

PRIMENA *IN SITU* GEOTEHNIČKIH METODA KAO OSNOVNOG ALATA ZA OPTIMIZACIJU GRAĐEVINSKIH KONSTRUKCIJA

APPLICATION OF *IN SITU* GEOTECHNICAL METHODS AS A BASIC TOOL FOR CIVIL ENGINEERING STRUCTURE OPTIMIZATION

Dušan Berisavljević

Originalni naučni rad
10.5937/IASPN25117B

Apstrakt: Ekspanzija građevinskog sektora u Srbiji pozitivno se odražava na razvoj geotehničkog inženjerstva u smislu sve češće upotrebe savremenih metoda koje se koriste za karakterizaciju terena. Reč „savremenih” ovde ima relativno značenje, jer su neke metode koje se odnedavno koriste kod nas u drugim zemljama primenjuju znatno duže. Neke od tih metoda su Menardov presiometar, seizmički dilatometar, opit statičke penetracije sa električnim i/ili pijezokonususom i dr. Nažalost, u rutinskim istraživanjima još uvek su u upotrebi paleo-opiti kao što je opit statičke penetracije s mehaničkim konususom i standardni penetracioni opit, kome se daje preveliki značaj. Tema ovog rada je da se proširi svest inženjera o kvalitetu i pouzdanosti podataka koji se dobijaju savremenim penetracionim i presiometarskim opitima. Takođe, prikazano je nekoliko primera „geotehničke optimizacije” građevinskih konstrukcija na kojima je autor imao priliku da učestvuje.

Ključne reči: Menardov presiometar, seizmički dilatometar, optimizacija, geotehnika

Abstract: The expansion of the construction sector in Serbia has had a positive impact on the development of geotechnical engineering in terms of the increasingly frequent use of modern techniques to characterize the terrain. The word “contemporary” has a relative meaning here, because some methods that have recently been used in Serbia, in other countries have been applied for much longer. Some of those methods are the Menard pressiometer, seismic dilatometer, static penetration test with electric and/or piezocone, etc. Unfortunately, paleo-tests such as the static penetration test with a mechanical cone and the standard penetration test, which are given too much importance, are still used in our routine research. The topic of this work is to increase engineers’ awareness about the quality and reliability of data obtained by modern penetration and expansion tests. Also, several examples of “geotechnical optimisation” of building constructions, in which the author had the opportunity to participate, are shown.

Key Words: Menard pressuremeter, seismic dilatometer, optimisation, geotechnics

UVOD

Kod nas je postala praksa da se tokom terenskih kampanja koriste savremeni multiparametarski penetracioni opiti kao što su opit statičke penetracije s pi-jezokonusom (CPTu) i seizmički dilatometar (SDMT). Takođe, u poslednjih nekoliko godina sve je češća upotreba Menardovog presiometra kao jednog od alata za karakterizaciju terena. U ovom radu terenom smatramo tlo i podzemnu vodu. Stenska masa neće biti predmet izučavanja ovog članka. Rezultati laboratorijskih ispitivanja biće pomenuti samo u obimu koji je dovoljan za razumevanje članka.

Prednosti terenskih metoda kod određivanja svojstava geotehničkih sredina u poređenju sa istražnim bušenjem i laboratorijskim ispitivanjima je očigledan kada se govori o brzini izvođenja, brzini obrade podataka i dobijanju finalnih rezultata. Tako, na primer, iz jednog CPTu opita koji ima učestalost merenja po dubini 1–2 cm, za 1 m dužni vertikalnog profila dobija se 50–100 podataka za svaki od parametara koji se mere. Zato se CPTu često naziva i kvazikontinualni test penetracije. Količina informacija koja se dobija iz terenskih opita znatno je veća u odnosu na laboratorijska ispitivanja. S druge strane, laboratorijski uzorci uobičajenih dimenzija predstavljaju samo mali element tla unutar terena koji ima izraženu prostornu varijabilnost po svim geotehničkim svojstvima. Iz toga sledi da je veoma teško pouzdano predvideti ponašanje neke geotehničke sredine iz rezultata laboratorijskih ispitivanja bez obzira na to koliko kvalitetno su ona izvedena. S druge strane, terenski opiti angažuju znatno veću zapreminu tla pa je i samo predviđanje ponašanja geomaterijala pouzdanije i bliže „istini”. Na slici 1 je prikazan Menardov presiometar s kontrolnom jedinicom i uzorak u triaksijalnoj ćeliji u svrhu razumevanja razmere problema. Zapremina vode potrebna da se izvrši maksimalna ekspanzija centralne ćelije presiometarske sonde iznosi 700 cm^3 što je oko deset puta veća zapremina od zapremine triaksijalnog uzorka. Pored toga, presiometar napreže tlo i u dalekom polju gde je deformacija elastična. Prednost ispitivanja u laboratoriji je ta što je moguće kontrolisati putanje napona prilikom ispitivanja i ciljano odrediti parametre tla za konkretnu inženjersku situaciju. U svakom slučaju i dalje je opšte prihvaćeno da su laboratorijska ispitivanja referentna za razumevanje ponašanja geomaterijala.

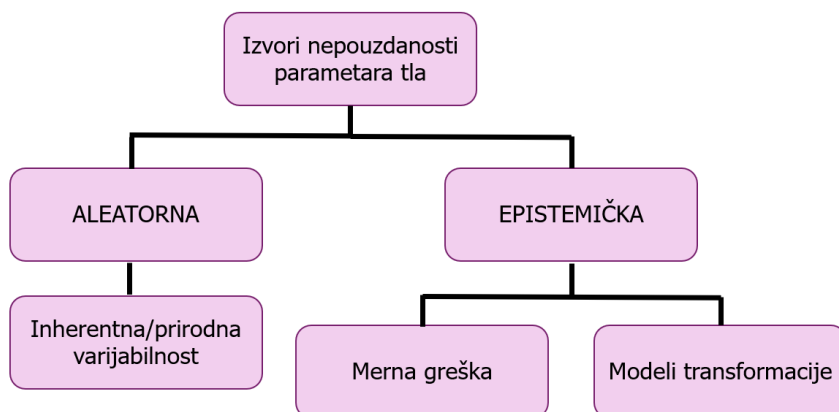
POUZDANOST GEOTEHNIČKIH PODATAKA

Tlo je kompleksan materijal koji je nastao udruženim delovanjem geoloških i fizičko-hemijskih procesa koji stalno menjaju njegova svojstva. Varijabilnost tih svojstava utiče na pouzdanost s kojom se vrši geotehničko projektovanje.

Izvori nepouzdanosti, koji utiču na predviđanje ponašanja geotehničke konstrukcije, mogu biti epistemički i aleatorni. Nepouzdanost se može okarakterisati kao epistemička ukoliko se može umanjiti npr. povećanjem obima istražnih radova, dok na aleatornu nepouzdanost ne može da se utiče. U geotehničkom inženjerstvu postoje dva izvora epistemičke nepouzdanosti: merna greška i model transformacije. Prva nepouzdanost se pripisuje nesavršenosti opreme koja se koristi za ispitivanje, operateru i statističkim greškama i može se smanjiti ukoliko se recimo poveća broj ispitivanja nekog geotehničkog svojstva. Drugi tip nepouzdanosti dolazi do izražaja kada se iz nekog podatka izmerenog u laboratoriji ili na terenu određuju geotehnički parametri (npr. korelacija između otpora konusa i ugla smičuće čvrstoće peska). Taj drugi izvor greške može da se umani upotrebom nekog pouzdanijeg matematičkog ili empirijskog modela. S druge strane, inherentna varijabilnost tla, koja je posledica prirodnih procesa, predstavlja aleatornu nepouzdanost. Izvori grešaka kod određivanja geotehničkih parametara prikazani su na slici 2.

