

Igor AJDIČ
mag., dipl.ing.geol., Družba za državne ceste, d.o.o.

OCENA DRENAŽNIH IN KONSOLIDACIJSKIH LASTNOSTI ZEMLJIN IZ DISIPACIJSKIH TESTOV

POVZETEK: Ob intenzivnem načrtovanju in gradnji avtocest v Sloveniji so v polnem teku tudi različna geotehnična raziskovalna dela. Med temi so se pri nas dobro uveljavile terenske raziskave tal s statičnim konusnim penetrometrom. Večina penetracij je bila dosedaj izvedena brez merjenja pomih tlakov.

Glede na to, da je v naslednjih letih pričakovati enak ali pa povečan obseg geotehničnih raziskovalnih del, bo potrebno raziskave čim bolj racionalno načrtovati ter izvajati. Namen tega prispevka je pokazati, da je v primeru izvajanja CPT smotno povečati delež raziskav z merjenjem pomih tlakov, ne samo med penetriranjem temveč tudi v stanju mirovanja merilne konice, saj na ta način povečamo fond podatkov za geotehnično interpretacijo. Podan je pregled nekaterih postopkov interpretacij disipacijskih testov, s priporočili za nadaljnje delo.

EVALUATION OF DRAINAGE AND CONSOLIDATION PROPERTIES OF SOIL FROM DISSIPATION TESTS

SUMMARY: Due to an intensive planning and construction of highways in Slovenia, a geotechnical research work of different kind is taking place too. Among these activities, a cone penetration testing has achieved a good recognition. Up to now, a considerable portion of penetrations has been executed without the pore pressure measurement.

Since a geotechnical research work of the same or even wider extent is expected, the future geotechnical investigation should be planned and executed as rationally as possible. The aim of this article is to point out that in the domain of the CPT it is useful to increase the portion of pore pressure measurements, not only during the penetration but also after penetration is interrupted. On this way a larger amount of data for geotechnical interpretation is achieved. A review of some procedures for interpretation of dissipation tests with recommendation for future work is given.

UVOD

V Sloveniji je od leta 1988 v uporabi sodoben statični konusni penetrometer, s katerim je bilo do konca leta 1995 izvedenih preko 10.000 m raziskav (CPT). Manjši del penetracij, v povprečju le 4%, je obsegal merjenje pomih tlakov (CPTU), v sklopu katerih so bili izvedeni tudi t.im.disipacijski testi - beleženje pomih tlakov v stanju mirovnja merilne konice penetrometra.

Medtem ko se je standardna metoda raziskav s CPT v naši geotehnični praksi dobro uveljavila, ne nazadnje tudi kot nadomestilo za ne vselej kvalitetno pridobivanje vzorcev zemljin za laboratorijske preiskave, pa tega ne moremo trditi za disipacijske teste. Namen pričujočega članka je predstaviti osnovne podatke o tovrstnih raziskavah s priporočili za nadaljnje delo, še posebej, ker smo danes priča intenzivnim geotehničnim raziskovalnim delom zaradi načrtovanja in izgradnje avtocest.

SPLOŠNO O DISIPACIJSKIH TESTIH

Potek preizkusa

Bistvo preizkusa je v beleženju časovnega razvoja pomih tlakov takoj po zaustavitvi kontinuiranega vtiskovanja merilne konice (statičnega penetrometra, lahko pa tudi le merilnika pomih tlakov). Pri penetriranju v zasičenih koherentnih zemljinah prihaja do nedreniranega striženja le-teh in s tem do povišanja pomih tlakov. Od prekinitve penetriranja dalje pomi tlaki s časom upadajo proti ravnovesni/mejni vrednosti (v nadaljevanju u_0). Ta fenomen je manj izrazit v relativno prepustnejših zemljinah, v zelo prepustnih okoljih (nekoherentnih zemljinah) pa so lahko pomi tlaki med penetriranjem celo negativni in po zaustavitvi penetriranja naraščajo proti vrednosti u_0 . V vsakem primeru predstavlja čas, potreben za doseganje predpostavljene ravnovesne vrednosti u_0 , merilo o drenažnih lastnostih okolja, v katerem je bil preizkus izveden.

