



مکانیک خاک

فصل ۹. نشست و تحکیم خاک

دکتر علیرضا غنی زاده

دانشکده مهندسی عمران-دانشگاه صنعتی سیرجان

نشست خاک

- ✓ با تأثیر سربار، تنش‌های فشاری در لایه‌های خاک به وجود آمده و باعث فشردگی آن می‌شود.
- ✓ فشردگی خاک ناشی از تغییر شکل فشاری و جابجایی ذرات خاک، رانده شدن هوا و آب از حفرات خاک و عوامل دیگر است.
- ✓ در یک خاک بخصوص، یک و یا تعدادی از عوامل فوق ممکن است مشارکت داشته باشند.
- ✓ از آنجایی که فشردگی خاک باعث نشست سازه واقع بر روی آن می‌شود، از نقطه نظر مهندسی به این پدیده، نشست آ خاک می‌گویند.

انواع نشست خاک

در حالت کلی نشست های خاک به سه گروه زیر تقسیم می شوند:

- I. **نشست آنی یا الاستیک** که ناشی از تغییر شکل الاستیک خاک خشک و یا خاک های مرطوب و اشباع بدون هرگونه تغییری در میزان آب است. محاسبات نشست آنی معمولاً بر پایه روابط به دست آمده از تئوری الاستیسیته قرار دارد.
- II. **نشست تحکیم اولیه** که ناشی از تغییر حجم خاک اشباع به علت رانده شدن آب های موجود در حفرات است.
- III. **نشست تحکیم ثانویه** که در خاک های چسبنده اشباع مشاهده می شود و ناشی از تغییر آرایش مجدد ذرات خاک به علت تغییر شکل هاس پلاستیک می باشد.

$$S_T = S_c + S_s + S_e$$

نشست الاستیک

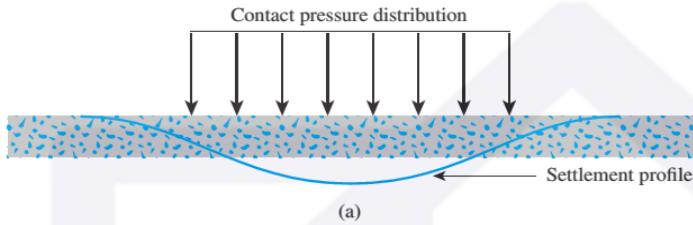
نشست الاستیک بلافاصله پس از اعمال بارگذاری و بدون تغییر در رطوبت خاک اتفاق می افتد. معادلات به دست آمده در فصل گذشته برای توزیع تنش در توده خاک با توجه به فرضیات زیر به دست آمدند:

- I. بار بر روی سطح زمین اعمال می شود.
- II. خاک به صورت یکنواخت، ایزوتروپیک، الاستیک و عمق آن تا بینهایت ادامه دارد.
- III. سطح بارگذاری انعطاف پذیر است (پی انعطاف پذیر).

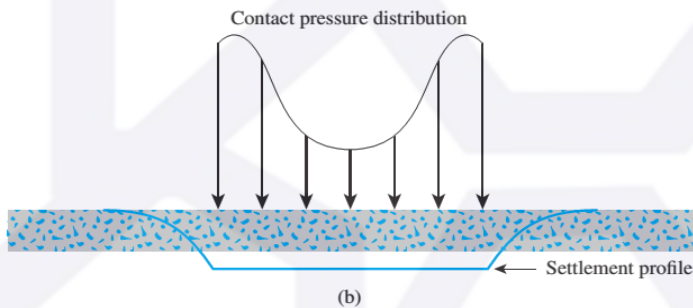
Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

توزیع تنش در زیر پی و تغییر شکل سطح خاک برای رس



پی انعطاف پذیر



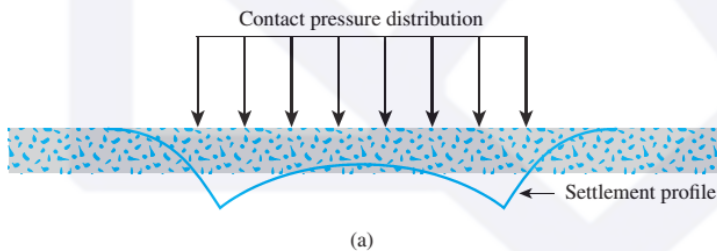
پی صلب

دانشگاه صنعتی سیرجان

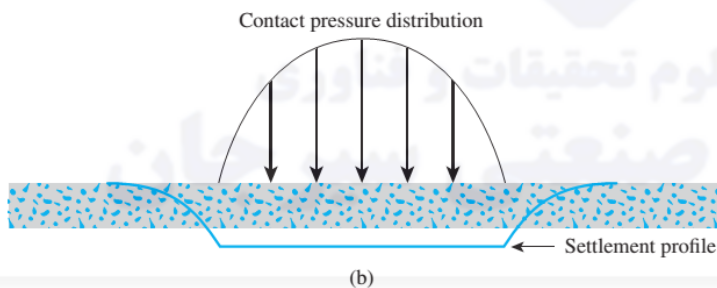
مکانیک خاک

5

توزیع تنش در زیر پی و تغییر شکل سطح خاک برای ماسه



پی انعطاف پذیر



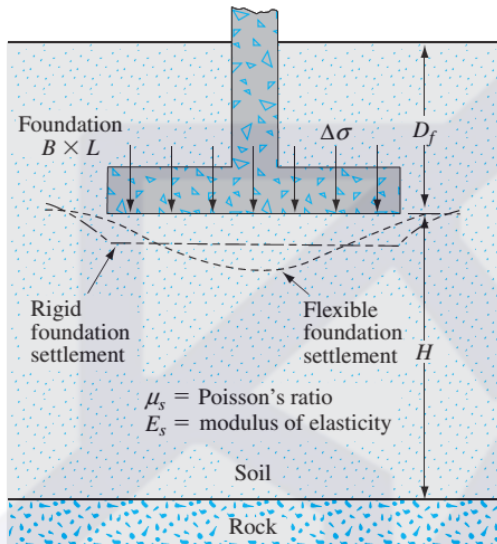
پی صلب

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

6

محاسبه نشست الاستیک یک پی انعطاف پذیر



$$S_e = \Delta\sigma(\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f$$

$\Delta\sigma$ = net applied pressure on the foundation

μ_s = Poisson's ratio of soil

E_s = average modulus of elasticity of the soil under the foundation measured from $z = 0$ to about $z = 4B$

B' = $B/2$ for center of foundation
= B for corner of foundation

I_s = shape factor (Steinbrenner, 1934)

محاسبه نشست الاستیک یک پی انعطاف پذیر

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2\mu_s}{1 - \mu_s} F_2$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} (A_0 + A_1)$$

$$F_2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})}$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1}) \sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$A_2 = \frac{m'}{n' \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$I_f = \text{depth factor (Fox, 1948)} = f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, \text{ and } \frac{L}{B}\right)$$

ضریب α به محلی از پی که هدف محاسبه نشست در آن نقطه است، بستگی دارد.

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

محاسبه نشست الاستیک یک پی انعطاف پذیر

نشست در مرکز پی

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 4 \\ m' &= \frac{L}{B} \\ n' &= \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} \end{aligned} \right\}$$

نشست در گوشه پی

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 \\ m' &= \frac{L}{B} \\ n' &= \frac{H}{B} \end{aligned} \right\}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

9

تغییرات ضریب عمق

L/B	D_f/B	I_f		
		$\mu_s = 0.3$	$\mu_s = 0.4$	$\mu_s = 0.5$
1	0.5	0.77	0.82	0.85
	0.75	0.69	0.74	0.77
	1	0.65	0.69	0.72
2	0.5	0.82	0.86	0.89
	0.75	0.75	0.79	0.83
	1	0.71	0.75	0.79
5	0.5	0.87	0.91	0.93
	0.75	0.81	0.86	0.89
	1	0.78	0.82	0.85

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

10

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مقادیر مدول الاستیک و ضریب پواسن برای انواع خاک‌ها

Soil type	E_s	
	kN/m ²	lb/in. ²
Soft clay	1,800–3,500	250–500
Hard clay	6,000–14,000	850–2,000
Loose sand	10,000–28,000	1,500–4,000
Dense sand	35,000–70,000	5,000–10,000

Type of soil	Poisson's ratio, μ_s
Loose sand	0.2–0.4
Medium sand	0.25–0.4
Dense sand	0.3–0.45
Silty sand	0.2–0.4
Soft clay	0.15–0.25
Medium clay	0.2–0.5

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

11

محاسبه مدول الاستیسیته متوسط خاک

$$E_s = \frac{\sum E_{s(i)} \Delta z}{\bar{z}}$$

$E_{s(i)}$ = soil modulus of elasticity within a depth Δz

\bar{z} = H or $5B$, whichever is smaller

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

12

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

نشست الاستیک ناشی از پی صلب

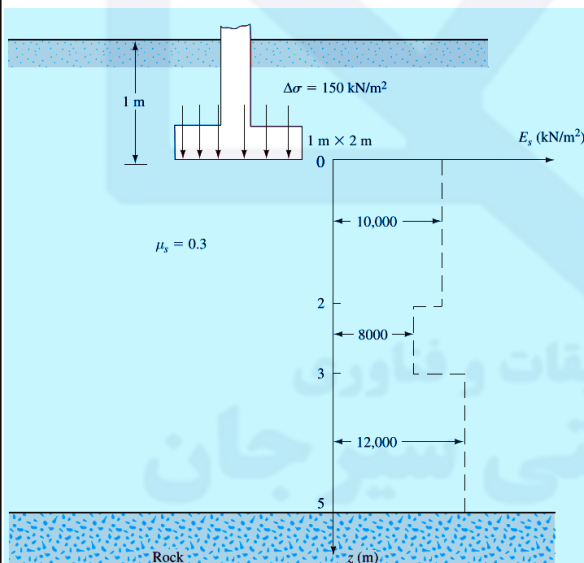
$$S_{e(\text{rigid})} \approx 0.93 S_{e(\text{flexible, center})}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

