

Otkrivanje podzemnih prepreka metodom SASW

Vedrana Krstić, Nenad Gucunski

Ključne riječi

podzemna prepreka, otkrivanje prepreka, laboratorij, metoda SASW, površinski valovi, spektralna analiza, svojstvo materijala

Key words

underground obstacle, identification of an obstacle, laboratory, SASW method, surface waves, spectral analysis, property of a material

Mots clés

obstacle souterrain, identification de l'obstacle, laboratoire, méthode SASW, onde de surface, analyse spectrale, propriété de un matériau

Ключевые слова

подземное препятствие, обнаружение препятствий, лаборатория, метод SASW, поверхностные волны, спектральный анализ, свойство материала

Schlüsselworte

unterirdisches Hindernis, Entdeckung von Hindernissen, Laboratorium, Methode SASW, oberflächenwellen, Spektralanalyse, Materialeigenschaften

V. Krstić, N. Gucunski

Izvorni znanstveni rad

Otkrivanje podzemnih prepreka metodom SASW

Prikazana je laboratorijska primjena metode za spektralnu analizu površinskih valova (SASW) radi otkrivanja podzemnih prepreka. Prikazan je utjecaj prepreka raznih veličina, oblika, krutosti i dubina prostiranja na krivulju disperzije. U studiji je dokazano da se metoda SASW može uspješno rabiti za otkrivanje podzemnih prepreka, za definiranje horizontalnog i vertikalnog položaja prepreke te za laboratorijsko određivanje općih svojstava materijala od kojeg se prepreka sastoji.

V. Krstić, N. Gucunski

Original scientific paper

Identification of underground obstacles by SASW method

The laboratory use of the spectral analysis of surface waves (SASW) for identification of underground obstacles is presented. The way in which dispersion curve is influenced by obstacles of various size, shape, rigidity and spreading depth, is presented. It is demonstrated in the study that the SASW method can successfully be used for identification of underground obstacles, for definition of the horizontal and vertical position of obstacles, and for laboratory determination of general properties of materials the obstacle is made of.

V. Krstić, N. Gucunski

Ouvrage scientifique original

L'identification des obstacles souterrains par la méthode SASW

L'application en laboratoire de l'analyse spectrale des ondes de surface (SASW) pour l'identification des obstacles souterrains est présentée. La manière dont la courbe de dispersion est influencée par obstacles de différent type, forme, rigidité et profondeur, est présentée. Il est prouvé dans l'étude que la méthode SASW peut être utilisée avec succès pour l'identification des obstacles souterrains, pour la définition de la position horizontale et verticale des obstacles, et pour la détermination en laboratoire des propriétés générales des matériaux constitutifs de l'obstacle.

В.Крстич, Н. Гучунски

Оригинальная научная работа

Обнаружение подземных препятствий с помощью метода SASW

Показано применение в лабораторных условиях метода спектрального анализа поверхностных волн (SASW) в целях обнаружения подземных препятствий. Показано влияние препятствий различных величины, формы, твердости и глубины простирания на кривую дисперсии. В работе доказано, что метод SASW может успешно использоваться для обнаружения подземных препятствий, определения горизонтального и вертикального положений препятствия и лабораторного определения общих свойств материала, из которого оно состоит.

V. Krstić, N. Gucunski

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Entdeckung unterirdischer Hindernisse mit Hilfe der Methode SASW

Dargestellt ist eine laboratorische Anwendung der Methode für Spektralanalyse von Obeflächenwellen (SASW) zwecks der Entdeckung unterirdischer Hindernisse. Dargestellt ist der Einfluss von Hindernissen verschiedener Grössen, Formen Steifigkeit und Tiefendehnung auf die Dispersionskurve. In der Studie ist erwiesen dass die Methode SASW für die Entdeckung unterirdischer Hindernisse, Definierung der horizontalen und vertikalen Lage des Hindernisses sowie für die laboratorische Bestimmung allgemeiner Eigenschaften des Materials des Hindernisses erfolgreich genutzt werden kann.

Autori: Doc. dr. sc. **Vedrana Krstić**, dipl. ing. građ., Koledž u New Jerseyu, Visoka tehnička škola, Odjel za građevinarstvo, SAD; prof. dr. sc. **Nenad Gucunski**, dipl. ing. građ., Državno sveučilište u New Jerseyu, Katedra za građevinarstvo i ekologiju, SAD

1 Uvod

Područje prostiranja površinskih valova u poluprostoru s lokalnim nepravilnostima počelo se istraživati krajem šezdesetih i tokom sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Glavni razlog za istraživanje položaja podzemnih prepreka bila je želja da se građevine i komunalna infrastruktura u što većoj mjeri zaštite od prostornih valova i udara. Woods [1] proučavao je utjecaj otvorenih jaraka na prostiranje/rasap Rayleighovih valova. Ustanovio je da se amplituda vertikalnog pomicanja tla u prosjeku smanjuje za 75 % u udaljenosti od 10 valnih duljina od kružnog jarka dubine od barem 0,6 valnih duljina kada je izvor vibracije udaljen otprilike jednu valnu duljinu od rova. Mogućnosti pronalazjenja krutih prepreka smještenih blizu površine tla analizirali su Haupt [2] i Prange [3]. Haupt je analizirao na koji način oblik prepreke i materijal od kojeg se ona sastoji utječu na amplitudu vertikalnih pomaka tla. Ustanovio je da se kod krutih prepreka smanjenje amplitude iza prepreke povećava s povećanjem površine prepreke, dok se kod prepreka čija je krutost manja od krutosti okolnog materijala ublažavanje amplitude smanjuje proporcionalno s povećanjem udaljenosti između izvora vala i prepreke.

Elastični valovi pružaju bitne podatke o karakteristikama medija kroz koje prolaze. Seizmičke metode uglavnom se zasnivaju na odgovarajućim pretpostavkama o mediju koji se ispituje. U spektralnoj se analizi površinskih valova (SASW – *spectral analysis of surface waves*), pretpostavlja da se sustav koji ispituujemo sastoji od niza homogenih slojeva konstantne debljine. Ova pretpostavka, zajedno s pretpostavkom ravninskoga površinskog (Rayleighova) vala dovoljno udaljenog od izvora, omogućuje relativno jednostavno i prilično izravno modeliranje problema [4]. Međutim, rezultati dobiveni teorijskim istraživanjima [2], [5], [6], [7], [8], [9], [10], kao i rezultati eksperimentalnih analiza [11], pokazuju velik utjecaj podzemnih prepreka i na obrasce prostiranja valova u tlu i na površinsko prostiranje valova.

Utjecaj diskontinuiteta i podzemnih prepreka na SASW posebno se obrađuje u sljedeće dvije studije:

- 1) Prva je studija teorijska i eksperimentalna studija autora Sheua i dr., [12] o utjecaju reflektiranih površinskih valova i izravnih i reflektiranih prostornih valova pri ispitivanju kolnika metodom SASW. U zaključku studije navodi se da bi refleksije od rubova kolnika i dna površinskog sloja mogle bitno utjecati na oblik disperzijske krivulje. Sheu i dr. [12] preporučuju postupke kojima se utjecaji reflektiranih valova mogu svesti na najmanju moguću mjeru.
- 2) Druga je studija opsežna eksperimentalna studija o utjecajima podzemnih šupljina na oblik disperzijske krivulje, a izradili su je Al-Shayea i dr. [13] i Al-

Shayea [14]. Na seriji ispitivanja u spremniku pijeska s umjetno napravljenom šupljinom, Al-Shayea i dr. [13] dobivaju znatno smanjenje (do 40 %) fazne brzine u nekim frekvencijskim područjima prema brzinama za isti spremnik bez šupljina. Opisane su i neke pojave ovisne o položaju izvora u odnosu na prepreku i udaljenost prijmnika. Međutim, ne daju se preporuke o primjeni metode u svrhu otkrivanja podzemnih prepreka. Rezultati tih eksperimenata kasnije su potvrđeni rezultatima numeričkih simulacija [15] [16] i [17]). Numerički rezultati, na kojima se temelji ova analiza, opisani su u sljedećem poglavlju.

