

VEČKANALNA ANALIZA POVRŠINSKEGA VALOVANJA (MASW) ZA DOLOČITEV HITROSTI STRIŽNEGA VALOVANJA Multichannel analysis of surface waves (MASW) to determine shear wave velocity

Andrej Gosar* UDK 550.83

Povzetek Abstract

Hitrost strižnega valovanja v površinskih plasteh je pomembna za analizo nihanja tal ob potresu in v geotehniki (npr. pri raziskavah zemeljskih plazov), vendar jo je dokaj težko in drago določiti z uveljavljenimi geofizikalnimi metodami, kakršna je refrakcijska seizmika. V zadnjem desetletju so kot koristno drugo možnost razvili večkanalno analizo površinskega valovanja (MASW). Metoda temelji na disperziji površinskega (predvsem Rayleighjevega) seizmičnega valovanja, ki ima precej nižje frekvence (1–30 Hz) kakor prostorsko valovanje. Pri aktivni različici prožimo seizmično valovanje z udarci težkega kladiva, pri pasivni pa uporabljamo seizmični nemir naravnega in umetnega izvora, ki je stalno prisoten v okolju. Z inverzijo disperzijske krivulje površinskega valovanja dobimo enodimenzionalni model spreminjanja hitrosti strižnega valovanja z globino. Ta se uporablja v seizmologiji za določitev vpliva mehkih sedimentov na potresno nihanje tal, v geotehniki pa za določitev strižne trdnosti tal ali nevarnosti plazenja.

Understanding the shallow shear-wave velocity structure is important for seismological ground motion studies and for geotechnical engineering (e.g. landslide investigations), but it is quite difficult and expensive to derive this structure through conventional geophysical techniques, e.g. seismic refraction method. Multichannel analysis of surface waves (MASW) is therefore a valuable alternative, and one which was developed in the last decade. The method is based on dispersion of surface (mostly Rayleigh) seismic waves, which have lower frequencies (1-30 Hz) than body waves. In active MASW method seismic waves are generated using impacts of a sledgehammer, whereas in passive MASW method ambient noise of natural and artificial origin is used. By inverting the surface wave dispersion curve, a one-dimensional model of shear-waves velocity variation with depth is obtained. This model is used in seismology to determine the effects of soft sediments on seismic ground motion and in geotechnical engineering to determine the shear strength or danger of sliding.

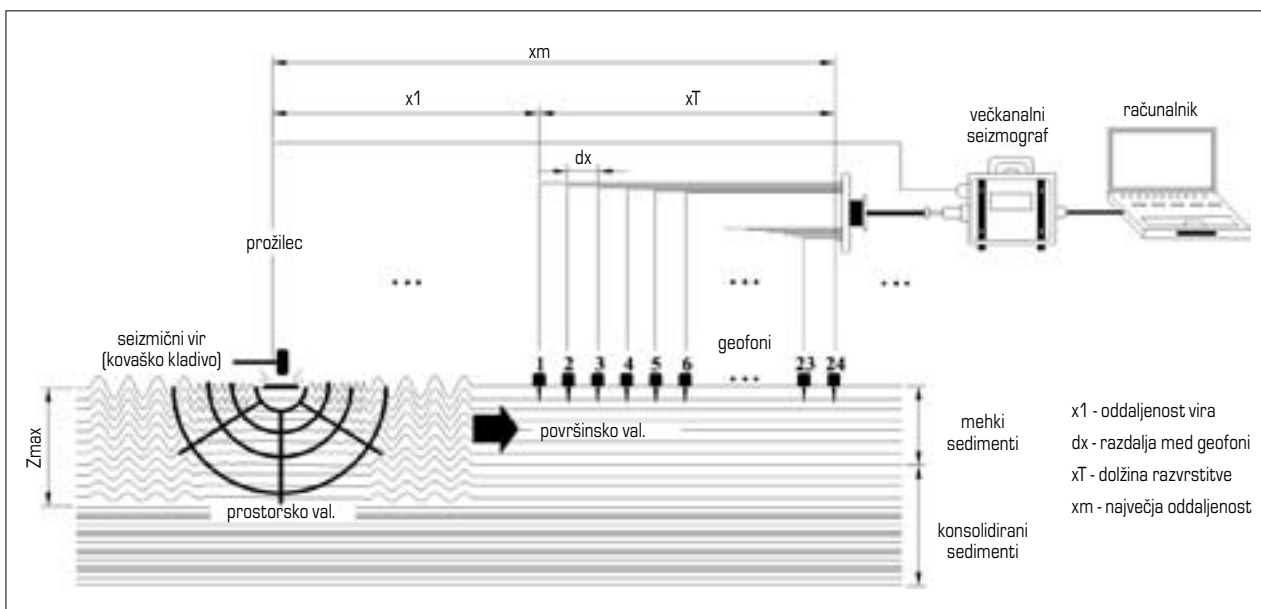
Uvod

Velika večina seizmičnih raziskav (refleksijska in refrakcijska metoda) uporablja longitudinalno (P) valovanje, ki ga je lažje tvoriti in kot najhitrejšega tudi najlažje registrirati (Sheriff in Geldart, 1995). Pri seizmoloških in geotehničnih raziskavah pa je zelo pomembno poznati hitrost strižnega (S) valovanja v kamninah, ker je ta neposredno odvisna od strižnega modula in togosti kamnine in zato

predstavlja osnovni geomehanski parameter. V seizmologiji se uporabljajo S-hitrosti za določitev vpliva mehkih sedimentov na potresno nihanje tal, v geotehniki pa za določitev strižne trdnosti tal ali nevarnosti plazenja.

Hitrost S-valovanja blizu površja lahko ugotovimo z refrakcijskimi seizmičnimi raziskavami, pri katerih uporabljamo vodoravne geofone in poseben način proženja strižnega valovanja, npr. z vodoravnim tolčenjem s kovaškim kladivom po leseni kladi, ki je trdno zasidrana v tla. Če imamo na razpolago vrtine, lahko hitrost S-valovanja izmerimo tudi z meritvami v eni vrtini (*down-hole*) ali meritvami med dvema vrtinama (*cross-hole*). Seizmični signali, ki se uporabljajo pri vseh omenjenih meritvah, obsegajo frekvence nad 30 Hz. Refrakcijske meritve s S-valovanjem so razmeroma zahtevne in dolgotrajne, meritve v vrtinah pa zahtevajo drago vrtanje.

