

KRAJEVNA SPREMENLJIVOST NIHANJA TAL OB POTRESU

Spatial variability of earthquake ground motion

Izidor Tasič* UDK 550.344.094.3

Povzetek Abstract

Krajevna spremenljivost nihanja tal ob potresu oziroma krajevno različno potresno gibanje tal je pojav, ki je pri potresu vedno prisoten, a se ga pogosto ne zavedamo. Meritve nihanj tal ob potresu na lokalnih mrežah z velikim številom potresnih opazovalnic so pokazale, da ta pojav ni zanemarljiv in da je pomemben predvsem pri objektih velikih vodoravnih razsežnosti, kot so mostovi, pregrade, cevovodi, predori in drugi. Krajevna spremenljivost nihanja tal ob potresu je predvsem posledica prehoda potresnega valovanja preko opazovanega območja ter izgube skladnosti nihanja zaradi različnih poti potresnih valov in različnih lokalnih razmer v tleh.

The spatial variability of ground motion is the phenomenon of an earthquake, though people are usually not aware of it. Measurements from closely-located seismographs have shown that ground motion during an earthquake, measured at different locations, can be different and can affect large structure such as bridges, pipelines, dams, tunnels etc., with the consecutive seismic response of these structures. The spatial variability of ground motion can be mainly attributed to the wave passage effect, loss of coherence and different local soil conditions.

Uvod

Krajevna spremenljivost nihanja tal ob potresu se nanaša na razlike v nihanju tal, ki nastanejo med potresom na nekem omejenem območju. Četudi se krajevne spremenljivosti zaradi velikih hitrosti potresnih valov pogosto niti ne zavedamo, je lahko pomembna že na območju nekaj deset oziroma sto metrov. To so pokazali tudi z geometrijsko urejenimi lokalnimi mrežami potresnih opazovalnic, ko je bilo na majhnem območju nameščenih več deset seizmoloških sistemov, ki so zapisovali nihanje tal ob potresu (Zerva in Zervas, 2002). S seizmološkega vidika so te lokalne spremembe v nihanju tal pomembne, saj nam podatki o tem, kako hitro je potresno valovanje prešlo določeno območje, spremembe v njihovi polarizaciji, sestavi, amplitudi ter fazi pomagajo pri razkrivanju fizikalnih lastnosti Zemljine notranjosti. Pomembne pa so tudi z »inženirskega« vidika, saj nas zanimajo zaradi posameznih »razpotegnjenih« objektov oziroma objektov velikih vodoravnih razsežnosti, pri katerih bi ob potresu samo zaradi razlik v nihanju tal že lahko prišlo do poškodb. To so objekti s podaljšanim temeljenjem (kot so recimo jezovi, podolgovati pristaniški sistemi), objekti, ki povezujejo večje razdalje (ceste, železnice), objekti in druge strukture, ki so s podlago povezani prek nosilcev na večjih medsebojnih oddaljenostih (mostovi), ter ne nazadnje objekti, ki so zakopani pod zemljo (predori, plinovodi). Večina teh objek-

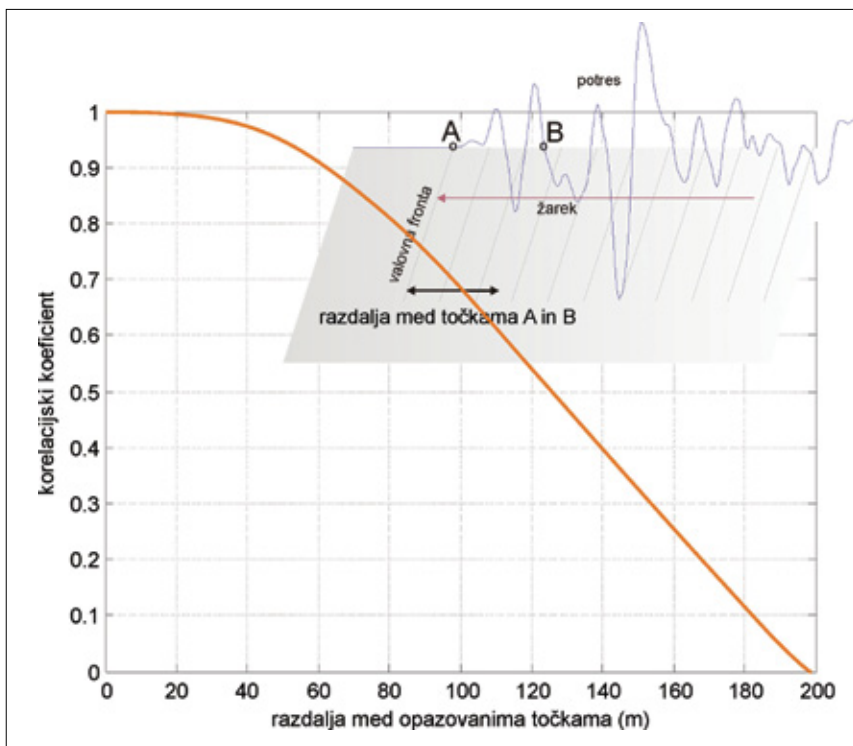
tov je ob katastrofalnem potresu življenjsko pomembna za delovanje družbe, saj ti omogočajo izvajanje različnih reševalnih in sanacijskih ukrepov po elementarni nesreči. Zaradi njihovega pomena uporabljajo v ZDA za take objekte učinkovit izraz *lifelines* (USGS 2013; Zerva 2010) oziroma »življenjske linije«, če bi angleško ime dobesedno prevedli.

