

Dilatometarska ispitivanja u inženjerskoj mehanici stijena

Ivan Vrkljan, Boris Kavur, Karmen Fifer-Bizjak

Ključne riječi

inženjerska mehanika stijena, ispitivanje, dilatometar, stijenska masa, deformabilnost, dilatometarski modul

Key words

engineering rock mechanics, testing, dilatometer, rock mass, deformability, dilatometer model

Mots clés

mécanique des roches appliquée, essai, dilatomètre, masse rocheuse, déformabilité, modèle dilatométrique

Ключевые слова

инженерная механика пород, испытание, dilatometr, горная масса, деформируемость, dilatометрический модуль

Schlüsselworte

Ingenieurfelsmechanik, Untersuchung, Dilatometer, Gestein, Verformbarkeit, Dilatometermodul

I. Vrkljan, B. Kavur, K. Fifer-Bizjak

Izvorni znanstveni rad

Dilatometarska ispitivanja u inženjerskoj mehanici stijena

Prikazana su iskustva u primjeni različitih tipova dilatometara pri ispitivanju stijena. Uz teorijske osnove daju se i preporuke za upotrebu odgovarajućeg tipa dilatometra ovisno o deformabilnosti stijenske mase. Ističe se važnost interpretacije izmjerenih veličina i pravilne primjene rezultata. Ocjenjuju se rezultati mjerenja različitim tipovima dilatometara na više lokacija. Uspostavljena je korelacija dilatometarskog modula i modula iz velikih in situ ispitivanja vapnenca.

I. Vrkljan, B. Kavur, K. Fifer-Bizjak

Original scientific paper

Dilatometer testing in engineering rock mechanics

Experience gained in the use of various dilatometer types in rock testing is presented. In addition to theoretical background information, the authors present recommendations for the use of individual dilatometer types depending on rock mass deformability. The significance of interpretation of measurement results and proper use of resulting information is emphasized. Measurement results obtained by different dilatometer types on a number of locations are analyzed. The correlation between the dilatometer module and the modules originating from big in situ limestone tests is established.

I. Vrkljan, B. Kavur, K. Fifer-Bizjak

Ouvrage scientifique original

Essais au dilatomètre dans la mécanique des roches appliquée

L'expérience obtenue dans l'emploi de types différents des dilatomètres dans l'analyse des roches est présentée. En plus des informations théoriques de base, les auteurs présentent les recommandations pour l'emploi des dilatomètres spécifiques, choisis selon la déformabilité de la masse rocheuse. L'importance des résultats de mesure et de l'emploi adéquat des informations résultantes est soulignée. Les résultats obtenus par différents dilatomètres aux sites variés sont analysés. Une corrélation a été établie entre le module dilatométrique et les modules provenant des grands essais conduits sur le terrain dans les formations calcaires.

И. Врклјан, Б. Кавур, К. Фифер-Бизјак

Оригинална научна работа

Дилатометрические испытания в инженерной механике пород

В работе показаны опыты применения различных типов dilatometров при испытании пород. Наряду с теоретическими основами даются и рекомендации для употребления соответствующего типа dilatometра, в зависимости от деформируемости горной массы. Подчеркивается значение интерпретации измеренных величин и правильного применения результатов. Оцениваются результаты измерений различными типами dilatometров на большем числе локаций. Установлена корреляция dilatометрического модуля и модуля из большого числа полевых испытаний (in situ) известняка.

I. Vrkljan, B. Kavur, K. Fifer-Bizjak

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Dilatometrische Untersuchungen in der Ingenieurfelsmechanik

Dargestellt sind Erfahrungen in der Anwendung verschiedener Dilatomertypen bei der Untersuchung des Gesteins. Neben theoretischen Grundlagen präsentiert man auch Empfehlungen für die Benützung entsprechender Dilatomertypen abhängig von der Verformbarkeit des Gesteins. Hervorgehoben ist die Wichtigkeit der Interpretierung der gemessenen Grössen und der regelrechten Anwendung der Ergebnisse. Man bewertet die Ergebnisse der Messung mit verschiedenen Dilatomertypen auf mehreren Örtlichkeiten. Gebildet ist die Korrelation des Dilatometermoduls und des Moduls aus grossen in situ Untersuchungen des Kalksteins.

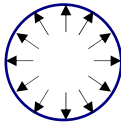
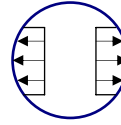
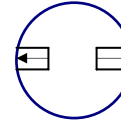
Autori: Prof. dr. sc. **Ivan Vrkljan**, dipl. ing. rud.; mr. sc. **Boris Kavur**, dipl. ing. rud., Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb; dr. sc. **Karmen Fifer-Bizjak**, dipl. ing. geol., Zavod za građbeništvo, Ljubljana,

1 Uvod

U literaturi se pojavljuju dva termina za isti uređaj: presiometar i dilatometar. Nekada se pod terminom presiometar misli samo na Ménardov tip uređaja, dok se dilatometrom naziva uređaj koji se rabi isključivo u stijinama.

Bez obzira što dilatometarski pokusi kao i drugi terenski pokusi imaju neka ograničenja, oni se danas još uvijek često rabe. U nekim su okolnostima dilatometarska ispitivanja jedini način za dobivanje informacija o deformabilnosti i čvrstoći stijene. Rabe se tri grupe uređaja: dilatometri ili presiometri, bušotinske preše. (*borehole jacks*) i bušotinski penetrometri.

Tablica 1. Principi rada triju najčešće upotrebljivanih uređaja za određivanje čvrstoće i deformabilnosti stijenske mase u bušotinama

Naziv uređaja	Uvjeti opterećenja	Skica načina opterećenja
dilatometar (presiometar)	radijalno simetričan tlak djeluje po cijeloj duljini sonde	
bušotinska preša (<i>borehole jack</i>)	tlak se na stijenku prenosi preko dviju ploča (krutih ili elastičnih)	
bušotinski penetrometar	tlak se na stijenku bušotine prenosi preko male površine	

Kod svih se pokusa opterećuje stijenku bušotine, a mjeri se promjena njezina promjera. Pojedine grupe uređaja razlikuju se samo po obliku i veličini opterećene površine.

Prema njemačkoj literaturi dilatometar se za određivanje deformabilnosti tla rabi još 1930. [1]. Metoda se rutinski počela primjenjivati u kasnim pedesetim godinama s razvojem aparature i postupka što je predložio Ménard 1956. Prvu uspješnu uporabu fleksibilnih dilatometara s mogućnošću primjene visokih tlakova opterećenja prikazali su Panek i dr. [2] (razvijen na United States Bureau of Mines), te Rocha i dr. [3] (razvijen u Laboratorio Nacional de Engenharia Civil iz Portugala (LNEC)).

S pomoću dilatometra (presiometra) na plašt bušotine djeluje radijalno simetričan tlak po cijeloj duljini sonde. Tlak u dilatometru ostvaruje se s pomoću plinova ("Ménard" i "Geoprobe" presiometri) ili hidraulički (voda ili ulje) (LNEC). Promjena promjera bušotine mjeri se na dva načina: neizravno - mjerenjem promjene volumena

fluida u dilatometru ili izravno - mjerenjem promjene promjera bušotine mjernim uređajima.

