

Određivanje svojstava naslaga mekih glina pokusom CPTU

Igor Sokolić, Željana Skazlić, Antun Szavits-Nossan

Ključne riječi

meke gline, naslage, svojstva, pokus CPTU – ispitivanje statičkim prodiranjem s mjerenjem pornoga tlaka, korelacija, usporedba vrijednosti

Key words

soft clay, formations, properties, CPTU test - cone penetration test with pore pressure measurement, correlation, comparison of values

Mots clés

argile molle, couches, propriétés, essai au piézocône - essai de pénétration au cône avec la mesure de la pression interstitielle, corrélation, comparaison des valeurs

Ключевые слова

мягкая глина, слоения, особенности, эксперимент CPTU – испытание статического проникновения с CPTU измерением давления, корреляции, сравнение результатов

Schlüsselworte

Weichtone, Schichten, Eigenschaften, CPTU-Versuch - Untersuchung durch statisches Eindringen mit Messung des Porendrucks, Korrelation, Vergleich der Werte

I. Sokolić, Ž. Skazlić, A. Szavits-Nossan

Izvorni znanstveni rad

Određivanje svojstava naslaga mekih glina pokusom CPTU

Opisane su glavne karakteristike naslaga mekih glina i način njihova nastanka, s posebnim osvrtom na uvjete okoliša u kojima se odvija taloženje i na procese koji se pri tom odvijaju. Na primjeru naslage mekih glina u zaljevu Pelješac provedena je analiza rezultata pokusa CPTU pri čemu su upotrijebljene korelacije za određivanje mehaničkih i fizičkih karakteristika tla. Dobivene vrijednosti uspoređene su s vrijednostima izmjerenim laboratorijskim i terenskim istražnim radovima.

I. Sokolić, Ž. Skazlić, A. Szavits-Nossan

Original scientific paper

Determining properties of soft clay formations by CPTU testing

Principal properties of soft clay formations, and the way in which they were formed, are described. A particular emphasis is placed on the environment in which deposition has been taking place, and on processes that are taking place during the deposition. Using soft clay formations from Pelješac Bay as an example, the analysis of CPTU test results, and appropriate correlations, were used to determine mechanical and physical properties of soil. The values obtained were compared with those measured during laboratory testing and in situ investigations.

I. Sokolić, Ž. Skazlić, A. Szavits-Nossan

Ouvrage scientifique original

Détermination des propriétés des couches d'argile molle à l'aide des essais au piézocône

Les propriétés principales des couches d'argile molle, et la manière de formation de ces couches, sont décrites. L'accent est mis sur l'environnement dans lequel la sédimentation des couches s'est produite, et sur les processus qui se sont déroulés au cours de la sédimentation. En utilisant comme exemple les couches d'argile molle provenant de la baie de Pelješac, l'analyse des résultats d'essai au piézocône et les corrélations appropriées ont été utilisées pour déterminer les propriétés mécaniques et physiques du sol. Les valeurs obtenues ont été comparées avec celles mesurées au cours des essais en laboratoire et sur le terrain.

И. Соколич, Ж. Сказлич, А. Сзавитс-Носсан

Оригинальная научная работа

Определение свойств слоений мягкой глины способом эксперимента CPTU

Описанные главные характеристики слоений мягкой глины и способ их формирования, с отдельным описанием условий окружающей среды в которой происходила осадка, и процесса который при этом происходил. На примере слоений мягкой глины в заливе полуострова Пелешац осуществлен анализ результатов эксперимента CPTU при чем были употреблены корреляции ради определения механических и физических характеристик почвы. Полученные результатов были сравнены с результатами измеренных лабораторных исследовательских работ на местах.

I. Sokolić, Ž. Skazlić, A. Szavits-Nossan

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

Bestimmung der Eigenschaften von Weichtonschichten mit dem CPTU-Versuch

Beschrieben sind die Hauptmerkmale von Weichtonschichten und die Art deren Entstehung, mit besonderer Rückschau auf die Verhältnisse der Umgebung in denen die Sedimentierung vor sich geht und die Prozesse die sich dabei abspielen. Am Beispiel der Weichtonschichten im Golf von Pelješac führte man die Analyse der Ergebnisse des CPTU-Versuchs durch, wobei Korrelationen für die Bestimmung mechanischer und physikalischer Bodenkennzeichen benützt wurden. Die erhaltenen Werte verglich man mit den gemessenen Werten von Labor- und Geländeuntersuchungen.

Autori: **Igor Sokolić**, dipl. ing. građ., znanstveni novak; **Željana Skazlić**, dipl. ing. građ. asistent; prof. dr. sc. **Antun Szavits-Nossan**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zagreb

1 Opća svojstva mekih glina

Meke su gline vrsta tla koja ima vrlo nepovoljne mehaničke karakteristike i često su složen problem pri izvođenju geotehničkih konstrukcija. Nastale su taloženjem sitnih čestica iz suspenzije u relativno mirnim uvjetima okoliša. Prema Hightu i dr. [4] definirane su kao materijal slabe vodopropusnosti i nedrenirane čvrstoće manje od 50 kN/m^2 . Tlo je normalno konsolidirano ili blago prekonsolidirano i podvrgnuto maksimalnom *in situ* vertikalnom efektivnom naprezanju do 150 kN/m^2 . U ovome radu analizirane su naslage tla u zaljevu Pelješac koje dijelom prelaze navedene granice, međutim duž cijelog profila tlo se ponaša na način karakterističan za naslage mekih glina i zbog toga će se promatrati u istom kontekstu.

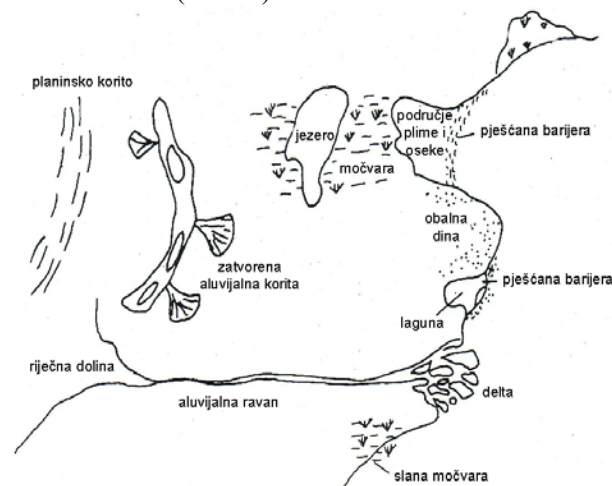
Za meke gline karakteristična je pojava osjetljivosti te proces puzanja. Osjetljivost se definira kao odnos između čvrstoća neporemećene i pregnječene gline i označava se sa S_r . Puzanje je proces u kojem materijal smanjuje volumen bez promjene efektivnoga vertikalnog naprezanja, što tokom vremena dovodi do povećanja gustoće, krutosti i čvrstoće. Talozenje novih slojeva dovodi do povećanja vertikalnog naprezanja u donjim slojevima, voda se istiskuje iz pora i materijal se stišće. Pri velikoj brzini taloženja, zbog vrlo malog koeficijenta vodopropusnosti, u mekim glinama može doći do porasta izlaznoga hidrauličkoga gradijenta porne vode koji smanjuje naprezanje ispod razine naprezanja u hidrostatičkim uvjetima pa tada govorimo o potkonsolidiranom materijalu.

Mehaničke karakteristike mekih glina ovise o raznim čimbenicima koje možemo podijeliti u sljedeće kategorije: sastav, struktura čestica, povijest naprezanja i kemijska povijest (tablica 1.).