Ocene konsolidacijskih in drenažnih karakteristik zemljin

Različni avtorji si že preko petnajst let prizadevajo čim natančneje interpretirati posnetke časovnega upadanja pomih tlakov, predvsem oceniti koeficient horizontalne konsolidacije (c_h) in s tem posredno koeficient horizontalne prepustnosti (k_h) zasičenih koherentnih zemljin. Glavni problem pri tem je v simuliranju kompleksnega mehanizma penetracijskega procesa, zato so pri teoretičnih izhodiščih za obravnavanje disipacije nujne določene poenostavitve.

Skupno večini postopkov ocene koeficienta horizontalne konsolidacije je primerjava časovnega poteka normiranih presežnih pomih tlakov Δu glede na njihovo začetno vrednost s teoretičnimi, ki so podani v odvisnosti od časovnega faktorja $T=c_h t/r_0^2$. V navedenem izrazu pomeni T časovni faktor, c_h koeficient horizontalne konsolidacije, t čas izbrane stopnje konsolidacije in r_0 premer merilne konice. Kot za vse interpretacije rezultatov in-situ meritev velja tudi tu pravilo, da je treba za potrditev ustreznosti postopka izvesti določeno število vzporednih referenčnih preiskav. Še posebej to velja pri oceni izpeljanih geotehničnih parametrov, torej tudi c_h . V slovenski geotehnični praksi se je za razlago disipacijskih preizkusov doslej preizkusilo teoretična izhodišča naslednjih avtorjev: Levadoux-a in Baligh-a (1980), Tumay-a s soavtorji (1985), Houlsby-a in Teh-a (1988) ter Gupta in Davidson-a (1986). Opis posameznih metod bi presegel namen tega prispevka. Nekatere podrobnosti so razvidne iz članka Gaberčeve in sodelavcev (1995).

Manj ambiciozni, pa vseeno zelo koristni, so poskusi kvalitativne/opisne interpretacije disipacijskih testov, kjer na osnovi hitrosti časovnih sprememb pomih tlakov sklepamo na splošne drenažne karakteristike preiskanih zemljin, kar vsekakor dobro dopolnjuje siceršnjo klasifikacijo na osnovi CPT. Na tem mestu velja omeniti poročilo Larsona in Mulabdića (1991) o kratkotrajnih - 5 in/ali 10 minutnih disipacijskih preizkusih, na osnovi katerih predlagata delitev na tri tipe prepustnosti (preglednica št. 1). Avtorjema se zdi predlagana delitev še posebej primerna za presojo pogojev dreniranja v slojevitih glinastih in meljastih zemljinah ter za razločevanje med razmeroma prepustnejšimi sloji melja in peska ter tršimi vključki v glini (oba tipa zemljin izkazujejata med penetracijo razmeroma visoke odpore pod konico in nizke pome tlake).

Preglednica 1. Razdelitev zemljin glede na zaostale pome tlake; filter tik za konusom. Larson in Mulabdić, 1991

Tip zemljine	Zaostali pomi tlak kot delež začetnega pomega tlaka	
	Po 5 min	Po 10 min
Prepustna	< 0,2	< 0,2
Polprepustna	0,2 - 0,6	0,2 - 0,5
Neprepustna	> 0,6	> 0,5

Poskusi ocenjevanja koeficienta prepustnosti mehkih koherentnih zemljin pa se citiranima avtorjema zdijo manj perpektivni, predvsem zaradi težav v simuliranju mehanizmov časovnega upadanja pomih tlakov takoj po zaustavitvi penetriranja ter zaradi zamudnosti samega preizkusa. Morda iz enakega razloga uporabnost disipacijskih testov ni obravnavana niti v evropskem predstandardu Eurocode 7, niti v informaciji SGI (Larson, 1995), ki sicer razmeroma izčrpno podaja način izvajanja preiskav s statičnim penetrometrom, pričakovane rezultate in njihovo zanesljivost.

Zanimivo je tudi, da je bilo na mednarodnem simpoziju CPT' 95 (Proceedings, 1995) sorazmerno malo prispevkov (le 4 od 98) s področja disipacijskih testov.