13

مثال



$$B = 1\text{ m and } L = 2\text{ m}$$

$$\bar{z} = 5\text{ m} = 5B$$

$$E_s = \frac{\sum E_{s(i)} \Delta z}{\bar{z}}$$

$$= \frac{(10,000)(2) + (8,000)(1) + (12,000)(2)}{5} = 10,400\text{ kN/m}^2$$

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B} = \frac{2}{1} = 2$$

$$n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{5}{\left(\frac{1}{2}\right)} = 10$$

$$\frac{D_f}{B} = \frac{1}{1} = 1, \frac{L}{B} = 2, \mu_s = 0.3$$

$$I_f = 0.71$$

$$F_1 = 0.641 \text{ and } F_2 = 0.031$$

$$I_s = F_1 + \frac{2 - \mu_s}{1 - \mu_s} F_2$$

$$= 0.641 + \frac{2 - 0.3}{1 - 0.3} (0.031) = 0.716$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

14

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

ادامه مثال

$$S_{e(\text{flexible})} = \Delta\sigma(\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f$$

$$= (150) \left(4 \times \frac{1}{2} \right) \left(\frac{1 - 0.3^2}{10,400} \right) (0.716)(0.71) = 0.0133 \text{ m} = 13.3 \text{ mm}$$

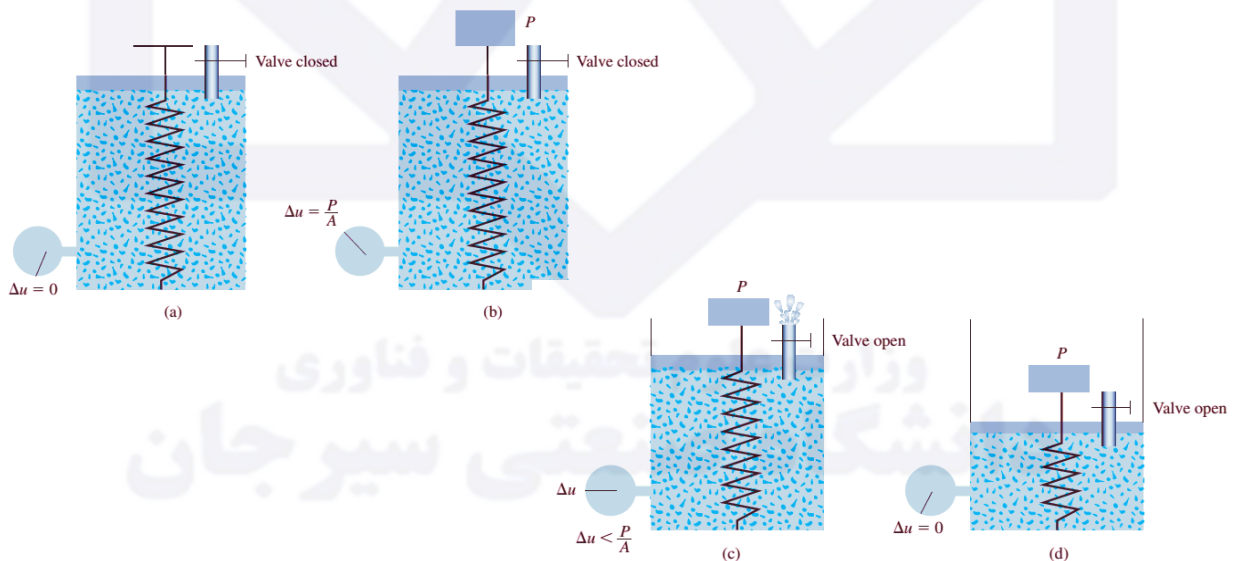
$$S_{e(\text{rigid})} = (0.93)(13.3) = 12.4 \text{ mm}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

15

مفاهیم تحکیم

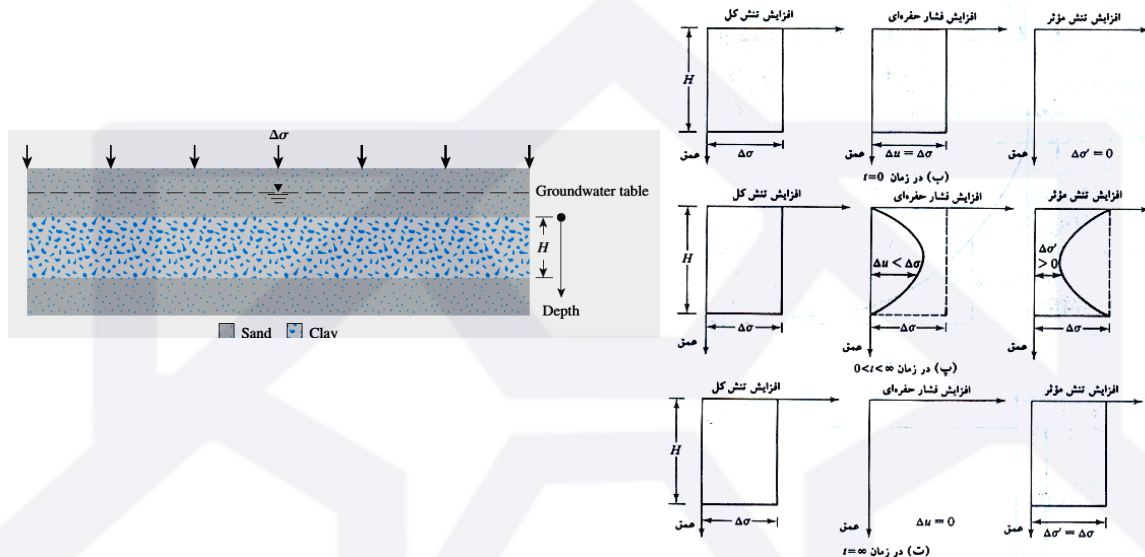


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

16

مفاهیم تحکیم



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

17

مفاهیم تحکیم

- ✓ وقتی که یک لایه خاک رس اشباع، تحت تأثیر افزایش تنش قرار گیرد، ابتدا نشست آبی رخ می‌دهد. اما از آنجایی که ضریب نفوذپذیری رس به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای کوچک‌تر از ضریب نفوذپذیری ماسه است، زهکشی آب حفره‌ای سریعاً انجام نشده و زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای ناشی از بارگذاری به‌طور تدریجی و در یک زمان طولانی رخ می‌دهد.
- ✓ بنابراین کاهش حجم خاک که از این به بعد آن را تحکیم می‌نامیم به مدت طولانی بعد از بارگذاری و نشست آبی ادامه خواهد داشت.
- ✓ در خاکهای رسی نرم نشست تحکیم چندین برابر نشست آبی است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

18

آزمایش تحکیم (Odometer test)



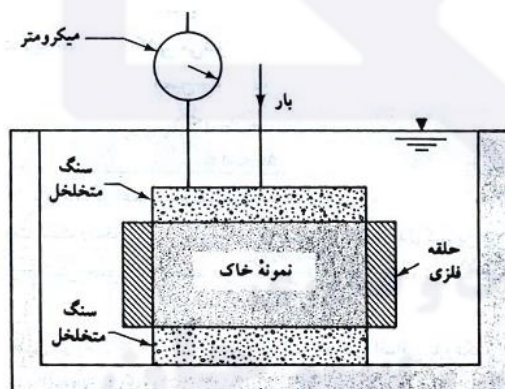
- ✓ نمونه خاک در داخل یک حلقه فلزی قرار داده شده و دو درپوش سنگی متخلخل یکی در بالا و دیگری در پایین آن قرار داده می‌شود.
- ✓ قطر نمونه معمولاً $63/5$ میلی‌متر و ضخامت آن $25/4$ میلی‌متر است.
- ✓ در حین آزمایش نمونه در داخل آب نگهداری می‌شود. پس از پر کردن محفظه با آب ۲۴ ساعت صبر می‌کنیم تا نمونه اشباع شود.
- ✓ بارگذاری نمونه به وسیله یک اهرم اعمال شده و میزان فشردگی توسط یک میکرومتر عقربه‌ای اندازه‌گیری می‌شود. هر بارگذاری برای مدت ۲۴ ساعت حفظ می‌شود. بارگذاری با اعمال بار $0/25$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مکعب آغاز می‌شود.
- ✓ بعد از آن میزان بار معمولاً دو برابر می‌گردد. با دو برابر کردن بار، میزان فشردگی و اندازه‌گیری فشردگی ادامه می‌یابد.
- ✓ در انتهای آزمایش، وزن خشک نمونه آزمایشی تعیین می‌گردد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

19

تنش قائم بر روی یک صفحه مشخص

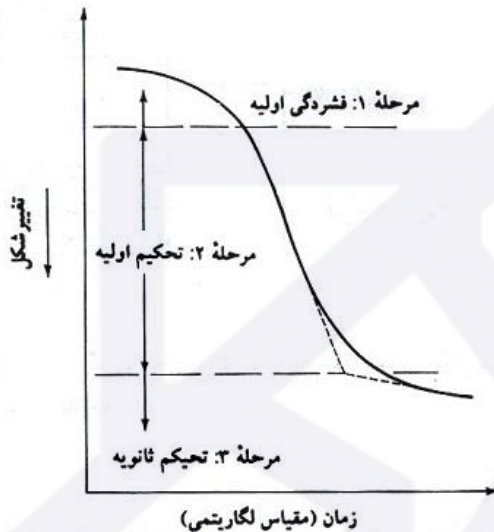


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

20

نمودار تغییر شکل – زمان در حین تحکیم با افزایش بار معلوم

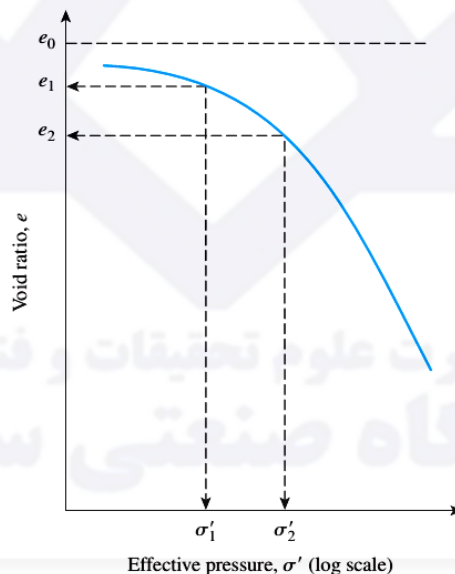


مرحله ۱: فشردگی اولیه که اکثراً به علت پیش بارگذاری است.

مرحله ۲: تحکیم اولیه که طی آن به علت زهکشی آب حفره‌ای، فشار اضافی آب حفره‌ای به تدریج به تنش مؤثر تبدیل است.

مرحله ۳: تحکیم ثانویه که بعد از اتمام زایل شدن فشار اضافی آب حفره‌ای رخ می‌دهد و علت آن به وجود آمدن تغییرشکل‌های پلاستیک در اسکلت خاک است.

