
WORKSHOP HATTI SEEPAGE & KONSOLIDASI 19 Mei 2021

BIGMAN M. HUTAPEA
KK-GEOTEKNIK FTSL – ITB
ANGGOTA HATTI

BMH-Mei 2021

1

Latar Belakang

- Pengalaman pembicara sebagai salah satu anggota tim sertifikasi Ahli Madya Geoteknik HATTI menunjukkan bahwa masih banyak peserta yang “lupa” bagaimana menghitung penurunan konsolidasi berdasarkan teori Terzaghi
- Pembicara sebagai seorang yang berpraktek dalam bidang geoteknik tahu persis bahwa topik ini sangat sering dijumpai di dunia nyata. Sebagai contoh masalah embankment on soft soils adalah masalah “sehari-hari” yang akan dihadapi oleh seorang ahli geoteknik.
- Oleh karena itu, pembicara sebagai anggota senior dan pembina HATTI menganggap adalah **kewajiban** pengurus HATTI untuk menerangkan/menjelaskan lebih detail kedua topik ini untuk para anggota.
- Dengan latar belakang inilah workshop ini dilaksanakan.

BMH-Mei 2021

2

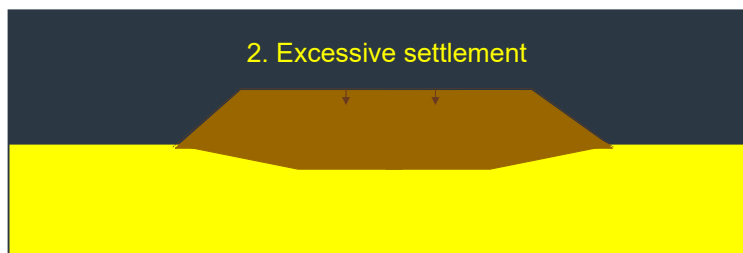
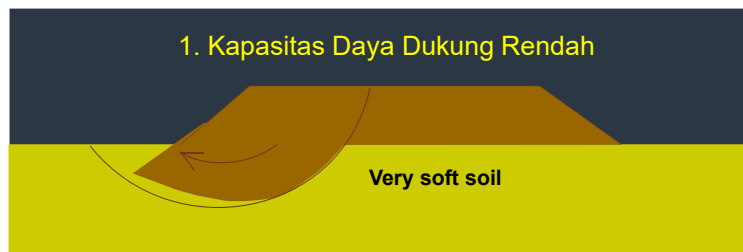
Tujuan

- Tujuan utama adalah agar para peserta dapat melakukan analisis masalah konsolidasi yang merupakan dasar dari ilmu Mekanika Tanah; serta pemakaian pre-loading dan kombinasi pre-loading dengan PVD untuk mempercepat proses konsolidasi.
- Untuk “memperkuat” kemampuan melakukan analisis tersebut, maka disampaikan juga “sedikit” latar belakang teori dari kedua topik tersebut beserta beberapa contoh soal.
- Semoga tujuan ini dapat tercapai sebagai wujud pertanggung jawaban asosiasi terhadap anggotanya.

BMH-Mei 2021

3

Permasalahan timbunan di atas tanah lunak

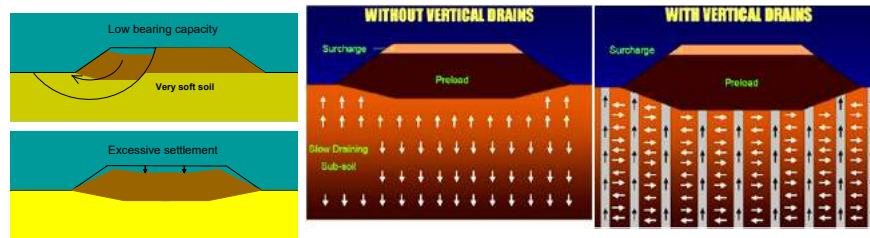


BMH-Mei 2021

4

Timbunan di atas tanah lunak (embankment on soft soils)

- Daya dukung tanah yang sangat lunak akan mengganggu stabilitas dari timbunan. Hal ini menyebabkan tinggi timbunan yang dapat dilakukan akan sangat terbatas. Sehingga untuk timbunan yang tinggi perlu dilakukan secara bertahap atau diberikan perkuatan, antara lain dengan menggunakan berm, geotextiles, stone column, dll.
- Penurunan konsolidasi dari tanah yang cukup besar dan akan memakan waktu yang lama. Apabila proses konsolidasi ini tidak dipercepat, maka pembangunan struktur di atasnya harus menunggu waktu yang cukup lama (bertahun-tahun). Penurunan konsolidasi dapat dipercepat antara lain dengan menggunakan kombinasi prefabricated vertical drains dan pre-loading. Targetnya, penurunan ini harus selesai pada saat konstruksi, sehingga pada saat operasional penurunan sudah dapat diabaikan.



BMH-Mei 2021

5

Topik yang dibicarakan

- Sistem Particulate dan Multi Phase
- Review aliran air dalam tanah
- Review 1D Terzaghi consolidation theory
- Contoh soal yang mencakup:
 - analisis penurunan konsolidasi,
 - mempercepat proses konsolidasi dengan pre-loading,
 - kombinasi pre-loading dengan PVD

BMH-Mei 2021

6

Karakteristik tanah

SISTIM PARTICULATE DAN MULTI PHASE

BMH-Mei 2021

7

Sistem *Particulate & Multi Phase*

- Perbedaan utama antara tanah dan material pondasi yang lain adalah kenyataan bahwa tanah merupakan suatu *particulate system*. Maksudnya tanah tersebut terdiri dari gabungan beberapa partikel yang berbeda dan bukan terdiri dari hanya satu *continuum* (*a single solid mass*). Partikel-partikel tersebut diikat untuk membentuk suatu massa tanah. Akan tetapi ikatan antara partikel tanah tidak sekuat ikatan yang ada pada suatu *continuum* sehingga partikel tanah tersebut masih dapat bergerak relatif satu terhadap yang lain. Partikel tanah tersebut merupakan partikel yang *solid* sehingga gerakan antara partikel tanah yang terjadi tidak semudah gerakan dari suatu *fluid*. **Hal inilah yang membedakan mekanika tanah dari mekanika benda padat ataupun dari mekanika fluida.**
- Sifat-sifat teknis dari tanah (misalnya *strength* dan *compressibility*) ditentukan juga oleh susunan (*arrangement*) dari partikel-partikel dan interaksi diantara partikel tersebut disamping sifat masing-masing partikel.

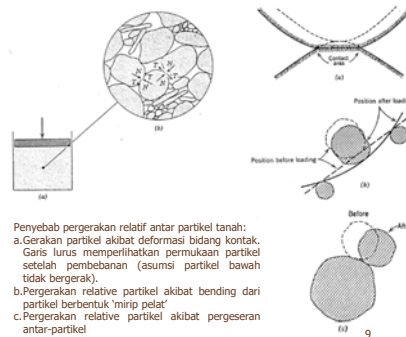
BMH-Mei 2021

8

Beberapa konsekuensi yang timbul akibat tanah merupakan Sistem *Particulate & Multi Phase* (1/5)

1. Deformasi dari suatu massa tanah sangat dipengaruhi oleh interaksi dari partikel-partikel tanah, terutama oleh *sliding* diantara partikel. *Sliding* diantara partikel merupakan suatu deformasi yang *nonlinear* dan *irreversible*. Oleh karena itu perilaku hubungan antara tegangan dan regangan tanah akan bersifat *nonlinear* dan *irreversible*.

- Gambar di samping menunjukkan suatu potongan dari sebuah box yang berisi tanah kering. Pada gambar tersebut ditunjukkan juga sebuah piston yang digunakan untuk memberikan beban vertikal terhadap tanah.
- Dari gambar dapat dilihat bahwa beban yang bekerja ditransfer kepada tanah melalui: gaya-gaya kontak (*contact forces*) yang bekerja diantara partikel-partikel tanah yang berdekatan. Gaya-gaya ini akan menyebabkan partikel tanah terdeformasi.
- Gaya-gaya kontak tersebut dapat diuraikan menjadi: komponen gaya normal N dan gaya geser T .



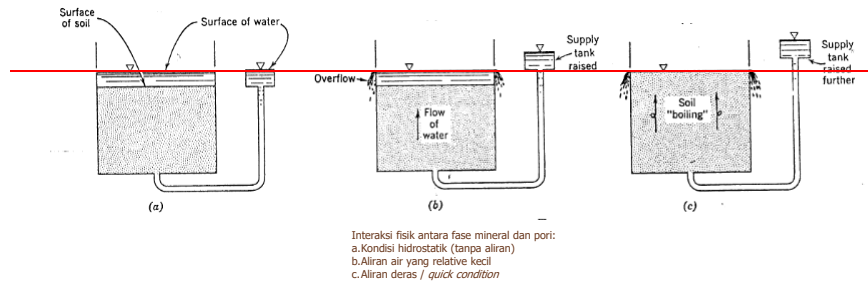
Beberapa konsekuensi yang timbul akibat tanah merupakan Sistem *Particulate & Multi Phase* (2/5)

2. Ruangannya yang ada diantara partikel tanah disebut sebagai *pore spaces*, yang umumnya terisi oleh air dan/atau udara. Sehingga tanah merupakan suatu sistem *multiphase* yang terdiri dari *phase mineral* yang disebut sebagai *mineral skeleton* dan *pore phase*. Sehingga material yang berada pada pore phase akan mempengaruhi proses terjadinya gaya-gaya pada bidang kontak antar partikel.



Beberapa konsekuensi yang timbul akibat tanah merupakan Sistem *Particulate & Multi Phase* (3/5)

3. Air dapat mengalir melalui tanah dan akan berinteraksi dengan *mineral skeleton* yang mana akan mengubah besarnya gaya-gaya pada bidang kontak untuk selanjutnya hal ini akan mempengaruhi perilaku pemampatan dan kuat geser dari tanah. (case: SEEPAGE).

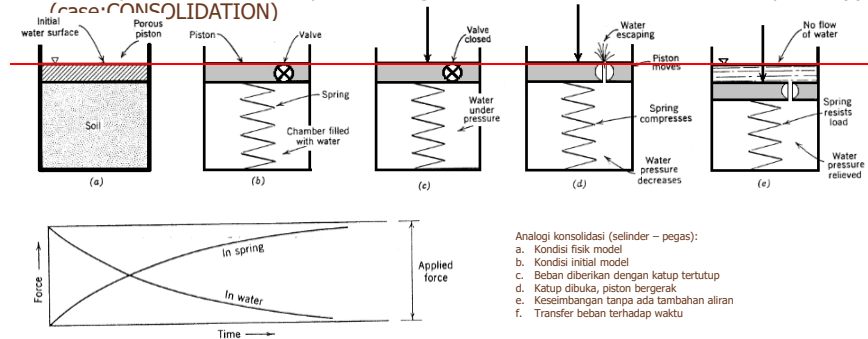


BMH-Mei 2021

11

Beberapa konsekuensi yang timbul akibat tanah merupakan Sistem *Particulate & Multi Phase* (4/5)

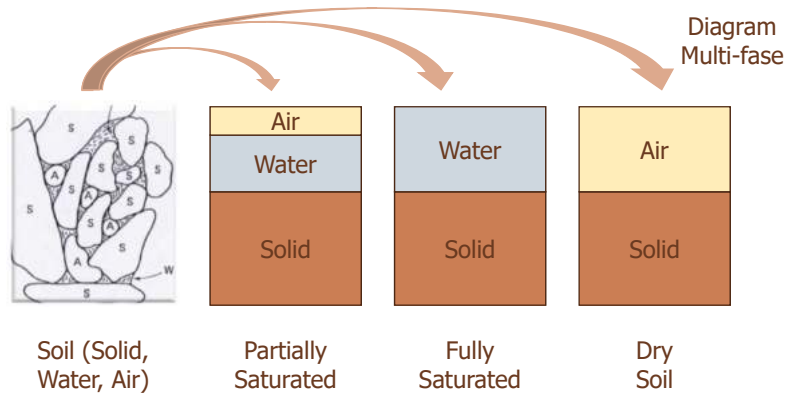
4. Bila beban diberikan dengan kondisi valve tertutup (c) maka sebagian besar beban akan dipikul oleh air. Bila valve dibuka (d), maka tekanan air akan berkurang dan spring mulai memikul beban yang cukup besar. Akhirnya (e) beban akan dipikul seluruhnya oleh spring dan tekanan air kembali ke kondisi semula yaitu hydrostatic. Perubahan beban yang bekerja pada spring akan sangat tergantung pada kecepatan keluarnya air dan merupakan fungsi dari waktu seperti terlihat pada (f).



