

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



مکانیک خاک پیشرفته

فصل اول: تحکیم

دکتر علیرضا غنی زاده

استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی سیرجان

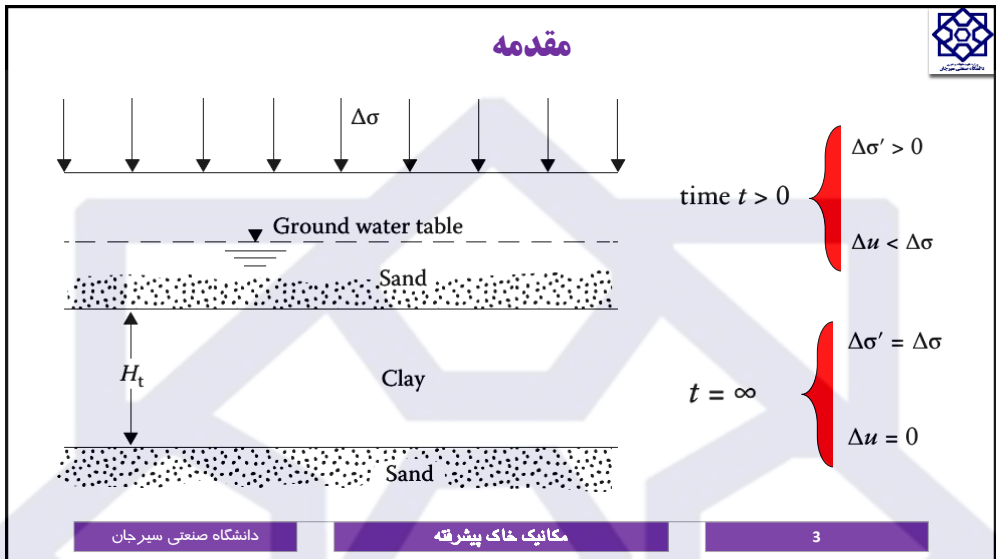
<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مقدمه

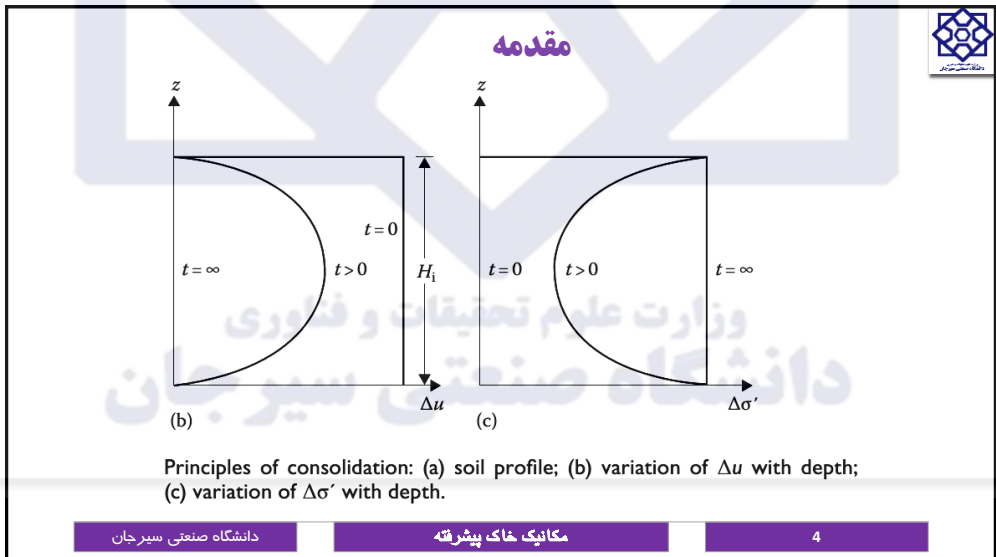


- هنگامی که یک لایه خاک تحت تأثیر تنش فشاری قرار می‌گیرد تا حد معینی فشرده می‌شود.
- این فشردگی می‌تواند ناشی از تغییر وضع قرارگیری ذرات، تغییر شکل الاستیک، بیرون رانده شدن هوا یا آب و پدیده خزش باشد.
- بر اساس نظریه ترزاقی "کاهش میزان رطوبت خاک اشباع بدون جایگزین شدن آب با هوا تحکیم نامیده می‌شود".
- تحکیم تنها در خصوص خاک‌های ریزدانه مطرح می‌باشد که در آنها فشار آب حفره‌ای به سرعت زایل نمی‌شود و برای زایل شدن فشار آب حفره‌ای نیاز به گذشت زمان است.

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



مقدمه

Time, t	Total stress increase, $\Delta\sigma$	Excess pore water pressure, Δu	Effective stress increase, $\Delta\sigma'$
0	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma$	0
>0	$\Delta\sigma$	$<\Delta\sigma$	>0
∞	$\Delta\sigma$	0	$\Delta\sigma$

❖ فرایند کاهش فشار آب حفره‌ای و افزایش فشار مؤثر در لایه رسی به فرایند تحکیم معروف است.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

5

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



نظریه تحکیم یک بعدی

- نظریه تحکیم یک بعدی نخستین بار در سال ۱۹۲۵ توسط ترزاقی ارائه شد.
- فرضیات نظریه تحکیم یک بعدی ترزاقی:
 - ۱- لایه خاک رس همگن است.
 - ۲- لایه رس اشباع است.
 - ۳- تراکم لایه خاک تنها ناشی از تغییر حجم حاصل از خارج شدن آب از فضای خالی می‌باشد.
 - ۴- قانون دارسی در مورد حرکت آب صادق است.
 - ۵- تغییر شکل خاک تنها در امتداد اعمال بار انجام می‌شود.
 - ۶- ضریب تحکیم C_v در زمان تحکیم ثابت باقی می‌ماند.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

6

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

نظریه تحکیم یک بعدی

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

7

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

نظریه تحکیم یک بعدی

$(q_z + dq_z) - q_z = \text{rate of change of volume of soil element}$

$$= \frac{\partial V}{\partial t}$$

where

$$V = dx \, dy \, dz$$

$$k \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} dx \, dy \, dz = \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$h = \frac{u}{\gamma_w} \left\{ \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{dx \, dy \, dz} \frac{\partial V}{\partial t} \right.$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

8

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



نظریه تحکیم یک بعدی

During consolidation, the rate of change of volume is equal to the rate of change of the void volume. So,

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V_v}{\partial t}$$

where V_v is the volume of voids in the soil element. However,

$$V_v = eV_s$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = V_s \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{V}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{dx \, dy \, dz}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$



نظریه تحکیم یک بعدی

$$\frac{\partial V}{\partial t} = V_s \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{V}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{dx \, dy \, dz}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{dx \, dy \, dz} \frac{\partial V}{\partial t}$$

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



نظریه تحکیم یک بعدی

The change in void ratio, ∂e , is due to the increase of effective stress; assuming that these are linearly related, then

$$\partial e = -a_v \partial(\Delta\sigma') \quad (6.10)$$

where a_v is the coefficient of compressibility. Again, the increase of effective stress is due to the decrease of excess pore water pressure, ∂u . Hence

$$\left. \begin{aligned} \partial e &= a_v \partial u \\ \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} &= \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \end{aligned} \right\} \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u}{\partial t} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6.11)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

11

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



نظریه تحکیم یک بعدی

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{a_v}{1+e} \frac{\partial u}{\partial t} = m_v \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$m_v = \text{coefficient of volume compressibility} = \frac{a_v}{1+e}$$

$$\text{or } \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w m_v} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

where

$$C_v = \text{coefficient of consolidation} = \frac{k}{\gamma_w m_v}$$

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

12

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



حل تحلیلی معادله تحکیم یک بعدی

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

$$u = F(z)G(t)$$

So,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F(z) \frac{\partial}{\partial t} G(t) = F(z)G'(t)$$

and

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial^2}{\partial z^2} F(z)G(t) = F''(z)G(t)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

13

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



حل تحلیلی معادله تحکیم یک بعدی

$$F(z)G'(t) = C_v F''(z)G(t)$$

or

$$\frac{F''(z)}{F(z)} = \frac{G'(t)}{C_v G(t)} \quad (6.19)$$

The right-hand side of Eq. (6.19) is a function of z only and is independent of t ; the left-hand side of the equation is a function of t only and is independent of z . Therefore they must be equal to a constant, say, $-B^2$. So,

$$F''(z) = -B^2 F(z) \quad (6.20)$$

A solution to Eq. (6.20) can be given by

$$F(z) = A_1 \cos Bz + A_2 \sin Bz \quad (6.21)$$

where A_1 and A_2 are constants.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

14

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



حل تحلیلی معادله تحکیم یک بعدی

$$G'(t) = -B^2 C_v G(t)$$

The solution to Eq. (6.22) is given by

$$G(t) = A_3 \exp(-B^2 C_v t)$$

$$F(z) = A_1 \cos Bz + A_2 \sin Bz$$

$$G(t) = A_3 \exp(-B^2 C_v t)$$

$$u = F(z)G(t)$$

$$u = (A_1 \cos Bz + A_2 \sin Bz) A_3 \exp(-B^2 C_v t) \\ = (A_4 \cos Bz + A_5 \sin Bz) \exp(-B^2 C_v t)$$

where $A_4 = A_1 A_3$ and $A_5 = A_2 A_3$.