Lokalno gibanje tal ob potresu

Razlike v nihanju tal ob potresu na nekem omejenem območju so posledica različnih dejavnikov. Kadar je opazovana lokacija tako blizu žarišča, da je območje pretrga potresa veliko glede na velikost opazovanega območja, pride do tako imenovanih pojavov bližnjega polja (Shinozuka in drugi, 1999). Zaradi superpozicije valov s celotnega območja prelomne cone pride že na majhni razdalji med dvema sosednjima opazovanima točkama do razlik v nihanju tal. A ti primeri so redki. Največkrat je velikost opazovanega območja zanemarljiva glede na oddaljenost od žarišča potresa. V takih primerih so krajevne spremembe nihanja tal pri potresu najpogosteje posledica kombinacije treh različnih pojavov (Harichandran, 1999). To so:

a) časovni zamik nihanja tal posameznega dela površine kot posledica prehoda potresnih valov (angl. wave passage effect), saj vse točke na opazovanem območju zaradi končne hitrosti potresnih valov ne nihajo sočasno;

* mag., Ministrstvo za kmetijstvo in okolje, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, izidor.tasic@gov.si



Slika 1:

Spreminjanje vrednosti korelacijskega koeficienta zaradi časovne zakasnitve potresnih valov med dvema točkama kot posledica »večanja« oddaljenosti med njima v smeri valovne fronte. Uporabili smo zapis lokalnega potresa, zabeleženega na potresni opazovalnici Ljubljana.

Figure 1:

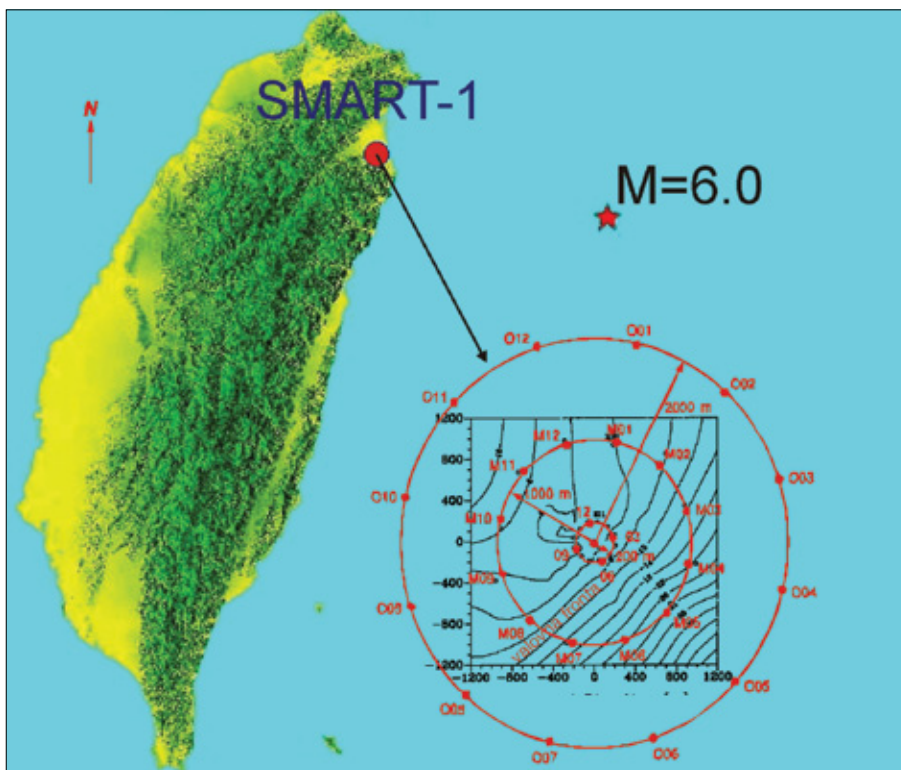
Changing the correlation coefficient value due to the passage of earthquake waves between two points is the result of their "increasing" distance in the direction of wave front. The actual recording of a local earthquake obtained from the seismic station Ljubljana has been used.

- b) izguba korelacije med posameznimi merilnimi točkami zaradi naključnega razširjanja in loma seizmičnega valovanja med potovanjem skozi Zemljino notranjost;
- c) različen odziv mikrolokacij na potresno valovanje, ki je posledica različnih geofizikalnih lastnosti tal pod njimi.

Ker govorimo o lokalno omejenem območju, bomo učinek slabljenja oziroma dušenja amplitud seizmičnega valovanja, ki je selektivno glede na frekvenco potresnih valov in je posledica tako geometrijskega razširjanja potresnega valovanja kot tudi izgube energije v mediju, skozi katere-

ga se potresno valovanje razširja, zanemarili. Prav tako bomo zanemarili lokalne spremembe v nihanju tal, ki so lahko tudi posledica plazov, ki se prožijo ob potresu, ali posledica utekočinjenja zemljin zaradi potresa.

