

Prilog analizi primjene dilatometrom Marchetti

Mensur Mulabdić, Alan Brunčić

Ključne riječi

dilatometar Marchetti,
porni tlak,
ispitivanje,
interpretacija,
parametri tla,
geotehnički zahvat

Key words

Marchetti dilatometer,
pore pressure,
testing,
interpretation,
soil parameters,
geotechnical project

Mots clés

dilatomètre Marchetti,
pression interstitielle,
essai, interprétation,
paramètres du sol,
opération géotechnique

Schlüsselworte:

Marchetti-Dilatometer,
Porenwasserdruck,
Untersuchung,
Interpretierung,
Bodenparameter,
bodentechnischer
Eingriff

M. Mulabdić, A. Brunčić

Izvorni znanstveni rad

Prilog analizi primjene dilatometra Marchetti

U radu se opisuje princip ispitivanja dilatometrom Marchetti i interpretacije nekih parametara tla na temelju rezultata pokusa. Ispituje se utjecaj pogrešne prognoze pornog tlaka in situ u_0 (NPV) na vrijednost interpretiranih parametara tla: tipa tla, nedrenirane čvrstoće i modula stišljivosti. Ustanovljeno je da je pogreška u interpretaciji navedenih parametara zbog krive procjene u_0 zanemariva za preliminarne geotehničke analize. Istaknuta je opravdanost uporabe ovoga pokusa.

M. Mulabdić, A. Brunčić

Original scientific paper

Contribution to the analysis of Marchetti dilatometer application

The principle of Marchetti dilatometer testing procedure is presented and some soil parameters are interpreted on the basis of test results. Authors analyze the effect of faulty estimate of the in situ pore pressure u_0 (NPV) on interpretation of soil parameters: type of soil, undrained strength and compressibility modulus. It was established that the error in interpretation of the above parameters, as resulting from erroneous u_0 estimate, is negligible at the stage of preliminary geotechnical analyses. It is stressed that the use of this test is therefore justified.

M. Mulabdić, A. Brunčić

Ouvrage scientifique original

Une contribution à l'analyse de l'utilisation du dilatomètre Marchetti

L'article décrit le principe des essais au dilatomètre Marchetti et les interprétations de certains paramètres du sol sur la base des résultats des essais. On étudie l'effet d'un pronostic erroné de la pression interstitielle in situ u_0 (NPV) sur la valeur des paramètres interprétés du sol : type de sol, de cohésion remaniée et de module de compressibilité. Il a été établi qu'une interprétation erronée de ces paramètres due à une mauvaise évaluation de u_0 était négligeable pour les analyses géotechniques préliminaires. On souligne la pertinence de l'utilisation de cet essai.

M. Mulabdić, A. Brunčić

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Beitrag zur Analyse der Anwendung des Marchetti-Dilatometers

Im Artikel wird das Prinzip der Untersuchung mit dem Marchetti-Dilatometer und die Interpretierung einiger Bodenparameter auf Grund der Experimentergebnisse beschrieben. Untersucht ist der Einfluss falscher Porenwasserdruckprognose in situ u_0 (NPV) auf Werte der interpretierten Bodenparameter: Bodentyp, undrenierte Festigkeit und Zusammendrückbarkeitsmodul. Es wurde festgestellt dass der Fehler in der Interpretierung der genannten Parameter wegen der falschen Abschätzung des u_0 für präliminäre bodentechnische Analysen unterlässbar ist. Hervorgehoben ist die Berechtigung der Benützung dieses Experiments.

Autori: Doc. dr. sc. **Mensur Mulabdić**, dipl. ing. građ., Građevinski fakultet, Sveučilište J. J. Strossmayera, Osijek; **Alan Brunčić**, dipl. ing. građ., Institut Građevinarstva Hrvatske d.d., Janka Rakuše 1, Zagreb

1 Uvod

In situ pokusi sve češće zauzimaju zaslužno istaknuto mjesto u programima geotehničkih istražnih radova, prvenstveno zahvaljujući uznapredovaloj tehnici ispitivanja i interpretaciji koji omogućuju brzo i razumno jeftino opisivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava tla.

Sljedeći citat oslikava stav mnogih stručnjaka o geotehničkim istražnim radovima:

”Uvjeren sam da većina geotehničkih istražnih radova može i treba biti obavljena in situ”

(Prof. J.H. Schmertmann, SAD, izvadak iz izlaganja s međunarodnog simpozija CPT'95, Linkoping, Švedska, 1995.)

Većina *in situ* pokusa, pa i ovoga, interpretira se postupcima koji su empirijskog ili poluempirijskog karaktera, pa se i njihova uporaba u projektiranju geotehničkih zahvata mora obavljati uz prihvaćanje lokalnih uvjeta u tlu pri korištenju preporučenim postupcima interpretacije.

