

LIKVIFAKCIJA SEDIMENTOV OB POTRESU

EARTHQUAKE INDUCED LIQUEFACTION OF SEDIMENTS

Andrej Gosar

dr., Ministrstvo za okolje in prostor, ARSO, Urad za seizmologijo, Vojkova 1b, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si

Povzetek

Likvifakcija ali utekočinjenje je nevaren učinek močnih potresov, ki lahko lokalno povzroči veliko škodo na objektih in zahteva človeške žrtve. Likvifakcija nastane, če so zrnati in z vodo nasičeni nevezani sedimenti podvrženi dinamični obremenitvi, ki v njih povzroči ciklične dinamične deformacije in pride do porušitve rahle notranje strukture ter izgube strižne trdnosti. Mehanizem nastanka je zapleten in zato predmet podrobnega proučevanja, ki vodi k njegovemu boljšemu razumevanju. Med metodami proučevanja nevarnosti likvifakcije prevladujejo *in-situ* preiskave v vrtinah ter empirične korelacije med geomehanskimi parametri sedimentov in dovzetnostjo za utekočinjenje. Ocene nevarnosti so sestavni del potresne mikrorajonizacije. Čeprav v Sloveniji še ni bilo dokazanega primera likvifakcije, je treba v okviru ocenjevanja potresne nevarnosti vključiti tudi oceno te nevarnosti.

Abstract

Liquefaction is a dangerous effect of strong earthquakes which can locally result in great damage to buildings and many casualties. Liquefaction occurs if grained and saturated unconsolidated sediments are exposed to dynamic stress, which causes cyclic dynamic deformations and the collapse of the loose internal structure and shear strength. The mechanism is very complex and thus the subject of intense investigations which lead to better understanding. Of the methods used to evaluate the liquefaction hazard, the most important are *in-situ* tests in boreholes and the empirical relationship between geomechanic parameters and liquefaction susceptibility. Such evaluations are part of seismic microzonation studies. Although up to now there has been no proven case of liquefaction in Slovenia, it is necessary to include it in seismic hazard assessments.

Uvod

Likvifakcija ali utekočinjenje tal je pojav, pri katerem z vodo nasičen sediment zaradi ciklične obremenitve močnega tresenja tal ob potresu izgubi svojo strižno trdnost in se začne obnašati kot tekočina. Gre za zelo nevaren učinek močnih potresov, ki lahko povzroči veliko gmotno škodo in zahteva številne človeške žrtve. Zato se pri potresni mikrorajonizaciji oceni nevarnosti pojava likvifakcije posveča posebna pozornost (Bramerini in sod., 2015). V središče zanimanja inženirskih seizmologov in geotehnikov je prišel ta pojav leta 1964, ko sta se zgodila dva rušilna potresa z zelo močnimi pojavi likvifakcije, in sicer potres na Aljaski z navorno magnitudo 9,2 in v Niigati na Japonskem z magnitudo 7,5. Na Aljaski so zaradi likvifakcije nastali lateralni premiki, ki so poškodovali več kot 250 cestnih in železniških mostov, večino tako močno, da popravilo ni bilo mogoče, nekateri pa so se celo porušili. Na obalah pa je prišlo do obsežnih zdrsov pristaniške infrastrukture v morje. Skupno je bila več kot polovica škode ob aljaškem potresu, ki je bil eden od treh najmočnejših znanih potresov vseh časov, posledica likvifakcije. V Niigati so se zaradi likvifakcije pogreznila, nagnila in celo prevrnile številne stavbe. Drugod pa so se zaradi lateralnih premikov porušili mostovi, pretrgali cevovodi in poškodovale druge podzemne strukture (Reiter, 1990).

