

MERITVE IN INTERPRETACIJA TOGOSTI TAL PRI MAJHNIH SPECIFIČNIH DEFORMACIJAH

Vojkan Jovičić

IRGO – Inštitut za rudarstvo, geotehnologijo in okolje

Povzetek: Prikazane meritve togosti tal pri zelo majhnih specifičnih deformacijah (G_{\max}) so bile opravljene pod dinamičnimi in statičnimi obremenitvami, v triosnem aparatu, vključno do visokih napetostih. Osne specifične deformacije pri statičnem obremenjevanju so bile merjene s pomočjo lokalnih merskih naprav (LVDT-ji). Pri dinamičnih preiskavih pa je bila togost določena s pomočjo bender elementov. Rezultati obeh metod so pokazali dobro ujemanje pri togostih izmerjenih za specifične deformacije velikosti 0.0001%, za dve različne zemljine.

Bender elementi merijo hitrost propagacije strižnih valov skozi vzorec tal, na osnovi katerih se določa vrednost G_{\max} . Bender elementi so bili instalirani v triosno napravo za apliciranje visokih tlakov, kjer so bili uporabljeni za preizkušanje mehkih hribin. V članku bodo predstavljene teoretične študije in dinamične analize z metodo končnih elementov, s pomočjo katerih so bili razviti bolj objektivni kriteriji za določanje G_{\max} .

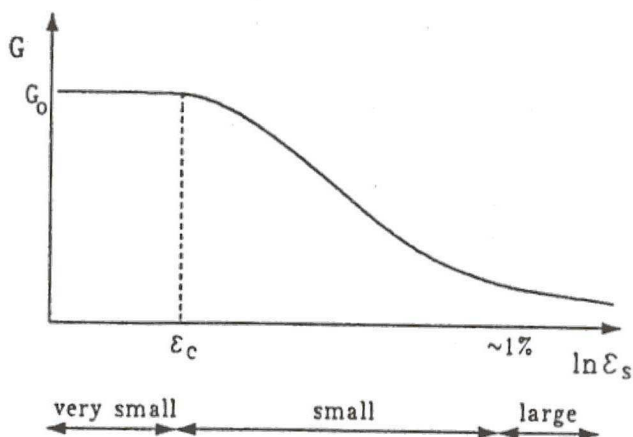
Podani so rezultati dobljeni z bender elementi na peskih, pri čemer se določa sprememba G_{\max} in se povezuje s togostjo pri večjih specifičnih deformacijah, določenih pri statičnih preizkusih s pomočjo LVDT-jev. Trije peski z različno geološko zgodovino so bili preizkušeni v širokem razponu napetosti, kar je omogočilo vzpostavitev skupnega okvirja za obravnavanje togosti peskov. Interpretacija rezultatov je bila zasnovana na pravilni normalizaciji podatkov, s čimer so bile izpeljane enotne odvisnosti za posamezne peske. Izpostavilo se je, da sta ključna dejavnika, ki uravnavata togost hidrostatska komponenta napetosti in oddaljenost trenutnega volumskega stanja od linije primarne kompresije; podobno kot to velja za glin. Postavljen okvir pa upošteva tudi, ali je bilo volumsko-napetostno stanje doseženo z zbijanjem ali prekonsolidacijo, kar je za peske ključnega pomena.

UVOD

Članek prikazuje del raziskovanja, ki sem ga opravil v okvirju doktorskega študija na City Universty, v Londonu, leta 1997. Glavno področje mojega raziskovalnega dela je bilo preiskovanje togosti tal in mehkih kamnin pri majhnih in zelo majhnih specifičnih deformacijah. Togosti v tem območju so pomembne za napovedovanje obnašanja zemljin pri majhnih specifičnih deformacijah, ki je potreben za formuliranje nelinearnih konstitutivnih modelov. Ta članek podrobneje obdeluje dve temi: tehniko meritev togosti z bender elementi in splošni teoretični okvir togostnega obnašanja peskov.

V večini tal se nepovratne (plastične) deformacije pojavijo pri specifičnih deformacijah, ki so manjše od 0.001% (Atkinson & Sallfors, 1991), tako, da se izrazito nelinearno napetostno-deformacijsko obnašanje nadaljuje pri vseh večjih deformacijah, kot je shematsko prikazano na

sliki 1. Zelo majhne specifične deformacije navadno povezujemo z dinamičnimi obremenitvami, vendar je danes že dobro znana pomembna vloga majhnih specifičnih deformacij pri odzivih tal tudi pri statičnih obremenitvah (Simpson, 1991; Burland, 1989) in drugi so pokazali, da je nivo specifične deformacije v bližini geotehničnih objektov v razponu od majhnih do zmernih specifičnih deformacij (do 0.2%). Pri tem različni avtorji poudarjajo pomen degradacije togosti z zvišanjem specifične deformacije. Ključni parameter te karakteristične togostno-deformacijske krivulje za katerokoli tla je togostni modul pri zelo majhnih specifičnih deformacijah G_{\max} (ali G_0 pri nekaterih avtorjih).



Slika 1 Obnašanje tal pri majhnih deformacijah (Atkinson and Salfors, 1992)

Vrednost G_{\max} lahko merimo v laboratoriju s pomočjo rezonačne preiskave (resonant column test) ali s pomočjo nekaterih dinamičnih metod, ki so zasnovane na širjenju valov skozi vzorec. V okviru tega raziskovanja je bil G_{\max} določen s pomočjo bender elementov, ki merijo čas potovanja strižnega vala skozi vzorec. Togosti so bile določene tudi pri kontinuiranem strižnem preizkusu v triosni celici, pri čemer so bile zelo majhne specifične deformacije merjene s pomočjo osnih lokalnih inštrumentov pritrjenih direktno na vzorec.

Predhodne raziskave togosti peska pri zelo majhnih specifičnih deformacijah so nakazovale, da je G_{\max} odvisen od trenutnega volumetrijsko-napetostnega stanja in napetostne zgodovine tal (Hardin & Richart, 1963; Hardin & Blanford, 1983). Vendar je bila večina teh preiskav opravljena pri zmernih napetostih, kar je preprečevalo vzpostavitev odnosov med temeljnimi materialnimi parametri. Te odnose je možno opaziti le pri bistveno višjih napetostih. Zaradi tega do zdaj ni bilo možno vzpostaviti teoretično-eksperimentalnega okvirja, ki obravnava togostno obnašanje peskov. Namen raziskovalne naloge je bil laboratorijsko obdelati peske v območju bistveno višjih napetosti kot do zdaj, z namenom, da se vzpostavi odvisnost togosti tal, ne samo od hidrostatske komponente napetosti temveč tudi od volumskega stanja peska. Trije rekonstituirani peski z različnim geološkim izvorom so bili preiskani z namenom postavitve novega teoretično-eksperimentalnega okvirja, ki obravnava togost peskov.

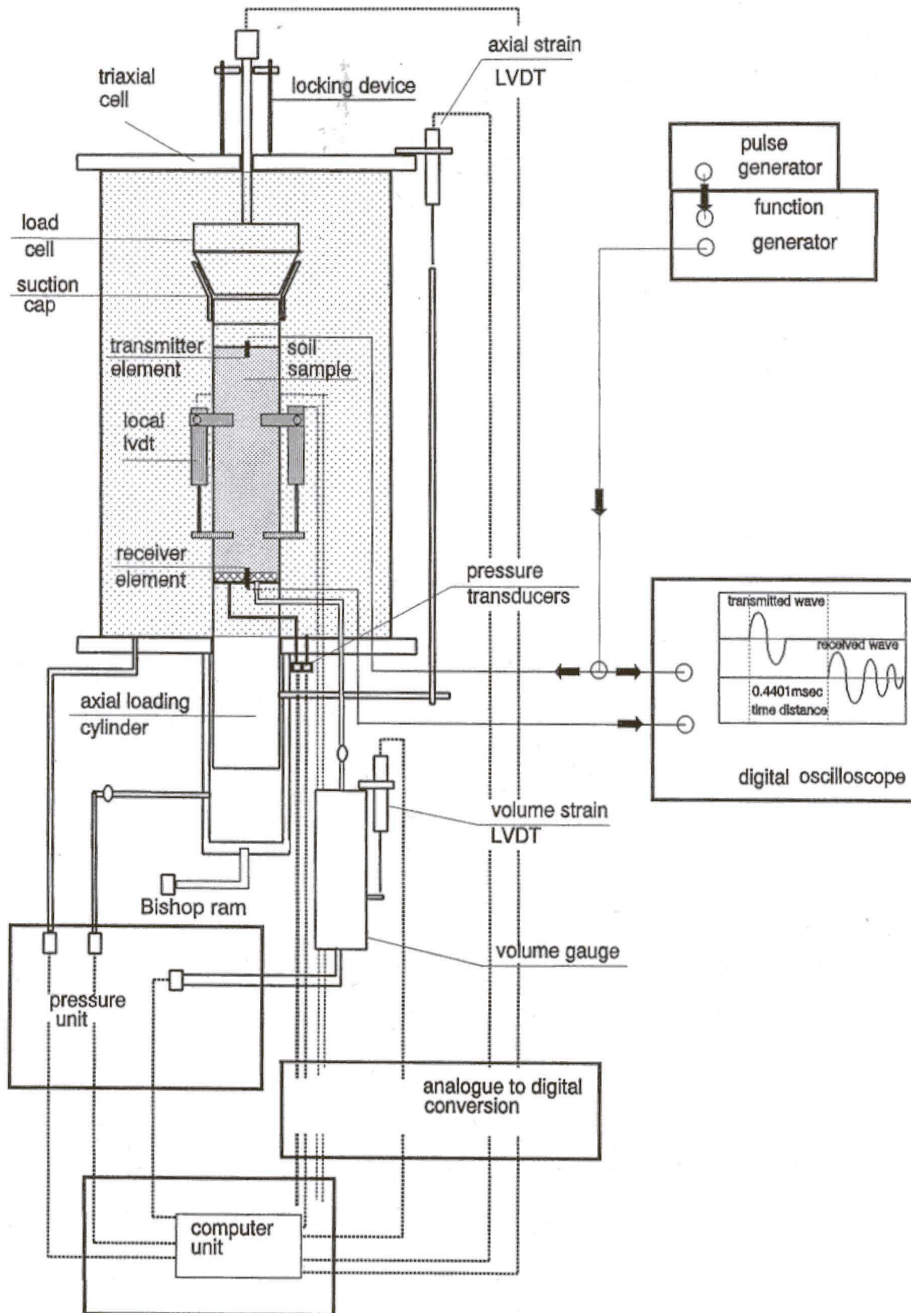
1. MERITEV MAJNIH SPECIFIČNIH DEFORMACIJ V LABORATORIJU

1.1 Uvod

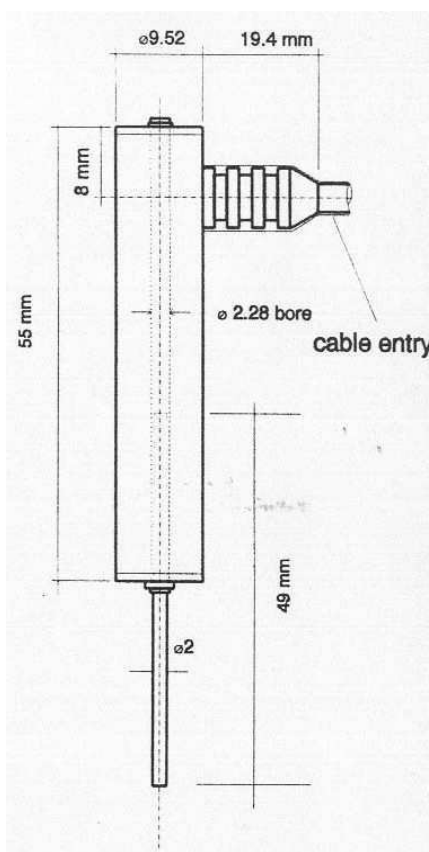
Tehniko bender elementov sta razvila Shirley and Hampton (1977), v triosnem aparatu pa so jo prvi uporabili Shulteiss (1982), Dyvik and Madshus (1985). To je relativno enostavna metoda za določitev strižnega elastičnega modula v tleh pri zelo majhnih deformacijah. Prednost metode

bender elementov je, da v povezavi s triosnim aparatom omogoča poljubno število ne-destruktivnih meritev G_{\max} v času triosnega testa s poljubno kontrolo napetostnih poti.