دانشگاه صنعتی سیرجان

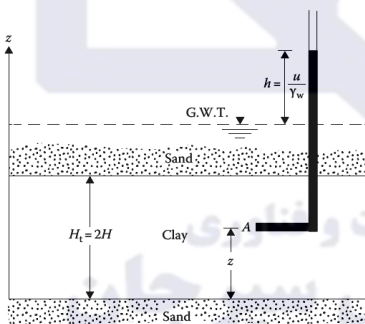
مکانیک خاک پیشرفته

15

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



شرایط مرزی و حل معادله تحکیم یک بعدی



$$u = (A_1 \cos Bz + A_2 \sin Bz) A_3 \exp(-B^2 C_v t) \\ = (A_4 \cos Bz + A_5 \sin Bz) \exp(-B^2 C_v t)$$

1. At time $t = 0$, $u = u_i$ (initial excess pore water pressure at any depth).
2. $u = 0$ at $z = 0$.
3. $u = 0$ at $z = H_t = 2H$.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

16

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



حل تحلیلی معادله تحکیم یک بعدی

1. At time $t = 0$, $u = u_i$ (initial excess pore water pressure at any depth).
2. $u = 0$ at $z = 0$.
3. $u = 0$ at $z = H_i = 2H$.

$$u = (A_1 \cos Bz + A_2 \sin Bz) A_3 \exp(-B^2 C_v t)$$

$$= (A_4 \cos Bz + A_5 \sin Bz) \exp(-B^2 C_v t)$$

The second boundary condition dictates that $A_4 = 0$, and from the third boundary condition we get

$$A_5 \sin 2BH = 0 \quad \text{or} \quad 2BH = n\pi$$

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4}\right)$$

where T_v is the nondimensional time factor and is equal to $C_v t / H^2$.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

17

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



حل تحلیلی معادله تحکیم یک بعدی

1. At time $t = 0$, $u = u_i$ (initial excess pore water pressure at any depth).
2. $u = 0$ at $z = 0$.
3. $u = 0$ at $z = H_i = 2H$.

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4}\right)$$

To satisfy the first boundary condition, we must have the coefficients of A_n such that

$$u_i = \sum_{n=1}^{n=\infty} A_n \sin \frac{n\pi z}{2H} \quad (6.26)$$

Equation (6.26) is a Fourier sine series, and A_n can be given by

$$A_n = \frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \quad (6.27)$$

Combining Eqs. (6.25) and (6.27),

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp\left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4}\right) \quad (6.28)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

18

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



حل تحلیلی معادله تحکیم یک بعدی

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(\frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4} \right)$$

If u_i is constant with depth—i.e., if $u_i = u_0$ (Figure 6.3a)—then, referring to Eq. (6.28),

$$\frac{1}{H} \int_0^{2H} u_i \sin \frac{n\pi z}{2H} dz = \frac{2u_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi)$$

So,

$$u = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{2u_0}{n\pi} (1 - \cos n\pi) \sin \frac{n\pi z}{2H} \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4} \right) \quad (6.29)$$



حل تحلیلی معادله تحکیم یک بعدی

substitute $n = 2m + 1$, where m is an integer

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_0}{(2m+1)\pi} [1 - \cos(2m+1)\pi] \sin \frac{(2m+1)\pi z}{2H} \times \exp \left[\frac{-(2m+1)^2 \pi^2 T_v}{4} \right]$$

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_0}{M} \sin \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T_v)$$

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

$$U_z = \frac{\text{excess pore water pressure dissipated}}{\text{initial excess pore water pressure}}$$

$$= \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i} = \frac{\Delta\sigma'}{u_i} = \frac{\Delta\sigma'}{u_0}$$

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



درجه تحکیم

$$U_z = \frac{\text{excess pore water pressure dissipated}}{\text{initial excess pore water pressure}}$$

$$= \frac{u_i - u}{u_i} = 1 - \frac{u}{u_i} = \frac{\Delta\sigma' - \Delta\sigma'_i}{\Delta\sigma' - \Delta\sigma'_0} = \frac{\Delta\sigma'}{u_0}$$



$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T_v)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

21

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


مثال ۱

حالت اضافه فشار اولیه آب حفره‌ای که نسبت به عمق ثابت است را در نظر بگیرید. برای $T_v = 0.3$ ، درجه تحکیم را در عمق $H/3$ از بالای لایه رس به دست آورید.

SOLUTION From Eq. (6.32), for constant pore water pressure increase,

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T_v)$$

Here $z = H/3$, or $z/H = 1/3$, and $M = (2m + 1)\pi/2$. We can now make a table to calculate U_z :

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

22

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



مثال ۶-۱

1. z/H	1/3	1/3	1/3	
2. T_v	0.3	0.3	0.3	
3. m	0	1	2	
4. M	$\pi/2$	$3\pi/2$	$5\pi/2$	
5. Mz/H	$\pi/6$	$\pi/2$	$5\pi/6$	
6. $2/M$	1.273	0.4244	0.2546	
7. $\exp(-M^2 T_v)$	0.4770	0.00128	≈ 0	
8. $\sin(Mz/H)$	0.5	1.0	0.5	
9. $(2/M)[\exp(-M^2 T_v) \sin(Mz/H)]$	0.3036	0.0005	≈ 0	$\Sigma = 0.3041$

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

Using the value of 0.3041 calculated in step 9, the degree of consolidation at depth $H/3$ is

$$U_{(H/3)} = 1 - 0.3041 = 0.6959 = 69.59\%$$

Note that in the above table we need not go beyond $m = 2$, since the expression in step 9 is negligible for $m \geq 3$.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

23

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



درجه تحکیم متوسط

$$U_{av} = \frac{(1/H_t) \int_0^{H_t} u_i dz - (1/H_t) \int_0^{H_t} u dz}{(1/H_t) \int_0^{H_t} u_i dz}$$

The average degree of consolidation is also the ratio of consolidation settlement at any time to maximum consolidation settlement. Note, in this case, that $H_t = 2H$ and $u_i = u_0$.

$$U_{av} = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

24

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



رابطه بین عامل زمان و درجه تحکیم متوسط

Terzaghi

$$\text{For } U_{av} = 0-53\% : \quad T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U_{av}\%}{100} \right)^2 \quad (6.35)$$

$$\text{For } U_{av} = 53-100\% : \quad T_v = 1.781 - 0.933 [\log(100 - U_{av}\%)] \quad (6.36)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

25

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


رابطه بین عامل زمان و درجه تحکیم متوسط

Sivaram and Swamee (1977)

$$\frac{U_{av}\%}{100} = \frac{(4T_v/\pi)^{0.5}}{[1 + (4T_v/\pi)^{2.8}]^{0.179}} \quad (6.37)$$

or

$$T_v = \frac{(\pi/4)(U_{av}\%/100)^2}{[1 - (U_{av}\%/100)^{5.6}]^{0.357}} \quad (6.38)$$

Equations (6.37) and (6.38) give an error in T_v of less than 1% for $0\% < U_{av} < 90\%$ and less than 3% for $90\% < U_{av} < 100\%$. Table 6.1 gives the variation of T_v with U_{av} based on Eq. (6.34).