V zvezi z disipacijskimi testi je treba omeniti še uporabnost rezultatov v nekoherentnih zemljinah. Ker so te relativno dobro prepustne, pride v stanju mirovanja penetracijske konice razmeroma hitro do vrednosti u_0 . Navedeno lastnost lahko v praksi uporabimo za ugotavljanje pomega tlaka v okolju, še posebej, če meritev izvedemo v okviru iste penetracije v različnih globinah. Rezultati predstavljajo skupaj z drugimi interpretiranimi podatki na osnovi CPT pomemben prispevek k razlagi hidrogeoloških razmer v preiskanem okolju (prisotnost morebitnega subarteškega/arteškega pritiska, tip vodonosnika ipd).

NEKAJ PRIMEROV INTERPRETACIJE

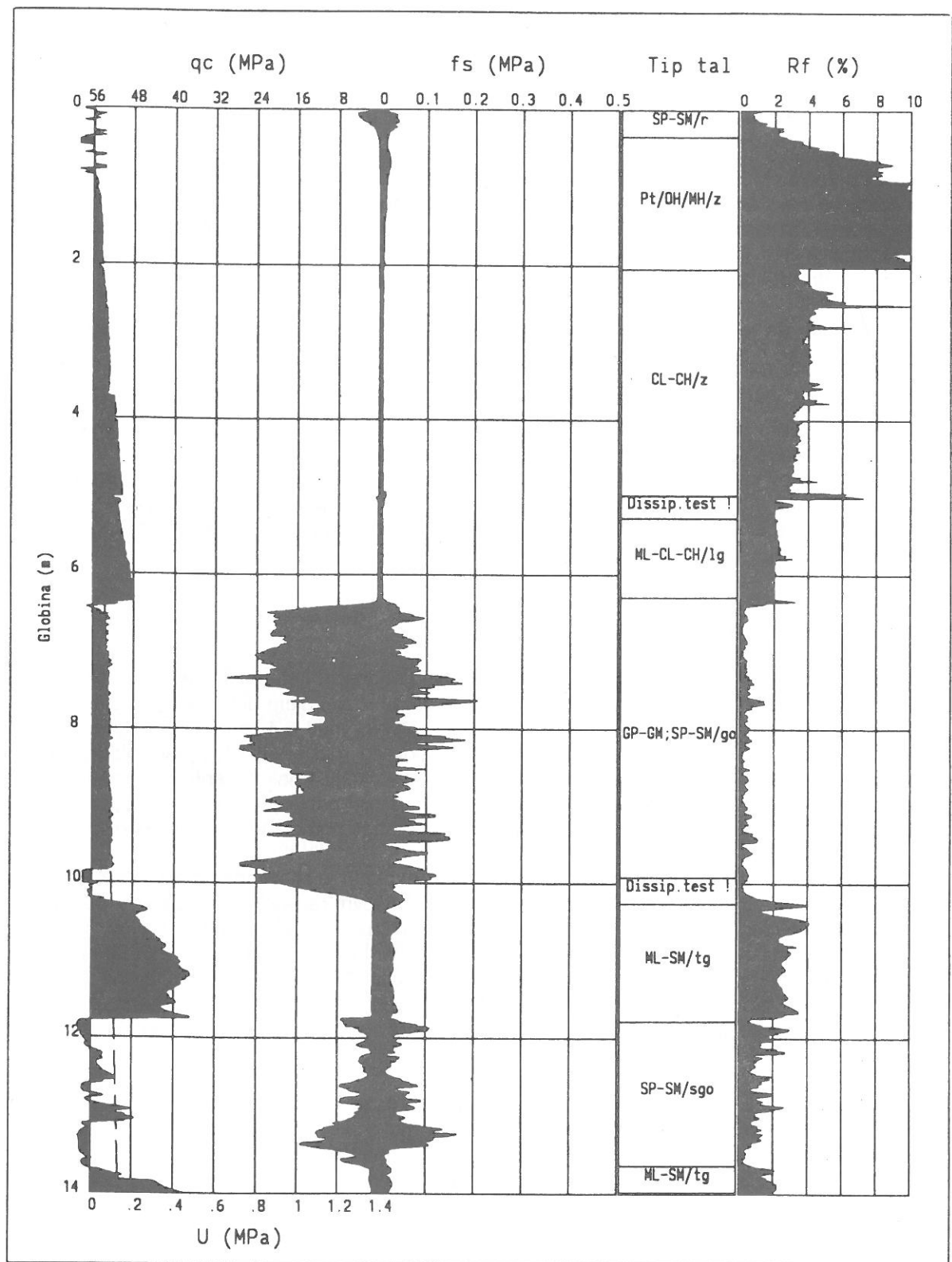
Na sliki št.1 je prikazan penetracijski posnetek v tipičnih barjanskih tleh ob Ižanski cesti, okoli 250 m severno od Iga (Ajdič, 1991). Iz posnetka je razvidno, da se v zgornjem delu nahajajo slabo nosilne koherentne zemljine, prvi prodni sloj pa se pojavi že v globini med 6,4 m in 10,2 m pod površjem terena. Pomi tlaki so v območju koherentnih zemljin povsod nad predpostavljenimi hidrostatskimi (prekinjena premica v diagramu u -globina), medtem ko so v okolju z nekoherentnimi zemljinami blizu hidrostatskim ali pa lokalno celo negativni. Negativne vrednosti pripisujemo možnemu pojavu, da je pri penetriranju skozi trši medij prišlo do začasne prekinitve med pomo vodo in merilno konico.