BMH-Mei 2021

12

Beberapa konsekuensi yang timbul akibat tanah merupakan Sistem *Particulate* & *Multi Phase* (5/5)



BMH-Mei 2021

13

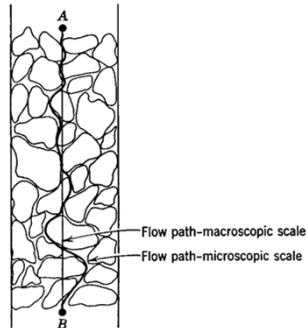
Aliran Air dalam Tanah

• ————— •
PERSAMAAN LAPLACE DAN PERSAMAAN KONTINUITAS

BMH-Mei 2021

14

Aliran Air 1-D Melalui *Porous Media*



Flow Path in Soil

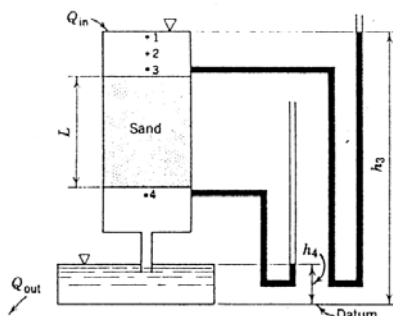
- Gambar memperlihatkan aliran air dari titik A menuju titik B.
- Air tersebut tidak mengalir mengikuti suatu garis lurus dengan kecepatan yang konstan, akan tetapi air tersebut akan mengalir berliku-liku seperti terlihat pada Gambar disamping.
- Pada persoalan geoteknik air tersebut dapat diasumsikan mengalir dari A ke B mengikuti suatu garis lurus dan dengan kecepatan tertentu.

BMH-Mei 2021

15

AK1

Hukum Darcy



Persamaan Darcy:

$$Q = k \frac{h_3 - h_4}{L} A = kiA$$

$$Q = vA$$

dimana:

$$v = k \frac{h_3 - h_4}{L} = ki$$

dimana:

v = kecepatan pengaliran,

i = hydraulic gradient

BMH-Mei 2021

16

Slide 16

AK1 Apakah perlu tambahan materi untuk nilai k (hydraulic conductivity)?
Aksan Kawanda, 8/29/2020

Persamaan Bernoulli

$$h = h_p + h_e + h_v = \text{konstan}$$

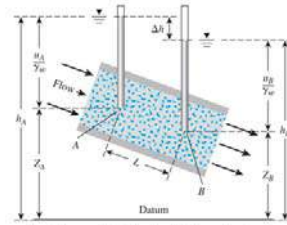
dimana:

- h = total head,
- $h_p = \frac{u}{\gamma_w}$ = pressure head,
- $h_e = z$ = elevation head,
- $h_v = \frac{v^2}{2g}$ = velocity head,
- u = tekanan air pori,
- z = elevasi dari suatu titik terhadap suatu datum,
- v = kecepatan pengaliran,
- g = percepatan gravitasi.

Karena kecepatan rembesan dalam tanah sangat kecil, maka *velocity head* dapat diabaikan, sehingga persamaan *total head* menjadi:

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z$$

BMH-Mei 2021



Pressure, elevation, and total heads for flow of water through soil

Tinggi *head loss* antara titik A dan B (Δh) dapat dituliskan:

$$\Delta h = h_A - h_B = \left(\frac{u_A}{\gamma_w} + z_A \right) - \left(\frac{u_B}{\gamma_w} + z_B \right)$$

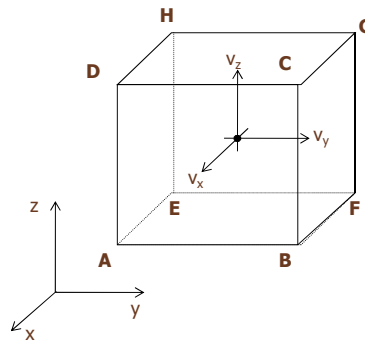
Sehingga *head loss* (Δh) **antara 2 titik** dapat dinyatakan secara non-dimensi sebagai:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

Dimana i adalah *hydraulic gradient* dan L adalah **panjang alir** dari titik A ke B

17

Persamaan Kontinuitas Aliran Air dalam Tanah (1/5)



- Saturated Flow
- Solids and fluid are incompressible
- v_x , v_y dan v_z adalah kecepatan pengaliran air arah x , y dan z pada titik berat kubus.

BMH-Mei 2021

18

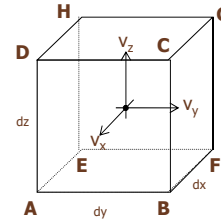
Persamaan Kontinuitas Aliran Air dalam Tanah (2/5)

Volume air yang masuk melalui sisi EFGH per unit time

$$\left(v_x - \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz$$

Air yang keluar melalui sisi ABCD

$$\left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz$$



Penjumlahan air yang masuk & keluar pada arah x:

$$\left(v_x - \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz - \left(v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{dx}{2} \right) dy dz = - \frac{\partial v_x}{\partial x} dx dy dz$$

dengan cara yang sama akan diperoleh untuk arah y:

$$\left(v_y - \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz - \left(v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \frac{dy}{2} \right) dx dz = - \frac{\partial v_y}{\partial y} dx dy dz$$

dan arah z:

$$\left(v_z - \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dy dx - \left(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z} \frac{dz}{2} \right) dy dx = - \frac{\partial v_z}{\partial z} dx dy dz$$

BMH-Mei 2021

19

Persamaan Kontinuitas Aliran Air dalam Tanah (3/5)

- Total volume air yang masuk dan keluar pada arah x, y dan z per satuan waktu menjadi:

$$- \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) dx dy dz = \frac{\partial V_w}{\partial t}$$

- Atau:

$$- \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{1}{V_0} \frac{\partial V_w}{\partial t}$$

dimana $V_0 = dx dy dz$ adalah volume awal dari elemen tersebut

- Persamaan tsb dapat ditulis juga sb: dimana $W_w =$ weight of water per unit volume of soil

$$- \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial W_w}{\partial t} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t}$$
- Persamaan ini disebut sebagai **persamaan kontinuitas**

BMH-Mei 2021

20

Persamaan Kontinuitas Aliran Air dalam Tanah (4/5)

- **Penurunan Persamaan Laplace**

Untuk kondisi steady state: $-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = 0$

Ingat Persamaan Darcy: $v_x = k_x i_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}$

$$v_y = k_y i_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = k_z i_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

Substitusikan kedua persamaan diatas, diperoleh: $\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$

BMH-Mei 2021

21

Persamaan Kontinuitas Aliran Air dalam Tanah (5/5)

- **Penurunan Persamaan Laplace**

Untuk tanah homogen, dimana k konstan terhadap x, y, dan z:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Untuk kondisi isotropic, dimana $k_x = k_y = k_z$:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Untuk aliran 2 dimensi:

$$\nabla^2 h = \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Dimana h = total head

Persamaan tersebut merupakan persamaan dasar untuk *steady flow* (2-D dan isotropik) yang juga dikenal sebagai **persamaan Laplace**, dimana perubahan *gradient* (arah x) + perubahan *gradient* (arah z) = 0

BMH-Mei 2021

22

Solusi Masalah *Seepage*

- *Closed-form (exact) solutions*
- *Model solutions: centrifuge tests dll*
- *Approximate Solutions*
 - *Graphical method* → **Flow net**
(*Sekumpulan equipotential lines dan flow lines*)
 - *Numerical method: SEEP/W, PLAXIS*

Catatan: masalah seepage tidak dibahas pada workshop ini

BMH-Mei 2021

23



University of Colorado, Boulder, USA

BMH-Mei 2021

24

KONSOLIDASI

1D-TERZAGHI CONSOLIDATION THEORY

BMH-Mei 2021

25

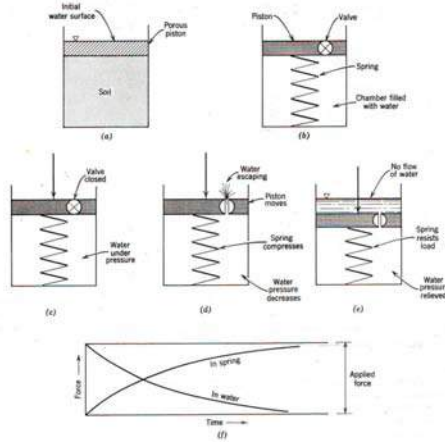
Mathematical Derivation

- Assumptions:
 - Clay-water system is homogeneous
 - Saturation is complete
 - Compressibility of water is negligible
 - Compressibility of soil grains is negligible
 - Water flows only in one direction (in direction of loading)
 - Darcy's law is valid

BMH-Mei 2021

26

Sistem *Particulate & Multi Phase*



4. Bila beban yang bekerja pada massa tanah berubah dengan cepat, maka perubahan ini akan dipikul baik oleh mineral skeleton maupun oleh pore fluid. Perubahan tekanan air pori ini akan menyebabkan pergerakan air dalam massa tanah sehingga perilaku tanah tersebut akan berubah dengan waktu.

BMH-Mei 2021

27

Penurunan Konsolidasi 1-D Terzaghi

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

- Aliran air dan pemampatan hanya terjadi pada arah vertikal
- Lateral strain = nol
- Uji Oedometer
- c_v = koef konsolidasi vertikal
- u = tekanan **ekses** air pori

BMH-Mei 2021

28

Persamaan Kontinuitas Aliran Air dalam Tanah (3/5)

- Total volume air yang masuk dan keluar pada arah x , y dan z per satuan waktu menjadi:

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) dx dy dz = \frac{\partial V_w}{\partial t}$$
- Atau:

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = \frac{1}{V_0} \frac{\partial V_w}{\partial t}$$

dimana $V_0 = dx dy dz$ adalah volume awal dari elemen tersebut
- Persamaan tsb dapat ditulis juga sbb: dimana $W_w =$ weight of water per unit volume of soil

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial W_w}{\partial t} = \frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t}$$
- Persamaan ini disebut sebagai **persamaan kontinuitas**

BMH-Mei 2021

29

Mathematical Derivation

$$-\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial x}\right) = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial W_w}{\partial t}$$

$$v_x = k_x i_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = k_y i_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

$$v_z = k_z i_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial W_w}{\partial t}$$

BMH-Mei 2021

30

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial W_w}{\partial t} \quad (*)$$

$W_w =$ weight of water / unit volume of soil
 $W_w = n_v \cdot W_s$, $n_v =$ water content; $W_s =$ weight of solid / unit volume of soil
 $n_v = \frac{s \cdot e}{G_s}$; $s =$ degree of saturation; $G_s =$ specific gravity = γ_s / γ_w

\therefore RHS (*): $\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial W_w}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{s \cdot e}{G_s} \cdot W_s \right) = \frac{1}{\gamma_w} \frac{W_s}{G_s} \frac{\partial e}{\partial t}$

Assume: W_s & G_s : constant; $s_r = 100\% = 1$.

Void = water	e	$e \cdot \gamma_w$
Solid	1	$\gamma_s \cdot G_s = 1 \cdot G_s \cdot \gamma_w$
	$V_t = 1 + e$	$W_t = \gamma_w (e + G_s)$

$W_s = \frac{\text{weight of solid}}{\text{Volume}} = \frac{\gamma_w \cdot G_s}{1 + e} \Rightarrow \frac{W_s}{\gamma_w \cdot G_s} = \frac{1}{1 + e}$

\therefore RHS (*): $\frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial W_w}{\partial t} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{W_s}{G_s} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{1}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial t}$

Maka: (*) menjadi:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

BMH-Mei 2021 31

$h = h_{ss} + h_{er} = (h_{e,ss} + h_{e,w}) + (h_{e,er} + h_{p,er})$

For steady state flow: $\nabla^2 h_{ss} = 0$ (Laplace equation)

For transient flow: $h = h_{er} = h_{e,er} + h_{p,er} = h_{p,er}$, and:

h_{ss} is invariant in time & $h_{e,er}$ is also constant.

$\therefore h = h_{p,er} = u / \gamma_w$; $u =$ excess pwp.

$$\Rightarrow k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{1}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial t}$$

$h = \frac{u}{\gamma_w} \Rightarrow k_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\gamma_w}{1 + e} \frac{\partial e}{\partial t}$

$u =$ excess pwp (fungsi waktu)

$u_w = u_0 + u(t)$

BMH-Mei 2021 32

- Aliran air **tiga arah** sementara compression hanya pada **1 arah** yaitu vertikal.

