

KONSOLIDACIJA TLA

I. Uvod

Proces konsolidacije tla promatrat ćemo u sitnozrnatom potpuno saturiranom tlu. Terzaghi je još 1925. godine razvio teoriju jednodimenzionalne konsolidacije tla, koja se i danas koristi za interpretaciju rezultata edometarskog pokusa i predviđanje ponašanja tla *in situ* tijekom konsolidacije. Nakon opterećenja veće površine sitnozrnatog potpuno saturiranog tla jednolikim opterećenjem $\Delta\sigma$, može se smatrati da se tlo nalazi u nedreniranim uvjetima (nema promjene volumena tla), jer je koeficijent propusnosti takvoga tla tako mali da treba vremena dok voda ne počne iz njega istjecati. Budući da ovaj problem možemo promatrati kao jednodimenzionalan, voda u tlu preuzima ukupno vanjsko opterećenje i stvara se takozvani višak tlaka vode $u_e = \Delta\sigma$ (*excess pore water pressure*) u odnosu na tlak vode prije opterećenja tla u_0 , u svim točkama po visini tla, tako da je sada tlak vode

$$u(z,0) = u_0(z,0) + u_e(z,0) = u_0(z,0) + \Delta\sigma$$

gdje je z vertikalna koordinata, od površine tla usmjerena prema dolje, a druga vrijednost u zagradama označava početno vrijeme $t = 0$.

S vremenom voda istječe iz tla brzinom koja ovisi o veličini koeficijenta propusnosti i hidrauličkog gradijenta. Istjecanje vode iz pora omogućava smanjenje njihova volumena i ostvarenje odgovarajuće deformacije (slijeganja tla). Pri tom se smanjuje veličina viška tlaka vode, a za isti se iznos povećava efektivno naprezanje u tlu. Dakle,

$$u(z,t) = u_0(z,0) + u_e(z,0) - \Delta u_e(z,t)$$

$$\sigma'(z,t) = \sigma'(z,0) + \Delta\sigma'(z,t)$$

$$\Delta\sigma'(z,t) = \Delta u_e(z,t)$$

Trajanje ovog procesa u vremenu zove se konsolidacijom tla. Kako se tlak vode u tlu mijenja u vremenu, radi se o nestacionarnom strujanju vode. Ovaj proces završava kada višak tlaka vode padne na nulu, a skelet tla preuzme cijelo vanjsko opterećenje, odnosno efektivno naprezanje naraste za ukupnu vrijednost vanjskog opterećenja. Završetak ovako definiranog procesa konsolidacije označit ćemo vremenom t_{EOP} (indeks označava kraj primarne konsolidacije, o kojoj će još biti riječi, *End of Primary*). Tada je

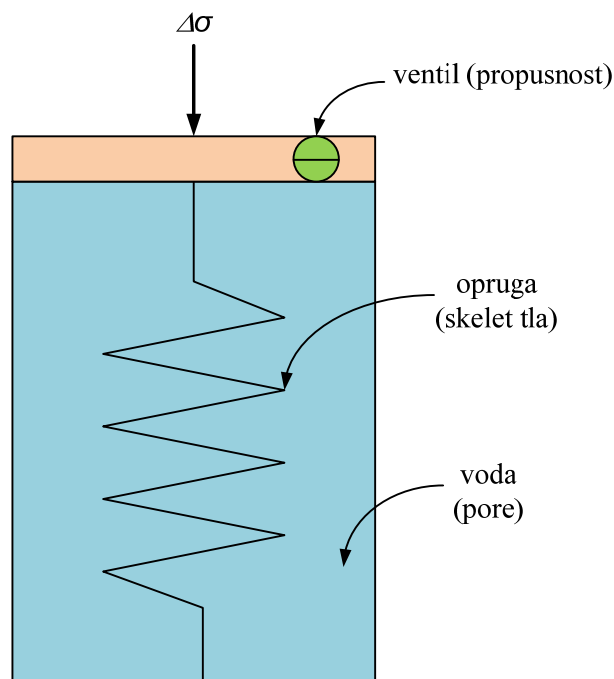
$$u_e(z,t_{EOP}) = 0$$

$$u(z,t_{EOP}) = u_0(z,0)$$

$$\sigma'(z,t_{EOP}) = \sigma'(z,0) + \Delta\sigma$$

Sada je ostvareno novo stacionarno stanje u tlu.

Proces konsolidacije tla možemo ilustrirati jednostavnim primjerom opruge u posudi s vodom (slika I-1). Posuda ima čep s ventilom. Otporetimo je dok je ventil zatvoren (nedrenirani uvjeti). Voda u posudi, koja simulira vodu u porama tla, preuzima ukupno vanjsko opterećenje, a opruga, koja simulira skelet tla, ne miče se. Kada otvorimo ventil voda će početi istjecati iz posude, brže ako je ventil više otvoren, sporije ako je otvoren manje, što znači da ventil simulira propusnost tla. Tlak vode u posudi tijekom ovog procesa se smanjuje, opruga preuzima isti dio vanjskog opterećenja za koji se tlak vode smanjio i opruga se skraćuje. Ovo traje dok voda ne prestane istjecati iz posude, što znači da u njoj više nema viška tlaka vode i da je opruga preuzela ukupno vanjsko opterećenje te se više ne miče.

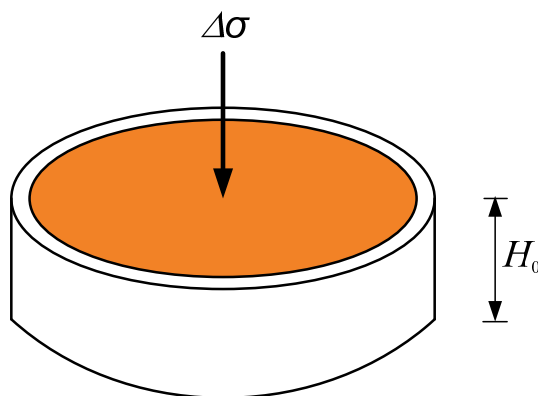


Slika I-1. Opruga u posudi s vodom – ilustracija konsolidacije tla

Ovdje će biti opisan edometarski pokus za određivanje konsolidacijskih karakteristika tla i Terzaghijeva teorija jednodimenzionalne konsolidacije tla, uz prikaz njenih ograničenja.

II. Edometarski pokus i osnovne definicije

Edometarski se pokus provodi u laboratoriju na cilindričnim uzorcima saturiranoga tla visine oko 2 cm i promjera od 8 do 10 cm (slika II-1). Uzorci se umeću u šuplji metalni cilindar tako da su bočne deformacije uzorka spriječene i omogućen je pomak tla samo u vertikalnom smjeru (jednodimenzionalna konsolidacija tla). Na obje se horizontalne površine uzorka postavljaju porozne pločice koje osiguravaju da je na ovim površinama uzorka tlak vode tijekom cijeloga pokusa nula (drenirane granice). U raznim se laboratorijima koriste takozvani hidraulički edometri, kojima je jedna horizontalna površina nepropusna i na njoj je moguće mjeriti tlak vode u tlu. Prvo će se opisati standardni edometarski pokus, s dvije drenirane granice uzorka. U ovom se pokusu novo opterećenje na uzorak nanosi svaka 24 sata. Tijekom 24 sata mjeri se vertikalni pomak uzorka pod konstantnim opterećenjem, tako da se krivulja pomaka u vremenu crta u polulogaritamskom mjerilo (vrijeme je u minutama na logaritamskoj skali), što znači da se ubrzo nakon nanošenja određenog inkrementa opterećenja, očitavanja vrše učestalo, a kasnije sve rjeđe. Inkrementi opterećenja obično su takvi da je veličina svakog inkrementa jednaka prethodnom opterećenju (primjerice, $\sigma_0 = 50$ kPa, $\Delta\sigma_1 = 50$ kPa, $\Delta\sigma_2 = 100$ kPa, $\Delta\sigma_3 = 200$ kPa, $\Delta\sigma_4 = 400$ kPa), odnosno svaki inkrement opterećenja odgovara tada dosegnutoj vrijednosti efektivnog naprezanja u uzorku. Budući da tijekom 24 sata sav višak tlaka vode uvijek disipira (padne na nulu), efektivna su naprezanja u uzorku (pretpostavlja se da su konstantna po visini uzorka) jednaka zbroju početnog efektivnog naprezanja i svih do tada nanesenih inkremenata opterećenja. Nakon nanošenja određenog broja takvih inkremenata opterećenja, uzorak se obično rastereti do određene vrijednosti efektivnog naprezanja i nakon toga se opet opterećuje do kraja pokusa, kada se uzorak potpuno rastereti. Rasterećenje uzorka provodi se, sada u dekrementima, koji svaki također traje 24 sata.

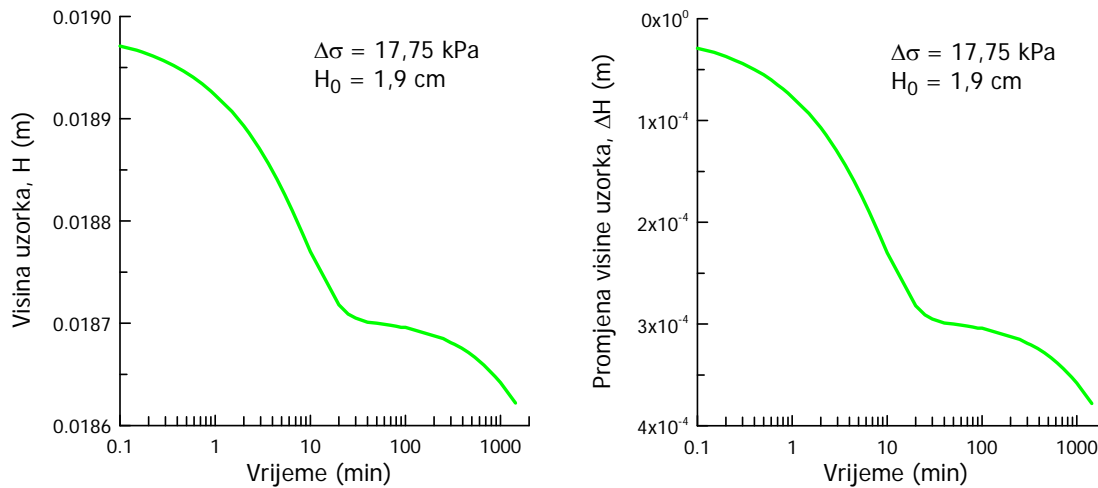


Slika II-1. Uzorak u šupljem metalnom cilindru za edometarski pokus

Promatramo edometarski pokus na uzorku meke gline, kojemu je početno efektivno naprežanje

$$\sigma'(z,0) = 17,75 \text{ kPa}$$

Početna visina uzorka $H_0 = 1,9 \text{ cm}$. Prvi inkrement opterećenja iznosi $\Delta\sigma_1 = 17,75 \text{ kPa}$. Na slici II-2 prikazana je krivulja visine uzorka u vremenu (lijevo) kroz 24 sata (1440 min) i krivulja promjene visine uzorka u vremenu (desno). Ove, kao i ostale krivulje iz prikazanog edometarskog pokusa, rezultat su proračuna na osnovi napredne teorije konsolidacije tla (V. Szavits-Nossan, 1989), kojom se vrlo realno može prikazati ponašanje tla tijekom konsolidacije. Visina uzorka nakon 24 sata konsolidacije pod prvim inkrementom opterećenja iznosi $H = 1,862 \text{ cm}$.



Slika II-2. Visina i promjena visine uzorka u vremenu za prvi inkrement opterećenja

Iako se tijekom standardnog edometarskog pokusa ne mjeri tlak vode u uzorku, pomoću navedene se napredne teorije može odrediti tlak vode u vremenu u diskretnim točkama uzorka. Tako je na slici II-3 prikazan dijagram tlaka vode u vremenu u točki koja je na polovini visine uzorka.

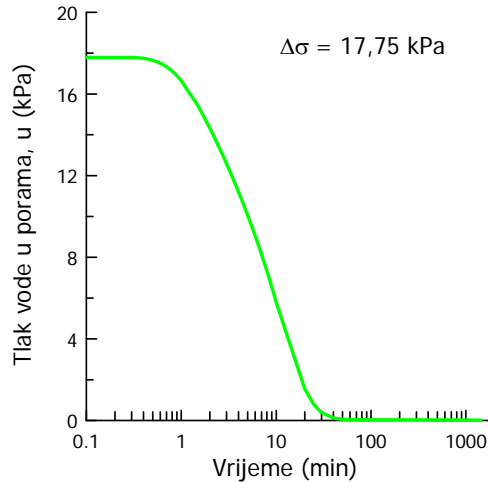
Na početku se pokusa, prije nanošenja prvog inkrementa opterećenja, pretpostavi da je

$$u_0(z,0) = 0$$

pa je za svako vrijeme t

$$u(z,t) = u_c(z,t)$$

Tlak vode u uzorku neposredno nakon nanošenja opterećenja iznosi 17,75 kPa, a već nakon pedesetak minuta padne na nulu.



Slika II-3. Tlak vode u vremenu za prvi inkrement opterećenja

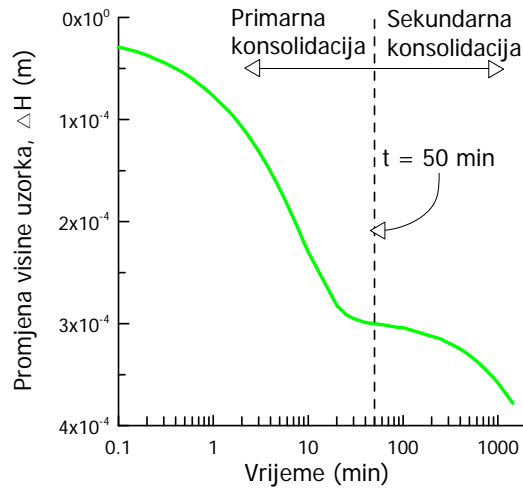
Dio konsolidacije do vremena kada višak tlaka vode (u ovom slučaju ukupni tlak vode) padne na nulu i odgovarajuća slijeganja tla nazivaju se primarnom konsolidacijom. Za prvi inkrement opterećenja u ovom edometarskom pokusu, vrijeme potrebno za kraj primarne konsolidacije je $t_{EOP} \cong 50$ min. Nakon ovog vremena, efektivno je naprezanje u uzorku konstantno i iznosi

$$\sigma'(z,t) = \sigma'(z,0) + \Delta\sigma_1 = 17,75 + 17,75 = 35,5 \text{ kPa}$$

gdje je $t \geq t_{EOP}$.