Po obeh potresih so se začele obsežne raziskave s ciljem razumeti mehanizme likvifakcije, opredeliti postopke za ocenjevanje nevarnosti njenega pojava in razviti metode za zmanjšanje učinkov. Terenski in laboratorijski poskusi so pokazali, da sta likvifakcija in z njo povezane deformacije tal zelo zapletena pojava, ki ju je težko obravnava-ti tako fizikalno kot analitično. Zato so za uporabo v



Slika 1: Posledice likvifakcije po potresu 1964 v Niigati (Japonska). Stanovanjski bloki so se pogreznil, nagnili ali prevrnili. (vir: Wikipedia)

Figure 1: Effects of liquefaction after the 1964 Niigata (Japan) earthquake. Residential houses sunk, tilted or overturned. (Source: Wikipedia)



Slika 2: Posledice likvifikacije po potresu 2011 v Christchurchu. (Nova Zelandija) (vir: Wikipedia)

Figure 2: Effects of liquefaction after the 2011 Christchurch (New Zealand) earthquake. (Source: Wikipedia)



Slika 3: Peščeni izviri, ki so nastali ob potresu 2011 v Christchurchu (Nova Zelandija). (vir: Wikipedia)

Figure 3: Sand volcanoes that erupted during the 2011 Christchurch (New Zealand) earthquake. (Source: Wikipedia)

inženirski praksi razvili različne empirične postopke za ugotavljanje odpornosti sedimentov na likvifikacijo, napovedovanje deformacij tal in načrtovanje sanacijskih ukrepov (Youd, 2003).

Mehanizem likvifikacije

Likvifikacija nastane, če so zrnati in z vodo nasičeni nevezani sedimenti podvrženi dinamični obremenitvi, ki v njih povzroči ciklične dinamične deformacije in pride do porušitve rahle notranje strukture. V rahlo vezanih zrnatih sedimentih, kot so razne vrste peska, temelji njihova nosilnost na stikih med posameznimi zrnji. Pri porušitvi se ti stiki prekinejo in obremenitev prenese na vodo v porah sedimenta. Ta prenos obremenitve povzroči povečanje porenega tlaka in posledično zmanjšanje medzrnske ali efektivne napetosti. Bolj kot porni tlak narašča, mehkejši postaja sediment. Zato so deformacije znotraj sedimenta vedno večje in notranja struktura se pospešeno podira. Ko porni tlak doseže kritično raven, se efektivna napetost približa ničli in zrnat sediment se začne obnašati kot viskozna tekočina in ne več kot trdna snov. Ko se sediment v tleh utekočini in postane mehak, pride do različnih deformacij površja kot odziv na dinamično ali statično obtežbo (Youd, 2003).

Za likvifikacijo so najbolj dovzetni rahli meljasti peski ali peski, v katerih je možnost dreniranja vode slaba, kot je v primeru, da so prekriti z neprepustno plastjo gline. Med ciklično seizmično obremenitvijo se rahlim sedimentom zmanjšuje prostornina, kar povzroči povečanje porenega tlaka in posledično zmanjšanje strižne trdnosti po opisanem mehanizmu.

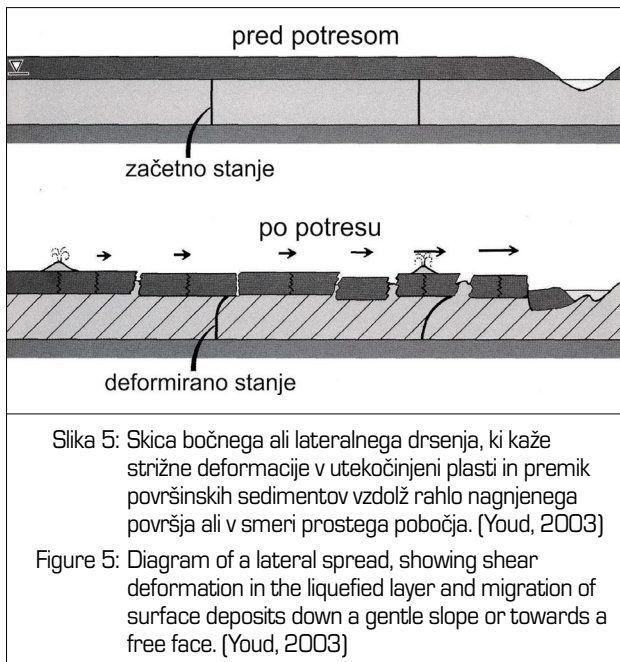


Slika 4: Posledice lateralnega drsenja ob potresu 2011 v Christchurchu (Nova Zelandija). (vir: Wikipedia)