Tablica 1. Čimbenici koji utječu na mehaničke karakteristike mekih glina prema Hightu [4]

Sastav	Struktura čestica	Povijest naprezanja	Kemijska povijest
granulometrija	orijentacija	rasterećenje	trošenje atmosferilijama
minerologija	uslojenost	isušenje	ispiranje
sadržaj organske tvari	raspucalost	starenje	promjena baze minerala
kemijski sastav porne vode	površina smicanja		vezivanje / cementacija
	Kanali korijenja		tiksotropija
	pukotine od sušenja		
uvjeti okoliša taloženja			
proces nakon taloženja			

Taloženje većine današnjih mekih glina odvijalo se u relativno mladoj geološkoj prošlosti, u razdoblju kvartera koje traje od prije 1,6 milijuna godina. Vrlo meke gline nastale su uglavnom u razdoblju od zadnjeg ledenog doba koje je završilo prije otprilike 10 000 godina (razdoblje holocena). Debljine naslaga sedimenata nastalih u tom razdoblju kreću se od 10 do 2600 m, a brzine taloženja od 0,03 do 120 m/1000 godina [17]. Neke od današnjih naslaga mekih glina završile su proces taloženja, međutim u većini slučajeva proces još uvijek teče. Uvjeti okoliša u kojem nastaju meke gline mogu biti vrlo promjenjivi, a dijelimo ih na kontinentalne, mješovite i marinske (slika 1.).



Slika 1. Vrste okoliša taloženja mekih glina prema Christoulasu [2]

Vrlo velik utjecaj na nastanak naslaga mekih glina imala je i promjena razine mora u vrijeme izmjene ledenog doba. Samo u razdoblju od zadnjega ledenog doba procjenjuje se da je razina površine mora narasla za otprilike 100 m. Istraživanjem potopljenih nastambi uz hrvatsku obalu, starosti siga u potopljenim špiljama [19] te linije utjecaja valova [1] pokazano je da je veći dio podmorja uz današnju obalu Jadranskog mora u prošlosti bio suh.

U vrijeme i nakon taloženja, meke gline mogu doživjeti čitav niz procesa koji mijenjaju njihove karakteristike (tablica 2.). Najizraženija je posljedica procesa koji se odvijaju na naslagama mekih glina prekonsolidacija koja može biti uzrokovana raznim procesima kao što su isušivanje (koje formira površinsku koru), cementacija (kod koje dolazi do spajanja kalcijeva karbonata, silikata, aluminijskih i željeznih oksida na kontaktu čestica) te starenje (kod kojeg zbog puzanja dolazi do smanjenja volumena materijala pri konstantnom vertikalnom efektivnom naprezanju te povećanja gustoće, krutosti i čvrstoće). Do izrazitog smanjenja čvrstoće meke gline te povećanja njezine osjetljivosti može doći u slučaju njezinog ispiranja kad se slana voda, u kojoj je taložena, zamijeni slatkom vodom (norveške 'brze gline')

Tablica 2. Vrste procesa nakon taloženja i njihov utjecaj na karakteristike tla prema Hightu [4]

Promjena	Proces nakon taloženja	Posljedice na tlo	
naprezanje	erozija	prekonsolidacija rasterećenjem, propadanje i smicanje	
	zbijanje valovima	prekonsolidacija	
	isušivanje	prekonsolidacija, formiranje kore, pucanje uslijed skupljanja	
	zamrzavanje-odmrzavanje	prekonsolidacija, segregacija	
	bioturbacija	iskapanje rupa i popunjavanje, formiranje kanala od korijenja, promjena propusnosti i kemijskog sastava	
	propadanje i smicanje	razvoj pukotina, zona smicanja i ploha niske čvrstoće,	
kemijski sastav	struktura čestica	trošenje	oksidacija i promjena sastava tla što uzrokuju promjenu plastičnosti, čvrstoće pregnečenog uzorka i osjetljivost
		ispiranje	promjena kemijskog sastava porne vode i izmjena iona koji uzrokuju promjenu plastičnosti, čvrstoće pregnečenog uzorka i osjetljivost
	vrijeme	cementacija	povećanje čvrstoće, redukcija inicijalne stišljivosti zbog karbonatnih veza i oksidacija
		tiksotropija	povećanje čvrstoće pri konstantnoj vlažnosti, prekonsolidacija
		starenje	smanjenje vlažnosti, povećanje čvrstoće pri konstantnom vertikalnom efektivnom naprezanju, prekonsolidacija

2 Ispitivanje statičkim prodiranjem s mjerenjem pornoga tlaka (pokus CPTU)

CPT jest terensko istražno ispitivanje u kojem se mjeri otpor tla sporom prodiranju posebne sonde na kraju serijski spojenih cijevi. Otpor se mjeri zasebno na plaštu, f_s , i na šiljku sonde, q_c . Standardna je dimenzija ploštine šiljka 10 cm^2 , a zašiljenost vrha 60 stupnjeva. Sonda u koju su ugrađeni geofoni i/ili akcelerometri za mjerenje brzine širenja uzdužnih i posmičnih valova u tlu naziva se seizmički piezokon SCPT, a sonda koja ima mogućnost mjerenja pornog tlaka piezokon CPTU.

CPTU je dokazao svoju primjenjivost u svim vrstama prirodnih tala kao što su sitnozrnata, krupnozrnata, mješovita, organska, cementirana, potkonsolidirana i kalcitna tla te naslage krede i lesa. Razne modifikacije tog

ispitivanja primijenjene su također u snijegu, zamrznutom tlu, plinskom hidratu, rezidualnom tlu, kamenoj prašini, piljevini, bentonitnom ispunu, vulkanskom tlu, pepelu pa čak i u tlu s Mjeseca i nizozemskom siru [9]. Primjenjivost CPTU-a za određivanje pojedinoga geotehničkog parametra dana je, za razne vrste tala, u tablici 3.

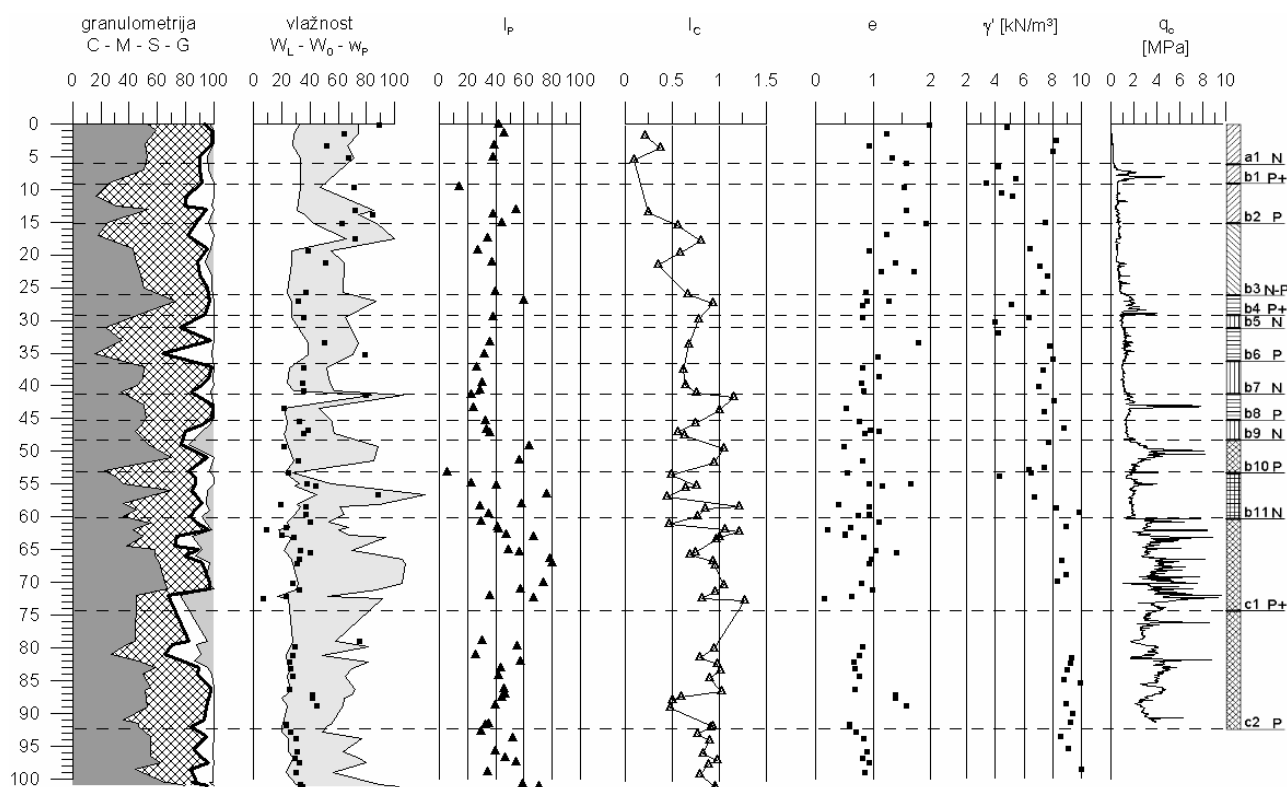
Tablica 3. Primjenjivost CPTU-a prema Lunneu [9]