It must be pointed out that, if we have a situation of one-way drainage

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

26

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

درجه تحکیم در حالت توزیع فشار منفذی خطی

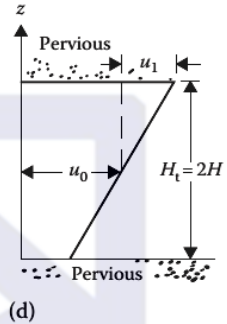
$$u_i = u_0 - u_1 \frac{H-z}{H} \quad (6.39)$$

Substitution of the above relation for u_i into Eq. (6.28) yields

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{H} \int_0^{2H} \left(u_0 - u_1 \frac{H-z}{H} \right) \sin \frac{n\pi z}{2H} dz \right] \sin \frac{n\pi z}{2H} \times \exp \left(\frac{-n^2 \pi^2 T_v}{4} \right) \quad (6.40)$$

The average degree of consolidation can be obtained by solving Eqs. (6.40) and (6.33):

$$U_{av} = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v)$$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

27

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

درجه تحکیم در حالت توزیع فشار سینوسی

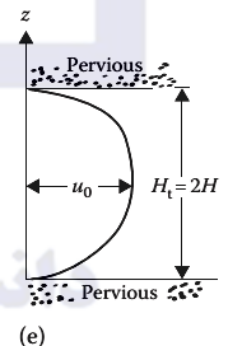
Sinusoidal variation (Figure 6.3e) can be represented by the equation

$$u_i = u_0 \sin \frac{\pi z}{2H} \quad (6.41)$$

The solution for the average degree of consolidation for this type of excess pore water pressure distribution is of the form

$$U_{av} = 1 - \exp \left(\frac{-\pi^2 T_v}{4} \right) \quad (6.42)$$

The variation of U_{av} for various values of T_v is given in Table 6.1.



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

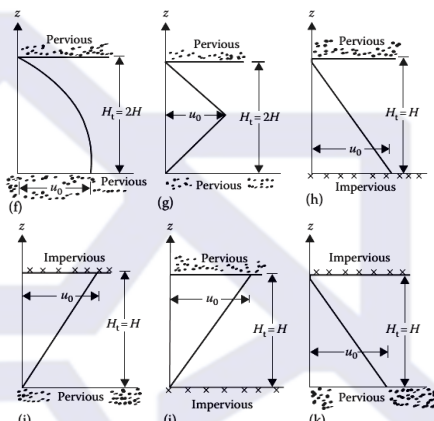
28

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

رابطه بین عامل زمان و درجه تحکیم متوسط

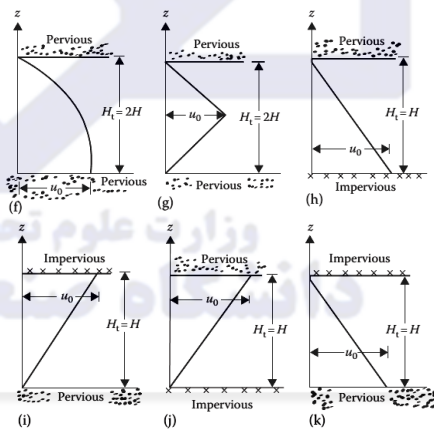
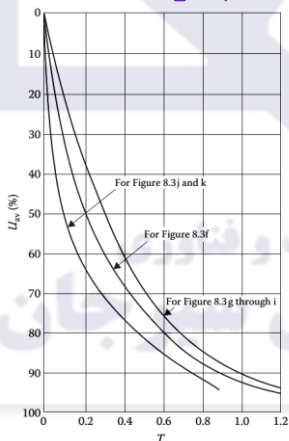


Figure	u_i	Boundary conditions
6.3f	$u_0 \cos \frac{\pi z}{4H}$	Time $t = 0$, $u = u_i$ $u = 0$ at $z = 2H$ $u = 0$ at $z = 0$ $t = 0$, $u = u_i$ $u = 0$ at $z = 2H$ $u = 0$ at $z = 0$
6.3g	For $z \leq H$, $\frac{u_0}{H} z$ For $z \geq H$, $2u_0 - \frac{u_0}{H} z$	$t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = 0$ $t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = H$ $u = 0$ at $z = 0$ $u = 0$ at $z = H$
6.3h	$u_0 - \frac{u_0}{H} z$	$t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = H$ $t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = 0$ $u = 0$ at $z = 0$ $u = 0$ at $z = H$
6.3i	$\frac{u_0}{H} z$	$t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = H$ $t = 0$, $u = u_i$ $u = 0$ at $z = 0$ $u = u_0$ at $z = H$ $u = 0$ at $z = 0$ $u = 0$ at $z = H$
6.3j	$\frac{u_0}{H} z$	$t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = H$ $t = 0$, $u = u_i$ $u = 0$ at $z = 0$ $u = 0$ at $z = H$ $u = 0$ at $z = 0$ $u = u_0$ at $z = 0$
6.3k	$u_0 - \frac{u_0}{H} z$	$t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = 0$ $t = 0$, $u = u_i$ $u = u_0$ at $z = H$ $u = 0$ at $z = 0$ $u = u_0$ at $z = 0$



<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

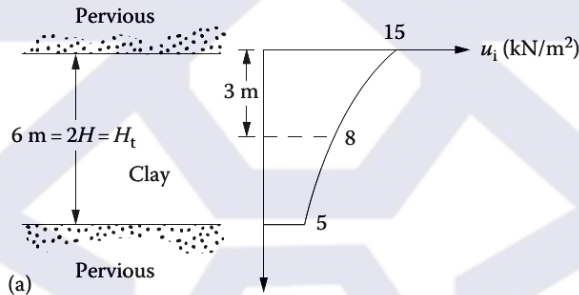
رابطه بین عامل زمان و درجه تحکیم متوسط



© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

مثال ۲

تحت بارگذاری معین فشار آب حفره‌ای در یک لایه رسی (زهکشی از بالا و پایین) مطابق شکل زیر افزایش پیدا خواهد کرد. برای عامل زمان $T_v=0.3$ درجه تحکیم متوسط را محاسبه کنید.



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

31

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۲

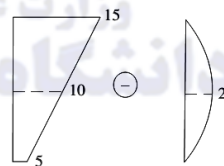
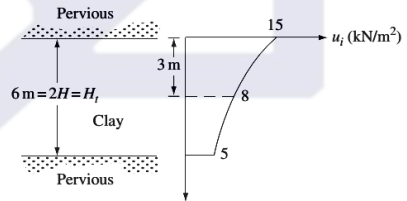
The area of the diagram in Figure 6.6b is

$$A_1 = 6 \left(\frac{1}{2} \right) (15 + 5) = 60 \text{ kN/m}$$

The area of the diagram in Figure 6.6c is

$$A_2 = \sum_{z=0}^6 2 \sin \frac{\pi z}{2H} dz = \int_0^6 2 \sin \frac{\pi z}{6} dz$$

$$= (2) \left(\frac{6}{\pi} \right) \left(-\cos \frac{\pi z}{6} \right)_0^6 = \frac{12}{\pi} (2) = \frac{24}{\pi} = 7.64 \text{ kN/m}$$



(b)

(c)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

32

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



مثال ۲

The average degree of consolidation can now be calculated as follows:

$$U_{av}(T_v = 0.3) = \frac{\text{For Figure 6.6b} \quad U_{av}(T_v = 0.3)A_1 - \text{For Figure 6.6c} \quad U_{av}(T_v = 0.3)A_2}{\text{For Figure 6.6a} \quad A_1 - A_2}$$

Net area of Figure 6.6a

From Table 6.1 for $T_v = 0.3$, $U_{av} \approx 61\%$ for area A_1 ; $U_{av} \approx 52.3\%$ for area A_2 .
So

$$U_{av} = \frac{61(60) - (7.64)52.3}{60 - 7.64} = \frac{3260.43}{52.36} = 62.3\%$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

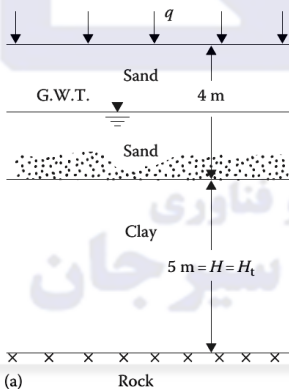
مکانیک خاک پیشرفته

33

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



مثال ۳



یک سربار یکنواخت به شدت ۱۰۰ کیلونیوتن بر متر مربع مطابق شکل زیر بر سطح زمین اثر می کند. مطلوبست:
 ✓ توزیع اضافه فشار اولیه آب حفره‌ای در لایه رسی
 ✓ توزیع اضافه فشار آب حفره‌ای نسبت به عمق در لایه رسی در زمانی که $T_v = 0.5$ برای آن باشد.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

34

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

حل عددی معادله تحکیم یک بعدی با روش FDM



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

با فرض مقادیر دلخواه برای t_R و U_{R1} و Z_R داریم:

Nondimensional excess pore water pressure: $\bar{u} = \frac{u}{u_R}$

Nondimensional time: $\bar{t} = \frac{t}{t_R}$

Nondimensional depth: $\bar{z} = \frac{z}{z_R}$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u_R}{t_R} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}}$$