Figure 4: The effects of lateral spreading after the 2011 Christchurch (New Zealand) earthquake. (Source: Wikipedia)

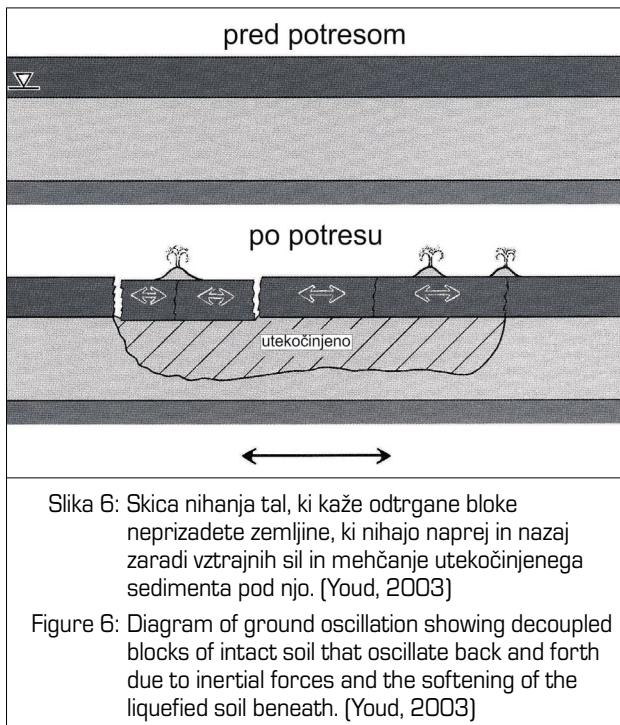
Najdovzetenjši za likvifikacijo so zelo mladi (holocenski) sedimenti, ki so bili odloženi v zadnjih 10.000 letih, in sicer peski ali melji, ki so dobro sortirani, kar pomeni, da so vsa zrna podobne velikosti. Plasti sedimentov morajo

biti vsaj nekaj metrov debele in nasičene z vodo. Taki sedimenti se odlagajo ob rekah, v jezerih, na obalah, v puščavah ali kot eolski sediment, kot je puhlica. Za likvifikacijo zelo dovzetna so tudi umetna nasutja, s katerimi



Slika 5: Skica bočnega ali lateralnega drsenja, ki kaže strižne deformacije v utekočinjeni plasti in premik površinskih sedimentov vzdolž rahlo nagnjenega površja ali v smeri prostega pobočja. (Youd, 2003)

Figure 5: Diagram of a lateral spread, showing shear deformation in the liquefied layer and migration of surface deposits down a gentle slope or towards a free face. (Youd, 2003)



Slika 6: Skica nihanja tal, ki kaže odtrgane bloke neprizadete zemljine, ki nihajo naprej in nazaj zaradi vztrajnih sil in mehčanje utekočinjenega sedimenta pod njo. (Youd, 2003)

Figure 6: Diagram of ground oscillation showing decoupled blocks of intact soil that oscillate back and forth due to inertial forces and the softening of the liquefied soil beneath. (Youd, 2003)

Navorna magnituda potresa	Vršni horizontalni pospešek tal	
	Togi sedimenti	Mehki sedimenti
$M < 5,2$	$a_{max} > 0,4 \text{ g}$	$a_{max} > 0,1 \text{ g}$
$5,2 < M < 6,4$	$a_{max} > 0,1 \text{ g}$	$a_{max} > 0,05 \text{ g}$
$6,4 < M < 7,6$	$a_{max} > 0,05 \text{ g}$	$a_{max} > 0,025 \text{ g}$
$M > 7,6$	$a_{max} > 0,025 \text{ g}$	$a_{max} > 0,025 \text{ g}$

Preglednica 1: Najmanjša magnituda in vršni horizontalni pospešek tal, pri katerih so sedimenti dovzetni za likvifikacijo. (Youd, 2003)

Table 1: Minimum earthquake magnitude and peak horizontal ground acceleration at which sediments are capable of generating liquefaction. (Youd, 2003)

na obalah pridobivajo dodatna kopna območja ali zasipavajo depresije v površju, saj so umetno nasuti materiali praviloma bolj rahli od naravnih sedimentov (Ansal, 2004).