2 Numerička analiza utjecaja podzemnih prepreka na disperzijsku krivulju Rayleighovih valova

U gore spomenutoj numeričkoj studiji, ispitivanje SASW simulirano je pomoću osnosimetričnih modela konačnih elemenata, a obuhvaćene su razne veličine, oblici, gustoće i dubine prepreka [17]. Utjecaji na gustoću prepreka analizirani su tako da su prepreke modelirane kao betonski blokovi i šupljine. Disperzijska krivulja numeričkih simulacija dobivena je primjenom postupka koji je jednak onom iz stvarnog SASW ispitivanja.

Studija je pokazala da su u disperzijskoj krivulji fluktuacije vrlo velike u zoni ispred prepreke. Ova pojava postaje izraženija sa smanjenjem udaljenosti od prijmnika. Na disperzijskoj su krivulji uočene i manje fluktuacije u zoni iza prepreke. Ta se opažanja dobro podudaraju s eksperimentalnim rezultatima koje je dobio Al-Shayea [18].

Studija je također pokazala da oblik disperzijske krivulje ovisi o gustoći prepreke. Općenito uzevši, ako je gustoća prepreke veća od gustoće okolnog tla veća je i fazna brzina, pri čemu vrijedi i obratna situacija. Osim toga, s rastom širine prepreke šire se i nabori na disperzijskoj krivulji i to zbog povećanja raskoraka između valova reflektiranih s bliskih i udaljenih strana prepreke. Visina prepreke ne utječe na oblik nabora već na njihovu amplitudu. To je u skladu s prijašnjim zaključkom o utjecaju na širinu prepreke. Povećanje dubine dovodi do pomaka fluktuirajućeg dijela krivulje prema manjim frekvencijama. To se događa zato što komponente Rayleighovih valova manje valne duljine ili veće frekvencije mogu proći iznad prepreke bez bitne interakcije sa samom preprekom.

Eksperimentalna studija prikazana u ovom radu provedena je da bi se provjerili, koliko je god to praktički moguće, rezultati opisane numeričke studije.

3 Eksperimentalna shema za otkrivanje prepreka

Na osnovi rezultata studija konačnih elemenata [15], [16] i [17] predlaže se sljedeća eksperimentalna shema za otkrivanje prepreka:

1. Obaviti ispitivanja SASW u raznim smjerovima (slično lepezastom snimanju), s malim razmakom prijammnika. Usporediti veličinu fluktuacija u svakom smjeru i odabrati slučaj najvećih odstupanja.
2. Izračunati približnu udaljenost d_1 između prepreke i bliskog prijammnika sljedećom jednačinom [17].

$$d_1 = \frac{V_R}{2\Delta f} \quad (1)$$

V_R je približna vrijednost brzine Rayleighovih valova u sloju iznad prepreke, a Δf je razlika u frekvenciji između dvaju vrhova ili dna amplitude na disperzijskoj krivulji.

3. Obaviti ispitivanje oko pretpostavljene lokacije prepreke i točnije locirati prepreku. Točan položaj prepreke nalazi se u točki najvećih fluktuacija fazne brzine.
4. Usporediti disperzijsku krivulju ove točke s disperzijskom krivuljom dobivenom na mjestu udaljenom od prepreke radi određivanja krutosti prepreke te da bi se otprilike locirao vrh prepreke. Vrh prepreke može se točnije locirati odgovarajućim ispitivanjem refleksije.

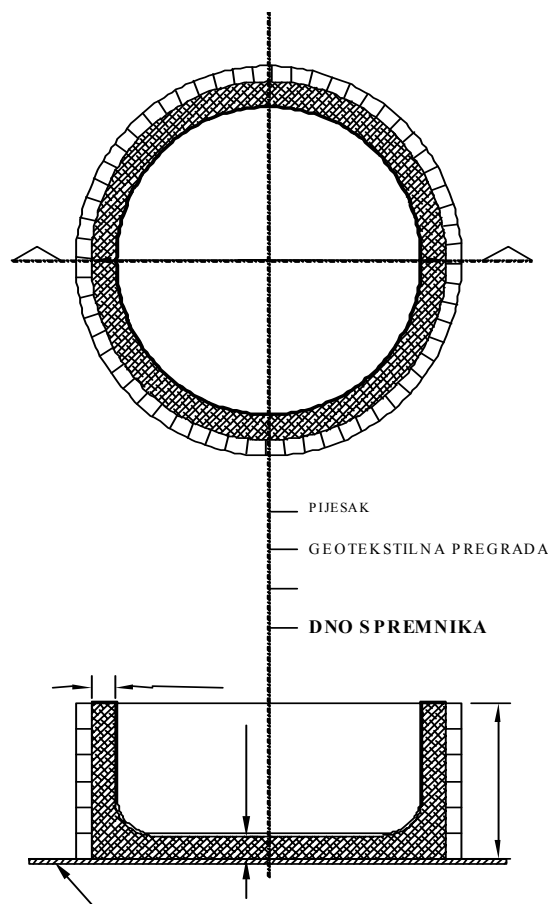
4 Prikaz laboratorijskog ispitivanja

4.1 Opis polja pijeska

Laboratorijsko je ispitivanje obavljeno na polju pijeska izgrađenom na Sveučilištu Rutgers. Geometrijski oblik ispitnog polja prikazan je na slici 1. To je polje geometrijski pojednostavljena verzija polja koje je predložio Woods [1]. Pritom je cilj bio izraditi pješčanu jezgru s rubnim slojem od materijala koji apsorbira energiju (piljevina). Da bi se izbjeglo miješanje pješčane jezgre s rubnim materijalom od piljevine, te da bi se pojednostavio proces izrade polja, na kontaktu između piljevine i pijeska postavljena je geosintetika. Pijesak se nabijao u slojevima pojedinačne debljine 0,30 m. Postupak nabijanja kontrolirao se tako da je na svakom sloju obavljeno mjerenje gustoće (ASTM D-2167) i to na tri mjesta. Dobivena gustoća u suhom stanju pješčanog materijala iznosila je otprilike 93 % od maksimalne gustoće u suhom stanju. Dovršeno polje pijeska prikazano je na slici 2.