* izr. prof. dr., Ministrstvo za okolje in prostor RS, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana, andrej.gosar@gov.si



Slika 1. Shematski prikaz aktivnih meritev MASW
 Figure 1. Schematic representation of active MASW measurements

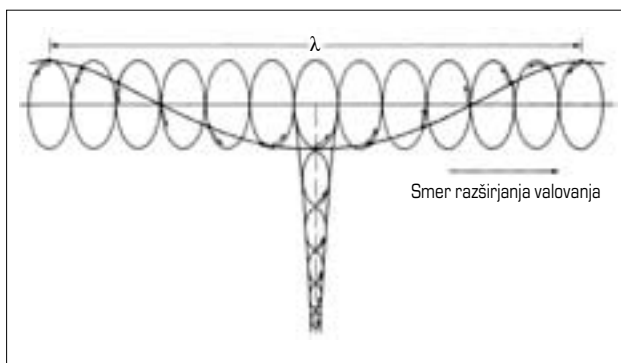
Večkanalna analiza površinskega seizmičnega valovanja

V zadnjem desetletju se je razvila nova metoda, imenovana večkanalna analiza površinskega valovanja (*Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW*), ki ima pri določitvi porazdelitve hitrosti S-valovanja pod površjem številne prednosti v primerjavi z uveljavljeno refrakcijsko seizmično metodo ali meritvami v vrtninah (Park in drugi, 1999). Metoda temelji na analizi disperzije površinskega seizmičnega valovanja (predvsem Rayleighjevega). Disperzija je odvisnost fазne hitrosti valovanja od njegove valovne dolžine oz. frekvence in je značilna za površinsko seizmično valovanje, medtem ko je pri prostorskem seizmičnem valovanju v območju frekvenc, ki se uporabljajo v seizmiki, zanemarljiva. Metode povr-

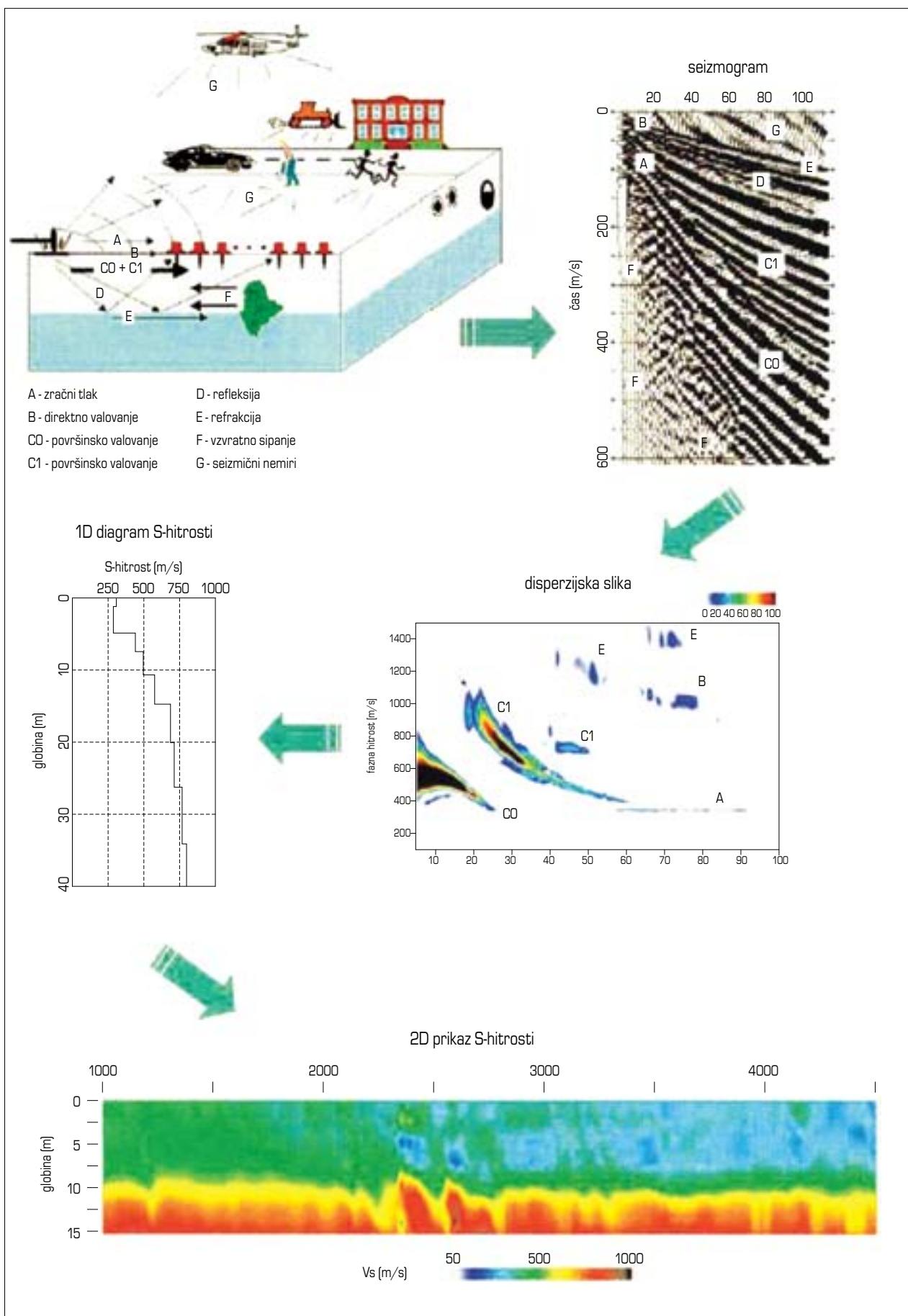
šinskega valovanja uporabljajo precej nižje frekvence valovanja (npr. 1–30 Hz) kakor seizmične metode, ki uporabljajo prostorsko valovanje. Globina, zajeta pri širjenju površinskega valovanja, je neposredno odvisna od valovne dolžine. Zaradi tega je njegoa hitrost odvisna od frekvence oz. je valovanje disperzno. Ker je hitrost površinskega valovanja odvisna od hitrosti S-valovanja (doseže do 90 odstotkov hitrosti S-valovanja), lahko iz disperzijske krivulje površinskega valovanja (krivulje odvisnosti fазne hitrosti od frekvence) z inverzijo določimo spreminjanje hitrosti S-valovanja z globino (Xia in drugi, 1999). Glede na izvor površinskega seizmičnega valovanja (tolčenje ali seizmični nemir – mikrotremorij) razlikujemo aktivno in pasivno metodo MASW (Park in drugi, 2007).