Na sliki št.1 sta označeni tudi dve globini (5 m in 10 m), v katerih je bil izveden disipacijski test; prvi v glinasto-meljastih in drugi v prodno-peščenih zemljinah. Časovni razvoj pomih tlakov v posameznih preizkusih je razviden s slike št.2. Levi graf ponazarja časovni razvoj pomih tlakov, tipičen za zasičene koherentne zemljine, saj se upadanje pomih tlakov tudi po skoraj dveh urah še ni končalo. Glede na to, da se je nivo talne vode v času preizkusa nahajal 0,6 m pod površjem terena, bi moral v normalnih pogojih hidrostatski pritisk v globini 5 m znašati 0,044 MPa. Za dodatno ponazoritev disipacije/konsolidacije je v sliki št.3 podan isti preizkus z normiranimi pomimi tlaki in s časom v logaritemskem merilu.

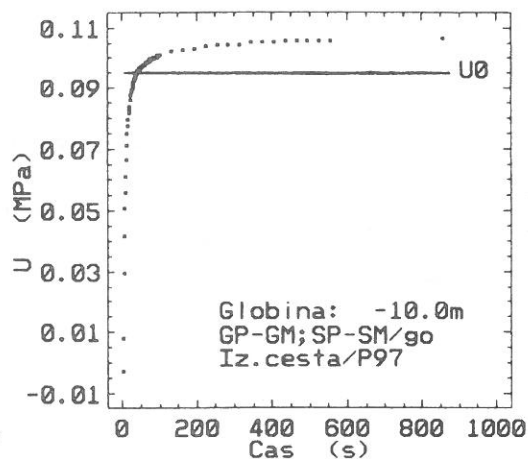
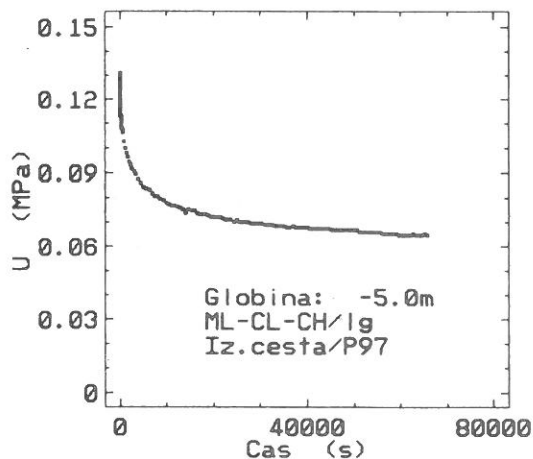
Desni graf na sliki št.2 pa ponazarja časovni razvoj pomih tlakov, značilen za zasičene nekoherentne zemljine. Prvi dve odčitani vrednosti sta celo negativni, po približno 10 minutah pa se pomi tlak po naraščanju ustali na vrednosti 0,105 MPa, kar pri globini meritve 10 m in pri že omenjenem nivoju talne vode 0,6 m pod površjem terena pomeni, da je voda na preiskanem mestu pod arteškim pritiskom velikosti:

