

# PRIMJENA MÉNARDOVOG PRESIOMETRA ZA PROCJENU G- $\gamma$ KRIVULJE KRUTOSTI SITNOZRNATOG TLA

## USE OF MÉNARD PRESSUREMETER TO ASSESS G- $\gamma$ STIFFNESS CURVE OF FINE GRAINED SOIL

Dario Čolja<sup>1</sup>, Boris Kavur<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, Varaždin, Hrvatska

\*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: bkavur@gfv.hr

**Sažetak:** U radu se prikazuje primjena Ménardovog presiometra u sitnozrnatom tlu u kombinaciji s geofzičkim seizmičkim in situ metodama ispitivanja brzine posmičnih valova radi procjene krivulja degradacije modula krutosti (G- $\gamma$ ). Opisan je pojednostavljeni postupak transformacije izmjerenih promjena volumena ispitne šupljine u posmičnu deformaciju iz rezultata nedreniranih pokusa Ménardovim presiometrom. Prikazani su parametri modeliranih krivulja krutosti i rezultati interpretacije Ménardovih presiometarskih pokusa u zagrebačkoj prekonsolidiranoj glini.

**Cljučne riječi:** Ménardov presiometar, krivulja krutosti sitnozrnato tlo.

**Abstract:** The paper presents a use of Ménard pressuremeter tests in fine grained soil together with geophysical seismic in situ methods for determination of shear wave velocities in order to estimate in situ decay curves of shear stiffness (G- $\gamma$ ). A simplified procedure for transformation of measured volume changes of the test cavity into shear deformations from the results of the undrained Ménard pressuremeter test is described. Parameters of modeled shear stiffness curves and interpreted results of Ménard pressuremeter tests in the Zagreb preconsolidated clay are presented.

**Keywords:** Ménard pressuremeter, shear stiffness curve of fine grained soil.

Received: 20.11.2017 / Accepted: 8.12.2017

Published online: 18.12.2017

Znanstveni rad / Scientific paper

### 1. UVOD

U novije vrijeme presiometar se relativno rijetko koristi u geotehničkoj praksi Republike Hrvatske (RH). Međutim, tijekom osamdesetih i devedesetih godina prošlog stoljeća presiometar je u RH češće korišten za projektiranje plitkih i dubokih temelja u tlu i mekšim stijenama. Rjeđe korištenje presiometra je vjerojatno posljedica intenzivnijeg korištenja različitih penetracijskih tehnika ispitivanja tla kao npr. statičkog penetracijskog pokusa (CPT/CPTU, SCPTU), pokusa plosnatim dilatometrom (DMT, SDMT), dinamičkih penetracija i drugih terenskih metoda, koje su tehnički ipak manje zahtjevne u pogledu implementacije. U navedenim penetracijskim tehnikama ispitivanja nije moguće kontrolirati uvjete pokusa ili dobiti naponsko-deformacijsku krivulju, kao što je to moguće u presiometarskom pokusu. Prednost presiometarskog pokusa leži upravo u činjenici da su rubni uvjeti pokusa kontrolirani i teoretski dobro definirani, kao i u mogućnosti istovremenog in situ mjerenja parametara krutosti i čvrstoće tla i mekših stijena (Mair i Wood, 1987). Osim toga, ispitivanja presiometrom je moguće obaviti u svim tipovima tla i stijena.

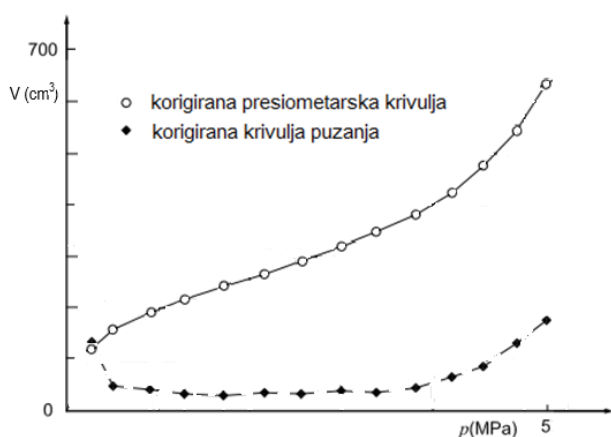
Presiometarski pokus se u osnovi sastoji u kontroliranom, radijalnom ekspaniranju sonde cilindričnog oblika (odnosno njene savitljive membrane), koja je

odgovarajućim postupkom prethodno ugrađena u tlo, ili stijenu.