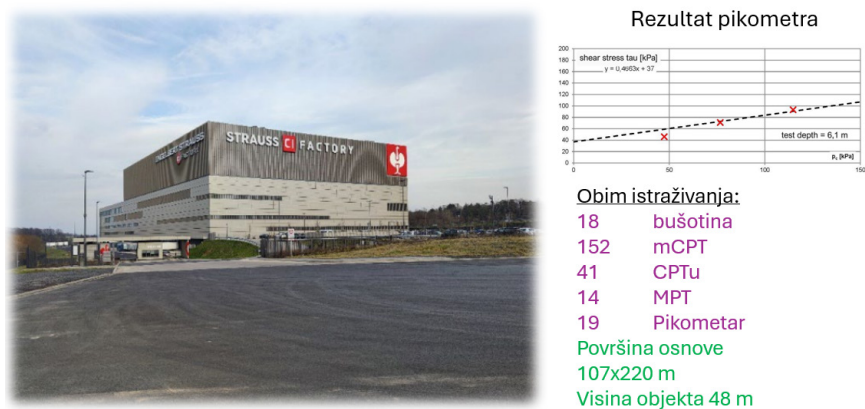


Slika 1: Menardov presiometar i triaksljalni uzorak



Slika 2: Izvori grešaka kod određivanja geotehničkih parametara

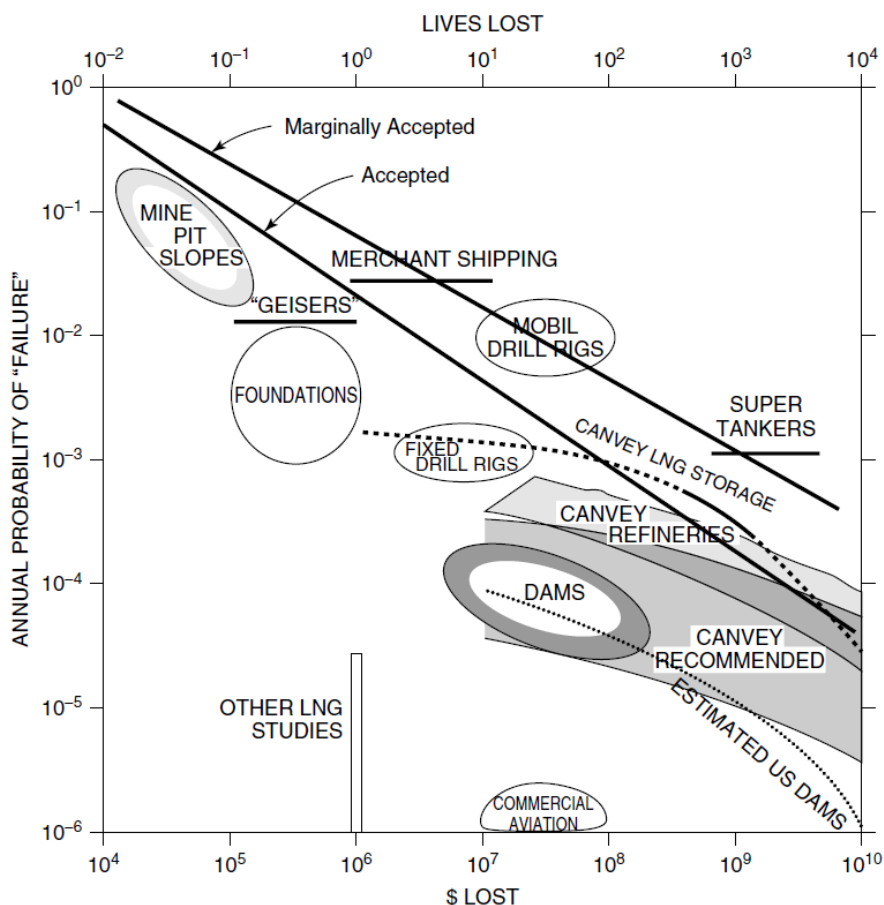
Veoma često investitor nema razumevanja za geotehnička istraživanja u pogledu obima, pa je pored aleatorne nepouzdanosti izražena i epistemička. Međutim, ima i svetlih primera iz prakse, kao što je to slučaj sa skladištem i administrativnim objektom „Engelbert Strauss“ u Nemačkoj, gde je u fazi razvoja projekta urađen veoma veliki broj istražnih radova na relativno maloj površini (107 x 220 m), kako je prikazano na slici 3. Na slici 3 je prikazan i rezultat pikometra sa istog projekta u cilju popularizacije poslednjeg standardizovanog *in situ* opita iz grupe standarda ISO 22476.



Slika 3: „Engelbert Strauss“ skladište u Nemačkoj
s vrstom i količinom *in situ* istraživanja

Odavno je prepoznato da se u građevinskom projektovanju i izgradnji najveći element finansijskog i tehničkog rizika „leži u terenu“. U geotehničkom inženjerstvu nepouzdanost ili nesigurnost koje u sebi sadrži neko rešenje definiše se verovatnoćom određenog događaja. Evrokod je, kada se govori o građevinskom projektovanju, napisan za verovatnoću 1/1000. Ovako mala verovatnoća je prihvatljiva za građevinske materijale koji se proizvode u strogo kontrolisanim uslovima (beton, čelik i dr.), dok su u geotehničkom projektovanju ove verovatnoće teško dostižne, odnosno nepouzdanost je znatno veća. To za posledicu ima i veći dozvoljeni rizik kod projektovanja. Pod rizikom se podrazumeva verovatnoća pojave nekog događaja u kombinaciji s posledicama koje bi nastale u slučaju da se taj događaj desi, odnosno:

Posledica se izražava najčešće u vidu gubitaka života ljudi ili novčanim gubicima. Očekivani rizik za različite vrste geotehničkih konstrukcija (kosina, brana, temelji i dr.) prikazan je na slici 4. Sa slike se može videti da verovatnoća opada s povećanjem posledica, kao i da je najveća verovatnoća da dođe do pojave graničnog stanja loma za rudarske kosine na površinskim kopovima s verovatnoćom oko 0,1, što znači da će se lom desiti na 1 od 10 kosina godišnje.

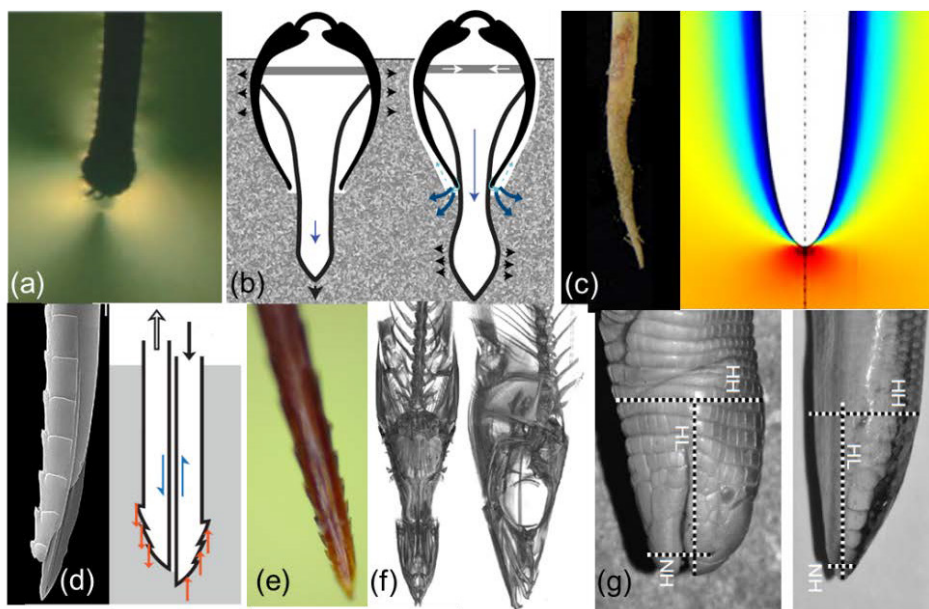


Slika 4: F-N dijagram koji pokazuje prosečan godišnji rizik kome su izložene geotehničke i druge konstrukcije i objekti (Baecher 1982)

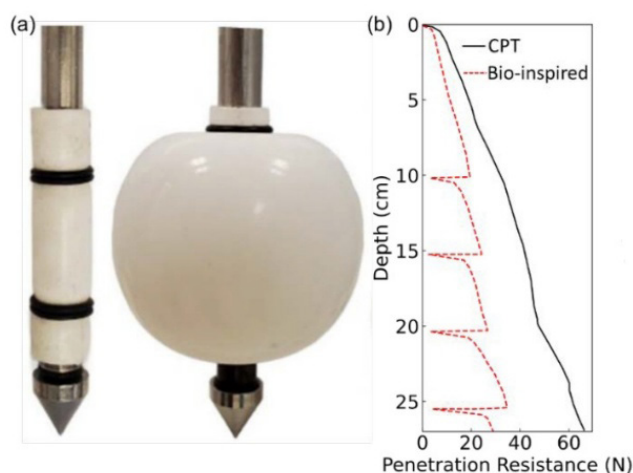
BIO-INSPIRISANI OPITI U GEOTEHNICI

Poslednjih par godina došlo je do ubrzanog razvoja tzv. bio-inspirisane geotehnike. Ona polazi od pretpostavke da su određene životinje i biljke razvile uspešnu strategiju prilikom interakcije s geomaterijalima i da postoji analogija s pojedinim opitima s kojima se susrećemo u geotehničkom inženjerstvu. Posmatranjem korenja biljaka i zemljanih crva (Slika 5) uočeno je da kada naiđu na tvrdo tlo oni se radijalno šire stvarajući pukotine u glinovitom tlu neposredno ispod svog vrha. Te pukotine su posledica koncentracije napona zatezanja, a njihovim otvaranjem organizmima je olakšano dalje utiskivanje u tlo. Istraživači sa Dejvisa su posmatranjem tih prirodnih pojava napravili nekoliko prototipova penetracionih soni. Jedna takva sonda koja ima ekspanirajući rukavac iza konusa prikazana je na slici 6 zajedno s rezultatom merenja

penetracione otpornosti dobijene standardnim CPT konusom i bio-inspirisanim konusom. Rezultat prikazan na slici 6 ukazuje da je penetraciona otpornost oko 50% manja kada se koristi konus sa ekspandirajućim rukavcem. To ukazuje da su potrebne znatno manje sile reakcije prilikom izvođenja CPT opita i da se mogu ostvariti veće dubine utiskivanja.



Slika 5: Biološke adaptacije biljaka i životinja za kopanje kroz tlo
(Martinez i sar., 2024)



Slika 6: Konus sa ekspandirajućim rukavcem
s rezultatom merenja penetracione otpornosti

MATERIJALI I METODE

U okviru članka biće prikazani rezultati *in situ* opita koji su izvedeni u različitim geomaterijalima kao što su jako do umereno prekonsolidovane gline, normalno konsolidovano tlo, ali i peskovita tla različite zbijenosti. Akcenat je na tri terenske metode, CPTu, SDMT i MPT, koje se kod nas često koriste za karakterizaciju terena. Sledi kratak opis pomenutih metoda i prikaz osnovnih jednačina koje se koriste za njihovu interpretaciju.

Familija penetracionih opita

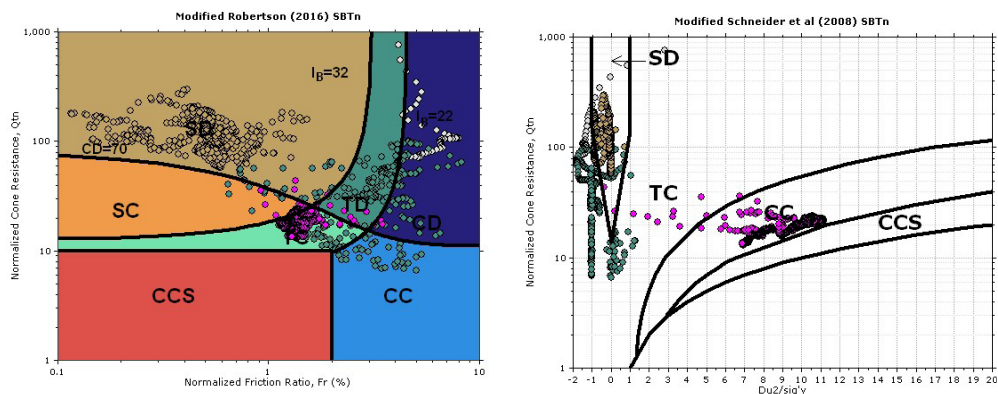
CPTu i SDMT opit spadaju u familiju penetracionih opita. Kod CPTu opita u tlo se utiskuje konus standardnih dimenzija koji u sebi ima instaliranu mernu opremu koja omogućava da se izmere sile i pritisci koje tlo pruža prilikom prodora konusa. Iz izmerenih sila i pritisaka određuju se najmanje tri podatka na rastojanju 1–2 cm po dubini: otpor konusa korigovan za uticaj pornih pritisaka (q_t), trenje duž frikcionog rukavca (f_s) i penetracioni porni pritisci (u_2). Nekoliko osnovnih jednačina koje se koriste za interpretaciju opita prikazane su u tabeli 1.