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_v \frac{u_R}{z_R^2} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

35

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

حل عددی معادله تحکیم یک بعدی با روش FDM



If we adopt the reference time in such a way that $t_R = z_R^2 / C_v$

$$\frac{1}{t_R} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} = \frac{C_v}{z_R^2} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2} \quad \longrightarrow \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{\Delta \bar{t}} (\bar{u}_{0,\bar{i}+\Delta \bar{t}} - \bar{u}_{0,\bar{i}})$$

$$\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial \bar{z}^2} = \frac{1}{(\Delta \bar{z})^2} (\bar{u}_{1,\bar{i}} + \bar{u}_{3,\bar{i}} - 2\bar{u}_{0,\bar{i}})$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{\Delta \bar{t}} (\bar{u}_{0,\bar{i}+\Delta \bar{t}} - \bar{u}_{0,\bar{i}}) = \frac{1}{(\Delta \bar{z})^2} (\bar{u}_{1,\bar{i}} + \bar{u}_{3,\bar{i}} - 2\bar{u}_{0,\bar{i}}) \\ \bar{u}_{0,\bar{i}+\Delta \bar{t}} = \frac{\Delta \bar{t}}{(\Delta \bar{z})^2} (\bar{u}_{1,\bar{i}} + \bar{u}_{3,\bar{i}} - 2\bar{u}_{0,\bar{i}}) + \bar{u}_{0,\bar{i}} \end{array} \right\}$$

$$\bar{u}_{0,\bar{i}+\Delta \bar{t}} = \frac{\Delta \bar{t}}{(\Delta \bar{z})^2} (\bar{u}_{1,\bar{i}} + \bar{u}_{3,\bar{i}} - 2\bar{u}_{0,\bar{i}}) + \bar{u}_{0,\bar{i}}$$

For Eq. (6.61) to converge, $\Delta \bar{t}$ and $\Delta \bar{z}$ must be chosen such that $\Delta \bar{t} / (\Delta \bar{z})^2$ is less than 0.5.

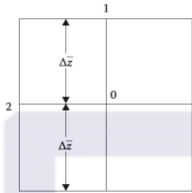
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

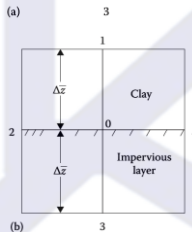
36

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

حل عددی معادله تحکیم یک بعدی با روش FDM



$$\bar{u}_{0,t+\Delta t} = \frac{\Delta t_{(1)}}{(\Delta z)^2} (\bar{u}_{1,t} + \bar{u}_{3,t} - 2\bar{u}_{0,t}) + \bar{u}_{0,t}$$



$$\bar{u}_{0,t+\Delta t} = \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} (2\bar{u}_{1,t} - 2\bar{u}_{0,t}) + \bar{u}_{0,t}$$

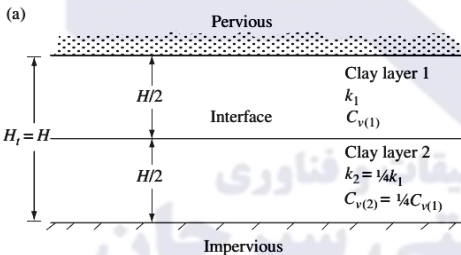
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

37

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

حل عددی معادله تحکیم یک بعدی برای خاک‌های لایه‌ای



$\frac{k}{C_v} \frac{\partial u}{\partial t} = k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$
 ↑ change in volume ↑ difference between the rate of flow

$$\frac{k}{C_v} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{2} \left(\frac{k_1}{C_{v1}} + \frac{k_2}{C_{v2}} \right) \frac{1}{\Delta t} (u_{0,t+\Delta t} - u_{0,t})$$

$$k \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{2} \left[\frac{k_1}{(\Delta z)^2} + \frac{k_2}{(\Delta z)^2} \right] \left(\frac{2k_1}{k_1 + k_2} u_{1,t} + \frac{2k_2}{k_1 + k_2} u_{3,t} - 2u_{0,t} \right)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

38

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



حل عددی معادله تحکیم یک بعدی

$$\left(\frac{k_1}{C_{v1}} + \frac{k_2}{C_{v2}}\right) \frac{1}{\Delta t} (u_{0,t+\Delta t} - u_{0,t})$$

$$= \frac{1}{(\Delta z)^2} (k_1 + k_2) \left(\frac{2k_1}{k_1 + k_2} u_{1,t} + \frac{2k_2}{k_1 + k_2} u_{3,t} - 2u_{0,t} \right)$$

or

$$u_{0,t+\Delta t} = \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \frac{k_1 + k_2}{k_1/C_{v1} + k_2/C_{v2}}$$

$$\times \left(\frac{2k_1}{k_1 + k_2} u_{1,t} + \frac{2k_2}{k_1 + k_2} u_{3,t} - 2u_{0,t} \right) + u_{0,t}$$

or

$$u_{0,t+\Delta t} = \frac{\Delta t C_{v1}}{(\Delta z)^2} \frac{1 + k_2/k_1}{1 + (k_2/k_1)(C_{v1}/C_{v2})}$$

$$\times \left(\frac{2k_1}{k_1 + k_2} u_{1,t} + \frac{2k_2}{k_1 + k_2} u_{3,t} - 2u_{0,t} \right) + u_{0,t}$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

39

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


حل عددی معادله تحکیم یک بعدی

Assuming $1/t_R = C_{v1}/z_R^2$

$$\bar{u}_{0,i+\Delta \bar{t}} = \frac{1 + k_2/k_1}{1 + (k_2/k_1)(C_{v1}/C_{v2})} \frac{\Delta \bar{t}}{(\Delta \bar{z})^2}$$

$$\times \left(\frac{2k_1}{k_1 + k_2} \bar{u}_{1,i} + \frac{2k_2}{k_1 + k_2} \bar{u}_{3,i} - 2\bar{u}_{0,i} \right) + \bar{u}_{0,i}$$

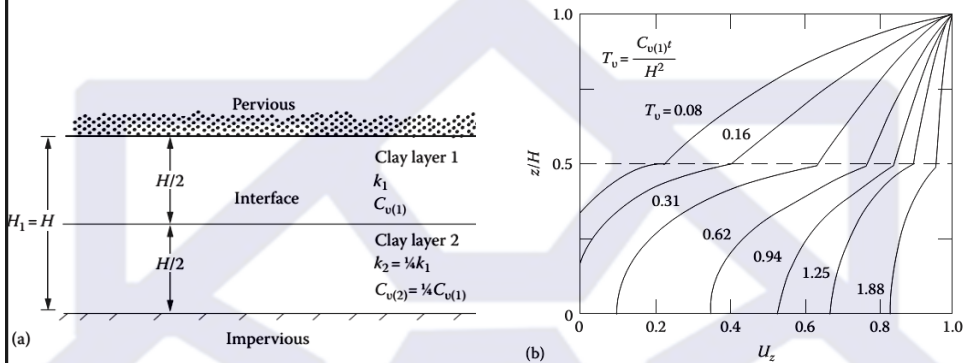
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

40

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

حل عددی معادله تحکیم یک بعدی



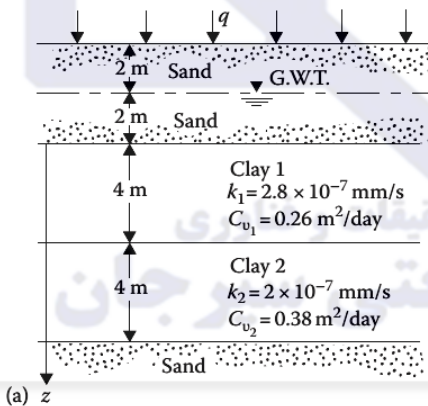
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