Preizkusi z bender elementi so bili izvedeni v triosni celici, ki sta jo razvila Bishop and Wesley (1975), le-ta je shematsko prikazana na sliki 2. Vodenje preizkusa in beleženje podatkov je popolnoma avtomatizirano (Atkinson, Evans and Scott, 1985). Celica je bila opremljena z dvema merilcema napetosti za pritisk v celici in pornih tlakov, z notranjo celico za merjenje devijatorske sile, s cilindrom za merjenje spremembe volumna in za merjenje osnih specifičnih deformacij z LVDT-ji; eden, ki je bil nameščen na zunanji strani celice in dva potopna, ki sta bila pritrjena direktno na vzorec. Premer vzorca je bil 38mm, maksimalna napetost v celici je bila 700kPa. Preiskave pri višjih napetostih so bile opravljene v visoko tlačnih, napetostno vodenih aparatih, z makimalnim tlakom 5Mpa. Oprema je bila podobna kot je bila pri Bishop and Wesley celici. Razlika je le ta, da je premer vzorca znašal 50mm.



Slika 2 Shematski prikaz triaksialne celice z bender elementi in LVDT-ji

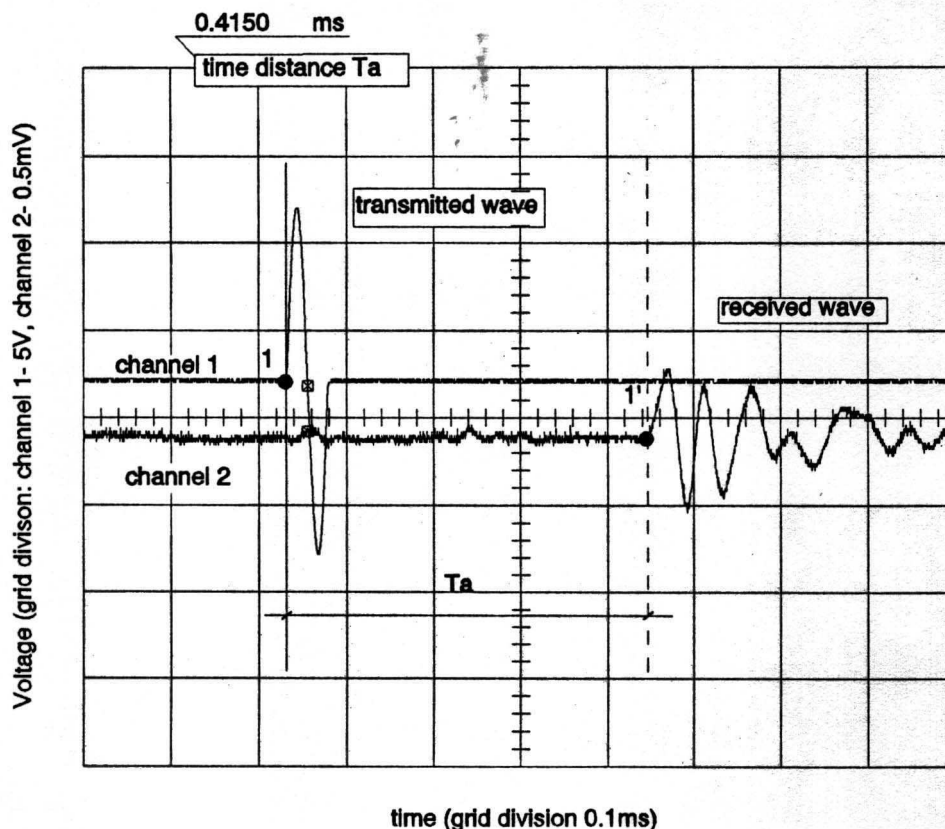


Slika 3 Shematski prikaz LVDT-ja

Potopni LVDT-ji za merjenje osnih specifičnih deformacijah so bili izbrani, ker omogočajo merjenje togosti v podobnem razponu kot bender elementi. Izbran je par LVDT -jev (RDP D5-200) s senzorsko minijaturno palico in priključnim kablom na desni strani, kot je prikazano na sliki 3, kar omogoča prost prehod palice skozi telo LVDT-ja pri višjih specifičnih deformacijah.

1.1.1 Teoretično ozadje metode bender elementov

Teoretične in numerične študije so preiskovale posamezne vidike uporabe bender elementov v triosnih celicah. Konfiguracija postavitve sistema bender elementov v triaksijalni celici, ki je prikazana na sliki 2, se uporablja za določitev potovanja strižnih valov skozi vzorec. Bender elementi vzbujeni s pomočjo električne napetosti vibrirajo in s tem sproščajo energijo v vzorec, skozi katerega se širijo strižni valovi. Te valove prestreže sprejemnik, ki je nameščen tako, da sprejme transverzalne pomike, ki potujejo skupaj s strižnim valom. Meri se potovalni čas strižnega vala T_a , ki predstavlja razdaljo med dvema karakterističnima točkama na zaslonu osciloskopa, kot je prikazano na sliki 4. Točka 1 predstavlja začetek vzbujanja bender elementa in ima v tem primeru sinusoidno obliko. To je trenutek sprostitve energije z bender elementom v vzorec. Točka 1' predstavlja začetek vzbujanja sprejemnika, kar označi prenos energije z vzorca v sprejemni bender element.



Slika 4 Karakteristične točke sprejetega signala z metodo bender elementov

Pri predpostavki, da so specifične deformacije v vzorcu elastične pri potovanju strižnih valov in ob poznavanju oddaljenosti med vrhoma bender elementov L_a in vremenske oddaljenosti T_a med točkami 1 in 1' s slike 4, se lahko izračuna hitrost strižnih valov v_s s pomočjo naslednje povezave:

$$v_s = \frac{L_a}{T_a} \quad 1.1$$

tako, da se strižna togost G_{\max} pri zelo majhnih specifičnih deformacijah izračuna s pomočjo:

$$G_{\max} = \rho v_s^2 \quad 1.2$$

kjer ρ predstavlja gostoto suhega vzorca, oziroma skupno gostoto nasičenega vzorca tal.

1.1.2 Uporabnost metode s praktičnega stališča

Metoda bender elementov temelji na osnovi naslednjih predpostavk, ki so skupne vsem metodam, ki obravnavajo razširjanje valov:

- (i) specifične deformacije, ki jih povzroči oddajnik so zelo majhne, torej je odziv na dinamično obremenitev elastičen
- (ii) razdalja potovanja vala je določena z razdaljo med vrhoma bender elementov

(iii) val, ki potuje po vzorcu je planarni strižni val, iz česar sledi, da z valom potuje le transverzalna deformacija

(iv) vzorec se obnaša kot brezkončni prostor za podano konfiguracijo oddajnika in sprejemnika, tako, da vsi valovi odbiti od roba vzorca pridejo na cilj kasneje kot direktni val

Obstaja zelo malo dokazov, ki podpirajo predpostavko iz točke (i), ker je dejansko nemogoče izmeriti specifične deformacije med vzorcem in elementom. V času preiskave so bile togosti nekaterih vzorcev zelo nizke, vendar ni nikdar prišlo do akumulacije specifičnih deformacij zaradi dinamične obremenitve. Ker je dinamična obremenitev ciklična, to nakazuje, da so deformacije reverzibilne, torej elastične.

Viggiani (1992) je potrdila točnost predpostavke (ii). Predpostavka (iii) generalno ne drži. Za razpon razdalj in frekvenc, ki so v uporabi pri tej metodi so oddani valovi sferični in ne planarni (v eni ravnini), tako da se v vzorcu ne pojavljajo samo transferzalne deformacije. Širjenje sferičnih (krožnih) valov je bistveno bolj komplicirano v smislu potovanja vala (propagacije) in polarizacije, torej teoretična ločitev valov na strižne in kompresijske ni mogoča.

Najbolj popolno analitično rešitev problema širjenja valov skozi telo so podali Sanches-Salintero, Roeset & Stokoe (1986). V študiji so obdelali širjenje valov iz točkovnega vira skozi neskončen izotropen in elastičen prostor. Vir je vzbujen s sinusoidnim valom, ki je transverzalno polariziran relativno na položaj oddajnika. Oblika sferičnega vala je določena z enačba prikazano na sliki 5 s pomočjo spremenljivko Γ_a , kjer je ω vogalna hitrost in v_p hitrost kompresivnih valov. Sferični val je daleč od tega, da bi bil enostavno transverzalno polariziran strižni val, ki se razširja v longitudinalni smeri, kot predvideva bender metoda.

$$\Gamma_a = \frac{1}{d} e^{-i \frac{\omega d}{v_s}} + \left(\frac{1}{i \frac{\omega d^2}{v_p}} - \frac{1}{\frac{\omega^2 d^3}{v_p^2}} \right) e^{-i \frac{\omega d}{v_s}} - \left(\frac{v_s}{v_p} \right)^2 \left(\frac{1}{i \frac{\omega d^2}{v_p}} - \frac{1}{\frac{\omega^2 d^3}{v_p^2}} \right) e^{-i \frac{\omega d}{v_p}}$$

$\Gamma_a = \underbrace{\Gamma_1}_{\text{shear wave}} + \underbrace{\Gamma_2 - \Gamma_3}_{\text{compression wave}}$
far field term near field term