parametar	jednačina
Otpor konusa	$q_c = \frac{Q_c}{A_c}$
Korigovani otpor konusa	$q_t = q_c + u_2(1 - a)$
Neto otpor konusa	$q_n = q_t - \sigma_{v0}$
Trenje duž frikcionog rukavca	$f_s = \frac{F_s}{A_s}$
Frikcioni koeficijent/koeficijent trenja	$R_f = \frac{f_s}{q_t} \cdot 100\%$

Tabela 1: Osnovne jednačine za interpretaciju CPTu opita

Iz prikazanih jednačina određuju se geotehnički parametri primenom modela transformacije koji mogu da budu empirijski ili teorijski. CPTu opitom se meri ponašanje tla *in situ* i zato on predstavlja odličan alat za njegovu karakterizaciju. Ono što je posebno značajno kod CPTu opita, a ujedno mu je to i velika prednost u poređenju s mehaničkim mCPT opitom, jeste to što može da se utvrdi vrsta tla po dubini. Vrsta tla se određuje iz indeksa I_c koji predstavlja radijus

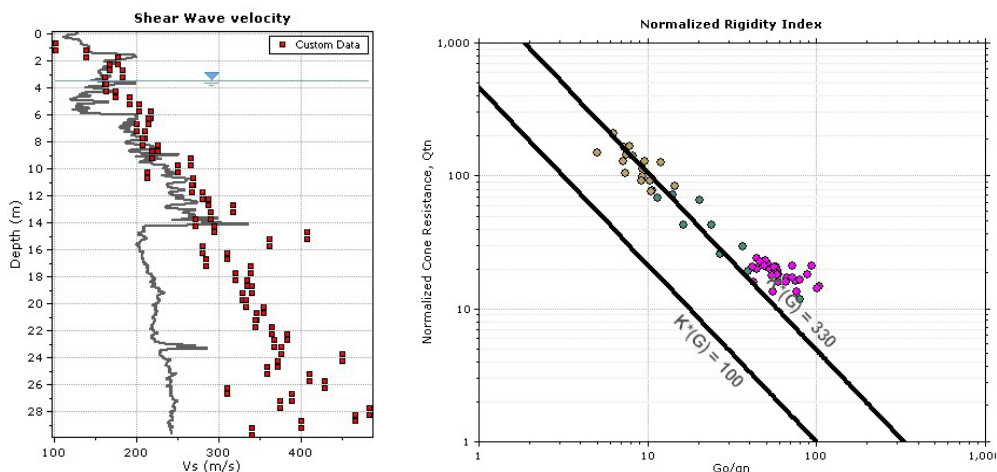
koncentričnih krugova koji čine granice između pojedinih SBT zona (zone različitog ponašanja tla). U poslednje vreme interpretacija CPTu opita zasniva se na karakteristikama tla pri velikim deformacijama i u tom smislu moguće je izdvojiti nekoliko grupa tla kako je prikazano na slici 7. Slika 7 predstavlja rezultat dobijen ispitivanjem tla na jednom gradilištu u blizini Obrenovca.



Slika 7: Grupe tla izdvojene prema ponašanju na osnovu njihovih karakteristika u uslovima velikih deformacija (SC-peskovito kontraktivno, SD-peskovito dilatantno, CD-glinovito dilatantno, CC-glinovito kontraktivno, CCS-glinovito kontraktivno osetljivo, TD-prelazno dilatantno, TC-prelazno kontraktivno)

Sa slike 7 se može videti da se ljubičaste tačke (predstavljaju podatke izmerene u laporovitoj glini) različito klasifikuju na levom i desnom dijagramu. Na levom dijagramu, gde je tip tla određen iz otpora konusa i trenja duž frikcionog rukavca, laporovita glina je klasifikovana kao TC-kontraktivno prelazno tlo, dok je prema izmerenom pornom pritisku (desni dijagram) tlo klasifikovano kao CC-kontraktivna glina. Ova neusaglašenost ukazuje da tlo ima mikrostrukturu, odnosno cementaciju koja se inicijalno angažuje i poremeti prilikom prodora konusa, pa izmereni porni pritisci reflektuju karakteristike preoblikovanog/poremećenog tla. Mikrostruktura može da se utvrdi poređenjem izmerenih i procenjenih brzina smičućih talasa (V_s). V_s je parametar koji se određuje pri jako malim smičućim deformacijama, tako da cementne veze na kontaktu između čestica tla ostaju sačuvane prilikom prolaska smičućeg talasa. Zato je kod tla sa izraženom mikrostrukturom V_s veća u poređenju s tлом koje nema izraženu mikrostrukturu. Na prethodno pomenutom gradilištu, brzine V_s izmerene su iz SDMT opita, koji je urađen na rastojanju od 1 m od CPTu opita. Poređenje izmerenih i procenjenih brzina (iz CPTu opita) prikazano je na slici 8. Sa slike se može videti da su izmerene brzine znatno veće u odnosu na procenjene u laporovitim glinama (na dubinama većim od 14 m). Ovakav rezultat je uobičajen kada se ispituju laporovite gline. Na istoj slici na desnom

dijagramu date su vrednosti izmerenog normalizovanog indeksa krutosti pri malim deformacijama (K_G) za tri izdvojene geotehničke sredine. Ukoliko je $K_G > 330$ smatra se da tlo ima mikrostrukturu, što je slučaj s laporovitim glinama predstavljenim ljubičastim tačkama.

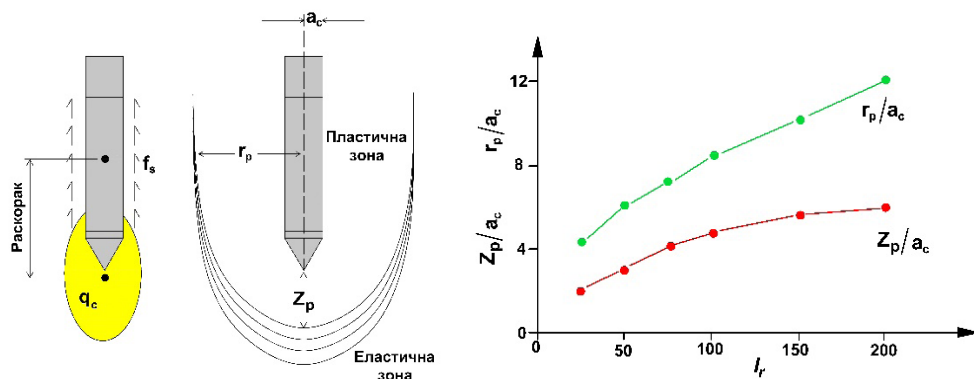


Slika 8: Mikrostruktura tla određena iz Vs

Ono što je bitno napomenuti, a gotovo nikada nije predmet interpretacije CPTu opita jeste značaj relativnog raskoraka između q_c i f_s . Zbog rastojanja između konusa i frikcionog rukavca, kao i činjenice da akvizicioni sistemi mere q_c i f_s (koji su u raskoraku, odnosno nisu na istoj dubini), u datom vremenskom trenutku potrebno je izvršiti određenu korekciju izmerenih podataka. Ta korekcija podrazumeva da se izmerene vrednosti f_s relativno pomeraju u odnosu na q_c sve dok se ne dobije njihovo odgovarajuće poklapanje. Jedan od načina da se pronađu parovi q_c - f_s koji odgovaraju istim dubinama jeste primena funkcije kros-korelacije (Tabela 1). Bitno je napomenuti da fizičko rastojanje između uređaja koji mere q_c i f_s (za komercijalne konuse ono iznosi 7.5–10 cm) ne mora da odgovara relativnom raskoraku za koji se te dve veličine najbolje slažu. To ćemo pokazati za jedan CPTu opit izveden na Beogradu na vodi. Pre toga su ukratko prikazane teorijske osnove potrebne za razumevanje problema.

Tlo u okolini konusa plastično se deformiše prilikom njegovog utiskivanja. Prostiranje zone loma tla može da se opiše elasto-plastičnom granicom, koja razdvaja oblast elastičnih i oblast plastičnih deformacija, kao što je prikazano na slici 9 (Teh i Houlsby, 1991). Položaj elasto-plastične granice zavisi od indeksa krutosti tla (I_r), koji se definiše kao odnos smičućeg modula (G) i nedrenirane smičuće čvrstoće (s_u). Ovo su teorijski utvrdili Teh i Houlsby (1991), koji navode da položaj granice može da se definiše s dve geometrijske veličine, r_p i z_p (slika 9). Prva veličina r_p predstavlja radijalno rastojanje elasto-plastične

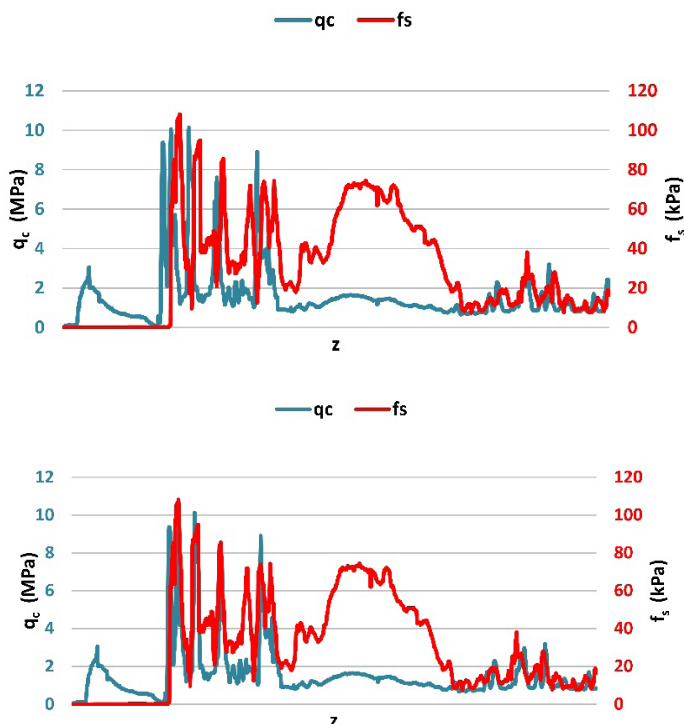
granice od podužne ose konusa, a druga veličina z_p predstavlja rastojanje od granice do vrha konusa mereno duž podužne ose konusa. Uticaj indeksa krutosti na položaj elasto-plastične granice prikazan je na slici 9 (desno). Sa slike se vidi da se z_p povećava s povećanjem I_r što implicira da je u prekonsolidovanim, tvrdim glinama (veliki I_r) elasto-plastična granica najudaljenija u odnosu na vrh konusa. To ima za posledicu da se težište zone plastifikacije udaljava od vrha konusa i tačke u kojoj se meri trenje po frikcionom rukavcu (f_s). Sve ovo pokazuje da raskorak između q_c i f_s nije konstanta definisana fizičkim rastojanjem između njih već je promenljiva veličina koja zavisi od vrste tla koja se ispituje. To ćemo proveriti primenom funkcije kros-korelacije za različite vrste tla (meke gline do jako prekonsolidovane).