S obzirom na način ugradnje sonde, kao i način mjerenja rezultirajuće deformacije ekspanirajuće šupljine, razvijene su različite konstrukcije ovakvog uređaja, koji se obično naziva presiometrom, ili u nekim verzijama, dilatometrom. Prve su razvijene verzije uređaja, koje podrazumijevaju prethodno bušenje ispitne bušotine u koju se ugrađuje sonda. Takav je tzv. Ménardov tip presiometra (MPM, Ménard pressuremeter), kao i različite verzije dilatometara fleksibilnog i krutog tipa za primjenu u stijenama (Vrkljan i dr. 2006). Kasnije je razvijena verzija tzv. samobušeceg presiometra (SBP, self-boring pressuremeter), koji se s dna prethodno izbušene bušotine sam ubuši u tlo poput mini krtice za iskop tunela. Ovakav postupak ugradnje sonde bi trebao rezultirati minimalnim poremećenjem tla ili stijene. Razvijene su i verzije presiometra, koje se ugrađuju utiskivanjem (penetracija) u tlo odnosno razmicanjem tla. Penetracijske verzije tzv. razmičućeg presiometra (FDP, full-displacement pressuremeter) najčešće se koriste zajedno sa statičkom penetracijom (CPTU) u istraživanjima morskog dna. U ovom radu prikazat će se mogući način primjene tzv. Ménardovog tipa presiometra u sitnozrnatom tlu.

Hrvatski zavod za normizaciju je prihvatio međunarodnu i europsku normu za ispitivanje Ménardovim presiometrom kao hrvatsku normu HRN EN ISO 22476-4: 2012.

Tipični rezultat pokusa Ménardovim presiometrom prikazan je na slici 1. Korigirana presiometarska krivulja predstavlja odnos opterećenja ( $p$ ) na stijenske bušotine i rezultirajuće promjene volumena ( $V$ ) ispitne šupljine. Podaci ispitivanja se korigiraju s obzirom na krutost savitljive membrane presiometra kao i s obzirom na deformabilnost sustava za mjerenje promjene volumena. Krivulja puzanja se dobiva kao razlika promjene volumena između očitavanja provedenih nakon 60 odnosno 30 sekundi od aplikacije inkrementa opterećenja na stijenku bušotine.



Slika 1. Tipični rezultat ispitivanja Ménardovim tipom presiometra.

Prema usvojenoj normi, iz rezultata ispitivanja Ménard-ovim presiometrom interpretiraju se: presiometarski modul ( $E_M$ ), granični tlak ( $p_{LM}$ ) i tlak puzanja ( $p_M$ ). Navedeni parametri koriste se zatim u empirijskom načinu projektiranja temelja (vidi Baguelin i dr. 1978).

Mair i Wood (1987) naglašavaju da generalno postoje dva pristupa korištenja presiometarskih rezultata, tzv. francuski, odnosno engleski pristup. Francuski pristup podrazumijeva da se parametri dobiveni presiometarskim ispitivanjem direktno koriste pri projektiranju temelja. Interpretirani parametri  $E_M$  i  $p_{LM}$  su empirijski dovedeni u vezu s uvjetima temeljenja, te se preko njih procjenjuju nosivost i slijeganja plitkih i dubokih temelja (Vrkljan i dr. 2006). Spomenuti pristup je vezan uz povijesni razvoj Ménardova presiometra u Francuskoj i njihovo gledište da ovaj pokus ne treba generalno razmatrati kao sredstvo za dobivanje temeljnih svojstava tla, već radije kao metodu kojom se koristi striktno empirijski (Mair i Wood 1987). Engleski pristup podrazumijeva uporabu presiometra tako da se njime procjene temeljna svojstva tla/stijena (krutost i čvrstoća), koja se onda rabe u uobičajenim metodama geotehničkog projektiranja.

Iako se na prvi pogled čini da je u presiometarskom ispitivanju tlo ili stijena opterećena tlačno, izazvana deformacija stijenke bušotine posljedica je isključivo posmičnih naprezanja (Mair i Wood 1987; Vrkljan i dr.

2006). Nagib naponsko-deformacijske krivulje ovisi o krutosti ispitivanog tla odnosno stijene i zbog toga presiometarsko ispitivanje omogućava interpretaciju posmičnog modula ( $G$ ) odnosno krutosti. Općenito, jedno od fundamentalnih svojstava tla je postojanje nelinearne veze između posmičnih deformacija i odgovarajućih posmičnih naprezanja, odnosno modula posmika. Navedeno vrijedi i za relativno male vrijednosti posmičnih deformacija. Posljedica je postojanje potrebe za uporabom naprednijih i složenijih postupaka analiza i proračuna, u cilju dobivanja relevantnih, korektnih i interpretabilnih rezultata.

U svezi s navedenim, cilj rada je istražiti primjenu Ménard-ovog presiometra u sitnozrnatom tlu (nedrenirani pokus) u kombinaciji sa seizmičkim metodama ispitivanja brzine posmičnih valova radi definiranja krivulje degradacije modula krutosti ( $G$ - $\gamma$ ) tla. Problem ovakve primjene Ménard-ovog presiometra leži u činjenici da se interpretirani moduli ( $G$ ) ne mogu izravno povezati s posmičnim deformacijama ( $\gamma$ ) već promjenama volumena ispitne šupljine. U sklopu ovog zadatka analizirat će se rezultati istraživanja koje je uključilo različite metode ispitivanja u zagrebačkoj, čvrstoj, prekonsolidiranoj glini.