4.2 Oprema za ispitivanje

Da bi se omogućilo prikupljanje podataka, instalirana je ploča za registriranje podataka tipa AT-MIO-16E-1 proizvedena u tvrtki National Instruments. Ploča AT-MIO-16E uključiva je ploča 12-bitne rezolucije, s frekvencijom uzorkovanja od 1,25 MHz. Ploča ima do 16 jednokrajnih analognih ili 8 diferencijalnih ulaznih



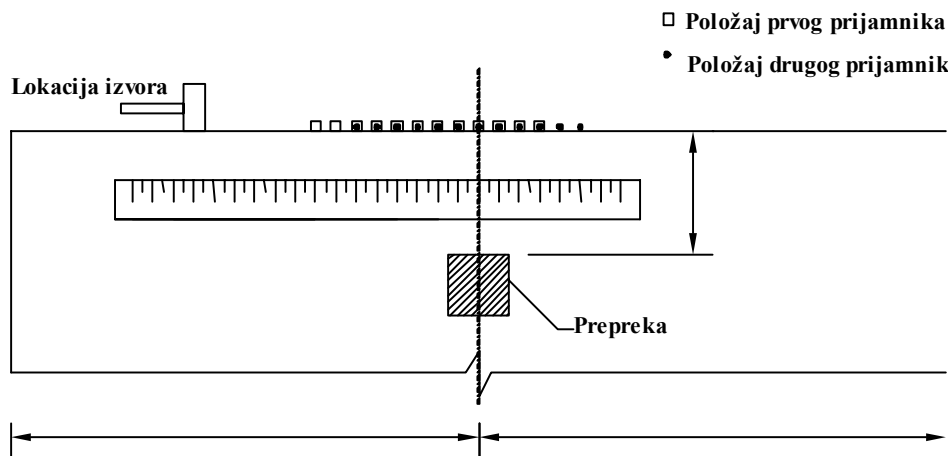
Slika 2. Polje pijeska nakon dovršetka

kanala. Za prijenos analognih ili digitalnih signala do ploče za prikupljanje podataka uporabljena je spojna ploča BNC-2090 koju je proizvela tvrtka National Instruments. Kao prijammnici upotrijebljeni su vertikalni geofoni tipa L-4 koje proizvodi tvrtka Mark Products.



Slika 1. Geometrija polja pijeska

Za nabijanje pijeska rabili su se čekići raznih težina. Točka udara linearno je poravnana sa dva prijammnika. Opći raspored izvora, prijammnika (geofona) i mjerne opreme shematski je prikazan na slici 3.



Slika 3. Shematski prikaz ispitivanja

odlučeno je da se upotrijebi, kada je god to moguće, čekić težine 200 g. Međutim, teži se čekić rabio svaki put kada bi se koeficijent signala i buke spustio ispod 10. U većini slučajeva čekići su se rabili kako slijedi:

- Položaji 1-6: čekić težine 200 g
- Položaji 7-10: čekić težine 775 g
- Položaji 11-12: čekić težine 1050 g

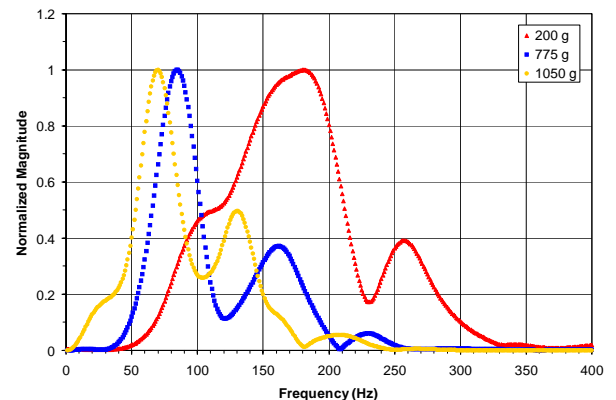
4.3 Postavljanje prijamnika

Relativno mali razmak između prijamnika od samo 20 cm (slika 3.) odabran je da bi se postiglo znatno pojačanje fluktuacija na disperzijskoj krivulji. Iako je u standardnom pokusu SASW razmak između izvora i bližeg prijamnika obično jednak razmaku između prijamnika, taj je razmak u postupku otkrivanja podzemnih prepreka ipak veći od razmaka između prijamnika. Prema ispitivanjima koja su obavili Sanchez-Salineri i dr. [19], razmak od izvora do prvog prijamnika treba iznositi dvije valne duljine ili više. S obzirom da su u ovom ispitivanju značajne valne duljine iznosile 30 cm ili manje, za razmak između izvora i bližeg prijamnika odabrana je udaljenost od 60 cm ili otprilike dvije valne duljine (slika 3.).

I prostorni valovi (tlačni i posmični) i Rayleighovi valovi generiraju se udarom po površini pijeska. Prostorni i površinski reflektirani valovi (refleksija od ruba polja pijeska) mogu nepovoljno utjecati na disperzijsku krivulju. Prema ispitivanju kolnika metodom SASW, [12] preporučuju da razmak između izvora i reflektirajućeg ruba iznosi barem tri razmaka između prijamnika, da bi se tako na minimum svela nepoželjna refleksija površinskih valova (slika 3.). Sloj piljevine postavljen po obodu polja pijeska ublažava pojavu reflektirajućih valova.

4.4 Uređaj za nabijanje

Odabir sredstva za nanošenje udara ovisi o frekvencijskom području. Manjim i lakšim uređajima dobivamo kratak impuls, a energija se prostire po širokom pojasu frekvencija. S druge strane, primjenom većih i težih uređaja dobivamo dulji impuls, s koncentracijom energije na nižim frekvencijama. Da bi se odredila najpovoljnija naprava za nabijanje, ispitani su čekići težine 200 g, 775 g i 1050 g (slika 4.). Nakon analize rezultata



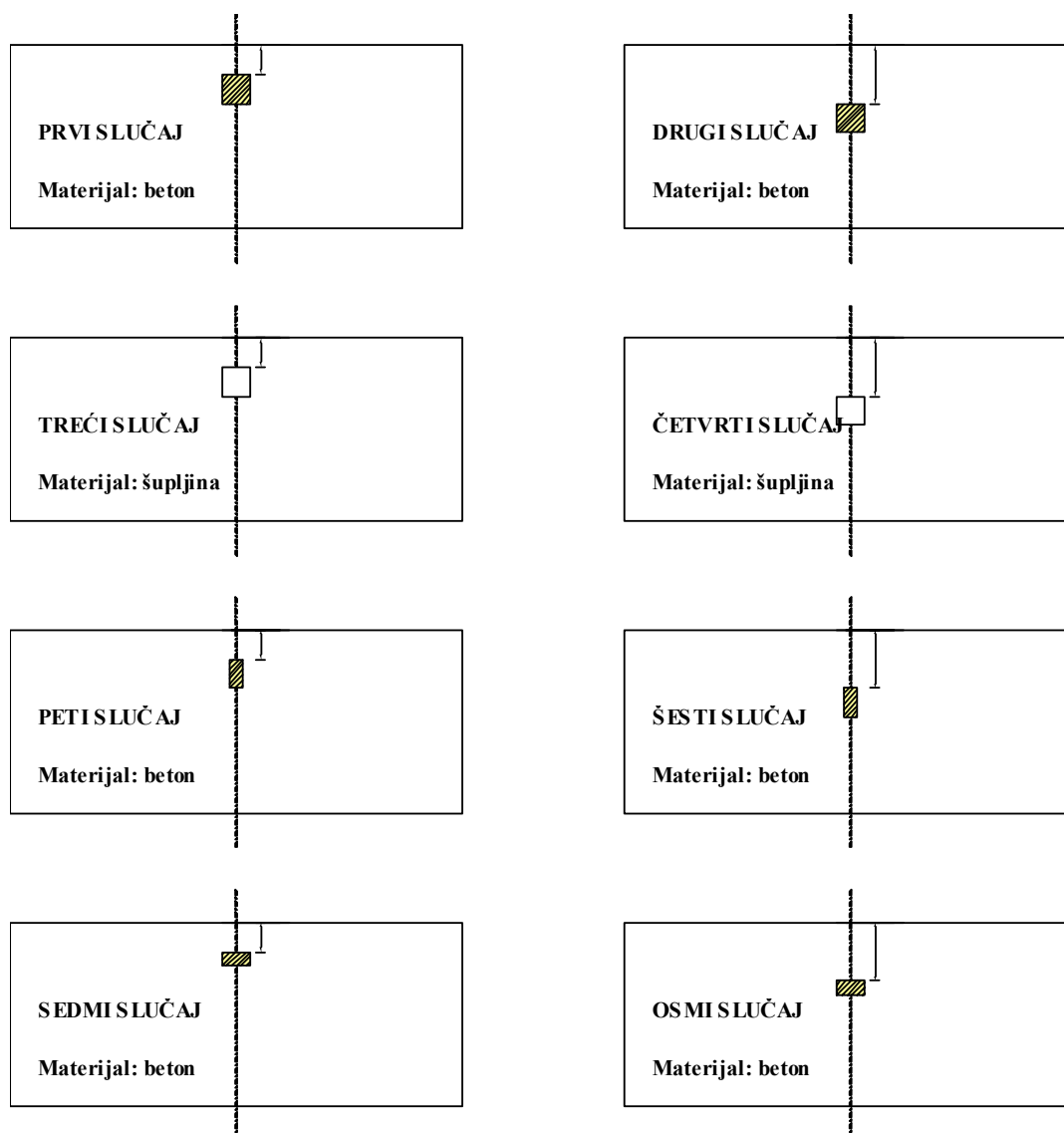
Slika 4. Vrijednosti veličina za prvi položaj prijamnika 4