Slika 5 Razdelana funkcija gibanja sferičnega vala

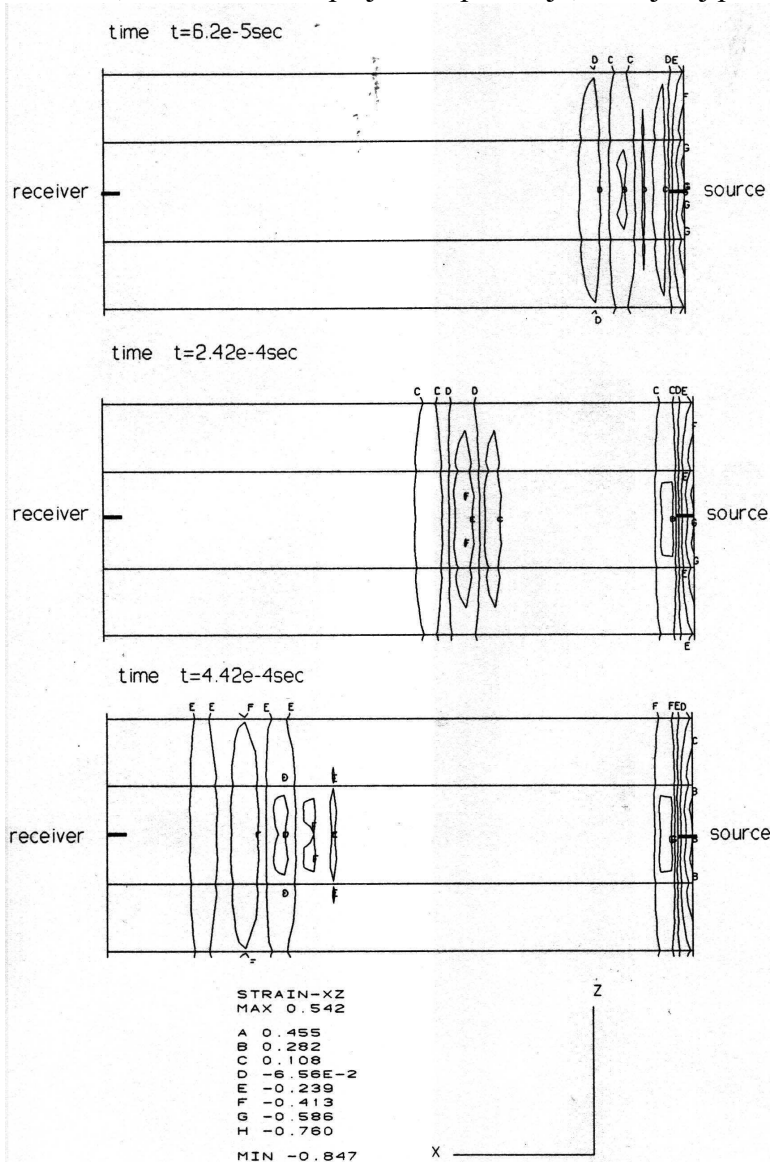
Salintero, Roeset & Stokoe (1986) so ugotovili, da je spremenljivka Γ_a odvisna od treh elementov in je vsota izrazov Γ_1 , Γ_2 in Γ_3 , ki predstavljajo transverzalno gibanje vendar pri različnih hitrostih. Prva dva, Γ_1 in Γ_2 opisujeta hitrost strižnega vala, zadnji Γ_3 pa hitrost kompresijskega vala. Vse tri komponente se manjšajo zaradi geometrijskega dušenja pri propagaciji, vendar z različnimi stopnjami. Γ_2 in Γ_3 se manjšajo za red velikosti hitreje kot Γ_1 . Izraza Γ_2 in Γ_3 opisujeta valove, ki nastopijo blizu izvira motnje in jih zato imenujemo tudi valovi bližnje okolice. Izraz Γ_1 (far field term) pa opisuje čisti strižni val in je edini, ki ga zaznamo tudi v večji oddaljenosti od vira motnje in sicer tam, kjer valova Γ_2 in Γ_3 (near field terms) postaneta zanemarljiva. Geometrično dušenje na ta način loči območje, kjer se prepletajo strižni in kompresijski valovi od področja, kjer nastopajo čisti strižni valovi. Salintero, Roeset & Stokoe (1986) so svoje ugotovitve podali s pomočjo količnika R_d , ki ovrednoti geometrijsko dušenje in posredno definira obliko sprejemnega vala. Vrednost R_d je podana kot količnik med razdaljo med sprejemnikom in oddajnikom d in valovno dolžino izvornega valu λ_w :

$$R_d = \frac{d}{\lambda_w}, \lambda_w = \frac{v_s}{f} \quad 1.3$$

tako da je:

$$R_d = f \frac{d}{v_s} \quad 1.4$$

pri čemer je f frekvenca izvornega vala. Glede na analitično rešitev je ta pojav opazen le pri vrednosti R_d višji od 2.0. Pri nižjih vrednostih R_d -ja v začetku nastopi odklon navzdol v signalu, pred prihodom strižnih valov, ki so povezani z valovi bližnje okolice (Γ_3). Pri višjih vrednostih R_d -ja je vpliv teh valov zanemarljiv. Iz tega je razvidno, da je predpostavka (iii) veljavna le pri odsotnosti valov bližnje okolice. Ker imajo sinusni valovi pretežno le eno frekvenco, katera se lahko poljubno spreminja, so najbolj primerna oblika izvornega vala.



Slika 6 Konture specifičnih deformacij v vzorcu dobljene s pomočjo metode končnih elementov

Predpostavko (iv) je zaradi kompleksnih robnih pogojev pri namestitvi sistema bender elementov v triosni celici nemogoče preveriti analitično v obliki enoznačne rešitve. Zato je bila uporabljena metoda končnih elementov, s pomočjo katere je bila preverjena neodvisnost metode bender elementov od namestitve oddajnika in sprejemnika. Numerične analize so bile opravljene s programskim paketom Solvia90, v tridimenzionalnem 3D prostoru, kar je omogočilo upoštevanje kompleksnih robnih pogojev. Rezultati numerične analize so podali identične vrednosti odziva bender elementa kot jo predvideva teorija, vključno s vplivom valov bližnje okolice. Vpliv mejnih pogojev (predpostavka iv) je prikazan na sliki 6, ki kaže konture nivoja specifične deformacije v prerezu vzorca v ploskvi premika. Konture specifičnih deformacij so proporcionalne napetostim, ker je material modeliran kot elastičen medij, tako da so vrednosti kontur določene arbitrarno. Konture so podane za tri karakteristične časovne dogodke: čas neposredno po vzbujanju oddajnika, vmesni čas in trenutek prihoda valov do vozlišča, ki predstavlja vrh sprejemnika. V vseh treh primerih je opazno, da valovi potujejo vzdolž osi vzorca in vzporedno z bazo vzorca. Strižna motnja se s časom v vzorcu razširi, velikost specifičnih deformacij pa se zmanjša zaradi geometrijskega dušenja pri prehodu valu do sprejemnika za en velikostni red.

Vse pomembne predpostavke vezane na metodo bender elementov so bile predstavljene, njihova veljavnost pa je bila potrjena pod pogoji, katere je možno kontrolirati. Vendar metoda še vedno ne omogoča rutinske uporabe, saj zahteva izkušenega preiskovalca z dobrim poznavanjem metode in teoretičnega ozadja. Ob predpostavki, da je stik med bender elementi in zemljino ali kamnino dober, lahko poda metoda bender elementov zanesljive rezultate.

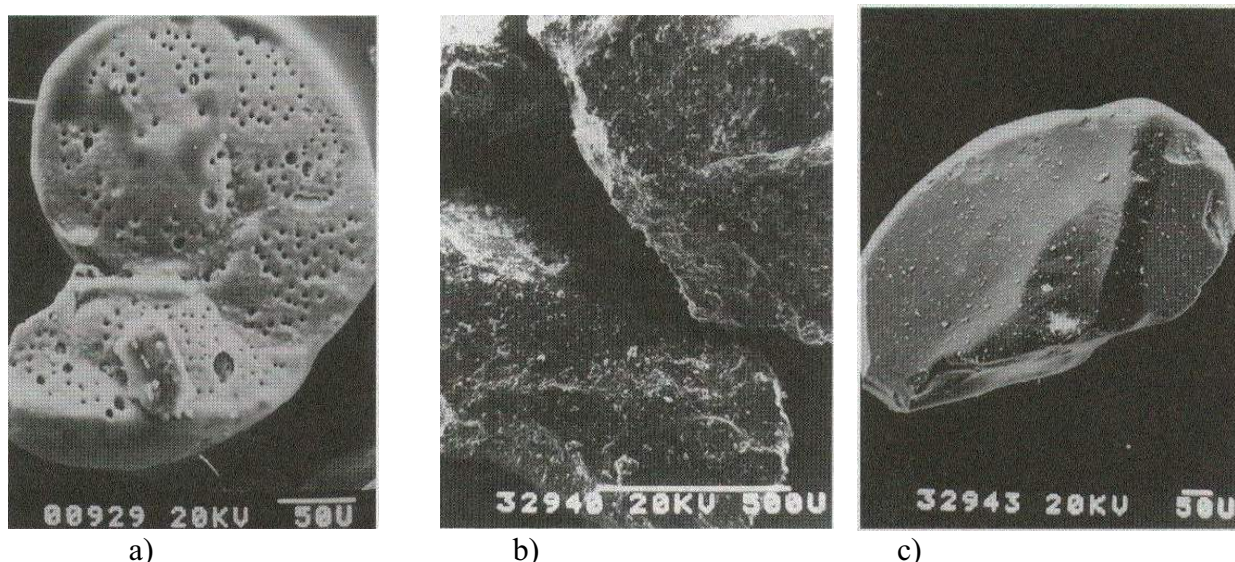
2. TOGOST PESKOV PRI ZELO MAJHNIH IN MAJHNIH SPECIFIČNIH DEFORMACIJAH

2.1 Preiskovane zemljine

Zaradi primerljivosti s predhodnimi raziskavami na peskih (Coop, 1990; Lee, 1991; Coop & Lee, 1993) so bili uporabljeni trije peski, ki so bili obdelani v raziskavah. To so Dogs Bay pesek, razpadli granit in Ham River pesek, ki so bili izbrani zaradi razlike v izvoru in sestavi. Dogs Bay pesek je iz Irske. Sestavlja ga pa povečini biogena karbonatna komponenta v obliki foraminifer in lupin školjk (slika 7a). Pesek je slabo graduiran in ima velik delež kalcijevega karbonata. (Houlsby et al., 1988). Peske je iz sipinskega okolja odvezel in obdelal Evans (1987). Delci peska so relativno nepoškodovani, njihova odprta in oglata struktura pa ima za posledico visok količnik por, ki ga v teh peskih merimo.

Korejski razpadli granit je residualna zemljina, ki jo po preperelosti uvrščamo v V stopnjo po klasifikaciji Geological Society (1990). Naravno se pojavlja s kompleksno strukturo, tako da je potrebno za rekonstituiranje vzorca material mehansko drobiti in s tem uničiti medzrnske povezave. Pri drobljenju so bili izločeni delci večji od 5 mm. Ker v naravi ta zemljina ni bila transportirana, je dobro graduirana z oglatimi in pologlatimi zrni (slika 7b). Razpadel granit je nastal s kemičnim preperevanjem, tako da je vsak delec sestavljen iz mešanice različnih mineralov. Kremen in kalijeve glinenci so podedovani z matične kamnine, medtem ko so kaolin in smektiti produkt preperevanja.

Ham River pesek je kvarcitne sestave in je odvezel iz peskokopa Chersty v Angliji. To je značilen rečni sediment, slabe graduiranosti s pol oglatimi do zaobljenimi delci (slika 7c).