Tip tla	STANJE				
	γ , I_D	ψ	K_0	OCR	S_t
glina	3-4	-	4-5	2-3	2-3
pijesak	2-3	2	4-5	4-5	-
	ČVRSTOĆA		DEFORMABILNOST		
	c_u	ϕ' , a	E , G	E_{oed}	G_0
glina	1-2	3-4	4-5	4-5	4-5
pijesak	-	2	2-4	2-4	2-3
	TEČENJE		pouzdanost ispitivanja: 1 – velika 2 – velika do srednja 3 – srednja 4 – srednja do slaba 5 – slaba		
	k	c_h			
glina	2-4	2-3			
pijesak	-	-			

γ – objamska težina, I_D – indeks zbijenosti
 ψ – parametar stanja, K_0 – koeficijent mirnog pritiska,
OCR – stupanj prekonsolidacije (σ_p/σ'_v), S_t – osjetljivost,
 c_u – nedrenirana čvrstoća,
 ϕ' – efektivni kut unutarnjeg trenja, a – adhezija
 E – Youngov modul elastičnosti, G – modul posmika,
 E_{oed} – edometarski modul stišljivosti (M)
 G_0 – modul posmika pri malim deformacijama
 k – koeficijent vodopropusnosti,
 c_h – horizontalni koeficijent konsolidacije

3 Analiza rezultata istraživanja na lokaciji mosta Pelješac

Istražni radovi na lokaciji mosta Pelješac provedeni su krajem 2004. u okviru prethodnih geotehničkih [3], geoloških [13] i geofizičkih istraživanja [5]. Širina zaljeva Pelješac na trasi planiranog mosta iznosi 2,3 km, a dubina mora oko 27 m. Geofizičkim mjerenjima ustanovljeno je da se tlo sastoji od serije horizontalnih slojeva koji leže na stijeni promjenjive dubine. Stijena se strmo spušta od obale do maksimalne dubine oko 100 m ispod morskog dna. Geotehnički istražni radovi obuhvaćali su šest istražnih bušotina, dubine 44 do 106 m ispod morskog dna, te mjerenje brzine širenja posmičnih valova u dva uzdužna i tri poprečna profila. Mjerenja su izvedena s broda tipa *Bavenit* koji je opremljen instrumentima za terenske istražne radove i laboratorijem za manje zahtjevna ispitivanja. Složenija ispitivanja provedena su na kopnu, u domaćim i inozemnim laboratorijima.



Slika 2. Geotehnički profil tla u zaljevu Pelješac iz bušotine BH-1

Na slici 2. prikazan je profil tla u bušotini BH-1, karakterističan za lokaciju, na kojem se vide glavne fizikalne karakteristike materijala. Mehaničke karakteristike materijala dane su zasebno u analizi rezultata mjerenja CPTU-a.

Na temelju provedenih ispitivanja tlo je podijeljeno u četiri karakteristične zone [3]: Zona A – do dubine 6 m ispod morskog dna, koja se sastoji od vrlo meke do meke gline visoke plastičnosti; Zona B – od 6 do 60 m dubine, koja se sastoji od slojeva srednje krute do krute visokoplastične gline i praha; Zona C – od 60 m dubine do stijene, koja se sastoji od vrlo krute do čvrste gline mjestimično cementirane; Zona D – stijena, uglavnom vapnenačka, s promjenjivim stupnjem istrošenosti i raspucanosti.

Tlo u zonama A, B i C tipično je za marinske uvjete okoliša taloženja i za lagune. Visoka plastičnost tog materijala posljedica je taloženja vrlo sitnih čestica u morskoj vodi koje su dospjele iz korita rijeke Neretve. Sloj A ističe se kao vrlo meka do srednje meka glina maslinasto sive boje u kojoj su prisutni fragmenti sitnih školjaka. Vlažnost materijala je na granici tečenja (indeks konzistencije oko 0). Sloj je normalno konsolidiran i pokazuje linearan porast nedrenirane čvrstoće s dubinom. Na dubini 5,5 m izmjerena je metodom C^{14} datiranja starost sedimenta od 8.580 godina pa se smatra da se taloženje čitavog sloja odvijalo u geološkom razdoblju holocena.

Na dnu zone A nalazi se sloj treseta debljine 1 m koji se pojavljuje u svim bušotinama. Treset je rezultat taloženja materijala u laguni koja se formirala na prijelaznoj fazi na kraju zadnjega ledenog doba.

Ispod zone A, na vrhu zone B, nalazi se sloj materijala debljine 9 m koji je prekonsolidiran. Smatra se da je prekonsolidacija rezultat erozije i trošenja tla u vrijeme niske razine mora tokom zadnje glacijalne faze.

Zona B sastoji se od srednje krute gline visoke plastičnosti u kojoj se mjestimično pojavljuju tanki slojevi s više praha i pijeska. Mjestimično se u naslagama nalaze fragmenti školjaka, osobito na dubinama od 25 do 35 m, dok su na većim dubinama (od 35 do 51 m) prisutni i kalcitni te laporoviti fragmenti. Materijal je taložen u relativno mirnoj geološkoj fazi od dubine 15 do 25 m, a na većim se dubinama pojavljuju prekonsolidirani slojevi krute gline koji naznačuju promjene u uvjetima taloženja. Starost materijala od 17.100 godina, izmjerena na dubini od 38,5 m, odgovara geološkom razdoblju pleistocena i upućuje na prosječnu brzinu sedimentacije od 2 mm na godinu. Općenito je zona B normalno konsolidirana, jedinična težina i nedrenirana čvrstoća povećavaju se linearno s dubinom, a lokalno se pojavljuju skokovi u prekonsolidiranim slojevima. Na dnu zone B, na dubini 60 m, nalazi se vidljiva promjena u stratigrafiji. Materijal prelazi u vrlo krutu do čvrstu glinu visoke plastičnosti s tankim cementiranim slojevima i kalcitnim fragmen-

tima veličine šljunka. Indeks konzistencije materijala približno je 1,0, što znači da se glina nalazi na granici plastičnosti. Čitava je zona prekonsolidirana zbog starenja i cementacije materijala i stoga su joj čvrstoća i krutost znatno veći.

U ovome su radu analizirani rezultati CPTU-a prema iskustvima u sitnozrnatim materijalima [9]. Ako promotrimo otpor šiljka q_c u CPTU profilu tla (slika 2.) vidimo da on pokazuje trend linearnog povećanja s dubinom, ali s izrazitim lokalnim odstupanjima. Poznato je da pojava krupnozrnatih frakcija povećava otpor prodiranju CPTU sonde, međutim ovdje to nije slučaj. Na primjer, na slici 2. možemo vidjeti da se veća količina pijeska pojavljuje na dubini od 12 i 31 m, ali ne i veći otpor prodiranju sonde. Nasuprot tomu veći se otpor šiljka pojavljuje na dubinama 9 i 45 m gdje krupnozrnate frakcije uopće nisu prisutne, što upućuje na činjenicu da je prekonsolidacija dominantniji čimbenik na otpor šiljka od sastava tla. Iz tog je razloga profil tla na promatranoj lokaciji podijeljen na zone u kojima se pojavljuju istaci u CPTU profilu otpora šiljka i na zone gdje on pokazuje linearni trend povećanja s dubinom. Na taj je način prethodno opisana zona B podijeljena na još 11 dijelova, a zona C na dva (slika 2.). Izraženiji istaci pojavljuju se relativno pravilno u svim bušotinama, pa se smatra da se zaključci i opažanja provedeni u analizi profila BH-1 mogu primijeniti i na ostale profile.