Aktivna metoda

Aktivna metoda MASW uporablja podobno linearno razvrstitev geofonov kakor refrakcijska metoda in kovaško kladivo ali padajočo utež kot seizmični vir (slika 1). Metoda temelji na analizi predvsem Rayleighjevega valovanja, ki potuje vzdolž prostega površja od točke tolčenja proti geofonom. Za Rayleighjevo valovanje je značilno eliptično nihanje delcev, ki je retrogradno glede na smer širjenja valovanja (slika 2). Njegova amplituda se z globino eksponentno zmanjšuje. Z večkanalno razvrstitvijo (običajno uporabljamo 24 geofonov) registriramo različne vrste seizmičnega valovanja (slika 3): neposredno, lomljeno (refrakcija), zračni udar, odbito (refleksje), osnovno obliko Rayleighjevega valovanja in njegove višje oblike, vzvratno-sipano (*back-scattered*) površinsko valovanje in seizmični nemir. Večkanalni seizmogram nato spremenimo z 2D pretvorbo valovnega polja (Xia in drugi, 2004) v disperzijsko sliko (slika 3). Nekatero motnje, kakor je (vzvratno ali s strani) sipano površinsko valovanje in različno prostorsko valovanje, se



Slika 2. Gibanje delcev pri Rayleighjevem valovanju. Vidno je zmanjševanje amplitude z globino
 Figure 2. Particle motion for Rayleigh waves showing amplitude decrease with depth



Slika 3. Prikaz meritev in analize podatkov z aktivno metodo MASW (po Park in drugi, 2007)

Figure 3. Presentation of active MASW measurements and data analysis (after Park et al., 2007)



Slika 4. Povezana razvrstitev geofonov (*land streamer*) s 24 geofoni in kovaško kladivo kot seizmični vir; majhna vstavljena slika prikazuje pritrditve geofona na premične sani

Figure 4. Land streamer with 24 geophones and a sledhammer as a seismic source; on a small insert a detail of geophone mount is shown

pri tej pretvorbi samodejno filtrirajo. Na disperzijski sliki nato odčitamo disperzijsko krivuljo osnovne oblike Rayleighovega valovanja. Z inverzijo disperzijske krivulje dobimo enodimenzionalni (1D) profil spreminjanja hitrosti S-valovanja (V_s) z globino (Xia in drugi, 1999; Roth in Holinger, 1999). Če smo meritve izvedli vzdolž daljšega profila in z večjim številom točk proženja valovanja, lahko več 1D profilov z interpolacijo združimo v dvodimenzionalni (2D) prerez pod površja (slika 3).

Značilni merilni sistem obsega 24-kanalni seizmograf in nizkofrekvenčne geofone (lastne frekvence npr. 4,5 Hz). Uporabimo lahko potrebno število posamičnih geofonov, ki se s konico zapičijo v tla, ali povezano razvrstitev geofonov, t. i. *land-streamer* (Gosar in drugi, 2008), pri katerem je vsak geofon nameščen na majhne kovinske sani, ki so praviloma v enakih razmikih nameščene na močan trak (slika 4). Pri povezani razvrstitvi med zaporednimi meritvami geofonov ni potrebno premeščati posamično, ampak potegnemo celotno razvrstitev naenkrat na novo lokacijo.

Največji globinski doseg raziskav pri aktivnem MASW je 20–30 m, frekvenčno območje, ki ga analiziramo, pa je med 3 in 30 Hz. Celotna dolžina razvrstitve geofonov neposredno opredeljuje največjo valovno dolžino, ki

jo še lahko analiziramo, ta pa določa največjo globino raziskav. Na drugi strani razdalja med posameznimi geofoni opredeljuje najmanjšo valovno dolžino in s tem najmanjšo globino, ki jo še lahko razločimo. Oddaljenost točke proženja valovanja od najbližjega geofona vpliva na zašumljenost seizmograma z drugimi vrstami valovanj – neposredno, lomljeno, zračni udar (Park in drugi, 2006). Kadar uporabljamo ponovljivi vir, kakršna sta kovaško kladivo ali padajoča utež, lahko s seštevanjem večjega števila udarcev močno zmanjšamo seizmični nemir.

Pasivna metoda

Glavna omejitev aktivnega MASW je največji globinski doseg, ki je okoli 20–30 m. Če želimo globinski doseg povečati za nekaj deset metrov, tako da dodamo nekaj Hz na spodnji meji disperzijske slike, moramo zelo povečati razdaljo med geofoni in povečati moč seizmičnega vira, kar naredi metodo nepraktično in negospodarno. Na drugi strani so v tleh stalni tresljaji naravnega (plimovanje, morski valovi, veter, reke) in umetnega (promet, industrija) izvora. Ti tresljaji povzročajo površinsko seizmično valovanje z valovnimi dolžinami od deset do nekaj deset ali sto metrov (umetni viri) ali do nekaj kilometrov (naravni viri), kar pomeni zelo velik razpon globine prodiranja pod Zemljino površje. To valovanje izkorišča pasivna metoda MASW. Pasivna se imenuje zato, ker seizmični vir ni pod našim nadzorom in valovanja v tleh le pasivno merimo.

Pasivno metodo so razvili najprej na Japonskem in jo imenovali mrežne meritve mikrotremorjev (Okada, 2003; Hayashi in drugi, 2003). Pri tem so uporabljali majhno število senzorjev (manj kakor deset). Iz nje so potem razvili refrakcijske meritve mikrotremorjev (Louie, 2001) vzdolž linearne razvrstitve geofonov (*Refraction Microtremor* – ReMi metoda). Pozneje so iz teh metod razvili pasivno različico MASW, ki uporablja 24 ali več geofonov, kar omogoča boljšo ločljivost podatkov (Park in drugi, 2007).

Pri pasivnem MASW uporabljamo dvodimenzionalne (2D) razvrstitve geofonov, kakršna sta križ ali krog. Uporabljata se tudi kvadratna ali trikotna razvrstitev, vendar je priporočljivo, da je razvrstitev simetrična, ker pri pasivnem opazovanju ni preferenčnih smeri, od koder bi prihajalo valovanje. Premer razvrstitve je neposredno povezan z največjo valovno dolžino valovanja in tako določa največjo globino raziskav. Po drugi strani pa razdalja med posameznimi geofoni določa najkrajšo valovno dolžino in s tem ločljivost raziskav. Značilni globinski doseg, ki ga lahko dosežemo pri pasivnem MASW, je 100 m.