## 2. MODEL KRIVULJE DEGRADACIJSKE KRUTOSTI TLA

Hardin i Drnevich (1972) su dinamičkim ispitivanjima tla u laboratoriju pokazali da je odgovor tla na mehaničko opterećenje nelinearan počevši od vrlo malih posmičnih deformacija ( $\gamma$ ). Kada dodatna naprezanja u tlu rezultiraju povećanjem deformacija preko granice od  $10^{-6}$ , krutost tla odnosno odgovarajuće vrijednosti posmičnog modula ( $G$ ) se nelinearno reduciraju s povećanjem posmičnih deformacija počevši od maksimalne vrijednosti ( $G_o$ ). Model nelinearnog ponašanja tla odnosno tipičnu krivulju redukcije ili degradacije modula Hardin i Drnevich (1972) su predstavili preko modela hiperbole (1):

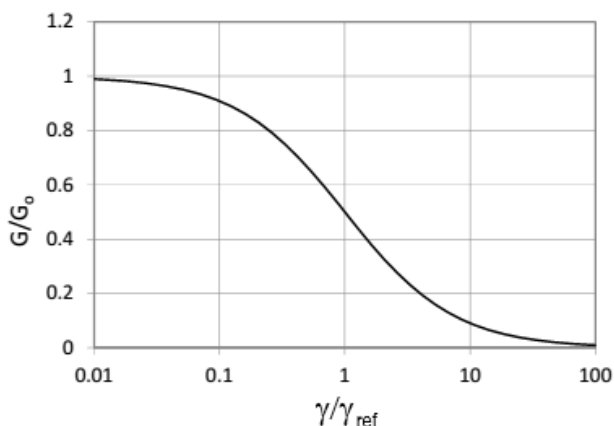
$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)} \quad (1)$$

gdje je  $\gamma_{ref}$  referentna posmična deformacija tla koju su definirali kao omjer maksimalnog posmičnog naprezanja ( $\tau_{maks}$ ) i maksimalnog posmičnog modula ( $G_o$ ) koji vrijedi pri malim posmičnim deformacijama ( $\gamma < 10^{-6}$ ) tla.

Na slici 2 je prikazana normalizirana krivulja degradacije krutosti ( $G/G_o$ ) u odnosu na normaliziranu vrijednost posmične deformacije ( $\gamma/\gamma_{ref}$ ).

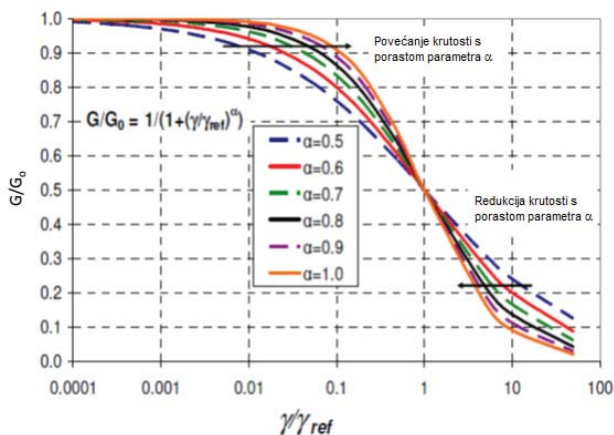
Varanega i Bolton (2011) su modificirali model hiperbole definiran izrazom (1) uključivanjem parametra  $\alpha$  koji utječe na zakrivljenost krivulje prema sljedećoj relaciji (2):

$$\frac{G}{G_o} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ref}}\right)^\alpha} \quad (2)$$



Slika 2. Krivulja degradacije krutosti tla (Hardin i Drnevich 1972).

Na slici 3 prikazane su normalizirane krivulje degradacije modula ( $G/G_0$ ) pri različitim vrijednostima  $\alpha$ . Utjecaj parametra  $\alpha$  na oblik krivulje vidljiv je na slici 3.



Slika 3. Krivulje degradacije krutosti ( $G/G_0$ ) u ovisnosti o vrijednosti parametra zakrivljenosti  $\alpha$  (modificirano iz Vardanega i Bolton 2011).