4.5 Prikupljanje podataka

Na svakom ispitnom položaju prikupljeno je pet grupa podataka, a prosječne su vrijednosti proračunane naknadno. Ukupno vrijeme ispitivanja u toku jednog registriranja podataka iznosilo je 1 s, a vremenski je korak iznosio otprilike 1 ms. Definirano je da ukupan broj prethodnih očitavanja bude jednak četvrtini od svih očitavanja. Odabrana je razina uzbude od 0,1 V jer je dovoljno iznad amplitude buke. Za potrebe automatskog prikupljanja podataka, te za određivanja disperzijske krivulje Rayleighovih valova, izrađena je posebna računalna aplikacija utemeljena na programskim jezicima LabVIEW i HiQ.

5 Rezultati laboratorijskih ispitivanja

Kao što se može vidjeti na slici 3., prepreka je pozicionirana u pijesku na dubini od 30 ili 60 cm ispod površine. Ispitivane su dvije vrste prepreka, tj. betonska prepreka i šupljina izvedena od ploča stiropora. Utjecaj oblika prepreke na disperzijsku krivulju istraživao je uz pomoć betonskih greda presjeka 30 x 30 cm i 15 x 30 cm. Sve konfiguracije laboratorijskog modela prikazane su na slici 5.



Slika 5. Oblik, materijal i položaj analiziranih prepreka

U nastavku će se iscrpno analizirati rezultate dobivene u spomenutih osam slučajeva, isto kao i u slučaju polja bez prepreke (*nulti slučaj*).

5.1 Rezultati ispitivanja – nulti slučaj

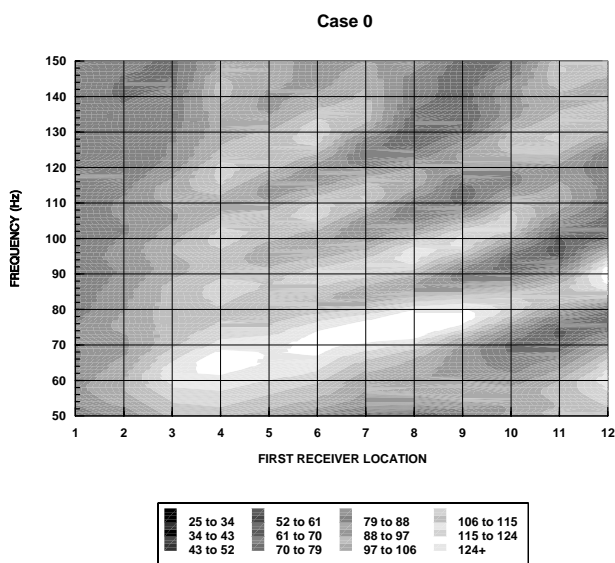
Prva grupa ispitivanja provedena je u polju bez prepreka (*nulti slučaj*) da bi se dobile referentne vrijednosti za usporedbu s ostalim konfiguracijama ispitivanja (slučajevi 1-8). Na slici 6. daje se spektralni ispis faznih brzina u rasponu frekvencija od 50 do 150 Hz za *nulti slučaj* na pozicijama prijammika 1 – 12. Jasno se može uočiti periodično povećanje i smanjenje fazne brzine na pozicijama svih prijammika. Do takvih varijacija fazne brzine dolazi zbog prisutnosti valova koji se reflektiraju od ograde polja. Ti su valovi superponirani na izravne valove i zabilježeni na pozicijama prijammika. Uspoređi-

vanjem tih rezultata s rezultatima koje su dobili Gucunski i dr. [16], može se zaključiti da fluktuacije uočene na disperzijskim krivuljama pokazuju da se iza položaja posljednjeg prijammika nalazi betonska prepreka, u ovom slučaju betonska ograda polja.

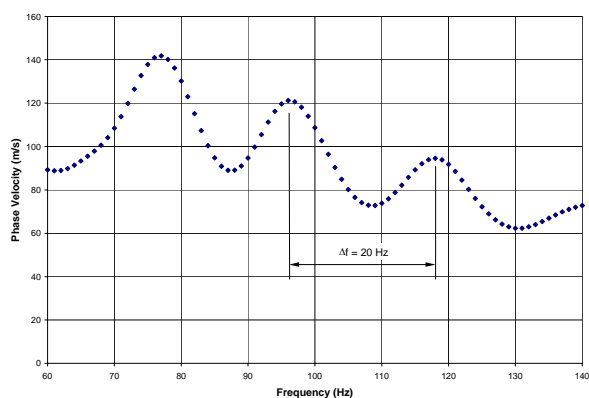
Približna udaljenost od ograde pješčanog polja može se odrediti jednadžbom 1. Disperzijska krivulja za prvi prijammik (lokacija 8) prikazana je na slici 7. Iz razlike frekvencije između dviju uzastopnih vršnih vrijednosti u krivulji (20 Hz), te iz fazne brzine od 95 m/s, može se locirati ograda u odnosu na blisku lokaciju prijammika (8).

$$d = \frac{V_R}{2 \Delta f} = \frac{95}{2 \cdot 20} = 2,375 \text{ m}$$

Stvarna udaljenost iskazana na slici 3. iznosi 2,4 m.