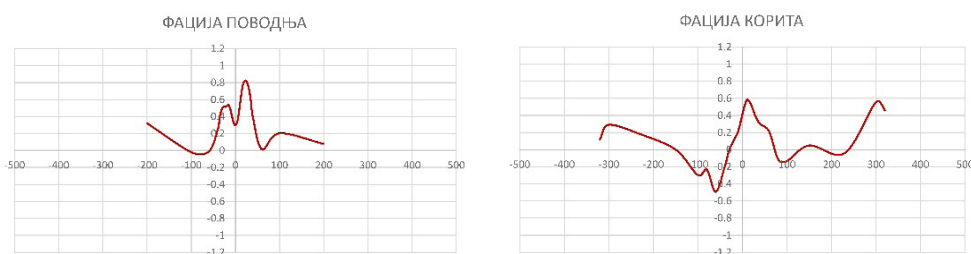
Slika 9: Šematski prikaz formiranja plastične zone tla u okolini konusa i njen položaj u zavisnosti od I_r

U jednačini CORREL prikazanoj u tabeli 1 parametri imaju sledeće značenje: $X=q_c$, $Y=f_s$, X_m – srednja vrednost q_c i Y_m – srednja vrednost f_s . Na slici 10 prikazan je q_c i f_s po dubini za jedan CPTu opit pre (gore) i nakon (dole) primene relativnog pomeranja f_s u odnosu na q_c . Najveći korelacioni koeficijent dobijen je nakon pomeranja f_s za raskorak od 15 cm. To je nešto veće rastojanje u odnosu na fizičko rastojanje (7.5–10.0 cm) između mernih instrumenata električnog konusa koji mere q_c i f_s . Rezultat prikazan na slici 10 odnosi se na ceo CPTu opit (sve dubine i sve sredine). Da bi se video uticaj vrste tla na veličinu raskoraka, odnosno položaj plastične zone oko konusa, potrebno je filtrirati podatke za samo jednu geotehničku sredinu. Promena korelacionog koeficijenta za faciju povodnja i faciju korita na Beogradu na vodi prikazana je na slici 11. Na sličan način se može izvršiti analiza za druge vrste tla. Krajnji rezultat ukazuje na to da je u prekonsolidovanom tlu (lapori) raskorak 5–10 puta veći u poređenju s normalno konsolidovanim tлом, što je u saglasnosti s teorijskim rešenjem koje daju Teh i Houlsby (1991). Dakle, težište zone plastifikacije je udaljenije od

konusa kod prekonsolidovanog tla, dok raskorak u normalno konsolidovanom tlu približno odgovara fizičkom rastojanju između tačaka gde se mere q_c i f_s .



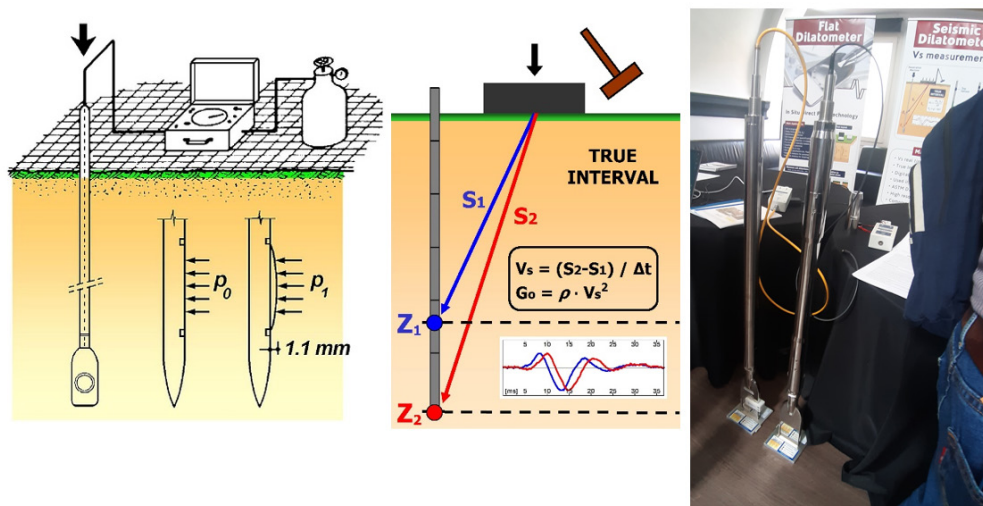
Slika 10: Položaj q_c i f_s pre (gore) i nakon (dole) primene kros-korelacije



Slika 11: Promena korelacionog koeficijenta u zavisnosti od raskoraka za dve geotehničke sredine

Drugi opit iz familije penetracionih opita jeste seizmički dilatometar, koji se u poslednjih nekoliko godina kod nas često koristi za karakterizaciju tla. Na nedavno održanoj CPT'22 konferenciji u Bolonji usvojeno je da je SDMT referentni opit za merenje V_s u tlu. Seizmički dilatometar predstavlja kombinaciju pločastog (mehaničkog) dilatometra i seizmičkog modula koji služi za merenje brzine smičućih (V_s) i kompresionih talasa (V_p). Seizmički modul je specijalno

opremljena čelična cev koja se postavlja neposredno iznad sečiva, slika 12. Seizmička sonda je opremljena s dva vertikalna geofona postavljena na međusobnom rastojanju 0.6 m, koji služe za merenje V_p talasa i dva horizontalno orijentisana geofona postavljena na rastojanju 0.5 m, koji služe za merenje V_s talasa. Dvoosni inklinometar postavljen je u središtu seizmičke sonde i služi za registrovanje inklinacije tokom izvođenja opita. Koriste se dva različita seizmička izvora za generisanje P i S talasa. P-talas se generiše vertikalnim udarom ručnim čekićem (10 kg) o čeličnu ploču postavljenu na 1–2 m rastojanja od mesta utiskivanja sečiva. S-talas se generiše horizontalnim udarom u vertikalno pritisnutu drvenu ili čeličnu gredu ručnim čekićem mase oko 10 kg. Položaj prijemnika (geofona) omogućava da se merenje V_s talasa vrši za „stvarni interval” dubine, odnosno na svakih 0.5 m, dok se V_p talasi određuju za „pseudointerval” na rastojanju od 1.0 m. Brzina smičućih talasa za određeni interval (0.5 m) predstavlja odnos između razlike rastojanja koje talas treba da pređe od izvora do oba senzora i razlike u vremenu koje je potrebno da talas pređe ta dva rastojanja (Slika 12). Iz izmerene brzine V_s primenom teorije elastičnosti određuje se inicijalni smičući modul G_0 . Poznavanje inicijalog smičućeg modula G_0 i jednodimenzionalnog-operativnog modula (M) može da pomogne pri izboru krive zavisnosti smičućeg modula od smičuće deformacije (G/G_0 - γ degradation curves). Te krive mogu da se iskoriste kao ulazni podatak za numeričke modele koji su na raspolaganju u komercijalnim softverima. Na slici 12 je prikazan najnoviji model seizmičkog dilatometra, tzv. Meduza dilatometar, koji predstavlja potpuno autonomnu sondu za izvođenje opita sa određenim prednostima u poređenju s konvencionalnim SDMT opitom.

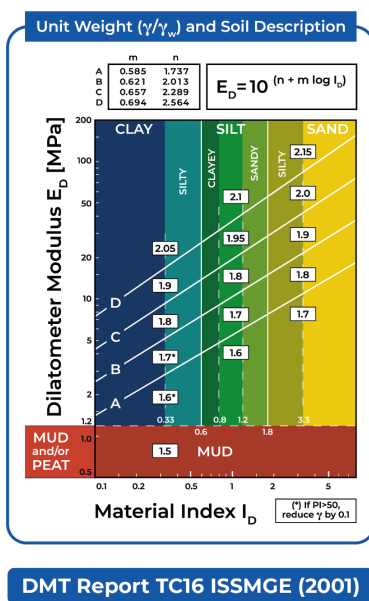


Slika 12: Dispozicija ispitivanja SDMT opitom i Meduza dilatometar sa seizmičkom sondom (slikao autor na CPT'22 konferenciji)

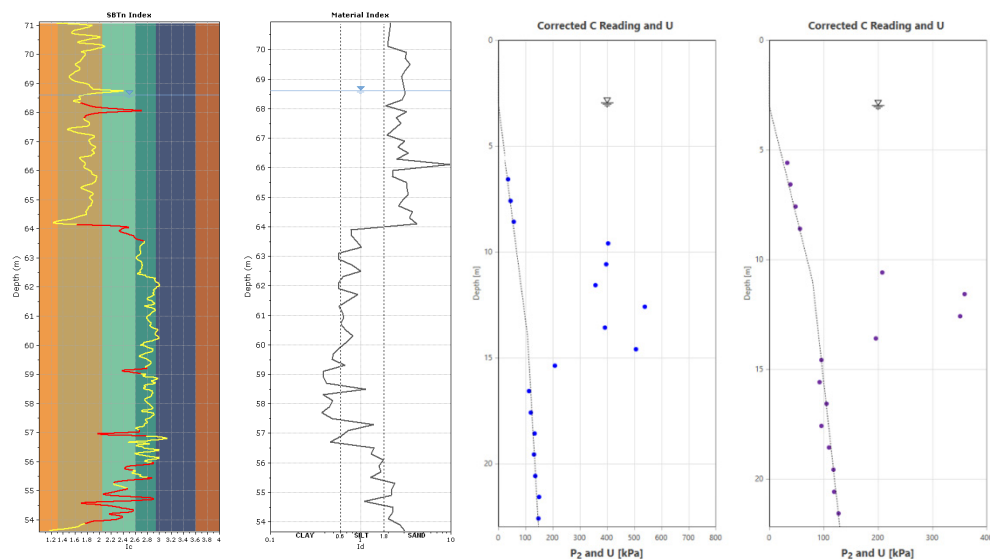
Prvi korak kod interpretacije SDMT opita jeste određivanje prelaznih parametara iz kojih se primenom standardnog DMT postupka određuju geotehnički parametri.