$$0,105 - (0,100 - 0,006) \approx 0,01 \text{ MPa}$$

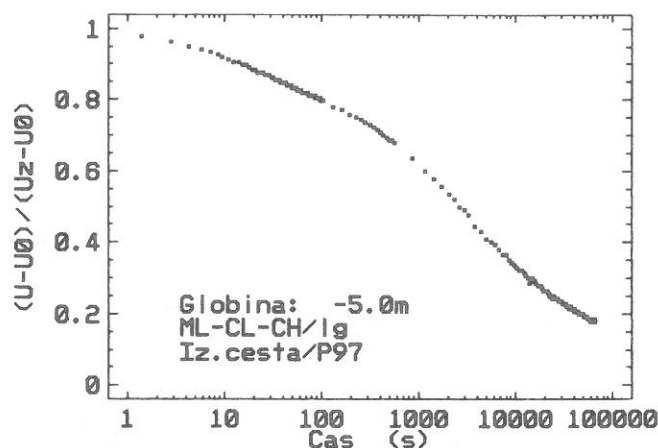
kar ustreza višini vodnega stolpca 1m nad površjem terena. Glede na znano nadmorsko višino začetka CPT (289,09 m) znaša torej ocena piezometrične gladine vode iz prvega gramoznega sloja ≈290,1m, kar se ujema z znanimi objavljenimi podatki te vrste (npr. Mencej, 1988).



Slika 1. Posnetek CPT v tipičnih barjanskih tleh z lokacijo izvedbe disipacijskih testov



Slika 2. Značilen razvoj pomih tlakov v dveh vrstah barjanskih tal. Globini posameznih preizkusov sta označeni tudi na sliki 1.



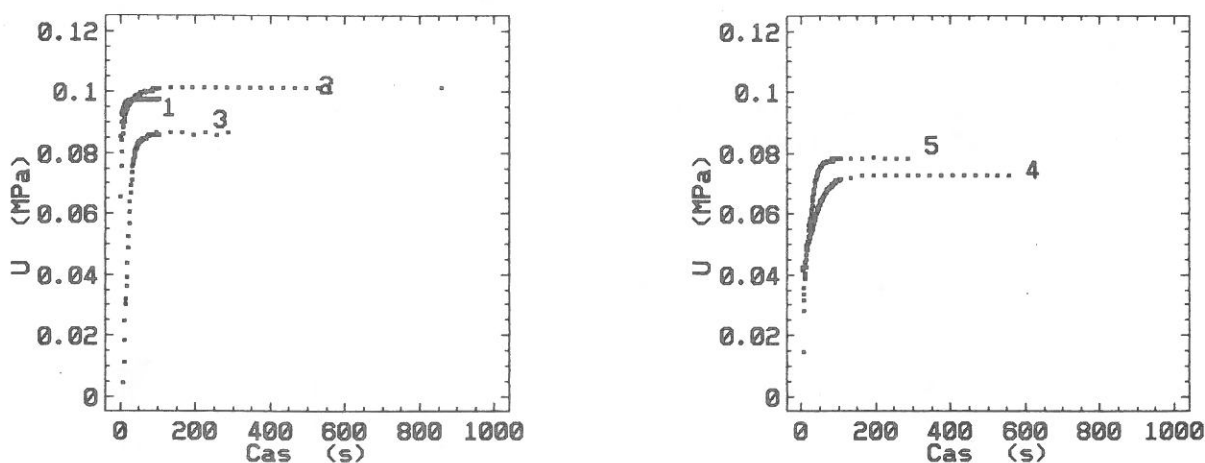
Slika 3. Disipacijski posnetek s slike 2-levo, prikazan z normiranimi pomimi tlaki.

Nekaj rezultatov disipacijskih preizkusov, tipičnih za dobro prepustne zemljine, je podano tudi v preglednici št.2 ter na sliki št.4 (Stmiša, 1996). Preizkusi so bili opravljeni v sklopu penetracijskega sondiranja tal za potrebe načrtovanja avtocestnega prometnega vozlišča pri Pesnici (AC Slivnica-Pesnica), med km 17+040 in km 17+200, z osnovnim namenom oceniti sestavo in trdnostno - deformacijske karakteristike temeljnih tal. Debelina zemljinkega pokrova znaša na omenjeni lokaciji okoli 8 m. Preiskana tla sestojijo v zgornjem delu predvsem iz koherentnih zemljin v srednje do težkognetnem konsistenčnem stanju, s primesjo peska. Navzdol sledi do 2 m debela cona nekoherentnih zemljin (v tej so bili izvedeni disipacijski preizkusi, ki so podani v preglednici št.2 in na sliki št.4) ter prehod v hribinsko osnovo. Del penetracijskega sondiranja je bil izveden s površine raščenege terena, del pa z vrha do takrat izvedenih avtocestnih nasipov.