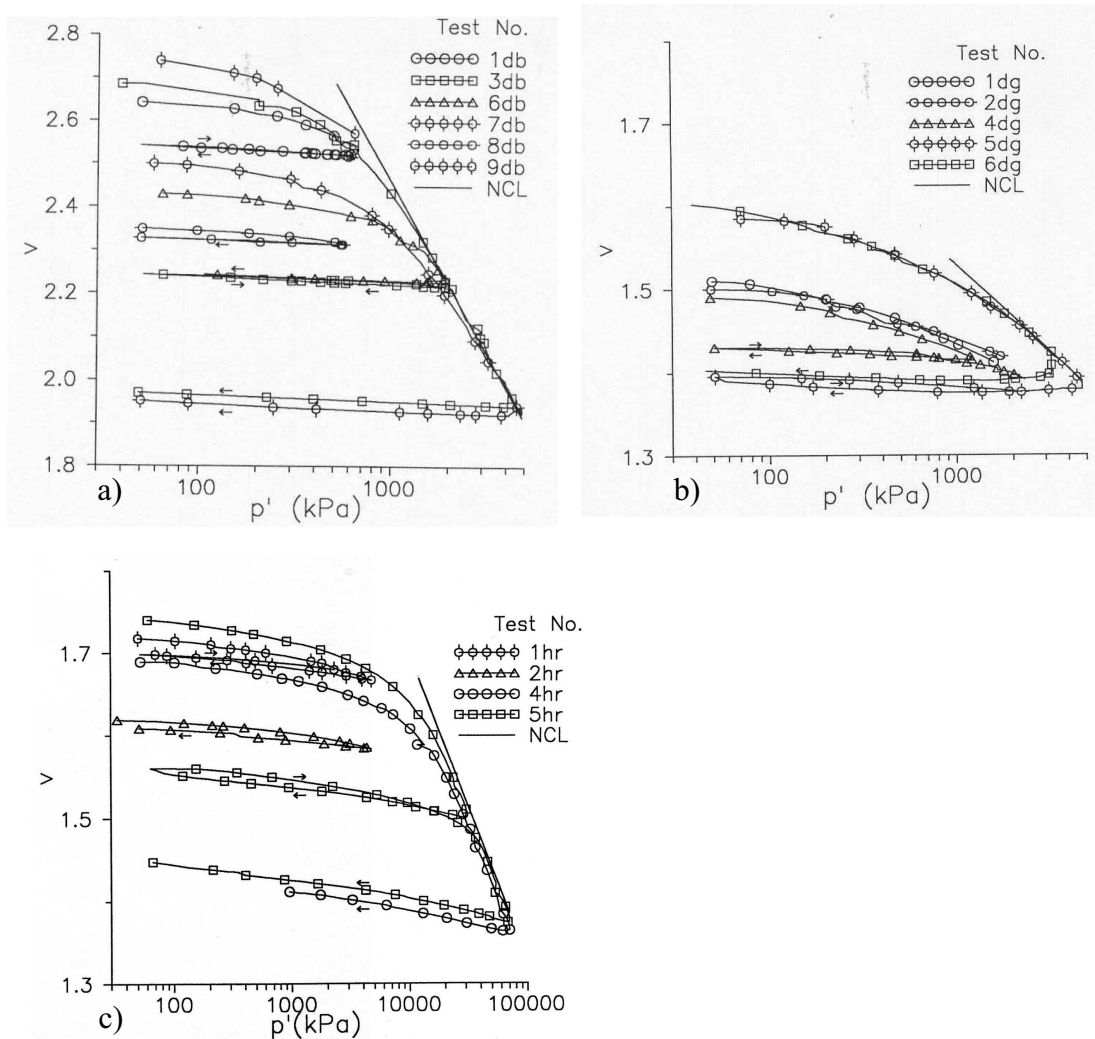
Slika 7 SEM posnetki tipičnih vzorcev peskov a) Dogs Bay pesek, b) razdrobljeni granit, c) Ham River pesek

2.2 Togosti pri zelo majhnih specifičnih deformacijah

2.2.1 Preiskave Dogs Bay peska

Vzorci Dogs Bay peska so bili pripravljene v najširšem možnem razponu začetnih gostot kar jih omogočajo različne tehnike priprave (od suhega zbijanja do plavljenja). Volumske poti pri hidrostatskem (izotropnem) obremenjevanju so podane v v - $\ln p$ ravnini na sliki 8a ($v=1+e$, kjer je e koeficijent poroznosti; $\ln p$ je naravni logaritem efektivne hidrostatske komponentne napetosti). Iz slike je razvidno, da ne glede na njihovo začetno gostoto, vsi vzorci težijo po svojih poteh k enotni liniji izotropne kompresije (odslej NCL od angleške besede: normal compression line). Poti kažejo, da gre za postopno plastično deformiranje, pri čemer manj zbiti vzorci dosežajo NCL pri nižjih napetostih. Na primer, najmanj zbit vzorec 9db doseže stanje normalne zbitosti oziroma NCL pri 700 kPa, medtem ko je najbolj zbit vzorec 8db dosegel NCL pri celih 3 MPa.

Pri ciklusih razbremenjevanja in ponovnega obremenjevanja je bil odziv vseh vzorcev zelo tog, z jasno izraženimi točkami popuščanja pri ponovni obremenitvi nad predhodno najvišjo napetostno obremenitev (odslej prekonsolidacijska napetost). To značilno rekompresijsko obnašanje je posledica drobljenja delcev, ki se začne pri preseganju prekonsolidacijske napetosti.

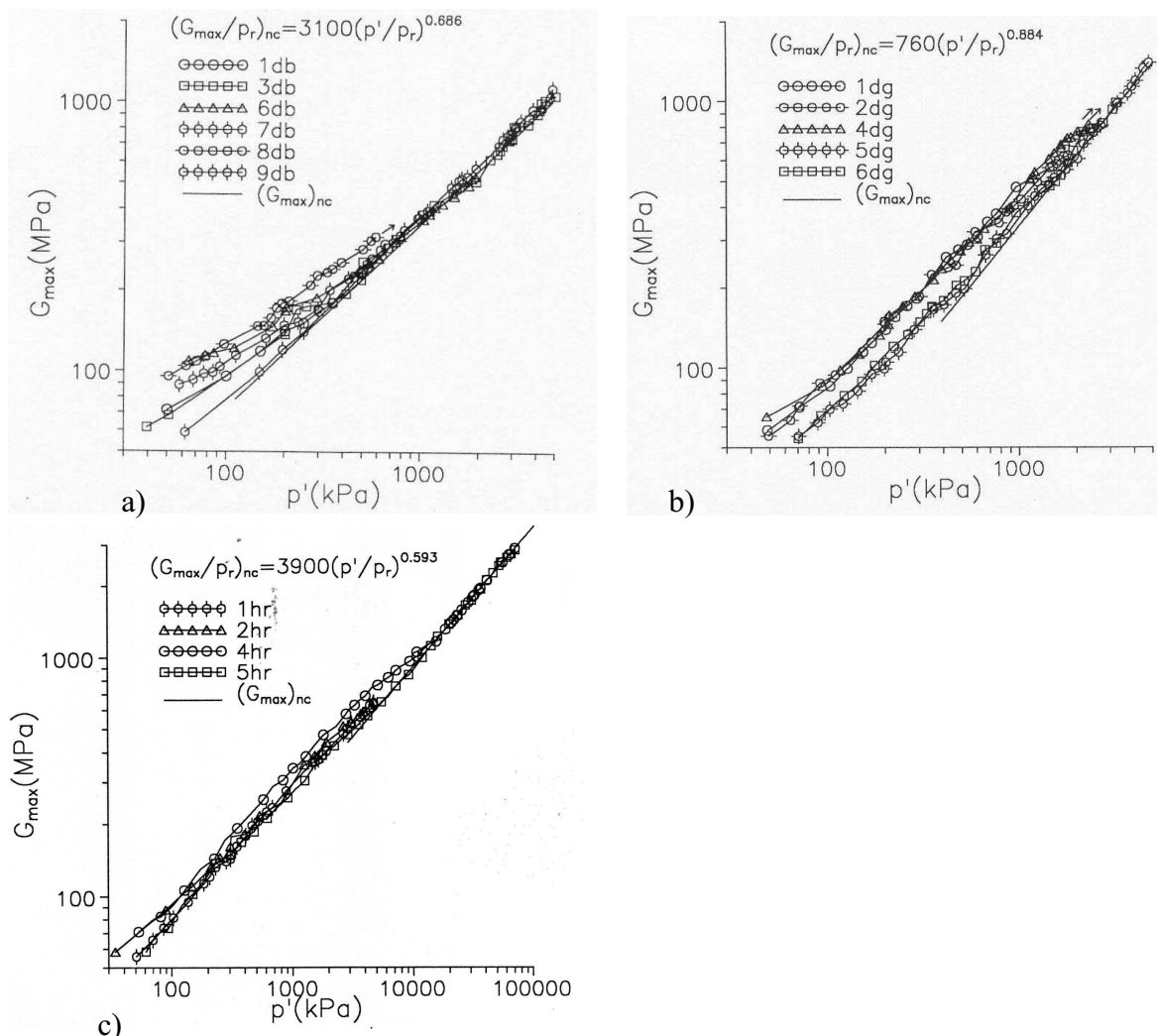


Slika 8 Volumske poti pri izotropni kompresiji za a) Dogs Bay pesek, b) razdrobljeni granit, c) Ham River pesek

Meritve z bender elementi pri prvi izotropni obremenitvi so podane na sliki 9. Vsak odčitek z bender elementa predstavlja na sliki točkovni podatek. Z direktno primerjavo rezultatov s slike 8a in 9a je razvidno, da začetna zbitost vzorca močno vpliva na vrednosti G_{max} . Razlika v specifičnem volumnu med vzorcema 9db in 8db, ki znaša 17 %, povzroči 70 % razliko vrednosti G_{max} -a.. Večanje začetne zbitosti se odraža z večanjem strižnega modula G_{max} v vseh obravnavanih vzorcih.

Iz slike 9a lahko razberemo, da pri prvi obremenitvi vrednosti G_{max} za vzorce različnih zbitosti težijo k skupni liniji, ki je prikazana na sliki in ki predstavlja ekvivalent izotropni liniji normalne konsolidacije v ravnini v - $\ln p$. Ta rezultat kaže, da stanje normalne kompresije ne predstavlja samo referenčnega stanja pri volumskih spremembah temveč tudi referenčno stanje za togost pri zelo majhnih specifičnih deformacijah. Linija predstavljena na sliki 9a predstavlja v log-log ravnini premico tako, da jo lahko apriksimiramo z eksponentno enačbo v obliki :

$$\left(\frac{G_{max}}{p_r}\right)_{nc} = A\left(\frac{p'}{p_r}\right)^n \tag{2.1}$$



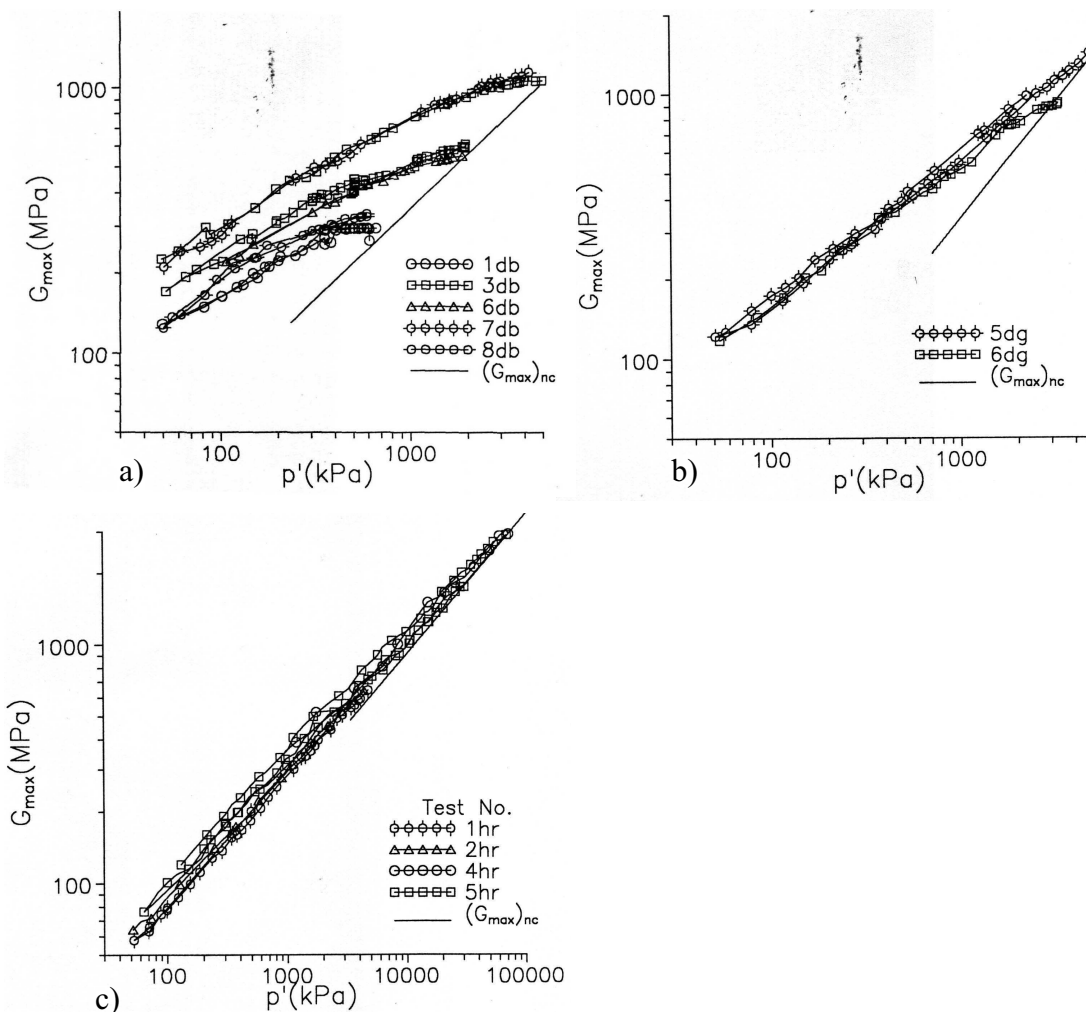
Slika 9. Spreminjane G_{max} z izotropno napetostjo p pri začetnem obremenjevanju a) Dogs Bay pesek, b) razdrobljeni granit, c) Ham River pesek

kjer $(G_{max})_{nc}$ predstavlja G_{max} izmerjen pri stanjih normalne konsolidacije, p_r je referenčni pritisk 1 kPa potreben za dimenzijsko uravnavanje enačbe. To enačbo sta uporabila Viggiani & Atkinson (1995) za izračun spreminjanja G_{max} s hidrostatično komponento napetosti p pri normalno konsolidiranih glinah.