41

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال



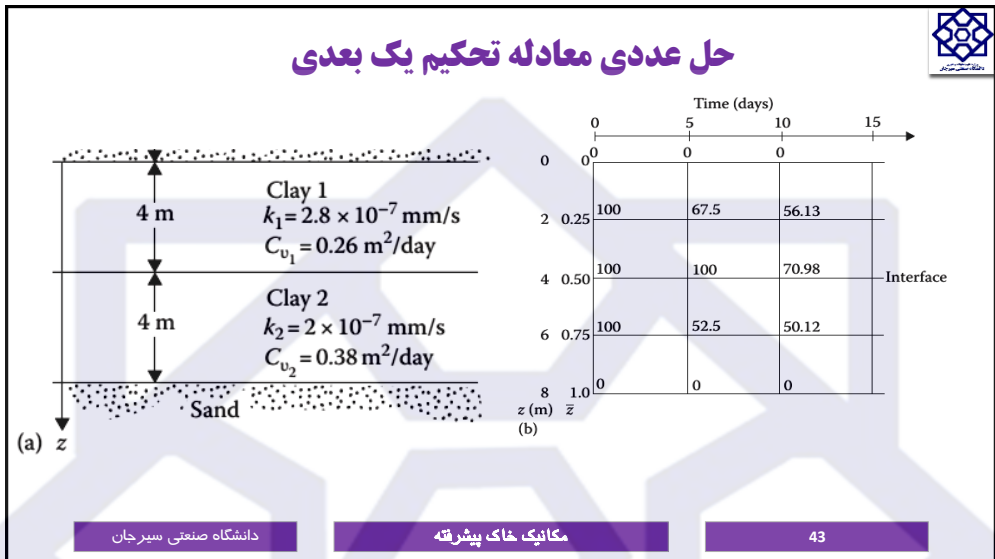
یک بار یکنواخت با شدت ۱۵۰ کیلو نیوتن بر متر مربع بر روی سطح خاکی با پروفیل نشان داده شده در شکل وارد می شود. با استفاده از روش تفاضل محدود توزیع فشار آب حفره‌های را در عمق‌های مختلف لایه‌های رسی پس از ۱۰ روز محاسبه کنید.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

42

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

حل عددی معادله تحکیم یک بعدی

Now, let $z_R = 8 \text{ m}$ and $u_R = 1.5 \text{ kN/m}^2$.

So, $\bar{z} = (8 \text{ m})/(8 \text{ m}) = 1$ and $\bar{u} = (150 \text{ kN/m}^2)/(1.5 \text{ kN/m}^2) = 100$.

$\Delta \bar{z} = 2/8 = 0.25$

$$t_R = \frac{z_R^2}{C_v} \quad \bar{t} = \frac{t}{t_R} \quad \frac{\Delta t}{\Delta \bar{t}} = \frac{z_R^2}{z^2} \quad \text{or} \quad \Delta \bar{t} = \frac{C_v \Delta t}{z^2}$$

Let $\Delta t = 5$ days for both layers. So, for layer 1,

$$\Delta \bar{t}_{(1)} = \frac{C_{v1} \Delta t}{z_R^2} = \frac{0.26(5)}{8^2} = 0.0203 \quad \frac{\Delta \bar{t}_{(1)}}{(\Delta \bar{z})^2} = \frac{0.0203}{0.25^2} = 0.325 \quad (< 0.5)$$

For layer 2,

$$\Delta \bar{t}_{(2)} = \frac{C_{v2} \Delta t}{z_R^2} = \frac{0.38(5)}{8^2} = 0.0297 \quad \frac{\Delta \bar{t}_{(2)}}{(\Delta \bar{z})^2} = \frac{0.0297}{0.25^2} = 0.475 \quad (< 0.5)$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

44

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۵ روز

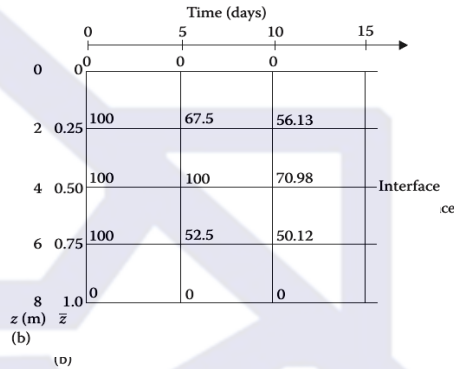
For $t = 5$ days,

At $\bar{z} = 0$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0$$

At $\bar{z} = 0.25$,

$$\begin{aligned} \bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} &= \frac{\Delta\bar{t}_{(1)}}{(\Delta\bar{z})^2} (\bar{u}_{1,\bar{z}} + \bar{u}_{3,\bar{z}} - 2\bar{u}_{0,\bar{z}}) + \bar{u}_{0,\bar{z}} \\ &= 0.325[0 + 100 - 2(100)] + 100 = 67.5 \end{aligned}$$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

45

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

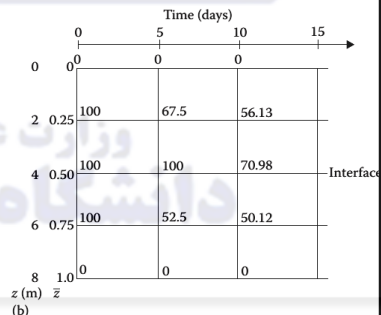


تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۵ روز

For $t = 5$ days,

At $\bar{z} = 0.5$ [note: this is the boundary of two layers, so we will use Eq. (6.66)],

$$\begin{aligned} \bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} &= \frac{1 + k_2/k_1}{1 + (k_2/k_1)(C_{v1}/C_{v2})} \frac{\Delta\bar{t}_{(1)}}{(\Delta\bar{z})^2} \\ &\times \left(\frac{2k_1}{k_1 + k_2} \bar{u}_{1,\bar{z}} + \frac{2k_2}{k_1 + k_2} \bar{u}_{3,\bar{z}} - 2\bar{u}_{0,\bar{z}} \right) + \bar{u}_{0,\bar{z}} \\ &= \frac{1 + \frac{2}{2.8}}{1 + (2 \times 0.26)/(2.8 \times 0.38)} (0.325) \\ &\times \left[\frac{2 \times 2.8}{2 + 2.8} (100) + \frac{2 \times 2}{2 + 2.8} (100) - 2(100) \right] + 100 \\ \bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} &= (1.152)(0.325)(116.67 + 83.33 - 200) + 100 = 100 \end{aligned}$$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

46

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۵ روز

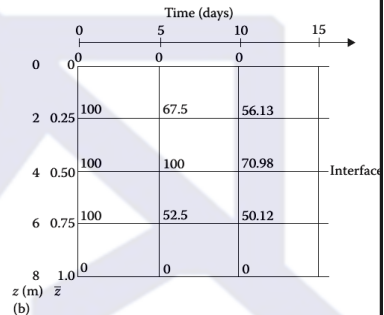


At $\bar{z} = 0.75$,

$$\begin{aligned}\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} &= \frac{\Delta\bar{t}_{(2)}}{(\Delta\bar{z})^2}(\bar{u}_{1,\bar{z}} + \bar{u}_{3,\bar{z}} - 2\bar{u}_{0,\bar{z}}) + \bar{u}_{0,\bar{z}} \\ &= 0.475[100 + 0 - 2(100)] + 100 = 52.5\end{aligned}$$

At $\bar{z} = 1.0$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0$$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

47

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۱۰ روز



For $t = 10$ days,

At $\bar{z} = 0$,

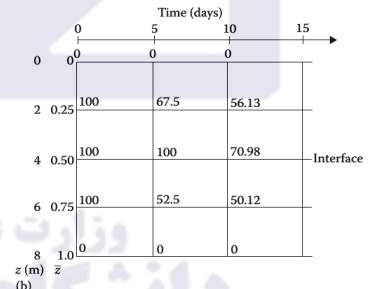
$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0$$

At $\bar{z} = 0.25$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.325[0 + 100 - 2(67.5)] + 67.5 = 56.13$$

At $\bar{z} = 0.5$,

$$\begin{aligned}\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} &= (1.152)(0.325) \left[\frac{2 \times 2.8}{2 + 2.8}(67.5) + \frac{2 \times 2}{2 + 2.8}(52.5) - 2(100) \right] + 100 \\ &= (1.152)(0.325)(78.75 + 43.75 - 200) + 100 = 70.98\end{aligned}$$



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

48

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

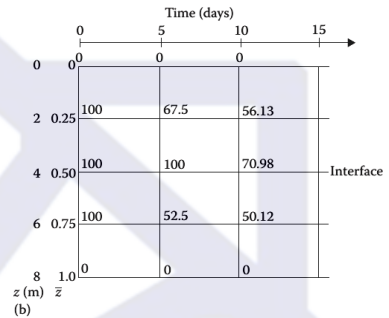
تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۱۰ روز

For $t = 10$ days,At $\bar{z} = 0$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0$$

At $\bar{z} = 0.25$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.325[0 + 100 - 2(67.5)] + 67.5 = 56.13$$