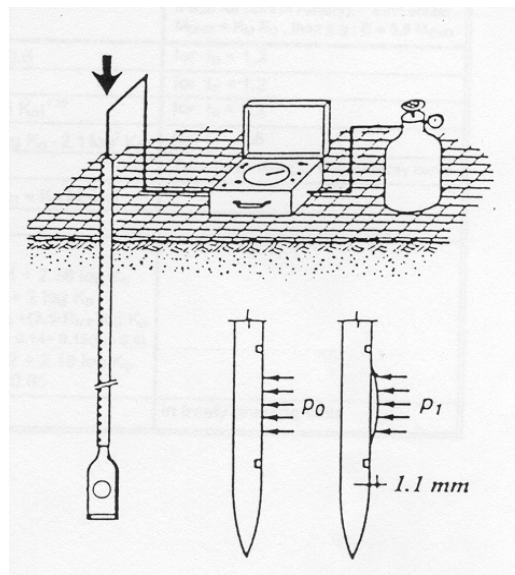
O mogućnosti ovog pokusa u interpretaciji geotehničkih parametara i usporedbi tih mogućnosti s mogućnostima drugih pokusa pisali su mnogi autori [1, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11 i 12].

Ovaj rad prvenstveno analizira moguće pogreške u interpretaciji geotehničkih parametara tla zbog loše procjene nivoa podzemne vode (pornih tlakova *in situ*), dok se za postupak ispitivanja i općenitu uspješnost u prognozi geotehničkih parametara tla daju osnovni komentari. Dakle, analizira se osjetljivost postupka interpretacije, prema općeprihvaćenim principima, a ne konačna točnost prognoze vrijednosti parametara, što bi se moglo obaviti na bogatoj bazi podataka, a što nije predmet ovog članka. Projektant koji analizira i projektira geotehnički zahvat na temelju rezultata pokusa dilatometrom može doći u nedoumicu i/ili posumnjati u uporabivost podataka ispitivanja ako podatak o nivou podzemne vode nije pouzdan, a taj se primjenjuje u interpretaciji geotehničkih parametara tla. Analizama izloženim u idućim poglavljima pokazuje se da inženjerske procjene i zaključci ne ovise bitno o tom podatku, odnosno da se mogu predvidjeti odstupanja u procjeni geotehničkih parametara tla izazvana pogreškama u procjeni nivoa podzemne vode.

Dilatometar Marchetti (DMT) pripada suvremenoj generaciji instrumenata za ispitivanje tla *in situ*. Pojavio se početkom devedesetih i omogućio jednostavno i brzo ispitivanje tla kojim se može odrediti tip tla (glina, prah, pijesak), nedrenirana čvrstoća, modul vertikalne deformacije, te okarakterizirati prekonsolidacija tla.

On je jedan od rijetkih instrumenata koji nudi modul za proračun slijeganja, pa je uz dobru osjetljivost na horizontalne napone dobar izbor u problemima progno-

ze slijeganja i ocjene poboljšanja tla. To su dvije osnovne prednosti ovog pokusa u odnosu na, primjerice pokus statičke penetracije (CPT), koji ima neke druge prednosti. Pokus je u mnogim zemljama prihvaćen i obuhvaćen normama (npr. CEN, ASTM).



Slika 1. Prikaz pokusa dilatometrom na odabranoj dubini

U osnovi pokus dilatometrom sastoji se od vertikalnog utiskivanja sonde (u obliku lopatice) s površine terena u tlo. Utiskivanje se može izvesti bilo kojim postupkom, bez obzira na brzinu ili način utiskivanja: udarno, konstantnom ili promjenjivom brzinom, uz pomoć bilo koje bušaće garniture, dakle one kojom ekipa na terenu raspolaže. Sonda je spojena s pomoću elektro-pneumatskog kabela, koji prolazi kroz šipke za utiskivanje ili je izvana pričvršćen na njih, s kontrolnom jedinicom na površini. Koristeći se kontrolnom jedinicom s regulatorom tlaka i audio signalom operater bilježi tlak p_0 - tlak potreban da se membrana (promjera 60 mm) nađe u ravnotežnom položaju (očitanje A) i tlak p_1 - tlak potreban da se membrana u svojem središtu izbaci za 1.1 mm (očitanje B) horizontalno prema tlu. Utiskivanje lopatice obavlja se u inkrementima dubine, uobičajeno na svakih 20cm. Geotehnički parametri tla ne mjere se direktno nego se interpretiraju. Interpretacija rezultata dilatometarskih ispitivanja zahtijeva poznavanje mjerenih tlakova p_0 i p_1 , *in situ* pornog tlaka u_0 (iz mjerenja nivoa podzemne vode) i vertikalnih efektivnih napona σ'_{v0} (iz poznate gustoće tla).

Program za interpretaciju mjerenja [9] sam pridružuje gustoće tla procijenjenom tipu tla (preko ugrađenog iskustveno formiranog dijagrama gustoće i tipa tla). Pokus se ne izvodi nužno iz bušotine, pa se često ne zna točan podatak o nivou podzemne vode. Pokazat će se da taj podatak nije nužan za uspješnu interpretaciju geotehničkih parametara.