3.1 Obujamska težina tla

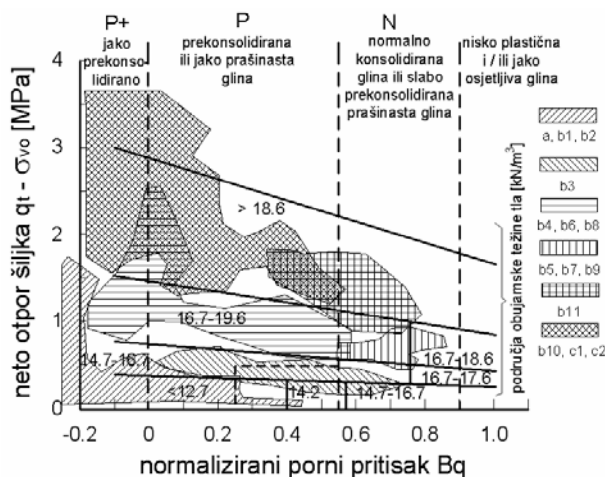
Na promatranoj je lokaciji obujamska težina tla mjerena neposredno na uzorcima tla (uzorci uporabljeni u troosnom ispitivanju i u edometru) te je proračunana za izmjerenu vlažnost w uz pretpostavku potpune zasićenosti uzorka vodom i relativne obujamske težine čvrstih čestica (u odnosu na obujamsku težinu vode) od $G_s = 2,7$.

Obujamska težina tla može se odrediti i iz rezultata mjerenja CPTU-a uporabom dijagrama koji su, na temelju istraživanja švedskih, norveških i engleskih glina, predložili Larsson i Mulabdić [8]. Na istom dijagramu moguće je procijeniti i stanje prekonsolidacije materijala. Pri uporabi dijagrama potrebno je odrediti normalizirani porni tlak prema izrazu:

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (1)$$

Gdje je u_0 *in situ* tlak podzemne vode (proračunan kao hidrostastički tlak od površine mora), u_2 porni tlak iza šiljka sonde, u_{v0} vertikalno naprezanje u tlu (određeno integracijom težine tla dobivene u laboratoriju), q_t otpor šiljka korigiran za porni tlak iza šiljka i koeficijent površine šiljka a , prema [9]:

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (2)$$



Slika 3. Analiza težine tla i prekonsolidacije prema Larssonu i Mulabdiću [8]. Tlo je analizirano po zonama definiranim na slici 2.

Dijagram je punim linijama podijeljen na polja iste obujamske težine tla, a vertikalnim isprekidanim linijama na polja jednake prekonsolidacije (slika 3.). Analizom rezultata na predmetnoj lokaciji dobiven je rasap obujamske težine tla u cijelom rasponu dijagrama, međutim očito je grupiranje rezultata u zonama koje su prethodno definirane na temelju otpora šiljka u CPTU-u, što potvrđuje valjanost takve podjele. Redovito u zonama gdje se pojavljuju istaci, materijal je prekonsolidiran i ima veću obujamsku težinu. U ovome su radu određenom stanju prekonsolidacije u dijagramu dodijeljeni simboli koji su uporabljeni i na ostalim slikama i dijagramima: N za normalno konsolidirano, P za prekonsolidirano i P+ za jako prekonsolidirano stanje.

3.2 Stupanj prekonsolidacije tla

Normalno konsolidirane zone tla mogu se odrediti za korigirani otpor šiljka poznavanjem vertikalnoga efektivnog naprezanja u tlu, prema Lunneu [9]:

$$q_t = 2,5 \text{ do } 5,0 \times \sigma'_{v0} \quad (3)$$

Ako je vrijednost q_t veća od dane zone, glina se smatra prekonsolidiranom, a ako je manja, smatra se potkonsolidiranom. Rezultati analize pokazuju da je tlo prekonsolidirano upravo na mjestima istaka otpora šiljka profila CPTU-a (slika 4.a).

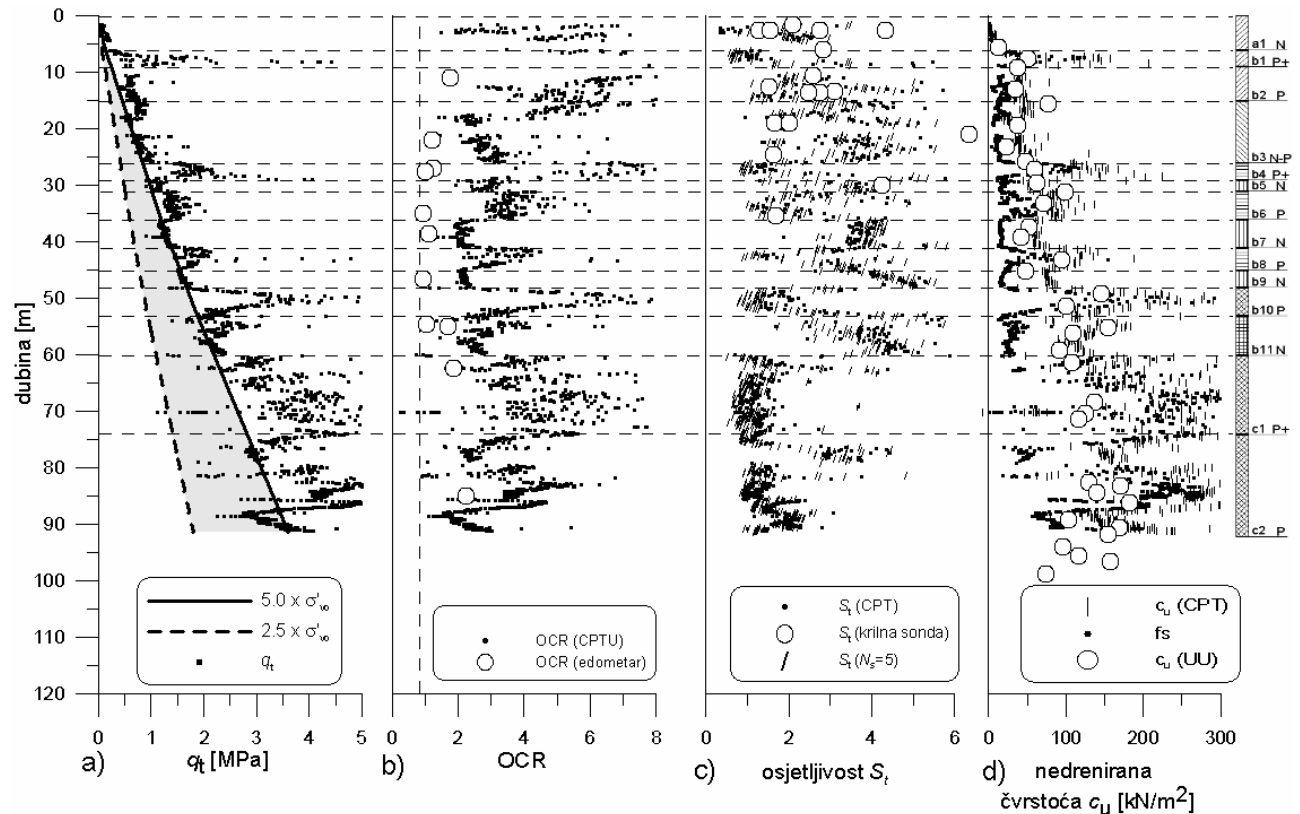
Mayne [10] je za određivanje stupnja prekonsolidacije OCR predložio analizu rezultata CPTU-a koja se zasniva na teoriji širenja tla pri prodiranju šiljka i na teoriji kritičnog stanja:

$$OCR = 2 \left[\frac{1}{1,95M + 1} \left(\frac{q_t - u_2}{\sigma'_{v0}} \right) \right]^{1,33} \quad (3)$$

gdje je M nagib linije kritičnog stanja, $M = 6 \sin \varphi' / (3 - \sin \varphi')$, a φ' efektivni kut unutarnjeg

trenja. Gornjim izrazom proračunan je OCR iz rezultata mjerenja CPTU-a primjenom $\varphi' = 30^\circ$ koji je određen ispitivanjem tla CID troosnim ispitivanjem (slika 4.b). Na dijagramu se jasno izdvajaju prekonsolidirane zone tla, međutim vrijednosti su izrazito velike. U normalno

vertikalnog napreznja (puna linija). Korelirane su vrijednosti napreznja prekonsolidacije približno jednake vertikalnom efektivnom napreznju u zonama normalno konsolidiranog tla ($OCR = 1$) i korelirane vrijednosti dobro se poklapaju s izmjerenim.