نمودار نسبت تخلخل – فشار



Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

نمودار نسبت تخلخل – فشار

گام ۱- ارتفاع قسمت جامد نمونه، H_s ، را محاسبه نمایید:

$$H_s = \frac{W_s}{AG_s\gamma_w} = \frac{M_s}{AG_s\rho_w}$$

W_s = dry weight of the specimen

M_s = dry mass of the specimen

A = area of the specimen

G_s = specific gravity of soil solids

γ_w = unit weight of water

ρ_w = density of water

گام ۲- ارتفاع اولیه حفرات، H_v ، را محاسبه کنید:

$$H_v = H - H_s$$

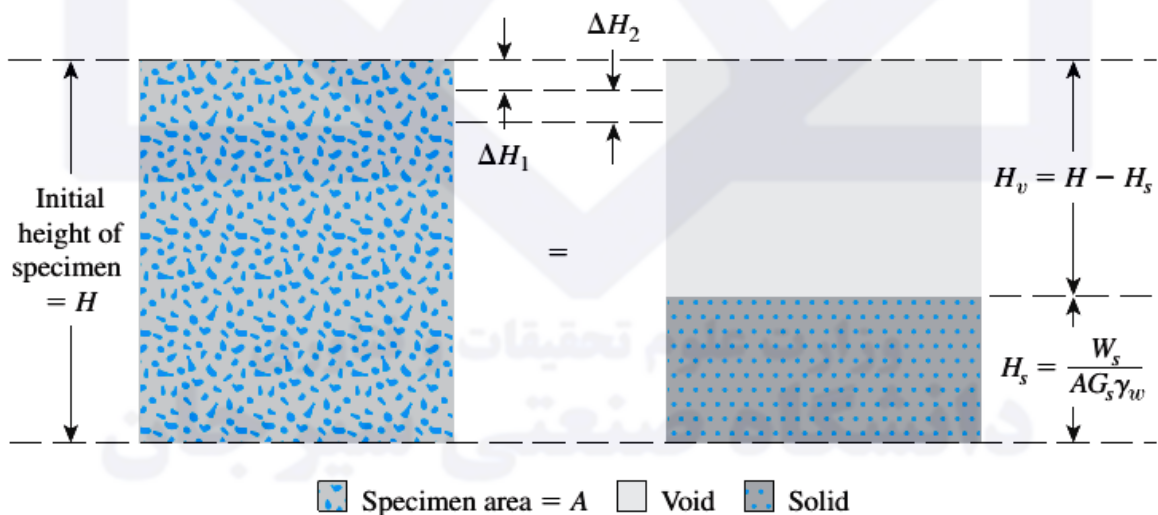
H = initial height of the specimen.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

23

نمودار نسبت تخلخل – فشار



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

24

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

نمودار نسبت تخلخل – فشار

گام ۳- نسبت تخلخل اولیه نمونه، e_0 ، را محاسبه نمایید:

$$e_0 = \frac{V_v}{V_s} = \frac{H_v}{H_s} \frac{A}{A} = \frac{H_v}{H_s}$$

گام ۴- برای اولین بارگذاری P_1 که باعث تغییر شکل ΔH_1 می‌شود تغییرات نسبت تخلخل، Δe_1 ، را محاسبه نمایید:

$$\Delta e_1 = \frac{\Delta H_1}{H_s}$$

گام ۵- پس از تحکیم به علت نمو فشار P_1 ، نسبت تخلخل جدید e_1 ، محاسبه نمایید:

$$e_1 = e_0 - \Delta e_1$$

برای بار بعدی P_2 که باعث تغییر اضافی شکل ΔH_2 می‌شود نسبت تخلخل، e_2 ، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

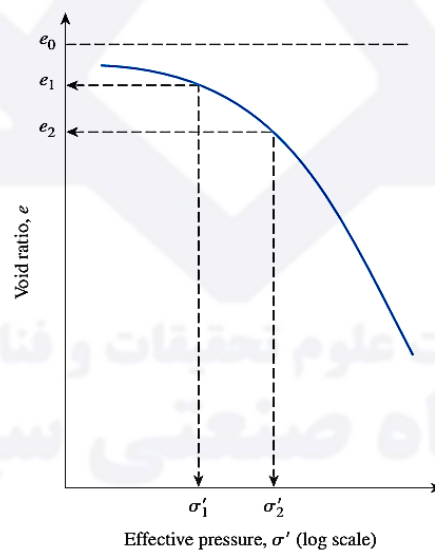
$$e_2 = e_1 - \frac{\Delta H_2}{H_s}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

25

نمودار نسبت تخلخل – فشار



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

26

رس عادی تحکیم یافته و رس پیش تحکیم یافته

- ✓ از دیدگاه تاریخچه زمین‌شناسی نمونه به دست آمده از عمق تحت تأثیر فشار سربار مؤثری قرار داشته و تحت آن تحکیم یافته است. حداکثر فشار سربار مؤثر ممکن است مساوی و یا بزرگ‌تر از فشار سربار موجود در هنگام نمونه‌گیری باشد.
- ✓ در هر صورت پس از نمونه‌گیری، نمونه از فشار سربار موجود نیز آزاد شده و در نتیجه مقداری منبسط می‌شود.
- ✓ وقتی که این نمونه تحت آزمایش تحکیم قرار گیرد، تا جایی که فشار وارده مساوی فشار سربار مؤثر صحرائی در گذشته باشد، مقدار فشردگی (و یا تغییر در نسبت تخلخل) کوچک خواهد بود و در واقع فقط انبساط ایجادشده به علت آزاد شدن فشار سربار در هنگام نمونه‌گیری جبران می‌شود.
- ✓ وقتی که فشار کل مؤثر بر نمونه در هنگام آزمایش از فشار سربار مؤثر در گذشته باشد، تغییرات تخلخل بزرگ‌تر خطی با شیب تندتر خواهد شد.

رس عادی تحکیم یافته و رس پیش تحکیم یافته



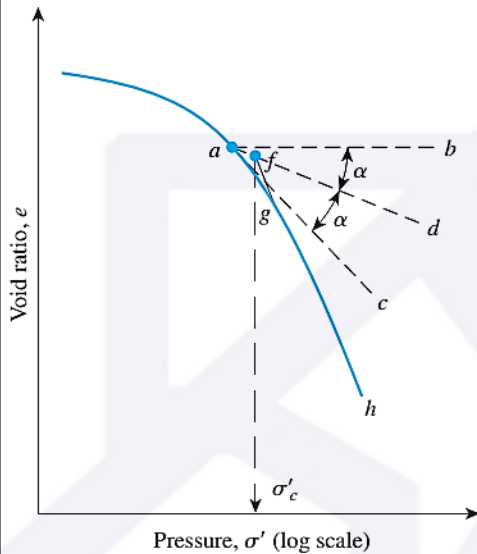
❖ رس‌های عادی تحکیم یافته که برای آن‌ها فشار سربار موجود حداکثر فشار سربار مؤثری است که نمونه در گذشته تحت تأثیر آن بوده است.

❖ رس‌های پیش تحکیم یافته که فشار سربار موجود بر روی آن‌ها، کمتر از فشار سربار حداکثری است که در گذشته نمونه آن را تجربه کرده است. حداکثر فشار سربار مؤثر در گذشته فشار پیش تحکیم نامیده می‌شود.

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

تنش در صفحات اصلی



- ✓ با بررسی چشمی در روی نمودار e در مقابل σ Log نقطه‌ای مثل a تعیین نمایید که دارای حداقل شعاع انحنا باشد.
- ✓ خط افقی ab را رسم کنید.
- ✓ مماس ac را در نقطه a بر منحنی رسم کنید.
- ✓ خط cd یعنی نیمساز زاویه bac را رسم کنید.
- ✓ قسمت خطی gh نمودار σ Log را به سمت عقب ادامه دهید تا ad را در f قطع کند. طول نقطه f فشار پیش تحکیم یافته است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

29

نسبت پیش تحکیمی

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'}$$

σ'_c = preconsolidation pressure of a specimen

σ' = present effective vertical pressure

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

30

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روابطی برای تعیین فشار پیش تحکیم

- Nagaraj and Murty (1985):

$$\log \sigma'_c = \frac{1.112 - \left(\frac{e_o}{e_L} \right) 0.0463 \sigma'_o}{0.188}$$

where e_o = *in situ* void ratio

$$e_L = \text{void ratio at liquid limit} = \left[\frac{LL(\%)}{100} \right] G_s$$

G_s = specific gravity of soil solids

σ'_o = *in situ* effective overburden pressure

(Note: σ'_c and σ'_o are in kN/m^2)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

31

روابطی برای تعیین فشار پیش تحکیم

- Stas and Kulhawy (1984):

$$\frac{\sigma'_c}{p_a} = 10^{[1.11 - 1.62(LI)]}$$

where p_a = atmospheric pressure ($\approx 100 \text{ kN/m}^2$)

LI = liquidity index

- Hansbo (1957)

$$\sigma'_c = \alpha_{(VST)} C_{u(VST)}$$

where $\alpha_{(VST)}$ = an empirical coefficient = $\frac{222}{LL(\%)}$

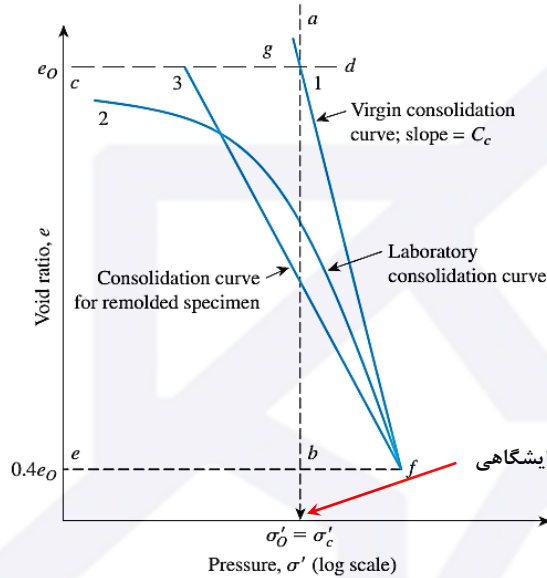
$C_{u(VST)}$ = undrained shear strength obtained from vane shear test

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

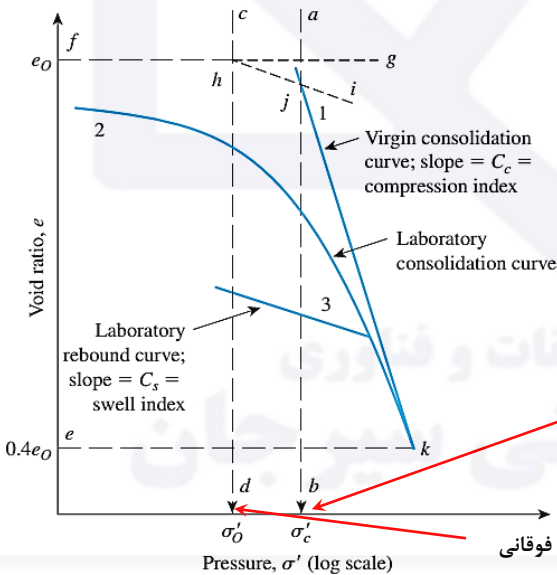
32

تأثیر دست خوردگی بر منحنی تحکیم رس عادی تحکیم یافته با حساسیت کم تا متوسط



منحنی‌های ۱ و ۲ و ۳ یکدیگر را تقریباً در نسبت تخلخل $e=0.4e_0$ قطع می‌کنند (ترزاقی و پک ۱۹۶۷).
 e_0 تخلخل کارگاهی خاک

تأثیر دست خوردگی بر منحنی تحکیم رس پیش تحکیم یافته با حساسیت کم تا متوسط



اشمرتن (۱۹۵۳) چنین نتیجه‌گیری کرد که شیب خط hj ، که مسیر تحکیم مجدد صحرایی است تقریباً مشابه شیب منحنی باربرداری است.