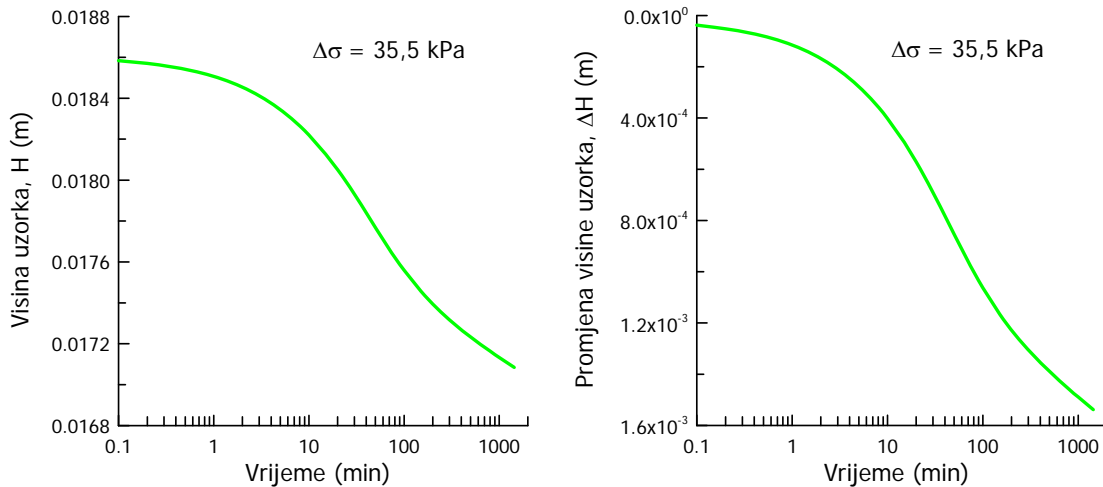
Na slici II-2 se vidi da se slijeganje uzorka nastavlja i nakon završetka primarne konsolidacije, pri konstantnom efektivnom naprezanju. Deformacija materijala koja se realizira pri konstantnom naprezanju zove se puzanjem i svojstvo je danog materijala. Tlo ima svojstvo puzanja. Ima više tumačenja kako dolazi do puzanja u tlu. Jedno je tumačenje da voda tijekom primarne konsolidacije istječe iz osnovnih pora tla, dok tijekom puzanja istječe iz mikropora u tlu, pri čemu se ne mijenjaju efektivna naprezanja. Drugo je tumačenje da nakon kraja primarne konsolidacije dolazi do preslagivanja čestica tla u novi složaj nakon uspostave novog ravnotežnog stanja, pod konstantnim efektivnim naprezanjem. Puzanje tla još se naziva i sekundarnom konsolidacijom, a slijeganje realizirano tijekom puzanja sekundarnim slijeganjem.

Na slici II-4 prikazana je ista krivulja slijeganja kao na slici II-2, s podjelom na primarnu i sekundarnu konsolidaciju.



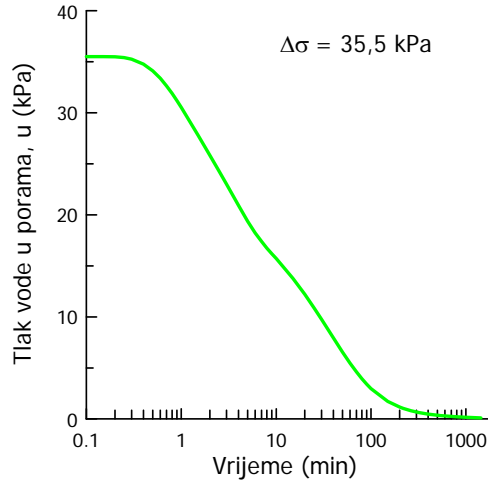
Slika II-4. Primarna i sekundarna konsolidacija tla

Sljedeći inkrement opterećenja jednak je efektivnom naprežanju u uzorku na kraju prvog inkrementa opterećenja, $\Delta\sigma_2 = 35,5$ kPa. Krivulje slijeganja za drugi inkrement opterećenja prikazane su na slici II-5. Treba uočiti razliku u obliku krivulja sa slike II-5 u odnosu na sliku II-2 za prvi inkrement opterećenja. Objašnjenje za to bit će dato naknadno. Visina uzorka nakon 24 sata konsolidacije pod drugim inkrementom opterećenja iznosi $H = 1,704$ cm.



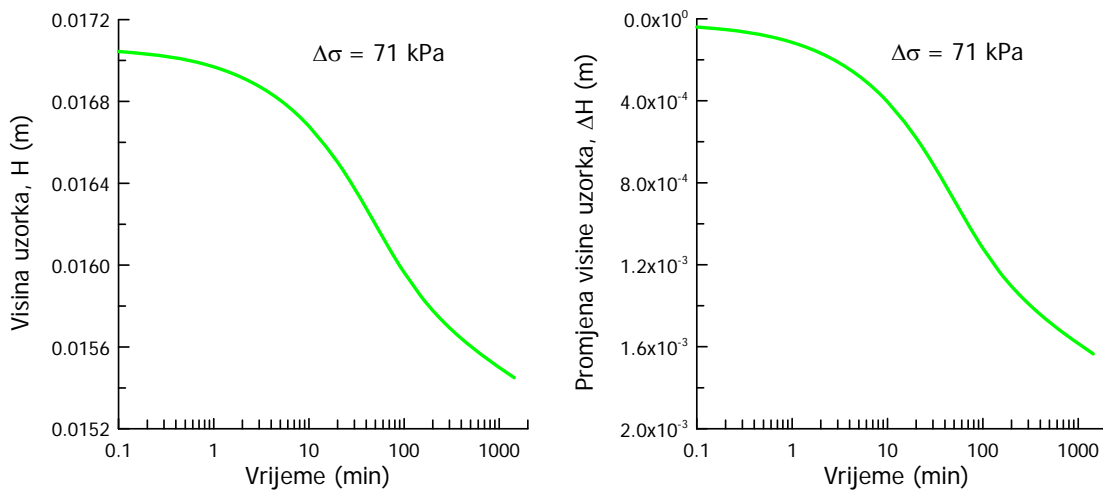
Slika II-5. Visina i promjena visine uzorka u vremenu za drugi inkrement opterećenja

Dijagram tlaka vode u vremenu na polovini visine uzorka tijekom 24 sata konsolidacije pod drugim inkrementom opterećenja prikazan je na slici II-6. Sada je vrijeme do kraja primarne konsolidacije bitno veće i iznosi $t_{EOP} \cong 600$ min.



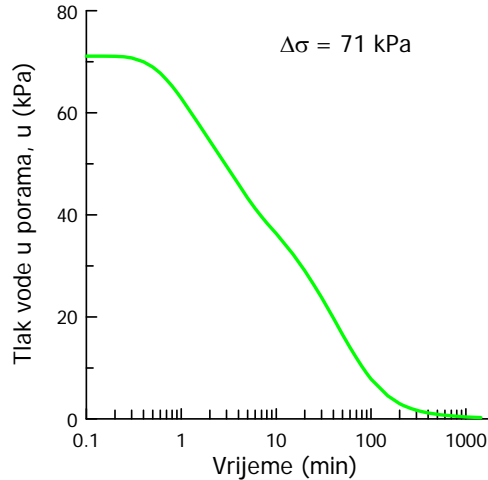
Slika II-6. Tlak vode u vremenu za drugi inkrement opterećenja

Na kraju drugog inkrementa opterećenja efektivno je naprezanje u uzorku 71 kPa, koliko iznosi treći inkrement opterećenja $\Delta\sigma_3 = 71$ kPa. Krivulje slijeganja za ovaj su inkrement opterećenja prikazane na slici II-7. Visina uzorka nakon 24 sata konsolidacije pod trećim inkrementom opterećenja iznosi $H = 1,545$ cm, a konačno je efektivno naprezanje u uzorku 142 kPa.



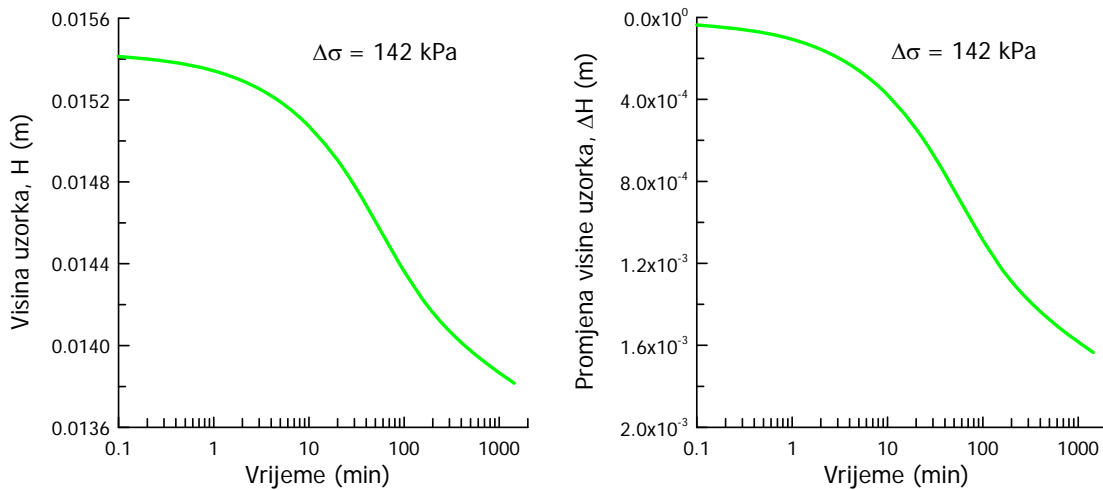
Slika II-7. Visina i promjena visine uzorka u vremenu za treći inkrement opterećenja

Dijagram tlaka vode u vremenu na polovini visine uzorka tijekom 24 sata konsolidacije pod trećim inkrementom opterećenja prikazan je na slici II-8. Vrijeme do kraja primarne konsolidacije isto je kao za drugi inkrement opterećenja i iznosi $t_{EOP} \cong 600$ min.



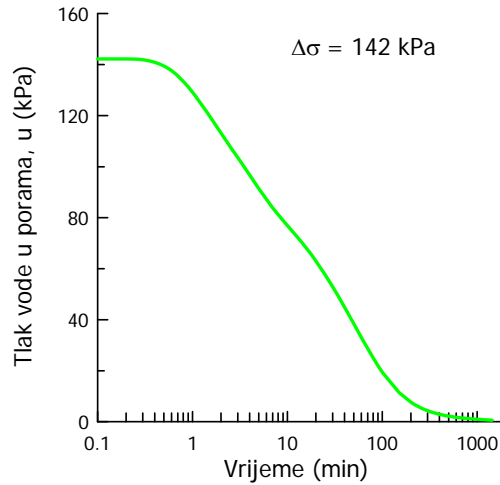
Slika II-8. Tlak vode u vremenu za treći inkrement opterećenja

Četvrti, konačni inkrement opterećenja iznosi $\Delta\sigma_4 = 142$ kPa. Krivulje slijeganja za ovaj su inkrement prikazane na slici II-9. Visina uzorka nakon 24 sata konsolidacije iznosi $H = 1,38$ cm. Efektivno je naprežanje u uzorku sada 284 kPa.



Slika II-9. Visina i promjena visine uzorka u vremenu za četvrti inkrement opterećenja

Dijagram tlaka vode u vremenu na polovini visine uzorka tijekom 24 sata konsolidacije pod četvrtim inkrementom opterećenja prikazan je na slici II-10. Vrijeme do kraja primarne konsolidacije sada je nešto veće nego za treći inkrement opterećenja i iznosi $t_{EOP} \cong 700$ min.



Slika II-10. Tlak vode u vremenu za četvrti inkrement opterećenja

Sada uzorak rasterećujemo s istim dekrementima opterećenja, svaki u trajanju od 24 sata. Konačna je visina uzorka nakon rasterećenja, $H_f = 1,498$ cm. Uzorku se pri rasterećenju, očekivano, povećala visina u odnosu na onu krajem četvrtog inkrementa opterećenja, ali nije dosegla početnu vrijednost 1,9 cm radi plastičnog ponašanja tla.