Slika 4. Prekonsolidacija i osjetljivost tla

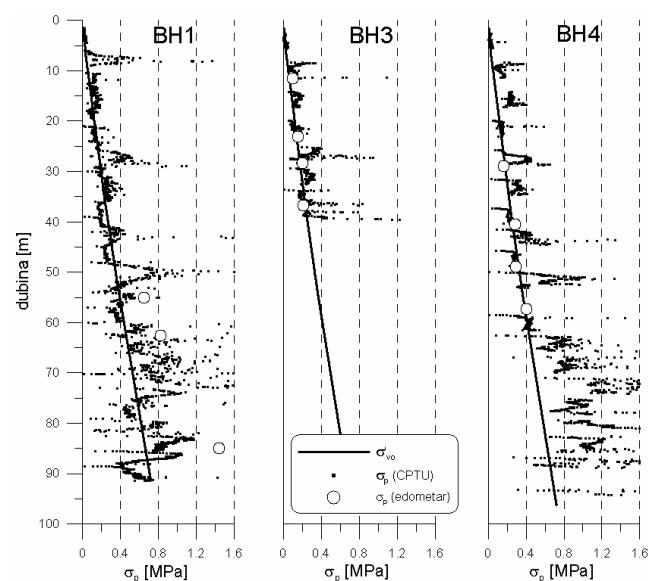
konsolidiranoj zoni tla vrijednost prekonsolidacije kreće se u granicama $1,5 < OCR < 2,0$, u prekonsolidiranoj zoni $3,5 < OCR < 6,0$ te u jako prekonsolidiranoj $6 < OCR < 10$. Treba napomenuti da je analiza osjetljiva na vrijednost efektivnog kuta trenja tla te da u ovom primjeru ne daje vrijednost $OCR = 1$ u normalno konsolidiranim zonama. U usporedbi s laboratorijski određenim vrijednostima koeficijenta OCR, određenog na 11 uzoraka u edometru Casagrandeovom metodom, primijenjena korelacija daje približno dva puta veće vrijednosti.

3.3 Napreznje prekonsolidacije tla

Larsson i Mulabdić [8] analizirali su utjecaj raznih čimbenika na pritisak prekonsolidacije primjenom rezultata istraživanja CPTU-a te predložili zakonitost:

$$\sigma_p \approx 0,305(q_t - \sigma_{vo}) \quad (4)$$

Primjenom dane zakonitosti određen je stupanj prekonsolidacije na promatranoj lokaciji za tri bušotine (slika 5.). Na istoj slici prikazan je stupanj prekonsolidacije po Casagrandeovoj metodi te prikaz vrijednosti efektivnoga



Slika 5. Analiza napreznja prekonsolidacije materijala na temelju rezultata CPTU-a prema Larssonu i Mulabdiću [8]

3.4 Koeficijent bočnog naprezanja (K_0)

Terenskim CPTU-om u današnje vrijeme nije moguće pouzdano izmjeriti horizontalna naprezanja u tlu niti procijeniti koeficijent bočnog tlaka K_0 . Međutim, gruba se procjena može dobiti primjenom korelacije koju su predložili Kulhawy i Mayne [6]:

$$K_0 = 0,1 \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \right) \quad (5)$$

U zonama koje su prethodno definirane kao normalno konsolidirane (N) vrijednost K_0 jest približno 0,25, u prekonsolidiranim zonama (P) $K_0 \approx 0,5$, a u jako prekonsolidiranim zonama (P+) $K_0 > 1,0$.

3.5 Nedrenirana čvrstoća (c_u)

Pri određivanju nedrenirane čvrstoće tla iz CPTU-a razlikujemo dva pristupa - jedan koji se bazira na teorijskim rješenjima i drugi koje se zasniva na empiriji. Prodiranje šiljka je izrazito kompleksna pojava pa se sva teorijska rješenja zasnivaju na nekim pretpostavkama. Na taj način pojednostavnjuje se realno ponašanja tla, mehanizam sloma i rubni uvjeti, ali su rješenja često čvrsto vezana za rezultate laboratorijskih i terenskih ispitivanja. Teorijska rješenja osiguravaju dobre okvire za bolje razumijevanje ponašanja realnog tla, međutim postoje mnoga ograničenja zbog kojih se u praksi češće primjenjuju empirijske korelacije.

Empirijska interpretacija nedrenirane čvrstoće c_u iz rezultata CPTU-a može se prema Lunneu [9] grupirati u tri glavne kategorije:

- procjena c_u primjenom 'totalnog' otpora šiljka

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (6)$$

- procjena c_u primjenom 'efektivnog' otpora šiljka

$$c_u = \frac{q_t - u_2}{N_{ke}} \quad (7)$$

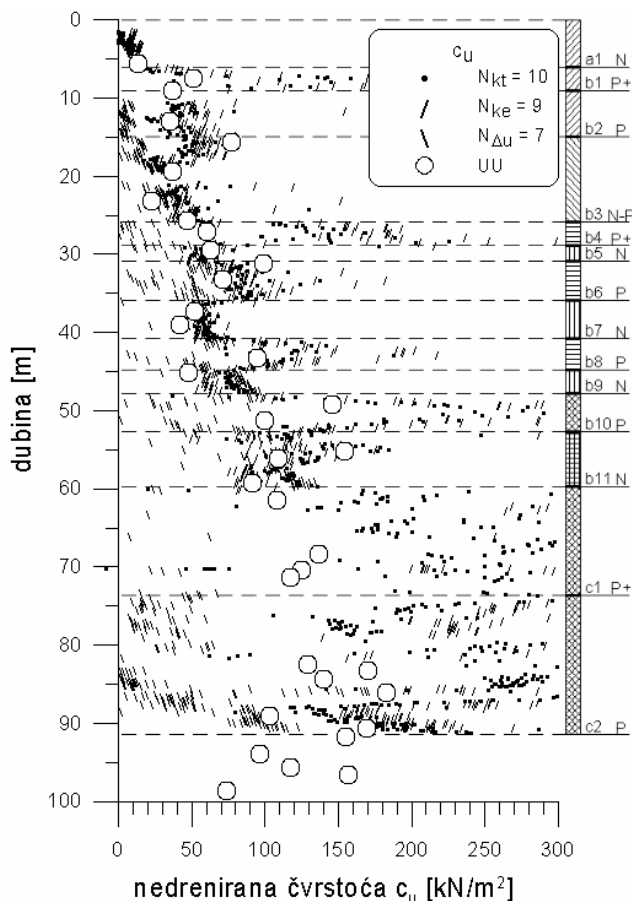
- procjena c_u primjenom 'izlaznog' pornog tlaka

$$c_u = \frac{u_2 - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (8)$$

gdje su N_{kt} , N_{ke} , $N_{\Delta u}$ empirijski dobiveni koeficijenti koji se mogu procijeniti na temelju normaliziranoga pornog tlaka B_q . U zonama koje su prethodno definirane kao normalno konsolidirane do prekonsolidirane, vrijednost koeficijenta B_q jest od 0,4 do 0,8. U tom rasponu vrijednost empirijskih korelacijskih faktora N iznose:

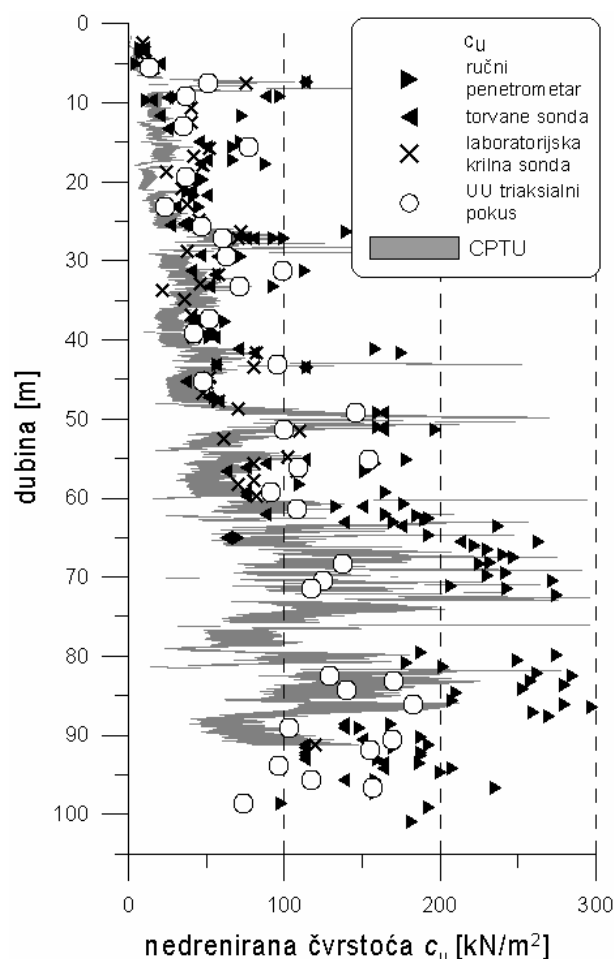
- N_{kt} u rasponu od 9 do 14 → odabrano 10
- N_{ke} u rasponu od 4 do 9 → odabrano 9
- $N_{\Delta u}$ u rasponu od 5-8 → odabrano 7.