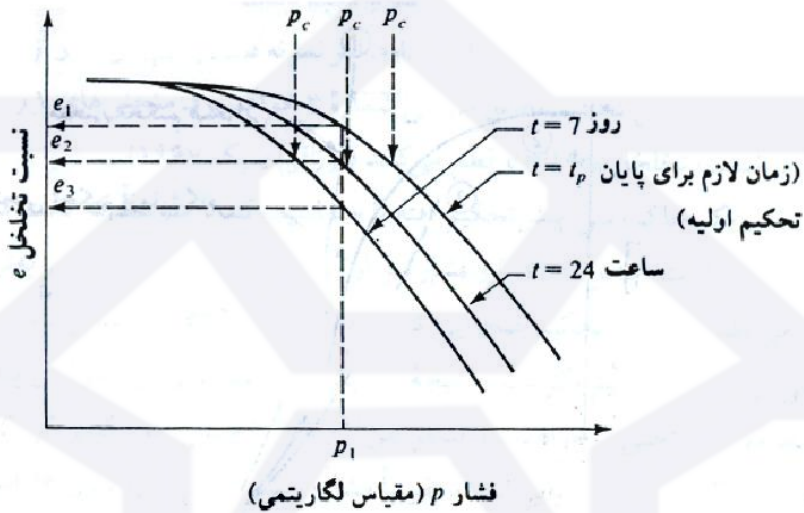
فشار پیش تحکیمی بر اساس نمودار تحکیم آزمایشگاهی

تنش مؤثر در محل ناشی از وزن لایه‌های فوقانی

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

تأثیر دوام بار بر روی نمودار e -log p

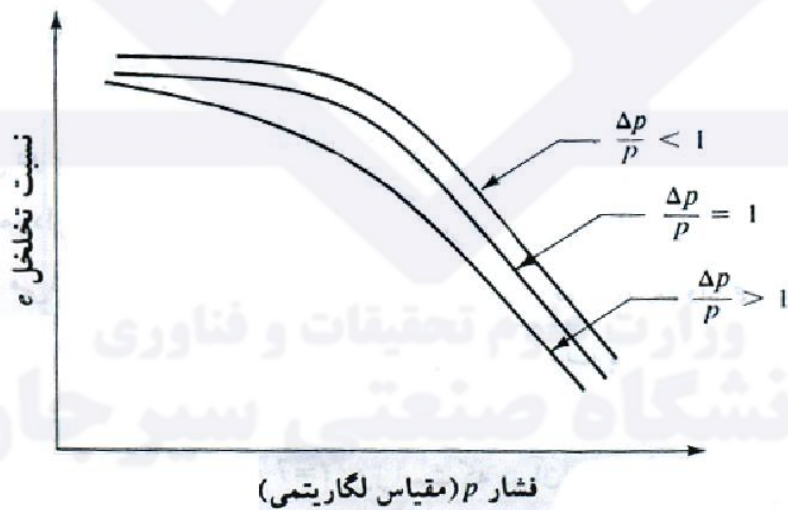


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

35

تأثیر نسبت افزایش بار بر روی نمودار e -log p



دانشگاه صنعتی سیرجان

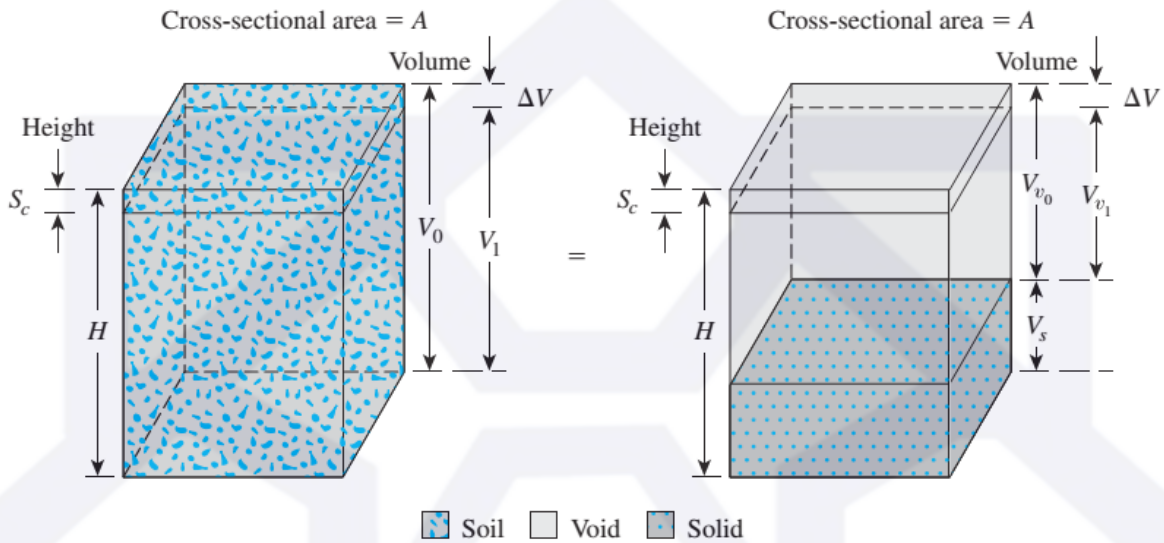
مکانیک خاک

36

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

محاسبه نشست حاصل از تحکیم اولیه

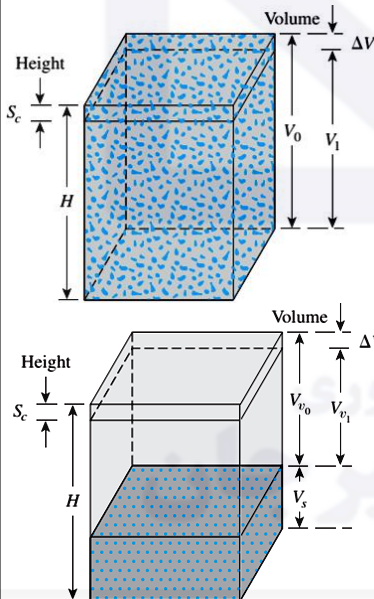


دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

37

تنش در صفحات اصلی



$$\Delta V = V_0 - V_1 = HA - (H - S_c)A = S_c A$$

$$\Delta V = S_c A = V_{v_0} - V_{v_1} = \Delta V_v$$

$$\Delta V_v = \Delta e V_s$$

$$V_s = \frac{V_0}{1 + e_0} = \frac{AH}{1 + e_0}$$

$$\Delta V = S_c A = \Delta e V_s = \frac{AH}{1 + e_0} \Delta e$$

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

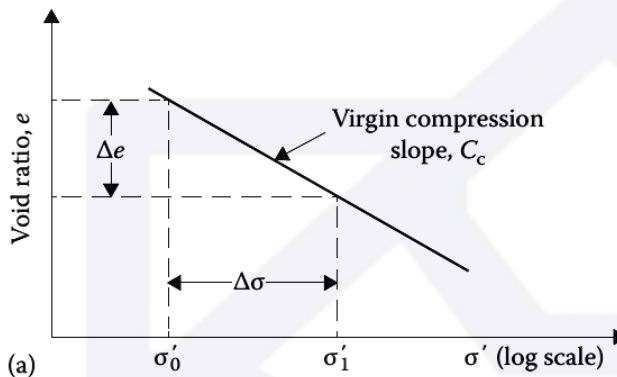
مکانیک خاک

38

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

محاسبه نشست در حالتی که تنش کمتر از فشار پیش تحکیمی است



(a)

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' \leq \sigma'_c$$

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

$$\Delta e = C_c [\log(\sigma'_0 + \Delta\sigma') - \log \sigma'_0]$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0}\right)$$

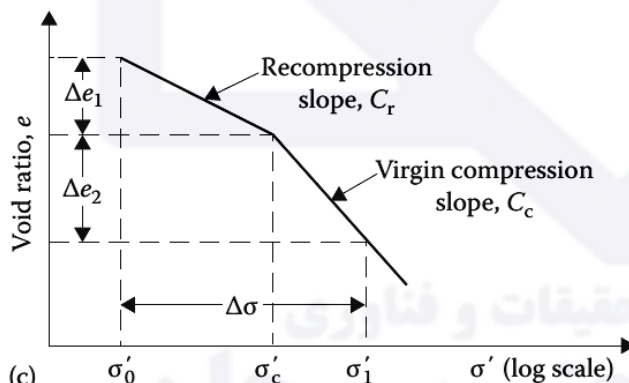
ضریب C_s نشانه تورم نامیده می شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

39

محاسبه نشست در حالتی که تنش بیش از فشار پیش تحکیمی است



(c)

$$\sigma'_0 + \Delta\sigma' > \sigma'_c$$

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_0} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_c} \right)$$

ضریب C_c نشانه فشردگی نامیده می شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

40

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روابط تجربی برای تعیین نشانه فشردگی C_c

Skempton (1944)

$$C_c = 0.009(LL - 10)$$

Rendon-Herrero (1983)

$$C_c = 0.141G_s^{1.2} \left(\frac{1 + e_o}{G_s} \right)^{2.38}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

41

روابط تجربی برای تعیین نشانه فشردگی C_c

Nagaraj and Murty (1985)

$$C_c = 0.2343 \left[\frac{LL(\%)}{100} \right] G_s$$

Wroth and Wood (1978)

$$C_c \approx 0.5G_s \frac{[PI(\%)]}{100}$$

Park and Koumoto (2004)

$$C_c = \frac{n_o}{371.747 - 4.275n_o}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

42

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روابط تجربی برای تعیین نشانه تورم C_s

$$C_s \approx \frac{1}{5} \text{ to } \frac{1}{10} C_c$$

Nagaraj and Murty (1985)

$$C_s = 0.0463 \left[\frac{LL(\%)}{100} \right] G_s$$

Kulhawy and Mayne (1990)

$$C_c \approx \frac{PI}{370}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

43

روابط تجربی برای تعیین نشانه تورم C_s

Soil	Liquid limit	Plastic limit	Compression index, C_c	Swell index, C_s
Boston blue clay	41	20	0.35	0.07
Chicago clay	60	20	0.4	0.07
Ft. Gordon clay, Georgia	51	26	0.12	—
New Orleans clay	80	25	0.3	0.05
Montana clay	60	28	0.21	0.05

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

44

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۱

Following are the results of a laboratory consolidation test on a soil specimen obtained from the field: Dry mass of specimen = 128 g, height of specimen at the beginning of the test = 2.54 cm, $G_s = 2.75$, and area of the specimen = 30.68 cm².

