanih u poglavlju o pilotima, koje bitno zbijaju okolno tlo, tada imaju učinak zbijanja. U tu se svrhu primjenjuju u rahlim nekoherentnim tlima i u mekim, koherentnim tlima. Prilikom potresa, šljunčani bitno povećava poboljšanje podtemelnog tla u smislu dodatnog zbijanja. Ovako zbijenije tlo ima povećanu čvrstoću na smicanje čime je povećana nosivost, smanjeno slijeganje, ubrzano dreniranje, a smanjena je i opasnost od likvefakcije. Ugradnja šljunčanih stupova je bila jedna od prvih mjera za ublažavanje posljedica jer stupovi otežavaju nastanak likvefakcije u njoj sklonom tlu. Jedan od razloga je različita krutost šljunčanih stupova i okolnog tla. Na šljunčane stupove, kod kojih su dominantne gravitacijske sile, nije moguće tako snažan utjecaj ubrzanja od potresa. Šljunčani stupovi djeluju drenirajuće i trenutno mijenjaju sliku pomih pritisaka u korist povećanja efektivnih napreznja u okolnom tlu. U svim tehnikama izvođenja smisao je da se postigne zbijanje okolnog tla i punjenje nastalog prostora nekoherentnim tlom veće propusnosti od okolnog tla. Važno je da se ugradnja vrši usporedo s dubinskim vibriranjem te se na taj način zbija okolno tlo, ali se zbija i ugrađeni kameni agregat te postižu značajni učinci.

## 5. ZAKLJUČAK

Činjenica jest da na neke posljedice potresa kao što je likvefakcija ne možemo utjecati, osim preporukom da se na takvim mjestima ne gradi. S obzirom na to da je većina područja s likvefakcijskim potencijalom već gusto urbanizirana, u takvim se područjima potrebno oslanjati na mogućnosti tehnologije kako bi se prevenirala ova pojava te njezine štetne posljedice. Evoluiranjem tehnologije javljaju se raznovrsne nove mogućnosti preventivnog djelovanja u područjima ugroženim od likvefakcije. Od ranije navedenih i opisanih metoda prevencije najekonomičnija je metoda vibroflotacija, dok je najučinkovitija ugradnja šljunčanih stupova.

Smatram da je ovo vrlo zanimljiva tematika kojoj građevinska struka može dati znatan doprinos te postoji još velik potencijal istraživanja i razvoj novijih metoda preveniranja likvefakcije.

## 6. LITERATURA

- [1] Herak, M.: Geologija, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [2] Nonveiller, E.: Geomehanika, Sveučilište u Zagrebu, 1964.
- [3] Roje – Bonacci, T.: Poboljšanje svojstava temeljnog tla, Split, 2010.
- [4] Alan, F.: Rauch – Soil liquefaction in Earthquakes
- [5] Khatibi, B.R.; Sutubadi, M.H.; Moradi, G.: Liquefaction potential influenced by building constructions, University of Tabriz, Iran, 2012.
- [6] <http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake> (Dostupno: srpanj 2013.)
- [7] <http://geoclass.wordpress.com> (Dostupno: kolovoz 2013.)
- [8] <http://www.livescience.com> (Dostupno: kolovoz 2013.)
- [9] [www.ce.washington.edu/~liquefaction](http://www.ce.washington.edu/~liquefaction) (Dostupno: rujan 2013.)

Kontakt autora:

**Maja Martinec, bacc. ing. aedif.**  
e-mail: [mamartinec@gmail.com](mailto:mamartinec@gmail.com)