Slika 6. Spektralni prikaz faznih brzina za polje pijeska bez prepreke



Slika 7. Disperzijska krivulja za nulti slučaj na lokaciji 8

Približna lokacija betonskog dna polja može se odrediti refleksijskim metodama kao što je metoda udarne jeke, a određivanje se provede na mjestu nepravilnosti unutar medija koji se ispituje.

$$d = \frac{V_p}{2f} \quad (2)$$

gdje je :

V_p - brzina vala P

f - frekvencija

5.2 Rezultat ispitivanja – slučajevi od 1 do 8

Spektralni prikazi faznih brzina dobiveni laboratorijskim ispitivanjem za slučajeve od 1 do 8 prikazani su na slikama od 8.a do 8.h. Iz prikazanih se rezultata mogu izvući sljedeći zaključci:

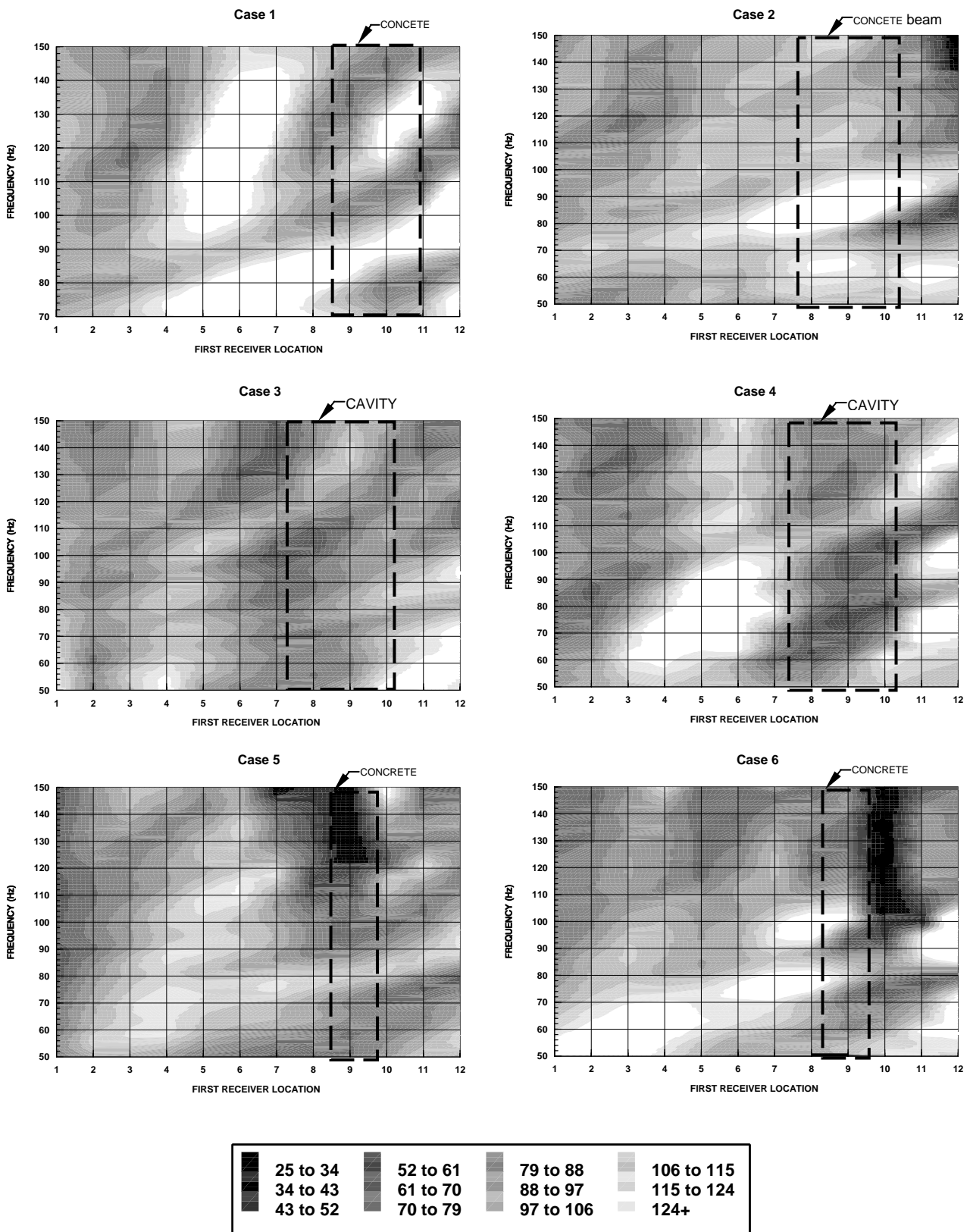
1. U svih se osam slučajeva ujednačeni niz promjena fazne brzine prikazan na slici 6. za nulti slučaj donekle prekida, što pokazuje prisutnost prepreke koja uzrokuje uočljivu promjenu.
2. Općenito uzevši, prisutnost krute prepreke uzrokuje povećanje fazne brzine, dok prisutnost šupljine uzrokuje smanjenje fazne brzine, a sve to u odnosu na vrijednosti dobivene u nultom slučaju (slike 8.a, b, c i d). Disperzijske krivulje za slučajeve 0, 1 i 3 na lokaciji prvog prijatelja (8) dane su na slici 9. Možemo uočiti povećanje fazne brzine zbog prisutnosti betonske prepreke, tj. smanjenje zbog prisutnosti šupljine. Na disperzijskim su krivuljama značajne fluktuacije na većim valnim duljinama, a razlog za to je blizina betonskog dna. Slični se rezultati dobivaju uspoređivanjem slučajeva 0, 2 i 4. Prikazani rezultati u skladu su sa rezultatima koje je dobio Al-Shayea [18].
3. Pliće prepreke utječu na faznu brzinu više od dubljih prepreka, pri čemu vrijedi napomenuti da pliće prepreke uzrokuju promjenu fazne brzine koja se može uočiti ne samo na lokaciji prepreke već i ispred same prepreke.

Povećanje, tj. smanjenje fazne brzine može se uočiti ispred prepreke i na lokaciji prepreke u slučajevima 1 (povećanje) i 3 (smanjenje) koji su prikazani na slikama 8.a i 8.c. Istodobno se najveća promjena u slučajevima 2 (povećanje) i 4 (smanjenje) uočava na samoj lokaciji prepreke (slike 8.b i 8.d).

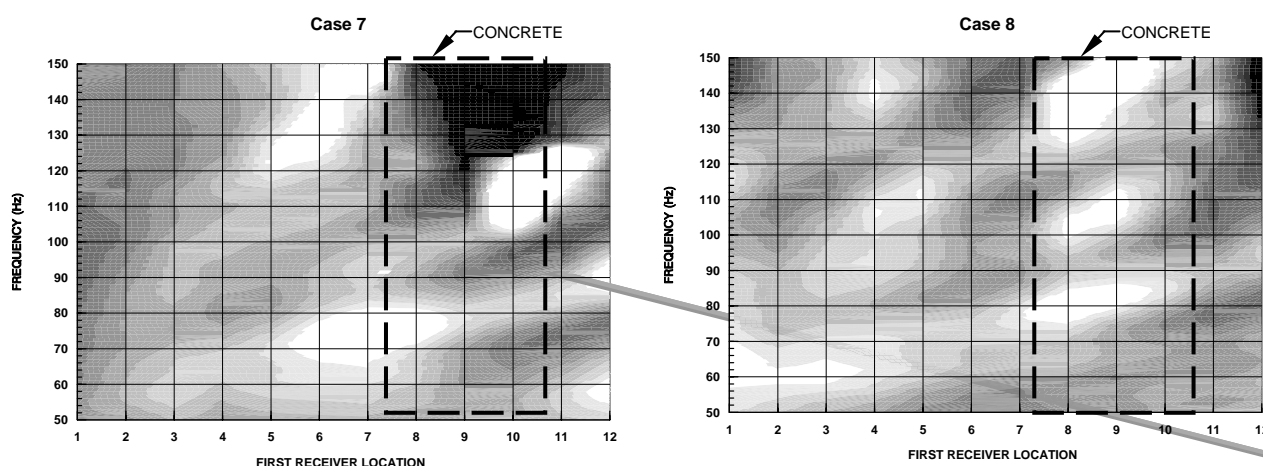
Sličan se zaključak nameće i nakon analize disperzijskih krivulja za slučajeve 0, 1 i 2 na lokacijama 7 i 8. Te su krivulje prikazane na slikama 10. i 11. U slučaju 1 do povećanja fazne brzine dolazi na obje lokacije, dok je fazna brzina u slučaju 2 na lokaciji 7 reda veličine brzina registriranih u nultom slučaju. Sličnu pojavu zamjećujemo i u slučajevima 3 i 4 na istim lokacijama.