Interpretacija dilatometarskog pokusa složen je postupak zbog malog volumena koji je zahvaćen pokusom i zbog promjene ponašanja stijenske mase tijekom pokusa. Vrijednosti modula razlikuju se od modula dobivenih drugim pokusima kao što su pokus pločom (PLT, *plate load test*) i pokus velikim tlačnim jastukom (LFJ, *large flat jack*) te se često nazivaju dilatometarskim modulom. Dilatometarski su moduli uglavnom niži [3]. Iskustvo pokazuje da su oni oko dva puta niži od modula dobivenih pločom ili tlačnim jastukom [4]. Zbog toga dilatometarski modul treba smatrati indeksnim pokazateljem mehaničkog ponašanja stijenske mase, posebno njezine deformabilnosti [5], [6], [7].

Osim za određivanje deformacijskih svojstava, dilatometarski pokus može poslužiti i za određivanje:

- *in situ* naprezanja i vlačne čvrstoće koristeći se dilatometrom visokog tlaka koji dovodi stijenu do loma [8]
- svojstava plastičnog ponašanja dilatometrom relativno visokog tlaka u slabim i plastičnim stijinama kao što su šejl, potaša ili sol [9]
- svojstava kratkotrajne čvrstoće slabih stijena iz nelinearne krivulje tlak-volumen koristeći dilatometar visokog tlaka i opterećivanjem stijene iznad njezine granice elastičnosti [1]. Metode su slične onima koje se primjenjuju za interpretaciju rezultata Ménardova presiometra.

Danas se dilatometri najčešće rabe u sljedećim situacijama:

- Na velikim projektima kod kojih je područje istraživanja veliko (betonske lučne brane, velike podzemne građevine i slično), dilatometar se rabi za zoniranje istražnog područja u geotehničke jedinice sličnih mehaničkih svojstava. Ova se ispitivanja obavljaju istodobno s istražnim bušenjima i geofizičkim ispitivanjima. Na taj se način utvrde zone u kojima treba obaviti velika statička *in situ* ispitivanja. Kako se radi o vrlo skupim i dugotrajnim ispitivanjima, bitno ih je locirati u zone čija deformabilnost ima najveći učinak na ponašanje građevine. Korelacije dilatometarskog modula i modula velikih *in situ* pokusa u kasnijoj fazi istraživanja omogućavaju provjeru nekih neistraženih zona izvođenjem samo dilatometarskih ispitivanja. Na osnovi rezultata dilatometarskih ispitivanja, izrađuje se program skupih i dugotrajnih velikih *in situ* pokusa. Charrua-Graca [5] izdvaja četiri razreda stijenske mase po parametru dilatometarskog modula (tablica 2.). U stijenskoj masi I. razreda nije potrebno obavljati velike *in situ* pokuse jer preciznije poznavanje deformabilnosti nema praktičnu vrijednost. Zone stijenske mase II. razreda zahtijevaju pažljivu analizu re-

zultata istraživanja. Zone stijenske mase razreda III. i IV. zahtijevaju obavljanje velikih *in situ* pokusa, kako bi se utvrdila stvarna deformabilnost stijenske mase.

Tablica 2. Klasifikacija stijenske mase prema dilatometarskom modulu [5]

Razred	Dilatometarski modul (GPa)
I.	$E_d > 10$
II.	$5 < E_d < 10$
III.	$1 < E_d < 5$
IV.	$E_d < 1$

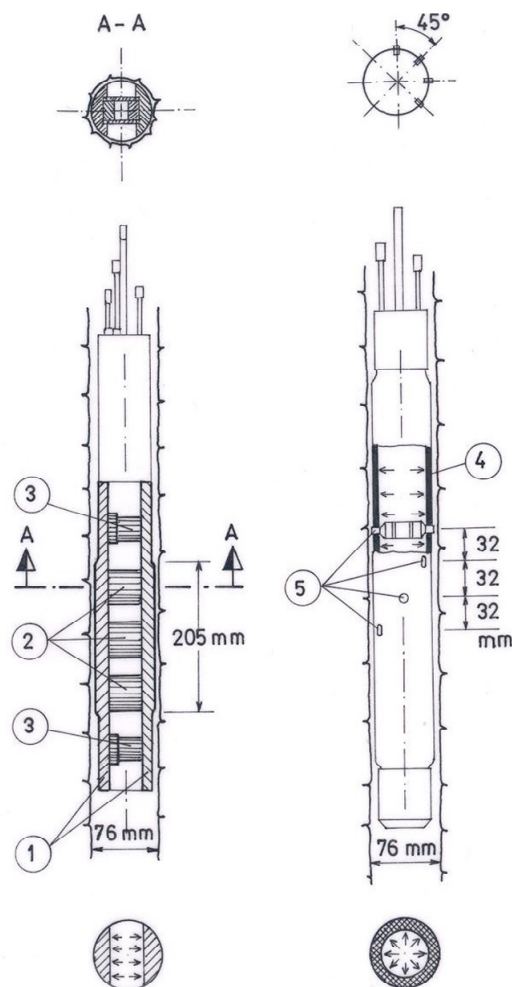
- Na manjim građevinama na kojima izvođenje velikih *in situ* pokusa nije prihvatljivo iz ekonomskih razloga, dilatometar je jedini *in situ* pokus kojim se dobiju statička deformacijska svojstva. Alternativa dilatometru su empirijske metode koje imaju jedno značajno ograničenje: ne mogu se primjenjivati u stijenskoj masi loše kvalitete ($RMR < 30$ i $Q < 0,1$) zbog dominantne uloge RQD-a u ovim klasifikacijama i teškoća pri njegovu mjerenju u vrlo lošim stijenskim masama. U ovim se situacijama moduli deformabilnosti stijenske mase nastoje odrediti iz dilatometarskog ispitivanja. Kako kod manjih građevina deformabilnost čvrste stijenske mase ne bi bitno utjecala na njezino ponašanje, ispituje se uglavnom deformabilnost mekših i intenzivno ispucanih stijena. U ovim se situacijama rabe dilatometri manjeg kapaciteta s indirektnim mjerenjem deformacija (Ménard) ili s direktnim mjerenjem ako sonda može mjeriti velike pomake (OYO-elastomer-2). Prevođenje dilatometarskog modula u modul deformabilnosti stijenske mase za numeričke analize zahtijeva veliko iskustvo istraživača i široko znanje iz područja inženjerske geologije i mehanike stijena.

U radu je prikazana uporaba dilatometra u obje navedene situacije. Na velikim hidrotehničkim objektima u Iranu dilatometar se rabi uz velike *in situ* pokuse (PLT i LFJ) i geofizička ispitivanja. Na većem broju tunela u Hrvatskoj i Sloveniji, dilatometar je često bio jedini indikator statičke deformabilnosti stijenske mase.

2 Dilatometri s izravnim mjerenjem radijalnih pomaka

Izravno mjerenje omogućeno je ugrađivanjem mjernih pretvornika pomaka (LVDT ili DCDT tipa) u sondu čime je znatno poboljšana osjetljivost i preciznost mjerenja. Osim toga, radijalna mjerenja pomaka pružaju uvid u anizotropiju deformabilnosti stijenske mase. Uređaji s ovim načinom mjerenja mogu se rabiti i u stijenskoj masi izrazito niske deformabilnosti (visokih modula deformabilnosti).

Često se ovaj tip dilatometra naziva LNEC dilatometrom jer je razvijen u institutu Laboratorio Nacional de Engenharia Civil iz Portugala. Mjerenje dilatacije bušotine u više pravaca omogućava procjenu anizotropije stijenske mase (slika 1.b).