Mathematical Derivation

$$k_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\gamma_w}{1+e_0} \frac{\partial e}{\partial t}$$

Terzaghi: aliran air dan compression hanya pada arah vertikal

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -a_v \frac{\partial \sigma}{\partial t} = -a_v \frac{\partial}{\partial t} (\sigma - u_w) = -a_v \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u_w}{\partial t} \right) = -a_v \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{\gamma_w a_v}{k_z(1+e_0)} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial t} - \frac{\partial u}{\partial t} \right); \text{ beban konstan: } \frac{\partial \sigma}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\gamma_w a_v}{k_z(1+e_0)} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{c_v} \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$c_v = \frac{k_z(1+e_0)}{\gamma_w a_v} = \frac{k_z}{m_v \gamma_w} \text{ coeff of vertical consolidation}$$

$$m_v = \frac{a_v}{(1+e_0)} \text{ coeff of volume compressibility}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \text{ dimana } u = \text{tekanan ekses air pori}$$

BMH-Mei 2021

33

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

$u_e = \text{tekanan ekses air pori}$

$$u_e = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2u_{ie}}{M} \left(\sin M \frac{z}{H_d} \right) e^{-M^2 T_v}$$

$$M = \frac{\pi}{2} (2m+1)$$

$$T_v = \frac{c_v t}{H_d^2}$$

$$\text{Degree of consolidation } U_z = 1 - \frac{u_e}{u_{ie}}$$

$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{z}{M} \left(\sin M \frac{z}{H_d} \right) e^{-M^2 T_v}$$

$$\text{Average degree of consolidation } \bar{U}_v = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$$

untuk $\bar{U} < 60\%$:

$$T = \frac{\pi}{4} U^2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2$$

untuk $\bar{U} > 60\%$:

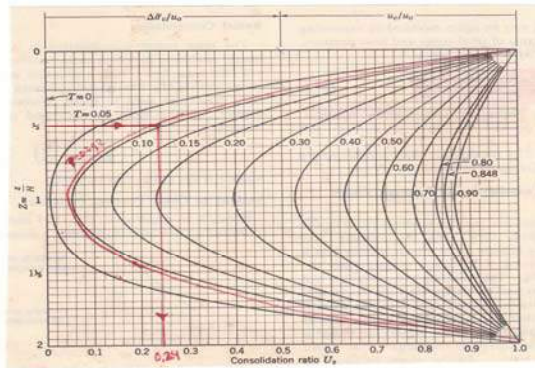
$$T = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$

BMH-Mei 2021

34

Degree of consolidation

- Based on amount dissipation of excess pore water pressure



$$U_z = 1 - \frac{u_e}{u_{ie}}$$

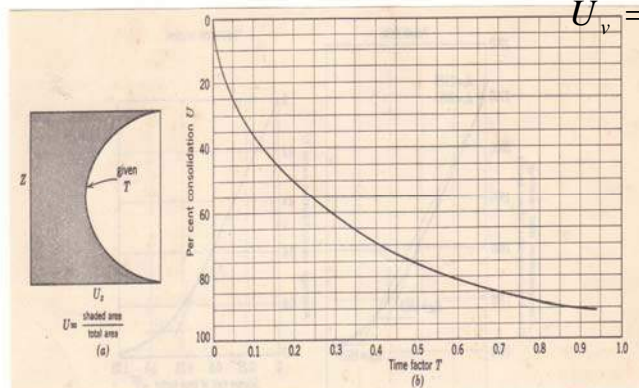
$$U_z = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{z}{M} \left(\sin M \frac{z}{H_d} \right) e^{-M^2 T_v}$$

BMH-Mei 2021

35

Average degree of consolidation

- Frequently desired average degree of consolidation over the whole layer of soil



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

untuk $\bar{U} < 60\%$:

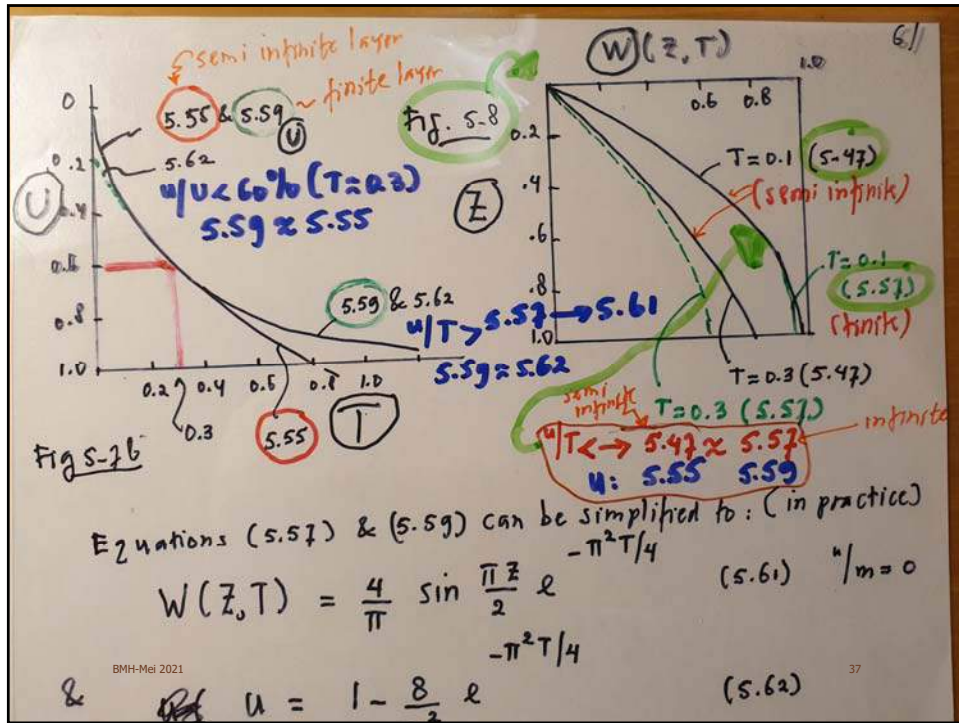
$$T = \frac{\pi}{4} U^2 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2$$

untuk $\bar{U} > 60\%$:

$$T = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%)$$

BMH-Mei 2021

36



Approximate relationship

- To quickly relate dimensionless U to dimensionless T , use:

$$T \leq 0.2 \quad U(T) = \sqrt{\frac{4T}{\pi}}$$

$$T > 0.2 \quad U(T) = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\pi^2 T/4}$$

$$T = \frac{c_v t}{(H_d)^2}$$

Contoh Soal:

$h = 7.0 \text{ m}$
 $\gamma_s = 22 \text{ kN/m}^3$
 Fill 99 kN/m^2
 $\gamma_c = 18.22 \text{ kN/m}^3$
 $c_v = 1.26 \text{ m}^2/\text{tahun}$
 $\gamma_t = 16.34 \text{ kN/m}^3$

at elevation -8.37 m
 and 4 months after loading:
 a) Excess pore?
 b) pore?
 c) vertical eff. stress?

Double drainage: $2H = 11.6 - 7.3 = 4.3 \text{ m}$
 $z = \frac{z}{H} = \frac{8.37 - 7.3}{2.15} = 0.498 \approx 0.5$ *dari grafik didapat*
 $T = \frac{t \cdot c_v}{H^2} = \frac{(4/12) \cdot 1.26}{(2.15)^2} = 0.092$ *dari grafik didapat*
 $U_z(T) = 0.24$

a) $u_z = 1 - \frac{u_e}{u_{ie}} = 0.24 \Rightarrow$

$\frac{u_e}{u_{ie}} = 0.76 \Rightarrow u_e = 0.76 * 99 = 75.24 \text{ kPa}$

b) $u = u_{ss} + u_e = (8.37 - 2.9)(9.81) + 75.24 = 128.9 \text{ kPa}$

c) $\sigma_v' = \sigma_{v0}' + \Delta\sigma_v'$

$= [(0.9)(18.22) + (7.3 - 2.9)(18.22 - 9.81) + (8.37 - 7.3)(16.34 - 9.81)] + (0.24)(99)$
 $= 89.2 \text{ kN/m}^2$

Average degree of consolidation $U(t)$
 (Derajat konsolidasi rata-rata) $U(t)$

$U(t) = \frac{\text{penurunan pada waktu } t}{\text{penurunan ultimate at end of consolidation}} = \frac{S_t}{S_u}$

Bila diketahui $S_u = 0.635 \text{ m}$
 maka $t = 4 \text{ bulan} \Rightarrow T = 0.092$
 dari grafik $U(t) = 0.35$ *Kurva (2)*
 maka: $S_t = (0.35)(0.635 \text{ m}) = 0.22 \text{ m}$

Kalan kondisiya $T_{0.5}$:

Single drainage: $H = 4.3 \text{ m}$
 $z = \frac{8.37 - 7.3}{4.3} = 0.25$
 $T = \frac{(4/12) \cdot (1.26)}{4.3^2} = 0.023$
 dari grafik didapat: $U(z, T) = 0.12$ *Kurva (1)*

- a) $u_e = 99(1 - 0.12) = 87.1 \text{ kN/m}^2$
- b) $u = 53.7 + 87.1 = 140.8 \text{ kPa}$
- c) $\sigma_v' = 60.4 + (99)(0.12) = 72.3 \text{ kPa}$

Oedometer test (uji konsolidasi)

BMH-Mei 2021

41

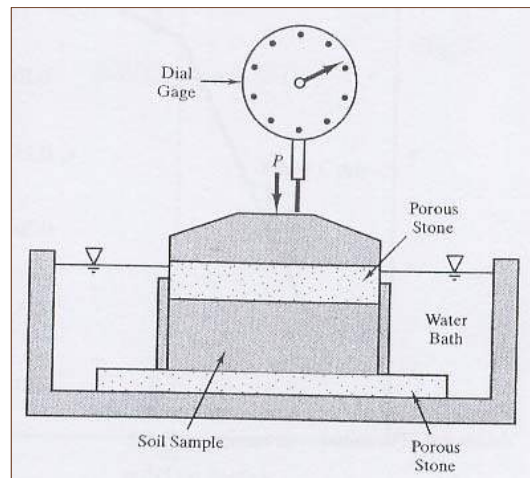
Oedometer test (uji konsolidasi)

- Untuk mencari parameter konsolidasi dari Terzaghi: C_c (compression index), C_s (swelling index), p_c (tekanan pra-konsolidasi), c_v (koefisien konsolidasi arah vertical).
- Ingat: salah satu asumsi dari 1D-Terzaghi consolidation theory adalah aliran air dan deformasi tanah terjadi hanya pada arah vertical. Hal ini dimodelkan dalam uji oedometer test.

BMH-Mei 2021

42

Oedometer Test

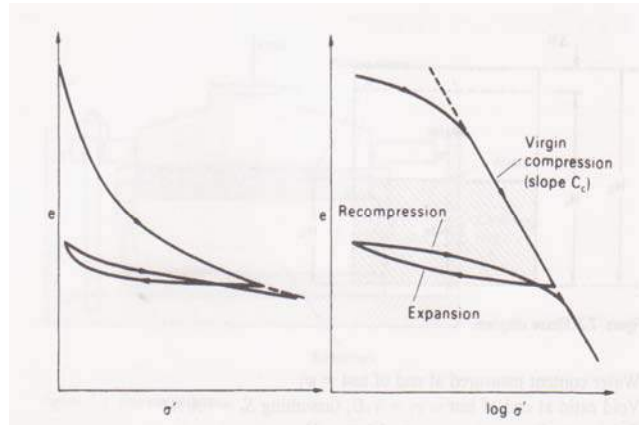


Cross section of a consolidometer

BMH-Mei 2021

44

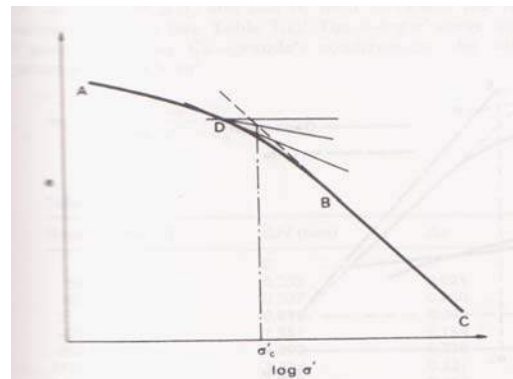
Oedometer Test



BMH-Mei 2021

45

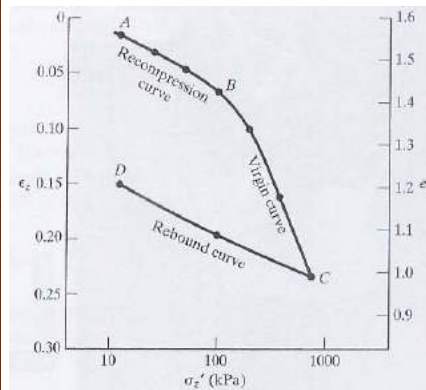
Tekanan Prakonsolidasi



BMH-Mei 2021

46

Oedometer Test



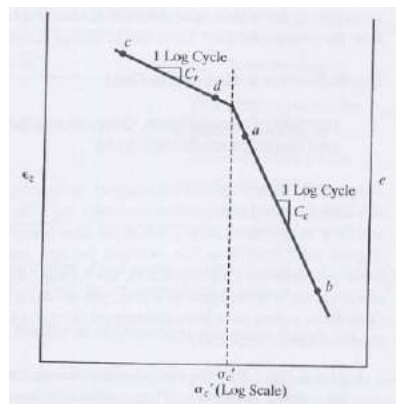
- Test Results
Compression Index:

$$C_c = -\frac{de}{d \log \sigma'_c}$$

BMH-Mei 2021

47

Oedometer Tests



- Compression Index

$$C_c = -\frac{e_a - e_b}{(\log \sigma'_z)_b - (\log \sigma'_z)_a}$$

- Recompression Index

$$C_r = -\frac{e_c - e_d}{(\log \sigma'_z)_d - (\log \sigma'_z)_c}$$

BMH-Mei 2021

48

Coefficient of consolidation

- Coefficient of consolidation c_v didapat melalui persamaan

$$c_v = \frac{T_i H^2}{t_i}$$

dimana T_i = time factor, H = panjang pengaliran maksimum, dan t_i = waktu yang diperlukan untuk mencapai $i\%$ konsolidasi