Vardanega i Bolton (2011) definiraju  $\gamma_{ref}$  kao vrijednost posmične deformacije pri kojoj je vrijednost sekantnog modula reducirana na 50% ( $G/G_0 = 0,5$ ) njegove maksimalne vrijednosti. Za procjenu vrijednosti  $\gamma_{ref}$  Vardanega i Bolton (2011) predlažu korelaciju (3) koja koristi indeks plastičnosti tla:

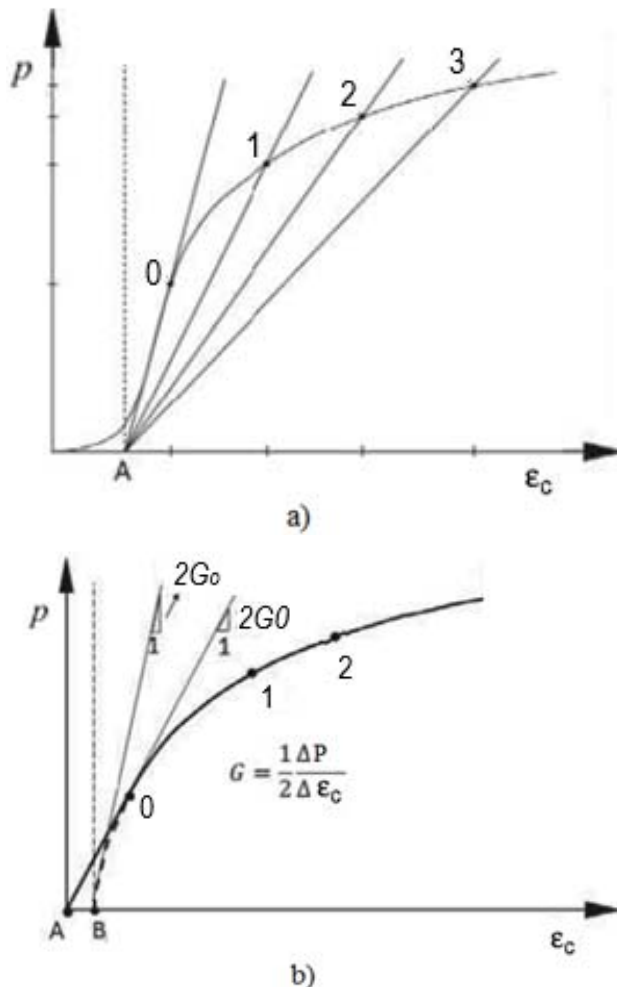
$$\gamma_{ref} = 2,17 \cdot (I_p) / 1000 \quad (3)$$

Na temelju analize podataka iz baze od 20 ispitanih sitnozmatih tala Vardanega i Bolton (2011) pokazuju da je koeficijent određenja korelacije (3) relativno povoljan ( $R^2 = 0,75$ ).

Za korištenje opisanog modela (2) potrebno je definirati barem dvije točke na krivulji tj. poznavati vrijednost maksimalnog modula  $G_0$  i vrijednost  $G$  pri nekoj vrijednosti posmične deformacije  $\gamma$  npr. iz presiometarskog pokusa.

### 3. KRIVULJA DEGRADACIJE KRUTOSTI IZ PRESIOMETARSKOG POKUSA

U presiometarskom ispitivanju tlo je prividno opterećeno tlačnim naprezanjima po obodu ispitne bušotine, a deformacija stijenki bušotine zapravo je posljedica isključivo posmičnih naprezanja (Mair i Wood 1987; Vrkljan i dr. 2006). Nagib naponsko-deformacijske krivulje ovisi o krutosti ispitivanog tla odnosno stijene i zbog toga presiometarsko ispitivanje omogućava interpretaciju posmičnog modula ( $G$ ) odnosno krutosti tla (slika 4).



Slika 4. Presiometarska krivulja ( $p-\epsilon_c$ ): a) kompletna krivulja; b) reducirana krivulja (ne uključuje fazu širenja sonde prije kontakta sa stijenkom bušotine).

Opterećenje  $p$  na slici 4 je prikazano u odnosu na deformaciju šupljine,  $\epsilon_c$ , pri čemu se  $p$  pojavljuje na ordinati za razliku od prikaza na slici 1, zbog čega presiometarska krivulja ima vizualno drugačiji oblik. O načinu izračuna posmičnog modula ( $G$ ) iz podataka opterećenja ( $p$ ) i deformacije šupljine ( $\epsilon_c$ ) može se više naći u Mair i Wood (1987).

Cilj interpretacije pokusa Ménardovim presiometrom u ovom istraživanju je dobiti krivulju promjene krutosti tla ( $G$ ) u odnosu na posmičnu deformaciju ( $\gamma$ ).