Učinki in pojavi likvifikacije

Pritisk na z vodo nasičen pesek zaradi ciklične obremenitve potresnega nihanja tal pogosto povzroči, da utekočinjen pesek in presežek vode iz globine več metrov iščeta pot na površje. Na površju se to izrazi kot peščen izvir ali vulkan, saj ima podobno obliko kot vulkanski krater (sliki 3 in 6). V peščenem izviru se lahko nahajata tako utekočinjen pesek kot tudi morebiten neutekočinjen pesek iz višjih plasti, skozi katere je potoval. Ob potresu leta 1989 je v San Franciscu na nasutem obmorskem območju predela Marina nastalo veliko takih peščenih izvirov, ki so vsebovali gradbene odpadke iz leta 1906, ko so po rušilnem potresu z njimi nasipali obalo.

Drug pojav likvifikacije je nestabilnost površja, ki se pokaže kot razpoke ali plazenje, tudi na le malo nagnjenih pobočjih (sliki 4 in 5). Predvsem pa so pogosti zdrsi ali plazenje tam, ker površje v bočni smeri nima opore, kot so obrežja morja, jezer ali rek. Ob potresu leta 1920 v Kansu na Kitajskem je plazenje kot posledica likvifikacije segalo 1,5 km daleč in zahtevalo več deset tisoč življenj.

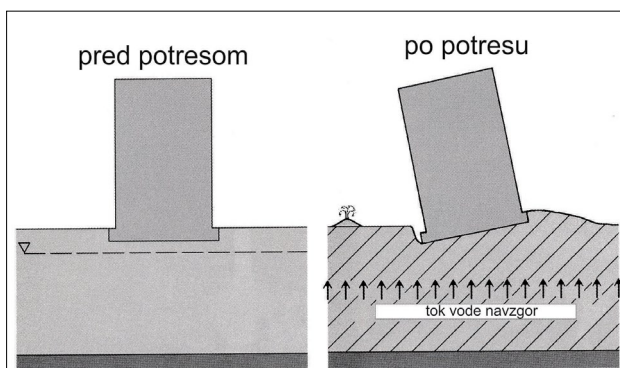
Najizrazitejši pa so učinki likvifikacije na grajeno okolje, kar je izredno nevarno. Če je stavba temeljena v pesku, ki se ob potresu utekočini, bodo temelji v trenutku skoraj v celoti izgubili oporo. Posledica bo izrazito in pogosto neenakomerno pogrezanje (slika 2). Znani so primeri, ko so se stavbe v celoti pogrezale v tla tudi do polovice pritlične etaže globoko, ne da bi se pri tem resneje poškodovale, saj je bilo ugrezanje zelo enakomerno. Ob neenakomernem ugrezanju, kot je bilo v naselju stanovaljskih blokov v Niigati, se je večina stavb močno nagnila, nekatere pa so se celo prevrnile (sliki 1 in 7). Če je med utekočinjenim peskom in temeljem plast, ki ni utrpela likvifikacije, pogosto pride do točkovnega poškodovanja temeljev. V takem primeru pesek in voda vdreta v kletne ali pritlične prostore stavbe. Če stavbe temeljijo na pilotih, ti izgubijo svojo oporo in pride do neenakomernega posedanja in nagibanja objekta. Strižne deformacije, povezane z neenakomernim posedanjem, pogosto pretrgajo podzemne cevovode in kable, kar je nevarno zlasti pri plinski napeljavi, saj sekundarni požari ob potresih povzročijo veliko škodo. Skladiščne cisterne (npr. za gorivo) v tleh pa se premaknejo in poškodujejo zaradi učinka vzgona (Ansal, 2004).

Kot že omenjeno, so nagnjena, nepodprta pobočja najbolj dovzetna za zdrse in druge pojave, ki jih označujemo z izrazom bočni ali lateralni premiki. Pogosto nastanejo v tleh velike razpoke, ki močno poškodujejo stavbe, ceste, mostove in drugo infrastrukturo. Nasipi, ki varujejo pred poplavamami rek ali morja, pogosto razpadejo in zdrsnejo,

kar ima hude sekundarne posledice, saj hitra sanacija običajno ni mogoča. Ob potresu magnitude 8,0 na Jamajki leta 1692 je večji del mesta Port Royal, ki je bilo zgrajeno na pesku, zdrsel okoli 4 m globoko v ocean. Še leta kasneje so lahko ljudje iz čolnov v morju gledali potopljene hiše.