Slika 1. a) borehole jack (1 - ploče za prienos opterećenja; 2 - hidraulički cilindri; 3 - uređaji za mjerenje pomaka), b) dilatometar s izravnim mjerenjem pomaka (4 - gumena membrana; 5 - uređaji za mjerenje pomaka)

Osnovno pitanje koje se postavljalo pred konstruktore dilatometara bilo je - za koji promjer bušotine proizvesti opremu? Prednost većeg promjera bušotine jest povećani volumen stijene koja se tlačí. Projektanti LNEC-a odlučili su se za sondu koja odgovara promjeru bušotine od 76 mm [3]. Danas se obično dilatometri proizvode s promjerom od 76 do 116 mm i odnosom duljine i promjera od 5 do 15 [1]. Najveći se tlak opterećenja obično kreće oko 20 MPa. Ovaj tip dilatometra uglavnom se rabi u čvrstim stijenskim masama jer nije prilagođen velikim deformacijama zidova bušotine.

Dilatometarski se modul određuje iz podataka o primijenom opterećenju unutar elastičnog ili pseudoelastič-

nog područja i izmjerenoj rezultirajućoj dilataciji. Veze između naprezanja i deformacija dane su za dva stanja stijenske mase [1]:

- neispucana stijena (ili stijena s velikim razmakom između pukotina).
- ispucana stijena za koju se pretpostavlja da nema vlačne čvrstoće u tangencijalnom pravcu na bušotinu.

U neispucanoj stijeni modul se računa prema jednadžbi:

$$E_D = (1 + \nu_R) D \frac{\Delta P_i}{\Delta D} \quad (1)$$

ΔP_i - inkrement tlaka unutar odabranog segmenta

D - početni promjer bušotine

ΔD - odgovarajuća srednja promjena promjera bušotine

ν_R - Poissonov omjer stijenske mase

E_D - sekantni dilatometarski modul

Ako (P_i) prelazi dvostruko srednje naprezanje stijene oko bušotine, sve će se postojeće radijalne raspukline otvoriti, te treba koristiti jednadžbu za ispucalu stijenu:

$$E_D = D \frac{P_i}{\Delta D} (1 + \nu_R) \left[(1 - \nu_R) \ln \left(\frac{P_i}{2P_0} \right) + 1 \right] \quad (2)$$

P_i - primijenjeni tlak

ΔD - srednje povećanje promjera bušotine kada se tlak poveća od nule na P_i .

Gornje jednadžbe vrijede samo za linearno elastičnu, homogenu i izotropnu stijensku masu.

3 Dilatometri s neizravnim mjerenjem radijalnih pomaka

Neizravno mjerenje omogućava izračunavanje srednje vrijednosti modula deformabilnosti, pošto se iz izmjerene promjene volumena izračuna srednja promjena promjera bušotine. Dilatometrom s ovim načinom mjerenja koristi se u tlima i slabim stijenama kod kojih se ne očekuje značajnija anizotropija deformabilnosti. Ovom tipu uređaja pripada i Ménardov presiometar koji je namijenjen ispitivanju tla i projektiran je za rad s nižim tlakovima. Nekada se upotrebljava za određivanje deformabilnosti mekih stijena kao što su one kojih je modul deformabilnosti manji od 500 MPa [1]. Kada se rabi u tlu, Ménardovim presiometrom može se odrediti i čvrstoća, in situ horizontalno naprezanje te vodopropusnost [10]. Uporabu Ménardova presiometra potanku su opisali Robertson [11] te Bauguelin i dr. [12].

Kod ovih se uređaja srednji radijalni pomak računa iz izmjerene promjene volumena sonde. Ovi dilatometri su naročito korisni za brzo indeksno kartiranje bušotine u glinovitim stijenama ili gusto ispucanim stijenskim masama iz kojih je nemoguće dobiti intaktni uzorak za laboratorijska ispitivanja. Postoji više tipova ovih uređaja različitih dimenzija i tlakova. CSM dilatometar (*Colorado School of Mines*) postiže tlakove do 100 MPa, a Ménardov do 20 MPa. U Europi se najčešće upotrebljava Ménardov tip dilatometra koji se u literaturi redovito opisuje kao Ménardov presiometar. Ménardovim presiometrom dobiju se deformacijski parametri i parametri loma, a obično se rabe u stijenskim masama koje imaju modul deformabilnosti manji od 500 MPa.

Mair je u izvještaju Britanskoga geotehničkog društva [10] istaknuo da postoji temeljna razlika u pristupu uporabe presiometra pri projektiranju u Francuskoj i Engleskoj.

Francuski pristup podrazumijeva da se parametri dobiveni ispitivanjem (E_M i p_L) izravno rabe pri projektiranju. Rezultati presiometarskog pokusa su empirijski dovedeni u vezu s geotehničkim parametrima ili još izravnije s uvjetima temeljenja (bočno opterećeni piloti, nosivost i slijeganje plitkih temelja) [13]. To je vezano 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 [10] [12].

Engleski pristup podrazumijeva uporabu presiometra kao uređaja kojim se dobiju temeljna svojstva tla (deformabilnost i čvrstoća). Ovako dobiveni parametri rabe se na uobičajen način u konvencionalnim metodama projektiranja [13] [14].

Iako se čini da je tijekom dilatometarskog ispitivanja stijena opterećena tlačno, promjena promjera bušotine posljedica je isključivo posmičnih naprezanja. Nagib krivulje tlak-deformacija (ekspanzija) zbog toga daje posmični modul G koji je često transformiran u ekvivalentni Youngov modul, E (za izotropni materijal) s pomoću izraza:

$$E = 2G (1 + \nu) \quad (3)$$

Gdje je ν Poissonov omjer. Nekada se uzima da je $\nu = 0,3$ pa se dobije deformacijski modul, E_m , poznat kao Ménardov modul

$$E = 2,6 G \quad (4)$$

Pri ispitivanju tla mora se razlikovati nedreniranog E_u i drenirani Youngov modul E' , dok u slaboj stijeni ova razlika nije bitna.

$$E_u = 2G (1 + \nu_u) \quad (5)$$

$$E' = 2G (1 + \nu') \quad (6)$$

Gdje su ν_u i ν' nedrenirani i drenirani Poissonovi omjeri. Za nedrenirane uvjete u glinovitom tlu može se uzeti da je $\nu_u = 0,5$ (odgovara konstantnom volumenu) pa se dobije

$$E_u = 3G \quad (7)$$

Za drenirane uvjete u bilo kojem tlu ν' može biti i 0,1 ali tipično između 0,1 i 0,3. Za stijenu se uglavnom uzima vrijednost Poissonova omjera između 0,1 i 0,3.

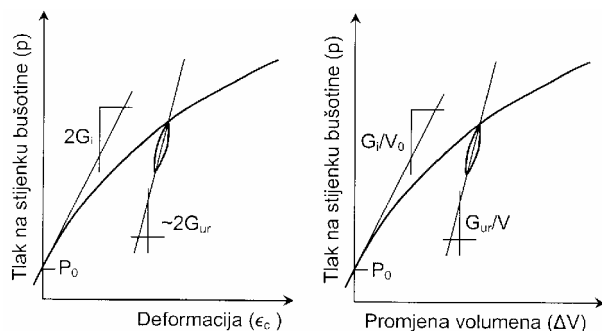
Ispitivanje počinje kada se tlak u sondi izjednači s horizontalnim *in situ* naprezanjem ($p_o = \sigma_h$). U tom stanju početni volumen sonde je V_o i polumjer bušotine r_o . Tijekom pokusa mjeri se tlak (p) i volumen sonde (V) iz kojeg se računa polumjer (r). Pretpostavka je da bušotina zadržava cilindričan oblik pa je odnos polumjera i volumena:

$$V = r^2 \pi h \quad (8)$$

gdje je h visina sonde.