Pionirska dela o odzivu razpotegnjenih objektov, predvsem mostov, na asinhrona nihanja tal segajo v šestdeseta leta 20. stoletja. V teh študijah so pretežno upoštevali samo vpliv relativne časovne zamaknjenosti v nihanju tal na opazovanem območju, ki je posledica prehoda ravne valovne fronte potresnega valovanja, saj vse točke opa-

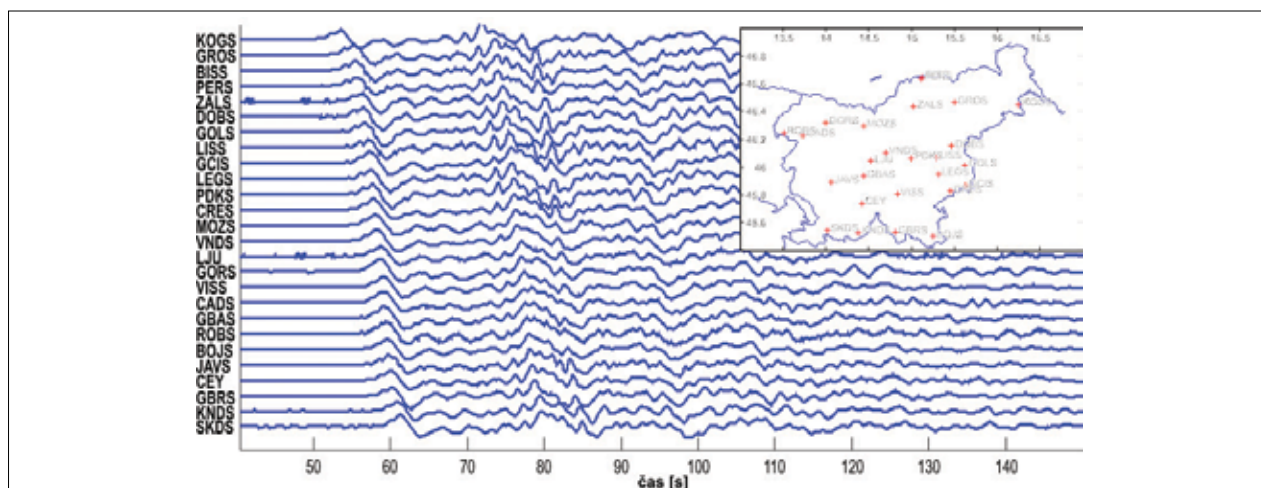


Slika 2:

Položaj geometrijsko urejenega omrežja potresnih opazovalnic SMART-1 na Tajvanu (rdeč krogec, SMART-1, 1990) ter primer izračunane valovne fronte [Harichandran, 1999] za potres 17. decembra 1982 (rdeča zvezda) z magnitudo 6,0 ter nadžariščno oddaljenostjo 117 kilometrov od središča omrežja

Figure 2:

Location of the seismic array SMART-1 in Taiwan (red circle, SMART-1, 1990), and the calculated wave fronts [Harichandran, 1999] for the 17 December 1982 earthquake (red star) with a magnitude of 6.0 and epicentral distance of 117 kilometers from the centre of the SMART-1.



Slika 3: Časovna zakasnitev potresnih valov (wave passage effect) na slovenski državni mreži potresnih opazovalnic na primeru teleseizma. Primer je za potres v bližini Japonske 17. decembra 2012 z magnitudo 7,3. Prva je potres zaznala potresna opazovalnica KOGS, zadnja, dobrih pet sekund pozneje, pa potresna opazovalnica SKDS.

Figure 3: Wave passage effect based on teleseism recorded by the Slovenian National Seismic Network for a 7.3-magnitude earthquake of 17 December 2012 near the Japanese coast. The earthquake was first detected by the KOGS seismic station and last, more than five seconds later, by the SKDS seismic station.

zovanega območja ne zaznajo potresa sočasno, ampak šele, ko jih potresni valovi dosežejo. V osemdesetih letih prejšnjega stoletja so podatki, ki so jih dobili ob delovanju prvih lokalnih geometrijsko urejenih seizmoloških mrež, pokazali na potrebo po celovitejši obravnavi potresnih nihanj tal. Vendar je šele v devetdesetih letih pojav spremenljivosti nihanja tal ob potresu pridobil pomen. Celoviti modeli o odzivu razpotegnjenih objektov na asinhrono nihanje tal so nastali šele v zadnjih nekaj letih (Task Group, 2007), deloma tudi na račun zmogljivejših računalnikov, ki so omogočili uporabo zapletenih algoritmov.