Iz prikazanih rezultatov je razvidno, da so pomi tlaki so med preizkusom v vseh primerih naraščali ter dosegli končno vrednost po največ 860 sekundah (predzadnji stolpec - $U_{končni}$), kar kaže na dobro prepustnost okolja. Ocenjena piezometrična gladina talne vode (iz globin preizkusov, nadmorskih višin začetka CPT in končnih pomih tlakov) je najvišja v območju nasipov (višje kote začetka penetracij - osončena polja), kar je možno pripisati procesu konsolidacije tal. Natančnejšo oceno bi seveda lahko podali na osnovi večjega fonda podatkov, predvsem pa dobrega poznavanja hidrogeoloških razmer. Raziskave te vrste so v teku. Lahko pa iz podatkov iz preglednice št.2 ocenimo merilno točnost izvedenih testov. Preizkusa št. 1303964 in 1303965 sta bila izvedena zaporedno na isti lokaciji in v istem sloju, v globinah 12,1 m in 12,5 m, pri čemer sta bila registrirana končna poma tlaka 0,0977 ter 0,1013. Njuna razlika znaša 0.0036 MPa (0,36 m vodnega stolpca), razlika v globini posameznih preizkusov pa 0,4 m, kar kaže na ustrezno natančnost meritev.

Preglednica 2. Rezultati disipacijskih testov v nekoherentnih zemljinah med km 16+700 in 17+200 AC Slivnica - Pesnica

Številka CP testa	Zap. št. disipacije	Datum	Nadmorska višina (m)	Globina (m)	Čas (s)	$U_{končni}$ (MPa)	Piezometrična gladina (m)
130396	1	22.06.96	256,2	12,1	103,2	0,0977	253,9
- " -	2	22.06.96	256,2	12,5	857,4	0,1013	253,8
130596	3	22.06.96	255,7	10,4	286,6	0,0864	253,9
130696	4	23.06.96	253,2	7,4	557,1	0,0726	253,0
130796	5	23.06.96	253,1	8,0	285,4	0,0781	252,9



Slika 4. Rezultati disipacijskih testov v nekoherentnih zemljinah med km 16+700 in 17+200 AC Slivnica - Pesnica; številke krivulj ustrezajo številkam v drugem stolpcu preglednice št.2

Nekaj primerov ocenjevanja koeficienta horizontalne konsolidacije (c_h) in s tem posredno koeficienta horizontalne prepustnosti (k_h) zasičenih koherentnih zemljin iz disipacijskih preizkusov je razvidno iz že omenjenega prispevka Gaberčeve in soavtorjev (1995). Osnovni namen citiranega članka je primerjava horizontalne in vertikalne prepustnosti tipičnih slabo nosilnih in zelo deformabilnih barjanskih tal iz rezultatov laboratorijskih preiskav in terenskih disipacijskih testov. Avtorica med drugim ugotavlja, da ni bistvenih razlik med vertikalnimi in horizontalnimi laboratorijsko ugotovljenimi prepustnostmi, da obstajajo razlike med rezultati posameznih načinov ocenjevanja prepustnosti iz disipacijskih testov in predvsem, da so terensko ugotovljene prepustnosti v splošnem višje od laboratorijskih. Dosedaj obdelani rezultati disipacijskih testov po različnih metodah izkazujejo npr. za polžarico povprečni koeficient vodoprepustnosti $3,0 \cdot 10^{-8}$ m/s, kar je 10 krat več od rezultatov, pridobljenih iz številnih laboratorijskih preiskav. Podobno poroča glede prepustnosti koherentnih materialov na območju načrtovane avtoceste Slivnica - Pesnica Brenčič (1996), za nekatere kanadske gline pa Leroueil s soavtorji (1995).