Rezultati se prikazuju kao odnos tlaka (p) i:

- volumena (V)
- deformacije oplošja $\varepsilon_c = (r - r_o)/r_o$ (često se naziva deformacijom bušotine).



Slika 2. Prikaz rezultata presiometarskih ispitivanja kao odnosa tlaka i deformacije, odnosno tlaka i promjene volumena bušotine

Koristeći se teorijom elastičnosti, može se dokazati sljedeći odnos posmičnog modula (G), prirasta tlaka u sondi (dp) te prirasta deformacije bušotine ($d\varepsilon_c$):

$$G = \frac{1}{2} \left(\frac{r}{r_0} \right) \left(\frac{dp}{d\varepsilon_c} \right)$$

Na početku pokusa je $r = r_o$ pa je $r/r_o = 1$, te se iz početnog dijela krivulje dobije inicijalni modul G_i .

$$G_i = \frac{1}{2} \frac{dp}{d\varepsilon_c} \quad \text{ili} \quad G_i = V \frac{dp}{dV}$$

gdje je (V) trenutni volumen bušotine ($V =$ početni volumen sonde + povećanje volumena zbog djelovanja tlaka dp). Jewell i Fahey [11] utvrdili su da G_i znatno varira uglav-

nom zbog utjecaja poremećenja dok je G_{ur} mnogo konzistentniji. Odnos modula iz ciklusa rasterećenja i ponovnog opterećenja govori o stupnju ispučanosti stijenske mase. Povećanje ovog odnosa ukazuje na jaču ispučanost stijene. Odnos G_{ur}/G_i može biti veći od 3 za srednje ispučanu stijenu i čak do 10 za jače ispučanu stijenu.

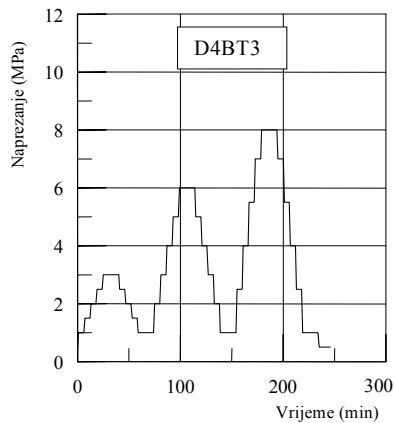
4 Primjeri iz prakse

Geotehnika d.d. iz Zagreba je u razdoblju od 1991. do 1994. obavila opsežna *in situ* ispitivanja stijenske mase na lokacijama triju velikih hidroenergetskih građevina u Iranu. Obavljeno je više od 100 dilatometarskih ispitivanja, 17 pokusa velikim tlačnim jastucima (ELFJ-*extra large flat jack*) i 28 pokusa pločom (PLT-*plate load test*) promjera 1 m. Ispitana je i posmična čvrstoća kontakta beton-stijena na 3 serije po 5 pokusa (70 x 70 cm). Primarna (prirodna) naprezanja u stijenskoj masi određena su uporabom "CSIR" troosne sonde (35 pokusa) i "doorstopper" metodom (5 pokusa). Uz istraživanja deformabilnosti stijenske mase u dovodnom tunelu HC Vinodol koje je profesor Nonveiller proveo 1949. (probna komora tlačena zrakom) bila su to najopsežnija *in situ* ispitivanja koje je jedna hrvatska tvrtka ikad obavila.



Slika 3. Lučna brana Karun 3, visine 205 m, na istoimenoj rijeci u Iranu

Na projektima Karun 1 i Godar-E-Landar HEPP ispitivanja su obavljena za potrebe projektiranja podzemnih strojnica, a na projektu Karun 3 za potrebe temeljenja najviše lučne brane u Iranu, visine 205 m (slika 3.). Ispitivanja su obavljena u istražnim galerijama i bušotinama. Stijenski masiv na lokaciji Karun 3 sadrži dva litološka člana: vapnence i lapore koji geološki pripadaju tzv. Asmari formaciji Zagros masiva. Vapnenci su bankoviti s vrlo izraženim plohama slojevitosti. Izražena je karstifikacija, tako da je pojava kaverna dimenzija od nekoliko cm do 1m vrlo česta (prevladavaju kaverne manjih dimenzija).



Slika 4. Vremenski tijek dilatometarskog pokusa D4BT3 (Karun 3)

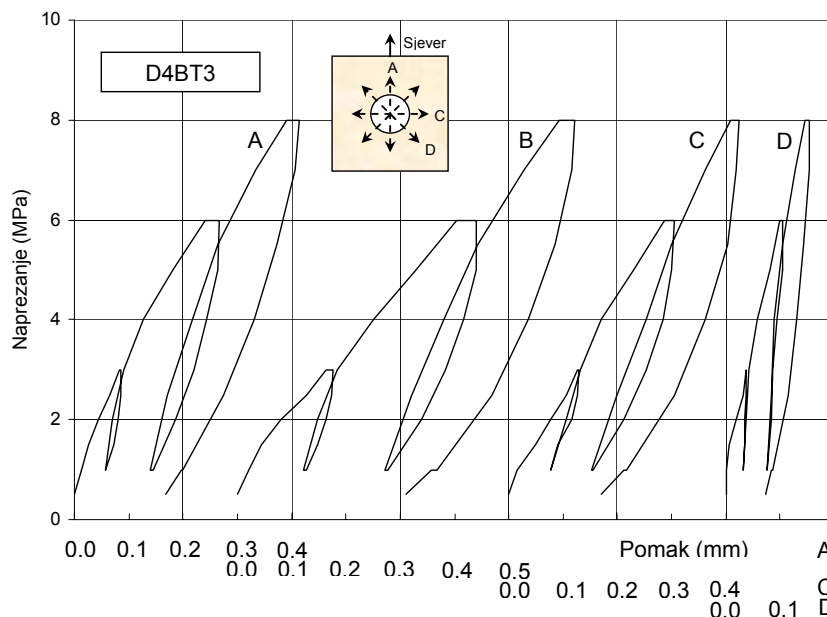
Dilatometarska ispitivanja obavljena su u vertikalnim i kosim bušotinama koje su bušene unutar istražnih galerija. Uporabljena je sonda njemačke tvrtke "Interfels", tip S/LNEC - IF sljedećih tehničkih karakteristika: duljina sonde: 1050 mm; najveći promjer sonde $D = 76$ mm; duljina opterećene zone $L = 470$ mm, mjerenja pomaka u 4 pravca s pomoću LVDT-a; najveći tlak $p_{max} = 200$ bar; najveća dubina ispitivanja 200 m; promjer gumene membrane: 70 mm; mjerni opseg uređaja za mjerenje pomaka ± 1 mm; rezolucija uređaja za mjerenje pomaka $\pm 1 \mu\text{m}$; točnost mjerenja pomaka $\pm 3\%$.