Na slici 13 su prikazane formule koje se koriste kod interpretacije SDMT opita. Na slici je navedena i referenca koja predstavlja dobru osnovu za razumevanje porekla prikazanih formula. Seizmičkim dilatometrom inicijalno se određuje vrsta tla slično kao i kod CPTu opita. Vrsta tla se određuje na osnovu indeksa materijala (I_p), koji se određuje iz formule prikazane na slici 13. Uporedni prikaz vrste tla određene iz SDMT opita i CPTu opita na lokaciji Nacionalnog stadiona na gradilištu EXPO 2027 prikazan je na slici 14. Sa slike se može videti odlično slaganje između rezultata dva penetraciona opita. SDMT opitom moguće je utvrditi položaj nivoa podzemne vode u dreniranom (peskovitom tlu). Za to je potrebno da se pored dva uobičajena pritiska p_0 i p_1 ispituje i treći pritisak p_2 , koji predstavlja korigovano C čitanje koje se ostvari kada se membrana sporim ispuštanjem vazduha vrati u svoj prvobitni položaj. Na slici 14 je prikazana ne-hidrostaticka raspodela por-nih pritisaka po dubini utvrđena iz dva SDMT opita na lokaciji EXPO 2027. Opiti su urađeni na prostoru koji je pod uticajem rada reni bunara, pa se pretpostavlja da su u trenutku izvođenja opita bunari bili u funkciji. Ovo je prvi takav slučaj zabeležen od strane autora. Uglavnom je raspodela por-nih pritisaka hidrostaticke prirode.

SYMBOL	PARAMETER NAME	FORMULA / DESCRIPTION
A	First Reading	Membrane lift-off pressure
B	Second Reading	Pressure for 1.1 mm membrane expansion
C	Third Reading	Membrane closing pressure
ΔA	Membrane Calibration (A in free air)	Suction as positive pressure
ΔB	Membrane Calibration (B in free air)	Inflation as positive pressure
[T, A]	Dissipation Test Readings	A-readings with time (at specific depth)
P₀	Corrected First Reading	$P_0 = 1.05 (A + \Delta A) - 0.05 (B - \Delta B)$
P₁	Corrected Second Reading	$P_1 = B - \Delta B$
P₂	Corrected Third Reading	$P_2 = C + \Delta A$
I_D	Material Index	$I_D = (P_1 - U_0) / (P_0 - U_0)$
K_D	Horizontal Stress Index	$K_D = (P_0 - U_0) / \sigma'_{v0}$
E_D	Dilatometer Modulus	$E_D = 34.7 (P_1 - P_0)$
U₀	Pore Pressure Index	$U_0 = (P_2 - U_0) / (P_0 - U_0)$
T_{flex}	Dissipation Flex Point	
γ	Unit weight	see unit weight chart
K₀	Earth Pressure Coefficient	$K_{0, DMT} = (K_{0, D} / 1.5)^{0.47} - 0.6$ $I_D \leq 1.2$
OCR	Overconsolidation Ratio	$OCR_{DMT} = (0.5 K_{0, DMT})^{1.56}$ $I_D \leq 1.2$
Su	Undrained Shear Strength	$Su_{DMT} = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_{0, DMT})^{1.25}$ $I_D \leq 1.2$
Φ	Friction Angle	$\Phi_{DMT} = 28 + 14.6 \log K_{0, DMT} - 2.1 \log^2 K_{0, DMT}$ $I_D > 1.8$
M	Vertical Drained Constrained Modulus	$M_{DMT} = R_u E_D$ If ($I_D \leq 0.6$) $R_u = 0.14 + 2.36 \log K_D$ If ($I_D \geq 3$) $R_u = 0.5 + 2 \log K_D$ If ($0.6 < I_D < 3$) $R_u = R_{MD} + (2.5 - R_{MD}) \log K_D$ $R_{MD} = 0.14 + 0.15 (I_D + 0.6)$ If ($K_D > 10$) $R_u = 0.32 + 2.18 \log K_D$ If ($R_u < 0.85$) set $R_u = 0.85$
C_h	Coefficient of Consolidation	$C_{h, DMT} = 7 \text{ cm}^2 / T_{flex}$
K_h	Coefficient of Permeability	$K_{h, DMT} = C_{h, DMT} \gamma_w / M_h$ ($M_h \approx K_{0, DMT} M_{DMT}$)
U₀	Equilibrium Pore Pressure	$U_0 \approx P_2$ for drained layers only



Slika 13: Standardne formule za interpretaciju SDMT opita

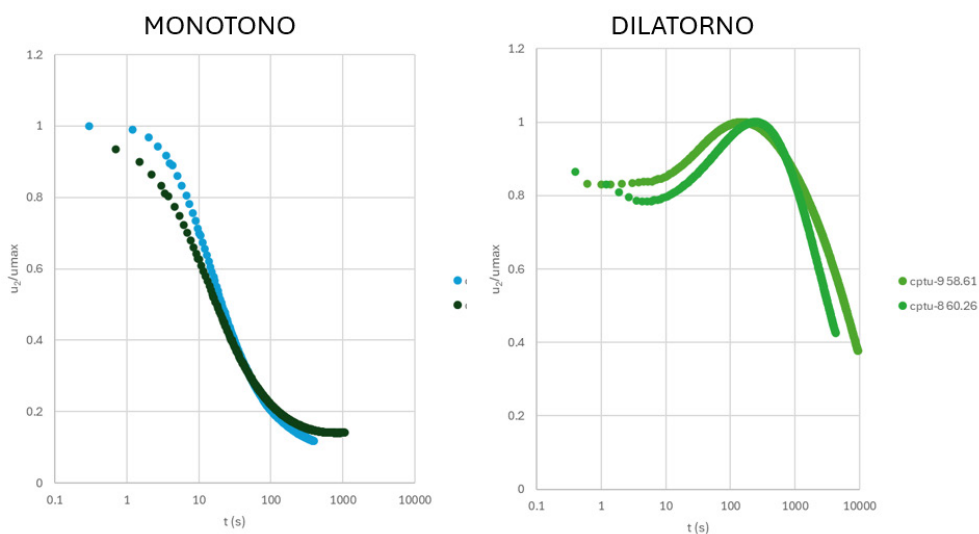


Slika 14: Uporedni prikaz određivanja vrsta tla iz CPTu i SDMT opita na lokaciji Nacionalnog stadiona (levo) i ne-hidrostaticka raspodela pornih pritiska izmerena iz dva SDMT opita

Opiti disipacije iz penetracionih opita

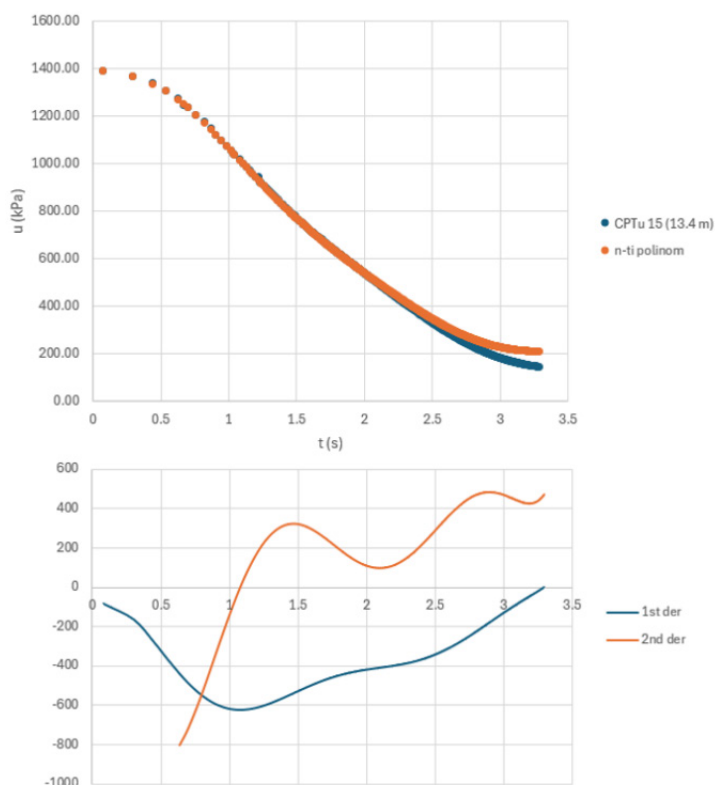
Vodopropusnost tla i brzina nanošenja opterećenja su najznačajniji činioci koji utiču na brzinu konsolidacije temeljnog tla. Ukoliko je brzina nanošenja opterećenja relativno velika u poređenju s brzinom kojom se voda drenira iz pora tla, onda će doći do pojave pornih natpritisaka koji nepovoljno utiču na stabilnost geotehničkih konstrukcija. U izvesnim situacijama može doći i do pojave loma u nedreniranim uslovima. Takođe, jedan od osnovnih zadataka u geotehnici je da se proceni vreme potrebno da se izvrši konsolidacija tla. To je posebno značajno prilikom projektovanja visokih nasipa infrastrukturnih koridora. U tom smislu prikazaćemo par rezultata opita disipacije iz CPTu i SDMT opita bez neke dublje interpretacije.

Na lokaciji EXPO 2027 urađena je nekolicina opita disipacije pretežno u glinovitom tlu, koje je najnepovoljnija sredina u pogledu vremena potrebnog da se u njoj ostvare sleganja. Rezultati disipacije za četiri opita prikazani su na slici 15.