Regionalno ocenjevanje nevarnosti likvifikacije

Nevarnost likvifikacije je omejena na razmeroma ozko območje sedimentacijskih in hidroloških pogojev ob sočasni možnosti nastanka dovolj močnega potresa. Za likvifikacijo najbolj dovzetni so mladi, necementirani, zrnati sedimenti, ki ležijo pod nivojem podtalnice. Najbolj dovzetni so pozno holocenski (recentni) sedimenti, z večanjem njihove starosti skozi holocen in pleistocen pa ta dovzetnost zaradi procesov kompakcije in cementacije hitro upada in v predpleistocenskih sedimentih se likvifikacija praktično ne pojavlja. Način odlaganja prav tako vpliva na dovzetnost. Sedimenti, ki so sortirani v drobno in debelo zrnate plasti zaradi delovanja vetra, rečnega toka ali valov, so bolj dovzetni za likvifikacijo od nesortiranih sedimentov, kot so ledeniške morene. Vsi sedimenti, ki ležijo pod gladino podtalnice, se pri analizah štejejo kot nasičeni z vodo ne glede ali gre za zvezno gladino ali ujeto vodo. Ker se odpornost na likvifikacijo povečuje z litostatičnim tlakom in starostjo sedimentov, se torej hitro povečuje tudi z globino. Bolj je gladina podtalnice globoko, večja bo torej odpornost sedimenta na likvifikacijo. Ocenjujejo, da 90 % pojavov likvifikacije nastane na območjih, kjer je podtalnica plitveje od 10 m, in le posamezni so primeri, kjer je nastala v globini, večji od 15 m. Na splošno se nevarnost likvifikacije v odvisnosti od globine podtalnice razvršča tako: zelo velika (< 3 m), velika (3–6 m), srednja (6–10 m), majhna (10–15 m) in zelo majhna (>15 m). To pa ne velja za umetna nasutja (Youd, 2003).



Slika 7: Skica izgube nosilne trdnosti, ki kaže migracijo porne vode navzgor in posledično ustvarjanje likvifikacijskih pogojev pod samo stavbo. (Youd, 2003)

Figure 7: Diagram of the loss of bearing strength showing upward migration of pore water creating a liquefied condition beneath a building. (Youd, 2003)

Za pojav likvifikacije je potrebno dovolj seizmične energije. Meja, nad katero se pojavlja, je odvisna od gostote in togosti sedimentov ter od trajanja močnega nihanja tal. Pri inženirskih analizah se uporabljata predvsem dva parametra: vršni horizontalni pospešek (PGA – *peak ground acceleration*) nihanja tal in magnituda potresa. Prvi je mera za intenziteto nihanja tal, druga pa poleg sproščene energije potresa opredeljuje tudi njegovo trajanje. Najmanjše magnitudo in vršni horizontalni pospeški tal, pri katerih so sedimenti dovzetni za likvifikacijo, so podani v preglednici 1. Te vrednosti so v splošnem konservativne in se uporabljajo le za preliminarne ocene, za dejanske lokacije pa so potrebne dodatne *in-situ* analize.

Lokalno ocenjevanje nevarnosti likvifikacije

Likvifikacija nastane predvsem v debelo zrnatih sedimentih (melj, pesek, prod), ki so dovolj rahli, da se med tresenjem preuredijo in zgostijo. Prisotnost glin, ki med seboj zlepi večja zrna, to možnost preprečuje. Sedimenti, v katerih je veliko glin, so zato v splošnem dobro odporni proti likvifikaciji. Z empiričnimi raziskavami so ugotovili, da je meja dovzetnosti za likvifikacijo pri 15 % vsebnosti glin ob sočasni zasičenosti sedimenta z vodo (Youd, 2003).

Pri lokalnem ocenjevanju nevarnosti likvifikacije se je uveljavil poenostavljen postopek, ki obsega izračun dveh glavnih parametrov:

- ciklično razmerje napetosti (CSR – *cyclic stress ratio*), ki podaja seizmično obremenitev sedimenta,
- ciklično razmerje odpornosti (CRR – *cyclic resistance ratio*), ki opisuje odpornost sedimenta proti likvifikaciji.