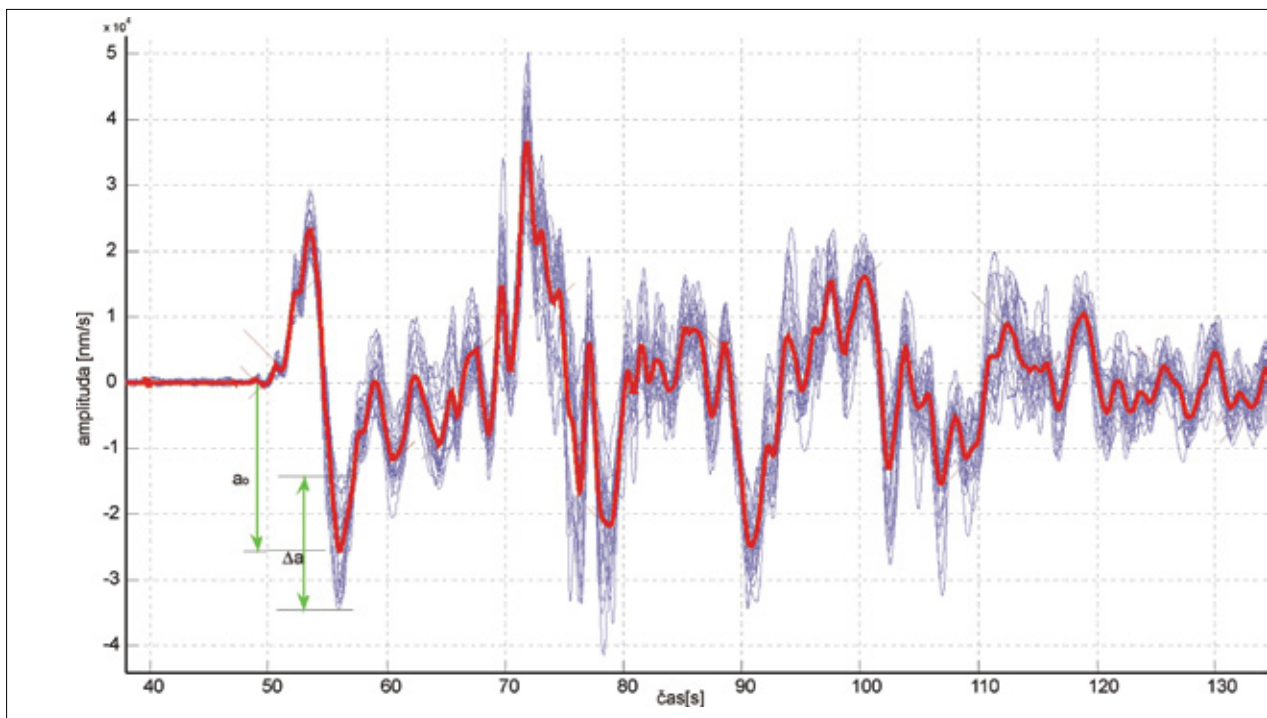
Razlogi za spremenljivost nihanja tal ob potresu

V idealni homogeni izotropni snovi se valovanje širi brez motenj. Valovna fronta je množica vseh točk, do katerih je v nekem trenutku prispelo valovanje. Če je izvor valovanja dovolj daleč od opazovanega območja, je valovna fronta na površini snovi ravna črta oziroma enakomerna krivulja. Nihanje točk, ki so na isti valovni fronti, je enako oziroma sinhrono. Dva opazovalca, postavljena na liniji valovne fronte, zaznata nihanje tal popolnoma istočasno. Za opazovalca, ki sta postavljena v smeri žarka, pa nihanje podlage ni več istočasno. Ker je potres kompleksen pojav, je s tem tudi nihanje tal zaradi potresa kompleksno, ni monokromatsko. Ko sta oba opazovalca postavljena na idealnem homogenem sredstvu v smeri žarka potresnega valovanja, zaznata sicer enako kompleksno nihanje tal, a z neko časovno zakasnitvijo, ki je odvisna od njune oddaljenosti. Večja ko je razdalja med opazovanima točkama, večja je zakasnitev v prihodu valovanja (Zerva, 2010). Linearna povezanost v nihanju med dvema opazovanima točkama lahko opišemo s korelacijskim koeficientom. Njegova vrednost med dvema opazovanima točkama, ki

isto nihanje tal zaradi potresa zaznavata z določeno časovno zakasnitvijo, je prikazana na sliki 1. Uporabili smo dejanski zapis lokalnega potresa, zabeležen na potresni opazovalnici Ljubljana 3. decembra 2012 ob 4.46 po UTC. Potres z lokalno magnitudo 3,8 in nadžariščem v bližini Gornjega Grada so čutili prebivalci skoraj vse Slovenije. Iz zapisov potresa na okoliških potresnih opazovalnicah smo v tem primeru ocenili povprečno horizontalno komponento hitrosti premikanja valovne fronte potresnih valov na 5,3 km/s. Na sliki lahko vidimo, da že pri razdalji 70 metrov, kljub idealizirani podlagi, med opazovalnima točkama ni več tako imenovane močne linearne povezanosti.

Do konca sedemdesetih let prejšnjega stoletja je veljalo splošno pravilo, da so spremembe v krajevnem nihanju tal ob potresu odvisne samo od časovne zakasnitve prihoda potresnih valov. Delovanje prvih gostih, geometrijsko urejenih potresnih opazovalnic na krajevno omejenih površinah pa je pokazalo, da je nihanje tal tudi na kratkih razdaljah bolj zapleteno (Zerva, 2010).