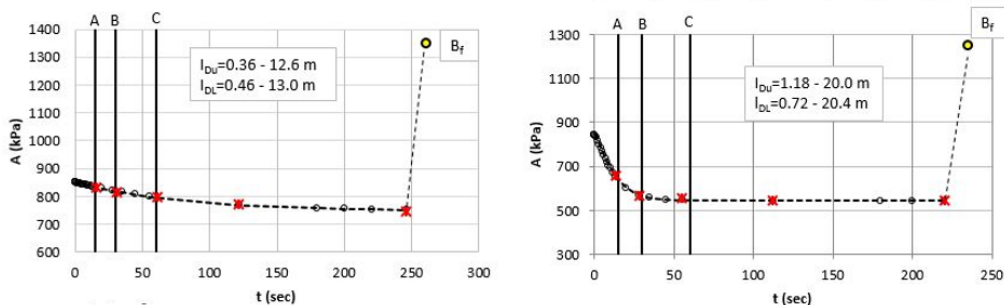
Slika 15: Rezultat disipacije iz CPTu opita na lokaciji EXPO 2027

Rezultat na slici 15 pokazuje dva suštinski različita ponašanja materijala. Na levom dijagramu disipacija je monotona, što je karakteristika normalno konsolidovanog do blago prekonsolidovanog tla. Na desnom dijagramu disipacija je dilatorna što je karakteristika jako prekonsolidovanih glina. Postupak određivanja koeficijenta filtracije, odnosno koeficijenta vodopropusnosti razlikuje se između oba prikazana slučaja. Jednačina koja se koristi za određivanje koeficijenta konsolidacije (c_h) ima svoje teorijsko poreklo (Houlsby i Teh, 1988), a da bi se rešila potrebno je odrediti vreme t_{50} iz disipacione krive i pretpostaviti indeks krutosti I_r . Za određivanje t_{50} od najvećeg je značaja adekvatna procena inicijalnog (u_i) i ravnotežnog pornog pritiska (u_0) što predstavlja uobičajen postupak interpretacije koji je integrisan u mnoge komercijalne softvere. Autor je primenio matematički rigorozniji postupak, koji eliminiše potrebu da se pretpostave u_i i u_0 . Postupak se sastoji u tome da se kriva disipacije matematički opiše polinomom n -tog reda kako bi se dobila kontinualna funkcija čijim diferenciranjem se određuje t_{inf} . Prvi izvod funkcije predstavlja nagib krive disipacije čiji minimum odgovara tački infleksije. Daljim diferenciranjem krive nagiba dobija se tačka infleksije kada je izvod jednak 0. Primer određivanja tačke infleksije na u - t dijagramu iz ovog pristupa prikazan je na slici 16. Pomenuti pristup ima prednost u odnosu na pristup integrisan u komercijalnom softveru jer eliminiše potrebu za pretpostavkom o veličini početnog pornog pritiska. Takođe, iskustvo je pokazalo da ovaj pristup može da se primeni na svega 40% do 50% završene disipacije.



Slika 16: Rezultat disipacije opisan polinomom n -tog reda s prvim i drugim izvodom

Rezultat disipacije može da se dobije i SDMT opitom iz ponovljenog A čitanja u određenim vremenskim intervalima. Rezultat disipacije iz SDMT opita prikazan je na slici 17 za gradilište kod Kuzmina. Rezultat je dobijen u glinovitom i prašinastom tlu. Dijagram s leve strane predstavlja rezultat disipacije u glinovitom tlu, a sa desne je rezultat disipacije u prašinastom tlu. Ovde treba imati na umu da promena A-čitanja u vremenu reflektuje promenu pornih pritisaka. Rezultat ukazuje da su porni pritisci praktično konstantni u glinovitom tlu u vremenu od oko 30 s, koliko je potrebno da se očitaju A i B pritisci, dok je u prašinastom tlu zabaležen znatan pad pornih pritisaka u prvih 30 s. S obzirom na to da su pritisci koji se mere funkcija totalnih napona, svaka promena pornih pritisaka utiče na veličinu izmerenih pritisaka, a na kraju i na veličinu interpretiranih geotehničkih parametara. U slučaju kada je disipacija delimično drenirana, postoji postupak kojim je moguće odrediti nedrenirane pritiske (A i B) preko Vejbulove raspodele uz određene granične uslove (Berisavljević i Berisavljević, 2021).



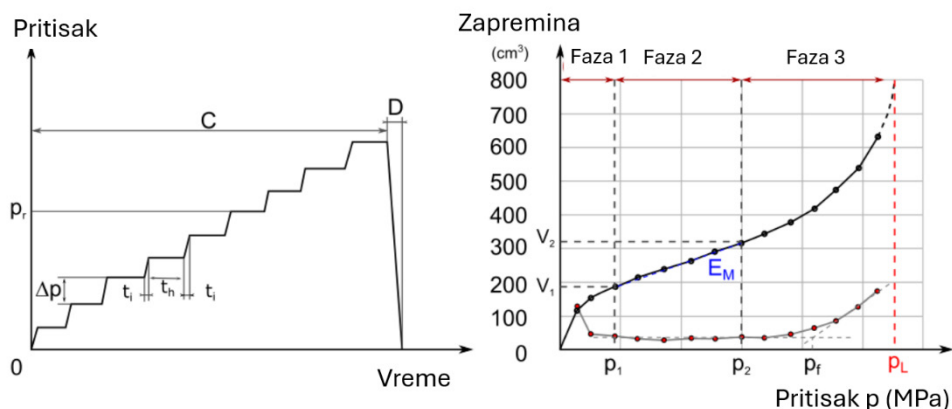
Slika 17: Vremenska sekvenca A-čitanja za dva opita na gradilištu kod Kuzmina

Berisavljević i Berisavljević (2021) pokazali su da su geotehnički parametri koji zavise samo od A (p_0) pritiska osetljiviji na uticaj delimične disipacije u odnosu na parametre koji su funkcija oba pritiska p_0 i p_1 . Tako, na primer, nedrenirana smičuća čvrstoća može da bude i za 40% niža kod delimično dreniranog opita u odnosu na onu koja bi se dobila kada je opit nedreniran.

PRESIOMETARSKI OPITI

Presiometarski opiti predstavljaju referentni *in situ* opit za ispitivanje tere- na u Francuskoj geotehničkoj praksi. Metoda ispitivanja je standardizovana i ukoliko se primeni standardni postupak ispitivanja, opitom se dobijaju pa- rametri deformabilnosti i čvrstoće. Najčešće primenjivan presiometarski opit u tlu je Menardov opit iz koga se određuju Menardov modul (E_M) i granični pritisak (p_L). Pored ova dva parametra određuje se i pritisak puzanja (p_f), koji se prvenstveno koristi za kontrolu kvaliteta izvedenog opita. Parametri koji se dobijaju iz opita koriste se direktno za geotehničko projektovanje plitkih i dubokih temelja u uslovima monotonog opterećenja i oslanjaju se na dobro utvrđene i proverene metode koje su uključene u mnoge standarde, uključujući i Evrokod 7. Oprema za ispitivanje sastoji se od dve glavne komponente: kontrolne jedinice i tročelijske sonde prečnika 44 ili 60 mm (u upotrebi su i drugi prečnici). Kontrolna jedinica služi da se voda kontrolisano potiskuje u sondu pod pritiskom (P), čija se vrednost očitava na manometru. Sonda se širi i menja zapreminu (V) na račun povećanja zapremine vode u njoj i na taj način pritiska zidove bušotine koji se radialno deformišu. Menardov test je poznat kao opit s kontrolisanim prirastom pritiska, za razliku od npr. TEXAM presiometra koji se najčešće izvodi u uslovima kontrolisane promene zapre- mine. Kod Menardovog opita postupak ispitivanja je standardizovan i odvija se u više inkremenata, gde se jedan inkrement pritiska održava konstantnim u trajanju od 60 sekundi pri čemu se meri promena zapremine na 15, 30 i 60 s od

trenutka nanošenja inkrementa opterećenja (pritiska). Rezultat Menardovog opita prikazuje se na P-V dijagramu, slika 18. Odgovor tla se manifestuje kroz tri faze: faza rekompresije, pseudo-elastična faza i plastična faza kako je prikazano na P-V dijagramu na slici 18. Značajno je napomenuti da je treća faza vremenski zavisna s obzirom na to da se zapremina menja pri konstantnom pritisku. E_m se određuje iz nagiba krive faze 2, koja je definisana parovima tačaka p_1 , V_1 i p_2 , V_2 . Menardov pritisak predstavlja pritisak pri dvostrukom povećanju zapremine šupljine koja se ispituje. Može ili direktno da se izmeri, ili da se odredi ekstrapolacijom. Program ispitivanja može da uključi i fazu rasterećenja ukoliko je potrebno.



Slika 18: Vremenski tok nanošenja opterećenja i karakteristični odgovor tla kod MPT opita

Neki aspekti projektovanja primenom rezultata MPT opita

Direktna primena rezultata presiometara na projektovanje plitkih i dubokih temelja počela je neposredno nakon što je Menard izumeo test. Posebno je značajna tzv. D60 beleška, u kojoj je Menard (1967) prikazao pravila za projektovanje koja su uz određene modifikacije ušle u Evrokod 7. Za proračun sleganja plitkih temelja često se koristi poluempirijski postupak koji se oslanja na direktnu upotrebu E_M . Taj postupak koristi tzv. reološki koeficijent (α), koji predstavlja empirijski parametar i služi da zameni modul elastičnosti Menardovim modulom u analitičkom rešenju koje je Menard razmatrao. Reološki koeficijent za tlo zavisi od vrste tla i odnosa E_M/p_L i prikazan je u tabeli 2. Za stensku masu α ne zavisi od odnosa modula. Kod plitkih temelja rezultati MPT koriste se za: određivanje ekvivalentne dubine fundiranja, određivanje račun-ske nosivosti i proračuna sleganja temelja. Sleganje može da se odredi ili direktno iz rezultata MPT primenom empirijskog pravila, ili transformacijom E_M u

modul elastičnosti i primenom analitičkog rešenja prema teoriji elastičnosti za plitke temelje. Orijentacioni odnosi između modula elastičnosti i Menardovog modula prikazani su u tabeli 3 za različite vrste tla.