Obdelava podatkov in njihova analiza je podobna kakor pri aktivnem MASW in obsega: 1) izdelavo disperzijske slike (odvisnost fazne hitrosti od frekvence), 2) odčitavanje disperzijske krivulje in 3) inverzijo te krivulje v 1D hitrostni profil S-valovanja. Nekatere metode, kakor je ReMi, uporabljajo namesto fazne hitrosti počasnost (*slowness*).

Pogosto se raziskave z aktivnim in pasivnim MASW kombinirajo in obe disperzijski sliki združita v eno, in sicer iz dveh razlogov: da povečamo uporabno območje disperzije površinskih valov (in s tem tudi globinsko območje raziskav) in da lahko bolje ločimo osnovne in višje valovne oblike.

Razvoj metode v zadnjih letih poteka v smeri skupne inverzije podatkov MASW in metode spektralnih razmerij mikrotremorjev (Garcia-Jerez in drugi, 2007). Metoda mikrotremorjev temelji na meritvah seizmičnega nemira s trikomponentnim senzorjem. S spektralnim razmerjem med vodoravnima in navpično komponento zapisa (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio* – HVSR) lahko ocenimo lastno frekvenco paketa mehkih sedimentov, ki ležijo na trši skalni podlagi, ne da bi poznali hitrost S-valovanja v njih ali njihovo debelino (Gosar, 2007). Skupna inverzija, pri kateri poskušamo z enodimenzionalnim modelom porazdelitve S-hitrosti z globino doseči čim boljše ujemanje modeliranih disperzijskih in HVSR krivulj z izmerjenimi, omogoča stabilnejšo rešitev od ločene inverzije s posamezno vrsto podatkov (D'Amico in drugi, 2008).

Uporaba rezultatov večkanalne analize površinskega valovanja

Področje seizmologije, kjer se porazdelitev hitrosti strižnega seizmičnega valovanja v vrhnjih nekaj desetih metrih najpogosteje uporablja, je potresna mikrorajonizacija. Z njo količinsko ovrednotimo vpliv mehkejših sedimentov blizu površja na potresno nihanje tal. V Evropi se je v potresni mikrorajonizaciji uveljavil evropski standard za klasifikacijo tal Eurocode 8 – projektiranje potresno

odpornih konstrukcij (CEN, 2004; SIST, 2004). V njem je vpliv lokalnih tal na učinke potresa za nekatere značilne tipe tal določen s faktorjem tal. Z njim pomnožimo vrednosti projektnega pospeška tal, ki veljajo za referenčno trdno kamnino. Eurocode 8 določa sedem tipov tal: A, B, C, D, E, S₁ in S₂ (preglednica 1), ki so opisani s stratigrafskim profilom in tremi veličinami: s povprečno hitrostjo strižnega valovanja v zgornjih 30 m tal pri strižni deformaciji 10⁻⁵ ($v_{s,30}$), s številom udarcev pri standardnem penetracijskem preizkusu (N_{spt}) in nedrenirano strižno nosilnostjo zemljine (c_u). Pri tem je $v_{s,30}$ najpomembnejša veličina. Šele ob pomanjkanju podatkov o hitrosti uporabimo drugi dve veličini ali opis stratigrafskega profila. Za tipe tal B, C, D in E je določen faktor glede na tip A. Za posebna tipa tal S₁ in S₂ faktor tal ni določen in ga je treba za ugotovljen hitrostni profil izračunati z 1D modeliranjem, npr. s programom SHAKE (Idriss in Sun, 1992).

Povprečna hitrost strižnega valovanja v zgornjih 30 m se izračuna po enačbi

$$v_{s,30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{v_i}}$$

kjer označujeta h_i in v_i debelino in hitrost strižnega valovanja i -te od skupno N plasti, ki se nahajajo v zgornjih 30 metrih.

Uporaba standarda Eurocode 8 je bila sprva precej omejena prav zaradi pomanjkanja geofizikalnih podatkov o hitrosti strižnega valovanja.

Korak naprej od potresne mikrorajonizacije, ki predpostavlja 1D navpični profil vodoravno ležečih plasti enakomerne debeline, je 2D modeliranje potresnega nihanja tal vzdolž profilov od izbranega potresnega izvora do

Tip tal	Opis stratigrafskega profila	$v_{s,30}$ (m/s)	N_{spt} (udarci/30 cm)	c_u (kPa)
A	Skala ali druga skali podobna geološka formacija, na kateri je največ 5 m slabšega površinskega materiala	>800	-	-
B	Sedimenti zelo gostega peska, proda ali zelo goste gline, debeli vsaj nekaj 10 m, v katerih se mehanske lastnosti izboljšujejo z globino	360–800	>50	>250
C	Globoki sedimenti gostega ali srednje gostega peska, proda ali zbite gline z debelino od nekaj 10 m do več 100 m	180–360	15–50	70–250
D	Sedimenti rahle do srednje nevezane (z ali brez posameznih mehkih vezanih plasti) ali večinoma mehke do trdne vezane zemljine	<180	<15	<70
E	Profil zemljine sestoji iz površinskega aluvija, ki ima vrednost $v_{s,30}$ tipa C ali D in debelino med 5 in 20 m, pod tem pa leži trdnější material z $v_{s,30} > 800$ m/s			
S ₁	Sedimenti, sestavljeni iz (ali pa vsebujejo plast debelo najmanj 10 m) mehkih glin/muljev z visoko vrednostjo plastičnosti ($PI > 40$) in veliko vsebnostjo vode	<100 (indikativno)	-	10–20
S ₂	Sedimenti zemljin in glin, dovzetnih za utekočinjenje, ali katera koli druga zemljina, ki ni bila vključena v vrste tal od A do E ali S ₁			

Preglednica 1. Klasifikacija tal po Eurocode 8 (CEN, 2004; SIST, 2004)
Table 1. Ground classification according to Eurocode 8 (CEN, 2004; SIST, 2004).

kraja, za katerega želimo izračunati potresno nevarnost. Rezultate več zaporednih MASW meritev, ki smo jih opravili vzdolž ravne linije, lahko z interpolacijo združimo v 2D prerez podpovršja (slika 3), ki ga uporabimo za izdelavo modela. Ena od uveljavljenih metod, ki združuje 1D modeliranje za regionalni model in 2D numerično modeliranje z metodo končnih razlik za lokalni model v sedimentacijskem bazenu, je hibridna metoda, ki so jo razvili na univerzi v Trstu (Fäh in drugi 1994).