Prve goste geometrijsko urejene mreže potresnih opazovalnic so bile postavljene ob koncu sedemdesetih let, in sicer v bližini aktivnejših prelomov, kjer je bila verjetnost močnejšega potresa večja. Ena prvih takih mrež, El Centro Differential Array (Kalifornija, ZDA), je imela linijsko postavljenih sedem potresnih opazovalnic v skupni dolžini 321 metrov (Zerva, 2010). Leta 1979 je zabeležila potres magnitude 6,5 z nadžariščno oddaljenost manj kot šest kilometrov od opazovalnic. Izredno pomembno za raziskave nihanja tal na krajevno omejenem območju pa je bilo omrežje z oznako SMART-1 (Strong Motion ARray Taiwan; SMART-1 1990) na Tajvanu. To omrežje, ki je delovalo v letih med 1980 in 1990, je bilo dvodimenzionalno. Sestavljalo ga je 37 triosnih pospeškometrov, postavljeni so bili v treh koncentričnih krogih (slika 2). V vsakem krogu je bilo 12 pospeškometrov, eden pa je bil še v središču



Slika 4: Povprečen zapis (rdeča črta) po časovni korekciji podatkov s slike 3 (modre črte). Kljub veliki oddaljenosti žarišča potresa od potresnih opazovalnic zapisi različnih opazovalnic niso enaki. To je posledica dveh dejavnikov: izgube korelacije med posameznimi merilnimi točkami zaradi naključnega razširjanja in loma seizmičnega valovanja med potovanjem skozi Zemljino notranjosti ter različnega odziva mikrolokacij na potresno valovanje zaradi različnih geofizikalnih lastnosti tal pod njimi.

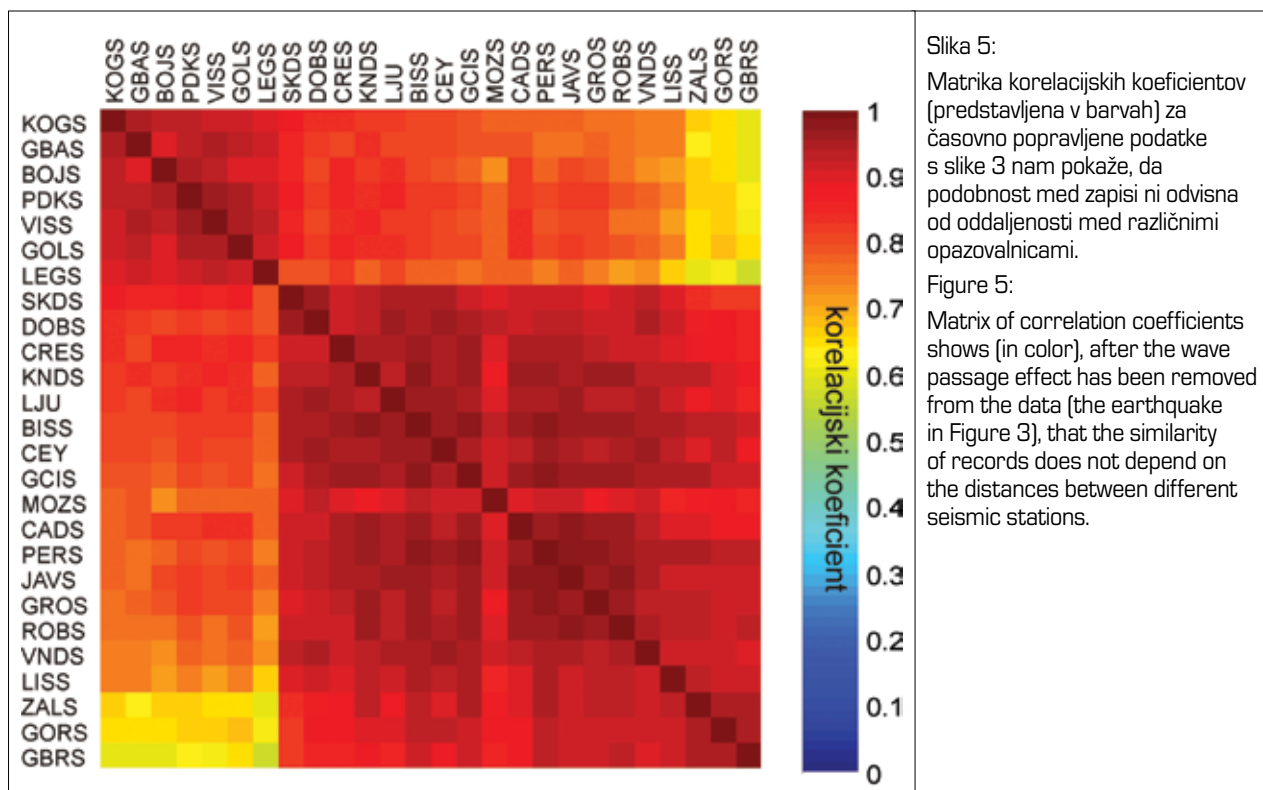
Figure 4: An average seismic record (red line), after the time correction, where the seismic data from Figure 3 were used (blue lines). Despite the long distance from the earthquake focus, seismic records from individual seismic stations differ. This is the result of two factors: the loss of correlation between single measuring points due to random diffusion and refraction of seismic waves travelling through the Earth's interior; and the different response of micro locations due to different geophysical properties of the ground.