Tablica 1. Prikaz osnovnih veličina koje se primjenjuju pri interpretaciji pokusa dilatometrom

Simbol	Opis	Formula	Napomena
p_0	Korigirano prvo čitanje	$p_0 = 1.05 (A - Z_M + \Delta A) - 0.05 (B - Z_M - \Delta B)$	Z_M = nulto čitanje, $\Delta A, \Delta B$ = kalibracijske konst.
p_1	Korigirano drugo čitanje	$p_1 = B - Z_M - \Delta B$	A, B = prvo i drugo očitavanje pri pokusu
I_D	Indeks materijala	$I_D = (p_1 - p_0) / (p_0 - u_0)$	u_0 = in situ porni tlak
K_D	Indeks horizontalnog napona	$K_D = (p_0 - u_0) / \sigma'_{v0}$	σ'_{v0} = in situ vert. efekt. napon
E_D	Dilatometarski modul	$E_D = 34.7 (p_1 - p_0)$	E_D nije Young-ov modul E. E_D se koristi kombinirano sa K_D (povijest napona). $M_{DMT} = R_M E_D, E \approx 0.8 M_{DMT}$

U tablici 1. navedeni su izrazi za osnovne veličine za interpretaciju mjerenja. One imaju sljedeće značenje: *Indeks materijala* (I_D) općenito prikazuje klasifikaciju tipa tla po dubini. Potrebno je imati na umu da je I_D predstavlja neki "indeks krutosti". Vrlo je osjetljiv parametar,

2 Interpretacija geotekničkih parametara tla

Dva najznačajnija interpretirana parametra su modul stišljivosti i nedrenirana čvrstoća. Prognoza OCR nije dovoljno iskustveno potvrđena pa se u ovom radu neće razmatrati. U tablici 2. dani su osnovni izrazi za inter-

Tablica 2. Prikaz izraza koji se koriste pri interpretaciji pokusa dilatometrom [9]

Simbol	Opis	Formula	Napomena
M_{DMT}	Modul vertikalne stišljivosti	$M_{DMT} = R_M E_D$ $I_D < 0.6, R_M = 0.14 + 2.36 \log K_D$ $0.6 < I_D < 1.8, R_M = 0.23 + 2.27 \log K_D$ $I_D > 1.8, R_M = 0.5 + 2.00 \log K_D$	glina prah pijesak
c_u	Nedrenirana čvrstoća	$c_{u,DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25}$	za $I_D < 1.2$ (prašinski, prašinsto glinoviti i glinoviti materijali)
OCR	Koeficijent prekonsolidacije	$OCR_{DMT} = (0.5 K_D)^{1.56}$	za $I_D < 1.2$ (prašinski, prašinsto glinoviti i glinoviti materijali)

pretaciju geotekničkih parametara, koji će kasnije biti analizirani na utjecaj *in situ* pornih tlakova u_0 .

tar, koji posebice u homogenim formacijama vrlo dobro identificira tip tla u tri kategorije prema tipu ili ponašanju tla: glina, prah, pijesak.

Indeks horizontalnog napona (K_D) ima profil po obliku vrlo sličan profilu OCR-a (koeficijenta prekonsolidacije) i općenito govoreći služi za bolje razumijevanje povijesti naprezanja. Valja uočiti da vrijednost $K_D = 2$ odgovara granici između normalno konsolidiranih (NC) i prekonsolidiranih (OC) glina ($OCR = 1$).

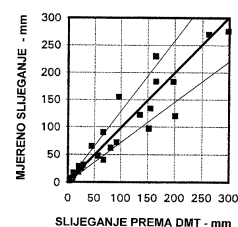
S pomoću parametra K_D moguće je uočiti tzv. koru u glinovitim materijalima, u kojoj je ovaj parametar zastupljen s vrlo visokim vrijednostima. Novija istraživanja pokazuju da K_D može locirati zonu u kojoj se odvija klizanje i ona se prepoznaje naglim padom vrijednosti parametra K_D .

Dilatometarski modul (E_D) računa se uz pomoć p_0 i p_1 po teoriji elastičnosti. E_D se ne rabi kao zasebna veličina, nego u kombinaciji s veličinama K_D i I_D . Potrebno je napomenuti da E_D nije Youngov modul elastičnosti E , nego dilatometarski modul.

pretaciju geotekničkih parametara, koji će kasnije biti analizirani na utjecaj *in situ* pornih tlakova u_0 .

Modul vertikalne stišljivosti (M_{DMT}) jest tangenti modul i odgovara modulu pri geološkom stanju naprezanja (σ'_{v0}) i ima isti karakter kao edometarski modul M_{OED} ($= 1/m_v$). Simbol M_{DMT} rabi se radi upozorenja da je modul M dobiven ispitivanjem dilatometrom (DMT). Vrijedi relacija $M_{DMT} = R_M E_D, R_M = f(I_D, K_D)$.

Razna ispitivanja pokazuju [6, 13] (slika 2.) da su slije-ganja izračunana uz modul vertikalne deformacije određena dilatometrom vrlo blizu mjenjenim slije-ganjima (prosječno unutar 30%) što često nije moguće postići ni uporabom edometarskog modula dobivenog uobičajenim ispitivanjem u laboratoriju. Treba naglasiti da se dilatometrom može dobiti izuzetno dobra slika o relativnoj stišljivosti tla po dubini.