Na kraju pokusa trebamo odrediti vlažnost ispitivanog uzorka nakon rasterećenja. Ovdje je $w = 66,2$ %, a gustoća čestica tla $\rho_s = 2,65$ Mg/m³. Uz pretpostavku da je tlo potpuno saturirano, pa je $S_r = 100$ %, iz izraza

$$S_r e = \frac{\rho_s}{\rho_w} w$$

Dobijemo vrijednost koeficijenta pora na kraju pokusa e_f

$$1 \times e_f = \frac{2,65}{1} \times 0,662 \Rightarrow e_f = 1,754$$

Dalje se odredi koeficijent pora na samom početku pokusa e_0 . Koeficijent pora se smanjuje tijekom opterećenja, pa je

$$e_0 = e + \Delta e$$

Također je

$$\frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\Delta H}{H_0}$$

iz čega slijedi da je

$$\Delta e_f = (1 + e_f + \Delta e_f) \frac{H_0 - H_f}{H_0}$$

Dakle,

$$\Delta e_f = (2,754 + \Delta e_f) \frac{1,9 - 1,498}{1,9} \Rightarrow \Delta e_f = 0,739$$

Sada je

$$e_0 = e_f + \Delta e_f = 1,754 + 0,739 = 2,493$$

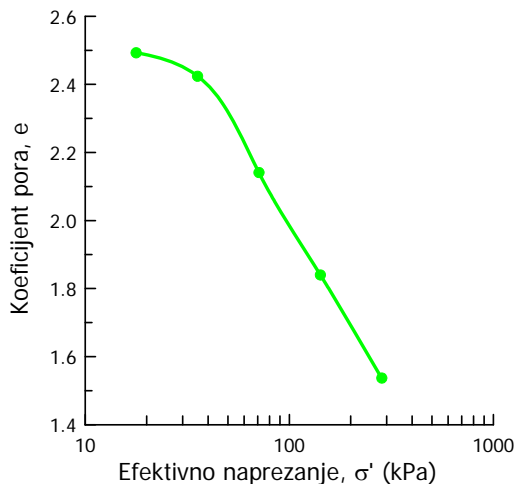
Dobili smo prvi par vrijednosti (e , σ') za edometarsku krivulju i to je (2,493; 17,75). Za ostale vrijednosti efektivnih naprežanja na kraju perioda od 24 sata konsolidacije, koeficijente pora dobijemo iz sljedećeg izraza:

$$e = e_0 - \Delta e = e_0 - (1 + e_0) \frac{\Delta H}{H_0} = 2,493 - 3,493 \frac{\Delta H}{1,9}$$

s tim da je na kraju svakog perioda od 24 sata poznata promjena visine ΔH u odnosu na početnu visinu $H_0 = 1,9$ cm. U tablici II-1 dane su vrijednosti odgovarajućih koeficijenata pora. Sada imamo sve parove vrijednosti (e , σ') iz kojih dobijemo edometarsku krivulju, odnos koeficijenta pora i efektivnog naprežanja u polulogaritamskom mjerilu, kao što je prikazano na slici II-11.

Tablica II-1. Koeficijent pora na kraju perioda od 24 sata konsolidacije

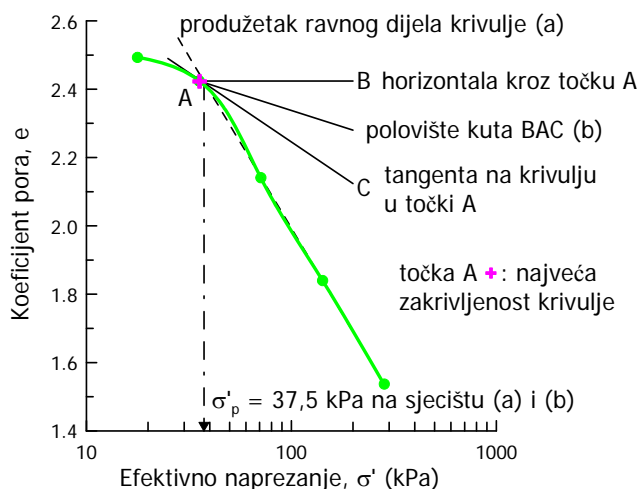
Inkrement	σ' (kPa)	H (cm)	ΔH (cm)	e
1	35,5	1,862	0,038	2,424
2	71	1,708	0,192	2,141
3	142	1,545	0,355	1,840
4	284	1,380	0,520	1,537



Slika II-11. Edometarska krivulja

Iz edometarske se krivulje može, između ostalog, očitati vrijednost napreznja prekonsolidacije σ'_p . Za napreznje prekonsolidacije se kaže da je najveće efektivno napreznje koje je u tlu, u njegovoj povijesti djelovalo na određenoj dubini iz koje je uzet uzorak tla za ispitivanje u edometru. Kao što će se vidjeti naknadno, postoji i drugo objašnjenje za napreznje prekonsolidacije. Prvo ćemo prikazati Casagrandeov postupak određivanja napreznja prekonsolidacije iz edometarske krivulje (slika II-12).

Prvo se odredi točka (označena slovom A) na edometarskoj krivulji gdje je ova krivulja najviše zakrivljena. Zatim se kroz točku A povuče horizontalna linija (do točke B) i tangenta na krivulju (do točke C) te se odredi polovište dobivenog kuta BAC (linija (b)). Linija (a) je produžetak ravnog dijela edometarske krivulje. Apscisa sjecišta linija (a) i (b) odgovara napreznju prekonsolidacije.



Slika II-12. Casagrandeov postupak za određivanje napreznja prekonsolidacije σ'_p

Ako je *in situ* vertikalno efektivno naprezanje manje od naprezanja prekonsolidacije, kaže se da je tlo prekonsolidirano. U slučaju edometarske krivulje sa slike II-11, može se odmah zaključiti da ispitivan uzorak tla odgovara prekonsolidiranom tlu, jer je početno vertikalno naprezanje od 17,75 kPa manje od naprezanja prekonsolidacije. Gotovo su sva tla u Hrvatskoj u manjoj ili većoj mjeri prekonsolidirana. Ako prihvatimo definiciju naprezanja prekonsolidacije, kao najvećeg efektivnog naprezanja koje je u tlu djelovalo, onda bi smanjenje efektivnog naprezanja *in situ* bio rezultat rasterećenja tla erozijom površinskih slojeva tla ili povećanja razine podzemne vode.

Vertikalno efektivno naprezanje *in situ* može biti najviše jednako naprezanju prekonsolidacije. U tom slučaju kažemo da je tlo normalno konsolidirano. Daljnjim opterećenjem normalno konsolidiranog tla, u principu, dobijemo linearni dio edometarske krivulje u polulogaritamskom mjerilu, cijeli u normalno konsolidiranom području. Kao što se vidi iz edometarske krivulje, tlo je puno kruće u prekonsolidiranom nego u normalno konsolidiranom području. U prekonsolidiranom se području tlo ponaša gotovo elastično, a u normalno konsolidiranom području se ponaša plastično. Normalno konsolidirano ćemo tlo rijetko naći u kontinentalnom području Hrvatske, dok je učestalo u gornjim dijelovima morskih sedimenata. Radi velike stišljivosti, normalno je konsolidirano tlo vrlo nepovoljno za geotehničke zahvate.

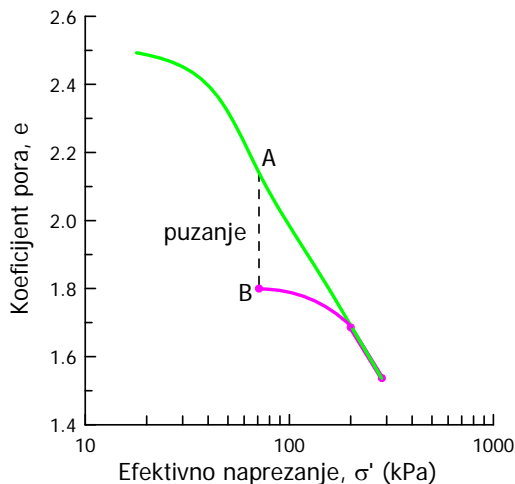
Definira se omjer prekonsolidacije OCR (*OverConsolidation Ratio*):

$$\boxed{\text{OCR} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \geq 1} \quad (1)$$

Ako je $\text{OCR} > 1$, tlo je prekonsolidirano, a ako je $\text{OCR} = 1$, tlo je normalno konsolidirano.

Uzrok prekonsolidiranosti tla, međutim, može biti njegovo puzanje, pa ne mora vrijediti gore navedena definicija naprezanja prekonsolidacije. Na slici II-13 je ilustrirano kako puzanje utječe na naprezanje prekonsolidacije. Neka se stanje koeficijenta pora i vertikalnog efektivnog naprezanja nalazi u točki A sa slike II-13. Ako tlo vrlo dugo ostane netaknuto, u potpuno istim uvjetima (tlak vode, temperatura), uslijed puzanja će se njegov volumen smanjiti, pa tako i koeficijent pora, a vertikalno će efektivno naprezanje ostati isto. Tada će se stanje koeficijenta pora i vertikalnog efektivnog naprezanja nalaziti u točki B sa slike II-13. Ako sada tlo opteretimo, ono će se ponašati kao prekonsolidirano tlo dok ne dosegne liniju normalnog naprezanja. Time će se moći odrediti naprezanje prekonsolidacije, koje ne odgovara osnovnoj definiciji, po kojoj se radi o najvećem efektivnom naprezanju koje je prethodno djelovalo u tlu.

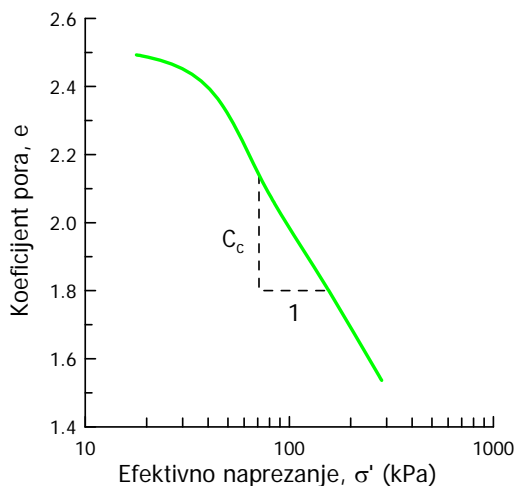
Prekonsolidirano je tlo poželjno ne opterećivati preko vrijednosti naprezanja prekonsolidacije, jer će, u suprotnom, doći do velikih slijeganja tla. Iz edometarske je krivulje moguće, za svako početno stanje (e_0, σ'_0) i odgovarajući inkrement opterećenja, odrediti konačno stanje u tlu (e_f, σ'_f) i odgovarajuće konačno slijeganje uslijed konsolidacije tla.



Slika II-13. Puzanje tla i novo opterećenje s odgovarajućim naprezanjem prekonsolidacije

Kao što je prethodno rečeno, krivulje slijeganja za prvi inkrement opterećenja (slika II-2), po svom se obliku razlikuju od krivulja slijeganja za preostale inkremente opterećenja. Razlog za to je što je tijekom prvog inkrementa opterećenja tlo bilo u prekonsolidiranom, a za preostale je inkremente bilo u normalno konsolidiranom području. Krivulje sa slike II-2 tipične su krivulje slijeganja za prekonsolidirano tlo.

Edometarska krivulja omogućava određivanje još nekih veličina. Prvo ćemo definirati indeks stišljivosti C_c (slika II-14). Indeks stišljivosti definiran je kao nagib linearnog dijela edometarske krivulje u polulogaritamskom mjerilu u normalno konsolidiranom području.

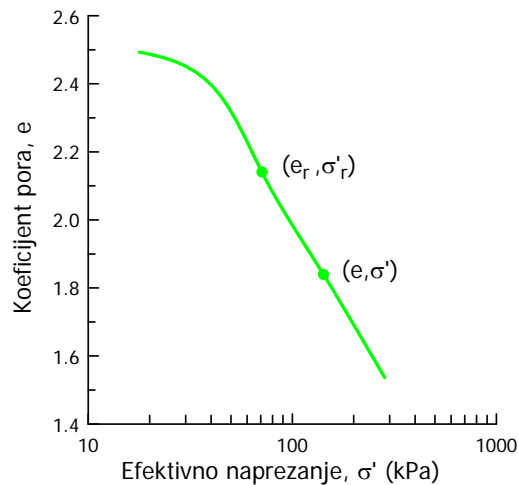


Slika II-14. Indeks stišljivosti C_c

Tako, za linearni dio edometarske krivulje u polulogaritamskom mjerilu, možemo postaviti jednadžbu:

$$e_r - e = C_c \log \frac{\sigma'}{\sigma'_r} \quad (2)$$

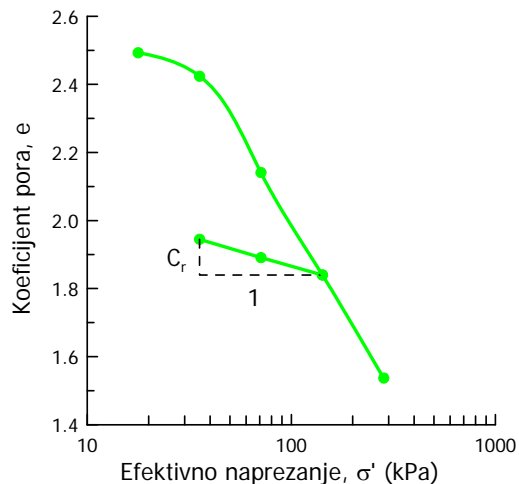
gdje su e_r i σ'_r koordinate referentne točke na edometarskoj krivulji u normalno konsolidiranom području (slika II-15).



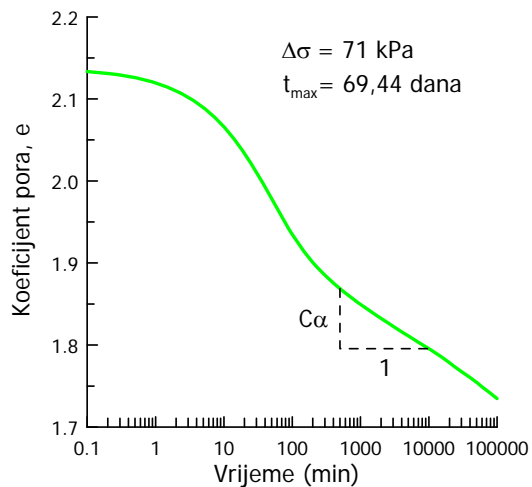
Slika II-15. Točke iz jednadžbe (2)

Analogno indeksu stišljivosti definiramo indeks rekompresije C_r (slika II-16). Ovdje je, pri efektivnom napreznju 142 kPa, uzorak rasterećen u koracima do efektivnog napreznja 35,5 kPa i ponovo, u koracima, opterećen do efektivnog napreznja 284 kPa. Nagib linearnog dijela ponovnog opterećenja u polulogaritamskom mjerilu je indeks rekompresije.