kroga. SMART-1 je med svojim delovanjem zaznal obilico tako šibkih kot močnih potresov, zaradi svoje oblike, velikosti in geometrije pa je omogočil poglobljene študije nihanj tal na krajevno omejenih območjih (Zerva, 2010). Prav analize teh zapisov so pokazale na potencialno ranljivost razpotegnjenih objektov zaradi krajevnega spreminjanja nihanja tal ob potresu. Na sliki 2 so prikazane lokacija SMART-1 na Tajvanu, oblika omrežja (koncentrični krogi) ter rekonstruirane valovne fronte na območju omrežja opazovalnic za potres z magnitudo 6,5 in nadžariščno oddaljenostjo 117 km od središča omrežja (potres iz leta 1982). Rekonstrukcija, ki je bila mogoča ravno zaradi velike gostote in oblike omrežja SMART-1 ter znane geološke podlage, lepo pokaže, da se krivulja valovne fronte na območju, velikem 2,4 x 2,4 km, iz skoraj enakomerne preoblikuje v bolj zapleteno obliko (Harichandran, 1999).

V Sloveniji nimamo geometrijsko urejene lokalne mreže potresnih opazovalnic. Imamo pa kakovostno državno mrežo potresnih opazovalnic, ki poleg lokalnih potresov z nadžariščem v Sloveniji ali njeni neposredni bližini omogoča tudi zapisovanje močnejših potresov z žariščem kjer koli po svetu (teleseizmi). S teleseizmi, v teh primerih je žarišče potresa zelo daleč od opazovalnic in je relativna oddaljenost potresnih opazovalnic med seboj majhna v primerjavi s potjo, ki so jo opravili potresni valovi, lahko pokažemo kar nekaj pojavov, povezanih s spremenljivo-

stjo nihanja tal ob potresu. Na takem povečanem lokalnem modelu lahko preprosto prikažemo *wave passage effect*. Sedemnajstega decembra 2012 smo zapisali močan potres z magnitudo 7,3 in nadžariščem v morju v bližini japonske obale. Potresni valovi so potrebovali dobrih dvanajst minut, da so dosegli Slovenijo. Potres je bil dovolj velik, da so ga zapisale vse opazovalnice v Sloveniji. Zapis hitrosti nihanja tal na državni mreži potresnih opazovalnic za prvih 100 sekund v navpični smeri je na sliki 3. Zapisi so skoraj enaki na vseh opazovalnicah, le časovna premaknjeni med seboj. Prva je potres zaznala potresna opazovalnica KOGS na severovzhodu Slovenije, kot zadnja je pet sekund pozneje zaznala potres dvesto kilometrov bolj oddaljena potresna opazovalnica z oznako SKDS (jugozahodni del Slovenije). S frekvenčno valovno analizo (f-k analiza) smo izračunali, da sta povprečna hitrost premikanja valovne fronte po površini 25,1 km/s (to je navidezna horizontalna hitrost vpadnega potresnega valovanja) in povprečen azimut horizontalne projekcije vpadnega valovanja 36° od smeri severa v smeri urnega kazalca.

Časovna zakasnitev ni edini pojav, ki ga zaznamo ob takih dogodkih. Pri natančnejši analizi sledi ugotovimo, da hitrost premikanja valovne fronte po površini ni bila konstantna, v severozahodnem delu je valovna fronta potovala hitreje kot v jugozahodnem. Te razlike so rezultat različnih poti žarkov skozi Zemljino notranjost. Na to



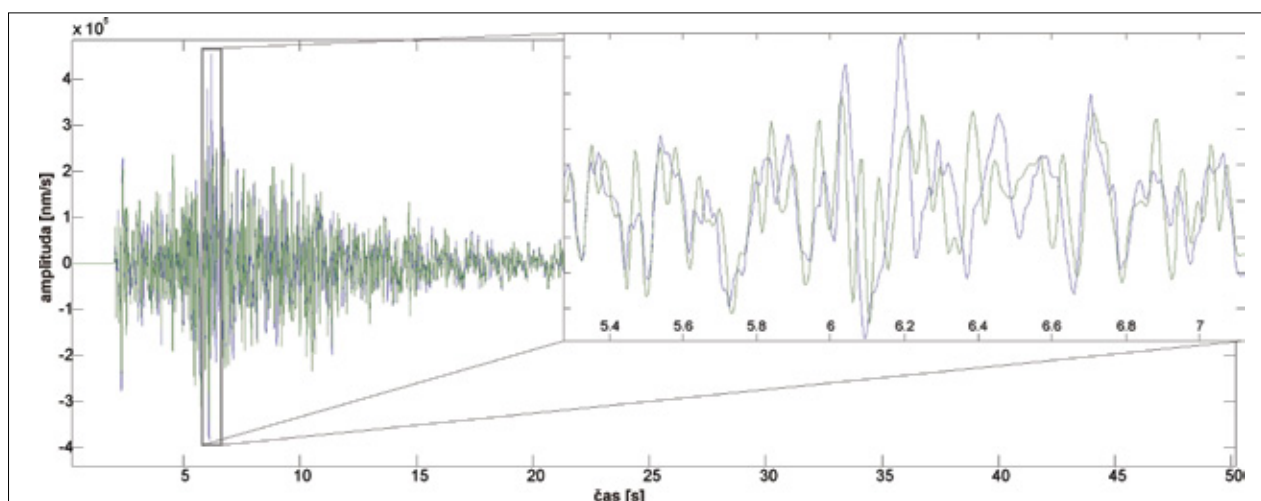
Slika 5:
Matrika korelacijskih koeficientov (predstavljena v barvah) za časovno popravljene podatke s slike 3 nam pokaže, da podobnost med zapisi ni odvisna od oddaljenosti med različnimi opazovalnicami.