Slika 2. Usporedba mjerenih i prognoziranih slije-ganja [13]

Dilatometarski modul E_D nije ovisan o pornom tlaku *in situ*, odnosno nivou podzemne vode, što se može vidjeti u jednadžbi:

$$E_D = E/(1-\nu^2) = 34.7 (p_1 - p_0) \quad (1)$$

jer se mogući utjecaj (uz pretpostavku da je u_0 stalan pri ispitivanju) gubi preko razlike tlakova p_1 i p_0 .

M_{DMT} je u relaciji sa E_D preko faktora korekcije R_M , i taj odnos prikazuje se izrazom:

$$M_{DMT} = R_M \cdot E_D \quad (2)$$

Faktor korekcije R_M (najčešće varira između 1 i 3) ovisan je o krutosti tla i povijesti naprezanja:

$$R_M = f(I_{DMT}, K_{DMT}) \quad (3)$$

I_{DMT} -indeks materijala,

$$I_{DMT} = (p_1 - p_0)/(p_0 - u_0)$$

K_{DMT} - indeks horizontalnog napona,

$$K_{DMT} = (p_0 - u_0)/\sigma'_{v0}$$

Kako se vidi iz navedenih odnosa jedino se preko faktora korekcije $R_M = f(I_{DMT}, K_{DMT})$ uzima u obzir utjecaj nivoa podzemne vode odnosno pornog tlaka (u_0), tj.

$$I_{DMT} = f(p_1, p_0, u_0) \text{ i}$$

$$K_{DMT} = f(p_0, u_0, \sigma'_{v0}).$$

Standard CEN N 165 "Flat dilatometer test-DMT", stupeni 1995., propisuje sljedeće odnose:

GLINA: (za $I_{DMT} < 0,6$)

$$R_M = 0,14 + 2,36 \log(p_0/\sigma'_{v0} - u_0/\sigma'_{v0}), \quad (4)$$

PRAH: (za $0,6 < I_{DMT} < 1,8$)

$$R_M = 0,23 + 2,27 \log(p_0/\sigma'_{v0} - u_0/\sigma'_{v0}), \quad (5)$$

PIJESAK: (za $I_{DMT} > 1,8$)

$$R_M = 0,50 + 2,00 \log(p_0/\sigma'_{v0} - u_0/\sigma'_{v0}), \quad (6)$$

$$K_{DMT} = (p_0/\sigma'_{v0} - u_0/\sigma'_{v0}) \quad (7)$$

Nedrenirana čvrstoća (c_u) jest u direktnoj vezi s osnovnim veličinama - vertikalnim efektivnim naponom i indeksom horizontalnog napona (odnosno koeficijentom prekonsolidacije): $c_{uDMT} = f(\sigma'_{v0}, K_D)$. Vrijednost nedrenirane čvrstoće c_u prognozirana s pomoću dilatometra uglavnom je na strani sigurnosti [5]. Bolje prognoze postižu se u mekim nego u tvrdim tlima [5, 11, 13]. Poželjno je kod značajnih projekata i osjetljivih objekata lokalno kalibrirati vrijednost čvrstoće određene dilatometrom s drugim vrijednostima (krilna sonda, triaksijalno smicanje). Izraz koji se navodi u nastavku teksta za interpretaciju nedrenirane čvrstoće (definirao ga je [1] rabi se u manje-više nebitno izmijenjenom obliku u većini zemalja. Nedrenirana čvrstoća može se razlikovati od one određene drugim pokusima [12], no to nije tipično samo za ovaj pokus. Svakako da treba biti oprezan u izboru osnovnih podataka s kojima se ispitivanje

dilatometrom uspoređuje, jer npr. krilna sonda u tvrdim tlima ne mora dati pravi iznos nedrenirane čvrstoće [4, 5, 12]. DMT u prosjeku (uzevši u obzir sve materijale) daje dobru ocjenu nedrenirane čvrstoće koja se traži za neko projektno rješenje. Relativni odnosi čvrstoće po dubini profila tla omogućuju dobar uvid u kritične dubine unutar profila tla.

Nedrenirana čvrstoća c_u direktno ovisi o vertikalnom efektivnom naponu σ'_{v0} i indeksu horizontalnog napona K_D što se može vidjeti iz izraza:

$$c_u = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25} \quad (8)$$

Budući da parametar K_D ovisi o pornom tlaku *in situ* kako to definira naredni izraz

$$K_D = (p_0 - u_0)/\sigma'_{v0}, \text{ odnosno}$$

$$K_D = p_0/\sigma'_{v0} - u_0/\sigma'_{v0} \quad (9)$$

može se iz (8) i (9) dobiti sljedeći izraz za nedreniranu čvrstoću koji oslikava utjecaj *in situ* pornog tlaka na interpretiranu vrijednost nedrenirane čvrstoće:

$$c_u/\sigma'_{v0} = 0.0925 (p_0/\sigma'_{v0} - u_0/\sigma'_{v0})^{1.25} \quad (10)$$

Koeficijent prekonsolidacije (OCR): uočena je sličnost između K_D profila i OCR profila u tlu. Vrijedi $OCR_{DMT} = f(K_D)$, vidi izraz u tablici 2. (za $K_D = 2$, $OCR = 1$). Utjecaj *in situ* pornog tlaka na OCR prenosi se preko K_D , slično utjecaju na nedreniranu čvrstoću.