Effective pressure, σ' (ton/ft ²)	Final height of specimen at the end of consolidation (cm)
0	2.540
0.5	2.488
1	2.465
2	2.431
4	2.389
8	2.324
16	2.225
32	2.115

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

45

مثال ۱

$$H_s = \frac{W_s}{AG_s\gamma_w} = \frac{M_s}{AG_s\rho_w} = \frac{128 \text{ g}}{(30.68 \text{ cm}^2)(2.75)(1 \text{ g/cm}^3)} = 1.52 \text{ cm}$$

Effective pressure, σ' (ton/ft ²)	Height at the end of consolidation, H (cm)	$H_v = H - H_s$ (cm)	$e = H_v/H_s$
0	2.540	1.02	0.671
0.5	2.488	0.968	0.637
1	2.465	0.945	0.622
2	2.431	0.911	0.599
4	2.389	0.869	0.572
8	2.324	0.804	0.529
16	2.225	0.705	0.464
32	2.115	0.595	0.390

دانشگاه صنعتی سیرجان

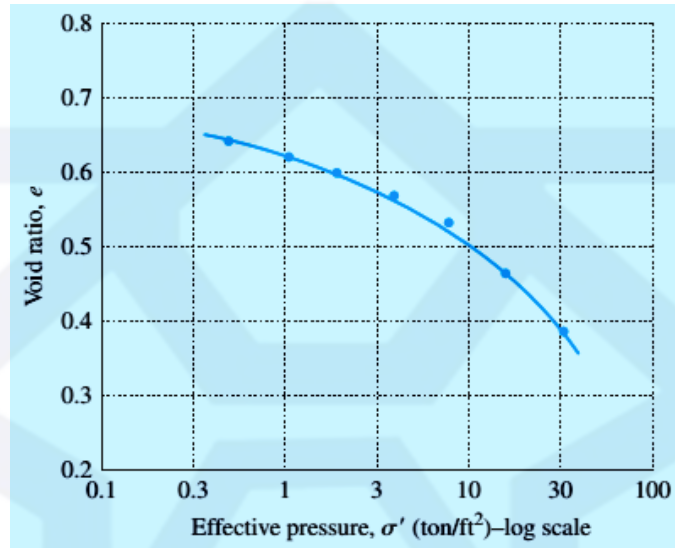
مکانیک خاک

46

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۱



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

47

مثال ۲

The following are the results of a laboratory consolidation test:

Pressure, σ' (ton/ft ²)	Void ratio, e	Remarks	Pressure, σ' (ton/ft ²)	Void ratio, e	Remarks
0.25	1.03	Loading	8.0	0.71	Loading
0.5	1.02		16.0	0.62	
1.0	0.98	Unloading	8	0.635	Unloading
2.0	0.91		4	0.655	
4.0	0.79		2	0.67	

- Draw an e -log σ'_o graph and determine the preconsolidation pressure, σ'_c
- Calculate the compression index and the ratio of C_s/C_c
- On the basis of the average e -log σ' plot, calculate the void ratio at $\sigma'_o = 12 \text{ ton/ft}^2$

دانشگاه صنعتی سیرجان

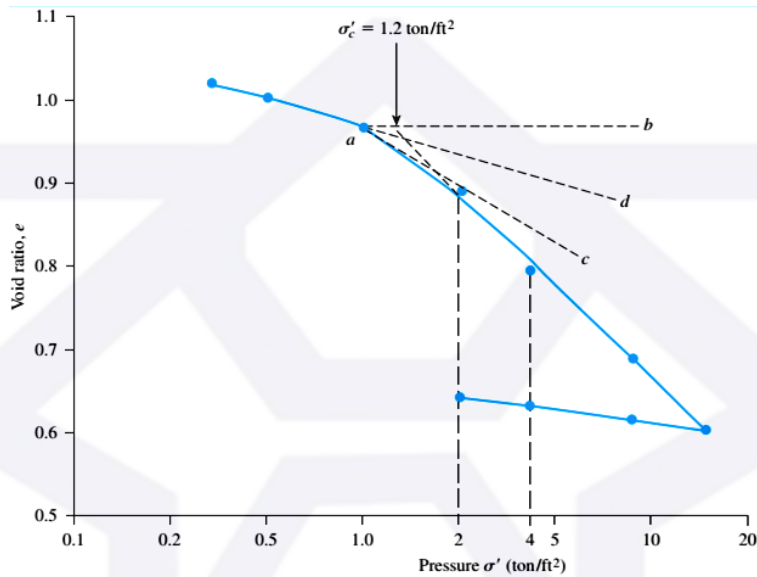
مکانیک خاک

48

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۲



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

49

مثال ۲

Branch	e	σ'_0 (ton/ft ²)
Loading	0.9	2
	0.8	4
Unloading	0.67	2
	0.655	4

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} = \frac{0.9 - 0.8}{\log \left(\frac{4}{2} \right)} = 0.33$$

$$C_s = \frac{e_1 - e_2}{\log \frac{\sigma'_2}{\sigma'_1}} = \frac{0.67 - 0.655}{\log \left(\frac{4}{2} \right)} = 0.05$$

$$\frac{C_s}{C_c} = \frac{0.05}{0.33} = 0.15$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

50

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۲

$$C_c = \frac{e_1 - e_3}{\log \frac{\sigma'_3}{\sigma'_1}}$$

We know that $e_1 = 0.9$ at $\sigma'_1 = 2 \text{ ton/ft}^2$ and that $C_c = 0.33$ [part (b)]. Let $\sigma'_3 = 12 \text{ ton/ft}^2$. So,

$$0.33 = \frac{0.9 - e_3}{\log \left(\frac{12}{2} \right)}$$

$$e_3 = 0.9 - 0.33 \log \left(\frac{12}{2} \right) = \mathbf{0.64}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

51

مثال ۳

A soil profile is shown in Figure 11.18. If a uniformly distributed load, $\Delta\sigma$, is applied at the ground surface, what is the settlement of the clay layer caused by primary consolidation if

- The clay is normally consolidated
- The preconsolidation pressure (σ'_c) = 190 kN/m²
- $\sigma'_c = 170 \text{ kN/m}^2$

Use $C_s \approx \frac{1}{6} C_c$.

دانشگاه صنعتی سیرجان

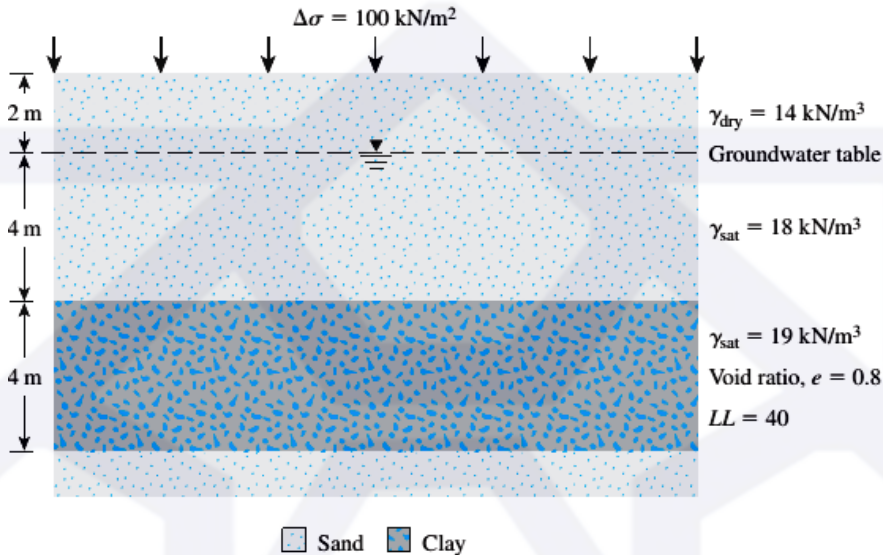
مکانیک خاک

52

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۳



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

53

مثال ۳

Part a

The average effective stress at the middle of the clay layer is

$$\sigma'_o = 2\gamma_{\text{dry}} + 4[\gamma_{\text{sat(sand)}} - \gamma_w] + \frac{4}{2}[\gamma_{\text{sat(clay)}} - \gamma_w]$$

$$\sigma'_o = (2)(14) + 4(18 - 9.81) + 2(19 - 9.81) = 79.14 \text{ kN/m}^2$$

From Eq. (11.31),

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_o} \log \left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_o} \right)$$

From Eq. (11.35),

$$C_c = 0.009(LL - 10) = 0.009(40 - 10) = 0.27$$

So,

$$S_c = \frac{(0.27)(4)}{1 + 0.8} \log \left(\frac{79.14 + 100}{79.14} \right) = 0.213 \text{ m} = \mathbf{213 \text{ mm}}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

54

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۳

Part b

$$\sigma'_o + \Delta\sigma' = 79.14 + 100 = 179.14 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_c = 190 \text{ kN/m}^2$$