Vrsta	Treset α	Glina E_M/p_L	α	Prašina E_M/p_L	α	Pesak E_M/p_L	α	Šljunak E_M/p_L	α
OC, zbijen	1	>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
NC	1	9–16	2/3	8–14	1/2	7–12	1/3	6–10	1/4
UC, rastresito	1	7–9	1/2	5–8	1/2	5–7	1/3		

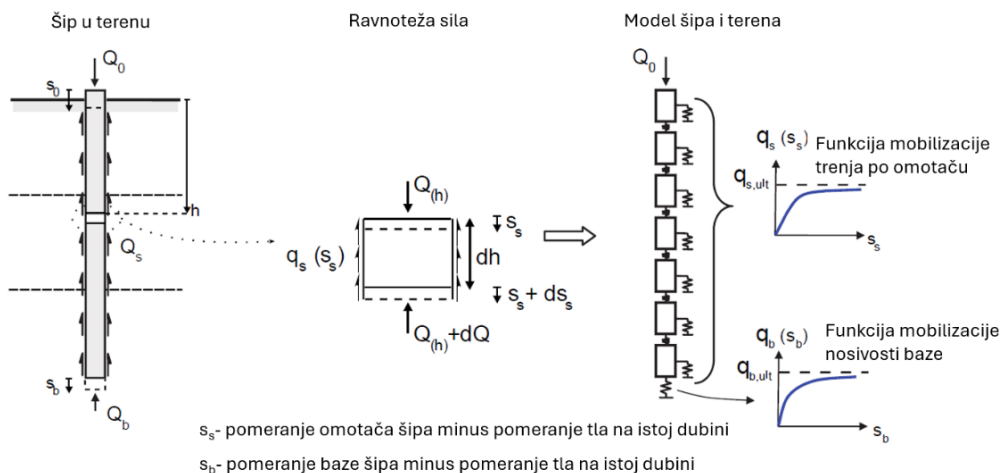
Tabela 2: Reološki koeficijent (α)

vrsta	stanje	E/E_M
Glina	NC	4.5
	OC	3.0
Prašina	NC	4.5
	OC	3.0
Pesak	rastersit	4.5
	zbijen	3.0
Šljunak	rastersit	6.0
	zbijen	4.5

Tabela 3: Orijentacione vrednosti odnosa E i E_M

Evrokod i drugi standardi definišu i postupke za geotehničko projektovanje dubokih temelja na osnovu rezultata MPT opita. Parametri određeni presiommetrom koriste se za: određivanje ekvivalentne dubine šipova (D_{ef}), jedinične nosivosti baze i omotača šipa i određivanje parametara funkcije prenosa opterećenja po omotaču i po bazi (p-y i t-z funkcije) za potrebe interakcije tlo-konstrukcija. Interakcija tlo-šip modelira se jednim od nekoliko pristupa: metoda prenosa opterećenja (t-z i q-t funkcije), metoda elastičnog kontinuuma i numeričko modelovanje, kao što je npr. metoda konačnih elemenata. Metoda prenosa opterećenja sastoji se u modeliranju šipa kao niza elastičnih elemenata koji su spojeni oprugama gde se otpori duž šipa nastali mobilizacijom trenja po omotaču predstavljaju t-z funkcijom, a otpori u bazi šipa se predstavljaju q-z funkcijom. Te nelinearne opruge lokalno predstavljaju

reakciju tla na relativno pomeranje između šipa i tla. Na slici 19 prikazane su sile (u ravnoteži) koje deluju na infinitezimalni element šipa. Interakcija tlo–šip predstavlja se diferencijalnom jednačinom koja ima rešenje ukoliko je poznata funkcija prenosa opterećenja (t-z i q-z funkcije).



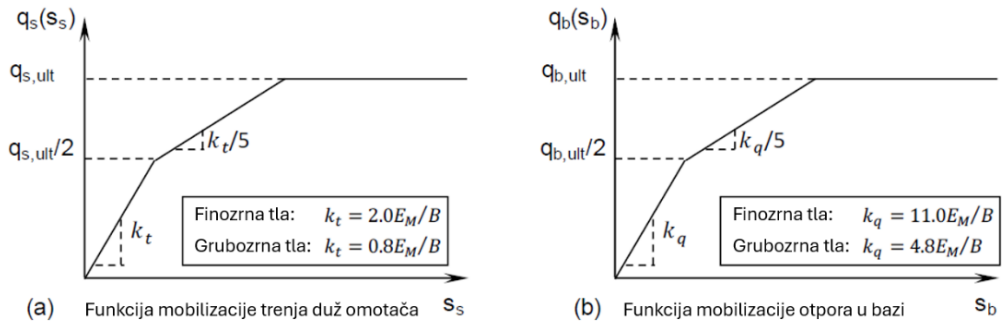
Slika 19: Princip metode prenosa opterećenja kod aksijalno pritisnutog šipa

Postoji veliki broj t-z i q-z funkcija i one su najčešće izvedene iz teorije elastičnosti, mogu biti empirijske ili poluempirijske prirode, ili su određene na osnovu merenja ponašanja instrumentalizovanih šipova. U praksi se veoma često koriste funkcije prenosa opterećenja koje su dali Frank i Zhao (1982), a koje su prikazane na slici 20. Ove funkcije su kalibrisane na osnovu velikog broja ispitivanja instrumentalizovanih šipova i koriste Menardov modul za određivanje krutosti opruga u zavisnosti od vrste tla. Pored vertikalno opterećenih šipova postoje postupci za modeliranje bočno opterećenih šipova primenom rezultata Menardovog presiometra.

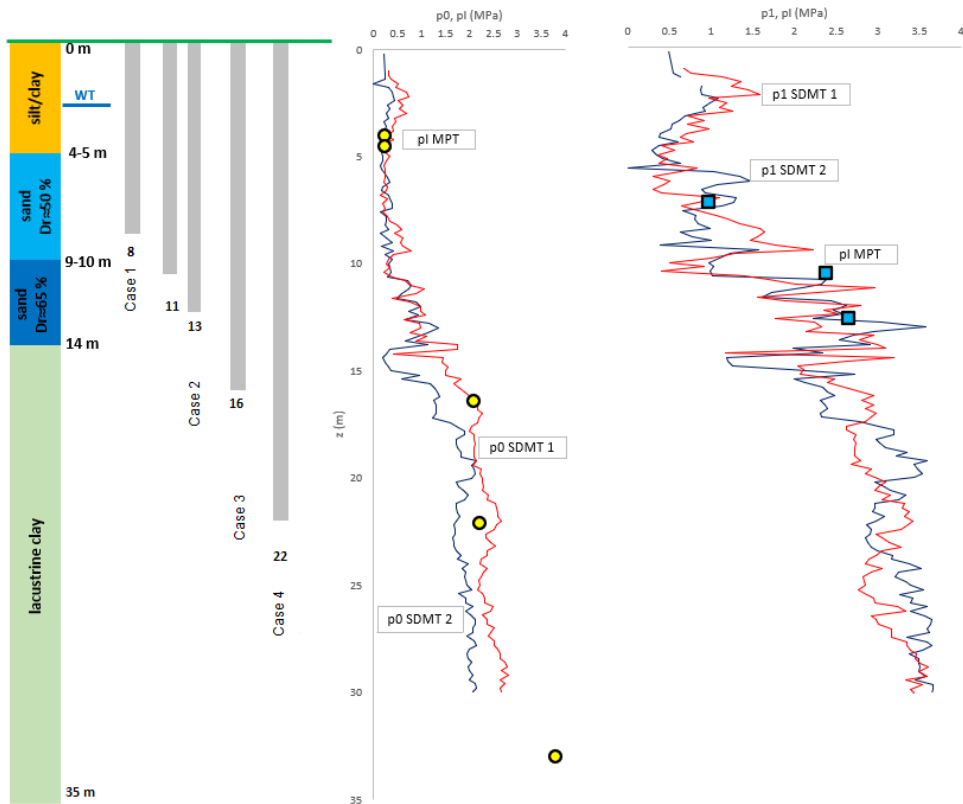
NEKO LIKO PRIMERA OPTIMIZACIJE PROJEKTA FUNDIRANJA

Prvi primer ukazuje na značaj MPT opita kod određivanja kompletne krive opterećenje-sleganje vertikalno opterećenih šipova. Na terenu je izvedeno 11 statičkih probnih opterećenja i veliki broj terenskih istražnih radova, od čega su urađeni i MPT opiti u bušotinama. Rezultati MPT opita iskorišćeni su u svrhu predikcije ponašanja vertikalno opterećenih šipova. Geotehnički model s rezultatima SDMT i MPT opita prikazani su na slici 21. Dužine šipova iznosile su od 8 do 22 m. Baza je u zavisnosti od dubine fundirana ili u peskovitom tlu ili u laporovitim glinama do glinovitim laporima. Detalji

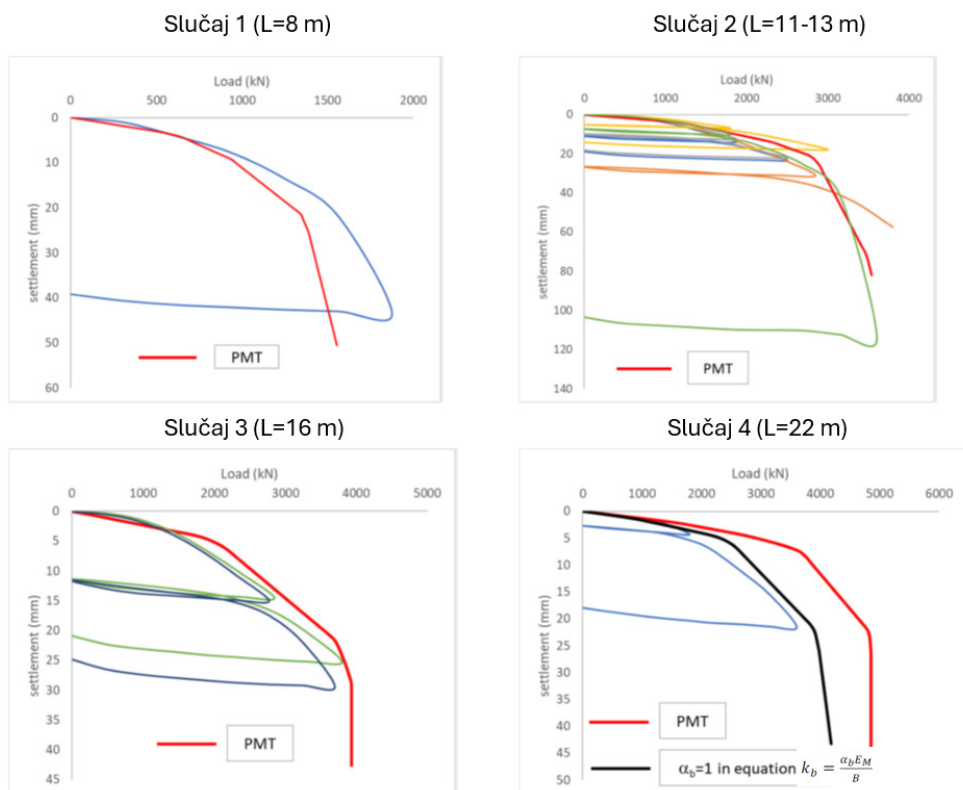
vezano za proračun i modeliranje šipa i tla mogu se naći u *Berisavljević i sar.* (2024). Razmatrana su 4 (slika 21) slučaja u zavisnosti od dužine šipa (šipovi su istog prečnika), a rezultat predikcije ponašanja šipova iz MPT opita prikazani su na slici 22.