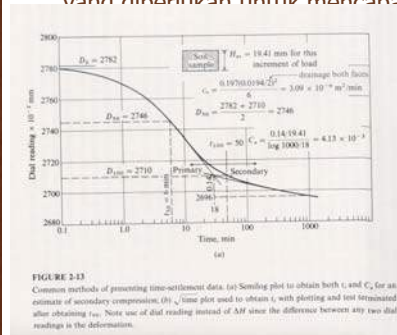
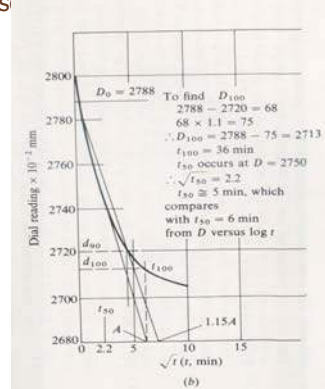


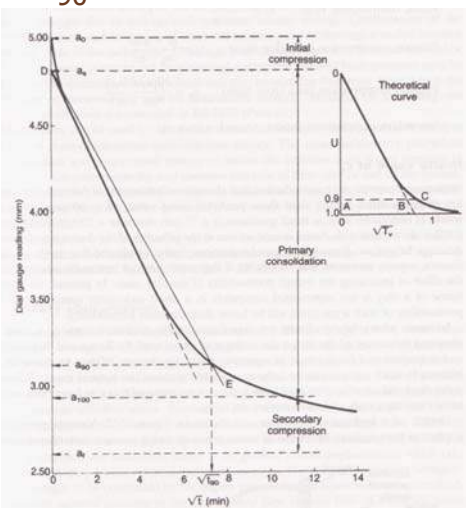
FIGURE 2-13 Common methods of presenting time-settlement data. (a) Semilog plot to obtain both C_v and C_c for an estimate of secondary compression. (b) \sqrt{t} time plot used to obtain t_i with plotting and test terminated after obtaining t_{50} . Note use of dial reading instead of ΔH since the difference between any two dial readings is the deformation.

BMH-Mei 2021



49

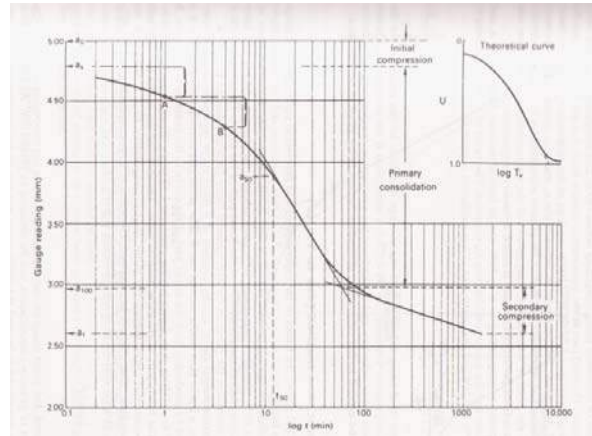
Mencari t_{90} – the root time method



BMH-Mei 2021

50

Mencari t50 – the log time method

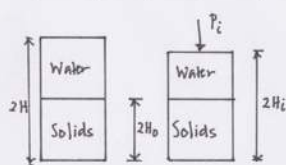


BMH-Mei 2021

51

OEDOMETER TEST

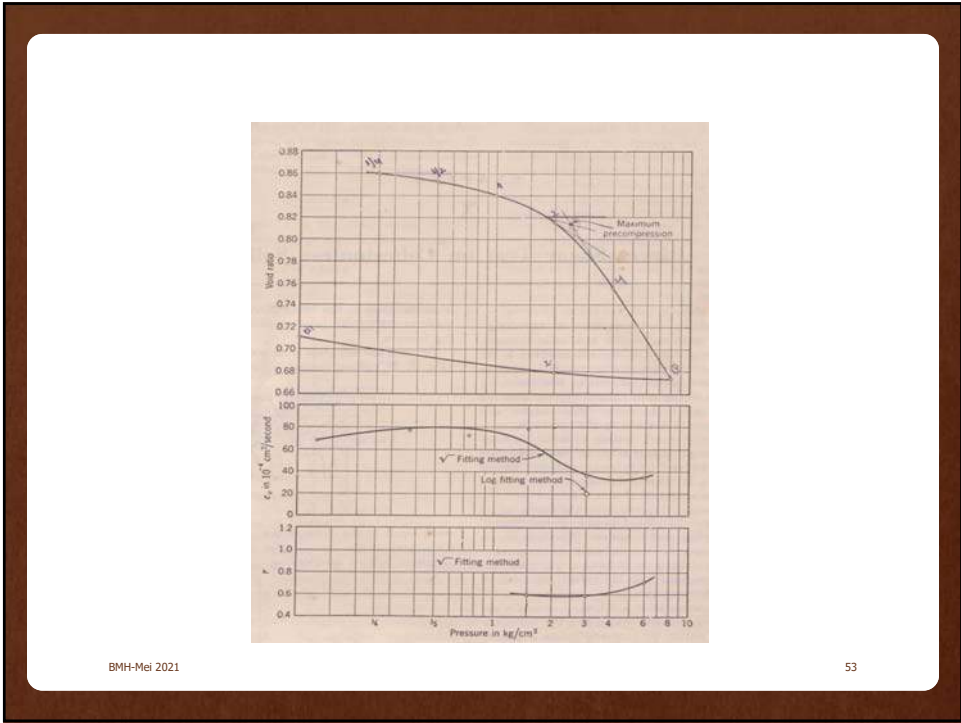
Applied pressure (kg/cm ²)	Final Dial (inch)	Dial Change (inch)	Specimen Height 2H (inch)	Void Height 2H - 2H ₀ (inch)	Void Ratio $e = \frac{2H - 2H_0}{2H_0}$	Fitting Time (seconds)		Coeff of Consolidation, cv	
						t ₅₀	t ₉₀	$\frac{0.848 H^2 / e_{90}}{\text{sq cm} / \text{seconds}}$	$\frac{0.197 H^2 / e_{50}}{\text{sq cm} / \text{seconds}}$
0	.34000	.00713	1.262	0.587	0.870	318	59	0.00683	0.00870
1/4	.33287	.00427	1.255	0.580	.860	276	66	.00777	.00758
1/2	.32860	.00836	1.250	.575	.852	284	58	.00725	.00860
1	.32024	.01744	1.242	.567	.840	264	95	.00790	.00510
2	.30280	.04184	1.225	.550	.815	540	216	.00368	.00214
4	.26176	.05414	1.184	.509	.755	516	201	.00354	.00212
8	.20762	.00417	1.129	.454	.673				
2	.21179	.02216	1.133	.458	.679				
0.1	.23395		1.155	.480	.711				



Initial sample height = $2H = 1.262$ inch
 Area = $A = 91.8 \text{ cm}^2$
 $2H_0 = \frac{W_s}{G_s \times \gamma_w \times A}$; $W_s = \text{weight of dry soil (solids) at the end of test.}$
 $= \frac{444.6}{2.83 \times 1 \times 91.8}$
 $= 1.71 \text{ cm} = 0.675 \text{ inch}$

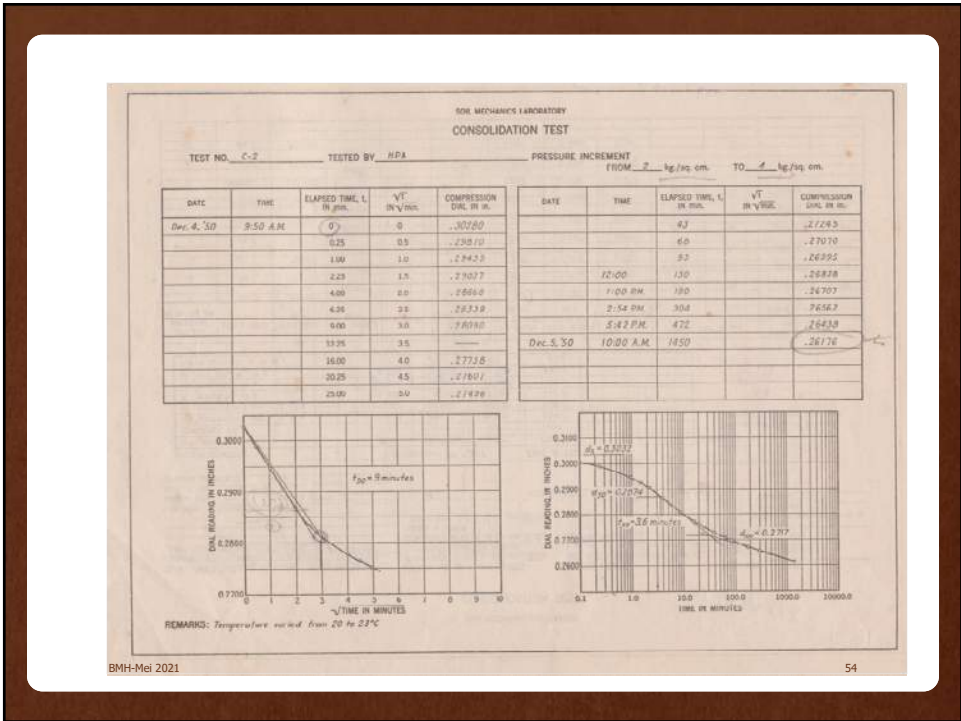
BMH-Mei 2021

52



BMH-Mei 2021

53



BMH-Mei 2021

54

Perhitungan penurunan

- Dibedakan atas:
 - Normally consolidated soil, dan
 - Over consolidated soil

penurunan:

$H_0 = \text{tinggi sampel mula}^3$ $V_0 = \text{volume sampel mula}^3 = H_0 A_0$
 $\Delta H = \text{penurunan sampel akibat beban } \sigma_v'$ $\Delta V = \text{penyusutan volume} = \Delta C$

$\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H_0}$ (1) $\epsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta C}{1+e_0}$ (2)

(kern $\epsilon_{lateral} = 0$, maka penyusutan volume, $\Delta V \approx \Delta H$)

Dari (1) & (2): $\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta C}{1+e_0} \Rightarrow \Delta H = H_0 \cdot \frac{\Delta C}{1+e_0}$ (3)

Deformetri test: $\sigma_v = \frac{\Delta C}{\Delta \sigma_v'}$ (4)

(4) \rightarrow (3): $\Delta H = H_0 \cdot \frac{\sigma_v \cdot \Delta \sigma_v'}{1+e_0}$ (5)

$\Delta H = H_0 \cdot m_v \cdot \Delta \sigma_v'$ (6)

dimana: $m_v = \frac{\Delta \epsilon_v}{\Delta \sigma_v'} = \frac{\sigma_v}{1+e_0}$

Kalau $C_c = \frac{\Delta C}{\Delta \log \sigma_v'}$, maka: $\Delta H = H_0 \cdot \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{\sigma_{v1}'}{\sigma_{v0}'}$ (7)

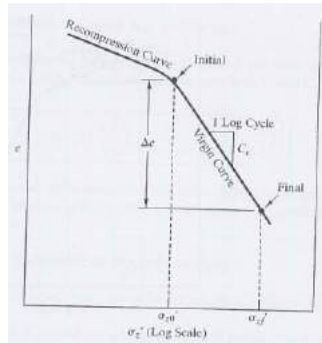
$\Delta \sigma_v' = \sigma_{v1}' - \sigma_{v0}'$
 $\sigma_{v1}' = \sigma_{v0}' + \Delta \sigma_v'$
 due to overburden due to external loads

Calculation of Consolidation Settlement

Normally consolidated soils

$$\sigma'_{zf} = \sigma'_{z0} + \Delta\sigma'_{z0}$$

σ'_{z0} = tekanan vertikal efektif akibat berat sendiri



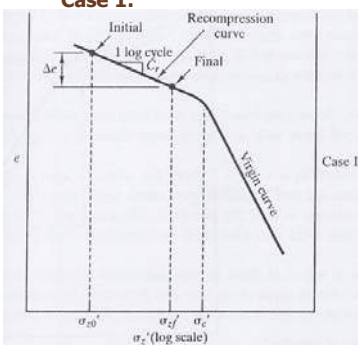
$$S = \sum \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_{zf}}{\sigma'_{z0}} \right)$$

BMH-Mei 2021

57

Overconsolidated Soils

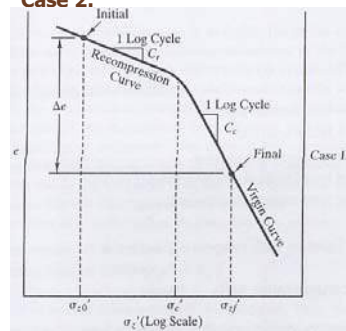
Case 1:



$$S = \sum \frac{C_r}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_{zf}}{\sigma'_{z0}} \right)$$

BMH-Mei 2021

Case 2:



$$S = \sum \left[\frac{C_r}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z0}} \right) + \frac{C_c}{1+e_0} H \log \left(\frac{\sigma'_{zf}}{\sigma'_c} \right) \right]$$

58

Mempercepat proses konsolidasi

- Menggunakan pre-loading
- Menggunakan vertical drains
- Menggunakan kombinasi pre-loading dan vertical drains.