Ako usporedimo korelirane vrijednosti s vrijednostima dobivenim laboratorijski u UU (*undrained uniaxial*) troosnom ispitivanju, vidimo da se one dobro poklapaju u zonama koje su definirane kao normalno konsolidirane (slika 6.). U prekonsolidiranim zonama dolazi do odstupanja, pri čemu vrijednosti korelirane prema totalnom i efektivnom otporu šiljka poprimaju veće vrijednosti (na strani nesigurnosti), dok one korelirane prema izlaznim pornim tlakovima poprimaju znatno manje vrijednosti (nerealno male, pa čak i negativne).



Slika 6. Nedrenirana čvrstoća materijala izmjerena u laboratoriju (UU troosno ispitivanje) i na terenu (korelacija prema CPTU-u)

S aspekta projektiranja poželjno je za predmetnu lokaciju statističkom obradom podataka definirati srednju vrijednost korelacijskog faktora, sa standardnom devijacijom za neku od metoda, koji bi vrijedio za cijeli profil. U ovim je istražnim radovima nedrenirana čvrstoća korelirana u odnosu prema rezultatima UU troosnog ispitivanja, a korelacijski faktor definiran je za korelacijsku kategoriju 'totalnog' otpora šiljka, $N_{kt} = 23 \pm 7$ [3]. Opisano područje vrlo dobro prati trend rasporeda nedrenirane čvrstoće u profilu određene svim primijenjenim metodama ispitivanja i poprima nešto manju vrijednost, što je sa stajališta projektiranja na strani sigurnosti (slika 7.).



Slika 7. Nedrenirana čvrstoća ispitana terenskim i laboratorijskim pokusima u svim bušotinama na lokaciji (ručni penetrometar, torvane sonda, laboratorijska krilna sonda i UU troosno ispitivanje) te korelirana prema CPTU-u za 'totalni' otpor šiljka, $N_{kt} = 23 \pm 7$

3.6 Osjetljivost

Osjetljivost gline definirana je kao omjer nedrenirane čvrstoće neporemećenog i pregriječenog uzorka. Neporemećenost uzorka uvjetuje da je najpogodnije ispitivanje osjetljivosti terenskim pokusima. Na promatranoj lokaciji osjetljivost je mjerena krilnom sondom na 17 uzoraka do dubine maksimalno 35 m (slika 4.c). Neporemećena nedrenirana čvrstoća određena je na temelju otpora tla pri okretanju sonde za prvih 90° , a pregriječena na temelju otpora tla nakon deset okretaja. Analizom rezultata CPTU-a osjetljivost je procijenjena na dva načina. Prema Lunneu [9] na temelju omjera korelirane nedrenirane čvrstoće c_u , koja odgovara vršnoj čvrstoći i izmjerenog otpora trenja po plaštu f_s , koji odgovara pregriječenoj čvrstoći gline (slika 4.c):

$$S_t = \frac{c_{u,korelirano}}{f_{s,izmjereno}} \quad (9)$$

Prema Schmertmannu [16] primjenom koeficijenta trenja $R_f = f_s/q_t$ i korelacijskog koeficijenta N_{kt} (slika 4.d):

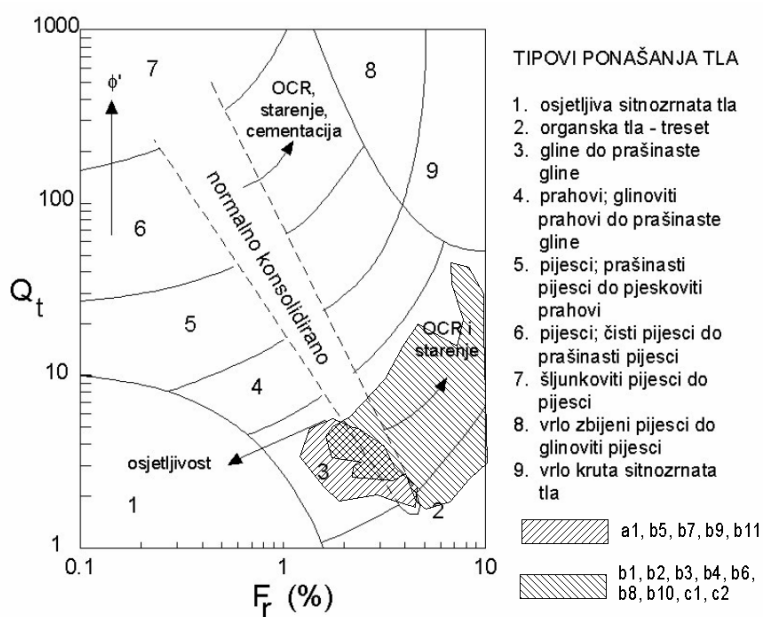
$$S_t = \frac{N_s}{R_f} \quad (10)$$

U ovim analizama nedrenirana čvrstoća određena je metodom 'totalnog' otpora šiljka, a vrijednost korelacijskog koeficijenta prema Lunneu [9], $5 \leq N_s = 5 < 10$. Na slici 4.d vidimo da se u normalno konsolidiranim zonama vrijednost korelirane nedrenirane čvrstoće c_u i otpor na plaštu CPTU sonde f_s znatno razilaze, dok se u prekonsolidiranim zonama približavaju. Sukladno tomu, u normalno konsolidiranim zonama izražena je osjetljivost, dok je njezina vrijednost u prekonsolidiranim zonama oko 1 (slika 3.c). Korelacija se dovoljno dobro poklapa s izmjerenim vrijednostima pa se smatra da daje pouzdane rezultate i u dijelu profila gdje ne postoje izravna mjerenja.

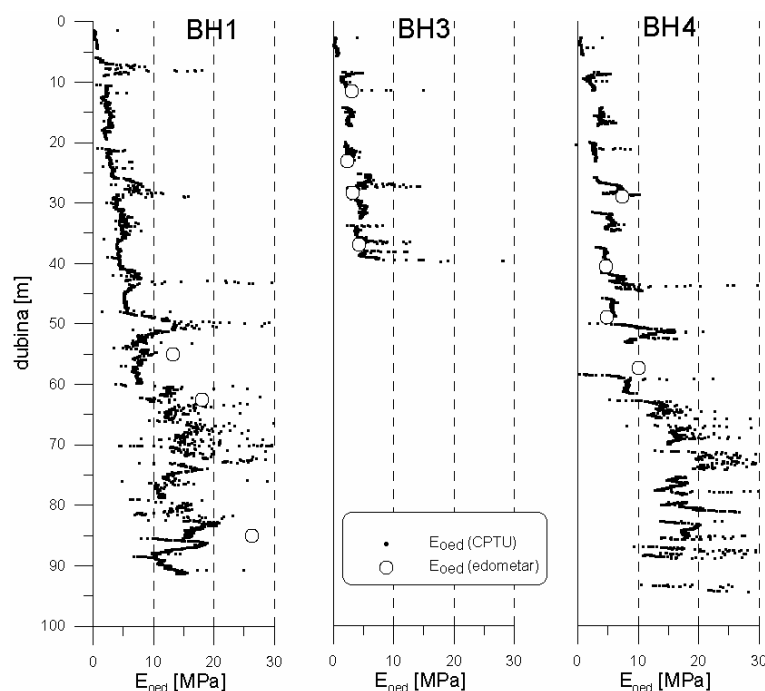
Osjetljivo ponašanje materijala moguće je grubo procijeniti koristeći se klasifikacijskim dijagramom tipova ponašanja tla za CPTU prema Robertsonu [14]. Za njegovu primjenu potrebno je proračunati normalizirani otpor šiljka i normalizirani faktor otpora:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}}; \quad (11)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_{vo}} \times 100\% \quad (12)$$



Slika 8. Tipovi ponašanja materijala prema Robertsonu [13]



Slika 9. Modul stišljivosti koreliran prema rezultatima CPTU-a i mjeren u edometru

Na dijagramu (slika 8.), materijal je na promatranoj lokaciji klasificiran kao glina do prašinstava gline, što odgovara laboratorijskoj klasifikaciji. Zone materijala koje su prethodno definirane kao normalno konsolidirane upadaju u pripadna polja na dijagramu i pokazuju porast osjetljivosti tla. Prekonsolidirane zone materijala upadaju u polja koja pokazuju povećanje koeficijenta prekonsolidacije i utjecaj procesa starenja koji smanjuju osjetljivost tla.