Varnostni faktor (FS – *factor of safety*) proti likvifikaciji je podan kot $FS = CRR/CSR$.

Za izračun CSR se uporablja enačba:

$$CSR = \tau_{av} / \sigma'_{vo} = 0,65(a_{max} / g)(\sigma_{vo} / \sigma'_{vo})r_d$$

kjer je

a_{max} – vršni horizontalni pospešek

g – težnostni pospešek

σ_{vo} – totalna napetost

σ'_{vo} – efektivna napetost

r_d – koeficient redukcije napetosti zaradi globine

Za določitev CRR se uporabljajo različne metode. Najprivlačnejša se zdi ta, pri kateri vzamemo intakten vzorec sedimenta in ga v laboratoriju ciklično obremenjujemo ter s tem simuliramo seizmično obremenitev. Žal pa je zelo težko vzeti intakten vzorec, saj se pri vrtnanju nevezanih sedimentov njihova struktura preveč spremeni, da bi bile laboratorijske preiskave še uporabne. Zato lahko intakten vzorec vzamemo le s posebnimi metodami vzorčenja, kot je zamrzovanje tal, kar pa je izredno drago in zato nedosegljivo za večino projektov. Zato so se za



Slika 8: Zdrs dela južne obale Bohinjskega jezera ob potresu 1998 v Krnskem pogorju. (foto: R. Vidrih)
 Figure 8: Part of the south shore of the Lake Bohinj slide during the 1998 earthquake in the Krn Mountains. (Photo: R. Vidrih)

določevanje CRR uveljavile *in-situ* metode preiskav, ki vključujejo standardni penetrometer (SPT), konični penetrometer (CPT), meritve hitrosti širjenja strižnega seizmičnega valovanja (V_s) in Beckerjev penetrometer (BPT). Največ se uporablja preizkus s standardnim penetrometrom (SPT), pri katerem v sediment zabijamo kovinsko cev in merimo število standardiziranih udarcev, ki so potrebni, da cev prodre za izbrano dolžino globoko. Število udarcev je odvisno od gostote in geomehanskih lastnosti sedimenta. Kljub omenjenim težavam glede intaktnosti vzetih vzorcev, pa so različne laboratorijske geomehanske raziskave sedimentov zelo pomembne, saj z njimi pridobimo potrebne vhodne podatke za modeliranje in vrednotenje deformacij zaradi likvifikacije.

Ocenjevanje nevarnosti porušitve tal

Objekti se poškodujejo, kadar pride zaradi likvifikacije do prevelikih premikov tal oziroma do porušitve tal. Poznamo več vrst porušitve, kot so drsenje pobočij, bočno ali lateralno drsenje, izguba nosilne trdnosti in pogrezanje

tal (Youd, 1984). Analize deformacij, povezane z različnimi vrstami porušitev, so zelo zapletene in zahtevajo posebna geotehnična znanja.

Pri likvifikaciji se izrazito zmanjša strižna trdnost, zaradi česar pride do nestabilnosti oziroma **drsenja pobočij** ali umetnih nasipov. Do drsenja pride, ko postane strižna trdnost sedimenta manjša od gravitacijske sile, ki deluje na pobočje. Tako kot sicer pri proučevanju zemeljskih plazov se tudi tu uporabljajo standardizirane analize stabilnosti pobočij. Če je statični varnostni faktor manjši od ena, je plazenje ob močnem potresu zelo verjetno. Pogosto velike deformacije ne nastanejo že pri prvem ciklu obremenitve, ampak šele pri ponavljajočih se ciklih, ki lahko vodijo k popolni porušitvi in splazitvi.

Če je lokacija stabilna za pobočne premike, je naslednja vrsta porušitve, ki se poučuje, **lateralno drsenje** (slika 6). Pri tem se za oceno velikosti deformacij uporabljajo različni analitični in geomehanski modeli. Največ se uporablja empirični model, ki temelji na velikem številu izmerjenih premikov tal, topografskih podatkih in prereзов tal (Youd, 1984). Končni model podaja lateralne premike kot funkcijo magnitude potresa, oddaljenosti lokacije od njega, kumulativne debeline rahlih zrnatih sedimentov z lastnostmi pod izbranim pragom, povprečne velikosti zrn in vsebnosti gline.