BMH-Mei 2021

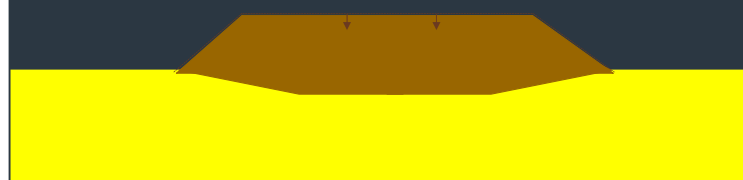
59

Permasalahan timbunan di atas tanah lunak

1. Kapasitas Daya Dukung Rendah



2. Excessive settlement

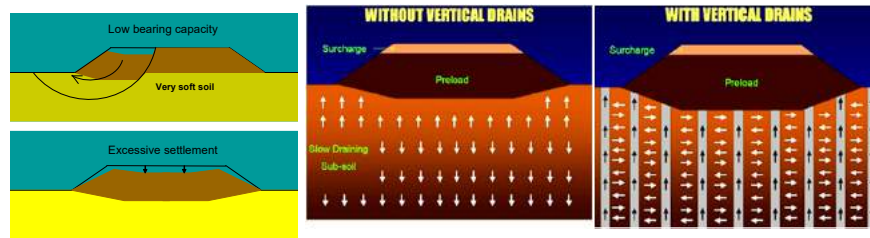


BMH-Mei 2021

60

Timbunan di atas tanah lunak (embankment on soft soils)

- Daya dukung tanah yang sangat lunak akan mengganggu stabilitas dari timbunan. Hal ini menyebabkan tinggi timbunan yang dapat dilakukan akan sangat terbatas. Sehingga untuk timbunan yang tinggi perlu dilakukan secara bertahap atau diberikan perkuatan, antara lain dengan menggunakan berm, geotextiles, stone column, dll.
- Penurunan konsolidasi dari tanah yang cukup besar dan akan memakan waktu yang lama. Apabila proses konsolidasi ini tidak dipercepat, maka pembangunan struktur di atasnya harus menunggu waktu yang cukup lama (bertahun-tahun). Penurunan konsolidasi dapat dipercepat antara lain dengan menggunakan kombinasi prefabricated vertical drains dan pre-loading. Targetnya, penurunan ini harus selesai pada saat konstruksi, sehingga pada saat operasional penurunan sudah dapat diabaikan.



BMH-Mei 2021

61

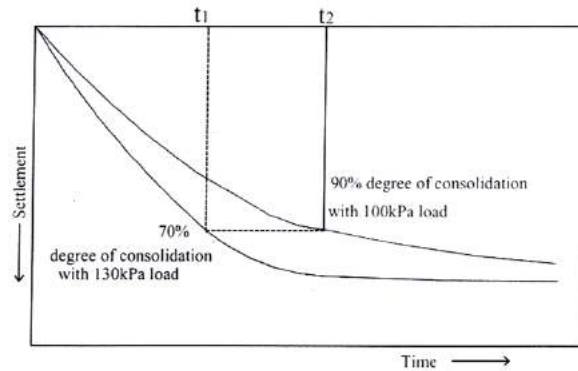
Perbaikan tanah dengan cara Precompression (pemampatan awal) dan Vertical Drains

- Precompression ialah teknik untuk memampatkan tanah dengan jalan memberikan beban sebelum beban yang sebenarnya bekerja.
- Preloading ialah cara yang dapat dilakukan untuk memberikan precompression. Cara tsb antara lain dengan memberikan beban timbunan, beban air, dll.
- Precompression technique (teknik pemampatan awal) dilakukan untuk:
 - a. Menghilangkan sebagian atau seluruh penurunan tanah akibat primary consolidation setelah selesai masa konstruksi (setelah beban maksimum yang direncanakan bekerja), dan
 - b. Mengurangi penurunan yang diakibatkan oleh secondary compression.
- Vertical drains digunakan untuk mempercepat proses primary consolidation dengan cara memperpendek jarak pengaliran.

BMH-Mei 2021

62

Preloading



BMH-Mei 2021

63

Aliran air arah radial – vertical drains

Proses terdispasinya tekanan eksese air pori pada arah radial diatur melalui persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial U_e}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 U_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_e}{\partial r} \right)$$

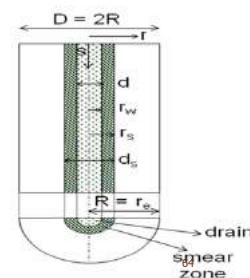
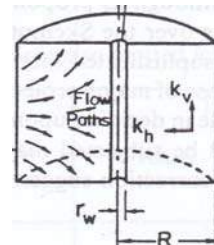
Untuk kasus vertical drain dan dengan asumsi kondisi equal strain, maka solusi dari persamaan di atas adalah:

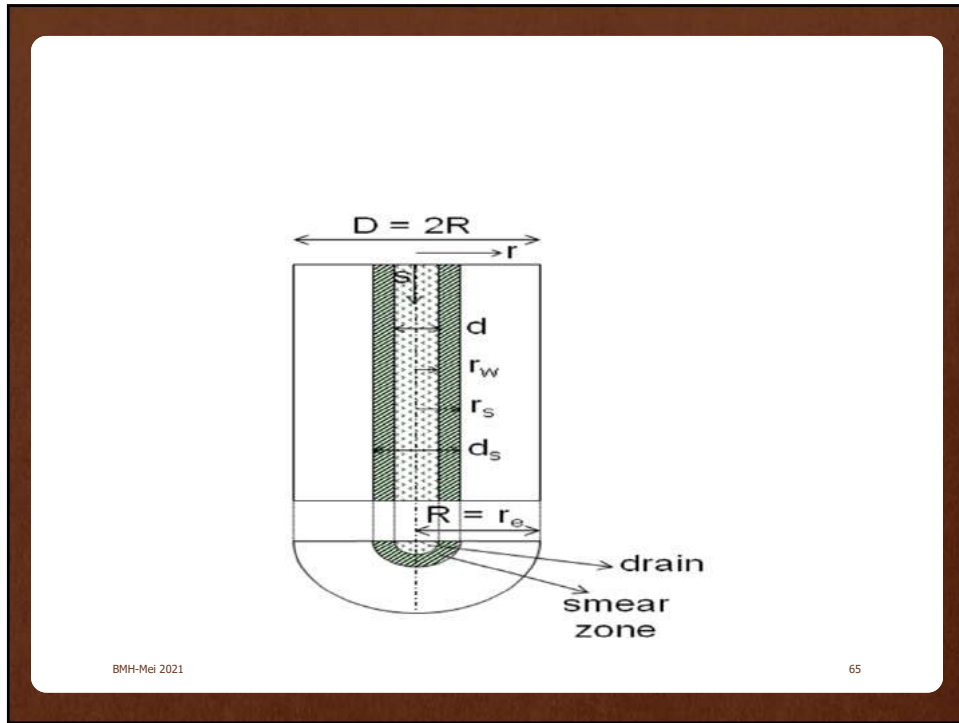
$$\bar{U}_h = 1 - \exp \left[\frac{-2T_h}{F(n)} \right]$$

dengan $T_h = \frac{C_h \cdot t}{r_e^2}$ $n = \frac{r_e}{r_w}$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{(3n^2 - 1)}{4n^2} + \frac{k_r}{r_w k} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2}$$

BMH-Mei 2021

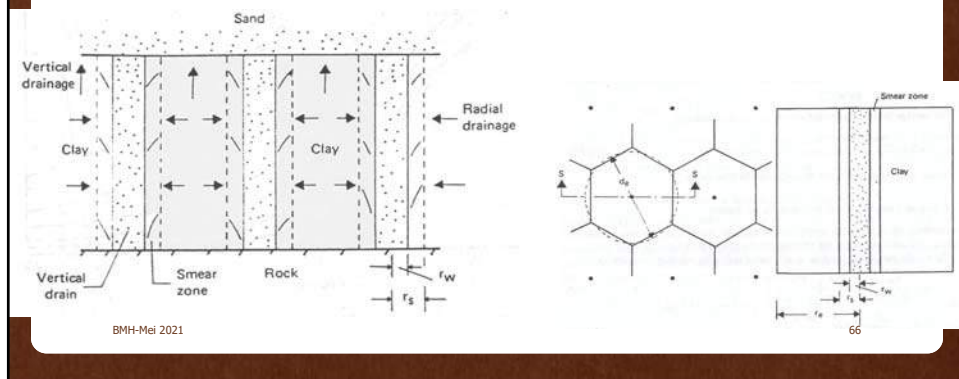




Aliran air arah vertikal dan arah radial

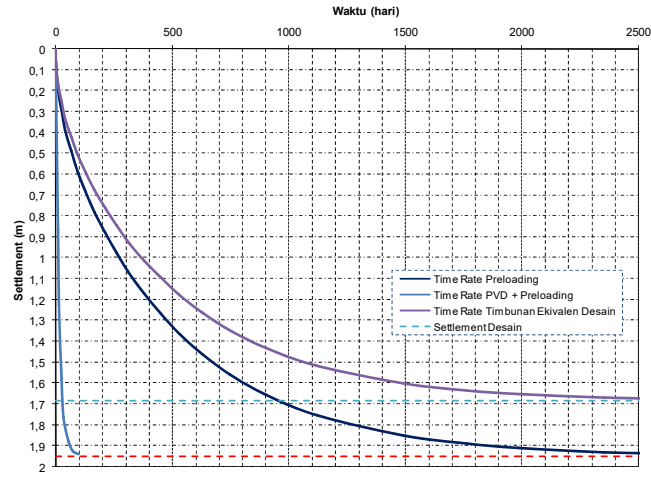
Proses konsolidasi untuk aliran dua arah ini diatur melalui persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\partial U_e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 U_e}{\partial z^2} + C_h \left(\frac{\partial^2 U_e}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U_e}{\partial r} \right) \qquad \bar{U}_{vh} = 1 - (1 - \bar{U}_v)(1 - \bar{U}_h)$$



Perbandingan waktu konsolidasi:

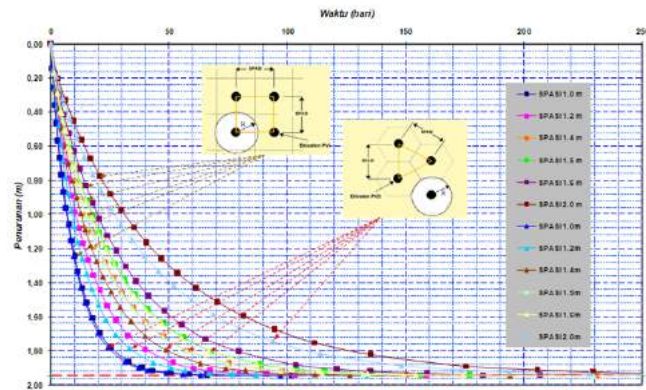
- 1) akibat timbunan saja,
- 2) timbunan + preloading,
- 3) timbunan + preloading + pvd



BMH-Mei 2021

67

Contoh analisis penurunan dengan PVD



BMH-Mei 2021

68

Perencanaan

Prefabricated Vertical Drains + Pre-loading

- Kombinasi prefabricated vertical drains (PVD) dengan pre-loading akan mempercepat penurunan konsolidasi. Namun PVD tidak mengurangi/mengubah besarnya penurunan ultimit.
- Pre-loading dapat mengurangi penurunan sekunder setelah konstruksi.
- Hal-hal yang harus diperhatikan: jarak dan konfigurasi PVD, tensile strength dan discharge capacity dari PVD, tinggi timbunan, kecepatan pelaksanaan timbunan (tahapan timbunan), dan undrained shear strength dari tanah eksisting.