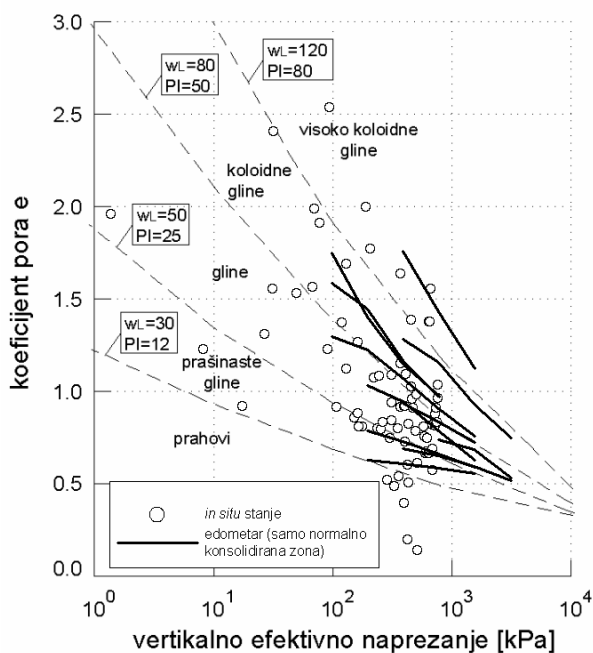
3.7 Stišljivost tla

Stišljivost tla na predmetnoj lokaciji ispitana je edometarskim ispitivanjem na 11 neporemećenih uzoraka (slika 10.). Tangentni edometarski modul stišljivosti E_{oed} , koji odgovara vertikalnom naprežanju u tlu na dubini s koje je izvađen uzorak, uspoređen je s vrijednostima dobivenim korelacijama prema mjeranjima CPTU-a (slika 9.):

$$E_{oed} = \alpha_m \cdot q_c \quad (13)$$

gdje je vrijednost korelacijskog koeficijenta odabrana prema preporukama Sanglerata [15] za visokoplastične gline i prahove $2 < \alpha_m = 4 < 6$. Rezultati analize pokazuju vrlo dobro poklapanje izmjerenih i koreliranih vrijednosti uporabom istog korelacijskog koeficijenta za sve tri bušotine. Na ovom primjeru posebno se ističe pogodnost CPTU-a za popunjavanje profila između mjerenja na uzorcima izvađenim iz bušotina.

Taloženje naslage horizontalno uslojenog materijala može se promatrati i kao 'prirodni' edometar, jer se element tla na nekoj dubini vertikalno deformira zbog opterećenja novih slojeva bez mogućnosti bočnog širenja. Rezultat su takvog 'pokusa' uređeni parovi koeficijenta pora tla na nekoj dubini i pripadnoga vertikalnog efektivnog naprežanja. U slučaju da nema promjena u uvjetima taloženja, rezultat takvog ispitivanja teorijski bi dao glatku krivulju koja odgovara laboratorijskoj edometarskoj krivulji za taj materijal. Prema Lambeu i Whitmanu [7], uređeni parovi koeficijenta pora i vertikalnih efektivnih naprežanja nekog tla nalaze se u određenim granicama, ovisno o njegovoj granici tečenja i indeksu plastičnosti (polja u dijagramu na slici 10.). Rezultati 'prirodnog' edometra grupiraju se u očekivanim poljima na dijagramu, gline do koloidne gline, a u istim poljima grupiraju se i rezultati edometarskih ispitivanja.



Slika 10. Rezultati laboratorijskog edometra (samo u normalno konsolidiranom području) i 'prirodnog' edometra prikazani na dijagramu prema Lambeu i Whitmanu [7]

3.8 Posmična krutost pri malim deformacijama

Kontinuirano mjerenje posmičnih valova na lokaciji provedeno je spektralnom analizom površinskih valova (SASW) do dubine oko 40 m, izravnim mjerenjem brzine posmičnih valova seizmičkim piezokonom (SCPT) do dubine svega 25 m i mjerenjem niz bušotinu (downhole metoda) do dubine 80 m. Na temelju

izmjerenih brzina posmičnih valova moguće je, poznavanjem gustoće materijala ρ proračunati modul posmika materijala pri malim deformacijama prema izrazu:

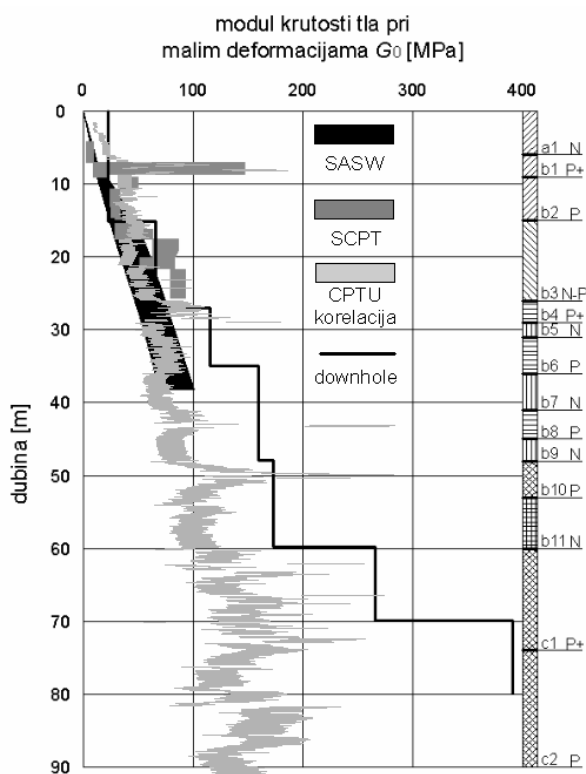
$$G_0 = \rho \cdot V_s^2 \quad (14)$$

Mayne i Rix [11] pokazali su da modul posmika pri malim deformacijama ovisi o koeficijentu pora e_0 i korigiranom otporu šiljka q_t i može se za većinu glina odrediti prema izrazu:

$$G_0 = 99,5(p_a)^{0,305} \frac{(q_t)^{0,695}}{(e_0)^{1,130}} \quad (15)$$

gdje je p_a referentni atmosferski tlak.

Na slici 11. prikazane su izmjerene i korelirane vrijednosti. Da bi se provela korelacija, potrebno je za svaki podatak otpora šiljka odrediti pripadni koeficijent pora na istoj dubini. S obzirom da je profil koeficijenta pora vrlo izlomljen, analiza je provedena za područje u kojem se on uglavnom kreće $0,75 < e_0 < 1,0$. Predložena korelacija vrlo se dobro poklapa s izmjerenim vrijednostima u normalno konsolidiranom materijalu, dok je njezina primjenjivost u prekonsolidiranoj zoni na dubini ispod 60 m vrlo upitna.