Dalje ćemo, sada iz krivulje slijeganja u vremenu, definirati indeks sekundarne konsolidacije C_α . Za ovu ćemo definiciju pretpostaviti da je inkrement opterećenja $\Delta\sigma_3$ na uzorku ostao 69,44 dana. Primarna je konsolidacija trajala oko 600 minuta. Iza toga su slijeganja rezultat puzanja. Kao što se vidi na slici II-17, dio krivulje slijeganja, tijekom puzanja je linearan u polulogaritamskom mjerilu. Nagib ovog dijela krivulje slijeganja je indeks sekundarne konsolidacije.



Slika II-16. Indeks rekompresije C_r

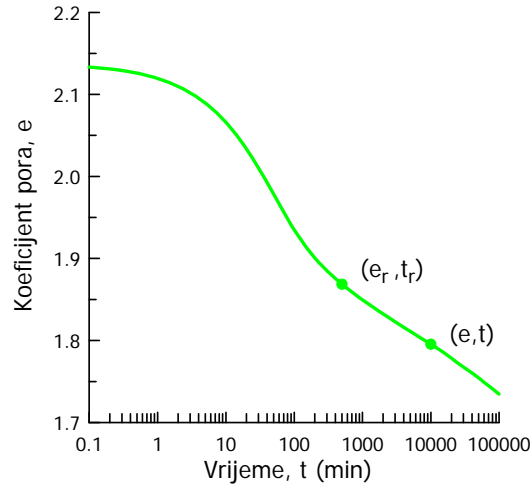


Slika II-17. Indeks sekundarne konsolidacije C_α

Za linearni dio krivulje slijeganja u polulogaritamskom mjerilu, možemo postaviti jednadžbu:

$$e_r - e = C_\alpha \log \frac{t}{t_r} \quad (3)$$

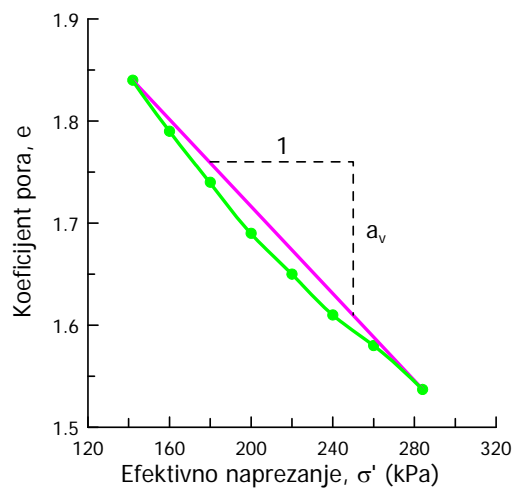
gdje su e_r i t_r koordinate referentne točke na linearnom dijelu krivulje slijeganja (slika II-18).



Slika II-18. Točke iz jednadžbe (3)

Kada bismo, u edometarskom pokusu, četvrti inkrement opterećenja $\Delta\sigma_4 = 142$ kPa nanosili na uzorak u 7 jednakih koraka, svaki u trajanju od 24 sata, u polulogaritamskom bismo dijagramu (e, σ') dobili pravac. Međutim, kada odgovarajuće parove vrijednosti (e, σ') ucrtamo u linearnom mjerilu, to više nije pravac (slika II-19). Ako spojimo prvu i zadnju točku ovog dijagrama, dobijemo pravac, čiji nagib definira koeficijent stišljivosti a_v . Tako je koeficijent stišljivosti definiran izrazom

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \quad (\text{m}^2/\text{kN}) \quad (4)$$



Slika II-19. Koeficijent stišljivosti a_v

Kada koeficijent stišljivosti podijelimo s $1 + e_0$, dobijemo modul promjene volumena m_v

$$\boxed{m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad (\text{m}^2/\text{kN})} \quad (5)$$

Iz izraza (4) i (5) proizlazi da je

$$m_v = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \frac{1}{\Delta \sigma'} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0} \frac{1}{\sigma' - \sigma'_0}$$

Kako je

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

slijedi da je

$$m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma'}$$

Sada definiramo modul stišljivosti M_v :

$$\boxed{M_v = \frac{1}{m_v} \quad (\text{kN}/\text{m}^2)} \quad (6)$$

Dakle,

$$M_v = \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \varepsilon}$$

Moguće je, za edometarske uvjete, odrediti vezu između modula stišljivosti i parametara linearno-elastičnog konstitucijskog odnosa, Youngovog modula elastičnosti E' i Poissonovog koeficijenta ν' .

U edometarskim je uvjetima:

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma'_v = \Delta \sigma'_1$$

$$\Delta \varepsilon = \Delta \varepsilon_1; \quad \Delta \varepsilon_3 = 0$$

Prema teoriji elastičnosti je, dakle:

$$0 = \frac{1}{E'} [\Delta\sigma'_3 - \nu'(\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_3)]$$

što daje

$$\Delta\sigma'_3 - \nu'(\Delta\sigma'_1 + \Delta\sigma'_3) = 0$$

odnosno

$$\Delta\sigma'_3 = \frac{\nu'}{1-\nu'} \Delta\sigma'_1$$

Gornjim je izrazom definiran odnos između horizontalnog i vertikalnog efektivnog napreznja, za što služi koeficijent bočnog napreznja tla u mirovanju K_0 (koji vrijedi u edometarskim uvjetima). Tako dođemo do veze između K_0 i ν'

$$\boxed{K_0 = \frac{\nu'}{1-\nu'}} \quad (7)$$

Za vertikalnu deformaciju imamo:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_1 &= \frac{1}{E'} (\Delta\sigma'_1 - 2\nu' \Delta\sigma'_3) = \frac{1}{E'} \left(\Delta\sigma'_1 - \frac{2\nu'^2}{1-\nu'} \Delta\sigma'_1 \right) = \\ &= \frac{\Delta\sigma'_1}{E'} \frac{1-\nu'-2\nu'^2}{1-\nu'} = \frac{\Delta\sigma'_1}{E'} \frac{(1+\nu')(1-2\nu')}{1-\nu'} \end{aligned}$$

iz čega slijedi tražena veza parametara:

$$\boxed{M_v = E' \frac{1-\nu'}{(1+\nu')(1-2\nu')}} \quad (8)$$

III. Terzaghijeva teorija jednodimenzionalne konsolidacije

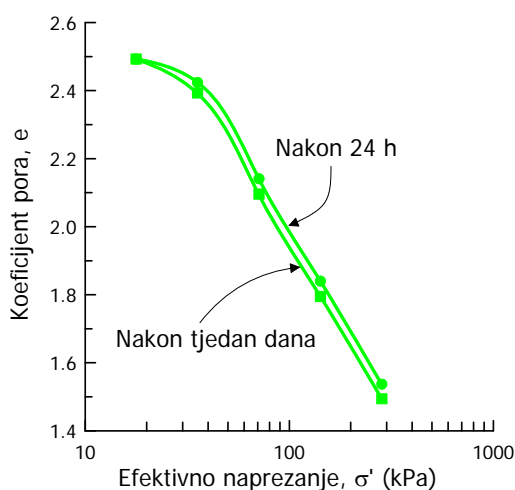
Terzaghijeva teorija konsolidacije, kao što je rečeno, još uvijek se u praksi koristi, iako ima bitnih ograničenja. Prvo, ova teorija vrijedi samo za male deformacije, što znači da njome nije uputno analizirati proces konsolidacije za meke, normalno konsolidirane gline. Nadalje, pretpostavlja se linearan odnos između koeficijenta pora i efektivnih naprežanja (konstantan koeficijent stišljivosti a_v), što može aproksimativno vrijediti samo za vrlo male deformacije, jer, kao što je gore prikazano, ovaj odnos nije linearan. Posebno treba naglasiti da se Terzaghijevom teorijom može obuhvatiti samo primarna konsolidacija, jer, prema njoj, slijeganje asimptotski teži nuli nakon što disipira sav višak tlaka vode. No, već je tijekom održavanja I. Međunarodne konferencije za mehaniku tla i temeljenje, u Cambridgeu 1936. godine, niz istraživača izvijestilo o nastavku slijeganja tla nakon disipacije viška tlaka vode, što je uočeno u laboratorijskim pokusima i *in situ*. Tako je i došlo do podjele na primarnu i sekundarnu konsolidaciju. Primarnom se konsolidacijom nazivao onaj dio konsolidacije koji se može obuhvatiti Terzaghijevom teorijom, a za sekundarnu je konsolidaciju Buisman (1936) predložio izraz u kojem se slijeganje linearno povećava s logaritmom vremena. Ovaj se izraz također još uvijek koristi.

U međuvremenu su razvijene razne teorije nelinearne jednodimenzionalne konsolidacije za konačne (velike) deformacije, u kojima se pretpostavlja nelinearan odnos između koeficijenta pora i efektivnih naprežanja te između koeficijenta pora i koeficijenta propusnosti. U nekima od ovih teorija je uključeno i puzanje tla. Međutim, do današnjega dana traju prepirke među istraživačima o tome je li puzanje izdvojeno ponašanje tla, koje počne djelovati tek nakon disipacije viška tlaka vode, ili je inherentno svojstvo tla, koje se uvijek očitava, pa tako i tijekom primarne konsolidacije tla. Ovaj drugi slučaj znači da nije pouzdano iz edometarskog ispitivanja tla, odnosno iz edometarske krivulje, prognozirati konačno slijeganje tla *in situ*, jer je uzorak tla visok svega 2 cm, dok je sloj konsolidirajuće gline *in situ* debljine više metara, pa bi se u njemu, za isti inkrement opterećenja, dosegulo veće slijeganje (radi puzanja) nego što bi se dobilo ekstrapolacijom rezultata edometarskog pokusa za debeli sloj tla. No, ovo su „akademske“ rasprave, a Terzaghijeva se teorija za primarnu konsolidaciju i Buismanov izraz za sekundarno slijeganje i dalje rabe u praksi.

Pretpostavke Terzaghijeve teorije su:

1. Tlo je homogeno
2. Tlo je potpuno saturirano
3. Voda i čestice tla nisu stišljive
4. Deformacije i strujanje vode su jednodimenzionalni (samo u vertikalnom smjeru)
5. Deformacije su male
6. Vrijedi Darcyev zakon
7. Koeficijent propusnosti i modul promjene volumena ostaju konstantnima tijekom konsolidacije
8. Postoji jedinstven odnos između koeficijenta pora i efektivnog naprežanja

Pretpostavke 1. do 3. i 6. su uobičajene. Pretpostavka 4. je logična za edometarski pokus, a treba reći da je Biot razvio trodimenzionalnu teoriju konsolidacije. Pretpostavke 5. i 7. su već komentirane. Laboratorijska ispitivanja raznih istraživača pokazuju da pretpostavka 8. ne stoji, kao što se vidi na slici III-1. Na ovoj su slici prikazane dvije edometarske krivulje nakon ispitivanja dvaju uzoraka iste vrste tla od istog početnog stanja i s istim inkrementima opterećenja. Jedan je pokus vođen tako da je svaki inkrement opterećenja na uzorku bio 24 sata, dok je svaki inkrement opterećenja u drugom pokusu na uzorku bio tjedan dana. Zbog duljeg trajanja pužanja u drugom pokusu, za iste su vrijednosti efektivnih naprežanja dobiveni manji koeficijenti pora (veće deformacije). Ovo opovrgava postojanje jedinstvenog odnosa između koeficijenta pora i efektivnog naprežanja.

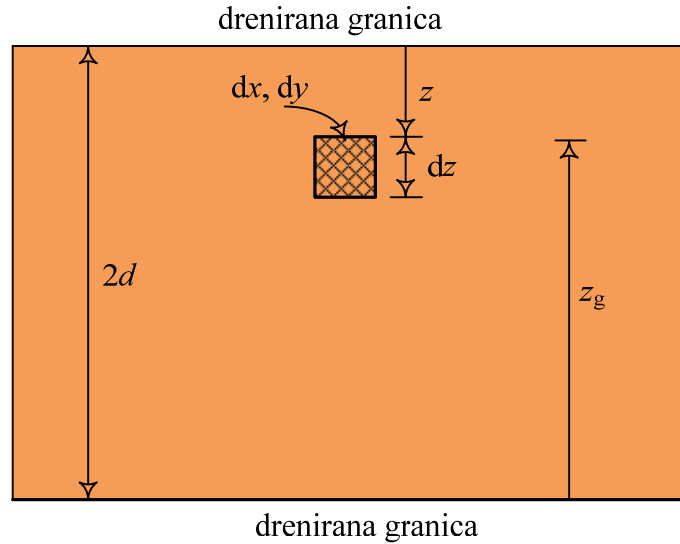


Slika III-1. Nejedinstven odnos između koeficijenta pora i efektivnog naprežanja

Za izvod Terzaghijeve teorije promatramo element tla dimenzija dx , dy i dz na dubini z u sloju tla debljine $2d$ (slika III-2). S d označavamo najdulji put, koji voda mora proći da bi istekla iz tla. Ako su obje horizontalne granice tla propusne (drenirane), onda je d jednak polovini debljine sloja tla, a ako je donja granica nepropusna, onda je d jednak debljini sloja tla.