BMH-Mei 2021

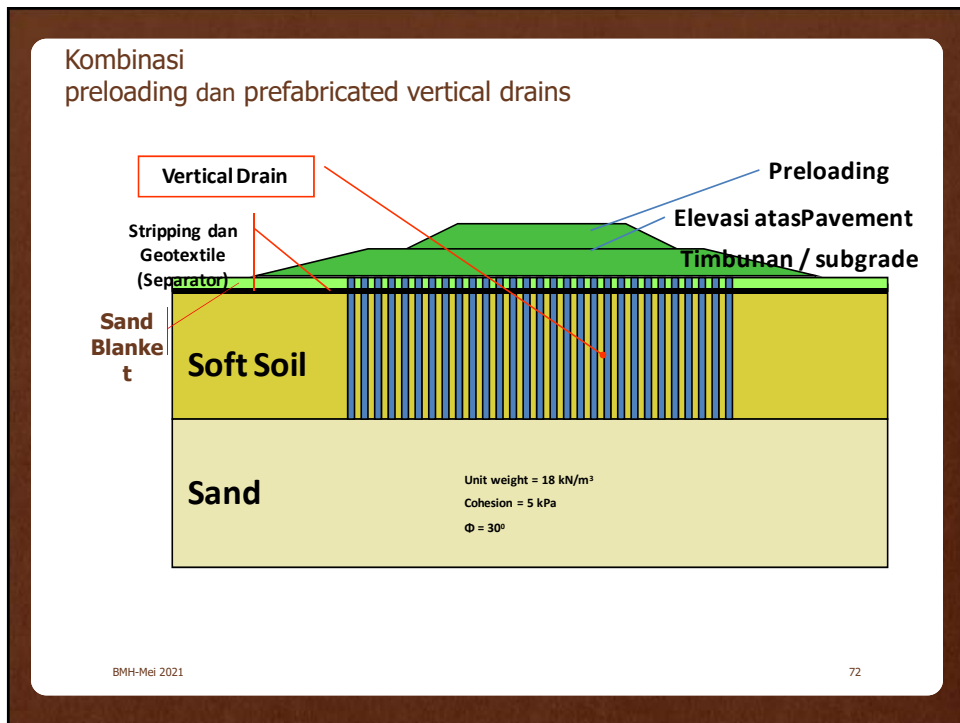
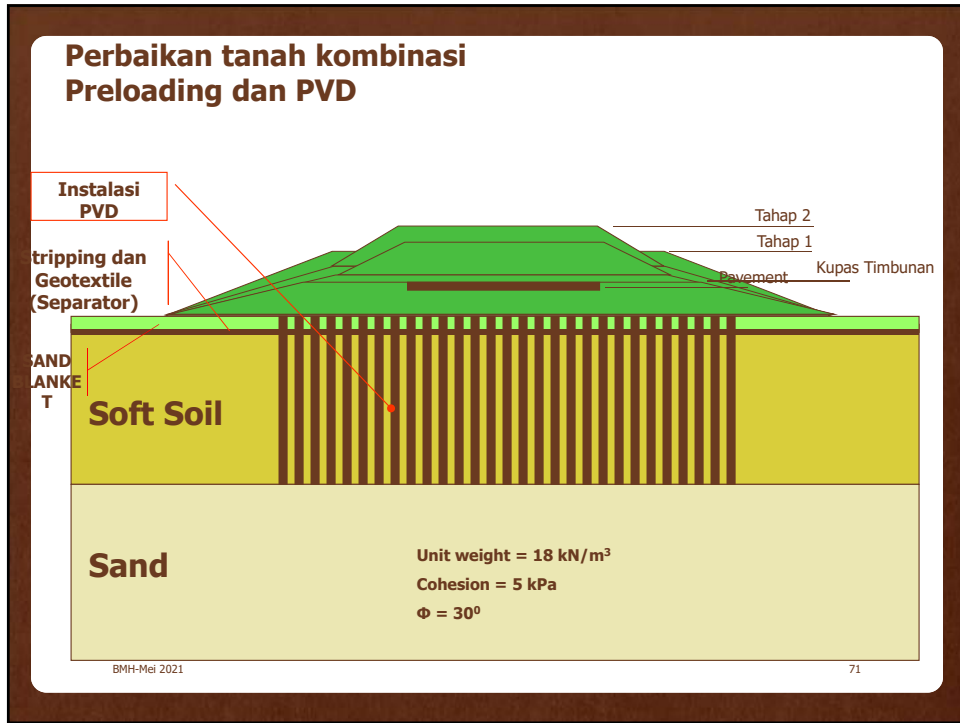
69

Komentar untuk metoda Preloading + PVD

- Metoda preloading dan PVD ini sangat mudah dilakukan dan umumnya kontraktor nasional sudah dapat melakukannya.
- Kelemahan dari metoda ini adalah untuk timbunan yang cukup tinggi, maka pelaksanaannya harus dilakukan bertahap mengingat lapisan tanah dasar yang lunak mempunyai keterbatasan dalam menerima beban timbunan tersebut. Hal ini tentu saja akan memperpanjang waktu penyelesaian proyek mengingat untuk setiap tahap penimbunan diperlukan waktu tunggu agar lapisan tanah dasar tersebut mempunyai kekuatan yang cukup untuk menerima beban selanjutnya.
- Kelemahan ini dapat diatasi dengan memperkuat tanah dasar tersebut antara lain dengan menggunakan geotextile atau stone column ataupun dynamic replacement atau dynamic compaction (untuk material berbutir kasar). Dengan cara ini maka penimbunan dapat dilakukan sekaligus (tidak perlu bertahap), sehingga waktu penyelesaian konstruksi dapat dipersingkat dan dapat dioperasikan lebih cepat. Konsekuensinya adalah adanya biaya tambahan untuk biaya pengadaan dan pemasangan geotextiles, pembuatan stone column ataupun dynamic replacement/compaction tersebut.

BMH-Mei 2021

70



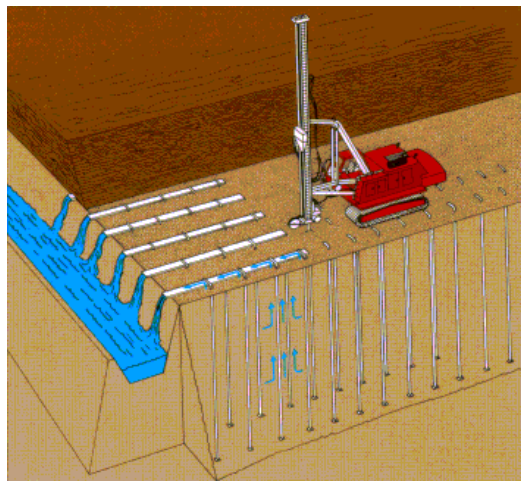
Pemasangan Vertical drains



BMH-Mei 2021

73

Vertical Drains



BMH-Mei 2021

74

Vertical Drains

Berikut ini konstruksi dari Cutoff dan instalasi drain pemalangan dengan metode peralihan tanah, hasil pemalangan yang penting ya meliputi ya meliputi kebutuhan dan akan untuk pemalangan. Keuntungan ekonomis yang utama ada ya bertambahnya kemampuan kapasitas drain lapisan tanah bagian bawah yang memungkinkan tanah dan untuk drainasi dengan cepat akan yang memperlambat. Faktor keamanan terhadap kegagalan. Perawatan dan saat selesai akan sesuai selama masa konstruksi.



BMH-Mei 2021

75

Vertical Drains



BMH-Mei 2021

76

Vertical Drains



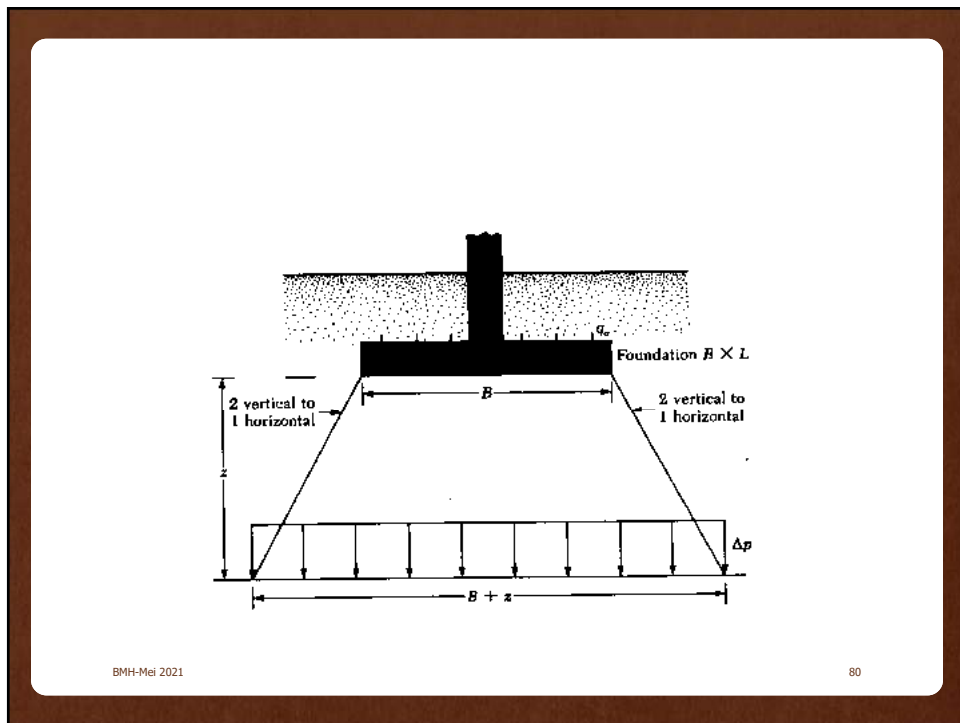
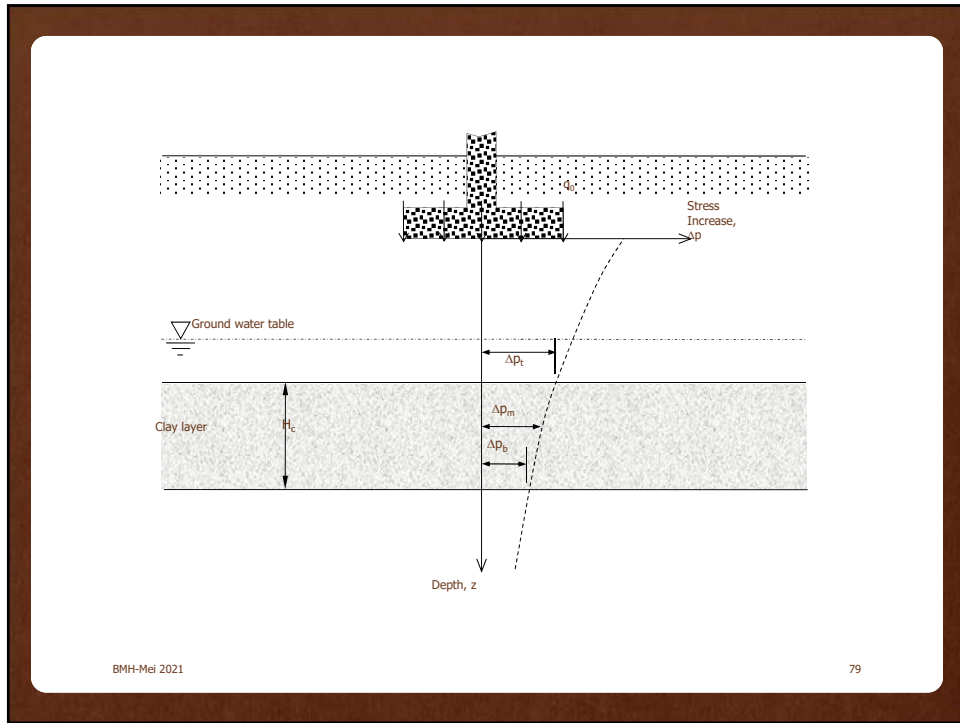
BMH-Mei 2021