Izguba nosilne trdnosti povzroči ugrezanje temeljev objekta v utekočinjen sediment (slika 7). Pri oceni te nevarnosti se za plitvo temeljenje objektov uporabljajo uveljavljene geomehanske metode, pri katerih za vse plasti v prerezu tal, ki so dovzetne za likvifikacijo, uporabimo rezidualno trdnost tal. Pri globokem temeljenju s piloti moramo za vse plasti, ki so dovzetne za likvifikacijo, uporabiti ničelno trdnost.

Ker je močno potresno nihanje tal zelo učinkovit mehanizem za kompakcijo zrnatih sedimentov, pride do bolj ali manj izrazitega **pogrezanja površja tal** in z njim povezanih deformacij. Metode, s katerimi to proučujemo, temeljijo na predpostavki cikličnih sprememb napetosti, ki zgoščujejo rahle in z vodo nasičene sedimente. Če v sedimentih ni možnosti za hitro drenažo vode, tresenje povzroči tudi prehodno povečanje pornega tlaka, ki preprečuje takojšnje zmanjšanje prostornine. Ko pa se porni tlak postopoma le zmanjša, pride do konsolidacije sedimenta, prostorninske deformacije in pogrezanja površja tal. Prostorninsko deformacijo vzporejamo s cikličnim razmerjem napetosti (CSR) kot mero za intenziteto seizmičnega nihanja in z gostoto sedimenta.

Zmanjševanje nevarnosti likvifikacije

Likvifikacija je pojav, ki se mu najučinkoviteje ognemo tako, da na potresnih območjih ne gradimo na tleh, dovzetnih zanjo. Ker so umetna nasutja praviloma še

bolj dovzetna za likvifikacijo kot naravni sedimenti, se je na potresnih območjih treba izogibati temu, da bi z nasipanjem obale pridobivali kopne površine. Izkušnje iz San Francisca, Japonske in drugod so jasno pokazale, da so učinki potresov največji prav na umetno nasutih območjih, seveda pa je to odvisno od stopnje komprimacije nasutega materiala.

Geotehnično potresno inženirstvo razvija metode, ki lahko deloma zmanjšajo nevarnost likvifikacije in temeljijo na kompaktiranju tal pred samo gradnjo. Najbolj razširjena metoda je vibro kompaktiranje s posebnimi vibratorji, ki v globini z močnim tresenjem zgostijo in utrdijo sediment. Poleg tega se v tla vgrajujejo tudi kamniti stebri, ki izboljšajo njihovo nosilnost. Če pa želimo izboljšati razmere na lokaciji, kjer je objekt že zgrajen, pa je edina učinkovita metoda injektiranje cementne mase skozi vrtine, s katerim utrdimo in stabiliziramo tla. Temeljenje na pilotih, ki segajo skozi plasti, dovzetne za likvifikacijo do bolj toge podlage, je prav tako učinkovit način, vendar le v primeru, da lahko na dani lokaciji izključimo pojav lateralnih premikov.

Sklepne misli

Likvifikacija ob potresu je zapleten pojav, katerega nevarnost ni preprosto oceniti, saj je treba upoštevati zelo različne dejavnike. Ker je za rahle, nevezane, zrnate sedimente skoraj nemogoče vzeti intaktne vzorce za laboratorijske preiskave, so se pri raziskavah nevarnosti likvifikacije uveljavile predvsem empirične