Ménard-ovim presiometrom mjere se promjene volumena ( $\Delta V$ ) u odnosu na neki početni volumen šupljine ( $V$ ) kako je prikazano na slici 1, a ne posmična deformacija. Radi transformacije promjena volumena u posmičnu deformaciju, promjene volumena se u prvom koraku mogu iskazati kao promjene deformacije šupljine  $\varepsilon_c$  preko izraza (4):

$$\varepsilon_c = (1 - \Delta V / V)^{-1/2} - 1 \quad (4)$$

Za prikaz krivulje  $p$ - $\varepsilon_c$ , presiometarsku krivulju je potrebno reducirati tako da se ishodište koordinatnog sustava preseli u točku A koja odgovara kontaktu membrane sa stijenkom bušotine odnosno točku od koje se počinje mjeriti deformaciju šupljine  $\varepsilon_c$ . Za ovakav postupak interpretacije pokusa nužno je što preciznije odrediti kontakt membrane i stijenke bušotine. Zbog toga pokus treba započeti s malim inkrementima opterećenja. Iz reducirane presiometarske krivulje prikazane na slici 4.b moguće je interpretirati promjene vrijednosti sekantnog modula  $G$  počevši od neke maksimalne vrijednosti  $G_0$ , koja odgovara ravnom (pseudo-elastičnom) dijelu krivulje i koja se postupno smanjuje porastom deformacije šupljine ( $G1, G2, G3$  itd.) nakon pseudo-elastične faze. Treba primjetiti da je maksimalna vrijednost modula  $G_0$  znatno niža od  $G_o$  koja odgovara stanju neporemećenog tla pri malim posmičnim deformacijama ( $\gamma < 10^{-6}$ ), što je posljedica procesa bušenja i relaksacije naprezanja u tlu izradom bušotine, odnosno poremećenja tla, koje nije moguće izbjeći u ovakvom načinu ispitivanja. Na slici 4.b prikazan je i dio idealne presiometarske krivulje (crtkana krivulja  $B-0$ ), koji je izgubljen uslijed poremećenja tla.

Za određivanje krivulje degradacije krutosti (slika 2) potrebno je promjene modula iskazati u odnosu na posmičnu deformaciju  $\gamma$ . Transformaciju deformacije šupljine  $\varepsilon_c$  u posmičnu deformaciju  $\gamma$  moguće je obaviti složenim matematičkim postupcima kao npr. Palmer (1972) ili Muir Wood (1990).

Ovdje je primjenjen pojednostavljeni postupak transformacije, koji je demonstrirao Jardine (1992). Jardine (1992) je uspoređivao presiometarske krivulje sekantnog posmičnog modula dobivene u različitim glinama s krivuljama sekantnog modula iz troosnih laboratorijskih pokusa na neporemećenim uzorcima istih glina, te pokazao da se deformacija šupljine  $\varepsilon_c$  i troosna posmična deformacija  $\varepsilon_s$  ispitnog uzorka mogu povezati približnim odnosom (5):

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_s} = 1.2 + 0.8 \log_{10} \frac{\varepsilon_c}{10^{-5}} \quad (5)$$

pri čemu je inženjerska posmična deformacija ( $\gamma$ ) 3/2 puta veća od troosne posmične deformacije ( $\varepsilon_s$ ).

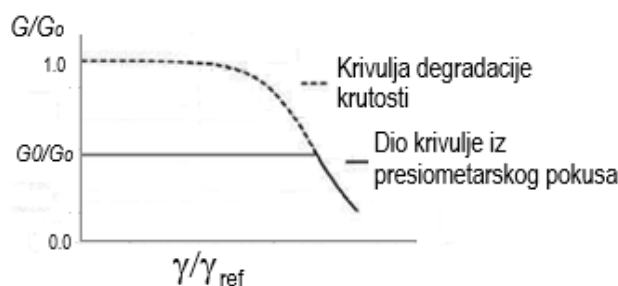
Za određivanje normalizirane krivulje degradacije modula ( $G/G_o$ ) potrebno je odrediti i vrijednost maksimalnog modula  $G_o$  pri malim posmičnim deformacijama. Za određivanje  $G_o$  potrebno je odrediti gustoću tla ( $\rho$ ) i izmjeriti brzinu posmičnih valova ( $v_s$ ) (6):

$$G_o = \rho \cdot v_s^2 \quad (6)$$

Brzinu posmičnih valova u tlu moguće je odrediti različitim seizmičkim metodama, koje se danas uspješno koriste pri terenskim geotehničkim istraživanjima, kao npr. downhole i crosshole metode, SASW, MASW itd.

Glavna hipoteza ovog istraživanja je da se na temelju prethodno opisane interpretacije presiometarskog pokusa može dobiti korektan završni dio krivulje degradacije krutosti, kako je prikazano na slici 5, te da se kombinacijom presiometarskih pokusa i terenskih seizmičkih metoda može pouzdano konstruirati krivulja degradacije krutosti sitnozrnatog tla. Završni dio degradacijske krivulje koji se može dobiti ovakvom interpretacijom presiometarskog ispitivanja najčešće je relevantan samo za analize nosivosti i stabilnosti tla. Međutim, za deformacijske analize (npr. procjene slijeganja temelja) relevantan je prethodni, srednji dio degradacijske krivulje pri nižim vrijednostima posmičnih deformacija, koji je relativno teško odrediti terenskim metodama ispitivanja zbog neizbježnog poremećenja tla koje se javlja kao posljedica pripreme bušotine ili ugradnje ispitnog uređaja. U tom dijelu krivulje se mogu naći vrijednosti posmičnog modula interpretirane iz presiometarskog ciklusa rasterećenje-opterećenje ili iz pokusa plosnatim dilatometrom (DMT). Pretpostavka je da će se navedenim vrijednostima posmičnog modula moći pridružiti pripadajuće posmične deformacije preko konstruirane degradacijske krivulje, te tako omogućiti preciznije korištenje rezultata presiometarskog pokusa.