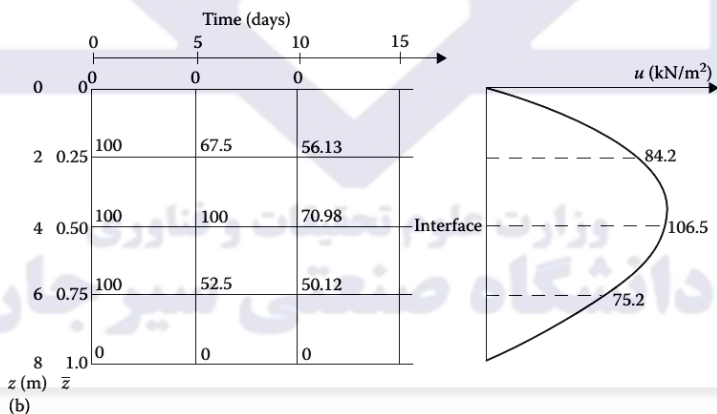
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

49

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

توزیع فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۱۰ روز



دانشگاه صنعتی سیرجان

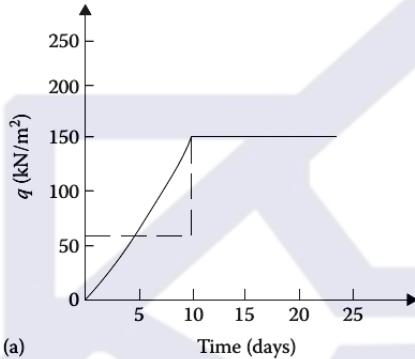
مکانیک خاک پیشرفته

50

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



مثال



در مثال قبل در صورتی که بار با شدت ۱۵۰ کیلوژ بر متر مربع بر روی سطح خاک به صورت تدریجی مطابق شکل روبرو افزایش یابد، با استفاده از تفاضل محدود توزیع فشار آب حفره‌ای را در عمق مختلف لایه‌های رسی پس از ۱۵ روز محاسبه کنید

(a)

Time (days)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

51

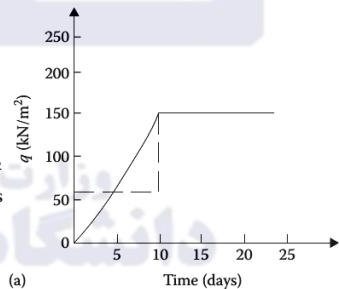
<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


حل

SOLUTION As before, $z_R = 8$ m, $u_R = 1.5$ kN/m². For $\Delta t = 5$ days,

$$\frac{\Delta \bar{t}_{(1)}}{(\Delta \bar{z})^2} = 0.325 \quad \frac{\Delta \bar{t}_{(2)}}{(\Delta \bar{z})^2} = 0.475$$

The continuous loading can be divided into step loads such as 60 kN/m² from 0 to 10 days and an added 90 kN/m² from the tenth day on. This is shown by dashed lines in Figure 6.12a.



(a)

Time (days)

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

52

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۰ روز

At $t = 0$ days,

$$\bar{z} = 0 \quad \bar{u} = 0$$

$$\bar{z} = 0.25 \quad \bar{u} = 60/1.5 = 40$$

$$\bar{z} = 0.5 \quad \bar{u} = 40$$

$$\bar{z} = 0.75 \quad \bar{u} = 40$$

$$\bar{z} = 1 \quad \bar{u} = 0$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

53

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>


تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۵ روز

At $t = 5$ days,At $\bar{z} = 0$,

$$\bar{u} = 0$$

At $\bar{z} = 0.25$, from Eq. (6.61),

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.325[0+40-2(40)]+40 =$$

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = (1.532)(0.325) \left[\frac{2 \times 2.8}{2+2.8}(40) + \frac{2 \times 2}{2+2.8}(40) - 2(40) \right] + 40 = 40$$

At $\bar{z} = 0.5$, from Eq. (6.66),At $\bar{z} = 0.75$, from Eq. (6.61),

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.475[40+0-2(40)]+40 = 21$$

At $\bar{z} = 1$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

54

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۱۰ روز

At $t = 10$ days,

At $\bar{z} = 0$,

$$\bar{u} = 0$$

At $\bar{z} = 0.25$, from Eq. (6.61),

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.325[0 + 40 - 2(27)] + 27 = 22.45$$

At this point, a new load of 90 kN/m^2 is added, so \bar{u} will increase by an amount $90/1.5 = 60$. The new $\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}}$ is $60 + 22.45 = 82.45$. At $\bar{z} = 0.5$, from Eq. (6.66),

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

55

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>



تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۱۰ روز

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = (1.152)(0.325) \left[\frac{2 \times 2.8}{2 + 2.8}(27) + \frac{2 \times 2}{2 + 2.8}(21) - 2(40) \right] + 40 = 28.4$$

$$\text{New } \bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 28.4 + 60 = 88.4$$

At $\bar{z} = 0.75$, from Eq. (6.61),

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.475[40 + 0 - 2(21)] + 21 = 20.05$$

$$\text{New } \bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 60 + 20.05 = 80.05$$

At $\bar{z} = 1$,

$$\bar{u} = 0$$

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

56

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



تعیین فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۱۵ روز

At $t = 15$ days,At $\bar{z} = 0$,

$$\bar{u} = 0$$

At $\bar{z} = 0.25$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.325[0 + 88.4 - 2(82.45)] + 82.45 = 57.6$$

At $\bar{z} = 0.5$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = (1.152)(0.325)$$

$$\times \left[\frac{2 \times 2.8}{2 + 2.8}(82.45) + \frac{2 \times 2}{2 + 2.8}(80.05) - 2(88.4) \right] + 88.4 = 83.2$$

At $\bar{z} = 0.75$,

$$\bar{u}_{0,\bar{z}+\Delta\bar{z}} = 0.475[88.4 + 0 - 2(80.05)] + 80.05 = 46.0$$

At $\bar{z} = 1$,

$$\bar{u} = 0$$

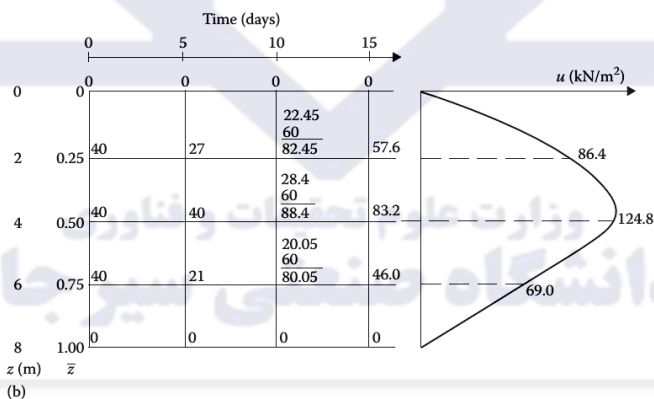
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

57

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

توزیع فشار آب حفره‌ای در عمق‌های مختلف پس از ۱۰ روز



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

58

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 مربع 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.

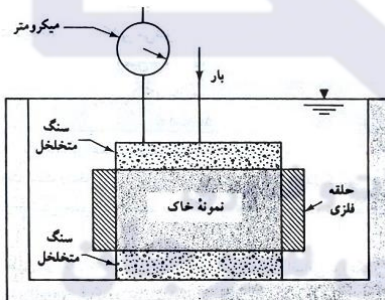
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

59

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

آزمایش تحکیم (Odometer test)



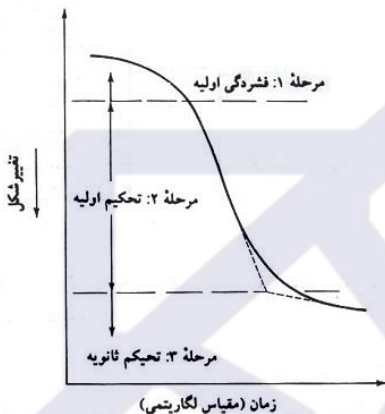
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

60

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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



مرحله ۱: فشردگی اولیه که اکثراً به علت پخش 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.

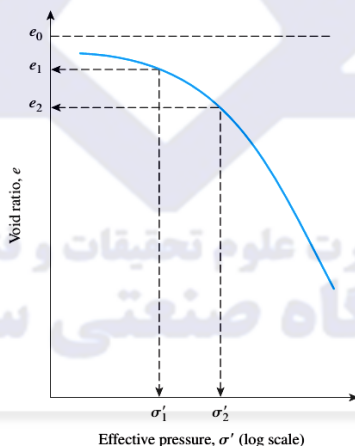
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

61

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

نمودار نسبت تخلخل – فشار



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

62

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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.