Because $\sigma'_o + \Delta\sigma' < \sigma'_c$, use Eq. (11.33):

$$S_c = \frac{C_s H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_o}\right)$$

$$C_s = \frac{C_c}{6} = \frac{0.27}{6} = 0.045$$

$$S_c = \frac{(0.045)(4)}{1 + 0.8} \log\left(\frac{79.14 + 100}{79.14}\right) = 0.036 \text{ m} = \mathbf{36 \text{ mm}}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

55

مثال ۳

Part c

$$\sigma'_o = 79.14 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_o + \Delta\sigma' = 179.14 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_c = 170 \text{ kN/m}^2$$

Because $\sigma'_o < \sigma'_c < \sigma'_o + \Delta\sigma'$, use Eq. (11.34)

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{C_s H}{1 + e_o} \log \frac{\sigma'_c}{\sigma'_o} + \frac{C_c H}{1 + e_o} \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_c}\right) \\ &= \frac{(0.045)(4)}{1.8} \log\left(\frac{170}{79.14}\right) + \frac{(0.27)(4)}{1.8} \log\left(\frac{179.14}{170}\right) \\ &\approx 0.0468 \text{ m} = \mathbf{46.8 \text{ mm}} \end{aligned}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

56

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۴

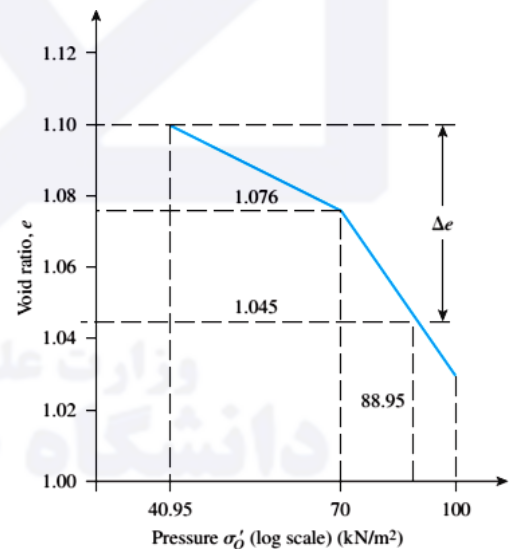
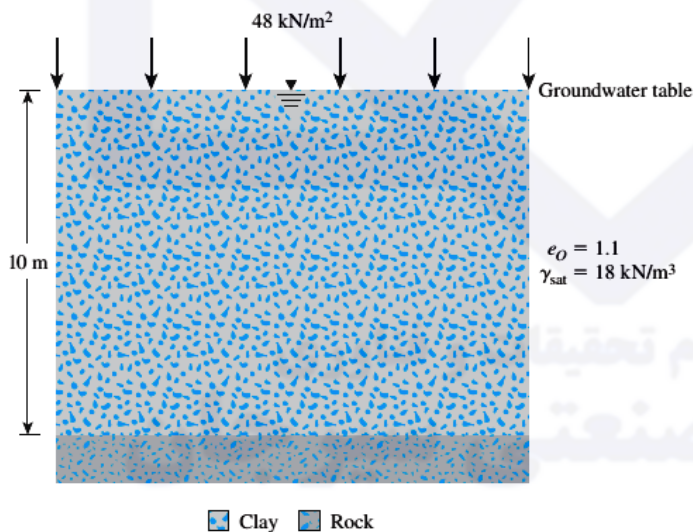
A soil profile is shown in Figure 11.19a. Laboratory consolidation tests were conducted on a specimen collected from the middle of the clay layer. The field consolidation curve interpolated from the laboratory test results is shown in Figure 11.19b. Calculate the settlement in the field caused by primary consolidation for a surcharge of 48 kN/m^2 applied at the ground surface.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

57

مثال ۴



(b)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

58

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۶

$$\sigma'_o = (5)(\gamma_{\text{sat}} - \gamma_w) = 5(18.0 - 9.81)$$

$$= 40.95 \text{ kN/m}^2$$

$$e_o = 1.1$$

$$\Delta\sigma' = 48 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma'_o + \Delta\sigma' = 40.95 + 48 = 88.95 \text{ kN/m}^2$$

The void ratio corresponding to 88.95 kN/m² (see Figure 11.19b) is 1.045. Hence, $\Delta e = 1.1 - 1.045 = 0.055$. We have

$$\text{Settlement } (S_c) = H \frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad [\text{Eq. (11.29)}]$$

so,

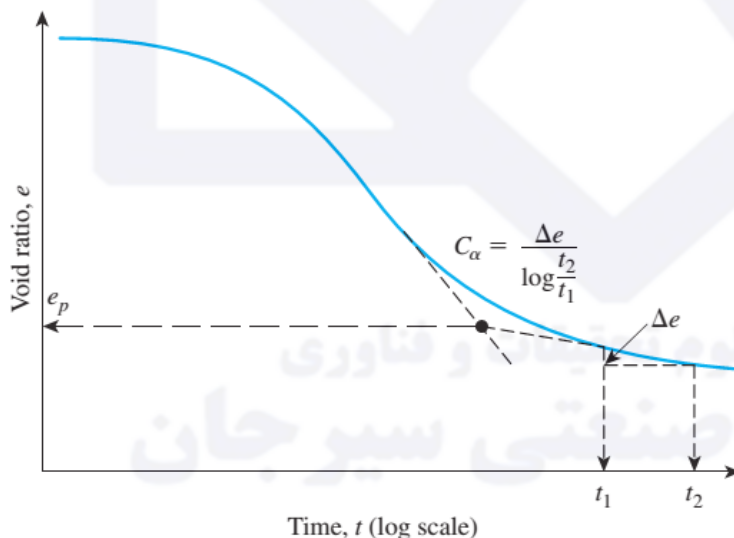
$$S_c = 10 \frac{(0.055)}{1 + 1.1} = 0.262 \text{ m} = \mathbf{262 \text{ mm}}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

59

شاخص تحکیم ثانویه



$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)}$$

where C_α = secondary compression index
 Δe = change of void ratio
 t_1, t_2 = time

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

60

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

محاسبه حاصل از تحکیم ثانویه

$$S_s = C'_\alpha H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$$

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p}$$

where e_p = void ratio at the end of primary consolidation

H = thickness of clay layer

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

61

C'_α

- Overconsolidated clays = 0.001 or less
- Normally consolidated clays = 0.005 to 0.03
- Organic soil = 0.04 or more

Mersri and Godlewski (1977) compiled the ratio of C'_α/C_c for a number of natural clays. From this study, it appears that C'_α/C_c for

- Inorganic clays and silts $\approx 0.04 \pm 0.01$
- Organic clays and silts $\approx 0.05 \pm 0.01$
- Peats $\approx 0.075 \pm 0.01$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

62

تحکیم ثانویه

✓ نشست ناشی از تحکیم ثانویه در خاک های آلی و خاک های غیر آلی با قابلیت فشرده گی زیاد مهمتر است.

✓ در رس های غیر آلی پیش تحکیم نیافته، نشانه تحکیم ثانویه بسیار کوچک است.

✓ نسبت تحکیم ثانویه به تحکیم اولیه برای یک لایه خاک بستگی به نسبت افزایش بارگذاری دارد و برای نسبت های کم $\Delta P/P$ نسبت تحکیم ثانویه به تحکیم اولیه بیشتر است.

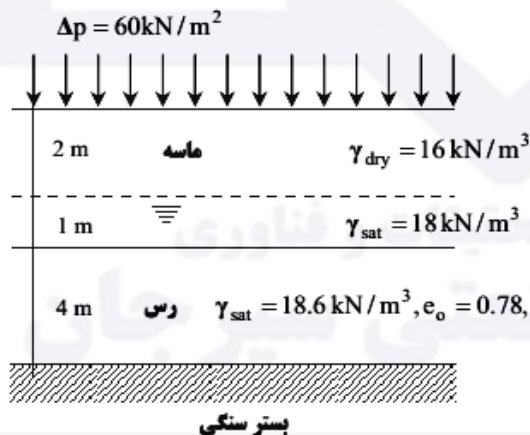
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

63

مثال ۵

در پروفیل خاک نشان داده شده فرض کنید تحکیم اولیه پس از ۴ سال تمام می شود مطلوب است محاسبه نشست تحکیمی کل پس از ۱۲ سال. $C_c = 0.38, C_s = 0.0475, P_c = 140\text{kPa}, C_a = 0.022$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

64

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۵

$$P_o = 2 \times 16 + 1 \times (18 - 10) + \frac{4}{2}(18.6 - 10) = 57.2 \text{ kPa}$$

$$P_o < P_c \rightarrow \text{خاک پیش تحکیم یافته است} \rightarrow \text{OCR} = \frac{P_c}{P_o} = \frac{140}{57.2} = 2.447$$

$$P_o + \Delta p = 57.2 + 60 = 117.2 \text{ kPa} < P_c = 140 \text{ kPa}$$

$$S_c = \frac{C_s \cdot H_o}{1 + e_o} \text{Log} \left[\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right] = \frac{0.0475 \times 4000}{1 + 0.78} \text{Log} \left[\frac{117.2}{57.2} \right] = 33.253 \text{ mm}$$

$$\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta e}{1 + e_o} \rightarrow \frac{33.253}{4000} = \frac{\Delta e}{1 + 0.78} = 0.0148$$

$$\Delta e = e_o - e_p \rightarrow e_p = e_o - \Delta e = 0.78 - 0.0148 = 0.7652$$

$$S_s = \frac{C_\alpha \cdot H_c}{1 + e_p} \text{Log} \left[\frac{t_2}{t_1} \right] = \frac{0.022 \times 4000}{1 + 0.7652} \text{Log} \left[\frac{12}{4} \right] = 23.785$$

$$\Delta H = S = 23.785 + 33.253 = 57 \text{ mm}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

65

مثال ۶

For a normally consolidated clay layer in the field, the following values are given:

- Thickness of clay layer = 8.5 ft
- Void ratio (e_o) = 0.8
- Compression index (C_c) = 0.28
- Average effective pressure on the clay layer (σ'_o) = 2650 lb/ft²
- $\Delta \sigma' = 970 \text{ lb/ft}^2$
- Secondary compression index (C_α) = 0.02

What is the total consolidation settlement of the clay layer five years after the completion of primary consolidation settlement? (Note: Time for completion of primary settlement = 1.5 years.)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

66

مثال ۶

$$C'_\alpha = \frac{C_\alpha}{1 + e_p}$$

$$e_p = e_o - \Delta e_{\text{primary}}$$

$$\Delta e = C_c \log\left(\frac{\sigma'_o + \Delta\sigma'}{\sigma'_o}\right) = 0.28 \log\left(\frac{2650 + 970}{2650}\right) = 0.038$$

$$\text{Primary consolidation, } S_c = \frac{\Delta e H}{1 + e_o} = \frac{(0.038)(8.5 \times 12)}{1 + 0.8} = 2.15 \text{ in.}$$

$$e_p = 0.8 - 0.038 = 0.762$$

$$C'_\alpha = \frac{0.02}{1 + 0.762} = 0.011$$

$$S_s = C'_\alpha H \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = (0.011)(8.5 \times 12) \log\left(\frac{5}{1.5}\right) \approx 0.59 \text{ in.}$$

$$\text{Total consolidation settlement} = 2.15 + 0.59 = \mathbf{2.74 \text{ in.}}$$

سرعت تحکیم

ترزاقی در سال ۱۹۲۵ اولین تئوری در خصوص سرعت تحکیم یک بعدی در خاکهای رسی را ارائه داد. حصول ریاضی تئوری بر پایه مفروضات زیر قرار دارد:

✓ سیستم آب - رس همگن است.