Imajući na umu ranije opisanu organizaciju ispitivanja i činjenicu da amplituda Rayleighovih valova gotovo nestaje na dubini od oko dvije valne duljine (Richart i dr. [29]), može se zaključiti sljedeće:

- Većina generiranih valova odlikuje se valnim duljinama u rasponu do 30 cm.
- Rayleighovi valovi s valnom duljinom u rasponu do 30 cm, koji se odbijaju od prepreke smještene na dubini od 30 cm, imaju dovoljno energije da bitno utječu na vrijednosti fazne brzine na bliskim lokacijama prijatelja ispred same prepreke. Rayleighovi valovi iste valne duljine koji dopiru do dubljih prepreka imaju energiju koja može bitno utjecati na fazne brzine samo ako se prijatelji nalaze iznad prepreke.



Slika 8.a, b, c, d, e i f. Spektralni prikazi faznih brzina



Slika 8. g,h. Spektralni prikaz faznih brzina

- Čini se da dublje prepreke najviše utječu na širenje Rayleighovih valova koji se odlikuju valnim duljinama raspona većeg od širine prepreke. O tome će biti više riječi u nastavku ovog rada.
4. Općenito uzevši, oblik prepreke ne utječe bitno na raspored faznih brzina. Sličnosti iskaza faznih brzina za slučajeve 1 i 7 mogu se uočiti na slikama 8.a i 8.g, te na slikama 8.b i 8.h za slučajeve 2 i 8.

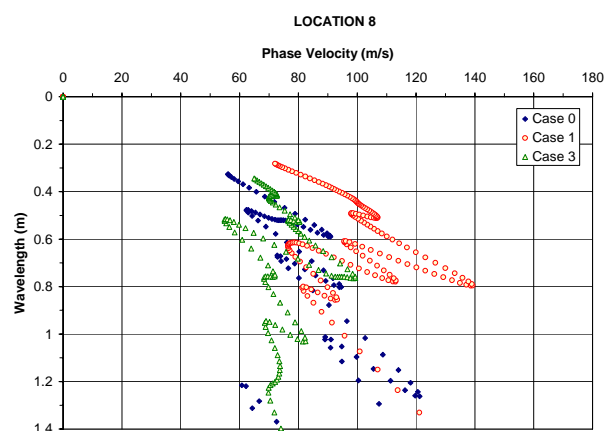
Iako je raspored faznih brzina kvalitativno sličan kod prepreka iste krutosti i dubine, kvantitativno se vrijednosti fazne brzine ipak razlikuju, osobito kod prepreka lociranih na manjim dubinama. Ako spektralni prikaz slučaja 1 (slika 8.a) usporedimo sa spektralnim prikazom slučaja 7 (slika 8.g), možemo ustanoviti da su kod kruće prepreke (slučaj 1) na istim lokacijama u blizini prijavnika vrijednosti fazne brzine ipak veće.

Smanjenje fazne brzine koji se uočava u slučajevima 5 i 6, te koji je izražen osobito na lokaciji prepreke (slike 8.e i 8.f), može se objasniti prisutnošću poremećenog pijeska u blizini grede. Ako gredu pomaknemo s položaja u slučaju 8 na položaj u slučaju 6, te zatim na položaj u slučaju 5, dobivamo prazninu ispunjenu relativno rahlim pijeskom, tj. prepreku sastavljenu od dva materijala čija se svojstva razlikuju od svojstava okolnog medija. Općenito uzevši, šuplja prepreka više utječe na prostiranje valova od krute prepreke. Moglo bi se zaključiti da rahli pijesak kojim je okružena betonska prepreka dominira poljem fazne brzine u tom području, dok se veće fazne brzine još uvijek bilježe u području ispred grede. Ta pojava utjecaja složene prepreke na prostiranje valova pomno je analizirana u radu Krstićeve i Gucunskog [21].

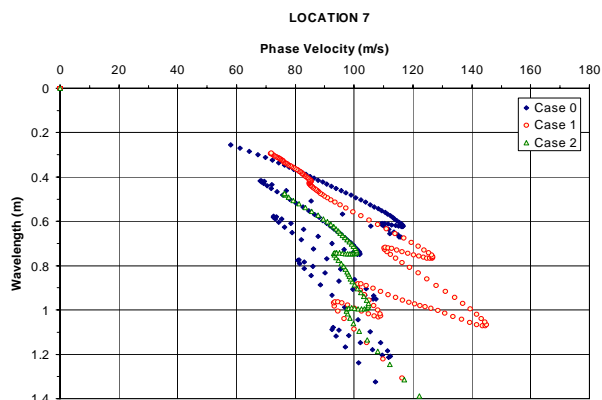
Općenito se može reći da raspored faznih brzina ispred prepreke u slučajevima 5 i 6 kvalitativno odgovara rasporedu faznih brzina u slučajevima 1 i 2 (slike 8.a, 8.b, 8.e i 8.f).

5. Horizontalni položaj prepreke može se odrediti pomoću spektara prikazanih na slikama 8.a, 8.b, 8.c, 8.d, 8.e, 8.f, 8.g i 8.h. Kao što smo već spomenuli, za lociranje prepreke koristimo se nultim slučajem kao referentnom vrijednosti. Na prisutnost prepreke ukazuje svako povećanje ili smanjenje fazne brzine neposredno ispred prepreke ili točno iznad nje, ovisno o dubini na kojoj se prepreka nalazi.

Lokacija plitkih prepreka koje - kao što smo već naveli - najviše utječu na prostiranje Rayleighovih valova male valne duljine, može se također odrediti analizom fluktuacija na disperzijskoj krivulji u području iza prepreke. Disperzijske krivulje na lokacijama 8 (iznad prepreke), 9 i 10 (iza prepreke) u slučajevima 0, 1, 2, 3 i 4 prikazane su na slici 12. Na



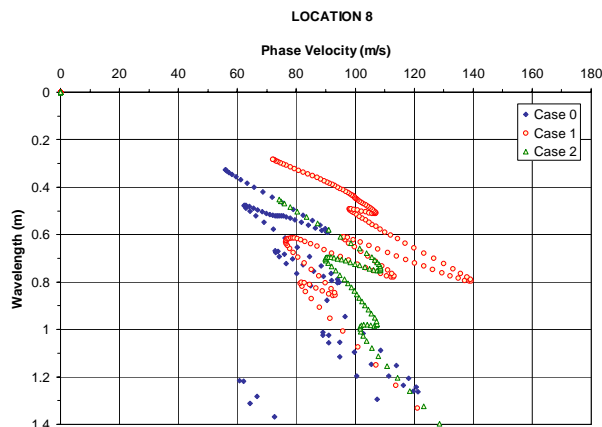
Slika 9. Disperzijske krivulje u slučajevima 0, 1 i 3 na lokaciji prvog prijavnika (8)