Kako Terzaghijeva teorija vrijedi za više oblika početne raspodjele viška tlaka vode, označit ćemo s u_i početnu raspodjelu viška tlaka vode. U slučaju jednolikog opterećenja veće površine tla s $\Delta\sigma$, $u_i = \Delta\sigma$. Općenito je

$$u_e(z,0) = u_i(z)$$



Slika III-2. Element tla u sloju debljine $2d$

Kako vrijedi Darcyev zakon, specifični je protok

$$v = k i = -k \frac{\partial H}{\partial z}$$

Za hidrostatski tlak vode je $u_0 = \gamma_w z$, pa je hidraulički potencijal

$$H = P + z_g = \frac{u}{\gamma_w} + z_g = \frac{u_0 + u_e}{\gamma_w} + z_g = z + z_g + \frac{u_e}{\gamma_w}$$

Ako je mjerna ravnina na donjoj horizontalnoj granici sloja tla, zbroj $z + z_g = 2d$ daje debljinu sloja tla, dakle to je konstanta, pa je

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u_e}{\partial z}$$

odnosno

$$v = -\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial u_e}{\partial z}$$

Prema jednadžbi kontinuiteta za jednodimenzionalno nestacionarno strujanje vode kroz saturirano tlo, odljev vode iz elementa tla kroz njegove rubove mora biti jednak smanjenju volumena tog elementa po jedinici vremena, što se matematički može izraziti u obliku

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

iz čega slijedi da je

$$-\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

S druge strane je

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon}{d\sigma'} \frac{\partial \sigma'}{\partial t} = \frac{1}{M_v} \frac{\partial \sigma'}{\partial t}$$

Kako je smanjenje viška tlaka vode u vremenu jednako povećanju efektivnih naprežanja, tako je

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = - \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

onda je

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = - \frac{1}{M_v} \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

Konačno dobijemo

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{1}{M_v} \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

odnosno

$$\boxed{c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}} \quad (9)$$

gdje je

$$\boxed{c_v = \frac{k M_v}{\gamma_w} \quad (\text{m}^2/\text{s})} \quad (10)$$

Izraz (9) je Terzaghieva diferencijalna jednadžba jednodimenzionalne konsolidacije, a izrazom (10) je definiran koeficijent konsolidacije c_v , koji je tijekom konsolidacije konstantan.

Terzaghieva jednadžba (9) ima eksplicitno analitičko rješenje. Za ovo rješenje treba postaviti početne i rubne uvjete. Početni uvjeti glase:

$$u_e(z, 0) = u_i(z) \quad \text{za} \quad 0 \leq z \leq 2d$$

Kako su obje horizontalne granice propusne (drenirane), na njima je ukupan tlak vode nula, pa je i višak tlaka vode nula, tako da rubni uvjeti glase

$$u_e(0, t) = 0 \quad \text{i} \quad u_e(2d, t) = 0$$

Rješenje Terzaghieve jednadžbe je u obliku beskonačnog reda:

$$u_e(z, t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{d} \int_0^{2d} u_i(z) \sin \frac{n\pi z}{2d} dz \right) \left(\sin \frac{n\pi z}{2d} \right) \times \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2 c_v t}{4d^2} \right)$$

Ako je $u_i(z)$ konstantan po dubini ($u_i = \Delta\sigma$) onda se rješenje pojednostavljuje:

$$u_e(z, t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2u_i}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \left(\sin \frac{n\pi z}{2d} \right) \times \exp \left(- \frac{n^2 \pi^2 c_v t}{4d^2} \right)$$

Kako je za parne brojeve n , $(1 - \cos n\pi) = 0$, a za neparne je n , $(1 - \cos n\pi) = 2$, uvodimo supstitucije

$$n = 2m + 1 \quad \text{i} \quad M = \frac{\pi}{2} (2m + 1)$$

i bezdimenzionalni vremenski faktor T_v :

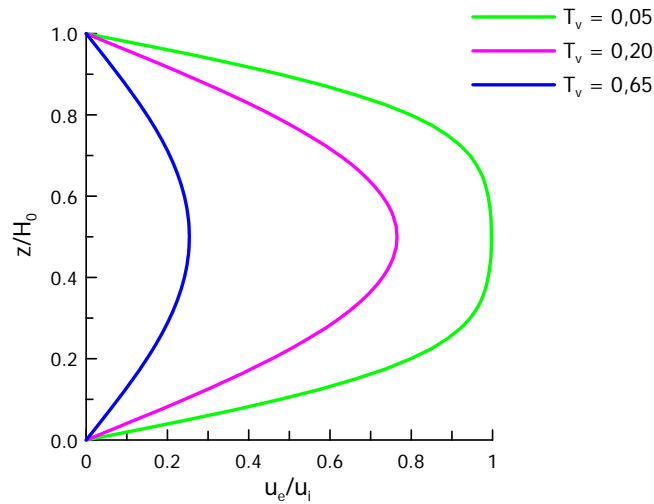
$$\boxed{T_v = \frac{c_v t}{d^2}} \quad (11)$$

pa se rješenje Terzaghieve jednadžbe svodi na

$$u_e(z, t) = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_i}{M} \left(\sin \frac{Mz}{d} \right) \exp(-M^2 T_v)$$

Prikazano rješenje Terzaghieve jednadžbe daje izokrone. Izokrona je krivulja koja, za dano vrijeme t , prikazuje raspodjelu viška tlaka vode $u_e(z, t)$ (ili ukupnog tlaka vode) po visini sloja tla (ili uzorka tla). Kada se $u_e(z, t)$ podijeli s konstantnim početnim viškom tlaka vode u_i , a koordinata z se podijeli s početnom visinom H_0 , dobije se normalizirana

izokrona. Na slici III-3 prikazane su tri normalizirane izokrone za dane vrijednosti bezdimenzionalnog vremenskog faktora T_v . Ove su normalizirane izokrone općenitog karaktera u tom smislu da vrijede za sve koeficijente konsolidacije c_v i za sve visine H_0 . Ako su obje granice promatranog sloja tla drenirane, cijele su izokrone relevantne za odgovarajuću raspodjelu tlaka vode, a ako je donja granica sloja nepropusna, samo je gornja polovina izokrone relevantna za raspodjelu tlaka vode. Ovisno o vrijednosti konkretnog koeficijenta konsolidacije i konkretnog najvećeg puta dreniranja d za dani sloj tla, za fiksirani T_v sa slike III-3 će se dobiti odgovarajuće vrijeme kada raspodjela tlaka vode, prema Terzaghiu, odgovara upravo izokroni sa slike III-3.



Slika III-3. Normalizirane izokrone za Terzaghievo rješenje konsolidacije

Sada ćemo definirati stupanj konsolidacije U_z na dubini z za dano vrijeme t , u općenitom obliku

$$U_z(z, t) = \frac{u_i(z) - u_e(z, t)}{u_i(z)} = 1 - \frac{u_e(z, t)}{u_i(z)}$$

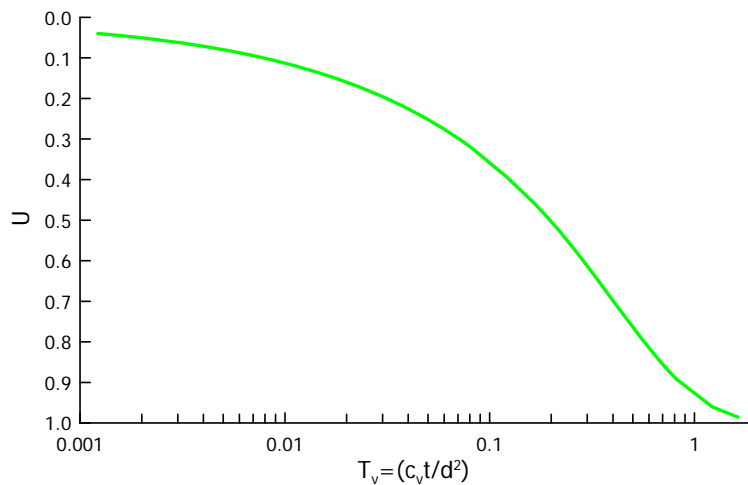
Za konstantni u_i po dubini sloja tla, iz Terzaghijevog se rješenja dobije da je

$$U_z(z, t) = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \left(\sin \frac{Mz}{d} \right) \exp(-M^2 T_v)$$

Nas zanima prosječni stupanj konsolidacije $U(t)$ za cijeli sloj tla, za dano vrijeme t , koji se dobije integracijom izraza za $U_z(z, t)$ po visini sloja. Dakle,

$$U(t) = 1 - \frac{\int_0^{H_0} (1/H_0) u_e(z,t) dz}{u_i} = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v)$$

Prosječni stupanj konsolidacije, kojeg ćemo u daljnjem tekstu nazivati samo stupnjem konsolidacije, daje postotak disipacije viška tlaka vode u odnosu na početni višak tlaka vode u_i , za dano vrijeme t . Desna strana gornjeg izraza sadrži samo bezdimenzionalne veličine, tako da je moguće dobiti odnos između stupnja konsolidacije U i bezdimenzionalnog vremenskog faktora T_v (slika III-4), koji vrijedi za sve koeficijente konsolidacije i sve visine sloja tla.



Slika III-4. Krivulja ovisnosti stupnja konsolidacije U o bezdimenzionalnom vremenskom faktoru T_v

Budući da krivulja sa slike III-4 ima takav oblik da joj se početni dio do $U = 60\%$ može aproksimirati parabolom, a dio između $U = 60\%$ i $U = 90\%$ pravcem u polulogaritamskom mjerilu, mogu se postaviti sljedeći empirijski izrazi za veze između stupnja konsolidacije i bezdimenzionalnog vremenskog faktora:

za $U < 0,6$ $T_v = \frac{\pi}{4} U^2$	(12)
za $U = 0,6$ $T_v = 0,286$	
za $U > 0,6$ $T_v = -0,933 \log(1-U) - 0,085$	

Jednim ćemo primjerom ilustrirati uporabu izraza (12). U standardnom edometarskom pokusu, uzorak saturirane gline, visine 1,9 cm, dosegne 50 % konsolidacije za 20 minuta. Koliko vremena treba sloju tla istih karakteristika, uvjeta opterećenja i dreniranja,

debljine 5 m, da dosegne isti stupanj konsolidacije? Koliko mu treba vremena da dosegne 30 %, a koliko da dosegne 75 % konsolidacije?

50 % konsolidacije znači da je stupanj konsolidacije $U = 0,5$, čemu odgovara jedinstvena vrijednost bezdimenzionalnog vremenskog faktora za uzorak i za sloj tla. Ako indeksom u označimo varijable koje se odnose na uzorak, a indeksom s one koje se odnose na sloj tla, onda je

$$T_v = \frac{c_v t_u}{d_u^2} = \frac{c_v t_s}{d_s^2}$$

gdje je

$$t_u = 20 \text{ min} \quad d_u = \frac{0,019}{2} = 0,0095 \text{ m}$$

$$t_s = ? \quad d_s = \frac{5}{2} = 2,5 \text{ m}$$

iz čega slijedi da je

$$t_s = \left(\frac{2,5}{0,0095} \right)^2 20 = 1.385.042 \text{ min} = 2,6 \text{ god}$$

što je odgovor na prvo pitanje.

Za odgovore na drugo pitanje treba odrediti vrijednost bezdimenzionalnog vremenskog faktora za stupanj konsolidacije 50 % i vrijednost koeficijenta konsolidacije iz poznatih podataka, primjerice, za uzorak tla. Za $U = 0,5$, iz izraza (12) slijedi da je

$$T_v = \frac{\pi}{4} 0,5^2 = 0,196$$

Sada je

$$c_v = \frac{T_v d_u^2}{t_u} \Rightarrow c_v = \frac{0,196 \times 0,0095^2}{20} = 8,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{min} = 0,465 \text{ m}^2/\text{god}$$

Za 30 % konsolidacije, odnosno $U = 0,30$

$$T_v = \frac{\pi}{4} 0,30^2 = 0,071$$

iz čega dobijemo vrijeme potrebno za 30 % konsolidacije sloja tla

$$t_s = \frac{T_v d_s^2}{c_v} = \frac{0,071 \times 2,5^2}{0,465} = 0,95 \text{ god}$$

Za 75 % konsolidacije, odnosno $U = 0,75$

$$T_v = -0,933 \log(1 - 0,75) - 0,085 = 0,477$$

pa je vrijeme potrebno za 75 % konsolidacije

$$t_s = \frac{T_v d_s^2}{c_v} = \frac{0,477 \times 2,5^2}{0,465} = 13,4 \text{ god}$$

Nadalje ćemo opisati kako se iz edometarskog pokusa određuje slijeganje tla na kraju primarne konsolidacije, a kako se na osnovi Terzaghiieve teorije može dobiti slijeganje tla za dano vrijeme t .

Iz poznatog odnosa

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

slijedi da je

$$\Delta H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_0 = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \frac{\Delta \sigma'}{\Delta \sigma'} H_0 = \Delta \sigma' m_v H_0$$

što znači da je slijeganje sloja tla početne debljine H_0 , nakon inkrementa opterećenja $\Delta \sigma$, na kraju primarne konsolidacije, kada je $\Delta \sigma' = \Delta \sigma$, dano izrazom:

$$\boxed{s_{\text{EOP}} = \frac{\Delta \sigma'}{M_v} H_0} \quad (13)$$

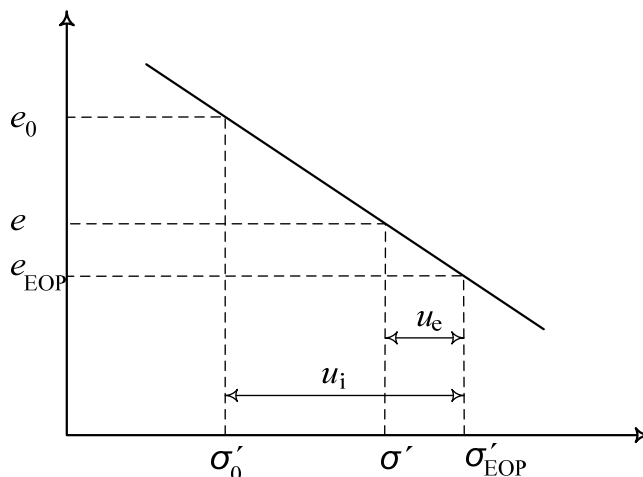
Za slijeganja tla na kraju primarne konsolidacije dovoljno je, dakle, iz edometarske krivulje odrediti modul stišljivosti M_v za dani inkrement opterećenja.