V geotehniko ima podatek o hitrosti strižnega valovanja prednost pred hitrostjo longitudinalnega valovanja, ker ga lahko neposredno povežemo s strižnim modulom hribine ali zemljine in njeno togostjo. Strižni modul je pomemben za oceno nosilnosti tal pri projektiranju temeljenja objektov. Še pomembnejša je strižna trdnost pri procesih na pobočju, ker določa mejo, pri kateri pride do splazitve. MASW metoda se zato pogosto uporablja pri raziskavah zemeljskih plazov, kjer lahko ugotovimo ploskev plazenja ali opredelimo nevarnost zdrsa. Uporablja se tudi pri raziskavah tras predorov ali zahtevnejših premostitvenih objektov, kjer lahko pride do strižnih deformacij.

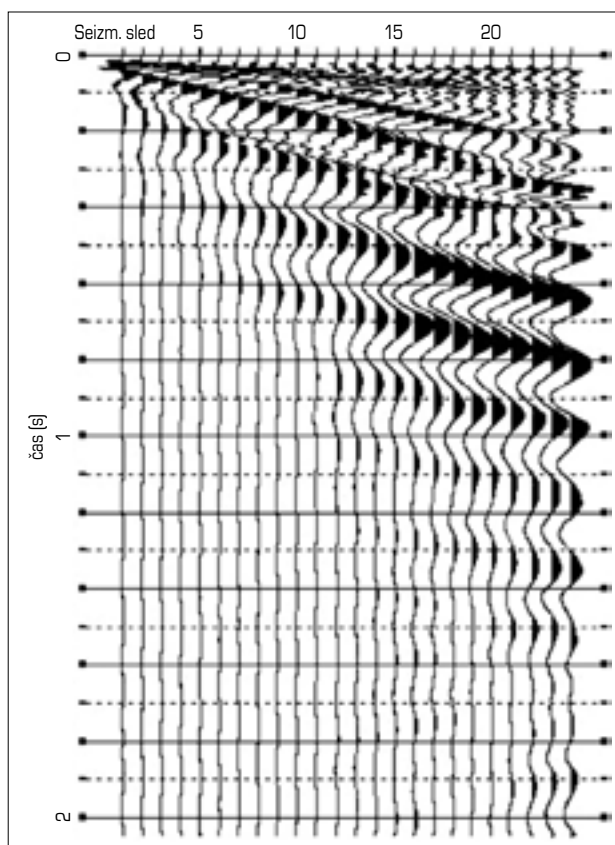
Primer meritev za kategorizacijo tal pri potresni mikrorajonizaciji

Za območje Ljubljane je bila izdelana potresna mikrorajonizacija že v začetku sedemdesetih let dvajsetega stoletja, in sicer je podala prirastke seizmične intenzitete glede na referenčna tla. Takrat so se namreč uporabljale karte potresne nevarnosti, ki podajajo pričakovano največjo intenziteto po lestvici MSK za izbrano povratno dobo. Pri tej mikrorajonizaciji so bili uporabljeni rezultati 441 meritev hitrosti longitudinalnega seizmičnega valovanja z refrakcijsko seizmično metodo (Lapajne, 1971), žal pa niso bile opravljene meritve hitrosti strižnega valovanja. Ker se danes uporablja nova karta potresne nevarnosti, ki podaja projektni pospešek tal (Lapajne in sodelavci, 2001), in ker se je uveljavil nov standard Eurocode 8, ki namesto prirastka intenzitete uvaja faktor tal, je treba izdelati novo potresno mikrorajonizacijo. Prvi poskus so opravili Zupančič in sodelavci (2004), ki so na podlagi obstoječih geoloških podatkov izdelali karto potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana, vendar izključno za uporabo v sistemu varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami. Pri tem namreč niso bile opravljene nobene dodatne geofizikalne ali druge raziskave, ki bi omogočale zanesljivejšo kategorizacijo tal. Te pa bi bile nujne za izdelavo mikrorajonizacije, ki bi jo lahko uporabili tudi za potresno odporno projektiranje objektov.

Ker se je pri omenjeni mikrorajonizaciji pokazalo, da je posebej problematična kategorizacija tal na Ljubljanskem barju, za katerega so značilni razmeroma mehki kvartarni sedimenti, smo izvedli poskusne meritve z

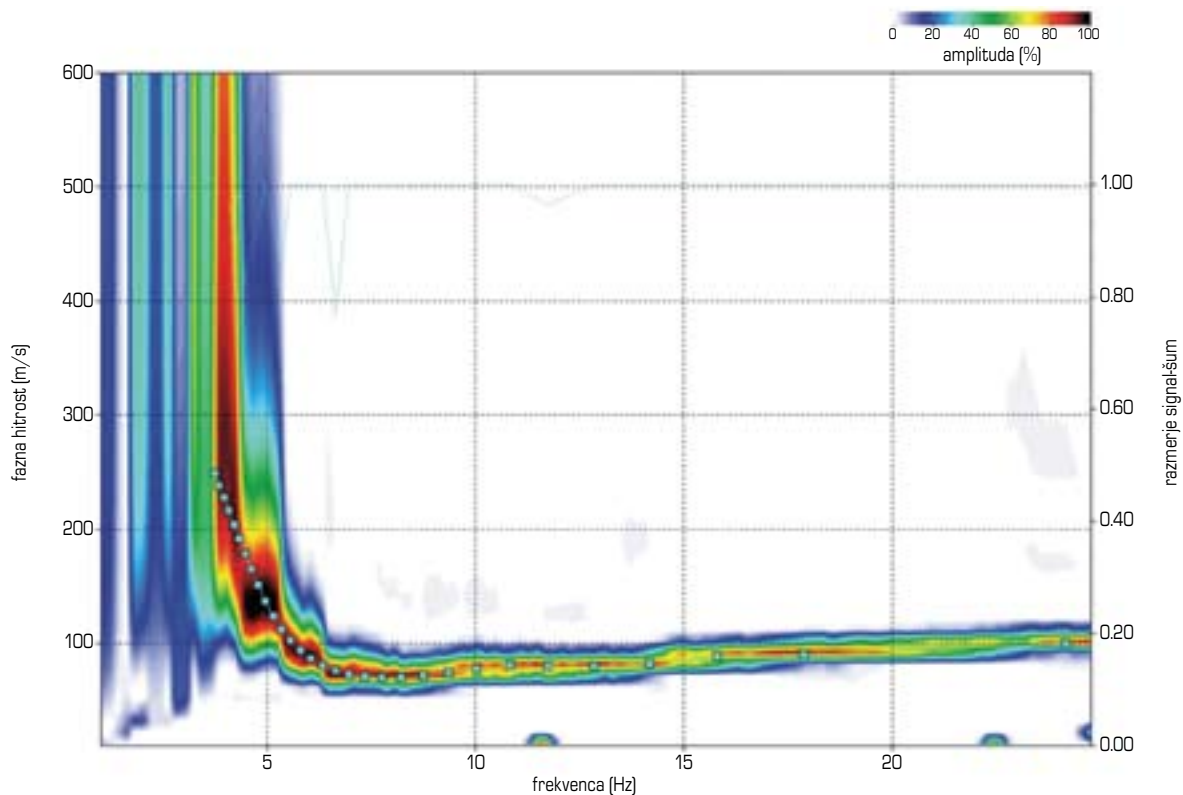
aktivno metodo MASW na območju Dolgega brega ob Ljubljani (Gosar in drugi, 2008). Pri tem smo uporabili 24-kanalni seizmograf ABEM Terraloc Mk6, navpične geofone z lastno frekvenco 4,5 Hz in 8 kg težko kovaško kladivo kot seizmični vir. Razdalja med geofoni je bila 1 m, oddaljenost točke vzbujanja valovanja od prvega geofona pa 5 m. Uporabljena je bila tračno povezana razvrstitev geofonov (*land streamer*), ki omogoča hitrejšo izvedbo meritev (slika 4). Za vsako meritev smo sešteli zapise valovanja okoli 10 udarcev kladiva, skupaj pa smo posneli 20 seizmogramov. Primer seizmograma je prikazan na sliki 5. Na njem se površinsko valovanje z daljšimi nihajnimi časi in manjšo navidezno hitrostjo jasno razlikuje od prvih prihodov, ki ustrezajo prostorskemu valovanju z neposredno in lomljeno potjo (refrakcija). Prevladujoča frekvenca površinskega valovanja je okoli 5 Hz.