Indeks materijala I_D , kao jedan od osnovnih parametara u interpretaciji ispitivanja dilatometrom, ima direktnu ovisnost o pornom tlaku *in situ* što se može vidjeti preko osnovnog izraza

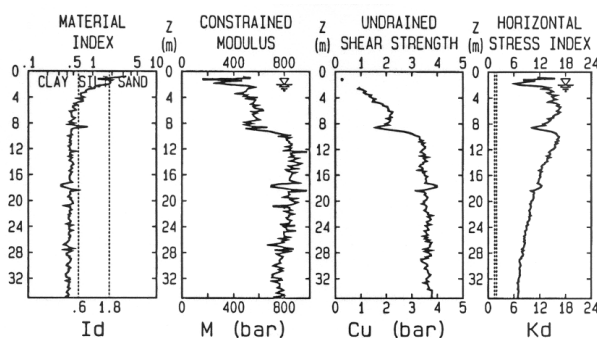
$$I_D = (p_1 - p_0)/(p_0 - u_0) \quad (11)$$

koji se može pisati u formi:

$$I_D = (p_1/u_0 - p_0/u_0)/(p_0/u_0 - 1) \quad (12)$$

3 Prikaz rezultata ispitivanja dilatometrom

Uobičajeno se rezultat interpretacije ispitivanja dilatometrom iskazuje navedenim parametrima (tablica 1. i 2.) u ovisnosti o dubini tla (slika 3.).



Slika 3. Uobičajeni grafički prikaz interpretiranih rezultata ispitivanja dilatometrom (prema programu DMT, [9])

4 Analiza utjecaja nivoa podzemne vode

Često se na istraživanoj lokaciji može pouzdano ustanoviti nivo podzemne vode o kojem ovise *in situ* porni tlakovi, a oni utječu na interpretaciju geotehničkih parametara prema pokusu dilatometrom (npr. u prvim fazama istražnih radova orijentiranih na penetracijske pokuse). Taj nedostatak može izazvati nesigurnost projektanta pri korištenju rezultatima pokusa dilatometrom. Kao što se vidi iz izraza (2) – (12) procjena i interpretacija tipa materijala, nedrenirane čvrstoće i modula vertikalne deformacije ovise o vrijednosti tlaka vode na dubini ispitivanja u_0 . U nastavku se analizira utjecaj *in situ* pornog tlaka na vrijednost interpretiranih parametara.

Analiza utjecaja za M_{DMT}

Dilatometarski modul nema u izrazu taj parametar, ali mjereni tlakovi p_0 i p_1 , kojima se on definira, ovise o vrijednosti pornog tlaka na dubini ispitivanja i brzini njihove disipacije za vrijeme mjerenja. Modul vertikalne deformacije M_{DMT} ovisi o *in situ* pornom tlaku jer koeficijent korekcije R_M ovisi o pornom tlaku. Ako se promatra odnos p_0/σ_{V0}' ovisno o odnosu u_0/σ_{V0}' tako da se pretpostave vrijednosti za u_0/σ_{V0}' od 0 - 1 (slučaj bez vode do slučaja vode na površini terena) tada se može izrazima (4), (5) i (6) provjeriti osjetljivost R_M na promjenu vrijednosti u_0 .

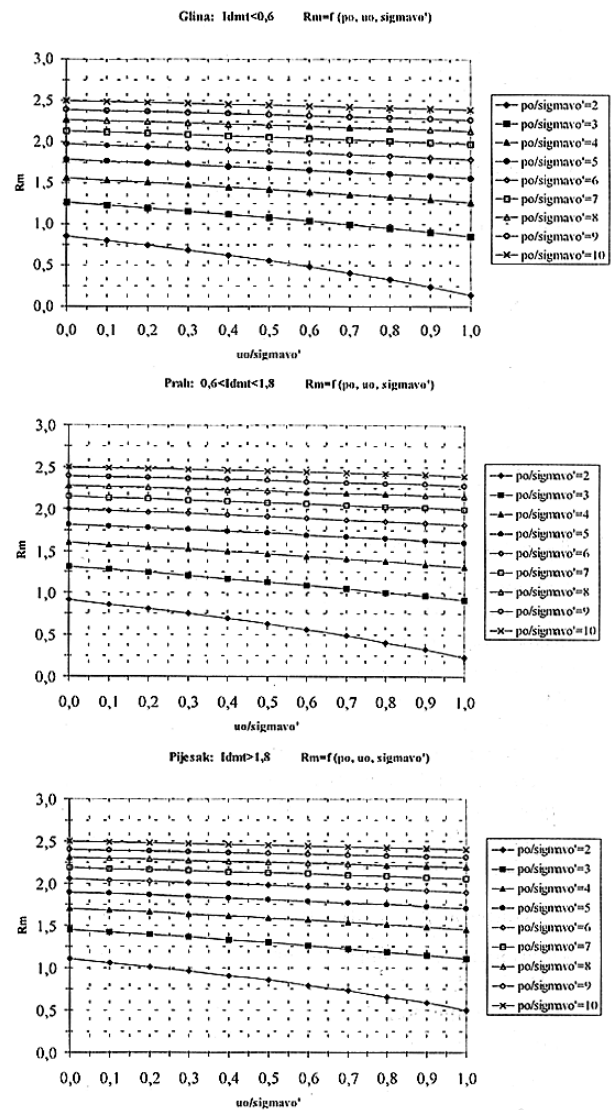
Tako se dobiju “familije” krivulja ovisnosti R_M o u_0/σ_{V0}' za određene grupe materijala kao što su glina, prah i pijesak (slika 4.).