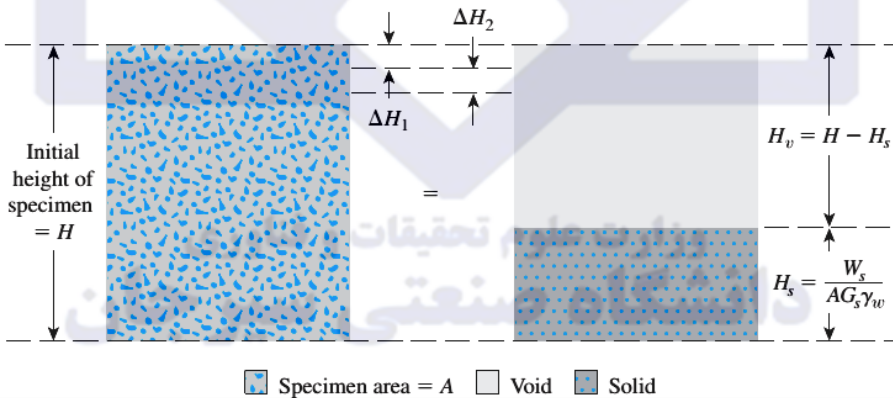
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

63

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

نمودار نسبت تخلخل - فشار



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

64

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 را 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:

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

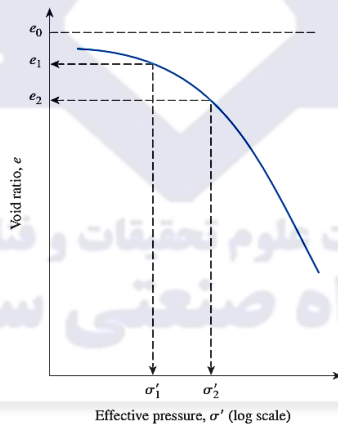
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

65

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

نمودار نسبت تخلخل - فشار



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

66

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 ایجاد شده 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 بیشتر باشد، تغییرات تخلخل با شیب تندتر خواهد شد.

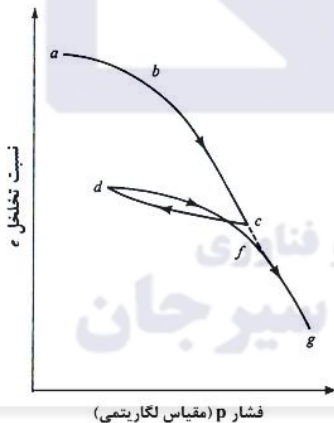
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

67

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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.

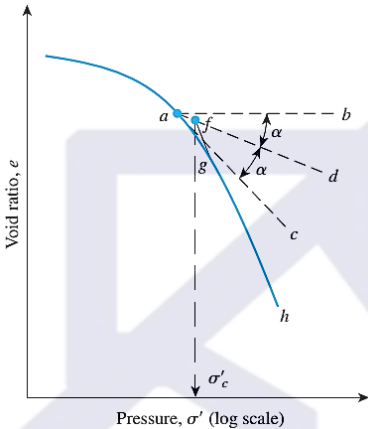
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

68

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

تنش در صفحات اصلی



- ✓ با بررسی چشمی در روی نمودار e در مقابل σ 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 پیشرفته

69

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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 پیشرفته

70

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

روابطی برای تعیین فشار پیش تحکیم

- Stas and Kulhawy (1984):

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

$$LI = \frac{\omega - PL}{LL - PL}$$

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 پیشرفته

71

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~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 پیشرفته

72

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 پیشرفته

73

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>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 پیشرفته

74

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 پیشرفته

75

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~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 پیشرفته

76

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D



سایر معادلات

- Rendon-Herrero (1983) $C_c = 0.141G_s^{1.2} \left(\frac{1 + e_0}{G_s} \right)^{2.38}$
 G_s = specific gravity of soil solids
 e_0 = in situ void ratio
- Nagaraj and Murty (1985) $C_c = 0.2343 \left(\frac{LL}{100} \right) G_s$
 G_s = specific gravity of soil solids
 LL = liquid limit (%)
- Park and Koumoto (2004) $C_c = \frac{n_o}{371.747 - 4.275n_o}$
 n_o = in situ porosity of soil

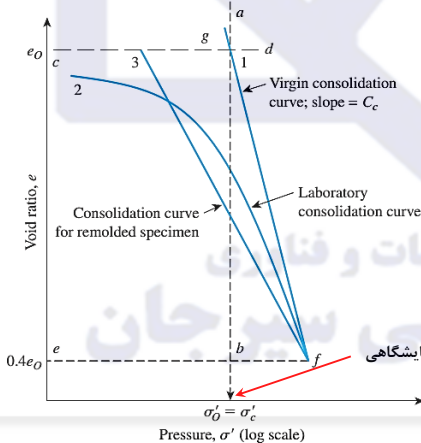
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

77

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

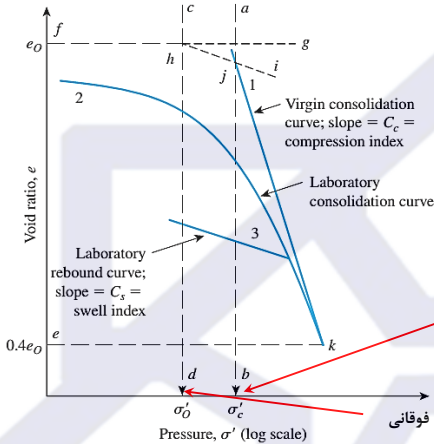
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

78

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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



اشمرتن (۱۹۵۳) چنین نتیجه‌گیری کرد که شیب خط h_j ، 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

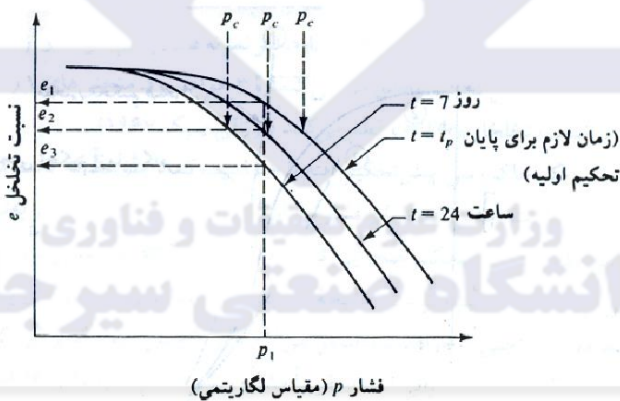
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

79

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

تأثیر دوام بار بر روی نمودار e-log p



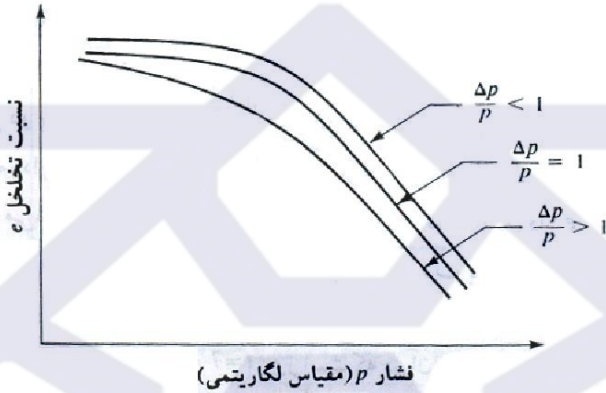
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

80

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

تأثیر نسبت افزایش بار بر روی نمودار e -log p



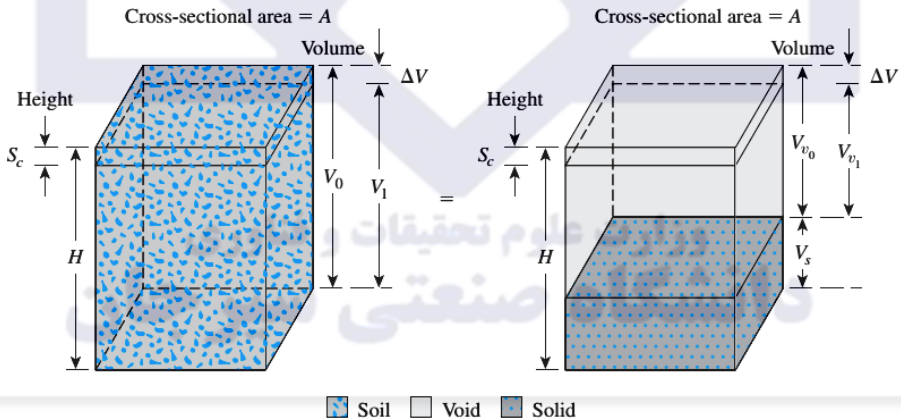
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

81

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

محاسبه نشست حاصل از تحکیم اولیه



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

82

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

محاسبه نشست حاصل از تحکیم اولیه

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

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

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

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

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

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

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

83

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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

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

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

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

ضریب C_s نشانه تورم نامیده می شود.