Togost merjena pri razbremenjevanju in ponovnem obremenjevanju, pri čemer so bili vsi vzorci razbremenjeni z linije normalne kompresije je prav tako prikazana v ravnini $\log G_{max} : \log p'$ na sliki 10a. Vsaka linija predstavlja pot razbremenitve določenega vzorca (glej sliko 8a), tako da je položaj linije določen z vrednostjo prekonsolidacijske napetosti. Pri ponovni obremenitvi je opazna histereza, ki pa ne vpliva na vrednost merjenih strižnih modulov pri razbremenjevanju.

2.2.2 Preiskave razpadlega granita

Vzorci so bili pripravljani z mokrim in suhim zbijanjem, kateremu je sledila zaplinitve vzorca z ogljikovim dioksidom, s čimer je bila izboljšana končna saturacija vzorca z vodo. Skupno je bilo preiskanih 5 vzorcev, katerih specifični volumni so varirali med 1.490 in 1.605.



Slika 10 Spreminjane G_{max} z izotropno napetostjo p' pri ciklusu razbremenitve in ponovne obremenitve a) Dogs Bay pesek, b) razdrobljeni granit, c) Ham River pesek

Postopno plastično deformiranje vzorcev proti liniji normalne kompresije je razvidno iz slike 8b. Gradient linije normalne kompresije je skoraj štirikrat nižji kot pri Dogs Bay pesku, kar je posledica nizke kompresibilnosti tega dobro graduiranega materiala. Pri razbremenjevanju in obremenjevanju je obnašanje podobno kot pri Dogs Bay pesku, kar nakazuje, da tudi tu prihaja do drobljenja delcev.

Meritve z bender elementi pri začetnem obremenjevanju v izotropni kompresiji so prikazane na sliki 9b. Tudi tu je opazen vpliv začetne zbitosti na vrednost G_{max} , pri čemer 8% razlika v zbitosti predstavlja 50 % razliko v strižnem modulu. Podobno kot pri Dogs Bay pesku tudi tu vrednosti G_{max} -a težijo k enotni liniji $(G_{max})_{nc}$, neglede na začetno gostoto vzorca. Tudi tu predstavlja ta linija premico v log-log ravnini, tako da materialni parametri (glej enačbo 2.1) znašajo $A = 760$ in $n = 0.884$. Ob primerjavi slik 8b in 9b lahko opazimo, da vzorci 1dg, 2dg in 4dg niso dosegli linije normalne kompresije. Zato tudi linija $G_{max}nc$ ni bila dosežena, čeprav trend očitno nakazuje konvergiranje k tej vrednosti, kot je poudarjeno s puščicami na sliki 9b.

Razbremenitveno-obremenitveni rezultati so podani na sliki 10b. Zopet je opazna majhna histereza pri ponovnem obremenjevanju, pozicija razbremenitvenih krivulj pa je podana s

prekonsolidacijsko napetostjo. V nasprotju z ukrivljenimi linijami pri Dogs Bay pesku so tu linije v log-log ravnini ravne. Vendar so v obeh primerih linije medseboj vzporedne, kar nakazuje povezavo med volumskim stanjem in odgovarjajočimi vrednostimi G_{\max} .

2.2.3 Preiskave Ham River peska

Vzorci so bili pripravljene z mokrim zbijanjem, kar je primeren postopek za pridobivanje homogenih vzorcev različne gostote. Preiskani so bili štiri vzorci.

Volumske poti v $v:\ln p$ ravnini so prikazane na sliki 8c. Preiskave najmanj zbitega vzorca 1hr in najbolj zbitega vzorca 2hr so bile opravljene v triosni celici za meritve pri visokih napetostih, pri čemer je aparat dovoljeval največjo napetost pri izotropni kompresiji 5MPa. Ta napetost je povzročila majhne spremembe volumna, okoli 1.5 %. Za doseganje linije normalne kompresije je bila potrebna precej višja napetost, tako da sta bila manj zbita vzorca 4hr in 5hr preiskana v triosnem aparatu, ki omogoča napetosti do 70 MPa. Postopno plastično deformiranje vzorcev se je povečalo pri 10 MPa, kar je precej višja vrednost kot pri predhodno obravnavanih peskih. Vendar ne glede na precej višje napetosti sta vzorca pokazala enako obnašanje in sta dosegla linijo normalne kompresije, ki sta jo določila tudi Coop & Lee (1993). Gradient linije normalne kompresije Ham River peska je približno pol manjši kot pri Dogs Bay pesku in dvakrat večji kot pri razpadlem granitu.

Variacija G_{\max} pri začetni obremenitvi v izotropni kompresiji je prikazana na sliki 9c. Podobno kot pri prejšnjih vzorcih je tudi tu vrednost strižnega modula odvisna od začetne zbitosti. Vendar je vpliv precej manj izražen, saj 7% razlika v zbitosti povzroči le 25% razliko v strižnem modulu, kar je pol manj kot pri razpadlem granitu in tretjino manj kot pri Dogs Bay pesku. Očitno sprememba zbitosti ne vpliva tako pomembno na togost kot pri ostalih dveh peskih. Kasneje bo razvidno, da je ta lastnost silikatnega peska prisotna pri vseh napetostnih stopnjah.

Kot je razvidno iz slike 9c je ukrivljenost volumetrijsko-napetostnih poti k enotni liniji $(G_{\max})_{nc}$ zelo majhna. Šele pri zelo podrobnem pregledu se lahko razloči ravni del linije, ki predstavlja referenčno stanje od zakrivljenih potih približevanja. To ponovno potrjuje, da je izotropna napetost ključni parameter, ki vpliva na vrednost G_{\max} v tem pesku. Parametri, ki karakterizirajo $(G_{\max})_{nc}$ linijo za Ham River pesek so $A=3900$ in $n=0.593$, kot je prikazano na sliki 9c.

Togost, izmerjena pri obremenjevanju in razbremenjevanju, je prikazana na sliki 10c. Zopet lahko opazimo, da ležijo rezultati na premici nad $(G_{\max})_{nc}$ linijo, pri čemer vsaka linija predstavlja linijo razbremenitve v $v:\ln p$ ravnini in je določena s prekonsolidacijsko napetostjo. Podroben pregled pokaže, da so linije med seboj vzporedne pri vseh napetostih, kar ponovno potrjuje povezavo med volumskim stanjem in togostjo, čeprav je njen vpliv v tem primeru majhen.

2.3 Teoretično eksperimentalni okvir obnašanja peskov pri zelo majhnih specifičnih deformacijah

Trije peski z različno minerologijo in geološkim izviro so pokazali izjemno podobne odzive v svojem obnašanju. Vprašanje, ki se lahko postavi je ali obstaja enoten teoretičen okvir, ki bi ga lahko porabili za opisovanje togosti teh treh, oziroma vseh rekonstituiranih peskov. V tem poglavju je prikazana postavitve takšnega okvirja z vpeljavo vpliva volumskega stanja na

togost, pri čemer je uporabljen podoben pristop kot sta ga uporabila Viggiani & Atkinson (1995) za rekonstituirane gline.

Pri začetni obremenitvi so vsi peski, ne glede na začetno zbitost, dosegli vrednost G_{\max} , ki je značilna za linijo normalne kompresije. To linijo togosti pri zelo majhnih specifičnih deformacijah za normalno konsolidirane peske $(G_{\max})_{nc}$ lahko opišemo z enačbo 2.1, ki je določena z gradientom n in odsečkom A v ravnini $\log G_{\max} \cdot \log p'$. Pri preiskanih treh peskih je bilo ugotovljeno, da je približevanje togosti vzorca k togosti za normalno konsolidirane vzorce odvisen od začetne zbitosti. Gradienti poti približevanja se gibajo v razponu med 0.5 in 0.7, kar je v skladu s podatki, ki se pogosto pojavijo v literaturi.

Togost pri prekonsolidiranih in zbitih stanjih v vseh treh peskih je bila večja kot togost pri normalno konsolidiranih vzorcih pri enaki izotropni napetosti. V okviru preiskovanja je bilo preverjeno ali obstaja enoznačna povezava med volumskim stanjem in togostjo, pri čemer je bil upoštevan tudi način, kako je bilo doseženo to volumsko stanje (s prekonsolidacijo, ali z zbijanjem in z začetno kompresijo). V tem kontekstu se izraz prekonsolidiran uporablja za vse vzorce, ki se nahajajo pod linijo normalne kompresije. Isti vzorci so se nahajali na liniji normalne kompresije v teku začetnega obremenjevanja. Izraz zbiti pa se uporablja za vzorce pri katerih začetno obremenjevanje ne poteka po liniji normalne kompresije, neglede na njihovo začetno gostoto.

Postopek normalizacije volumskega stanja vzorca je bil izbran tako, da ni odvisen od načina, kako je bilo volumsko stanje doseženo. Trenutno volumsko stanje je bilo določeno z normalizacijo trenutne izotropne napetosti p' z ekvivalentno napetostjo p'_e , privzeto pri enakem konstantnem specifičnem volumnu na liniji normalne kompresije NCL (glej sliko 11) pri čemer je:

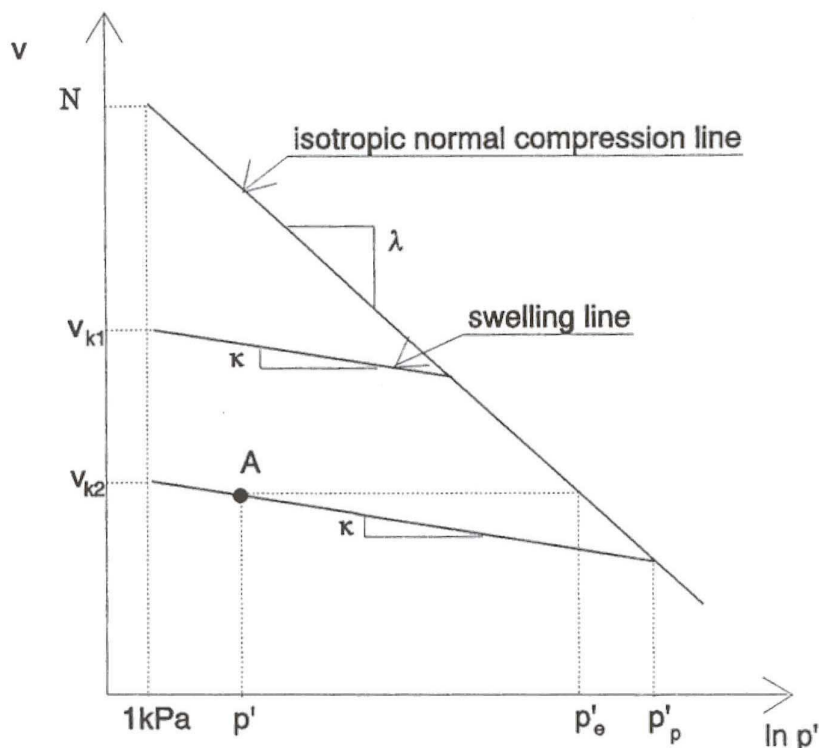
$$p'_e = \exp\left(\frac{N - v}{\lambda}\right) \quad 2.2$$

in kjer je λ gradient linije normalne kompresije in N njen projiciran odsek pri $p' = 1 \text{ kPa}$. Uporaba spremenljivke stanja p'/p'_e je ekvivalentna uporabi stopnje prekonsolidacije pri glinah.