Programom ispitivanja bila su predviđena tri ciklusa opterećenja i rasterećenja, s tim da najveći tlak u trećem ciklusu bude 10 MPa. Napreznost je povećavano i smanjivano u inkrementima vodeći računa da se maksimum odnosno minimum ciklusa postigne u 4-6 inkrementa. Povećanje ili smanjenje tlaka jednog inkrementa obav-

ljalo se tijekom jedne minute (ručna hidraulična crpka), s tim da se dostignuto napreznost održavalo stalnim tijekom 5 minuta. Očitavanje pomaka izvršeno je nakon prve, treće i pete minute. Nakon pete minute opterećenje se mijenjalo bez obzira na prirast pomaka u prethodnom vremenskom intervalu. Kriterij za prestanak mjerenja na najvećem i najmanjem napreznosti svakog od ciklusa bio je sljedeći: tlak se održava stalnim najmanje 15 min s tim da se očitavanje pomaka obavlja u prvoj, drugoj, četvrtoj, osmoj i petnaestoj minuti od postizanja najvećega odnosno najmanjega napreznosti. Mjerenje se dalje obavljalo u vremenskim intervalima od 30, 60, 90, 180, ($t_i = 2t_{i-1}$) min, odnosno sve dok promjena svih mjerenih promjera nije bila u posljednjem vremenskom intervalu manja od 3 μm .

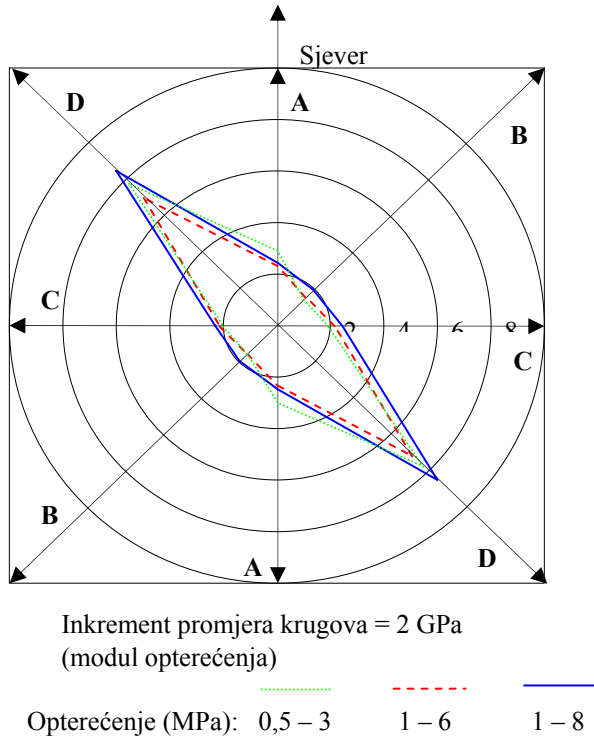
Rezultati ispitivanja obrađeni su u skladu s preporukama ISRM [1]. Moduli su izračunani uz pretpostavku da Poissonov omjer ima vrijednost $\nu = 0,3$. Rezultati ispitivanja prikazani su tablično i grafički. Kao primjer prikazuju se rezultati pokusa s oznakom D4BT3. Slika 4. prikazuje vremenski tijek ispitivanja, a slika 5. krivulje napreznost - deformacija za sve mjerne pravce. Anizotropija deformabilnosti izražena je indeksom anizotropije koji predstavlja omjer najvećega i najmanjega modula ($I_a = E_{max}/E_{min}$) koji su određeni pri istom opterećenju odnosno rasterećenju, ali u različitim pravcima (slika 6.). Provedena ispitivanja pokazuju visok stupanj anizotropije kod većine obavljenih pokusa.

Rezultati dilatometarskih ispitivanja iskorišteni su za određivanje broja i pozicije velikih *in situ* pokusa i za definiranje inženjersko-geološkog modela prema parametru deformabilnosti stijenske mase.



Slika 5. Krivulje napreznost - deformacija za četiri mjerna pravca (Karun 3)

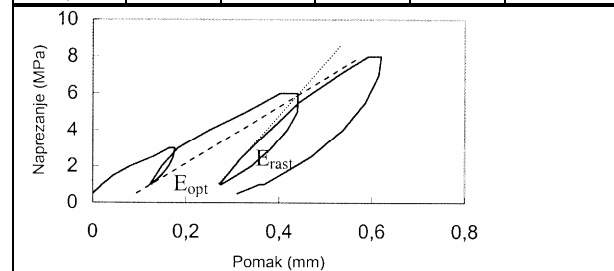
Moduli iz pokusa velikim tlačnim jastucima dobro opisuju deformabilnost stijenske mase i mogu se usvojiti kao proračunski moduli. Zato je izuzetno važno uspostavljanje korelacija mjerenih veličina iz ovih dvaju pokusa. Ovim se odnosima treba koristiti pri interpretaciji dilatometarskih ispitivanja u slučajevima kada su to jedina *in situ* ispitivanja.



Slika 6. Prikaz anizotropije deformabilnosti za pokus D4BT3 (Karun 3)

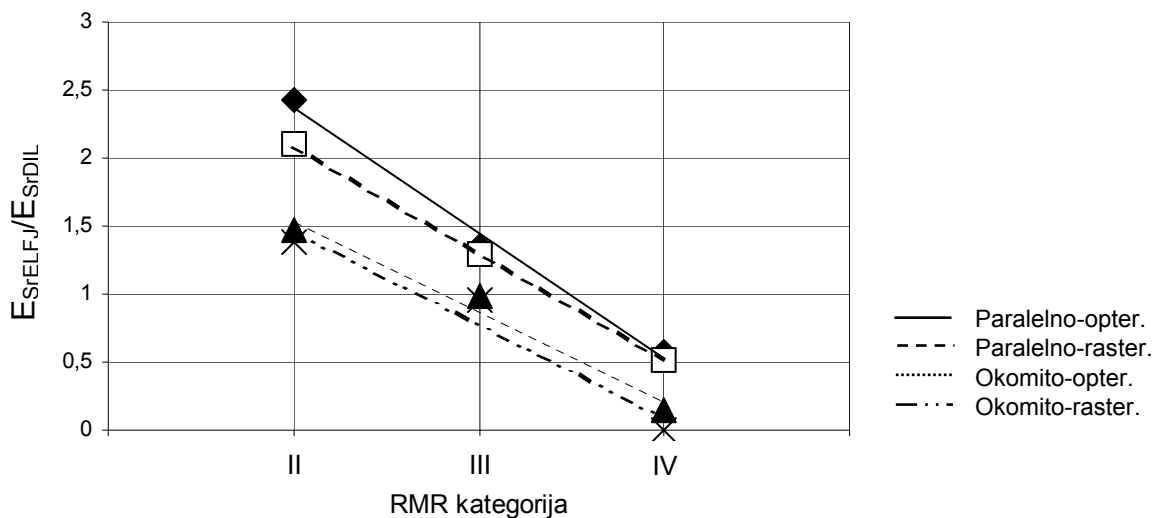
Tablica 3. Moduli deformabilnosti dilatometarskog pokusa D4BT3 (Karun 3)

DILATOMETARSKI POKUS					
Projekt: Karun 3					
Oznaka pokusa: D4BT3					
D = 75,7 mm		Dubina: 17,18 m		v = 0,3	
interval opterećenja (MPa)	smjer A (MPa)	smjer B (MPa)	smjer C (MPa)	smjer D (MPa)	geom. sred. AV (MPa)
MODULI OPTEREĆENJA					
0,5 – 3	2870	1420	1965	7791	2811
1 – 6	2318	1548	2154	6977	2710
1 – 8	2487	1980	2528	8684	3225
MODULI RASTEREĆENJA					
3 – 1	6970	3703	3660	24184	6914
6 – 1	3849	2910	3225	17473	5012
8 – 0,5	2945	2381	2902	8952	3674



Slika 7. jasno pokazuje kako omjermodula iz pokusa velikim tlačnim jastucima i dilatometarskog modula opada s opadanjem kvalitete stijenske mase. Pritom se razlikuju moduli koji definiraju deformabilnost u pravcu okomitom na ravninu slojeva od modula u pravcu paralelnom sa slojevima. Također su analizirani moduli opterećenja i rasterećenja.