Podatke smo obdelali s programom SurfSeis (Park in sodelavci, 2006). Po pretvorbi podatkov v format za obdelavo smo izvedli vpis geometrije meritev in izračun disperzijskih slik (slika 6). Za vse meritve je značilno dobro razmerje med signalom in šumom. Disperzija osnovne oblike površinskega valovanja je jasno vidna v frekvenčnem območju od 3 do 25 Hz. Fazna hitrost v frekvenčnem območju 2–7 Hz najprej strmo upada do najnižje vrednosti 70 m/s. Sledi rahlo povečevanje fazne hitrosti do okoli 25 Hz. Na sliki 7 so nad frekvenco 8 Hz lepo vidne tudi višje oblike površinskega valovanja.



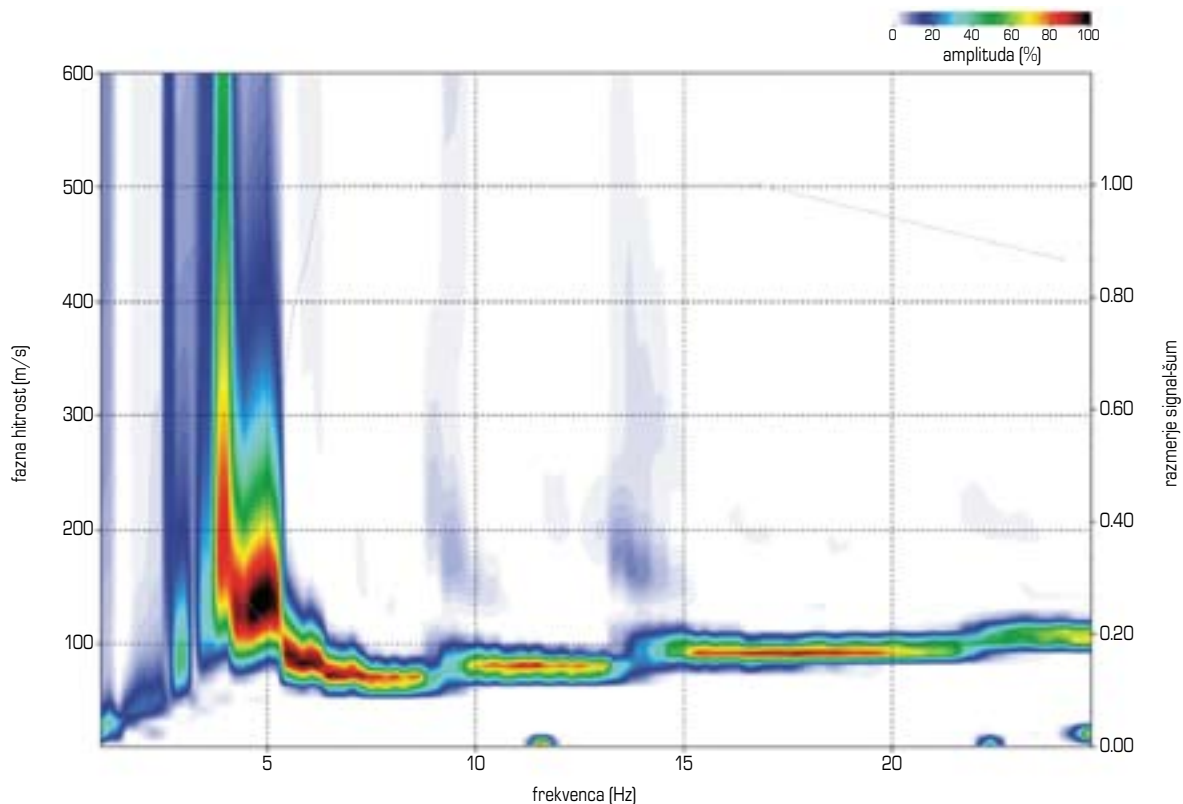
Slika 5. Primer seizmograma aktivnih meritev MASW na Ljubljanskem barju

Figure 5. Seismogram example of active MASW measurements in Ljubljansko barje



Slika 6. Disperzijska slika meritev MASW, ki kaže samo osnovno obliko površinskega valovanja. Prikazana je odčitana disperzijska krivulja

Figure 6. Dispersion image of MASW measurements which shows only fundamental mode of surface waves. Picked dispersion curve is also shown



Slika 7. Disperzijska slika meritev MASW, ki kaže nad frekvenco 8 Hz višje oblike površinskega valovanja

Figure 7. Dispersion image of MASW measurements with higher modes of surface waves visible above 8 Hz

Po določitvi mej območja iskanja (spodnja in zgornja meja fazne hitrosti) smo uporabili samodejni algoritem za odčitavanje disperzijske krivulje. Zaradi dobrega razmerja med signalom in šumom je samodejno odčitavanje krivulje pri skoraj vseh posnetkih dalo ustrezno krivuljo, ki je ni bilo treba ročno popravljati (slika 6). Točke krivulje smo digitalizirali po načelu enakega intervala valovnih dolžin, torej pogosteje pri nižjih frekvencah in redkeje pri višjih frekvencah.