Dijagrami na slici 4. jasno pokazuju da je R_M , a time i M_{DMT} , osjetljiviji na promjene *in situ* pornog tlaka (tj. nivoa podzemne vode, NPV) kod viših NPV, kod glina više negoli kod praha i pijeska, te kod mekših materijala sa $p_0/\sigma_{V0}' < 3$. Promjenom NPV mijenjaju se i u_0/σ_{V0}' i p_0/σ_{V0}' . Dakle, ukupna promjena R_M ovisi o promjeni NPV i efektivnog naprežanja, pa je ispravno promatrati promjenu parametra u_0/σ_{V0}' a ne samo NPV (tj u_0). Promjena parametra u_0/σ_{V0}' za 30% izaziva promjenu R_M , a time i M_{DMT} , prosječno 20%. Dakle, približno točna procjena nivoa podzemne vode (iz mjerenja na okolnim mjestima ili slično) može biti dovoljno dobra za račun M_{DMT} , osim u izuzetnim slučajevima vrlo mekog tla pod visokim NPV kada je odnos $p_0/\sigma_{V0}' < 3$.

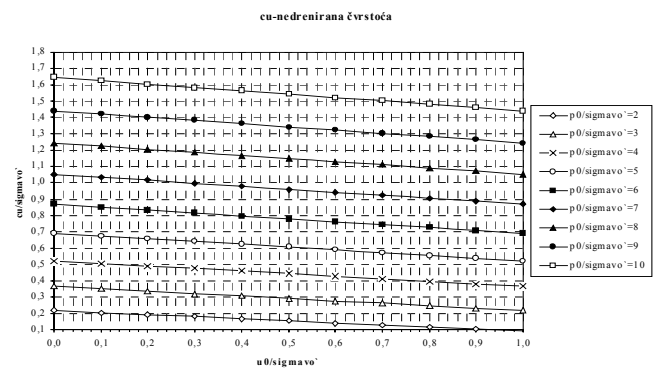
Analiza utjecaja za c_u

Jednadžba (10) daje mogućnost promatranja utjecaja variranja tlaka vode u tlu na parametar nedrenirane čvrstoće c_u preko “familije” krivulja p_0/σ_{V0}' u dijagramu ovisnosti c_u/σ_{V0}' i u_0/σ_{V0}' (slika 5.).

Analiza slike 5. pokazuje da je pogreška u procjeni c_u/σ_{V0}' za meka tla manja od 15% ako je pogreška u procjeni



Slika 4. Utjecaj nivoa pornih tlakova u_0 na faktor R_M

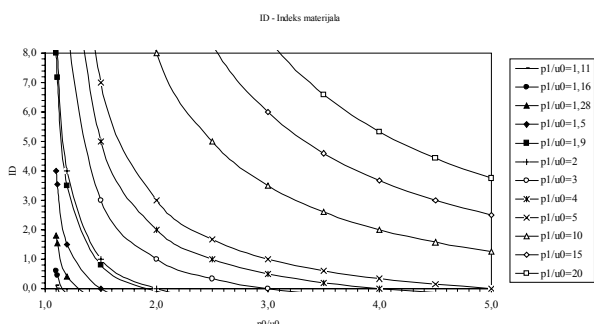


Slika 5. Utjecaj procjene u_0 na prognozu vrijednosti c_u

u_0/σ'_{v0} manja od 30%. Za tvrda tla ta je pogreška ispod 10%. Porast u_0/σ'_{v0} izaziva porast c_u/σ'_{v0} ali i pad σ'_{v0} pa je promjena u vrijednosti c_u ograničena (i obrnuto).

Analiza utjecaja za I_D

Utjecaj pornog tlaka u_0 na vrijednost indeksa materijala I_D može se promatrati preko odnosa parametara p_0/u_0 i p_1/u_0 , što je prikazano u dijagramu na slici 6.



Slika 6. Utjecaj procjene u_0 na prognozu vrijednosti I_D

Kao što se moglo i očekivati, utjecaj prognoze u_0 na vrijednost I_D izraženiji je kod nepropusnih mekših materijala negoli kod krućih i propusnih materijala. Opasnost za krivu interpretaciju tipa tla po ponašanju zbog slabe procjene u_0 vrlo je mala, jer je vrlo rijetko odnos $p_1/u_0 < 3$, osim u mekim tlima, što bi u protivnom moglo izazvati ograničeno pogrešnu informaciju o tipu tla. Valja napomenuti da su ispitivanja pokazala da je u mekim nepropusnim tlima $p_0/u_0 \approx 1$ [5]. Međutim, tada je i odnos $p_1/p_0 \approx p_1/u_0$ malen (oko 1.2-1.5) pa ne bi trebalo očekivati značajnu promjenu u prognozi tipa tla.