Figure 5:
Matrix of correlation coefficients shows (in color), after the wave passage effect has been removed from the data (the earthquake in Figure 3), that the similarity of records does not depend on the distances between different seismic stations.

verjetno vpliva tudi globina Mohorovičićeve diskontinuitete, ki se v Sloveniji precej razlikuje med severovzhodnim in jugozahodnim delom (Gosar, 2005).

Po časovni korekciji zapisov potresa med opazovalnicami pa pride do izraza tudi razlika v amplitudah med opazovalnicami (slika 4). Že po prvi periodi se največja in najmanjša amplituda nihanja tal razlikujeta za faktor 2. Do izgube korelacije med lokacijami po časovni korekciji torej pride zaradi dveh razlogov: razlik v geološki podlagi med opazovalnicami ter različnih poti potresnih valov. To nam potrjuje tudi vrednosti korelacijskih koeficientov (slika 5), ki smo jih izračunali iz časovno popravljenih zapisov tal.

Spremembe geofizikalnih lastnosti so pomembne za povečanje krajevne spremenljivost nihanja tal ob potresu. Večje ko so te spremembe, do večjih razlik v načinu nihanja tal med prehodom valovne fronte pride. Če so spremembe diskretne, pride na mejnem območju med dvema geološkima območjema do povečanih napetosti. Če je gradbeni objekt znotraj takega območja, kot na primer predor, se med potresom napetosti neposredno prenašajo tudi na objekt. Do razlik v napetosti lahko pride tudi, če objekt sicer stoji na podlagi z enakimi lastnostmi, vendar je tako območje v neposredni bližini in celo na poti potresnega valovanja (Zerva, 2010).



Slika 6: Zapis lokalnega potresa ter povečava izseka z največjimi amplitudami. Potres je bil zabeležen na dveh lokacijah, ki sta oddaljeni med seboj 25 metrov, a sta na različnih temeljih, kar je tudi razlog, da se zapisa med seboj razlikujeta.

Figure 6: Record of a local earthquake and the enlargement of the sector with the highest amplitudes. The earthquake was recorded at two locations 25 meters away from each other but built on different foundations, which explains the difference in the records.



Slika 7: Primeri porušenja mostov

Figure 7: Bridge collapses.

Za lokalni potres, predstavljen v prvem delu tega poglavja, obstaja zapis z dveh lokacij na Golovcu v Ljubljani, ki sta med seboj oddaljeni samo 25 metrov. Lokaciji sta v različnih objektih, na različno narejenih temeljih. Nihanje tal zaradi potresa in zapis potresa na obeh opazovanih točkah kljub veliki bližini nista bila enaka (slika 6). Razlog, zakaj pride do takšnih razlik v nihanju tal na precej manjši razdalji, je preprost. Tudi če predpostavimo, da je nihanje tal na prostem površju identično v obeh opazovanih točkah, podlaga ni togo telo z neskončno maso. Sile podlage oziroma tal med potresom delujejo lokalno na temelje in s tem lokalno na posamezen objekt. Zaradi interakcije podlage in konstrukcije sta lahko odziva dveh bližnjih, a med seboj različnih objektov, drugačna. Lokalna spreminljivost nihanja tal ob potresu je torej lahko tudi posledica

razlik v interakciji med različnimi objekti in tlemi (Task Group, 2007). To je predvsem pomembno pri podpornih strukturah, ki so masivne, a nimajo skupnega temeljenja (npr. večnivojski mostovi), ko zaradi vsiljenega nihanja geometrija in tudi togost objekta zaradi inercije povratno vplivata na nihanje tal podlage (Task Group, 2007).

Amplitude odmkov in amplitude pospeškov

Še danes se skoraj v vseh primerih pri potresnem projektiranju mostov izhaja iz predpostavke, da vse kontaktne

točke zaznajo enako nihanje tal (Task Group, 2007). A pri razpotegnjenih konstrukcijah niso pomembne samo sile, ki med potresom delujejo na objekt, temveč tudi relativni odmiki. Če na primer sosednja stebra med potresom zanihata v nasprotni smeri, je lahko odklik med njima tako velik, da prosto ležeča konstrukcija na vrhu stebrov izgubi oporo. Zaradi relativnih odklikov so bile v preteklosti pri močnejših potresih pogoste spektakularne porušitve delov nekaterih pomembnih mostov (Task Group, 2007). Med te spada tudi dvonivojski most, znan pod imenom *Bay Bridge*, ki del San Francisca povezuje z Oaklandom, dolg pa je dobrih sedem kilometrov. Zgrajen je bil v tridesetih letih prejšnjega stoletja. Na obeh nivojih mostu sta petpasovni cesti, ki omogočata, da je ta most v povprečju prečkalo 280.000 vozil na dan. Sedemnajstega oktobra 1989 je potres z magnitudo 6,9 povzročil porušitev majhnega dela (15 metrov, slika 7, levo zgoraj) zgornje ravni mostu in pri tem povzročil eno smrtno žrtev ter zaprl to povezavo za več kot mesec dni. Za to obdobje so morale vozila uporabljati druge poti, pri čemer se je dolžina poti v eni smeri zanje podaljšala za več kot 70 kilometrov. V povprečju so torej vozila vsak dan skupaj prevozila več kot 19 milijonov dodatnih kilometrov. Posledice porušitve mostov ob potresu so torej večplastne. Ni pomembna samo neposredna škoda, ki na takih objektih nastane ob potresu, temveč je treba upoštevati tudi druge dejavnike, ki posredno vplivajo na povečanje škode.