Kako Terzaghiieva teorija pretpostavlja da je odnos između koeficijenta pora i efektivnog naprezanja linearan (slika III-5), iz toga proizlaze sljedeći odnosi:

$$U_z(z, t) = \frac{u_i(z) - u_e(z, t)}{u_i(z)} = \frac{\sigma'(z, t) - \sigma'_0(z)}{\sigma'_{\text{EOP}}(z) - \sigma'_0(z)}$$

$$U_z(z, t) = \frac{e_0(z) - e(z, t)}{e_0(z) - e_{\text{EOP}}(z)} = \frac{\Delta e(z, t)}{\Delta e_{\text{EOP}}(z)} = \frac{s_c(z, t)}{s_{\text{EOP}}(z)}$$

gdje je $s_c(z, t)$ konsolidacijsko slijeganje tla na dubini z za vrijeme t .

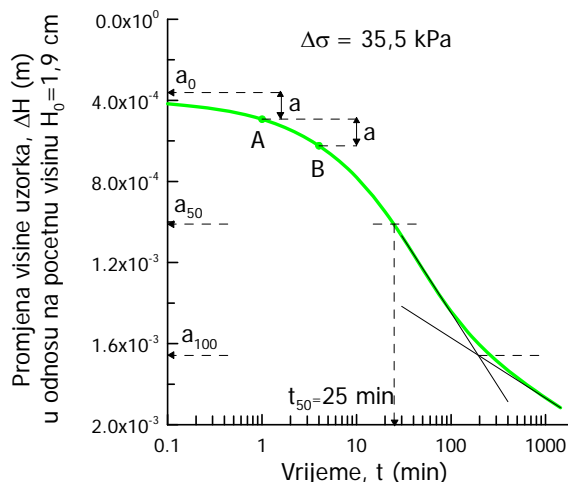


Slika III-5. Linearni odnos između koeficijenta pora i efektivnog napreznja

Dakle, na temelju pretpostavke da je odnos između koeficijenta pora i efektivnog napreznja linearan (konstantan modul stišljivosti M_v), proizlazi da stupanj konsolidacije u isto vrijeme predstavlja postotak disipacije viška tlaka vode u odnosu na početni višak tlaka vode u_i i postotak realizacije slijeganja $s_c(t)$ u odnosu na slijeganje na kraju primarne konsolidacije s_{EOP} . Prema tome, možemo pisati:

$$\boxed{s_c(t) = U(t) s_{\text{EOP}}} \quad (14)$$

Sada ćemo prikazati kako se iz rezultata edometarskog pokusa, za pojedini inkrement opterećenja, Casagrandeovim postupkom određuje koeficijent konsolidacije c_v . Na slici III-6 prikazani su rezultati edometarskog pokusa za inkrement opterećenja 35,5 kPa. Prvo se na početnom dijelu krivulje promjene visine uzorka u vremenu (polulogaritamsko mjerilo) odrede dvije točke, A i B, čiji je omjer apscisa 1:4. Uz pretpostavku da se početni dio ove krivulje može aproksimirati parabolom, omjer ordinata ovih dviju točaka je 1:2. Udaljenost ordinata točaka A i B, a , nanese se iznad točke A i tako na ordinati dobijemo točku a_0 koja označava početak konsolidacije, odnosno stupanj konsolidacije $U = 0$. Sjecište dvaju linearnih dijelova krivulje označava kraj primarne konsolidacije, dakle ordinata točke a_{100} odgovara stupnju konsolidacije $U = 100\%$. Polovina razlike ordinata točaka a_0 i a_{100} odgovara stupnju konsolidacije $U = 50\%$ (točka a_{50}), jer isti stupanj konsolidacije, kao što smo vidjeli, odgovara postotku disipacije viška tlaka vode i postotku ostvarenog slijeganja u odnosu na konačno slijeganje tla.



Slika III-6. Casagrandeov postupak za određivanje koeficijenta konsolidacije c_v

Dakle,

$$a_{50} = \frac{a_0 + a_{100}}{2}$$

a apscisa točke na krivulji, čija je ordinata a_{50} , daje vrijeme t_{50} potrebno za 50 % konsolidacije.

Kako stupnju konsolidacije od 50 % odgovara bezdimenzionalni vremenski faktor $T_v = 0,196$, koeficijent konsolidacije dobijemo iz izraza:

$$\boxed{c_v = \frac{0,196 d^2}{t_{50}}} \quad (15)$$

Za rezultate edometarskog pokusa sa slike III-6, koeficijent konsolidacije je

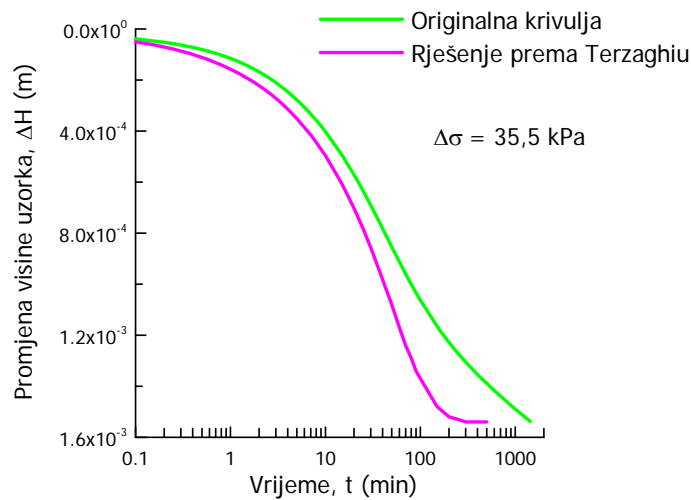
$$c_v = \frac{0,196 \times 0,019^2}{25} = 2,83 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{min}$$

S ovom vrijednošću koeficijenta konsolidacije, pomoću Terzaghijevog rješenja računamo krivulje slijeganja uzorka u vremenu (slika III-7) i viška tlaka vode (ujedno i ukupnog tlaka vode) na polovini visine uzorka u vremenu (slika III-8) za inkrement opterećenja 35,5 kPa. Na slikama III-7 i III-8 prikazane su i originalne krivulje prethodno prikazanih rezultata edometarskog pokusa za ovaj inkrement opterećenja.

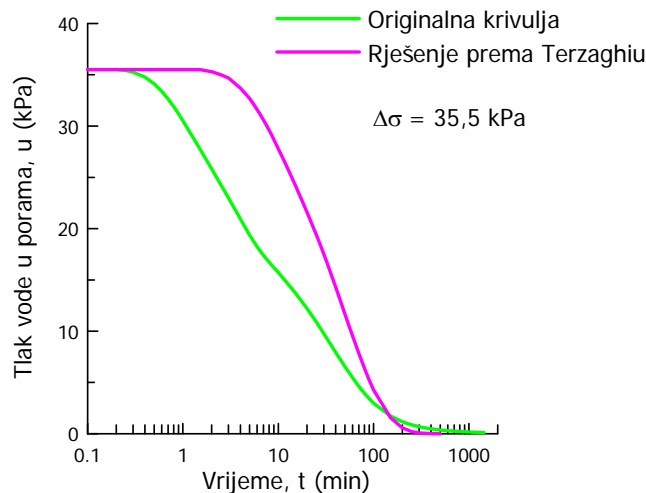
Poznato je da se Terzaghiievo rješenje jednodimenzionalne konsolidacije za slijeganje tla može dobro poklopiti sa svakom edometarskom krivuljom slijeganja uzorka tla u vremenu za dani inkrement opterećenja, u dijelu primarne konsolidacije, uz uvjet da se primjereno odabere vrijednost koeficijenta konsolidacije. Ovo vrijedi u području

normalne konsolidacije, jer krivulje slijeganja imaju drukčiji oblik u području prekonsolidacije. To je rezultat definicije koeficijenta konsolidacije kao konstante tijekom cijeloga procesa, jer se pokazuje da se evidentne nelinearnosti koeficijenta propusnosti i koeficijenta stišljivosti tla, na određeni način „poništavaju“ u izrazu za koeficijent konsolidacije. Zato je između Terzaghijeve linearne teorije samo za primarnu konsolidaciju i nelinearne teorije koja uključuje puzanje tla, relativno dobro poklapanje krivulja promjene visine uzorka u vremenu (slika III-7).

Međutim, nikako ne vrijedi da je, istovremeno, moguće dobro poklopiti Terzaghijevo rješenje za krivulju viška tlaka vode u vremenu s rezultatima nelinearne teorije koja uključuje puzanje tla, kao što je prikazano na slici III-8.



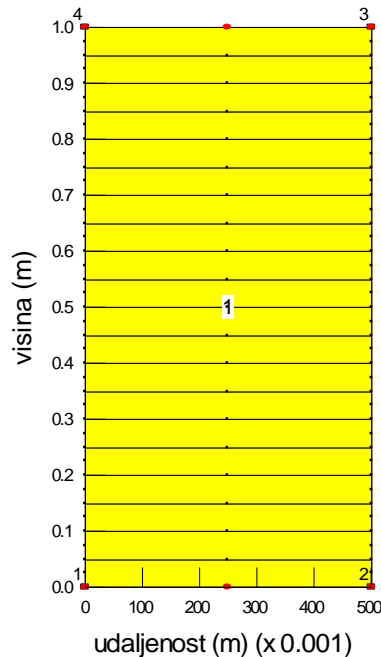
Slika III-7. Slijeganje u vremenu



Slika III-8. Tlak vode u vremenu

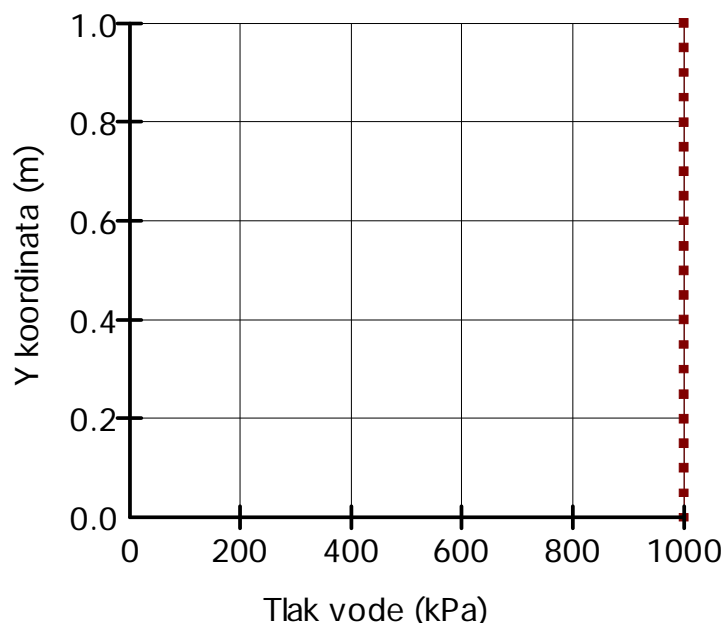
IV. Numeričko modeliranje procesa konsolidacije tla programima *GeoStudio*

Promatramo model tla sa slike IV-1. Koeficijent propusnosti tla $k = 5 \times 10^{-6}$ m/s. Model tla visine je 1 m i sastoji se od jedne regije. Zadali smo gustu mrežu konačnih elemenata po vertikalnoj stranici modela i sekundarne čvorove, radi što točnijeg proračuna varijabli procesa konsolidacije tla. Na početku analize procesa konsolidacije potrebno je zadati početne uvjete, odnosno višak tlaka vode, koji će disipirati tijekom vremena. Ovdje ćemo zadati konstantan višak tlaka vode po visini modela, $u_e = 1000$ kPa, a hidrostatski tlak vode u_0 ćemo zanemariti tako da je $u = u_e$. Ovaj višak tlaka vode odgovara jednolikom opterećenju tla s $\Delta\sigma = 1000$ kPa. Radi jednostavnosti, za zapreminsku težinu vode zadajemo $\gamma_w = 10$ kN/m³. Dakle, na donjem horizontalnom rubu modela zadajemo hidraulički potencijal $H = 100$ m, a na gornjem horizontalnom rubu hidraulički potencijal $H = 101$ m.



Slika IV-1. Model tla za proračun početnih uvjeta za konsolidaciju tla

Rezultati ovog proračuna prikazani su na slici IV-2, gdje se vidi da je u cijelom modelu generiran višak tlaka vode od 1000 kPa.



Slika IV-2. Početni tlak vode po visini modela (1000 kPa)

Ako nas tijekom konsolidacije tla zanimaju samo izokrone, bez slijeganja tla, za sljedeći ćemo proračun koristiti samo program SEEP/W. Budući da se ovdje radi o nestacionarnom strujanju vode kroz tlo, za proces konsolidacije koristimo *Transient* analizu. U programu SEEP/W za nestacionarnu analizu, osim koeficijenta propusnosti tla, treba definirati i funkciju obujamske vlažnosti θ . Obujamska je vlažnost definirana izrazom

$$\theta = n S_r \quad (16)$$

dakle, ima ulogu u nesaturiranom tlu, gdje je $S_r < 100\%$. Ako je tlo potpuno saturirano, kao što ćemo pretpostaviti u ovom primjeru, onda je obujamska vlažnost jednaka relativnom porozitetu n .

U programu SEEP/W obujamska se vlažnost zadaje kao funkcija (negativnog) tlaka vode u tlu (*KeyIn – Hydraulic Functions – Volumetric Water Content*). Ako se radi o potpuno saturiranom tlu, kao u ovom primjeru, dovoljno je zadati jedan redak podataka za tlak vode (*Pressure*) nula i vrijednost relativnog poroziteta n (*Volumetric Water Content*). U tom je slučaju, međutim, potrebno zadati još i vrijednost modula promjene volumena m_v (*Coefficient of Volume Compressibility (M_v)*). Treba svakako obratiti pozornost na to da se ovdje modul promjene volumena označava velikim slovom (M_v), umjesto malim slovom (m_v).

U ovom primjeru zadajemo da je $n = 30\%$ (0,3), a da je modul promjene volumena $m_v = 1 \times 10^{-4}$ (m^2/kN).