✓ خاک کاملاً اشباع است.

✓ آب غیرقابل تراکم است.

✓ دانه های خاک غیرقابل تراکم است.

✓ جریان آب فقط در یک امتداد است (امتداد تاثیر نیروی فشاری)

✓ قانون دارسی معتبر است .

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

معادله دیفرانسل تحکیم یک بعدی ترزاقی

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

اثبات؟

c_v = coefficient of consolidation = $k/(\gamma_w m_v)$

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} = \frac{k}{\gamma_w \left(\frac{a_v}{1 + e_o} \right)}$$

$$\partial e = a_v \partial(\Delta \sigma') = -a_v \partial u$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

69

معادله تحکیم

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

The solution yields

$$z = 0, \quad u = 0$$

$$z = 2H_{dr}, \quad u = 0$$

$$t = 0, \quad u = u_o$$

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2u_o}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) \right] e^{-M^2 T_v}$$

where m = an integer

$$M = (\pi/2)(2m + 1)$$

u_o = initial excess pore water pressure

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

70

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

جواب معادله تحکیم

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2u_o}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) \right] e^{-M^2 T_v}$$

where m = an integer

$$M = (\pi/2)(2m + 1)$$

u_o = initial excess pore water pressure

$$T_v = \frac{c_v t}{H_{dr}^2} = \text{time factor}$$

The time factor is a nondimensional number.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

71

درجه تحکیم در عمق Z

$$U_z = \frac{u_o - u_z}{u_o} = 1 - \frac{u_z}{u_o}$$

where u_z = excess pore water pressure at time t .

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

72

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

درجه تحکیم متوسط

$$U = \frac{S_{c(t)}}{S_c} = 1 - \frac{\left(\frac{1}{2H_{dr}}\right) \int_0^{2H_{dr}} u_z dz}{u_o}$$

where U = average degree of consolidation

$S_{c(t)}$ = settlement of the layer at time t

S_c = ultimate settlement of the layer from primary consolidation

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \left[\frac{2u_o}{M} \sin\left(\frac{Mz}{H_{dr}}\right) \right] e^{-M^2 T_v}$$

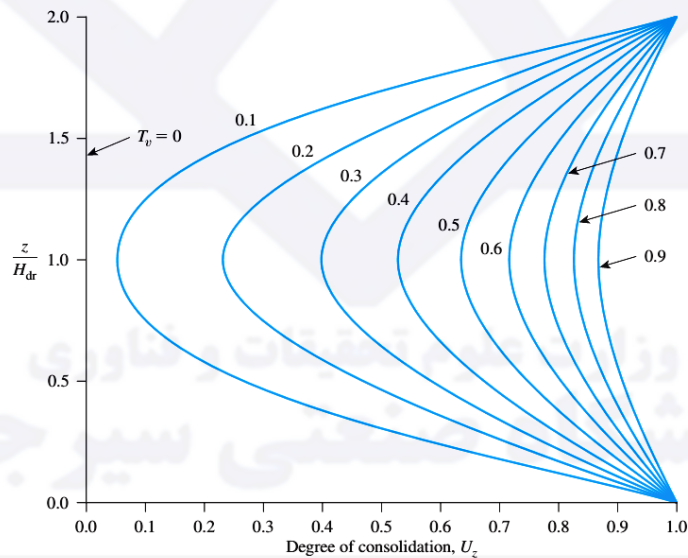
$$U = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

73

تغییرات U_z با توجه به T_v و z/H_{dr}



دانشگاه صنعتی سیرجان

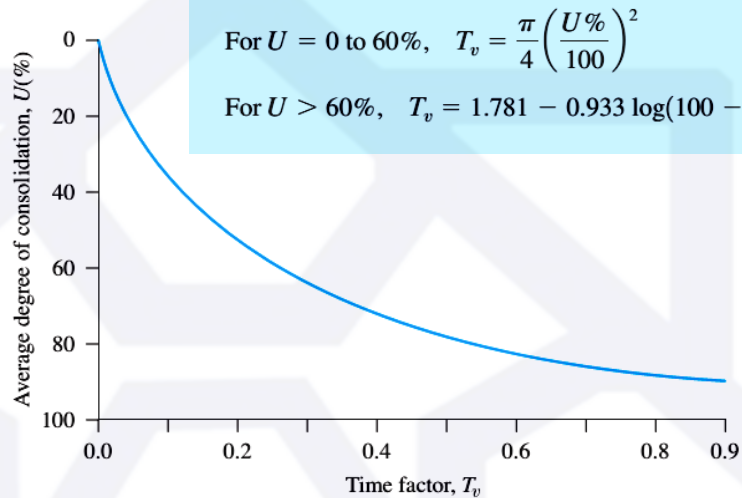
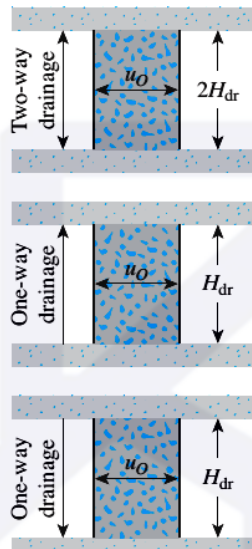
مکانیک خاک

74

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

تعیین عامل زمان با توجه به درجه تحکیم در حالت‌های مختلف تحکیم



$$\text{For } U = 0 \text{ to } 60\%, \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2$$

$$\text{For } U > 60\%, \quad T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

75

تغییرات T_v با توجه به درجه تحکیم متوسط U

U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v	U (%)	T_v
0	0	26	0.0531	52	0.212	78	0.529
1	0.00008	27	0.0572	53	0.221	79	0.547
2	0.0003	28	0.0615	54	0.230	80	0.567
3	0.00071	29	0.0660	55	0.239	81	0.588
4	0.00126	30	0.0707	56	0.248	82	0.610
5	0.00196	31	0.0754	57	0.257	83	0.633
6	0.00283	32	0.0803	58	0.267	84	0.658
7	0.00385	33	0.0855	59	0.276	85	0.684
8	0.00502	34	0.0907	60	0.286	86	0.712
9	0.00636	35	0.0962	61	0.297	87	0.742
10	0.00785	36	0.102	62	0.307	88	0.774
11	0.0095	37	0.107	63	0.318	89	0.809
12	0.0113	38	0.113	64	0.329	90	0.848
13	0.0133	39	0.119	65	0.340	91	0.891
14	0.0154	40	0.126	66	0.352	92	0.938
15	0.0177	41	0.132	67	0.364	93	0.993
16	0.0201	42	0.138	68	0.377	94	1.055
17	0.0227	43	0.145	69	0.390	95	1.129
18	0.0254	44	0.152	70	0.403	96	1.219
19	0.0283	45	0.159	71	0.417	97	1.336
20	0.0314	46	0.166	72	0.431	98	1.500
21	0.0346	47	0.173	73	0.446	99	1.781
22	0.0380	48	0.181	74	0.461	100	∞
23	0.0415	49	0.188	75	0.477		
24	0.0452	50	0.197	76	0.493		
25	0.0491	51	0.204	77	0.511		

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

76

رابطه سیوارم و سوامی برای تعیین عامل زمان

$$\frac{U\%}{100} = \frac{(4T_v/\pi)^{0.5}}{[1 + (4T_v/\pi)^{2.8}]^{0.179}}$$

Sivaram and Swamee (1977)

$$T_v = \frac{(\pi/4)(U\%/100)^2}{[1 - (U\%/100)^{5.6}]^{0.357}}$$

این رابطه دارای خطای کمتر از دو درصد در درجه تحکیم بین ۰ تا ۹۰ درصد و دارای خطای کمتر از ۳ درصد در درجه تحکیم بین ۹۰ تا ۱۰۰ درصد است

تعیین ضریب تحکیم C_v

با افزایش حد مایع ضریب تحکیم کاهش می‌یابد.

روش‌های تعیین ضریب تحکیم:

✓ روش لگاریتم زمان

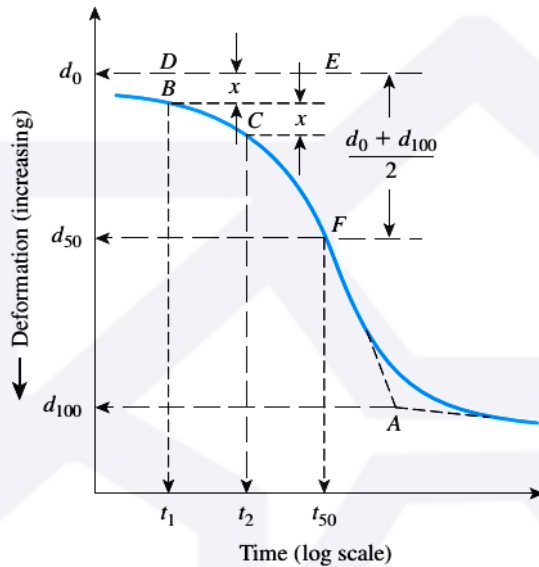
✓ روش جذر زمان

✓ روش سهمی

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روش لگاریتم زمان



$$T_{50} = \frac{c_v t_{50}}{H_{dr}^2}$$

$$c_v = \frac{0.197 H_{dr}^2}{t_{50}}$$

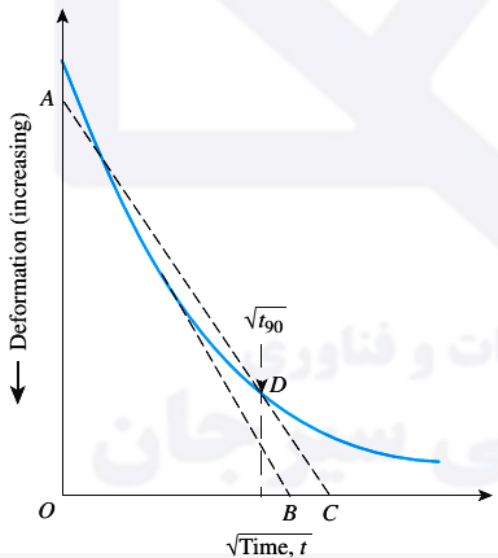
$$t_2 = 4t_1$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