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

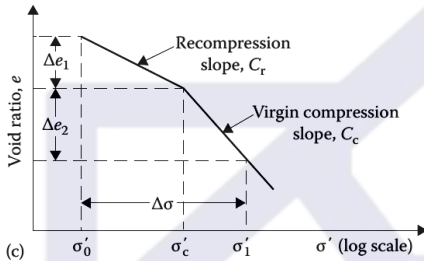
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

84

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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



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

ضریب C_c نشانه فشردگی نامیده می شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

85

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

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 پیشرفته

86

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

تعیین ضریب تحکیم C_v

با افزایش حد مایع ضریب تحکیم کاهش می یابد.

روش های تعیین ضریب تحکیم:

✓ روش لگاریتم زمان

✓ روش جذر زمان

✓ روش سهمی

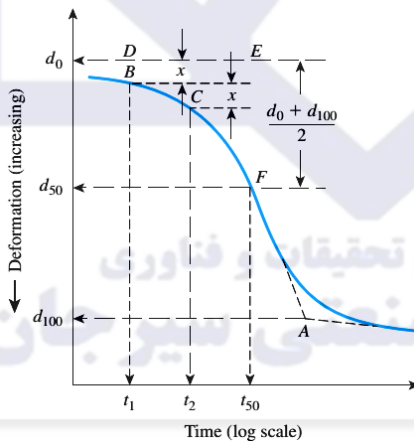
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

87

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

روش لگاریتم زمان



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

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

$$t_2 = 4t_1$$

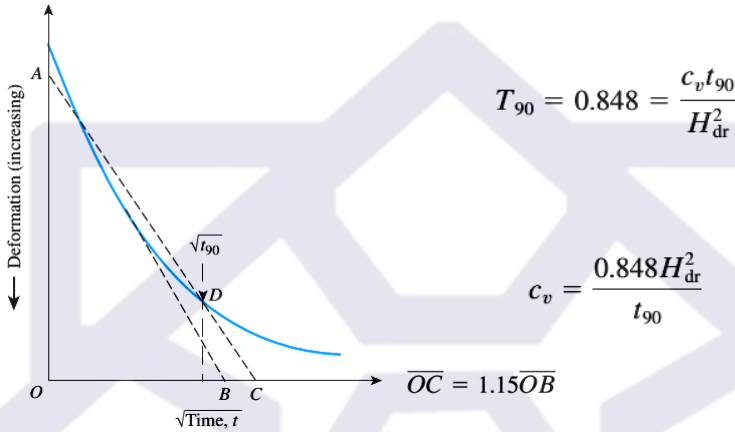
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

88

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

روش جذر زمان



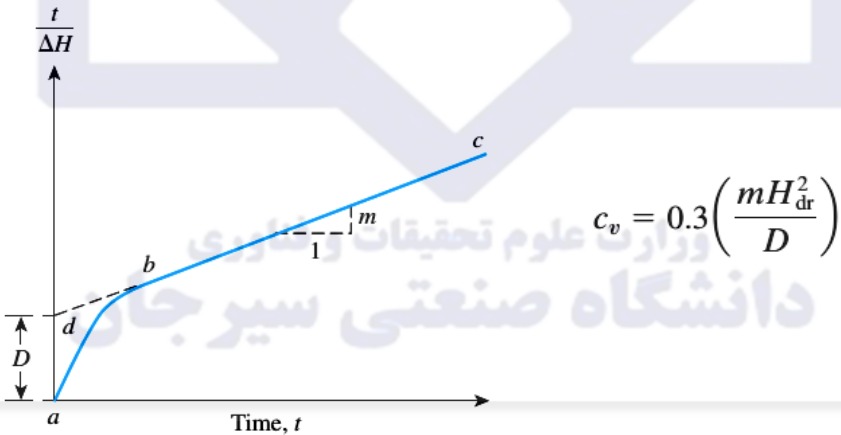
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

89

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

روش سهمی



دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

90

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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.

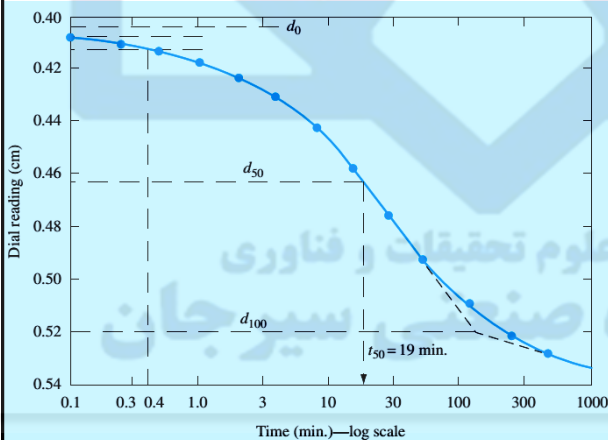
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

91

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۷



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

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

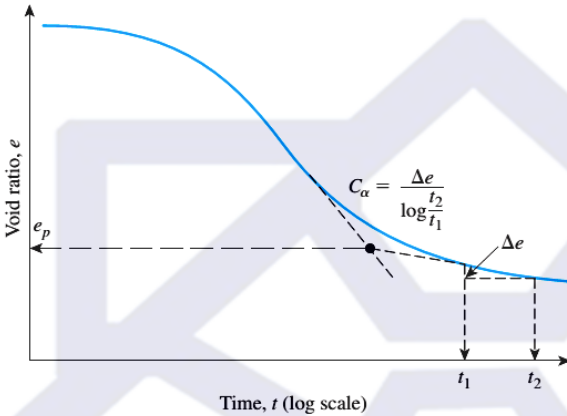
دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

92

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 پیشرفته

93

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~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 پیشرفته

94

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

 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 $\approx 0.075 \pm 0.01$

تحکیم ثانویه

✓ نشست ناشی از تحکیم ثانویه در خاک های آلی و خاک های غیر آلی با قابلیت فشرده‌گی 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.

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

اصلاح مقدار نشست حاصل از تحکیم سه بعدی

- ✓ آزمایش تحکیم یک آزمایش تک محوری است و تغییر شکل‌های جانبی را لحاظ نمی‌کند.
- ✓ در این روش کلیه تنش‌های وارده به نمونه خاک در ابتدا به تنش آب منفذی تبدیل می‌شوند.
- ✓ تحکیم یک بعدی تنها در لایه های رس نازک که ضخامت آنها در مقایسه با سطح بارگذاری ناچیز باشد، صادق است.
- ✓ در صورت نقض هر یک از این شرایط نشست تحکیمی کل باید اصلاح شود.

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

97

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

اصلاح مقدار نشست حاصل از تحکیم سه بعدی

✓ Skempton-Bjerrum, 1960

$$S_c^c = \mu S_c$$

ضریب μ	نوع خاک
۱/۲ الی ۱/۰	رس نرم و حساس
۱/۰ الی ۰/۶	رس تحکیم عادی یافته
۰/۷ الی ۰/۴	رس کمی تحکیم یافته
۰/۴ الی ۰/۲۵	رس بسیار تحکیم یافته

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

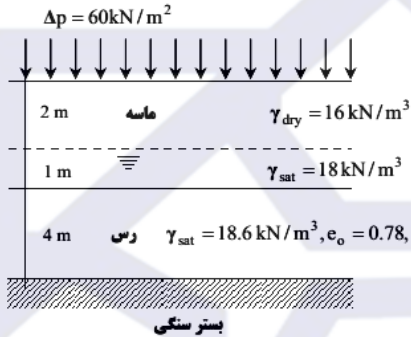
98

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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 پیشرفته

99

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۵

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

$$P_o < P_c \rightarrow \text{OCR} = \frac{P_c}{P_o} = \frac{140}{57.2} = 2.447$$

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

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

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

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

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

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

100

© Ali Reza Ghanizadeh, Ph.D

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
- $\Delta\sigma' = 970$ lb/ft²
- 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 پیشرفته

101

<http://civil.sirjantech.ac.ir/~ghanizadeh>

مثال ۶

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

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

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

$$e_p = 0.8 - 0.038 = 0.762$$

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

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

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

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

دانشگاه صنعتی سیرجان

مکانیک خاک پیشرفته

102