Ako se dilatometarski modul upotrebljava za procjenu proračunskih modula deformabilnosti, treba voditi raču-



Slika 7. Omjer modula iz pokusa velikim tlačnim jastucima i dilatometarskog modula u funkciji kvalitete stijenske mase

Tablica 4. Odnos modula velikih in situ pokusa i dilatometarskog modula u vapnencima Asmari formacije (Karun 3)

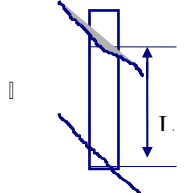
Statistički pokazatelji	Projekt: Karun 3											Kategorija RMR ⁷⁶ [15]
	Moduli deformabilnosti (GPa)								Dilatometarski modul (GPa)		Dinamički modul (GPa)	
	Paralelno sa slojevima				Okomito na slojeve							
	Opterećenje		Rasterećenje		Opterećenje		Rasterećenje		Opt.	Rast.		
	PLT	ELFJ	PLT	ELFJ	PLT	ELFJ	PLT	ELFJ				
Boyle	SRM	Boyle	SRM	Boyle	SRM	Boyle	SRM					
Srednja vrijednost E_{sr}	9,08	13,05	9,34	14,06	5,65	7,92	9,31	9,21	5,40	6,68	27,62	II
E_{sr}/E_{SrDII}	1,68	2,42	1,40	2,10	1,05	1,47	1,39	1,38				
Srednja vrijednost E_{sr}	5,29	5,66	7,49	6,51	9,46	4,14	1,72	4,86	4,19	5,03	9,89	III
E_{sr}/E_{SrDII}	1,26	1,35	1,49	1,29	2,26	0,99	2,53	0,96				
Srednja vrijednost E_{sr}	1,99	2,09	2,82	2,64	2,21	0,53	3,30	0,83	3,62	5,04	6,46	IV
E_{sr}/E_{SrDII}	0,55	0,58	0,56	0,52	0,61	0,15	0,65	0,16				

Napomene:
 PLT Boyle: Rezultati pokusa pločom interpretirani prema Boyleu [15]
 ELFJ: Extra Large Flat Jack

na o kvaliteti i anizotropiji stijenske mase. Provedena istraživanja pokazuju da u kvalitetnoj stijenskoj masi (II kategorija po RMR klasifikaciji) proračunski modul u ravnini paralelnoj sa slojevima može biti do 2,5 puta veći od dilatometarskog, a u pravcu okomitom na slojeve do 1,5 puta. S opadanjem kvalitete stijenske mase ovaj se omjer mijenja, pa u četvrtoj kategoriji RMR klasiifikacije proračunski modul pada na polovinu dilatometarskog modula i niže ako se govori o modulu u pravcu okomitom na izraženi sustav diskontinuiteta.

Dilatometarski se pokus pokazao pouzdanim u smislu ponovljivosti mjerenja. Najveći problem tijekom ispitivanja bilo je učestalo pucanje gumenih membrana. Dilatometri sličnog tipa obično su deklarirani za najveće naprezanje od 20 MPa. Stečeno iskustvo pokazuje da u stijenskoj masi koja se najčešće susreće u praksi nije moguće dostići deklarirano najveće naprezanje zbog pucanja membrane. Pažljivim odabirom lokacije izbjegnuto je pucanje membrane kod najvećih tlakova od 10 MPa. Pri većim naprezanjima dolazilo je do pucanja membrane i na najboljim lokacijama u bušotinama izbušenim u vapnencima. U konglomeratima (Godar-E-Landar) postignuto je najveće naprezanje od 15 MPa. Pucanje gumene membrane kadšto je bilo uzrokom oštećenja mjerila pomaka.

Tablica 5. Najveće naprezanje tijekom pokusa uvjetovano stupnjem ispučanosti stijenske mase

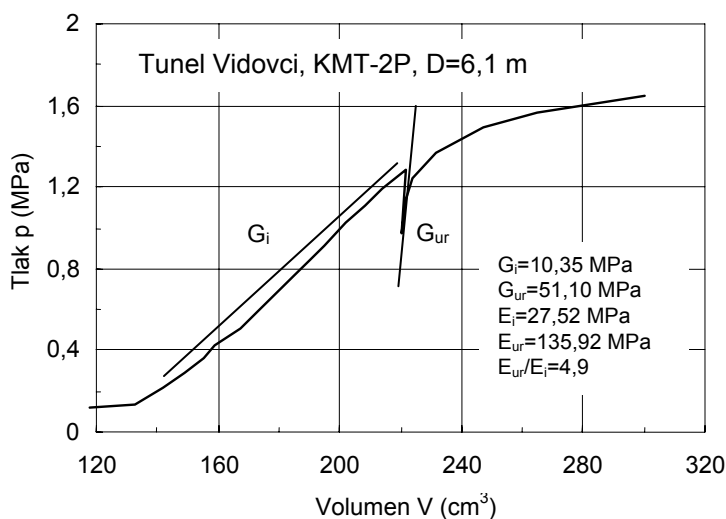
Najmanji tlak (MPa)	Najveći tlak po ciklusima (MPa)	Razmak diskontinuiteta
		
0,5	3-6-8	L(cm) > 60
0,5	2-4-6	20-60
0,5	2-3,5-5	6-20
0,5	1,5-3-3	< 6

Tijekom obavljanja ispitivanja uspostavljen je odnos između ispučanosti stijenske mase i najvećega tlaka pri kojem uglavnom nije dolazilo do pucanja membrane (tablica 5.). Ispučanost stijenske mase definirana je razmakom diskontinuiteta uzduž osi bušotine (prividni razmak). Pokusi nisu obavljani na mjestima pojavljivanja otvorenih diskontinuiteta čak ni u slučaju najmanjega zijeva.

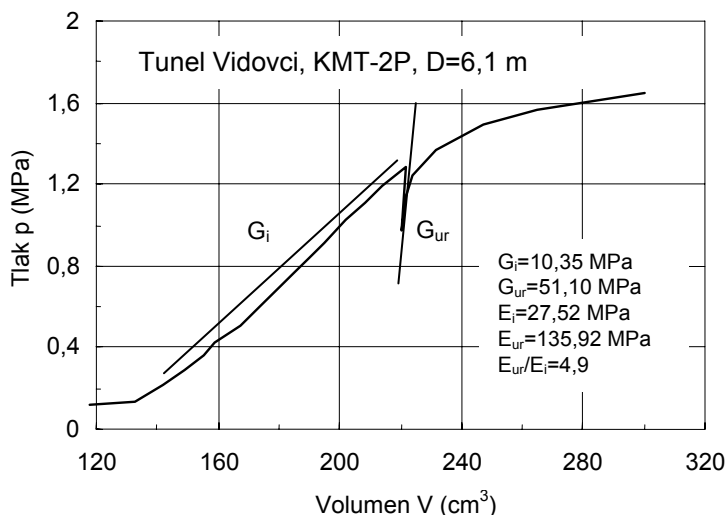
Uporabu dilatometra radi definiranja proračunskih parametara deformabilnosti ilustrirat ćemo se rezultatima ispitivanja na više lokacija u Hrvatskoj i Sloveniji. Kako se radi o mekanoj stijeni (tvrdom tlu) ili vrlo tektoniziranoj stijenskoj masi, nije bilo moguće dobiti kvalitetnu jezgru za laboratorijska ispitivanja pa su presiometarska ispitivanja jedini način za procjenu modula deformabilnosti. Na građevinama u Hrvatskoj uporabljen je Ménardov tip presiometra francuskog proizvođača Apageo-Se-gelm, a u Sloveniji presiometar OYO-elastomer-2.