Za model krivulje krutosti (2) koji su predložili Vardanega i Bolton (2011) potrebno je procijeniti iznos referentne posmične deformacije  $\gamma_{ref}$  preko korelacije (3) te parametar zakrivljenosti  $\alpha$ . Parametar  $\alpha$  se planira odrediti u postupku prilagodbe modelske krivulje (2) tako da se ista preklopi sa završnim dijelom krivulje promjene modula iz presiometarskog pokusa kao na slici 5.

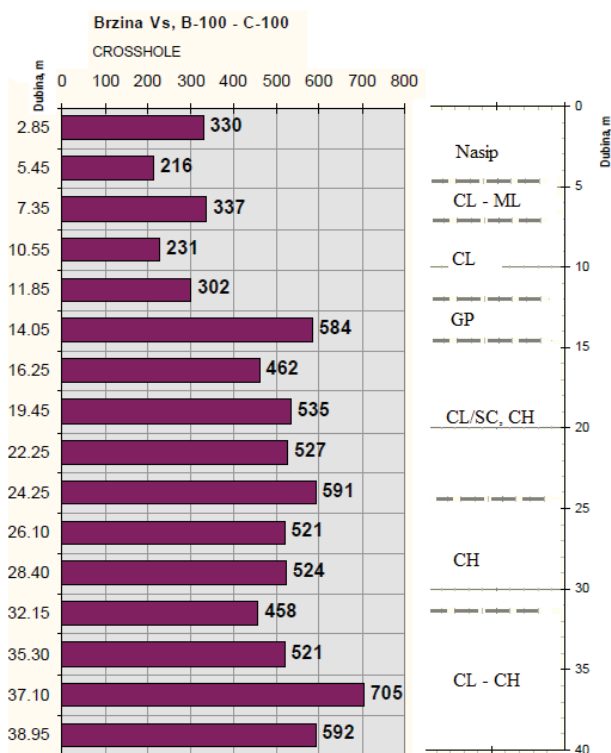


Slika 5. Krivulja degradacije krutosti s naznačenim dijelom iz presiometarskog pokusa.

Na lokaciji u Zagrebu, u blizini Trga bana Jelačića (Cesarčeva ulica), korišten je Ménardov presiometar u kombinaciji s više seizmičkih metoda i laboratorijskim ispitivanjima fizikalnih i mehaničkih svojstava tla. Presiometarski pokusi (7 kom) obavljani su u bušotini B-100 u prekonsolidiranoj, zagrebačkoj glini u intervalu od približno 20 do 40m dubine. Geotehnički profil tla i brzine posmičnih valova iz „crosshole“ seizmičke metode prikazani su na slici 6. Indeks konzistencije ispitivanih glina nalazi se u rasponu od 0,95 do 1,10, a indeks plastičnosti u rasponu od 0,20 do 0,25.

Na slici 7 prikazana je reducirana presiometarska krivulja ( $p$ - $\epsilon_c$ ) i modelska krivulja krutosti koja je prilagođena odabirom vrijednosti koeficijenta  $\alpha$  tako da se poklopi sa završnim dijelom krivulje promjene sekantnog modula iz presiometarskog pokusa.

Na slici 7 prikazani su i podaci sekantnog modula interpretiranog iz dva ciklusa rasterećenje-opterećenje. Vrijednost posmične deformacije koja odgovara modulu iz rasterećenja odabrana je tako da točka ( $G/G_0$ ;  $\gamma$ ) padne na modelsku krivulju krutosti.



Slika 6. Brzine posmičnih valova „crosshole“ metodom između bušotina B-100 i C-100 na lokaciji u Zagrebu.