5 Primjer provjere utjecaja nivoa podzemne vode

Na primjeru ispitivanja dilatometrom za Luku Ploče (IGH, Zagreb, 1998.) iskazat će se pogreška u procjeni pojedinoga interpretiranog parametra tla zbog pogreške u procjeni nivoa podzemne vode (NPV). Tablica 4. sa-

drži podatke o parametrima tla za točan nivo (0.5 m) i prognoziranu nivo podzemne vode (2, 4 i 6 m). Ti podaci su dobiveni tako što je u programu za proračun vrijednosti parametara uvršten podatak o nivou podzemne vode (vidi izraze u tablici 1. i 2.).

Iz tablica se vidi da podatak o NPV različito utječe na različite parametre. I_D se mijenja ali se ne mijenja interpretirani tip tla. Nedrenirana čvrstoća vrlo se malo mijenja s promjenom podatka o NPV ako je promjena unutar dva metra, a za drastične promjene NPV (0.5 m na 6 m) vrijednost nedrenirane čvrstoće u glini može biti veća i 35% (glina na 9 m).

Luka Ploče, DMT-2

- stvarni NPV = 0.5 m,
- prognozni NPV = 2,4,6 m,
- najveća dubina ispitivanja = 18.8 m,
- promatrane dubine u profilu tla = 3.4 m, 9.0 m i 17.0 m

Modul stišljivosti u sloju praha na 3.4 m osjetljiv je na promjenu NPV. Za promjenu NPV sa 0.5 na 2.0 m vrijednost modula se mijenja otprilike oko 20%, a za položaj vode ispod 3.4 m vrijednost modula se mijenja otprilike 30%. Pri toj promjeni NPV promjene efektivnog naprezanja na 3.4 m veće su nego u drugim dubinama (promjena efektivnog naprezanja je oko 90%). Dakle, u intervalu dubine u kojem se izrazito mijenja efektivni napon kao posljedica promjene NPV može se znatno mijenjati i vrijednost modula stišljivosti. Ta je promjena u obrađenom primjeru oko 20-30%, što ovisi o tome je li pretpostavljeni NPV iznad ili ispod promatrane dubine u tlu. Stoga je ispravno govoriti o promjeni u_0/σ'_{v0} , a ne o promjeni NPV.

Može se konstatirati da se u navedenom primjeru krivom procjenom NPV unutar 1-2 m (promjena u_0/σ'_{v0} pri površini je oko 0.50) umjereno utječe na interpretirane vrijednosti parametara tla. Drastične pogreške u procjeni NPV (4 i 6 m) vjerojatno je teško očekivati u praksi.

Tablica 3. Analiza utjecaja pogreške u procjeni nivoa podzemne vode na interpretiranu vrijednost parametara tla

Parametar	Vrijednost parametra na dubini 3.4/9.0/17.0 m ispod površine tla, proračunane programom za interpretaciju											
	dubina = 3.4 m				dubina = 9.0 m				dubina = 17.0 m			
	NPV = 0.5 m	NPV = 2.0 m	NPV = 4.0 m	NPV = 6.0 m	NPV = 0.5 m	NPV = 2.0 m	NPV = 4.0 m	NPV = 6.0 m	NPV = 0.5 m	NPV = 2.0 m	NPV = 4.0 m	NPV = 6.0 m
Tip tla I_D	Prah 1.03	Prah 0.90	Prah 0.81	Prah 0.81	Glina prašin. 0.49	Glina prašin. 0.44	Glina prašin. 0.38	Glina prašin. 0.34	Glina prašin. 0.49	Glina prašin. 0.46	Glina prašin. 0.43	Glina prašin. 0.40
Nedrenirana čvrstoća, c_u (kPa)	13.0	14.0	15.0	14.5	14.0	15.0	17.0	19.0	29.0	30.0	32.0	33.0
Modul stišljivosti, M (kPa)	5400	4300	3700	3700	1900	1800	1800	1800	4300	3900	3700	3700

Korisno je napomenuti da su dijagrami na slikama 4. i 5. dobro sredstvo za provjeru osjetljivosti parametra tla na nesigurnost u NPV. Iz podataka mjerenja tlakova pri ispitivanju i iz dijagrama može se iskazati ta osjetljivost. Odstupanje tako izračunanih vrijednosti parametara tla za primjer iz tablice 3. od točno izračunanih vrijednosti bilo je u rasponu 5-8 %.