Pri uporabi Ménardova presiometra iskorišten je postupak predviđen procedurom za uporabu ove sonde, s time da su pri svim ispitivanjima napravljeni jedan ili dva ciklusa rasterećenja i opterećenja kako bi se dobio odgovarajući modul. Već je objašnjena svrha rasterećenja i ponovnog opterećenja stijene tijekom ispitivanja. Tipičan rezultat ispitivanja prikazan je na slici 8.

U Sloveniji su geotehnički problemi posebno izraženi u permokarbonskim škriljancima. Radi se o izrazito tektoniziranoj stijenskoj masi koja se često ponaša kao tlo. U ovakvoj sredini nemoguće je napraviti bušotinu bez poremećenja stijenske mase. Često se bušotina zaruši samo nekoliko minuta ili sati nakon izvlačenja bušačeg pribora. Bušenje s isplakom izbjegava se zbog mogućeg popunjavanja diskontinuiteta bentonitom. Zbog nestabilnosti bušotine, usvojena je procedura da se na ispitnoj sekciji duljine tri metra, izvrše tri ispitivanja. Pritom se idući metar buši tek pošto je na prethodnom završeno ispitivanje. Tipičan rezultat ispitivanja prikazan je na slici 9.



Slika 8. Tipičan rezultat ispitivanja Ménardovim presiometrom s jednim ciklusom rasterećenja i ponovnog opterećenja (CL glina s proslojcima pijeska)



Slika 9. Tipičan rezultat ispitivanja s više ciklusa rasterećenja i ponovnog opterećenja (tektonizirani škriljavi glinjak, prahovnjak i tanki slojevi ispucalog pješčenjaka)

U tablici 6. prikazani su rezultati ispitivanja u tri bušotine na autocestama u Hrvatskoj i Sloveniji. Izračunane su vrijednosti presiometarskih modula te modula iz ciklusa rasterećenja i opterećenja. Presiometarski modul (Ménardov E-modul) izračunan je prema standardnoj proceduri koristeći se programom proizvođača opreme [16]. Moduli rasterećenja i ponovnog opterećenja izračunani su prema opisanoj proceduri.

U sva tri slučaja primijećeno je opadanje omjera modula rasterećenja i ponovnog opterećenja prema početnom modulu s dubinom ispitivanja. To se može pripisati ili zatvaranju diskontinuiteta (ako postoje) ili povećanju krutosti materijala s dubinom.

Kada se presiometri rabe za određivanje proračunskih parametara deformabilnosti, ispitivanje svakako treba obaviti s najmanje jednim ciklusom rasterećenja i ponovnog opterećenja. Iskustvo pokazuje da su moduli iz rasterećenja i ponovnog opterećenja puno bliže proračunskim modulima od modula dobivenih stalnim porastom opterećenja.

5 Zaključak

Pokus dilatometrom je jedini *in situ* pokus koji se uspješno primjenjuje na vrlo zahtjevnim geotehničkim građevinama (lučne betonske brane, velike podzemne prostorije, duboke podzemne građevine i slično), ali isto tako i na manje zahtjevnim (temeljenje, potporni zidovi, plitki tuneli i slično). U prvome se slučaju deformabilnost stijenske mase određuje velikim *in situ* pokusima, a dilatometar se rabi za određivanje područja sličnih mahaničkih svojstava. Koreliranjem dilatometarskog modula i modula iz velikih *in situ* pokusa može se u kasnijoj fazi istraživanja provjeriti deformabilnost nekih zona u kojima nisu rađena velika *in situ* ispitivanja. Kod manje zahtjevnih građevina dilatometar je često jedini način za procjenu proračunskih parametara deformabilnosti.

Na projektu Karun 3 u Iranu (betonska lučna brana visine 205 m), dilatometar je uporabljen uz velike *in situ* pokuse (veliki tlačni jastuci i kruta ploča promjera 1m) pri ispitivanju vapnenca i lapora Asmari formacije. Utvrđeni su odnosi dilatometarskih modula iz velikih *in situ* pokusa za tri kategorije RMR klasifikacije. U kvalitetnoj stijenskoj masi (II. kategorija po RMR klasifikaciji) proračunski modul u ravni paralelnoj sa slojevima bio je do 2,5 puta veći od dilatometarskog a u pravcu okomitom na slojeve do 1,5 puta. S opadanjem kvalitete stijenske mase ovaj se omjer mijenja, pa u četvrtoj kategoriji RMR klaisifikacije, proračunski modul pada na polovinu dilatometarskog modula i niže, ako se govori o modulu u pravcu okomitom na izraženi sustav diskontinuiteta.

Iskustva pokazuju da se u najvećem broju slučajeva ne može iskoristiti najveći tlak dilatometra zbog pucanja membrane. U vapnencima Asmari formacije najviši dostignuti tlak bio je 10 MPa. Uspostavljena je korelacija prividnog razmaka diskontinuiteta i najvećega tlaka pri kojem membrana nije pucala.

Kod manje zahtjevnih geotehničkih građevina u čvrstoj stijenskoj masi deformabilnost stijenske mase ne utječe znatno na projektno rješenje pa se obično ne obavljaju terenska ispitivanja. U ovim slučajevima empirijske

Tablica 6. Rezultati presiometarskih ispitivanja na nekoliko lokacija u tvrdim tlima i mekanim stijenama