ZAKLJUČKI

Raziskave tal s statičnim konusnim penetrometrom (CPT) so se v slovenski geotehnični praksi dobro uveljavile, še posebej v zadnjem času, ko smo priča intenzivnim raziskovalnim delom za potrebe načrtovanja in gradnje avtocest. V okviru omenjene vrste raziskav pa je bila doslej premalo izkoriščena možnost merjenja pomih tlakov med penetriranjem (CPTU) in, predvsem, izvajanja disipacijskih testov. Rezultati disipacijskih testov - beleženja časovnega razvoja pomih tlakov po zaustavitvi penetriranja namreč omogočajo, v povezavi z rezultati CPT, dober splošen vpogled v konsolidacijske in drenažne značilnosti preiskanih zemljin. Poleg tega je možno v nekoherentnih zemljinah določiti ravnovesni pomi tlak v izbrani globini, v koherentnih zemljinah pa, ob upoštevanju

ustreznih teoretičnih izhodišč, oceniti koeficient horizontalne konsolidacije ter posredno koeficient horizontalne prepustnosti.

Glede na to, da je v naslednjih letih pričakovati enak ali pa povečan obseg geotehničnih raziskovalnih del, oprema pa je že sedaj polno obremenjena, bo potrebno raziskave vse bolj racionalno načrtovati ter izvajati. V okviru penetracijskega sondiranja se kažejo "notranje rezerve" prav v povečanem deležu penetracij z registriranjem pomnih tlakov (CPTU), tako med penetriranjem kot z disipacijskimi preizkusi. Doslej je znašal delež CPTU le 4% (povprečje med letoma 1988 in 1995).

Disipacijske teste bo v bodoče smotno sistematično izvajati na dva načina. T.im. hitri način predvideva 5-minutne ali 10-minutne teste za splošen vpogled v drenažne značilnosti preiskovanega penetracijskega profila. Z drugim, časovno zamudnejšim načinom, pa se bo, ob vzporednem izvajanju alternativnih raziskav, povečeval fond podatkov. Na osnovi pridobljenih informacij bo možno za izbrane koherentne zemljine pridobiti izhodišča za oceno horizontalnega koeficienta konsolidacije in posredno koeficienta horizontalne prepustnosti.

LITERATURA

- Ajdič, I. (1991). Uporaba raziskav s statičnim penetrometrom za načrtovanje rekonstrukcij cest in kontrolo kakovosti izvedbe cestnih nasipov. Raziskovalna naloga. Ljubljana
- Baligh, M.M., Levadoux, J.N. (1986). Consolidation after Undrained Piezocone Penetration. I: Prediction, II: Interpretation. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 112, No7, 707-745.
- Brenčič, M. (1996). Poročilo o hidrogeoloških razmerah na pododseku AC Malečnik Pesnica v km 15+360.00 do km 15+620.00. GZL-IGGG, Arh.št.: K-II-30 d/c - 1 - 852. Ljubljana
- European Committee for Standardization (1995). Eurocode 7 Part 3. Geotechnical design assisted by field tests.
- Gaberc, A., Ajdič I., Majes B. (1995). Vertical and horizontal permeability of marshland subsoils. *Proceedings of the Eleventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol.1. Copenhagen, 127-132.
- Gupta, R.C., Davidson, J.L. (1986). Piezoprobe determined coefficient of consolidation. *Soils and foundations*, Vol.26, No 3,12-22
- Houlsby, G.T., Teh, C.I. (1988). Analysis of the piezocone in clay. *Penetration testing, ISOPT-1*, Balkema, Rotterdam, 777-783
- Larson R., Mulabdić M.(1991). Piezocone Tests in Clay. SGI Report No 42. Linköping
- Larson, R. (1995). The CPT test. *Information 15 E. SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE*. Linköping.
- Leroueil, S., Demers, D., La Rochelle, P., Martel, G., Virely, D., (1995). Practical use of the piezocone in Eastern Canada clays. *Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95. Volume 2*. Linköping, 515-522.
- Mencej Z.(1988). Prodni zasipi pod jezerskimi sedimenti Ljubljanskega barja. *Geologija* 31, 32. Ljubljana.
- Proceedings of the International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'95. Volume 2*. Linköping, Sweden, October 4-5, 1995
- Stmiša, G. (1996). Geotehnično poročilo o raziskavah tal s statičnim konusnim penetrometrom na območju rondoja (med km 16.300 in km 17.200) na AC Šentilj - Pesnica. Št.poročila: GEO4502/96. Ljubljana