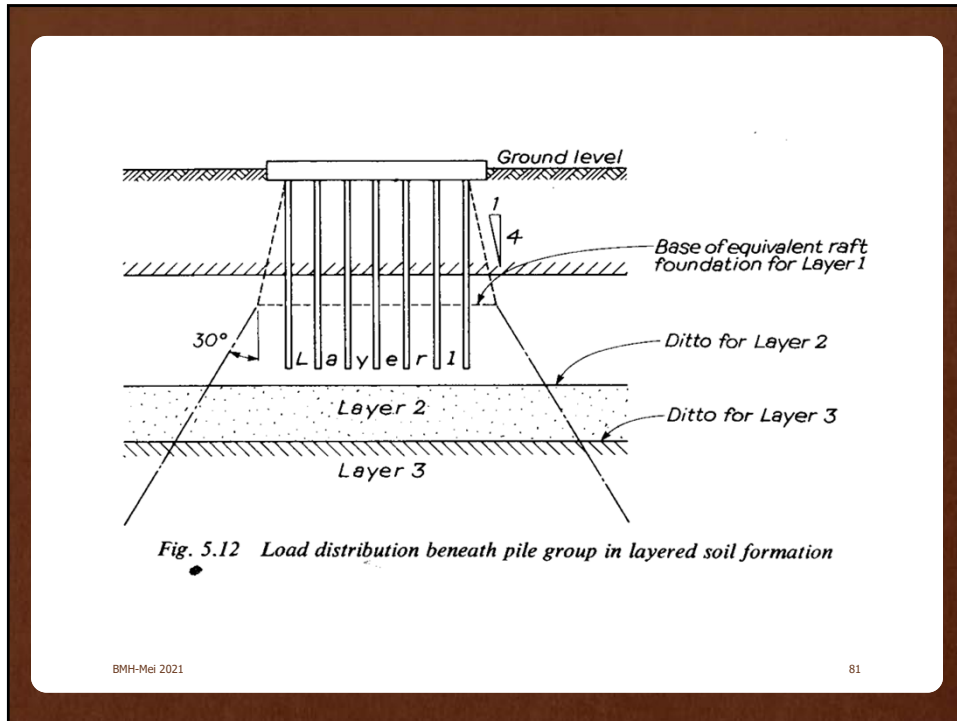
77

Distribusi tegangan
lampiran A: file Word

BMH-Mei 2021

78





Contoh soal:

- penurunan
- waktu penurunan
- pre-loading
- vertical drains

Contoh Soal:

$h = 7.0 \text{ m}$
 $\gamma_s = 22 \text{ kN/m}^3$
 Fill 99 kN/m^2
 $\gamma_w = 18.22 \text{ kN/m}^3$
 $c_v = 1.26 \text{ m}^2/\text{tahun}$
 $\gamma_t = 16.34 \text{ kN/m}^3$

at elevation -8.37 m
 and 4 months after loading:
 a) Excess pore?
 b) pore?
 c) vertical eff. stress?

Double drainage: $2H = 11.6 - 7.3 = 4.3 \text{ m}$
 $z = \frac{z}{H} = \frac{8.37 - 7.3}{2.15} = 0.498 \approx 0.5$ (dari grafik didapat)
 $T = \frac{t \cdot c_v}{H^2} = \frac{(4/12) \cdot 1.26}{(2.15)^2} = 0.092$
 $U_z(T) = 0.24$

a) $u_z = 1 - \frac{u_e}{u_{ie}} = 0.24 \Rightarrow$

$\frac{u_e}{u_{ie}} = 0.76 \Rightarrow u_e = 0.76 * 99 = 75.24 \text{ kPa}$

b) $u = u_{ss} + u_e = (8.37 - 2.9)(9.81) + 75.24 = 128.9 \text{ kPa}$

c) $\sigma_v' = \sigma_{v0}' + \Delta\sigma_v'$

$= [(0.9)(18.22) + (7.3 - 2.9)(18.22 - 9.81) + (0.24)(99)] + (6.24)(99)$
 $= 89.2 \text{ kN/m}^2$

BMH-Mei 2021

83

Average degree of consolidation
(Derajat konsolidasi rata-rata) $U(t)$

$U(t) = \frac{\text{penurunan pada waktu } t}{\text{penurunan ultimate at end of consolidation}} = \frac{S_t}{S_u}$

Bila diketahui $S_u = 0.635 \text{ m}$
 maka $t = 4 \text{ bulan} \Rightarrow T = 0.092$
 dari grafik $U(t) = 0.35$ ← Kurva (2)
 maka: $S_t = (0.35)(0.635 \text{ m}) = 0.22 \text{ m}$

Kalah kondisiya Tbb:

Single drainage: $H = 4.3 \text{ m}$
 $z = \frac{8.37 - 7.3}{4.3} = 0.25$
 $T = \frac{(4/12) \cdot (1.26)}{4.3^2} = 0.023$
 dari grafik didapat: $U(z, T) = 0.12$

- a) $u_e = 99(1 - 0.12) = 87.1 \text{ kN/m}^2$ Kurva (1)
- b) $u = 53.7 + 87.1 = 140.8 \text{ kPa}$
- c) $\sigma_v' = 60.4 + (99)(0.12) = 72.3 \text{ kPa}$

BMH-Mei 2021

84

Penurunan & pre-loading :

$C_c = 0.2$ clay $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 $C_v = 1.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{detik}$
 pasir padat

a) Hitung penurunan yg akan terjadi, $S_u = ?$

$$S_u = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_{ro}' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_{ro}'}$$

$$\sigma_{ro}' = 2.5 \times 18 = 45 \text{ kPa}$$

$$u = 2.5 \times 10 = 25 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{ro}' = \sigma_{ro}' - u = 20 \text{ kPa}$$

$$\Delta \sigma_v' = 7 \times 20 = 140 \text{ kPa}$$

$$\therefore S_u = 0.2 \times 5 \times \log \frac{20+140}{20}$$

$$S_u = 0.90 \text{ m}$$

b) Waktu yg dibutuhkan untuk mencapai 90% konsolidasi; $t = ?$

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2} \text{ atau } t = \frac{T_v \cdot H^2}{C_v}$$

$$U = 90\% \rightarrow T_v = 0.848$$

$$\therefore t = \frac{0.848 \times 2.5^2}{1.8 \times 10^{-3} \times 10^{-4}} \frac{\text{m}^2}{\text{detik}}$$

$$t = 2.94 \times 10^7 \text{ detik}$$

c) Besarnya surcharge yg diperlukan agar S_u dicapai dlm waktu 6 bulan.

Fill + Surcharge : $S = \frac{C_c}{1+e_0} \times H \times \log \frac{\sigma_{ro}' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_{ro}'}$

$$t = 6 \text{ bulan} ; T_v = \frac{t \cdot C_v}{H^2}$$

$$T_v = \frac{6 \times 30 \times 24 \times 3600 \times 1.8 \times 10^{-3}}{(2.5 \times 100)^2} = 0.448$$

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\pi^2 T_v / 4} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\pi^2 \times 0.448 / 4}$$

$$U = 73.1\% = \frac{S_u}{S_u + F + S} \rightarrow F + S = 0.90 \text{ m}$$

Sekarang : $S_u(F+S) = S_u(F+S)$

$$S_u(F+S) = U \times S_u(F+S)$$

$$S_u(F+S) = \frac{U}{S_u} \times S_u(F+S) = \frac{0.90}{0.731} = 1.231 \text{ m}$$

$$\therefore \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_{ro}' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_{ro}'} = 0.2 \times 5 \log \frac{\sigma_{ro}' + \Delta \sigma_v'}{\sigma_{ro}'}$$

$$\log \frac{20 + \Delta \sigma_v'}{20} = 1.231 \rightarrow \Delta \sigma_v' = 320.48 \text{ kPa}$$

$\Delta \sigma_v' = 7 \times 20 + \Delta \sigma_v' \rightarrow \Delta \sigma_v' = 320 \text{ kPa} \rightarrow$ tinggi surcharge

Contoh Soal:

Diberikan suatu lapisan tanah seperti terlihat pada Gambar 1a. Tebal lapisan pasir 4m dan tebal lapisan lempung 8m. Muka air tanah (MAT) terdapat pada kedalaman 3m dari permukaan tanah. Berat isi pasir di atas MAT sebesar $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$, sementara di bawah MAT berat isi pasir $\gamma_{\text{sat}} = 21.0 \text{ kN/m}^3$. Berat isi lempung $\gamma_{\text{sat}} = 18.5 \text{ kN/m}^3$, sementara berat isi air $\gamma_{\text{air}} = 10 \text{ kN/m}^3$. Hasil uji oedometer dari lapisan lempung yang menunjukkan hubungan antara void ratio e dan tegangan vertikal efektif σ'_v adalah sbb:

e	σ'_v (kN/m ²)	
0.97	30	Tekanan pra-konsolidasi = 150 kN/m ²
0.92	150	
0.50	800	

Pertanyaan:

- Hitunglah tegangan vertikal total, tekanan air pori, dan tegangan vertikal efektif pada titik A (yaitu pada pertengahan lapisan lempung).
- Hitunglah besarnya nilai-nilai: coefficient of volume compressibility m_v , compression index C_c dan swelling index C_s dari lapisan lempung tersebut.

Diagram showing a soil profile with two layers:

- Sand Layer (Pasisir):** 3m thick, $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3$.
- Clay Layer (Lempung):** 8m thick, $\gamma_{\text{sat}} = 18.5 \text{ kN/m}^3$, $e_0 = 0.97$.
- Bottom Boundary:** Impermeable.
- Point A:** Located at the interface between the sand and clay layers.

a) Tegangan vertikal total di titik A:

$$\sigma_{VA} = 3 \times 15 + 1 \times 21 + 4 \times 18.5 = 152 \text{ kPa}$$

Tekanan air pori di titik A: $u_A = \gamma_w \times 5 = 10 \times 5 = 50 \text{ kPa}$

Tegangan vertikal efektif di titik A: $\sigma'_{VA} = \sigma_{VA} - u_A = 102 \text{ kPa}$

b) Compression index $C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log \frac{\sigma'_1}{\sigma'_0}} = \frac{0.92 - 0.50}{\log \frac{800}{150}} = 0.578$

Swelling index $C_s = \frac{0.97 - 0.92}{\log \frac{150}{30}} = 0.072$

Coefficient of Volume Compressibility:

$$(m_v)_1 = \frac{1}{1 + e_0} \left(\frac{e_0 - e_1}{\sigma'_1 - \sigma'_0} \right) = \frac{1}{1 + 0.97} \left(\frac{0.97 - 0.92}{150 - 30} \right) = 2.11 \times 10^{-4}$$

$$(m_v)_2 = \frac{1}{1 + 0.92} \left(\frac{0.92 - 0.50}{800 - 150} \right) = 3.36 \times 10^{-4}$$

BMH-Mei 2021 87

Di atas lapisan tanah tersebut kemudian diberikan beban timbunan yang menyebabkan pertambahan tekanan pada titik A sebesar $\Delta\sigma_{v0} = 90 \text{ kPa}$.

c) Hitung besarnya penurunan ultimit lapisan lempung akibat timbunan tersebut.

d) Hitung juga berapa nilai void ratio (e) dari lempung tersebut untuk kondisi penurunan ultimit pada soal no.c di atas.

e) Apabila penurunan ultimit tersebut dianggap telah tercapai untuk derajat konsolidasi rata-rata sebesar 90%, maka hitunglah waktu yang diperlukan untuk mencapai penurunan ultimit bila koefisien konsolidasi $c_v = 8.5 \text{ m}^2/\text{tahun}$.

c) Di atas lap. Pindah kemudian diberikan timbunan yg memberikan $\Delta\sigma'_{vo} = 90 \text{ kPa}$ di titik A.
 Catatan: "perubahan dpt menggunakan teori dan"

$\sigma'_{vo,A} = 102 \text{ kPa}$
 $\Delta\sigma'_{vo,A} = 90 \text{ kPa}$ } $\sigma'_{vo,A} + \Delta\sigma'_{vo,A} = 192 \text{ kPa} > \sigma'_{vc} = 150 \text{ kPa}$
 \rightarrow tanah OC.

Penurunan ultimit: $S = S_1 + S_2$

$S_1 = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma'_{vo}}{\sigma'_{vc}} = \frac{0.072}{1+0.87} \times 8 \times \log \frac{102}{150} = 0.05 \text{ m}$
 $S_2 = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma'_{vo} + \Delta\sigma'_{vo}}{\sigma'_{vo}} = \frac{0.072}{1+0.87} \times 8 \times \log \frac{192}{102} = 0.27 \text{ m}$
 $S = S_1 + S_2 = 0.32 \text{ m} = 32 \text{ cm}$

d) nilai void ratio (e): $\Delta e_1 = C_c \log \frac{150}{102} = 0.012$
 $\Delta e_2 = C_c \log \frac{192}{102} = 0.062$
 $\Delta e \text{ total} : \Delta e_1 + \Delta e_2 = 0.074$
 $\therefore e = e_0 - \Delta e = 0.87 - 0.074 = 0.796$

e) $t = ?$ Time factor $T_v = \frac{e \cdot C_v}{H_{dr}^2}$ atau $t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{C_v}$
 " $U = 90\% \rightarrow T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%) = 0.848$
 Catatan: bisa dari grafik $U(t)$ vs T_v

$H_{dr} = \text{drainase length} = 8 \text{ m (single drainase)}$
 $\therefore t = \frac{0.848 \times 8^2 \text{ m}^2}{8.5 \text{ m}^2/\text{tahun}} = 6.38 \text{ tahun}$

BMH-Mei 2021 89

Untuk waktu $t = 1.2$ tahun setelah timbunan tersebut diberikan:

f) Hitunglah besarnya penurunan yang terjadi
 g) Hitung juga berapa nilai void ratio (e).
 h) Hitung besarnya tekanan eksese air pori yang ada pada titik A, apabila tekanan eksese air pori awal dianggap sama besar dengan $\Delta\sigma_{vo}$ yaitu = 90 kPa

Untuk mempercepat proses konsolidasi maka akan dipasang PVD (pre-fabricated vertical drains) dengan lebar = 100mm dan tebal = 5mm serta dipasang dengan pola segitiga dengan spasi = 1.2m. Apabila nilai c_h diambil = nilai $c_v = 8.5 \text{ m}^2/\text{tahun}$ dan smear effect dapat diabaikan, maka untuk waktu $t = 1.2$ tahun setelah timbunan diberikan:

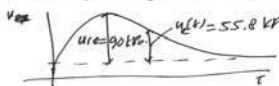
i) Hitunglah derajat konsolidasi rata-rata apabila terjadi aliran pada arah vertikal dan arah radial.
 j) Hitung juga berapa besar penurunan yang akan terjadi. Bandingkan jawaban anda dengan jawaban pada pertanyaan no. f di atas.