Vrednosti G_{\max} za prekonsolidirane in zbite vzorce so bile prav tako normalizirane glede na referenčno stanje togosti na $(G_{\max})_{nc}$ liniji, to je vrednosti togosti pri trenutni izotropni efektivni napetosti p' . Vrednosti $(G_{\max})_{nc}$ so bile izračunane s pomočjo enačbe 2.1 tako da je:

$$(G_{\max})_{nc} = p_r \cdot A \left(\frac{p'}{p_r}\right)^n \quad 2.3$$

Na enak način kot je določen p'_e na liniji normalne kompresije pri trenutnem specifičnem volumnu je določen $(G_{\max})_{nc}$ pri trenutni vrednosti efektivne izotropne napetosti p' .

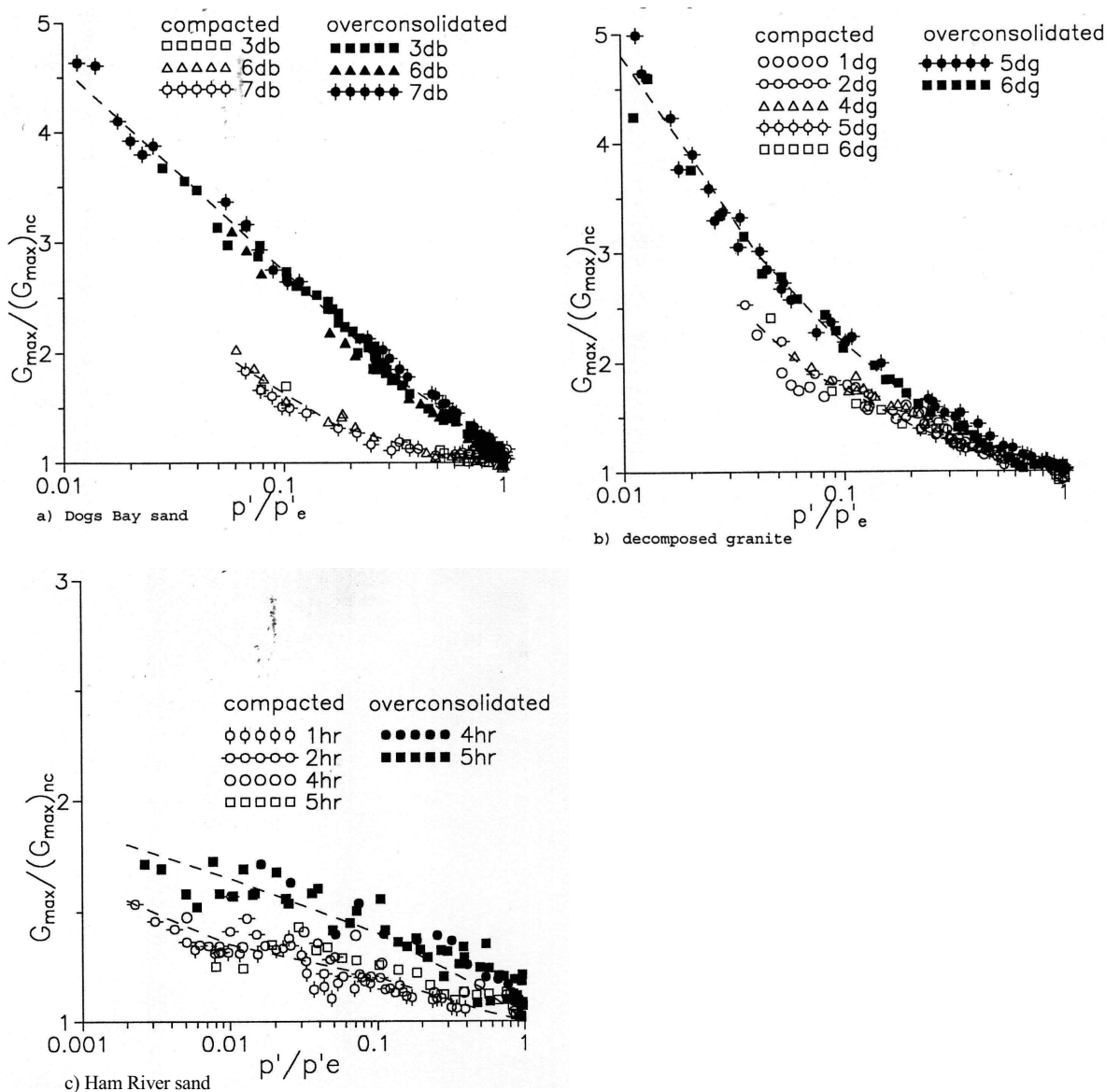


Slika 11 Parameter stanja za peske

Na grafu z osmi $G_{\max}/(G_{\max})_{nc}$, $\log p'/p'_e$, ležijo vse togosti normalno konsolidiranih vzorcev na liniji normalne kompresije v točki 1:1. To je razvidno s slike 12, kjer so normalizirane vrednosti podane v pol-logaritmičnem merilu za vse tri peske. Podobno obnašanje je opazno za vse tri materiale. Vsi zbiti vzorci pri vseh volumnih določajo enoznačno razmerje pri normalizirani togosti z volumskim stanjem. Enako enoznačno razmerje velja tudi za prekonsolidirane vzorce, vendar so linije odvisnosti drugačne. Za prekonsolidirane in zbite vzorce velja, da se normalizirana togost poveča z znižanjem parametra stanja p'/p'_e , torej z večanjem razdalje od linije normalne kompresije za zbite vzorce oziroma večanjem stopnje prekonsolidiranosti za prekonsolidirane vzorce.

Osnova teoretično eksperimentalnega okvirja je obstojanje edinstvenih linij, ki so grafične prezentacije enotnih matematičnih izrazov odnosov med G_{\max} in napetostno-volumskim stanjem v treh različnih peskih. Torej se vrednost n (enačba 2.1) ne spreminja z volumskim stanjem (p'/p'_e), tako da se za določeno stanje razmerje $\log G_{\max} : \log p'$ za prekonsolidirane ali zbite vzorce nahaja na premici, ki leži vzporedno in nad premico $(G_{\max})_{nc}$.

Vpliv volumskega stanja na togost za različne peske pa ni enak. Normalizirana togost za Dogs Bay pesek je skoraj linearna, ko se izriše v odvisnosti od normaliziranega stanja v pol logaritmičnem merilu, za razpadli granit pa je značilno ukrivljena (sl 10b). Vendar je velikostni red povečanja togosti z oddaljenostjo linije normalne kompresije podoben, kar si lahko razlagamo z dejstvom, da imata oba vzorca oglate delce, ki so drobljivi.



Slika 12 Spreminjanje G_{max} z normaliziranim volumskim stanjem

Vpliv stanja na togost za Ham River pesek je najmanj izražena od vseh treh vzorcev (slika 12c). Največja izmerjena razlika med močno prekonsolidiranimi (najnižja vrednost p'/p'_e) in odgovarjajočimi zbitimi vzorci je le 25%, kar je tretjina vrednosti dobljene pri ostalih dveh vzorcih. Prav tako je potrebno poudariti, da se ta učinek pojavlja pri vrednostih p'/p'_e , ki so za velikostni red nižje od preostalih dveh vzorcev. To lahko razložimo z večjo zaobljenostjo zrn in zaradi tega je manj izražena tendenca razvoja novih stikov med posameznimi delci.

Kot je razvidno iz neposredne primejave krivulj na sliki 10, je razpon normalizirane togosti med posameznimi vzorci precejšen. Velikost območja togosti med normalno konsolidiranimi in prekonsolidiranimi vzorci je najbolj izražena v karbonatnih peskih, ki so najbolj občutljivi na drobljenje zrn. V primeru granita je to območje majhno, najverjetneje zaradi dobre graduiranosti oglatih zrn, tako da dodatno drobljenje ne vpliva bistveno na kontakte med zrnji. Ham River pesek ima najslabše izraženo območje togosti, kar nakazuje na majhen vpliv drobljenja pri zaobljenih delcih.

3. Togost peskov pri kontinuirani obremenitvi pri majhnih deformacijah

3.1 Preiskava Dogs Bay peska

Strižne preiskave pod kontinuirano obremenitvo 38 mm širokega vzorca so bile opravljene v standardni Bishop & Wesley triosni celici. Celica je bila opremljena z LVDT-ji in bender elementi, kot je prikazano na sliki 2, tako da se je dalo primerjati togosti pridobljene z dinamično in kontinuirano obremenitvijo. Sistem LVDT jev omogoča določitev togosti do specifičnih deformacij velikosti 0.0001%, kar je primerljivo s togostjo merjeno pri bender elementih.

Program preiskav je bil za vsak vzorec sestavljen iz zaporednih izotropnih kompresij in testov nedrenirane strižne trdnosti. Med izotropno kompresijo in razbremenjevanjem so bile opravljene nedrenirane strižne preiskave pri konstantni stopnji obremenjevanja okoli 0,1% na uro. Program je obsegal 15 testov med tremi večstopenjskimi preiskavami.