79

روش جذر زمان



$$T_{90} = 0.848 = \frac{c_v t_{90}}{H_{dr}^2}$$

$$c_v = \frac{0.848 H_{dr}^2}{t_{90}}$$

$$\overline{OC} = 1.15 \overline{OB}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

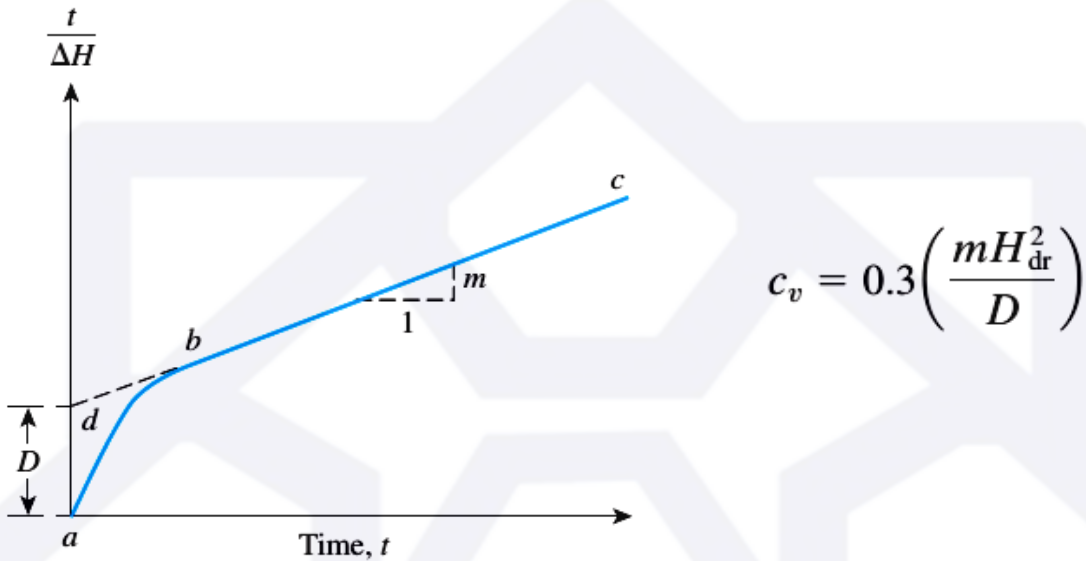
مکانیک خاک

80

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

روش سهمی



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

81

مثال ۷

During a laboratory consolidation test, the time and dial gauge readings obtained from an increase of pressure on the specimen from 50 kN/m² to 100 kN/m² are given here.

Time (min)	Dial gauge reading (cm × 10 ⁴)	Time (min)	Dial gauge reading (cm × 10 ⁴)
0	3975	16.0	4572
0.1	4082	30.0	4737
0.25	4102	60.0	4923
0.5	4128	120.0	5080
1.0	4166	240.0	5207
2.0	4224	480.0	5283
4.0	4298	960.0	5334
8.0	4420	1440.0	5364

Using the logarithm-of-time method, determine c_v . The average height of the specimen during consolidation was 2.24 cm, and it was drained at the top and bottom.

دانشگاه صنعتی سیرجان

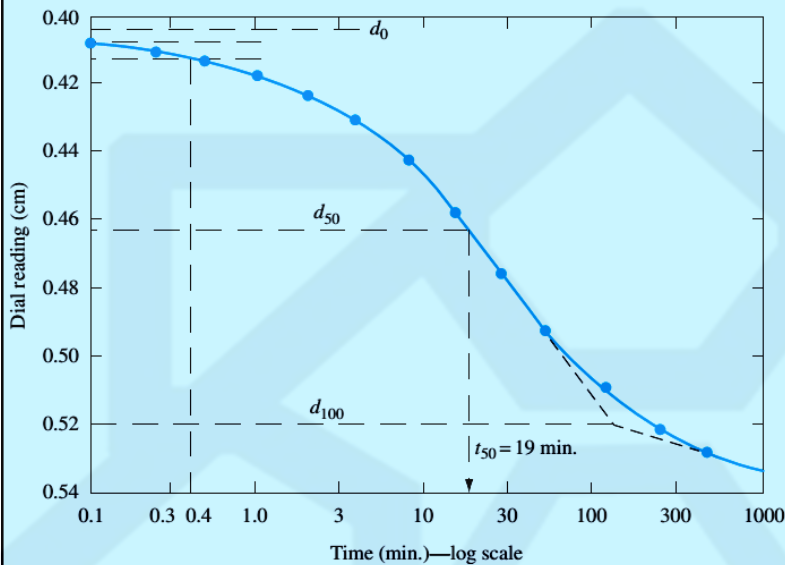
مکانیک خاک

82

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۷



$$C_v = \frac{0.197H_{dr}^2}{t_{50}} = \frac{0.197\left(\frac{2.24}{2}\right)^2}{19}$$

$$= 0.013 \text{ cm}^2/\text{min} = 2.17 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

83

مثال ۸

The time required for 50% consolidation of a 25-mm-thick clay layer (drained at both top and bottom) in the laboratory is 2 min. 20 sec. How long (in days) will it take for a 3-m-thick clay layer of the same clay in the field under the same pressure increment to reach 50% consolidation? In the field, there is a rock layer at the bottom of the clay.

$$T_{50} = \frac{C_v t_{lab}}{H_{dr(lab)}^2} = \frac{C_v t_{field}}{H_{dr(field)}^2}$$

or

$$\frac{t_{lab}}{H_{dr(lab)}^2} = \frac{t_{field}}{H_{dr(field)}^2}$$

$$\frac{140 \text{ sec}}{\left(\frac{0.025 \text{ m}}{2}\right)^2} = \frac{t_{field}}{(3 \text{ m})^2}$$

$$t_{field} = 8,064,000 \text{ sec} = 93.33 \text{ days}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

84

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۹

Refer to Example 11.7. How long (in days) will it take in the field for 30% primary consolidation to occur? Use Eq. (11.62).

$$\frac{c_v t_{\text{field}}}{H_{\text{dr}}^2(\text{field})} = T_v \propto U^2$$

$$t \propto U^2$$

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{U_1^2}{U_2^2}$$

$$\frac{93.33 \text{ days}}{t_2} = \frac{50^2}{30^2}$$

$$t_2 = 33.6 \text{ days}$$

$$\text{For } U = 0 \text{ to } 60\%, \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2$$

$$\text{For } U > 60\%, \quad T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

85

مثال ۱۰

A 3-m-thick layer (double drainage) of saturated clay under a surcharge loading underwent 90% primary consolidation in 75 days. Find the coefficient of consolidation of clay for the pressure range.

$$T_{90} = \frac{c_v t_{90}}{H_{\text{dr}}^2}$$

Because the clay layer has two-way drainage, $H_{\text{dr}} = 3 \text{ m}/2 = 1.5 \text{ m}$. Also, $T_{90} = 0.848$ (see Table 11.8). So,

$$0.848 = \frac{c_v (75 \times 24 \times 60 \times 60)}{(1.5 \times 100)^2}$$

$$c_v = \frac{0.848 \times 2.25 \times 10^4}{75 \times 24 \times 60 \times 60} = 0.00294 \text{ cm}^2/\text{sec}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

86

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

مثال ۱۱

For a normally consolidated laboratory clay specimen drained on both sides, the following are given:

- $\sigma'_o = 3000 \text{ lb/ft}^2$, $e = e_o = 1.1$
 - $\sigma'_o + \Delta\sigma' = 6000 \text{ lb/ft}^2$, $e = 0.9$
 - Thickness of clay specimen = 1 in.
 - Time for 50% consolidation = 2 min
- a. Determine the hydraulic conductivity (ft/min) of the clay for the loading range.
 - b. How long (in days) will it take for a 6-ft clay layer in the field (drained on one side) to reach 60% consolidation?

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

87

ادامه مثال ۱۱

Part a

The coefficient of compressibility is

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_{av}} = \left(\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} \right)$$

$$\Delta e = 1.1 - 0.9 = 0.2$$

$$\Delta \sigma' = 6000 - 3000 = 3000 \text{ lb/ft}^2$$

$$e_{av} = \frac{1.1 + 0.9}{2} = 1.0$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

88

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

ادامه مثال ۱۱

So

$$m_v = \frac{\frac{0.2}{3000}}{1 + 1.0} = 3.33 \times 10^{-5} \text{ft}^2/\text{lb}$$

From Table 11.8, for $U = 50\%$, $T_v = 0.197$; thus,

$$c_v = \frac{(0.197) \left(\frac{1}{2 \times 12} \right)^2}{2} = 1.71 \times 10^{-4} \text{ft}^2/\text{min}$$

$$k = c_v m_v \gamma_w = (1.71 \times 10^{-4} \text{ft}^2/\text{min})(3.33 \times 10^{-5} \text{ft}^2/\text{lb})(62.4 \text{lb}/\text{ft}^3)$$

$$= 3.55 \times 10^{-7} \text{ft}/\text{min}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

89

ادامه مثال ۱۱

Part b

$$T_{60} = \frac{c_v t_{60}}{H_{dr}^2}$$

$$t_{60} = \frac{T_{60} H_{dr}^2}{c_v}$$

From Table 11.8, for $U = 60\%$, $T_v = 0.286$,

$$t_{60} = \frac{(0.286)(6)^2}{1.71 \times 10^{-4}} = 60,211 \text{ min} = 41.8 \text{ days}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

90

Soil Mechanics

© Dr. Ali Reza Ghanizadeh

نشست کلی پی

$$S_T = S_c + S_s + S_e$$

$$\Delta\sigma'_{av} = \frac{\Delta\sigma'_t + 4\Delta\sigma'_m + \Delta\sigma'_b}{6}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک

91

وزارت علوم تحقیقات و فناوری
دانشگاه صنعتی سیرجان