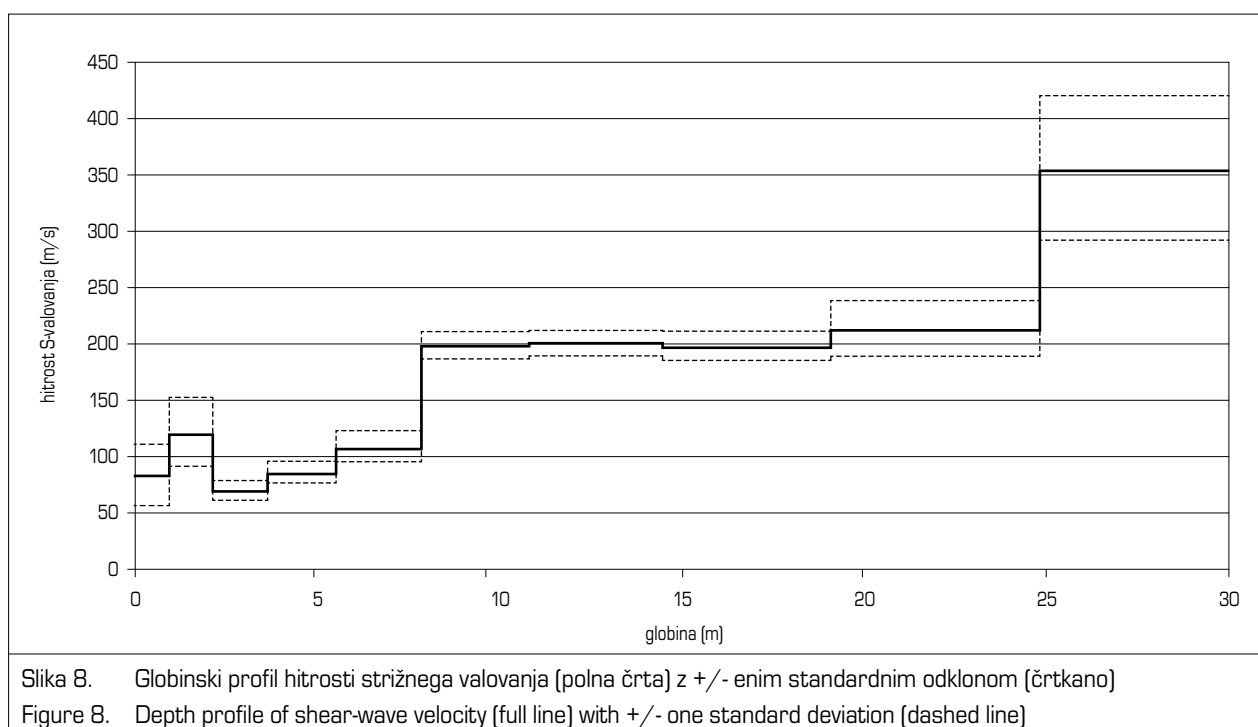
Enodimenzionalno inverzijo disperzijske krivulje smo opravili z metodo gradientne iterativne rešitve utežene enačbe (Xia in sodelavci, 1999). Uporabljen je bil desetplastni model, v katerem se debelina plasti povečuje z globino. Največji globinski doseg meritev sta velikost razvrstitve geofonov in najnižja frekvenca v disperzijski krivulji omejila na okoli 30 m. Inverzija se je končala po največ 12 iteracijah ali napaki RMS v fazni hitrosti, manjši od 5 m/s. Hitrost longitudinalnega valovanja smo vezali na hitrost strižnega valovanja z uporabo Poissonovega količnika 0,4. Povprečen rezultat vseh 20 meritev je skupaj s +/- enim standardnim odklonom prikazan na sliki 8. Spremenljivost rezultatov je dokaj majhna. Nekoliko se poveča le v globini večji od 25 m, kjer se hitrost S-valovanja skokovito poveča z okoli 200 m/s na 350 m/s. Na globini okoli 25 m se po podatkih bližnje vrtine nahaja meja med kvartarnimi sedimenti in podlago, ki jo tvorijo permski in karbonski peščenjaki, konglomerati in skrilavci.

Globinski hitrostni profil strižnega valovanja (slika 8) kaže naslednje glavne plasti, ki so opisane od površja v globino:

- na površju je 1 m debela plast zemlje s hitrostjo 80 m/s,
- nato je 1 m debela plast s hitrostjo 120 m/s,

- med 2 m in 7,5 m globine je plast nižje hitrosti (70–110 m/s),
- med 7,5 in 25 m globine se hitrost zelo malo spreminja in je povprečno okoli 200 m/s,
- za plast v globini večji od 25 m je značilna hitrost nekoliko nad 350 m/s.

V globini večji od 30 m, ki je raziskave niso zajele, lahko pričakujemo bistveno večjo hitrost S-valovanja. Praviloma obravnavamo v inženirski seizmologiji in potresnem inženirstvu kamnino, ki ima hitrost nad 800 m/s, kot kamninsko podlago. Če gre med 25 m in 30 m za permske in karbonske plasti, kaže hitrost strižnega valovanja na njihovo močno preperelost ali tektonsko pretrtost. Ker je bližnja vrtina segala samo do stika med kvartarnimi sedimenti in temi plastmi, namreč ni podatkov o geomehanskih lastnosti kamninske podlage na tej lokaciji. Glede na rezultate meritev MASW lahko torej vse kamnine v vrhnjih 30 m obravnavamo kot sedimente. Povprečna hitrost strižnega valovanja v zgornjih 30 m ($v_{s,30}$), ki upošteva debelino posameznih plasti in je izračunana po zgornji enačbi, znaša 145 m/s. Po Eurocode 8 klasifikaciji lahko tla na tej lokaciji uvrstimo v tip D. Za ta tip predpisuje Eurocode 8 faktor tal 1,35. S tem faktorjem pomnožimo projektni pospešek tal, ki je bil določen na karti potresne nevarnosti za referenčna skalna tla. Ker so barjanski sedimenti precej heterogeni, je treba z raziskavami MASW nadaljevati na različnih lokacijah. Glede na litološko zgradbo pričakujemo, da se precejšen del tal na Ljubljanskem barju uvršča v kategorijo S_1 , ki je opredeljena s hitrostjo S-valovanja ($v_{s,30}$) nižjo od 100 m/s. Za vrsto tal S_1 faktor tal v Eurocode 8 ni določen, ampak ga moramo za vsako obravnavano lokacijo posebej izračunati. Pri tem potrebujemo celotni profil spreminjanja hitrosti z globino in ne le povprečno vrednost v zgornjih



30 m. Opravljene poskusne raziskave so pokazale, da je metoda MASW zelo učinkovita za pridobitev podatkov, potrebnih za tak izračun.