6 Zaključak

U članku je opisan postupak ispitivanja tla *in situ* dilatometrom Marchetti i interpretacije parametara za geotehničke analize (tip tla, nedrenirana čvrstoća i modul stišljivosti) na temelju rezultata tog pokusa. Pokazuje se da je pokus DMT vrlo koristan za procjenu slijeganja tla, nedrenirane čvrstoće tla i uvjeta dreniranja. Dosadašnja iskustva iz izvedenih zahvata pokazuju da DMT prognozira slijeganja u različitim tlima s najvećim odstupanjem $\pm 30\%$ u odnosu prema mjerenim slijeganjima te da su nedrenirane čvrstoće u prosjeku oko onih koje se utvrđuju krilnom sondom (bolja prognoza za meke nego za tvrde materijale).

Razmatran je utjecaj procjene nivoa podzemne vode na vrijednosti interpretiranih parametara tla. Pogreška u procjeni nivoa podzemne vode ima ograničen utjecaj na preciznost prognoze modula, čvrstoće i tipa tla (stupanj utjecaja ide navedenim redom, najmanje je osjetljiv tip tla). Ona ovisi o promjeni u_0/σ_{v0} , krutosti tla (meko nasuprot tvrdom tlu), promjeni efektivnog napona i vrsti

tla. Pogrešne procjene NPV koje ne izazivaju promjene u u_0/σ_{v0} veće od 30% imaju vrlo ograničen utjecaj na interpretirane vrijednosti nedrenirane čvrstoće i modula stišljivosti tla. Te su promjene veće kod mekog tla, kod visokih NPV i u zoni tla koje ostaje nepotopljeno. Približna procjena nivoa podzemne vode (iz mjerenja na okolnim mjestima ili slično) može biti dovoljno dobra za račun c_u i M_{DMT} , pogotovu za preliminarne analize, osim u izuzetnim slučajevima vrlo mekog tla pri površini, za odnos $p_0/\sigma_{v0} < 3$, te kada je visok NPV.

Pogreška u procjeni c_u/σ'_{v0} za meka tla manja je od 15% ako je pogreška u procjeni u_0/σ'_{v0} manja od 30%. Za tvrda tla ta je pogreška ispod 10%. Opasnost za krivu interpretaciju tipa tla po ponašanju zbog slabe procjene u_0 vrlo je mala. Nešto veća odstupanja pojavljuju se u procjeni modula stišljivosti, pri istim uvjetima.

Provedene analize i simulacije na realnom ispitivanom tlu pokazuju da su vrijednosti interpretiranih parametara iz pokusa DMT malo osjetljive na umjereno pogrešne procjene nivoa podzemne vode i da je zbog toga pokus vrlo upotrebljiv u prvim fazama istražnih radova, a pogotovo u višim fazama kada postoji više podataka o tlu i kada se mogu izvršiti nužne korelacije za lokalne uvjete u tlu. Jednostavnost, ekonomičnost, ponovljivost i prilagodljivost svim bušaćim garniturama čine pokus DMT vrlo atraktivnim i poželjnim u većini geotehničkih istražnih radova i zahvata koji se izvode u glinama, prašinama i pijescima

LITERATURA

- [1] Marchetti, S.: *In Situ Tests by Flat Dilatometer*, Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the ASCE, Vol. 106, No. GT3, 1980. pp 299.-321.
- [2] Marchetti, S.; Crapps, D. K.: *Flat Dilatometer Manual*. 1981.
- [3] Schmertmann, J. H.: *Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test*, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 9, No. 2, 1986. June, pp 93.-101.
- [4] Lacasse, S.; Lunne, T.: *Calibration of dilatometer correlations, Penetration testing ISPT-1*, De Ruiter (ed.), Balkema, Rotterdam 1988., pp 539.-548.
- [5] Lutteneger, A.: *Current status of the Marchetti dilatometer test, Penetration testing ISPT-1*, De Ruiter (ed.), Balkema, Rotterdam 1988. pp 137.-155.
- [6] Schmertmann, J. H.: *Guidelines for using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for geotechnical design*, Report Number FHWA-PA-87-024+84-24, Final Report, March, Volume III (of IV) – DMT Test Methods and Data Reduction, National Technical Information Service, Springfield, VA, USA 1988.
- [7] Larsson, R.; Eskilson, S.: *Dilatometer försök i lera*, Varia 243, Statens geotekniska institut, Linköping, pp 63, (na švedskom) 1989.
- [8] Mulabdić, M.: *Pregled metoda ispitivanja tla in situ*, Građevinar, 44(1992)1, 23.-31.
- [9] Marchetti S.: *Programski paket DMT/SDMT za obradu i interpretaciju mjerenja dilatometrom*, 1995.
- [10] *European Committee for Standardization*, Standard CEN, "Flat Dilatometer test (DMT)", Nederlands Normalisatie Instituut (NNI), Geotechnical design, N 165., 1995,
- [11] Marchetti S.: *The flat dilatometer design applications*, Third geotechnical engineering conference, Cairo University, Keynote lecture, 1997. 26 pp.
- [12] Mulabdić, M.; Miklin, Ž.; Brunčić, A.: *Use of piezocone in site investigation for the Danube-Sava Canal*, 8th International IAEG Congress, Vancouver, Canada, 21-25 September 1998.
- [13] Marchetti S.: *The flat dilatometer (DMT) and its applications to geotechnical design*, International Seminar, Tokyo, Feb. 1999, Japanese Geotechnical Society, 1999. 79 pp.