Slika 20: Funkcije prenosa opterećenja



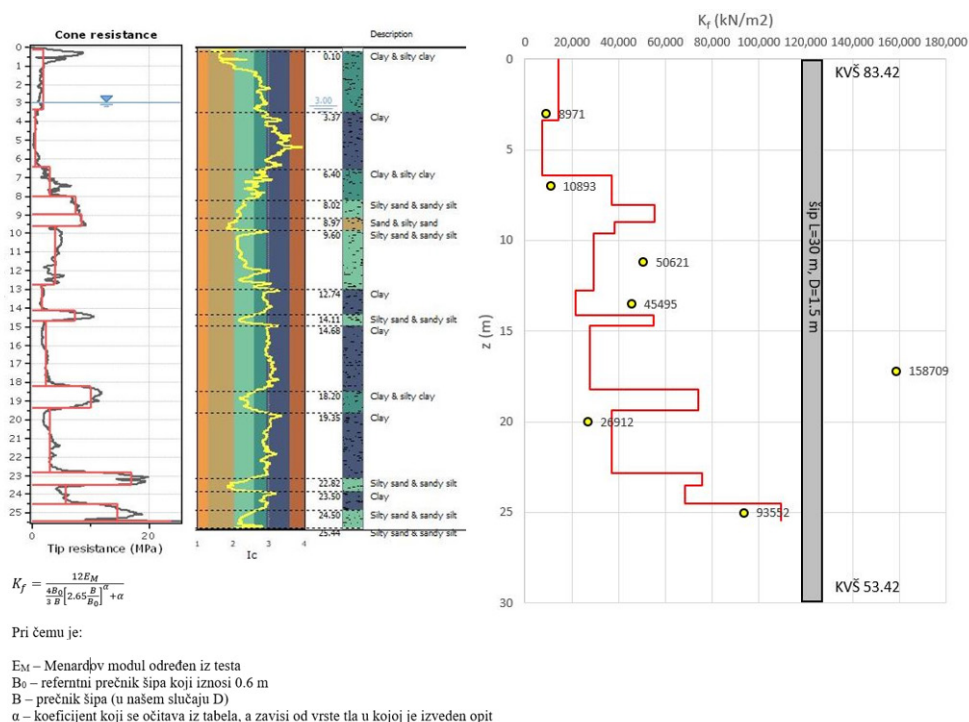
Slika 21: Geotehnički model terena i rezultat SDMT i MPT opita



Slika 22: Predikcija sleganja šipova različitih dužina iz rezultata Menardovog opita

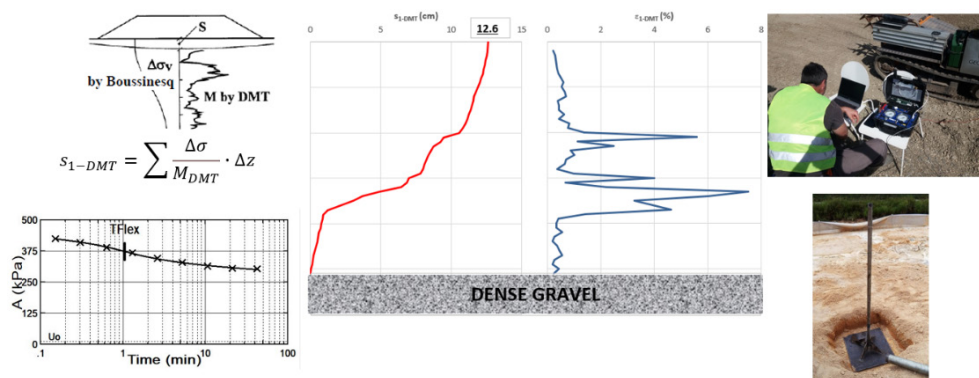
Rezultat prikazan na slici 22 ukazuje da postoji dobro poklapanje između rezultata dobijenih primenom Frank i Zhao (1982) metode i rezultata statičkog probnog opterećenja.

Drugi primer se odnosi na optimizaciju temeljne konstrukcije stuba prilaznog železničkog mosta ka kompleksu EXPO 2027. Na ovom gradilištu bilo je potrebno da se izračunaju krutosti opruga koje se koriste za modeliranje bočno opterećenih šipova iz rezultata Menardovog presiometra. Prethodno su krutosti određene iz rezultata laboratorijskih ispitivanja prema kojima su dobijena velika bočna pomeranja grupe šipova u fazi instalacije rasponske konstrukcije. Menardov presiometar je trebalo da omogući dobijanje realnijih krutosti i pomeranja (u granicama dozvoljenih). Model terena i rezultat određivanja linearnog koeficijenta reakcije tla K_f prikazan je na slici 23. Pored metode koja koristi parametre iz Menardovog opita prikazane su i K_f određene iz rezultata CPTu opita. U odnosu na inicijalno date krutosti iz rezultata laboratorijskih ispitivanja, K_f određene iz terenskih opita veće su za otprilike čitav red veličine.



Slika 23: Linearni koeficijent reakcije tla za jedan stub prilazne konstrukcije kompleksu EXPO 2027

Za projekat mosta na Savi na auto-putu Kuzmin–Sremska Rača vršen je monitoring sleganja podtla nasipa na više stacionaža. Na nekoliko tačaka urađena su dodatna geotehnička istraživanja, koja su se sastojala od izvođenja penetracionih opita (CPTu i SDMT) i istražnog bušenja. Za potrebe montiranja rasponske konstrukcije mosta na Savi bilo je neophodno da se izgradi nasip visine 9 m. S obzirom na to da je celokupna montaža obavljana s pomenutog nasipa, ceo postupak izvođenja je bio osetljiv na veličinu i vremenski tok sleganja temeljnog tla i nasipa. Na slici 24 prikazan je rezultat predikcije sleganja iz SDMT opita. Za proračun sleganja primenjena je 1D metoda konsolidacije, pri čemu su korišćeni moduli stišljivosti određeni iz DMT opita. Prikazana veličina sleganja odnosi se na sleganje nakon završetka primarne konsolidacije, dok inicijalno sleganje i sekundarna kompresija mogu da se uzmu u obzir na različite načine iz SDMT opita. Rezultat koji je na kraju dobijen ukazuje da su komponente izmerenog sleganja i sračunatog iz SDMT opita u veoma dobroj saglasnosti. S druge strane, značajno je bilo odrediti i vremenski tok sleganja. Prilikom toga korišćen je opit disipacije urađen u glinovitom materijalu, a njegov rezultat je prikazan na slici 24.



Slika 24: Sleganje nasipa iz SDMT opita na auto-putu Kuzmin–Sremska Rača

ZAKLJUČAK

U radu su prikazani neki savremeni postupci interpretacije *in situ* opita koji se često koriste u našoj geotehničkoj praksi za potrebe karakterizacije terena. Takođe, pokazano je da direktna upotreba parametara koji se dobijaju iz presiometarskih opita za potrebe predikcije ponašanja vertikalno i bočno opterećenih šipova u pogledu interakcije tlo–konstrukcija realnije opisuju ponašanje čitavog sistema. To je potvrđeno komparativnim analizama s rezultatima statičkih probnih opterećenja šipova. *In situ* opiti iz familije penetracionih opita, kao što su SDMT i CPTu, omogućavaju bolje razumevanje stanja i vrste tla koja je predmet izučavanja na nekoj lokaciji. Ovo je pre svega posledica velike količine podataka koja se dobija iz pomenutih opita i mogućnost merenja više parametara. Na kraju treba napomenuti da monitoring geotehničkih konstrukcija i ispitivanja u realnoj razmeri predstavljaju najbolji način za pouzdano i sigurno projektovanje, a kasnije i izvođenje građevinskih objekata. Terenske metode koje su ovde prikazane kalibrisane su u odnosu na rezultate opita u realnoj razmeri na velikim projektima. Stoga je trend poslednjih nekoliko godina da se projektovanje sve više oslanja na rezultate terenskih metoda.

LITERATURA

- [1] Baecher, G. B. (1982). "Statistical methods in site characterization." Updating Subsurface Samplings of Soils and Rocks and their In-Situ Testing, Santa Barbara, Engineering Foundation: 463–492
- [2] Berisavljević D., Božović N., and Stanić N. Paired in situ tests for site characterization and geotechnical design optimization. Proceedings of the 7th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization Barcelona, 18 – 21 June 2024.
- [3] Berisavljević D., Berisavljević Z. Dilatometer and seismic dilatometer tests in different depositional environments. 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization. Budapest, 2021. (SMA for the best paper).
- [4] Frank, R. & Zhao, S. R. (1982). Estimation par les paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins. Bull. Liaison Lab. Ponts Chaussées 119, 17–24.
- [5] Ménard, L. 1967. Règles d'utilisation des techniques pressiométriques et d'exploitation des résultats obtenus pour le calcul des fondations. Notice Générale D-60.

Rad broj 9, kategorija Pregledni rad

Dušan Berisavljević,
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet,
Beograd, Đušina 7,
dusan.berisavljevic@rgf.bg.ac.rs,
ORCID: 0009-0000-7992-625X, str. 117