Sklepne misli

Čeprav je metoda večkanalne analize površinskega valovanja razmeroma nova, se je že uveljavila tudi v Sloveniji. Raziskave s to metodo izvaja predvsem Geoinženiring d. o. o. V zadnjih letih so bile izvedene obsežne raziskave za seizmološko analizo na lokaciji načrtovanega drugega bloka jedrske elektrarne Krško in za potrebe projekta skladiščenja nizko in srednje radioaktivnih odpadkov nedaleč od jedrske elektrarne. Nekaj raziskav za geotehnične namene je bilo opravljenih še na lokacijah, kjer se projektirajo zahtevnejši objekti. Zaenkrat v Sloveniji še niso bile opravljene raziskave z metodo MASW na katerem od plazov. Ker imamo v Sloveniji več precej problematičnih plazov (npr. Slano blato nad Lokavcem pri Ajdovščini in Macesnik nad Solčavo), je torej možnosti za uporabo te metode v geotehničnih študijah še veliko. Drugo veliko področje raziskav je potresna mikrorajonizacija urbanih območij v Sloveniji. Obstoječe potresne mikrorajonizacije so bile izdelane po danes že zastareli metodologiji prirastkov intenzitete glede na referenčna tla. Nove potresne mikrorajonizacije morajo ustrezati standardu za potresno odporno gradnjo Eurocode 8. Ena od glavnih ovir za zanesljivo klasifikacijo tal po tem standardu je prav pomanjkanje podatkov o hitrosti strižnega valovanja v zgornjih 30 m tal. Zato bi bilo treba tudi v Sloveniji začeti s sistematičnimi meritvami z metodo MASW, ki so bistveno cenejše od vrtnanja geotehničnih vrtin in meritev seizmičnih hitrosti v njih.

Viri in literatura

1. CEN, 2004. Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European standard, EN 1998-1: 2004 (E), Stage 64, European Committee for Standardization, Brussels.
2. D'Amico, V., Picozzi, M., Baliva, F., Albarello, D., 2008. Ambient noise measurements for preliminary site-effects characterization in the urban area of Florence, Italy. *Bull. Seis. Soc. Am.*, 98, 1373–1388.
3. Garcia-Jerez, A., Navarro, M., Alcalá, F. J., Luzon, F., Perez_Ruiz, J. A., Enomoto, T., Vidal, F., Ocana, E., 2007. Shallow velocity structure using joint inversion of array and h/v spectral ratio of ambient noise: The case of Mula town (SE of Spain). *Soil. Dyn. Earthq. Eng.*, 907–919.
4. Gosar, A., 2007. Raziskave vpliva lokalne geološke zgradbe na potresno nihanje tal in ranljivosti objektov z mikrotremorji. *Geologija*, 50/1, 65–76.
5. Gosar, A., Stopar, R., Rošer, J., 2008. Comparative test of active and passive multichannel analysis of surface waves (MASW) and microtremor HVSZ method. *RMZ-Materials and Geoenvironment*, 55/1, 67–83.
6. Hayashi, K., Inazaki, T., Suzuki, H., 2006. Buried incised-channels delineation using microtremor array measurements at Soka and Misato Cities in Saitama Prefecture. *Bull. Geol. Surv. Japan*, 57/9-10, 309–325.
7. Fäh, D., Suhadolc, P., Mueller, S., Panza, G. F., 1994. A hybrid method for the estimation of ground motion in sedimentary basins: quantitative modelling for Mexico City. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84/2, 383–399.
8. Idriss, I., Sun, J. I., 1992. User's manual for Shake91, a computer program for conducting equivalent linear seismic response analysis of horizontally layered soil deposits. University of California, Davis.
9. Lapajne, J., 1970. Seizmična mikrorajonizacija Ljubljane. *Geofizikalne raziskave 1969–1970*. Geološki zavod Ljubljana.
10. Lapajne, J., Šket Motnikar, B., Zupančič, P., 2001. Karta potresne nevarnosti Slovenije – projektni pospešek tal. Uprava RS za geofiziko.
11. Louie, L. N., 2001. Faster, Better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 91, 347–364.
12. Okada, H., 2003. The microtremor survey method. *Society of Exploration Geophysicists*, 135 str.
13. Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., 1999. Multichannel analysis of surface waves (MASW). *Geophysics*, 64, 800–808.
14. Park, C. B., Miller, R. D., Ryden, N., Xia, J., Ivanov, J., 2005. Combined use of active and passive surface waves. *Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 10/3, 323–334.
15. Park, C. B., Ivanov, J., Brohammer, M., 2006. *SurfSeis 2.0 user manual*. Kansas Geological Survey, 38 str.
16. Park, C. B., Miller, R. D., Ryden, N., Xia, J., Ivanov, J., 2007. Multichannel analysis of surface waves (MASW)-active and passive methods. *The Leading Edge*, 26/1, 60–64.
17. Roth, M., Holliger, K., 1999. Inversion of source-generated noise in high-resolution seismic data. *The Leading Edge*, 18/12, 1402–1406.
18. Sheriff, R. E., Geldart, L. P., 1995. *Exploration seismology*. Cambridge University Press, 592 str.
19. SIST, 2004. Slovenski standard SIST EN 1998-1 Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij: Splošna pravila, potresni vplivi in vplivi na stavbe, s priložo: Nacionalni dodatek, Slovenski inštitut za standardizacijo, Ljubljana.
20. Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., 1999. Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves. *Geophysics*, 64, 691–700.
21. Xia, J., Miller, R. D., Park, C. B., Ivanov, J., Tian, G., Chen, C., 2004. Utilization of high-frequency Rayleigh waves in near-surface geophysics. *The Leading Edge*, 23/8, 753–759.
22. Zupančič, P., Šket Motnikar, B., Gosar, A., Prosen, T., 2004. Karta potresne mikrorajonizacije Mestne občine Ljubljana. *Potresi v letu 2002*, 32–54, ARSO, Urad za seizmologijo in geologijo.