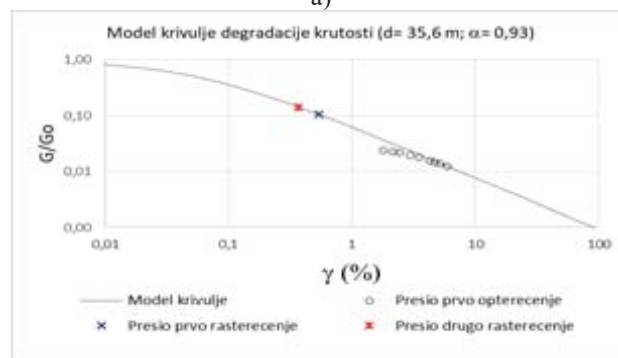
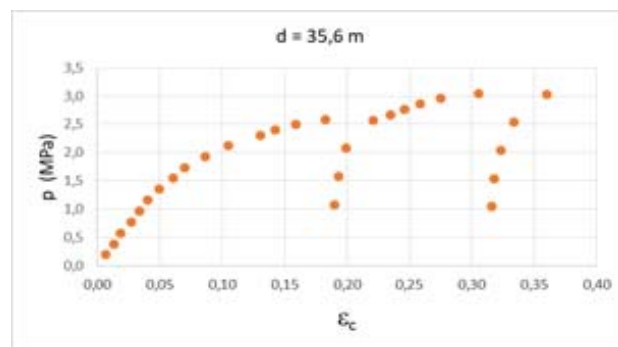
U tablici 1 prikazani su relevantni podaci dobiveni interpretacijom presiometarskih pokusa i konstrukcijom modelskih krivulja krutosti čvrste, prekonsolidirane, zagrebačke gline.

Poznato je da se u ciklusima rasterećenja dobiju znatno više vrijednosti Young-ovog i posmičnog modula od istih u prvom opterećenju tla. Problem koji naglašavaju protivnici provedbe ciklusa rasterećenje-opterećenje u presiometarskom pokusu (zagovornici tzv. francuskog pristupa) je da se rasterećenjem mogu dobiti različite vrijednosti modula (vidi sliku 7) u ovisnosti o amplitudi rasterećenja i stanju naprezanja, kod kojeg se rasterećenje započinje.

Briaud (2013) se protivi ideji korištenja modula iz ciklusa rasterećenje-opterećenje i naglašava da to nije standardni modul. Umjesto provedbe rasterećenja, Briaud (2013) preporuča korištenje hiperbolične ekstenzije presiometarske krivulje kako bi se odredila odgovarajuća vrijednost sekantnog modula pri očekivanom stupnju deformacije. Problem kod takvog pristupa se javlja kada je očekivani stupanj deformacije tla za odgovarajuće projektno rješenje niži od raspona deformacije dobivene u

presiometarskom pokusu, a ekstenzijom krivulje se ne mogu rekonstruirati njeni dijelovi koji su izgubljeni zbog poremećenja tla.

U svakom slučaju, tijekom presiometarskog pokusa treba nastojati ostvariti čim veću deformaciju šupljine jer je pouzdanost hiperbolične ekstenzije ovisna o veličini ostvarene deformacije nakon pseudoelastične faze. Ispitivač treba nastojati maksimalno iskoristiti kapacitet sonde u pogledu promjene volumena šupljine u pokusu (oko 700 cm<sup>3</sup>) što nažalost može rezultirati pucanjem membrane. Takav razvoj događaja ispitivači često nastoje izbjeći ranijim završetkom ispitivanja dok membrana nije maksimalno deformirana.



Slika 7. Reducirana presiometarska krivulja s dva ciklusa rasterećenja u pokusu na dubini 35,6 m (a); promjene sekantnog modula i pripadajuća krivulja degradacije krutosti (b).

Osim toga, vrlo je bitno da se bušenjem ispitne dionice (šupljine) ostvari minimalno poremećenje okolnog tla, koje će se podvrgnuti presiometarskom ispitivanju. To je moguće postići odabirom prikladne tehnike bušenja i bušačkih alatki s obzirom na geološke uvjete (vidi normu HRN EN ISO 22476-4: 2012, Dodatak C). Ispitnu dionicu bušotine se ne smije pročišćavati uzastopnim manevrima (gore-dolje) bušačkih alatki, kao što je to npr. slučaj kod pripreme dna bušotine za uzimanje neporemećenog uzorka. Ispitnu dionicu za presiometarski pokus je najbolje izbušiti jednim kontinuiranim manevrom i produbiti je 0,5-1 m dublje od dna ispitne zone, kako bi se dio krhotina nabušenog materijala, koji nije uspio izaći na površinu terena putem cirkulacije isplačnog fluida, mogao istaložiti ispod ispitne šupljine nakon vađenja bušačkih alatki. Presiometarsku sondu treba odmah zatim spustiti u ispitnu dionicu i započeti ispitivanje.

Tablica 1. Podaci interpretacije presiometarskih pokusa u prekonsolidiranoj zagrebačkoj glini.