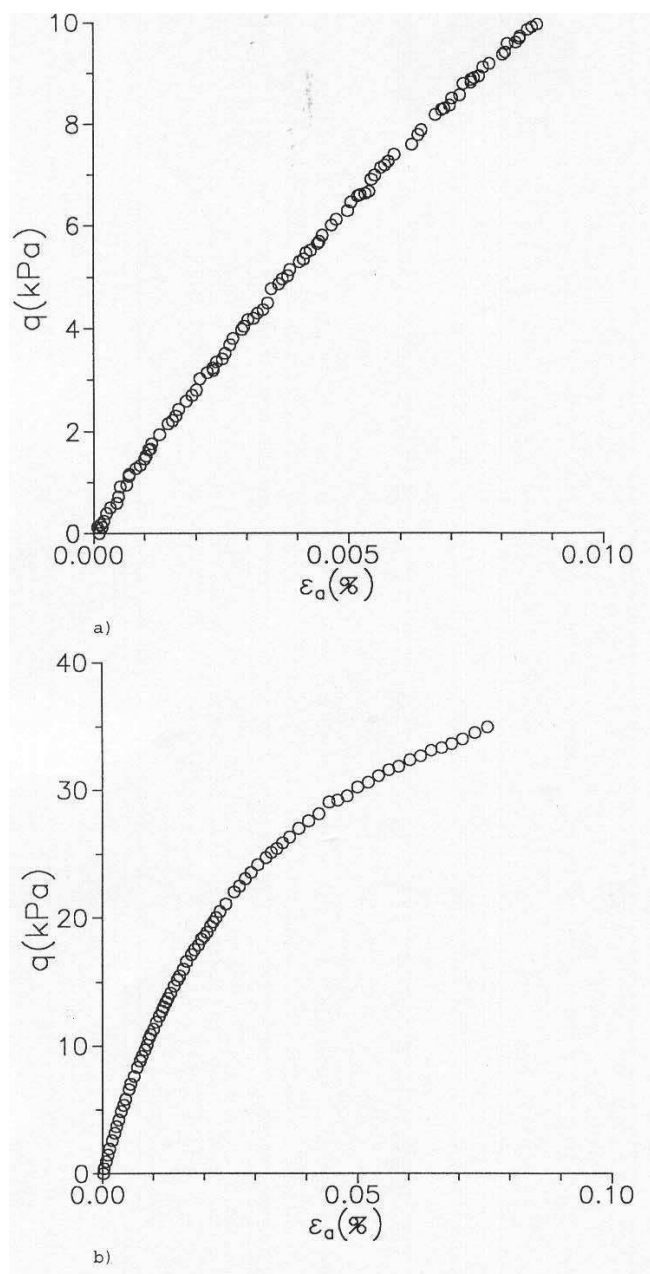
Tipična napetostno-deformacijska krivulja je podana na sliki 13 v dveh različnih merilih, kjer je podana povprečna vrednost dveh LVDT-jev glede na deviatorsko napetost. Za vsak LVDT je bilo zabeleženih okoli 500 podatkov, vsi pa niso prikazani na sliki. Razlika med vrednostmi na dveh LVDT-jih je v povprečju znašala manj kot 5%, tangenta togost pa je bila izračunana na osnovi povprečnih vrednosti. Tipične krivulje pri različnih začetnih izotropnih napetostih p_i so podane na sliki 14a. Tangenta togost je izračunana s pomočjo naslednjega izraza:

$$G = \frac{1}{3} \frac{\delta q}{\delta \varepsilon_a} \quad 3.1$$

in je bila izračunana s pomočjo linearne regresije tipično skozi 15 točk napetostno deformacijske krivulje. Manj točk (med 7-9) je bilo uporabljenih na začetku krivulje, kjer je bilo na voljo manj podatkov. Pri zelo majhnih deformacijah (manj kot 0.0001%) je elektronski šum dominanten, tako da ni bilo mogoče izračunati togosti, ki bi predstavljala obnašanje tal. Zato so vrednosti nižje od 0.0001% v preglednicah izpuščene.

V nekoliko primerih je opaženo obnašanje diskontinuiranega striženja, ki je omejilo minimalno deformacijo pri kateri je bilo mogoče določiti togost. Od 15 strižnih preiskav sta samo dve omogočili izračun togosti pri deformacijah nižjih od 0.0001%. Diskontinuirani strig je bil še slabši pri visokih napetostih, kjer fleksibilnost sistema naraste relativno glede na togost vzorca, kar je bilo še posebej izraženo pri vzorcih, ki so bili razbremenjeni.

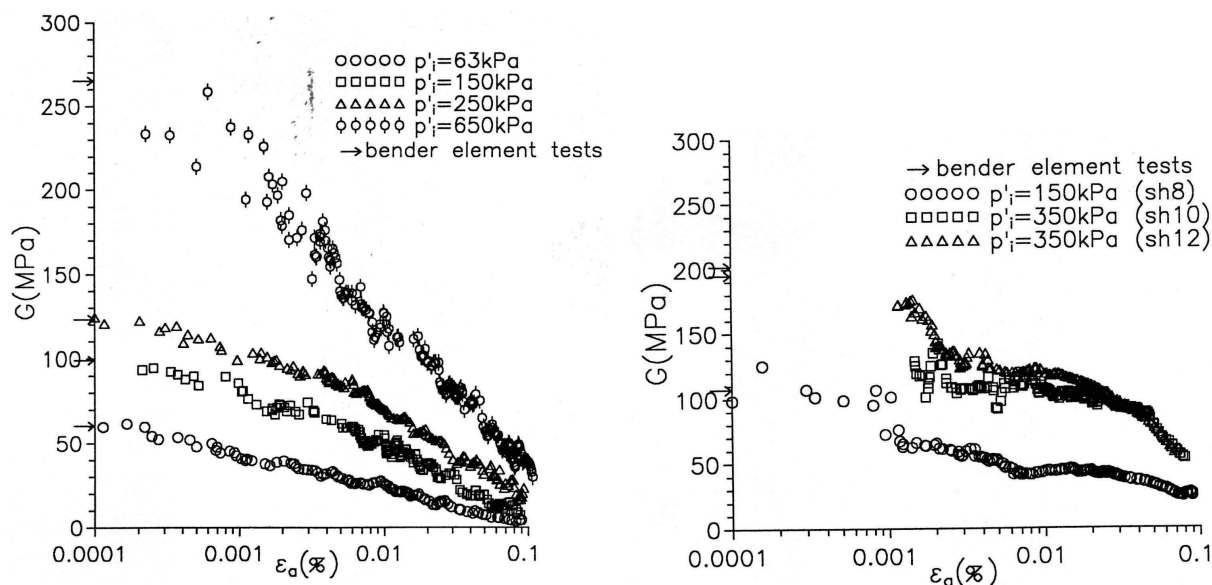
Značilne togostno deformacijske krivulje za prekonsolidirane vzorce so podane na sliki 14b, kjer zaradi diskontinuiranega striga niso podani rezultati za specifične deformacije manjše od 0.001%, razen za sh8, kjer je bil p_i' majhen, okoli 150kPa. Potrebno je še omeniti, da ti vzorci niso bili popolnoma prekonsolidirani, ker kapaciteta celice ni omogočila doseganja stanja normalne kompresije. Te vzorce bomo v bodoče imenovali prekonsolidirano-zbiti vzorci.



Slika 13 Napetostno-deformacijske krivulje pri nedreniranem strigu Dogs Bay peska pri $p' = 63 \text{ kPa}$

3.2 Primerjava med G_{\max} merjenim z dinamičnim in s kontinuiranim obremenjevanjem

Kot je bilo omenjeno v prejšnjem poglavju, je instrumentalizacija omogočala direktno primerjavo med togostjo pridobljeno z dinamičnim in s kontinuiranim obremenjevanjem. Te primerjave so predstavljene na sliki 14a, kjer so rezultati bender elementa podani skupaj z rezultati togosti za vzorce pri začetni obremenitvi (zbiti vzorci). Opazimo lahko dobro ujemanje med obema metodama pri specifičnih deformacijah velikosti 0.0001%. Nasprotno pa za prekonsolidirane-zbite vzorce dobimo prve zanesljive podatke iz kontinuirane obremenitve šele pri 0.001 %, tako da direktna primerjava ni bila mogoča (slika 14b).



a) zbiti vzorci

b) prekonsolidirano-zbiti vzorci

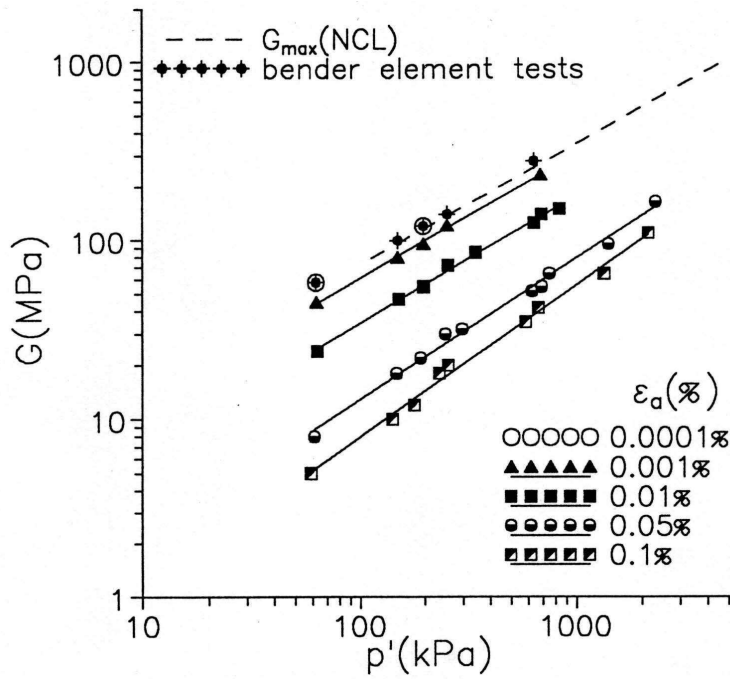
Slika 14 Spreminjanje G s specifično deformacijo za skupino nedreniranih triosnih preiskav

Za premostitev pomanjkanja podatkov o togosti pri specifičnih deformacijah 0.0001% je bilo potrebno izdelati objektivno primerjavo med togostno-deformacijskimi krivuljami pri različnih napetostih. To je bilo opravljeno s pomočjo normalizacije trenutne togosti glede na G_{max} tako, da bi se krivulje pri različnih nivojih napetosti lahko primerjale.

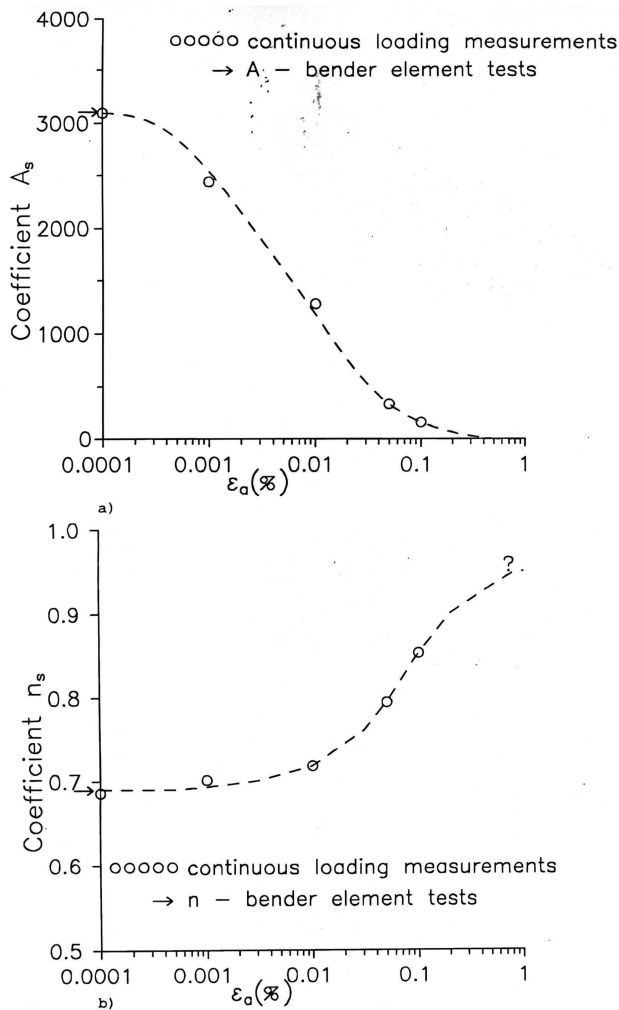
Viggiani & Atkinson (1995) sta pokazala, da je pri majhnih deformacijah togost pri različnih stopnjah specifične deformacije za rekonstituirano kaolinsko glino v normalno konsolidiranem stanju odvisna od izotropne napetosti po naslednjem zakonu:

$$\left(\frac{G}{p_r}\right)_{nc} = A_s \left(\frac{p'}{p_r}\right)^{n_s} \tag{3.2}$$

kjer nc pomeni normalno konsolidirano stanje. Parametra A_s in n_s sta povezana s tipičnim nivojem specifičnih deformacij določenim iz kontinuirane obremenitvene poti kjer je p' konstanten. Primerjali smo togost dobljeno pri nedreniranih strigih pri višjih specifičnih deformacijah za zbit Dogs Bay pesek z G_{max} dobljenim iz testov z bender elementi. To je prikazano na sliki 15, kjer je podano spreminjanje nedrenirane strižne trdnosti G pri različnih nivojih specifične deformacije skupaj z $(G_{max})_{nc}$ linijo. Podatki iz dveh kontinuiranih obremenitvenih preiskusov, pri katerih je bila določena togost pri velikosti specifične deformacije 0.0001%, kažejo, da je $(G_{max})_{nc}$ linija vzporedna s podatki dobljenimi iz bender element testov.