Slika 11. Modul krutosti tla pri malim deformacijama G_0 dobiven mjerenjima na terenu (SASW, SCPT, i downhole) i koreliran prema rezultatima CPTU-a

4 Zaključak

U ovome je radu pokazano da je analizom CPTU-a moguće pouzdano odrediti velik broj mehaničkih i fizičkih karakteristika naslage meke gline, međutim, prethodno je vrlo važno pravilno podijeliti profil tla u zone sličnih karakteristika. Predložena podjela profila na zone u kojima se pojavljuju istaci u profilu otpora šiljka CPTU-a pokazala su se vrlo dobrom, za razliku od podjele prema granulometrijskom sastavu tla ili konzistentnom stanju. Izdvojene zone dosljedno pokazuju isti tip ponašanja tla u svim primijenjenim korelacijama. S obzirom na velik broj primijenjenih korelacija, ne postiže se samo sigurnost u valjanost pojedine korelacije, već i u kvalitetu izvedenih laboratorijskih i terenskih istražnih radova.

Profil obujamske težine dobiven laboratorijskim mjerenjem može se provjeriti i nadopuniti dijagramom prema Larssonu i Mulabdiću (slika 3.). Dijagram nije osjetljiv na oscilacije izmjerene obujamske težine jer se one u analizi integriraju po dubini. Također dijagram omogućuje procjenu stanja prekonsolidacije u tlu. Vrijednost koeficijenta prekonsolidacije moguće je procijeniti korelacijom prema Maynu (4) za koju se u ovom radu pokazalo da daje dobar uvid u relativno stanje prekonsolidacije pojedinih zona u odnosu na normalno konsolidirane zone, međutim korelirane vrijednosti koeficijenta prekonsolidacije veće su od izmjerenih otprilike dva puta. Nedostatak korelacije je i taj što se ona temelji na relativno složenom ispitivanju efektivnog kuta unutarnjeg trenja u CID troosnom ispitivanju. Stanje prekonsolidacije moguće je dodatno provjeriti relativno jednostavnom korelacijom prema Lunneu (3) te dijagramom prema Robertsonu (slika 8.). Povoljno je što se dijagram prema Robertsonu temelji na vrijednostima koje se izravno mjere u CPTU-u te na vertikalnim efektivnim naprezanjima u tlu (koja se pouzdano mogu proračunati za horizontalno usloženo tlo i hidrostatičke uvjete podzemne vode). Isti dijagram pokazao se dosljednim i u klasifikaciji tla (slika 8.). Pri određivanju područja osjetljivosti u mekim glinama najbolje je usporediti dijagrame otpora trenja na plaštu i korelirane nedrenirane čvrstoće (slika 4.d). U istu svrhu dobro se može upotrijebiti dijagram prema Robertsonu (slika 8.), za razliku od dijagrama prema Larssonu i Mulabdiću kod kojeg u ovom primjeru nije registrirano osjetljivo ponašanje tla (slika 3.). Na promatranoj lokaciji korelacija za određivanje osjetljivosti prema Lunneu (9) pokazala je vrlo dobro poklapanje s izmjerenim vrijednostima, dok je u korelaciji prema Schmertmanu (10) potrebno kalibrirati korelacijski koeficijent (kalibrirana vrijednost $N_s=5$ nalazi se u predloženim granicama).

Krutost i nedrenirana čvrstoća mekih glina najvažniji su parametri u projektiranju geotehničkih konstrukcija, međutim pri njihovu određivanju korelacijama iz ispitiva-

nja CPTU-a treba biti vrlo oprezan. U radu je prikazano da se korelacijama prema Lunneu [9] može procijeniti nedrenirana čvrstoća tla na više načina, međutim predloženi korelacijski faktori vrijede samo u normalno konsolidiranim zonama (npr. vrijednost koeficijenta prema preporukama Lunnea [9] $N_{kt}=10$). Međutim, da bi se dobila jedinstvena korelacija, za cijeli profil tla na danoj lokaciji, potrebno je kalibrirati korelacijske faktore s pomoću rezultata izravnih mjerenja (za isti primjer korelacijski faktor dobiven statističkom obradom podataka [3] iznosi $N_{kt}=23\pm 7$). Potreba za kalibracijom korelacijskog koeficijenta izražena je i na primjeru određivanja edometarskog modula stišljivosti (13), kod kojeg se preporuka prema Sangleratu [15] pokazala pouzdanom. Takve ka-

libracije vrlo su korisne jer je njima moguće dobiti gotovo kontinuirani prikaz vrijednosti parametra po dubini, što omogućuje bolju analizu slojeva materijala na mjestu gdje nisu izvedeni 'točkasti' laboratorijski pokusi (npr. profil modula stišljivosti, slika 9.). Posmična krutost mekih glina pri malim deformacijama može se procijeniti primjenom korelacije prema Mayneu i Rixu (15). Nedostatak korelacije je potreba poznavanja koeficijenta pora tla koji može jako varirati po dubini, međutim u radu se pokazalo da korelacija daje mali rasap rezultata za relativno širok raspon koeficijenta pora $0,75 < e_0 < 1,0$. Također pokazalo se da korelacija nije dobra u dubljim, jako prekonsolidiranim slojevima materijala (zona C – krute do čvrste gline, mjestimično cementirane).

LITERATURA

- [1] Benac, Č.; Juračić, M.; Bakran-Petricoli, T.: *Submerged tidal notched in the Rijeka Bay NE Adriatic Sea: indicators of relative sea-level change and of recent tectonic movements*, 2004. *Marine Geology* 212, 21-33
- [2] Christoulas S.; Kalteziotis N.; Tsiambaos G.; Sabatakakis N.: *Engineering geology of soft clays. Examples from Greece*, Bulletin of public works research center "Embankments on soft clays", 1-31, 1987. Athens
- [3] CROSCO, *Peljesac Bridge Geotechnical Investigations*, Final report; Volume 1: Text, Tables, Figures and Drawings. 2005.
- [4] Hight D.W.; Jardine R.J.; Gens A.: *The behaviour of soft clays*, Bulletin of public works research center "Embankments on soft clays", 33-158, 1987. Athens
- [5] Institut građevinarstva Hrvatske (IGH), *Most-kopno – poluotok Pelješac, Geofizička istraživanja, Izvješće o mjerenju brzina S vala u bušotini B-4*, Report No. U0054/04, 2004.
- [6] Kulhawy, F.H.; Mayne, P.H.: *Manual on estimating soil properties for foundation design*, Electric Power Research Institute, 1990. EPRI
- [7] Lambe, T.W., Whitman, R.V. *Soil Mechanics*, Wiley, New York, 1969.
- [8] Larsson, R.; Mulabdić, M.: *Piezcone tests in clay*, Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Report 42, 1991.
- [9] Lunne, T.; Robertson, P.K.; Powell, J.J.M.: *Cone penetration Testing in Geotechnical Practice*, Black Academic & Professional, 1997.
- [10] Mayne, P.W.: *Determination of OCR in clays by piezcone tests using cavity expansion and critical state concepts*, *Soils and Foundations* 31(2), 65-76, 1991.
- [11] Mayne, P.W.; Rix, J.G.: *Gmax-qc relationship for clays*, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 16(1), 54-60, 1993.
- [12] Mitchell, K.J.; Soga, K.: *Fundamentals of soil behaviour*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2005.
- [13] Pavelić, D.: *Stratigrafska determinacija naslaga Jadranskog podmorja u okolici Pelješca*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, 2005.
- [14] Robertson, P.K.: *Soil classification using the cone penetration test*, *Canadian Geotechnical Journal* 27(1), 151-158, 1990.
- [15] Sanglerat, G.: *Penetrometer and soil exploration*, Elsevier, Amsterdam, 1972.
- [16] Schmertmann, J.H.: *Guidelines for cone penetration test, performance and design*, US Federal Highway Administration, Washington, DC, Report, FHWA-TS-78-209, 1978.
- [17] Skempton, A.W.: *The consolidation of clays by gravitational compaction*, *Jnl. Of Geol. Soc. of London*, 125, 373-412, 1970.
- [18] Stigter, H.C.; Zwaan, G.J.; Langone, L.: *Differential rates of benthic foraminiferal test production in surface and subsurface habitats in the southern Adriatic Sea*, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 149, 67-88, 1999.
- [19] Surić, M.; Juračić, M.; Horvatinčić, N.; Bronić, I.K.: *Late Pleistocen-Holocene sea-level rise and plattern of costal karst inundation: records from submerged speleothems along the Adriatic Coast (Croatia)*, *Marine Geology* 214, 163-175, 2003.