in-situ metode. Zelo pomembne so naknadne poglobljene analize območij, kjer je ob močnih potresih že prišlo do likvifikacije, saj nam predvsem dobro razumevanje tega pojava omogoča prepoznati podobne razmere tudi drugod. V Sloveniji še ni znano, da bi ob kakšnem potresu prišlo do likvifikacije, so bile pa na nekaterih območjih opravljene različne raziskave občutljivosti sedimentov na likvifikacijo (Lenart, 2006a in 2006b; Smolar in sod., 2012; Žlender in sod., 2005), naši raziskovalci pa so sodelovali tudi pri raziskavah po močnem potresu na Japonskem (Lenart in sod., 2012). Ko je ob potresu leta 1998 v Krnskem pogorju zdrsnil v jezero del južne obale Bohinjskega jezera (slika 8), so se pojavile domneve, da bi lahko do tega prišlo zaradi likvifikacije (Petkovšek, 2000/2001), vendar to ni zelo verjetno. Zdrs je namreč nastal 25 km daleč od nadzarišča potresa magnitude 5,6, kjer je bila intenziteta VI po Evropski potresni lestvici (Gosar, 2012). Pri takšni magnitudi, oddaljenosti in intenziteti pa likvifikacija ni verjeten pojav, to pa so potrdile tudi različne laboratorijske preiskave. Kljub temu je nujno, da bi tudi v Sloveniji opravili temeljito regionalno analizo nevarnosti likvifikacije in jo vključili v ocenjevanje potresne nevarnosti oziroma potresno mikrorajonizacijo, saj lahko ob potresu s povratno dobo 475 let na najbolj nevarnih območjih pričakujemo vršni pospešek tal do 0,25 g. Pri tem bo treba posebno pozornost nameniti umetno nasutim območjem in območjem z rahlimi nevezanimi holocenskimi sedimenti. Pri načrtovanju gradnje na potencialno nevarnih lokacijah morajo regionalnim ocenam slediti podrobne *in-situ* lokalne preiskave dovzetnosti sedimentov za likvifikacijo.

Viri in literatura

1. Ansal, A. 2004. Recent advances in earthquake geotechnical engineering and microzonation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 354 str.
2. Brammerini, F., Castenetto, S., Naso, G., 2015. Guidelines for Seismic Microzonation. Conference of Regions and Autonomous Provinces of Italy – Civil Protection Department. Rome, 120 str.
3. Gosar, A., 2012. Application of Environmental Seismic Intensity scale (ESI 2007) to Krn Mountains 1998 Mw = 5.6 earthquake (NW Slovenia) with emphasis on rockfalls. Nat. hazards earth syst. sci., 12/5, 1659–1670.
4. Guerrieri L., Vittori E., 2007. Intensity scale ESI 2007. Mem. Descr. Carta Geologica d'Italia, 74. Servizio Geologico d'Italia, APAT, Rome, 41 str.
5. Lapajne, J., 1995. Potres v Kobeju januarja 1995 – seizmološke in seizmotektonske značilnosti. Ujma, 9, 131–135.
6. Lenart, S., 2006a. Numerični model za račun pornega tlaka v zemljinah z visokim potencialom likvifikacije. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, FGG, 302 str.
7. Lenart, S., 2006b. Deformation characteristics of lacustrine carbonate silt in Julian Alps. Soil dynamics and earthquake engineering, 26/2–4, 131–142.
8. Lenart S., Koseki J., Miyashita Y., 2012. Soil liquefaction in the Tone river basin during the 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku. Acta geotechnica Slovenica, 9/1, 4–15.
9. Petkovšek A., 2000/2001. Geološke geotehnične raziskave plazu Stože. Ujma, 14–15, 109–117.
10. Reiter, L., 1990. Earthquake hazard analysis. Columbia University Press, New York, 253 str.
11. Smolar J., Maček M., Petkovšek A., 2012. Raziskave občutljivosti peskov na krškem polju na utekočinjenje. Razprave 6. posvetovanja slovenskih geotehnikov Lipica, 14. do 15. junij 2012.
12. Youd, T. L., 1984. Geological effects – liquefaction and associated ground failure. USGS Open-File Report 84-760, Menlo Park, 210–232.
13. Youd, T. L., 2003. Liquefaction mechanisms and induced ground failure. V: Lee in sod (ur.): International handbook of Earthquake and Engineering Seismology. Academic Press, Amsterdam, 1159–1173.
14. Wikipedia: Soil liquefaction. https://en.wikipedia.org/wiki/Soil_liquefaction
15. Žlender B., Lenart S., 2005. Cyclic liquefaction potential of lacustrine carbonate from Julian Alps. Acta geotechnica Slovenica, 1/2, 22–3.