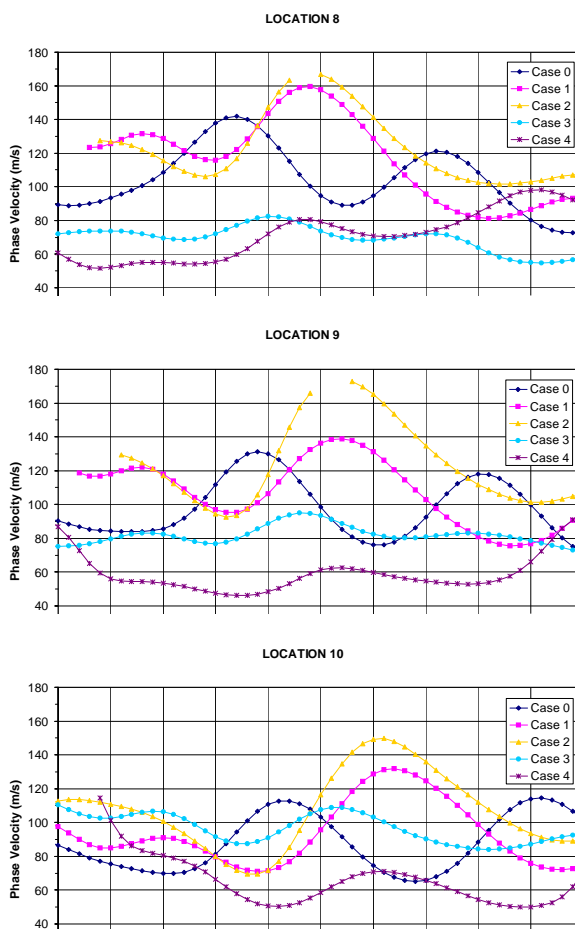
Slika 10. Dispersijske krivulje u slučajevima 0, 1 i 2 na lokaciji 7

lokaciji 8 možemo jasno uočiti povećanje fazne brzine u slučajevima 1 i 2 te smanjenje u slučajevima 3 i 4. Na lokacijama 9 i 10 fazne se brzine postupno smanjuju i povećavaju u slučajevima 1 i 3, tj. približavaju se faznoj brzini nultog slučaja (slučaj 0), što je znak da prisutnost prepreke ne utječe na te lokacije. S druge strane, fazne brzine u slučajevima 2 i 4 na lokacijama 9 i 10 i dalje ostaju relativno blizu vrijednosti zabilježenih na lokaciji 8, a zbog prisutnosti Rayleighovih valova većih valnih duljina koji se reflektiraju između ograde pješčanog polja i prepreke.

- Dubina prepreke približno se može odrediti promatranjem pojave i povećanja/smanjenja veličine fluktuacija disperzijskih krivulja na lokaciji prepreke. Povećanje fazne brzine za slučaj 2, prikazan na slici 11., odgovara stvarnoj dubini prepreke od 60 cm. U slučaju 1, povećanje fazne brzine u rasponu manjih valnih duljina pokazuje nam da je prepreka smještena plitko, dok nagao skok u veličini fazne brzine pokazuje stvarnu lokaciju prepreke. Dubina prepreke može se približno odrediti i pomoću jednadžbe 2 i analize refleksije (za primjer metode udarne jeke).



Slika 11. Dispersijske krivulje u slučajevima 0, 1 i 2 na lokaciji 8

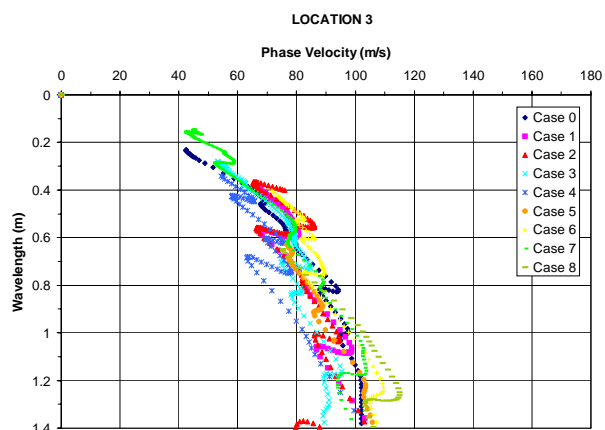


Slika 12. Dispersijske krivulje u slučajevima od 0 do 4 na lokacijama 8, 9 i 10

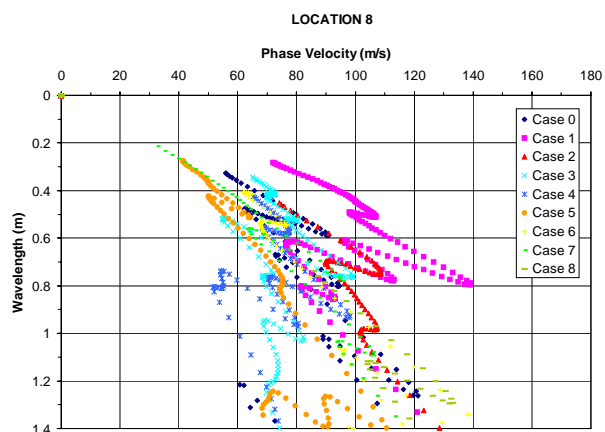
- Ako usporedimo disperzijske krivulje za svih osam slučajeva na lokacijama 3, 8 i 11 (slike 13.a, 13.b i 13.c), možemo zaključiti sljedeće:

- Samo se fluktuacije manje veličine mogu uočiti na disperzijskoj krivulji na lokacijama prijavnika koje se nalaze ispred prepreke, a dovoljno su udaljene od ograde pješčanog polja. Te su manje fluktuacije najvjerojatnije uzrokovane valovima koji se reflektiraju od ograde i dna pješčanog polja. Fazne su brzine na pojedinačnim valnim duljinama koncentrirane u uskom pojasu čija širina iznosi oko 20 m/s (slika 13.a).
- Fluktuacije koje se pojavljuju na lokacijama prijavnika iznad prepreke objašnjavaju se reflektiranjem Rayleighovih valova od prepreke i od ograde pješčanog polja. U slučajevima 1 i 2 disperzijske krivulje karakterizira gornji dio niza, dok je u slučajevima 3 i 4 dominantan donji dio niza (slika 13.b).
- Fluktuacije koje se pojavljuju na lokacijama prijavnika iza prepreke uglavnom su uzroko-

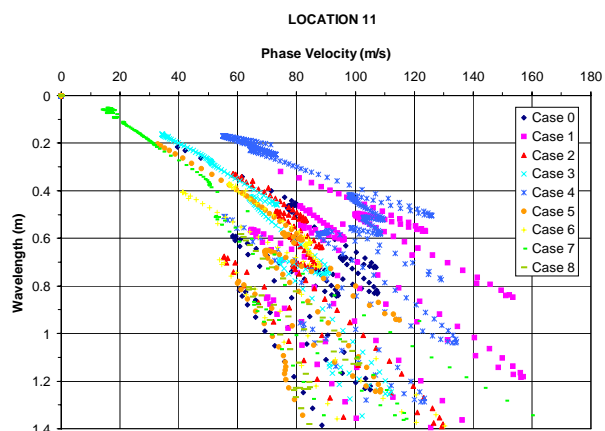
vane reflektiranjem valova od ograde pješčanog polja. Tu ne postoji jednoznačni gornji dio niza. Međutim, u nultom se slučaju bilježi donji dio niza kod valnih duljina većih od 60 cm (slika 13.c). To bi moglo upućivati na utjecaj valova koji se reflektiraju između prepreke i ograde pješčanog polja, o čemu smo već govorili.



Slika 13.a Disperzijske krivulje u slučajevima od 1 do 8 na lokaciji 3



Slika 13.b Disperzijske krivulje u slučajevima od 1 do 8 na lokaciji 8



Slika 13.c Disperzijske krivulje u slučajevima od 1 do 8 na lokaciji 11

6 Zaključci

U ovoj se studiji analiziraju mogućnosti primjene spektralne analize površinskih valova (SASW) u svrhu otkrivanja podzemnih prepreka u laboratorijskim uvjetima. Opisuju se neki od mogućih problema i predlažu se postupci za prostorno i materijalno opisivanje prepreka.