Modeliranje

Zaradi spremenljivosti nihanja tal ob potresu lahko pride do poškodb različnih objektov. V strokovni literaturi najpogosteje najdemo opisane primere, ko je prišlo do poškodbe mostov, predvsem zaradi njihove pomembnosti in številčnosti (slika 7). Ob potresu na Tajvanu leta 1999 so bili poškodovani mostovi in daljnovodi, zaradi bližine preloma so se porušili tudi jezovi (Vidrih in Godec, 2001). Analiza ranljivosti takih objektov je zaradi spremenljivosti nihanja tal pri potresu izredno zapletena. Zapletenost oziroma večplastnost potresa kot naravne pojave, s katerim se srečujemo že pri žariščnem mehanizmu, kot tudi pozneje pri potovanju potresnih valov skozi nehomogeno Zemljino notranjost, je tako velika, da še danes ni mogoče ustvariti splošnega natančnega krajevnega mehanskega modela za določanje spremenljivosti na območju, velikem nekaj deset ali sto metrov (Task Group, 2007). Če pri tem upoštevamo še strukturo dolgega objekta, kot sta recimo geometrija in material, iz katerega je sestavljen, se število mogočih odzivov objekta na spremenljivo nihanje tal izredno poveča (Task Group, 2007).

Sklepne misli

Krajevna spremenljivost nihanja tal ob potresu je pojav, ki je vedno prisoten, a se ga pogostokrat ne zavedamo. Hitrost potresnih valov je tako velika, da na zelo majhni

razdalji krajevna spremenljivost nihanja tal ob potresu ni izrazita. A pomembna postane, ko proučujemo nihanje tal na območju velikosti nekaj deset ali nekaj sto metrov. Če so nihanja tal zaradi potresa velika, je njihova spremenljivost ob potresu zelo pomembna za objekte velike vodoravne razsežnosti. Pogosto so to nebivanski objekti, ki pa lahko imajo velik posreden vpliv na družbo. Ranljivost takih objektov je zaradi spremenljivosti nihanja tal ob potresu zelo težko neposredno modelirati. Toda danes objekti, kot so recimo mostovi, kljub klasičnemu pristopu (vse kontaktne točke zaznajo enako nihanje tal) tudi pri močnih potresih ostanejo nepoškodovani. Potresno odporno projektiranje se nenehno izpopolnjuje in izboljšuje, predvsem zaradi izkušenj ter lekcij iz potresov v preteklosti (Moehle in Eberhard, 2000; Wen-Huei, 2002).

Viri in literatura

1. Gosar, A., 2005. Seizmične raziskave litosfere v srednji Evropi in debelina Zemljine skorje v Sloveniji, Potresi v letu 2003, 99–110.
2. Harichandran, R. S., 1999. Spatial Variation of Earthquake Ground Motion, Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, <http://www.egr.msu.edu/~harichan/papers/present/svegm.pdf> (dostop 13. 5. 2013).
3. Moehle, J. P., Eberhard, M. O., 2000. "Earthquake Damage to Bridges." *Bridge Engineering Handbook*. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan Boca Raton: CRC Press, 2000.
4. SMART-1, 1990. <http://www.earth.sinica.edu.tw/~smdmc/smart1/smart1.htm> (dostop 13. 5. 2013).
5. Shinozuka, M., Deodatis, G., Zhang, R., Papageorgiou, A. S., 1999. Modeling, Synthetics and engineering applications of strong earthquake wave motion, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 18 (1999) 209–228.
6. Task Group 7.4, 2007. Seismic bridge design and retrofit - structural solutions: state-of-art report, FIB - Fédération internationale du béton, Sprint-Digital-Druck, Stuttgart.
7. USGS (2013), Earthquake Glossary - lifelines; <http://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/?term=lifelines> (dostop 13. 5. 2013).
8. Vidrih, R., Godec, M., 2001. Potres 20. septembra 1999 na Tajvanu, *Ujma* 14-15, 202–208.
9. Wen-Huei, P. Y., 2002. Lessons Learned About Bridges From Earthquake in Taiwan, <http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads/02janfeb/taiwan.cfm> (dostop 13. 5. 2013).
10. Zerva, A., Zervas, V., 2002. Spatial variation of seismic ground motions: An overview. *Appl. Mech. Rev.* Vol 55:3, 271–297.
11. Zerva, A., 2010. Spatial Variation of Seismic Ground Motions: Modeling and Engineering Applications, *Advances in Engineering Series*, Taylor & Francis, CRC Press.