Dubina presiometarskog pokusa (m)	Raspon vrijednosti posmičnog modula i deformacija iz presiometarskih pokusa		Maks. posmični modul ( $\gamma < 10^{-6}$ )	Referentna posmična deformacija	Brzina posmičnih valova	Indeks plastičnosti tla	Parametar zakrivljenosti krivulje
	G (MPa)	$\gamma$ (%)	$G_o$ (MPa)	$\gamma_{ref}$ (%)	$v_s$ (m/s)	$I_p$	$\alpha$
22,7	13,1-9,7	1,8-4,6	578	0,051	527	0,235	0,90
24,4	9,1-7,5	2,8-6,2	723	0,051	591	0,235	0,95
26,7	5,6-3,5	4,3-9,7	565	0,044	521	0,200	0,95
30,2	15,2-8,1	1,5-5,4	565	0,048	521	0,220	0,90
33,7	7,8-5,9	2,7-7,2	503	0,054	500	0,250	0,91
35,6	12,6-7,1	1,8-6,0	570	0,054	521	0,250	0,93
37,5	63,3-17,2	0,1-1,4	1034	0,054	705	0,250	1,28

Provedena presiometarska ispitivanja u prekonsolidiranoj zagrebačkoj glini pokazala su znatne razlike u vrijednostima modula dobivenim pri opetovanim ciklusima rasterećenja (slika 7), što potvrđuje opisani nedostatak modula interpretiranog iz ciklusa rasterećenje-opterećenje. Iz podataka presiometarskog pokusa u rasterećenju nije moguće definirati razinu posmične deformacije, koja odgovara modulu kritosti dobivenom u rasterećenju.

Međutim, interpretacijom prema metodi opisanoj u trećem poglavlju, koja u kombinaciji sa seizmičkim metodama omogućava konstrukciju krivulje krutosti tla, moguće je procijeniti razine posmične deformacije, koje odgovaraju sekantnim modulima u rasterećenju.

U ovom istraživanju, vrijednosti posmičnog modula u rasterećenju kretale su se u rasponu od 5-15% maksimalnog modula ( $G_o$ ), a odgovarajuće vrijednosti posmične deformacije od približno 0.4 – 2 %.

### 5. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih krivulja krutosti odnosno podataka prikazanih u tablici 1 zaključuje se da je hipoteza ovog istraživanja valjana. Moguće je zaključiti da je, na temelju prethodno opisane interpretacije presiometarskog pokusa Ménardovim tipom presiometra, moguće dobiti završni dio krivulje degradacije krutosti tla. Kombinacijom presiometarskih pokusa i terenskih seizmičkih metoda moguće je zadovoljavajuće konstruirati krivulje degradacije krutosti sitnozrnatog tla na temelju usvojenog modela.

Ipak, za potpunu potvrdu hipoteze uputno bi bilo izvršiti i dodatna istraživanja (npr. laboratorijski dinamički pokusi), kojima bi se dokazala valjanost konstruiranih krivulja u širokom rasponu između  $G_o$  i dijela krivulje, koji odgovara sekantnim vrijednostima modula iz presiometarskog pokusa.

Konstrukcijom kompletne krivulje degradacije krutosti sitnozrnatog tla uz pomoć Ménardovog presiometra i seizmičkih metoda pružena je mogućnost rješavanja složenih inženjerskih problema, koji zahtijevaju precizno poznavanje odnosa naprezanja i deformacija u tlu.

### 6. LITERATURA

- Mair, R.J., Wood, D.M. (1987). Pressuremeter Testing, Methods and Interpretation. CIRIA 1987.
- Vrkljan, I., Kavur, B., Fifer-Bizjak, K., (2006). Dilatometarska ispitivanja u inženjerskoj mehanici stijena. Građevinar 58 (2006) 3, 187-197.
- HRN EN ISO 22476-4 (2012). Geotehničko istraživanje i ispitivanje – Terensko ispitivanje – 4. dio: Ispitivanje Ménardovim presiometrom (ISO 22476-4: 2012; EN ISO 22476-4: 2012)
- Baguelin, F.; Jezequel, J.F.; Shields, D.H. (1978). The Pressuremeter and Foundation Engineering, Trans Tech Publications.
- Hardin, B.O., Drnevich, V.P. (1972). Shear modulus and damping in soils: design equations and curves. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division (ASCE). Vol. 98, No. SM7, pp. 667-691.
- Vardanega, P.J., Bolton, M.D. (2011). Practical methods to estimate the non-linear shear stiffness of fine grained soils. Proc. of the Int. Symp. on Deformation Characteristics of Geomaterials. September 1-3, 2011, Seoul, Korea, pp. 372-378.
- Palmer, A.C. (1972). Undrained plane strain expansion of a cylindrical cavity in clay; a simple interpretation of the pressuremeter test. Geotechnique, 22: 451-457.
- Muir Wood, D. (1990). Strain dependent soil moduli and pressuremeter tests. Geotechnique, 40: 509-512.
- Jardine, R.J. (1992). Nonlinear stiffness parameters from undrained pressuremeter tests. Can. Geotech. Journal. 29: 436-447.
- Briaud, J.L. (2013). The pressuremeter test: Expanding its use. Proc. of the 18th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Honour Lectures. Paris, 2013. pp. 107-126.