Koristimo isti model tla kao za proračun početnih uvjeta, ali sada s konačnim rubnim uvjetima, na kraju primarne konsolidacije. Ovdje uvijek treba zadati takve rubne uvjete koji odgovaraju tlaku vode u_0 u tlu prije nanošenja opterećenja. Kako smo ovdje pretpostavili da je $u_0 = 0$, na gornjem i donjem rubu modela zadajemo da je piezometarska visina $P = 0$.

Još treba zadati realna vremena u kojima će se računati višak tlaka vode u tlu. Kako bi proračun bio što stabilniji, prvo vrijeme za proračun treba odabrati tako da je zadovoljen sljedeći uvjet:

$$t_{\min} \geq \frac{l^2}{12 c_v}$$

gdje je l vertikalna udaljenost rubova elemenata mreže uz propusnu (dreniranu granicu).

U ovom je primjeru (slika IV-1) $l = 1/20 = 0,05$ m, a koeficijent konsolidacije je

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} = \frac{5 \times 10^{-6}}{10 \times 10^{-4}} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

Tako dobijemo da je

$$t_{\min} \geq \frac{0,05^2}{12 \times 5 \times 10^{-3}} = 0,042 \text{ s}$$

Ako prvo vrijeme za proračun ima premalu vrijednost, u analizi može doći do numeričkih nestabilnosti, što se očituje u nepravilnom obliku izokrona, pa izračunato minimalno prvo vrijeme treba povećavati dok se ne dobiju izokrone pravilnoga oblika. Tako ćemo ovdje za prvo vrijeme proračuna (*Initial Increment Size*) zadati 0,5 (sekundi).

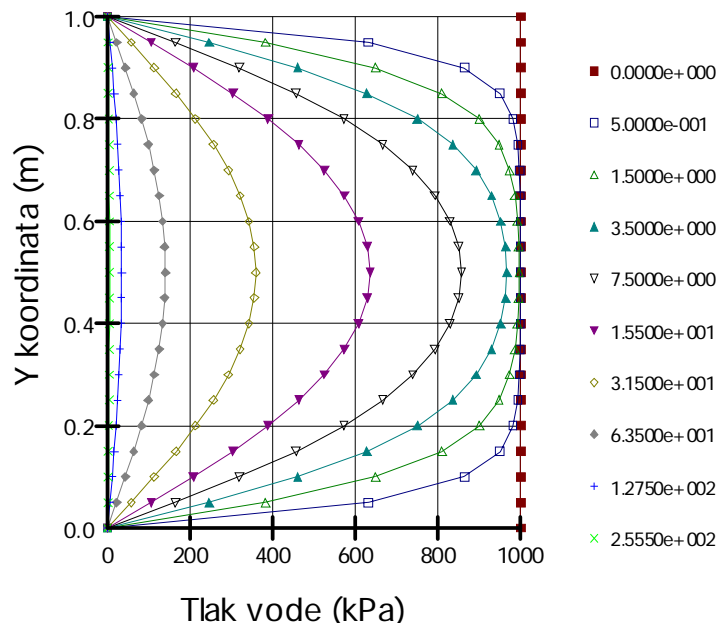
Sa slike III-4, gdje je prikazana ovisnost stupnja konsolidacije o bezdimenzionalnom vremenskom faktoru, vidi se da je T_v oko 2 na kraju primarne konsolidacije, kada je $U = 100$ %. Tako dobijemo da je vrijeme potrebno za završetak primarne konsolidacije

$$t_{100} = \frac{T_v d^2}{c_v} = \frac{2 \times 0,5^2}{5 \times 10^{-3}} = 100 \text{ s}$$

Faktor povećanja prvog vremena za proračun (*Expansion Factor*) odredimo tako da za oko 10 vremena proračuna (*# of Time Steps*) taman premašimo t_{100} . Ako za faktor povećanja ovdje zadamo 2, treba nam 8 koraka proračuna da se dosegne vrijeme 127,5 s. Kako bismo osigurali potpunu disipaciju viška tlaka vode, zadajemo 9 koraka proračuna.

Treba zadati i početne uvjete za tlak vode iz prvog proračuna.

Za zadanih 9 vremena proračuna, izokrone su prikazane na slici IV-3. Vidi se da je došlo do potpune disipacije viška tlaka vode.



Slika IV-3. Izokrone iz programa SEEP/W

Kako je stupanj konsolidacije za vrijeme t dan izrazom

$$U(t) = 1 - \frac{(1/H_0) \int_0^{H_0} u_e(z, t) dz}{u_i}$$

a integral viška tlaka vode jednak je površini omeđenoj izokronom sa slike IV-3 i vertikalne koordinatne osi, tako je iz pojedine izokrone moguće izračunati stupanj konsolidacije za vrijeme koje odgovara toj izokroni.

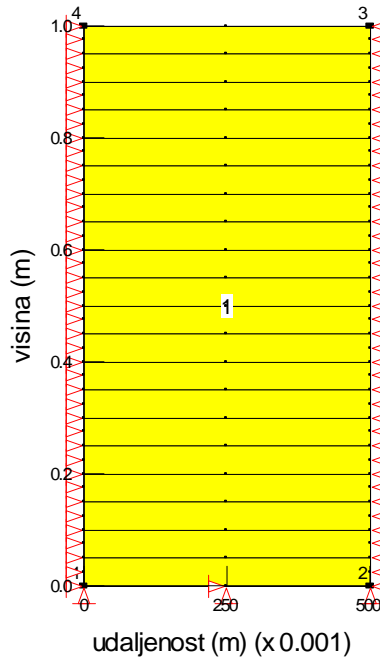
Sada nas zanimaju slijeganja tla tijekom konsolidacije, pa ćemo koristiti program SIGMA/W. Za analizu procesa konsolidacije programom SIGMA/W, ovaj program treba koristiti zajedno s programom SEEP/W, a za vrstu analize se zadaje *Coupled Consolidation* (sparena konsolidacija). Pri tom treba postaviti početne uvjete iz prvog provedenog proračuna programom SEEP/W, a program SEEP/W u ovom proračunu služi samo kao pomoćni program za definiranje tlaka vode u_0 na kraju primarne konsolidacije.

Zadajemo linearno-elastičan konstitucijski odnos za tlo. Youngov modul elastičnosti računamo iz izraza (8), a za Poissonov koeficijent zadajemo $\nu' = 0,33$.

Tada je

$$M_v = \frac{1}{m_v} = 10000 \text{ kPa}$$
$$E' = M_v \frac{(1 + \nu')(1 - 2\nu')}{1 - \nu'} = 6750 \text{ kPa}$$

Model tla za ovaj proračun prikazan je na slici IV-4.

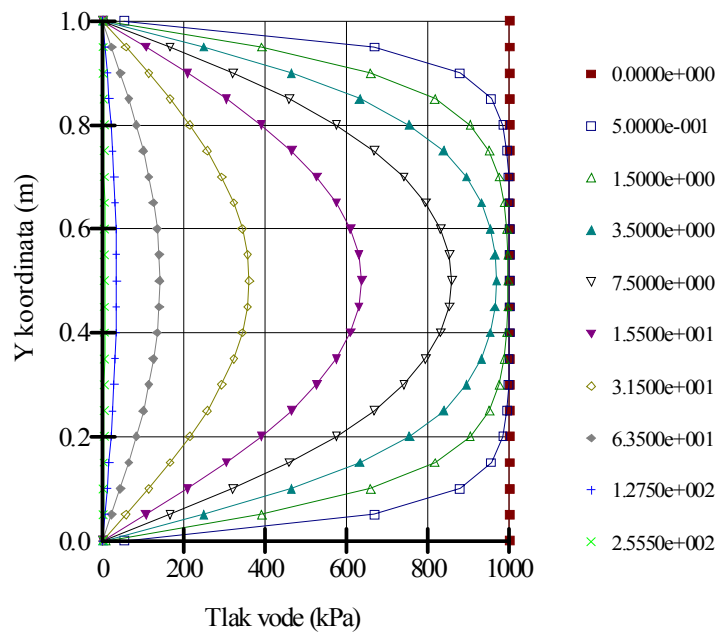


Slika IV-4. Model tla za proračun konsolidacijskih slijeganja programom SIGMA/W

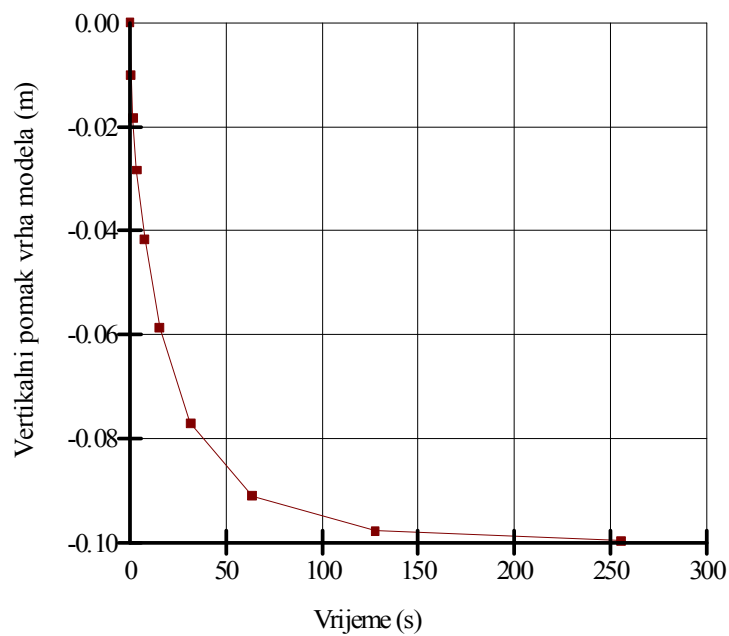
Izokrone dobivene proračunom programom SIGMA/W (slika IV-5) iste su kao one dobivene proračunom programom SEEP/W (slika IV-3).

Krivulja slijeganja vrha modela (vertikalni pomak) u vremenu prikazana je na slici IV-6. Slijeganje na kraju primarne konsolidacije iznosi 10 cm. Do istog bismo rezultata došli i pomoću izraza (13):

$$s_{EOP} = \frac{\Delta\sigma'}{M_v} H_0 = \frac{1000}{10000} 1 = 0,1 \text{ m}$$

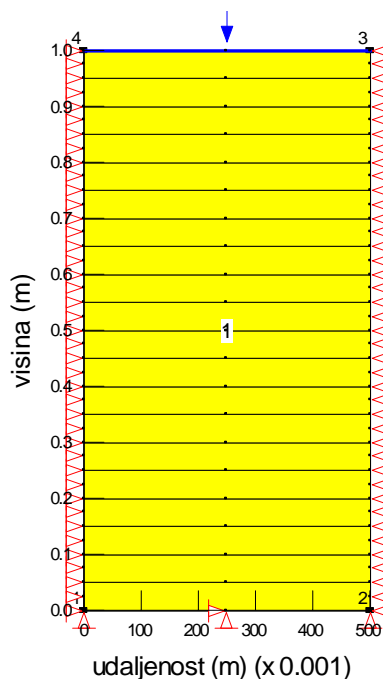


Slika IV-5. Izokrone iz programa SIGMA/W



Slika IV-6. Krivulja slijeganja vrha modela u vremenu

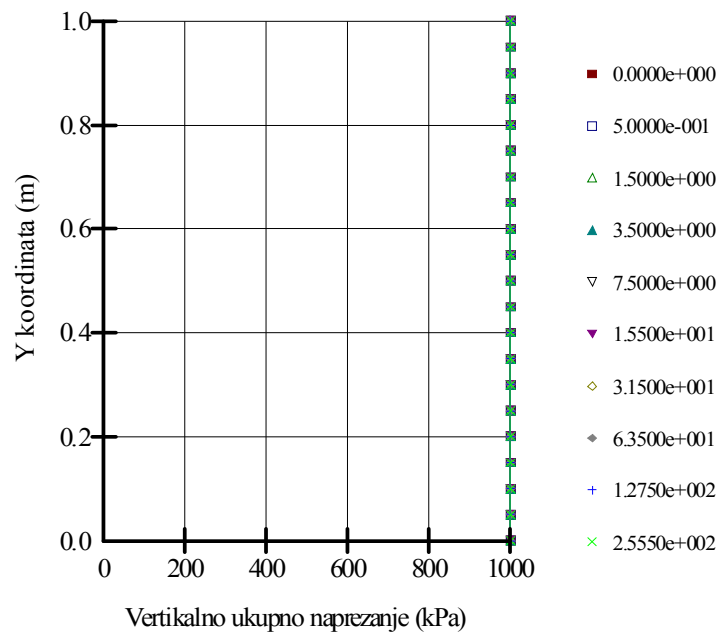
Treba naglasiti da smo u ovom proračunu programom SIGMA/W dobili samo korektne vrijednosti izokrona i slijeganja tla u vremenu. Kada bismo pogledali vertikalna ukupna napreznja po visini modela, ona su za sva vremena proračuna nula, a vertikalna su efektivna napreznja negativna (po apsolutnom iznosu jednaka odgovarajućem višku tlaka vode za dano vrijeme t). To je zato što nismo, kao početne uvjete, uzeli odgovarajuća ukupna napreznja u tlu. Zato treba, prije ovog proračuna programom SIGMA/W proračunati napreznja u tlu, koja odgovaraju vertikalnom ukupnom napreznju od 1000 kPa u cijelom modelu. Model tla za ovaj proračun prikazan je na slici IV-7. Na gornjem je rubu modela, duž stranice elementa zadano normalno opterećenje 1000 (kPa).