Slika 15 Spreminjanje G s specifično deformacijo in napetostjo za prvo obremenitev Dogs Bay peska



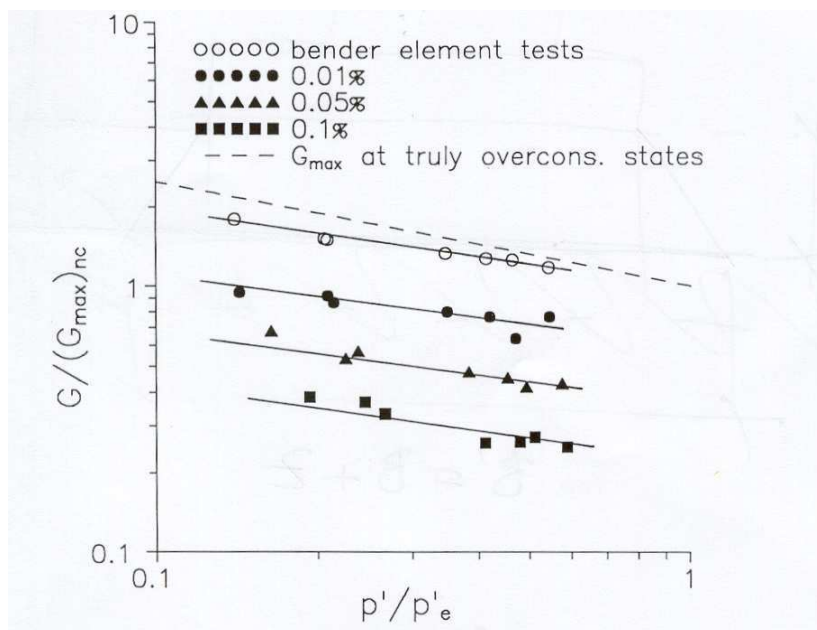
Slika 16 Spreminjanje parametrov A in n s stopnjo specifične deformacije za Dogs Bay pesek

Skupina z $(G_{\max})_{nc}$ linijo sub-paralelnih linij je prikazana za majhne specifične deformacije v istem grafu. Te linije konvergirajo pri višjih napetostih, kar kaže na hitrejšo stopnjo degradacije togosti s prirastkom napetosti, kar je razvidno tudi iz individualnih togostno-deformacijskih krivulj podanih na sliki 14. Enačba 2.5 je bila uporabljena za interpolacijo togostnih krivulj glede na posamezen nivo specifične deformacije, kot je prikazano na sliki.

Konvergiranje togosti z zvišanjem p' je grafično prikazano na sliki 16, kjer je niz parametrov A_s in n_s prikazan glede na nivo specifične deformacije. Lahko opazimo, da se parameter A_s približuje nični vrednosti, medtem ko n_s narašča s stopnjo specifične deformacije. Ni bilo mogoče odkriti ali n_s doseže vrednost 1 pri velikih deformacijah, ker preiskave v tem območju ni bilo možno izvesti.

Tangentna togost prekonsolidiranih-zbitih vzorcih, ki je dobljena pri različnih stopnjah specifične deformacije, je prikazna na sliki 17 znotraj predlaganega teoretičnega okvira. Logaritmično merilo $G/G_{\max,nc}$ je bilo uporabljeno, ker omogoča prikaz večjih specifičnih deformacij. G_{\max} linija za prekonsolidirane vzorce je tu prikazana in leži nad ostalimi G_{\max} vrednostmi. Kot je bilo omenjeno že prej, so bile opravljene meritve z bender elementi tudi pri razbremenjevanju in ker vzorci niso nikoli dosegli linije normalne konsolidacije NCL, je njihova normalizirana togost znotraj togostnega območja določenega za prekonsolidirane-zbite vzorce.

Normalizirani togostni podatki pri različnih nivojih specifične deformacije kažejo na značilen odnos odvisnosti pri katerih togost narašča z oddaljenostjo od linije normalne kompresije NCL (p'/p'_e se zmanjšuje). Vse premice imajo podobne gradiente ne glede na stopnjo specifične deformacije. Ti rezultati kažejo na to, da togost pri majhnih kot tudi zelo majhnih deformacijah lahko opišemo znotraj enakega teoretičnega okvira, kar ponovno potrjuje vpliv volumskega stanja na togost.



Slika 17 Spreminjanje normalizirane tangentne togosti z normaliziranim volumskim stanjem za prekonsolidirane-zbite vzorce Dogs Bay peska

ZAKLJUČKI

Tehnika bender elementov skupaj z lokalnimi instrumenti LVDT-ji v triosni celici se je pokazala kot učinkovita eksperimentalna namestitev za preiskovanje togosti peskov pri zelo majhnih in majhnih specifičnih deformacijah. Teoretični, numerični in praktični vidiki metode so pokazali, da lahko vodi do zanesljivih rezultatov, če je izvajalec preiskusa izurjen in dobro pozna metodo.

Preiskusi na treh peskih z različno mineralogijo in geološkim izvorom so bili opravljeni z namenom določiti vpliv volumskega stanja na togost pri zelo majhnih specifičnih deformacijah. Z visokimi napetostmi so bili peski različne zbitosti konsolidirani do linije normalne konsolidacije NCL, ki predstavlja referenčno stanje za togost peskov pri zelo majhnih specifičnih deformacijah. Togosti pri drugih napetostno volumetrijskih stanjih so bile primerjane na osnovi te referenčne togosti. S pomočjo ustrezne normalizacije je bil postavljen nov teoretično eksperimentalni okvir za togost peskov. Poudarek tega novega okvirja je na odvisnosti togosti pri različnih specifičnih deformacijah od tekočega napetostno-volumskega stanja vzorca.

Posebna značilnost teoretičnega okvirja je razlika med prekonsolidiranimi peski in tistimi, ki so bili samo začetno obremenjeni. Ta razlika je v velikosti togosti pri enakem volumskem stanju. Med temi mejnimi enotnimi odvisnostmi se nahaja območje možnih togosti za vse vzorce, ne glede na to ali so zbiti ali prekonsolidirani ali deloma oboje. Ker je začetna zbitost plasti tal odvisna od vrste njegovega odlaganja, teoretični okvir poudarja pomen geološke zgodovine tal, ki je navezana na njeno napetostno zgodovino in njen vpliv na togost.

Teoretični okvir je temeljen na obnašanju treh peskov izbranih zaradi različnih lastnosti, tako da lahko pričakujemo, da je okvir uporaben vsesplošno za tovrstne zemljine. Za popolno razumevanje obnašanja je potrebno opraviti preiskave pri visokih napetostih, vendar je potrebno poudariti, da je teoretični okvir uporaben na vseh nivojih specifičnih deformacij in na vseh nivojih napetosti. Razumevanje podlag, na osnovi katerega je bil postavljen teoretični okvir, pojasnjuje, zakaj je bil vpliv volumskega stanja na togost do sedaj zanemarjen.

Nov sistem za lokalno merjenje specifičnih deformacij je bil dovolj natančen, da je omogočil primerjavo togosti pridobljene z dinamičnimi in kontinuiranimi obremenitvami. Ugotovljeno je bilo, da se togosti merjene z bender elementi ujemajo s togostmi merjenimi pod kontinuiranimi obremenitvami pri približno 0.0001% specifične deformacije. Ni bilo znakov elastičnega platoja pri specifičnih deformacijah dobljenim s kontinuiranimi obremenitvami. Sistem je bil tudi uporabljen pri raziskovanju togosti peskov pri prvi obremenitvi pri majhnih deformacijah. Primerjali smo togosti peskov dobljenih pri večjih specifičnih deformacijah pri testu nedreniranega striga s togostimi dobljenimi pri zelo majhnih specifičnih deformacijah. Opažena je bila skupina sub-paraleničnih linij, ki konvergirajo proti višjim napetostim na enak način kakor je to bilo prej odkrito za glinice. Tangentne togosti za zbite-prekonsolidirane vzorce so tudi bile prikazane v teoretično eksperimentalnem okvirju, kar poudarja vpliv, ki ga ima volumetrijsko stanje na togost. Ta vpliv se opazi ne samo v območju zelo majhnih specifičnih deformacij ampak tudi v območju majhnih specifičnih deformacij.

LITERATURA

- Atkinson, J.H. , Evans, J.S., Scott, C.R., (1985). Developments in stress path equipment for measurements of soil parameters. *Ground Engineering*, Vol. 18, No. 1, 15-22.
- Atkinson, J.H and Salfors, G. (1991). Experimental determination of soil properties. *Proc. X ECSMFE*, Florence, Vol. 3, pp. 915-956.
- Bishop, A.W., Wesley, L.D., (1975). A hydraulic triaxial apparatus for controlled stress path testing. *Geotechnique*, Vol. 25, No. 4, pp. 657-670.
- Burland, J.B. (1989). The Ninth Bjerrum Mem. Lecture: Small is beautiful - the stiffness of soils at small strains. *Can. Geotech. Journ.*, Vol. 26, pp. 499-516.
- Coop, M.R. (1990). The mechanics of uncemented carbonate sands. *Geotechnique*, Vol. 40, No. 4, pp. 607-626.
- Coop, M.R. and Lee, I.K. (1993). The behaviour of granular soils at elevated stresses. *Proc. Wroth memorial Symposium: Predictive soil mechanics*, Thomas Telford, London, pp. 186-198.
- Dyvik, R. and Madshus, C., (1985). Laboratory measurements of G_{max} using bender elements. *Proc. ASCE Annual convention: Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*. Detroit, Michigan, pp. 186-197.
- Evans, K.M. (1987). A model study of the end bearing capacity of piles in layered carbonate soils. PhD Thesis, Oxford University.
- Houlsby, G.T., Evans, K.M. and Sweeney, M. (1988). End bearing capacity of model piles in layered carbonate soils. *Proc. Int. Conf. on Calcareous Sediments*. Perth, Australia, Vol. 1., pp. 209-214.
- Lee, I.K., (1991). Mechanical Behaviour of Compacted Decomposed Granite Soil. PhD Thesis, The City University.
- Sanches-Salinerio, I., Roesset. J.M., Stokoe, K.H., (1986). Analytical studies of body wave propagation and attenuation. Report GR 86-15, University of Texas, Austin.
- Schulteiss, P.J., (1982). Influence of packing structure on seismic wave velocities in sediments. Ph.D. Thesis. University College of North Wales.
- Shirley, D.J. and Hampton, L.D., (1997). Shear-wave measurements in laboratory sediments. *Journ. of Acous. Soc. of America*, Vol. 63, No. 2, pp. 607-613.
- Simpson, B., (1992). Thirty second Rankine Lecture: Retaining structures: displacement and design. *Geotechnique*, Vol. 42, No. 4, pp. 539-577.
- Taylor R.N. and Coop M.R., (1990). Stress path testing of Boom clay from Mol, Belgium., *Proc. 26th Annual Conf. of the Eng. Group of the Geological Soc., Leeds.*, pp. 89-98.
- Viggiani, G. (1992). Small strain stiffness of fine grained soils, PhD Thesis, The City University.
- Viggiani, G. and Atkinson, J.H. (1995). Stiffness of fine grained soils at very small strains. *Geotechnique* 45, No. 2, pp. 249-255.