U nastavku se navode zaključci doneseni nakon laboratorijskih ispitivanja raznih prepreka postavljenih u pješčano polje:

- Prepreke utječu na fazne brzine prostiranja valova. Kada je razmak između prijavnika malen, u odnosu na veličinu prepreke i dubinu na kojoj se ona nalazi, tada se taj utjecaj prepreke očituje u promjeni amplitude disperzijske krivulje i u velikoj fluktuaciji unutar krivulje. Kada je razmak između prijavnika velik, taj se utjecaj vidi samo u promjeni amplitude faznih brzina.
- Kada razmak između prijavnika odgovara veličini prepreke i dubini na kojoj je ona postavljena, tada pliće prepreke više utječu na disperzijsku krivulju od dubljih prepreka od istog materijala, veličine i oblika.
- Prepreke koje su u usporedbi s okolnim materijalom krute dovode do povećanja fazne brzine. Prepreke elastičnije od okolnog materijala uzrokuju smanjenje fazne brzine. Složene prepreke koje su zapravo kombinacija krutih i elastičnih materijala, pri čemu se elastični materijal nalazi iznad i/ili bočno od krutog dijela prepreke, dovode do smanjenja fazne brzine. Elastične prepreke, a osobito šupljine, više utječu na disperzijsku krivulju od krutih prepreka iste veličine, oblika i dubine postavljanja.
- Povećanjem debljine prepreke povećava se i amplituda fazne brzine u odnosu na tanju prepreku od istog materijala locirane na istoj dubini.
- Eksperimentalno se može ustanoviti da je horizontalna udaljenost prepreke jednaka udaljenosti od susjednog prijavnika na kojem je došlo do najveće promjene fazne brzine, s tim da se na sljedećem bliskom prijavniku bilježi povrat normalnog obrasca prostiranja valova (prostiranje kroz neporemećeni materijal).
- Dubina na kojoj se nalazi prepreka može se eksperimentalno procijeniti na temelju vrijednosti valnih duljina na kojima prestaju fluktuacije na disperzijskoj krivulji. Točnije, dubina se može proračunati iz rezultata odgovarajućeg pokusa refleksije.

Općenito uzevši, metoda SASW može se uspješno primjenjivati u svrhu otkrivanja podzemnih prepreka, za definiranje horizontalnog i vertikalnog položaja prepreke i općenito za određivanja svojstava materijala.

Zahvala

Istraživanje opisano u ovome radu obavljeno je zahvaljujući potpori NSF br. MSS-967345. Zahvaljujemo na podršci.

LITERATURA

- [1] Woods, R. D.: *Screening of Elastic Surface Waves by Trenches*, Dissertation, The University of Michigan, 1967.
- [2] Haupt, A. W.: *Surface Waves in Nonhomogeneous Half Space, Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics*, Proceedings, B. Prange Editor, Karlsruhe, Germany, September 1977, Vol. 1, 335-367.
- [3] Prange, B.: *Primary and Secondary Interferences in Wavefields, Dynamical Methods in Soil and Rock Mechanics*, Proceedings, B. Prange Editor, Karlsruhe, Germany, Vol. 1, September 1977, 281-309.
- [4] Nazarian, S.: *In Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavements by Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method*, Dissertation, The University of Texas at Austin, 1984.
- [5] Ohbo, N.; Katayama, T.: *A Numerical Experiment on Screening of Surface Waves by Open Trenches*, Bulletin ERS, No. 15, 1980, 133-147.
- [6] Bolt, B. A.; Morrison, H. F.: *Modification by Trench Barriers of the Seismic Input to Nuclear Power Plants*, Final Report, University of California, Berkeley, 1980.
- [7] May, T. W.; Bolt, B. A.: *The Effectiveness of Trenches in Reducing Seismic Motion*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, 1982, 257-269.
- [8] Dravinski, M.: *Ground Motion Amplification Due to Elastic Inclusions in a Half-Space*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 11, 1983, 313-335.
- [9] Belesky, R. M.; Hardy, H. R.: *Seismic and Microscopic Methods for Cavity Detection and Stability Monitoring of Near-Surface Voids*, Rock Mechanics: Key to Energy Production, Proc., 27th US Symposium on Rock Mechanics, Tuscaloosa, AL, June 23-25, 1986, 248-258.
- [10] Cooper S. S.; Ballard R. F.: *Geophysical Exploration for Cavity Detection in Karst Terrain*, Geotechnical Aspects of Karst Terrains, Proceedings, ASCE National Convention, Nashville, Tennessee, 1988, 25-39.
- [11] Curro, J. R.: *Cavity Detection and Delineation Research*, Report 2, Seismic Methodology, Medford Cave Site, Florida, U.S. Army Waterways Experiment Station Technical Report GL-83-1, 1983.
- [12] Sheu, J. C.; Stokoe, K. H. II.; Roesset, J. M.: *Effect of Reflected Waves in SASW Testing of Pavements*, Transportation Research Record 1196, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1988, 51-61.
- [13] Al-Shayea, N. A.; Woods, R. D.; Gilmore, P.: *SASW and GRP to Detect Buried Objects*, Proc. Symp. Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, March 27-31, Boston, Ma., 1994, 543-560.
- [14] Al-Shayea, N. A.: *Detection of Buried Objects Using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method*, Ph.D. Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor.
- [15] Gucunski, N.; Ganji, V.; Maher, M. H.: *Effects of Obstacles on Rayleigh Wave Dispersion Obtained from the SASW Test*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering Journal, Vol. 15, 1996, 223-231.
- [16] Gucunski, N.; Ganji, V.; Maher, M. H.: *Effects of Soil Nonhomogeneity and Underground Obstacles on Site Characterization by the SASW Test*, Uncertainty in the Geological Environment: From Theory to Practice, Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, 1996, 1083-1097.
- [17] Ganji, V.; Gucunski, N.; Maher, M. H.: *Detection of Underground Obstacles by SASW Method - Numerical Aspects*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, March 1997, 212-219.
- [18] Al-Shayea N.: *Detection of Subsurface Cavities Using the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves Method*, Dissertation, The University of Michigan, 1994.
- [19] Sanchez-Salinero, I.; Roesset, J. M.; Shao K.; Stokoe, K. H.; Rix, G. J.: *Analytical Evaluation of Variables Affecting Surface Wave Testing of Pavements*, Transportation Research Record No. 1196, 1987, 86-95.
- [20] Richart, F. E. Jr.; Hall, J. R. Jr.; Woods, R. D.: *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 414.
- [21] Krstic, V.; Gucunski, N.: *Detection of Composite Underground Obstacles by the SASW Test*, ASCE Geotechnical Special Publication No. 164, Innovative Applications of Geophysics in Civil Engineering.

ISPRAVAK!

U broju 5/2010. časopisa *Građevinar* objavljen je članak o *Sveučilišnom kampusu u Rijeci na Trsatu* za koji je greškom napisana kategorizacija pregledni rad. Članak je trebao biti atribuiran kao pregledni prikaz, što ga svrstava u ostale priloge. Napominjem da autorice nisu predlagale kategorizaciju. Članak je objavljen na prvom mjestu zbog važnosti pothvata na koji se odnosi.

Ispričavam se autoricama i čitateljima.

Glavni i odgovorni urednik