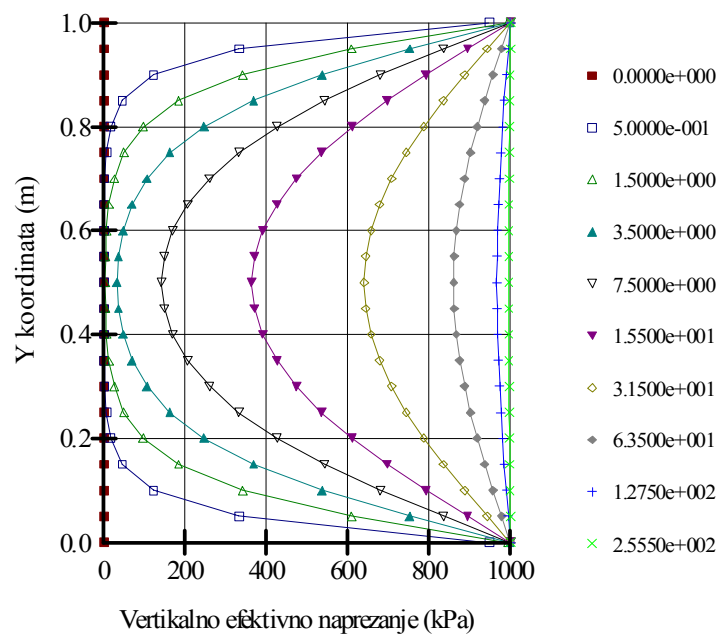
Slika IV-7. Model tla za proračun početnih uvjeta za program SIGMA/W

U rezultatima ovog proračuna može se vidjeti da su vertikalna ukupna napreznja u cijelom modelu 1000 kPa.

Sada ove rezultate zadamo kao početni uvjet za ukupna napreznja u programu SIGMA/W koji analizira proces konsolidacije tla. Izokrone i slijeganje vrha modela u vremenu bit će isti kao na slici IV-5, odnosno IV-6. Vertikalna su ukupna napreznja konstantna za sva vremena proračuna i iznose 1000 kPa (slika IV-8), a raspodjela vertikalnih efektivnih napreznja po visini modela tla za sva vremena proračuna prikazana je na slici IV-9.



Slika IV-8. Vertikalno ukupno naprezanje tijekom konsolidacije tla (1000 kPa)

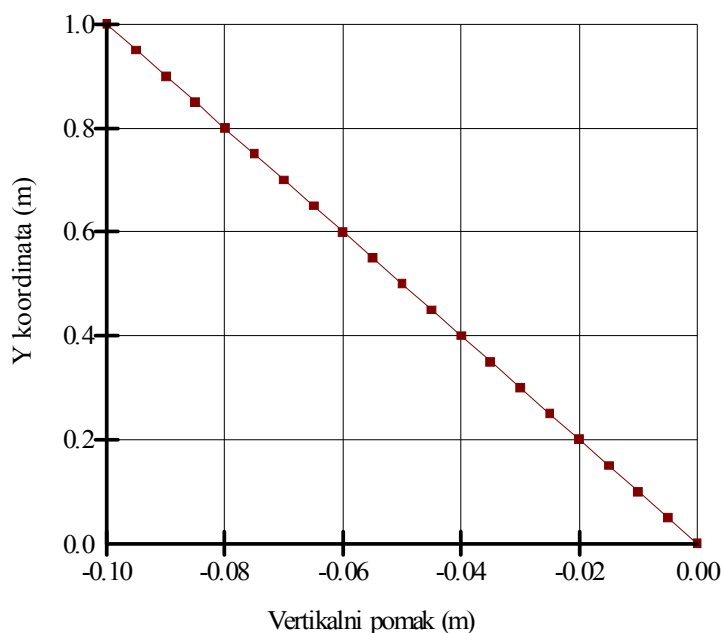


Slika IV-9. Raspodjela vertikalnih efektivnih naprezanja u tlu tijekom konsolidacije

Treba naglasiti da, kada se u programu SIGMA/W zadaju naprezanja kao početni uvjet iz nekog prethodnog proračuna, preuzimaju se samo ukupna naprezanja, a ne i efektivna. Efektivna se naprezanja uvijek računaju kao razlika ukupnih naprezanja i tlaka vode u tlu. Tako se na slici IV-8 vidi da vertikalna ukupna naprezanja iznose 1000 kPa i za $t = 0$, dok su vertikalna efektivna naprezanja nula za $t = 0$ (slika IV-9). Naime, tlak vode je, kao početni uvjet, zadan iz programa SEEP/W, gdje je generiran višak tlaka vode od 1000 kPa. Početno vertikalno ukupno naprezanje i jednaka veličina početnog tlaka vode u tlu daju vertikalno efektivno naprezanje nula za $t = 0$.

Sada ćemo, za isti model tla, opisati proračun programom SIGMA/W, u kojem nas zanima samo slijeganje na kraju primarne konsolidacije. Prvo treba generirati višak tlaka vode od 1000 kPa programom SEEP/W (slika IV-1). Zatim treba proračunati početne uvjete naprezanja programom SIGMA/W (slika IV-7). Za proračun slijeganja na kraju primarne konsolidacije koristimo samo program SIGMA/W, u kojem za vrstu analize zadajemo *Uncoupled Consolidation* (nesparena konsolidacija). Ovdje još treba zadati raspodjelu tlaka vode na kraju primarne konsolidacije u_0 . Kako je u ovom primjeru $u_0 = 0$, dovoljno je označiti *Final PWP Condition (PWP = 0 if undefined)*, jer, kao što u ovoj opciji piše, na kraju primarne konsolidacije tlak vode u tlu bit će nula. Još treba zadati početne uvjete naprezanja i tlaka vode u tlu iz odgovarajućih prethodnih proračuna.

Vertikalni pomak po visini modela na kraju primarne konsolidacije prikazan je na slici IV-10. Slijeganje vrha modela iznosi 10 cm, isto kao u proračunu s konsolidacijom tla za zadana vremena. Opet su vertikalna ukupna i vertikalna efektivna naprezanja jednaka i iznose 1000 kPa, a tlak vode u tlu je nula.



Slika IV-10. Vertikalni pomak tla po visini modela na kraju primarne konsolidacije

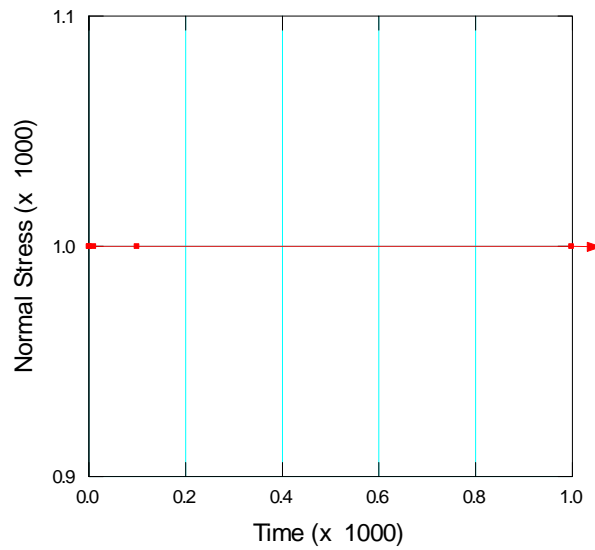
Druga je mogućnost da se proračun konsolidacije tla programom SIGMA/W, za isti model tla, provede bez zadavanja početnih uvjeta viška tlaka vode (1000 kPa) programom SEEP/W i bez početnih uvjeta ukupnih naprezanja od vanjskog opterećenja (1000 kPa) programom SIGMA/W. To znači da u jedinom proračunu programom SIGMA/W treba zadati sve što je potrebno za proračun procesa konsolidacije nakon opterećenja tla.

Nakon svakog opterećenja potpuno saturiranoga tla, program SIGMA/W generira odgovarajući višak tlaka vode u tlu. Ako ne zadajemo početne uvjete tlaka vode iz programa SEEP/W, prvo treba zadati razinu vode na površini modela za potpuno saturirano tlo, a tlo još treba opteretiti s $\Delta\sigma = 1000$ kPa. Ako takav rubni uvjet zadamo na stranici rubnog elementa površine tla, a zadajemo više vremena (koraka proračuna) za proračun konsolidacije, program SIGMA/W će u svakom koraku proračuna, na tlo primijeniti zadano opterećenje. Tako bismo, za 9 koraka proračuna (zadanih vremena konsolidacije) dobili ukupno opterećenje na tlo 9000 kPa. Rješenje je da se zada funkcija rubnog opterećenja u vremenu, koja će osigurati da se opterećenje na tlo primijeni jednokratno, na početku proračuna. Ova se funkcija zadaje pod *KeyIn – Stress Functions – Stress Boundary*, zatim se pod *Type* odabere *Edge Normal Stress vs. Time* i zada se konstantna vrijednost normalnog opterećenja 1000 kPa za vremena, primjerice, 0 s, 1 s, 10 s, 100 s, 1000 s (slika IV-11).

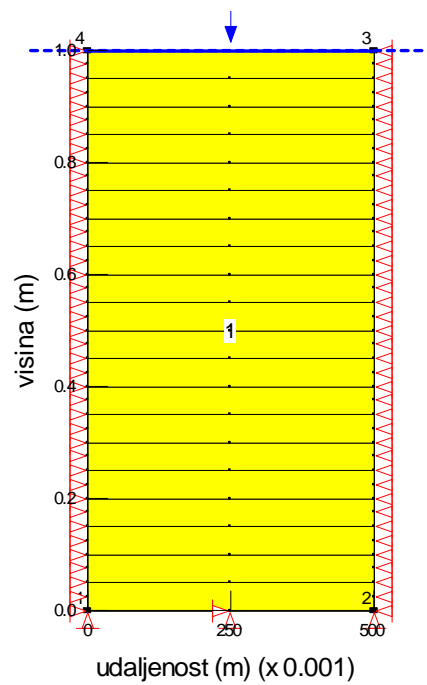
Sada se zadana funkcija za rubni uvjet pridruži gornjem rubu modela (*Draw Edge Boundary Conditions*), pod *Type* se odabere *Normal/Tan. Stress* i kako je zadana funkcija za ovakav rubni uvjet, uz *Normal* se pojavi mogućnost pridruživanja funkcije broj 1 (*Fn #*) odgovarajućim rubnim stranicama modela.

Model tla za ovaj je proračun prikazan na slici IV-12. U ovom je proračunu vrsta analize također sparena konsolidacija (*Coupled Consolidation*), bez ikakvih početnih uvjeta, ali uz korištenje programa SEEP/W za zadavanje tlaka vode u tlu u_0 nakon završetka primarne konsolidacije. Ovdje treba voditi računa o tome da će sa zadanom razinom vode na površini tla, program SIGMA/W izračunati hidrostatski tlak vode u tlu $u_0 = \gamma_w z$, pa će tlak vode nakon završetka primarne konsolidacije također biti hidrostatski (disipira samo višak tlaka vode). To znači da u programu SEEP/W, gdje se definira tlak vode u tlu nakon završetka primarne konsolidacije, treba zadati hidrostatsko stanje tlaka vode. Tako na gornjem rubu modela ostaje piezometarska visina $P = 0$, a na donjem je rubu modela piezometarska visina $P = 1$ m.

Rezultati ovog proračuna dat će iste rezultate kao i prethodni proračun sa zadanim početnim uvjetima viška tlaka vode i ukupnih naprezanja.

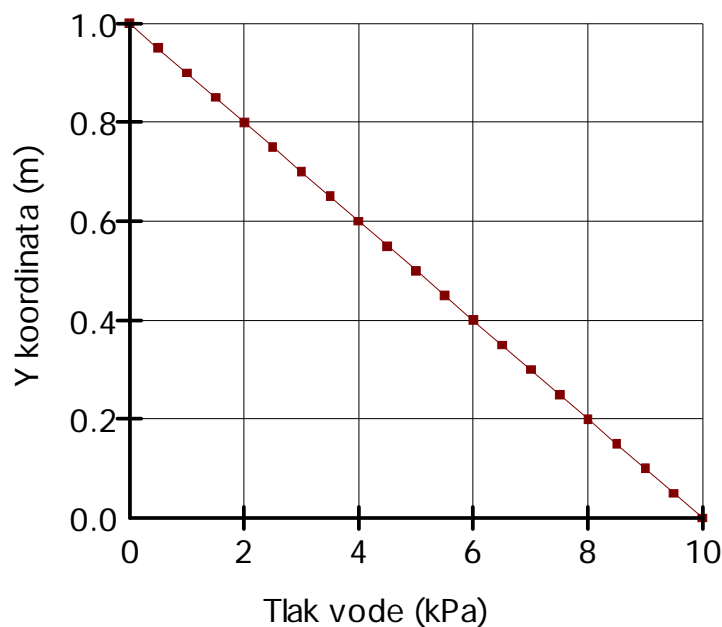


Slika IV-11. Funkcija za rubni uvjet: normalno naprezanje (kPa) na površinu tla u vremenu (s)



Slika IV-12. Model tla za proračun konsolidacije tla programom SIGMA/W bez zadavanja početnih uvjeta

Nesparenu konsolidaciju (*Uncoupled Consolidation*) samo za proračun slijeganja nakon završetka primarne konsolidacije programom SIGMA/W, također možemo provesti bez zadavanja početnih uvjeta viška tlaka vode i ukupnih naprezanja u tlu. Koristimo isti model tla kao za proračun procesa konsolidacije tla bez zadavanja početnih uvjeta (slika IV-12), sa zadanom funkcijom konstantnog normalnog opterećenja u vremenu na gornjem rubu modela. Ovdje, međutim, za tlak vode u_0 nakon završetka primarne konsolidacije, moramo zadati odgovarajući proračun stacionarnog strujanja vode programom SEEP/W za hidrostatski tlak vode u_0 . Rubni uvjeti u ovom proračunu programom SEEP/W isti su kao u pomoćnom SEEP/W-u za prethodni proračun procesa konsolidacije, dakle, na gornjem je rubu modela $P = 0$, a na donjem je rubu modela $P = 1$ m. Rezultati ovog proračuna prikazani su na slici IV-13.



Slika IV-13. Hidrostatski tlak vode u tlu proračunat programom SEEP/W

Ovako zadani podaci za program SIGMA/W dat će iste rezultate kao i prethodni proračun s nesparenom konsolidacijom, dakle slijeganje tla nakon primarne konsolidacije od 10 cm.