Objekt:	Oznaka bušotine	Redni broj	Dubina ispitivanja (m)	Litološki opis ispitne zone	Razina podzemne vode (m)	Tlak tečenja P_e^* (MPa)	Granični tlak P_l^* (MPa)	Ménard-ov E-modul E_m (MPa)	Engleski pristup ($E=2G(1+\nu)$, $\nu=0,33$)		Odnos E_{ur}/E_i	Odnos E_{ur}/E_m
									Modul elast. E_i (MPa)	Modul elast. E_{ur} (MPa)		
AC: Zagreb-Macej, Tunel Sv. Tri Kralja	KMT-8P (Ménard-ov presiometar)	1.	24,6	Pijesak	19,4	> 3,9	> 6,6	70,5	62,3	232,9	3,7	3,3
		2.	31,0	Pijesak do prah		> 4,1	> 7,0	149,8	215,5	426,4	2,0	2,8
		3.	35,0	Pijesak s proslojcima praha		> 4,0	> 6,8	119,2	95,8	243,1	2,5	2,0
		4.	39,0			> 3,5	> 5,9	174,7	89,6	190,1	2,1	1,1
		5.	41,5	Pješčenjak - pijesak		> 3,8	> 6,4	149,7	92,7	275,8	3,0	1,8
		6.	45,2	Prah (siltit) s prosloj.pijeska		> 1,8	> 3,0	112,6	100,7	416,4	4,1	3,7
		7.	49,5			> 2,1	> 3,6	19,0	45,8	98,4	2,1	5,2
		8.	52,5	Prah do sitnozrni pijesak		> 3,8	> 6,5	295,6	194,3	274,1	1,4	0,9
		9.	55,5			> 4,7	> 8,1	475,3	246,3	312,5	1,3	0,7
		10.	60,5			> 4,8	> 8,1	479,3	304,8	319,9	1,0	0,7
				11.		68,0	Prah - pješčenjak (prelaz)		> 3,9	> 6,6	210,9	108,6
AC: Zagreb-Macej, Tunel Vidovci	KMT-2P (Ménard-ov presiometar)	1.	6,1	CL glina pjeskovita	13,75	> 1,3	> 2,3	25,1	27,5	135,9	4,9	5,4
		2.	10,2	ML prah srednje gnječiv		> 2,0	> 3,4	33,3	35,5	151,3	4,3	4,5
		3.	15,0	ML prah pjeskovit		> 3,2	> 5,4	31,2	39,8	223,9	5,6	7,2
		4.	17,0	CL glina pjeskovita lako gnječ.		> 3,3	> 5,7	120,0	109,3	327,7	3,0	2,7
		5.	21,3	ML prah vrlo čvrst		> 3,9	> 6,7	179,1	115,1	316,1	2,7	1,8
		6.	24,1	Prah zaglinjen		> 3,9	> 6,6	203,4	160,7	322,0	2,0	1,6
		7.	27,1	ML prah vrlo čvrst		> 3,9	> 6,7	154,5	33,6	242,2	7,2	1,6
		8.	30,0	ML prah vrlo čvrst		> 3,9	> 6,7	333,4	267,1			
		9.	33,0	ML prah pjeskovit vrlo čvrst		> 3,8	> 6,5	71,3	72,2	185,1	2,6	2,6
		10.	36,2	ML prah pjeskovit vrlo čvrst		> 3,8	> 6,5	379,6	310,3			
		11.	39,2	Glina laporovita		> 3,8	> 6,4	497,0	177,8	262,0	1,5	0,5
		12.	43,0	Pijesak sitnozrn prašinst		> 3,8	> 6,4	122,2	164,5	283,5	1,7	2,3
		13.	46,5	Pijesak sitnozrn prašinst					156,5	255,4	1,6	
		14.	49,5	Pijesak sitnozrn prašinst		> 3,9	> 6,6	141,3	136,4			
AC: Vransko Blagovica, OZ 08	OZ-8-G1 (OYO-elastomer-2)	1.	7,8	Tektonizirani škriljavi glinjak i prahovnjak	Bez vode	1,4	> 1,8		6	115	19,6	
		2.	8,7			2,4	> 2,5		6	118	19,6	
		3.	10,7			2,7	> 2,9		7	138	19,7	
		4.	16	Tektonizirani škriljavi glinjak, prahovnjak i tanki slojevi ispucalog pješčenjaka		4	> 4,5		114	410	3,6	
		5.	17	Tektonizirani škriljavi glinjak i prahovnjak		2,8	> 5,1		215	335	1,5	
		6.	18			2,0	> 3,2		47	150	3,2	
		7.	22,5	Ispucali pješčenjak, glineni škriljavac i prahovnjak		4,2	> 9,2		1086	2066	1,9	
		8.	23,2			9,4	> 10		483	3301	6,8	
		9.	24,5			5	> 7,1		246	1020	4,2	

metode temeljene na klasifikaciji stijenske mase u potpunosti zadovoljavaju. Međutim, u mekanim stijenama (koje su često tektonizirane) i tlima, deformabilnost znatno utječe na projektno rješenje. Kako se iz ovakve stijene obično ne može dobiti kvalitetan uzorak za laboratorijs-

ska ispitivanja, dilatometar ostaje kao jedino prihvatljivo rješenje. U ovim slučajevima treba se koristiti presiometrima manjeg tlaka (do 20 MPa) jer se veća naprezanja ne mogu niti postići zbog ograničene čvrstoće stijene ili zbog pucanja membrane u tektoniziranoj stijeni.

Da bi se iz dilatometarskog pokusa dobio proračunski modul, ispitivanje treba izvesti s jednim ili više ciklusa rasterećenja i ponovnog opterećenja. Moduli iz ovih ciklusa puno su bliži modulima deformabilnosti stijenske

mase od modula iz kontinuiranog povećanja naprezanja. Kao što obavljena ispitivanja pokazuju, modul iz ciklusa rasterećenja i ponovnog opterećenja može biti i dvadeset puta veći od modula početnog opterećenja.

Zahvala

Autori zahvaljuju kolegama G. Krstiću, D. Domoviću, S. Duspariću, T. Kalausu, J. Vukobratu na trudu koji su uložili tijekom ispitivanja u Iranu. Zahvaljuju i Geotehnici-Zagreb koja je omogućila ova istraživanja te stručnjacima Interfelsa GmbH na korisnim sugestijama i pomoći tijekom izvođenja ovih pokusa. Zahvalni smo i DARS-u (Družba za avtoceste Republike Slovenije) za dopuštenje da se podaci upotrijebe u istraživačke svrhe te DDC-u za suradnju i konzultacije.

LITERATURA

- [1] ISRM: *Suggested Methods for Deformability Determination Using a Flexible Dilatometer*, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol. 24 (1987) No.2, 123-134.
- [2] Panek, L. A.; Hornsey, E. E.; Lappi, R. L.: *Determination of the modulus of rigidity of rock by expanding a cylindrical pressure cell in drillhole*, Proc. 6th Symp. On Rock Mechanics, Rolla, Missouri (1964), 427-449.
- [3] Rocha, M.; Silveira, A.; Grossmann, N.; Oliveira, E.: *Determination of the deformability of rock masses along boreholes*, Proc. of 1st Congress of the Int. Society for Rock Mechanics, Lisbon, Vol. 1 (1966), 697-704.
- [4] Rocha, M.: *Present Possibilities of Studying Foundations of Concrete Dams*, Proc. of the 3rd Congress of the ISRM, Denver, Vol. 1A (1974), 879-897.
- [5] Charrua-Graca, J. G.: *Dilatometer tests in the study of the deformability of rock masses*, Proc. of 4th Int. Congress on Rock mechanics, Montreux, Vol.2 (1979), 73-76.
- [6] Charrua-Graca, J. G.: *Estudo da deformabilidade dos macicos rochosos com dilatometro*, Thesis, LNEC, Lisbon, 1974.
- [7] Panek, L. A.: *Effect of rock fracturing on the modulus, as determined by borehole dilation tests*, Proc. of 2nd Congress of the Int. Society for Rock Mechanics, Belgrade, Vol. 1 (1970), 2-16.
- [8] Stephanson, O.: *Rock stress Measurements by Sleeve Fracturing*, Proc. of the 5th Int. Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Vol. F. (1983), 129-137.
- [9] Ladanyi, B.; Gill, D. E.: *In situ determination of creep properties of rock salt*, Proc. of 5th Int. Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Section A (1983), A219-A225.
- [10] Mair, R. J.; Wood, D. M.: *Pressuremeter testing, methods and interpretation*, CIRIA, Butterworths, 160 p., 1987.
- [11] Robertson, P. K.: *In situ testing and its application to foundation engineering*, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 23 (1986) No.4, 573-594.
- [12] Baguelin, F.; Jezequel, J.F.; Shields, D.H.: *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, Trans Tech Publications, p. 617, 1978.
- [13] Mair, R. J.: *General report*, The third international symposium on pressuremeters, Oxford, April 1990.
- [14] Holden, J. M. W.: *Pressuremeter and Cone penetration Testing*, A report of the British Geotechnical Society meeting, November +, 1987.
- [15] Boyle, W. J.: *Interpretation of plate load test data*, Int. Jour. of Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr. Vol. 29, No.2, pp. 133-142, 1992.
- [16] NF P 94-110: *Essai pressiométrique Ménard-AFNOR*, juillet 1991.