BMH-Mei 2021 90

f) $t = 1.2$ tahun ; $s_t = ?$
 Derajat konsolidasi rata-rata $= U(T) = \frac{s_t}{s_0}$
 $\rightarrow T = \frac{6 \cdot C_v}{H_{dr}^2} = \frac{1.2 \times 8.5}{8^2} = 0.159$
 $T < 0.2 \rightarrow U = \sqrt{\frac{4T}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.159}{\pi}} = 0.45$
 $U(T) = \frac{s_t}{s_0} \rightarrow s_t = s_0 \times U(T) = 32 \text{ m} \times 0.45 = 14.4 \text{ m}$

g) $e = ?$
 $U(T) = \frac{s_t}{s_0} = \frac{\Delta v}{\Delta v_{t=0}} = \frac{\Delta e}{\Delta e_{t=0}}$
 $\therefore \Delta e = U(T) \Delta e_{t=0} = 0.45 \times 0.074 = 0.033$
 $e = e_0 - \Delta e = 0.87 - 0.033 = 0.837$
 atam: $\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{\Delta H}{H} \rightarrow \Delta e = (1+e_0) \frac{\Delta H}{H} = (1+0.87) \times \frac{14.4}{800} = 0.033$

b) $u_{ekses} = ?$ $t = 1.2$ tahun $\rightarrow T_v = \frac{6 \cdot C_v}{H_{dr}^2} = 0.159$ dari grafik
 $Z = \frac{z}{H} = \frac{z}{8} = 0.50 \rightarrow U(Z, T) = 0.38$
 $U(Z, T) = 1 - \frac{u_f}{u_{ic}} \rightarrow \frac{u_{ic} - u_t}{u_{ic}} = 1 - U(Z, T)$
 $\therefore u_t(t) = (1 - 0.38) \times u_{ic} = 0.62 \times 90 = 55.8 \text{ kPa}$



BMH-Mei 2021 91

i) PVD: $a = 100 \text{ mm}$ } $\pi d_w = 2(a+b)$
 $b = 5 \text{ mm}$ } $d_w = 66.88 \text{ mm}$
 $r_w = \frac{d_w}{2} = 33.44 \text{ mm}$

spacing $S = 1.2 \text{ m} \rightarrow d_e = 1.055 = 1.05 \times 1.2 = 1.26 \text{ m}$
 $n = \frac{d_e}{d_w} = \frac{1260}{66.88} = 18.84$
 $F_n = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} + \frac{kr}{r_w \cdot k} \cdot \frac{n-1}{n^2}$ $\rightarrow 0$ because no smear
 $T_h = \frac{t \cdot C_h}{r_e^2} = \frac{1.2 \text{ tahun} \times 8.5 \text{ m}^2/\text{tahun}}{\left(\frac{1.26}{2}\right)^2 \text{ m}^2} = 25.70$
 $U_h = 1 - \exp\left[-\frac{2T_h}{F_n}\right] = 1 - \exp\left[-\frac{2 \times 25.70}{2.2}\right] \approx 0.99$
 $u_{\text{pot}} = 1 - (1 - u_v)(1 - u_h) = 1 - (1 - 0.45)(1 - 0.99)$
 $= 0.99$

BMH-Mei 2021 92

;) Kalam $t = 1$ bulan ; $U_{rh} = ?$

$$T_h = \frac{t \cdot C_h}{r_0^2} = \frac{1/12 \times 8.5}{\left(\frac{1.26}{2}\right)^2} = 1.77$$

$$U_h = 1 - \exp\left[-\frac{2T_h}{F_n}\right] = 1 - 0.20 = 0.80$$

$$T_v = \frac{t \cdot C_v}{H_{dr}^2} = \frac{1/12 \times 8.5}{8^2} = 0.07 \rightarrow U_v = \sqrt{\frac{4T}{\pi}} = 0.30$$

$$U_{rh} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) = 1 - (1 - 0.30)(1 - 0.80)$$

$$U_{rh} = 1 - (0.70)(0.20) = 0.86$$

Berk

Contoh soal:

- penurunan
- waktu penurunan
- pre-loading
- vertical drains

95

Contoh Soal:

Fill 99 kN/m²

-2.0

Silt, $\gamma_t = 18.22 \text{ kN/m}^3$

-7.3

clay

$c_v = 1.26 \text{ m}^2/\text{tahun}$

$\gamma_t = 16.34 \text{ kN/m}^3$

-11.6

sand

Double drainage: $2H = 11.6 - 7.3 = 4.3\text{m}$

$Z = \frac{z}{H} = \frac{8.37 - 7.3}{2.15} = 0.498 \approx 0.5$

$T = \frac{t \cdot c_v}{H^2} = \frac{\left(\frac{4}{12}\right) \cdot 1.26}{(2.15)^2} = 0.092$

dari grafik didapat $u_z(Z,T) = 0.24$

At elevation -8.37 m and 4 months after loading

- Excess pwp?
- Pwp?
- Vertical eff stress?

Initial eff. stress

final eff. stress

96

$$a. U_z = 1 - \frac{U_e}{U_{ie}} = 0.24$$

$$\frac{U_e}{U_{ie}} = 0.76 \rightarrow U_e = 0.76 \times 99 = 75.24 \text{ kPa}$$

$$b. U = U_{ss} + U_e = (8.37 - 2.9) (9.81) + 75.24 = 128.9 \text{ kPa}$$

$$c. \sigma_v' = \sigma_{v0}' + \Delta \sigma_v'$$

$$= [(0.9) (18.22) + (7.3 - 2.9) (18.22 - 9.81) + (8.37 - 7.3) (16.34 - 9.81)] + (0.24) (99)$$

$$= 84.2 \text{ kN/m}^2$$

BMH-Mei 2021

97

Average degree of consolidation (derajat konsolidasi rata-rata) $U(t)$

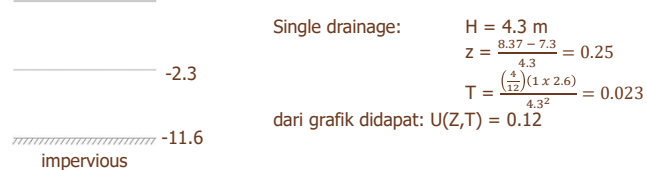
$$U(t) = \frac{\text{penurunan pada waktu } t}{\text{penurunan ultimite}} = \frac{S_t}{S_u}$$

Bila diketahui $S_u = 0.653 \text{ m}$

Maka $\frac{u}{T} = 4 \text{ bulan} \rightarrow T = 0.092$, dari grafik $U(t) = 0.35$

Maka: $S_t = (0.35) (0.635) = 0.22 \text{ m}$

Kalau kondisinya sebagai berikut:



- $U_e = 99 (1 - 0.12) = 87.1 \text{ kN/m}^2$
- $U = 53.7 + 87.1 = 140.8 \text{ kPa}$
- $\sigma_v' = 60.4 + (99) (0.12) = 72.3 \text{ kPa}$

BMH-Mei 2021

98

Penurunan & pre loading:

7 m
Timbunan pasir
 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$

5 m
 $\frac{C_c}{1 + e_0} = 0.2$ $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 $C_v = 1.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{detik}$

Pasir padat

a. Hitungan penurunan yang akan terjadi, S_u = ?

$$S_u = \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{\sigma_{v0}' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_{v0}'}$$

$$\sigma_{v0}' = 2.5 \times 18 = 45 \text{ kPa}$$

$$U = \frac{2.5 \times 10}{2.5 \times 10} = 25 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{v0}' = \sigma_{v0}' - u = 20 \text{ kPa}$$

$$\Delta\sigma_v' = 7 \times 20 = 140 \text{ kPa}$$

$$\therefore S_u = 0.2 \times 5 \times \log \frac{20 + 140}{20}$$

$$S_u = 0.90 \text{ mm}$$

b. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 90% konsolidasi, t = ?

$$T_v = \frac{C_v \cdot t}{Hd_v^2} \text{ atau } t = \frac{T_v \times Hd_v^2}{C_v}$$

$$U = 90\% \rightarrow T_v = 0.848$$

$$\therefore t = \frac{0.848 \times 2.5^2}{1.8 \times 10^{-3} \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{detik}}$$

$$t = 2.94 \times 10^7 \text{ detik}$$

c. Berapa tinggi surcharge yang diperlukan agar S_u dicapai dalam waktu 6 bulan

Fill + surcharge : $S = \frac{C_c}{1 + e_0} \times H \times \log \frac{\sigma_{v0}' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_{v0}'}$

$t = 6 \text{ bulan} : T_v = \frac{t \cdot C_v}{Hd_v^2}$

$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{(-\pi^2 \times T_v)/4} = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{(-\pi^2 \times 0.448)/4}$$

$$U = 73.1\% = \frac{S_u}{S} \rightarrow S_u = F + S \rightarrow t = 6 \text{ bulan}$$

Sekarang: $S_{\text{bulan}} (F + S) = S_u (F) = 0.90 \text{ mm}$

$$S_{\text{bulan}} (F + S) = U \times S_u (F + S)$$

$$S_u (F + S) = \frac{0.90}{73.1\%} = \frac{0.90}{0.731}$$

$$S_u (F + S) = \frac{0.90}{0.731} = 1.231 \text{ mm}$$

$$\therefore \frac{C_c}{1 + e_0} \times H \times \log \frac{\sigma_{v0}' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_{v0}'} = 0.2 \times 5 \log \frac{\sigma_{v0}' + \Delta\sigma_v'}{\sigma_{v0}'}$$

$$\log \frac{20 + \Delta\sigma_v'}{20} = 1.231 \rightarrow \Delta\sigma_v' = 320.4318$$

Contoh Soal:

Diberikan suatu lapisan tanah seperti terlihat pada Gambar 1a. Tebal lapisan pasir 4m dan tebal lapisan lempung 8m. Muka air tanah (MAT) terdapat pada kedalaman 3m dari permukaan tanah. Berat isi pasir di atas MAT sebesar $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$, sementara di bawah MAT berat isi pasir $\gamma_{\text{sat}} = 21.0 \text{ kN/m}^3$. Berat isi lempung $\gamma_{\text{sat}} = 18.5 \text{ kN/m}^3$, sementara berat isi air $\gamma_{\text{air}} = 10 \text{ kN/m}^3$. Hasil uji oedometer dari lapisan lempung yang menunjukkan hubungan antara void ratio e dan tegangan vertical efektif σ'_v adalah sbb:

e	σ'_v (kN/m ²)
0.97	30
0.92	150
0.50	800

Tekanan pra-konsolidasi = 150 kN/m²

Pertanyaan:

- Hitunglah tegangan vertikal total, tekanan air pori, dan tegangan vertikal efektif pada titik A (yaitu pada pertengahan lapisan lempung).
- Hitunglah besarnya nilai-nilai: coefficient of volume compressibility m_v , compression index C_c dan swelling index C_s dari lapisan lempung tersebut.

Diagram showing a soil profile with two layers:

- pasir (sand):** 3 m thick, $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$, $\gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3$. Water table (T) is at the surface. Point MA is at the interface.
- lempung (clay):** 8 m thick, $\gamma_{\text{sat}} = 18.5 \text{ kN/m}^3$, $e_0 = 0.87$. Point A is at the interface.

a. Tegangan vertical total di titik A:
 $\sigma_{VA} = (3 \times 19) + (1 \times 21) + (4 \times 18.5) = 152 \text{ kPa}$
 Tekanan air pori di titik A:
 $U_A = \gamma_w \times 5 = 10 \times 5 = 50 \text{ kPa}$
 Tegangan vertical efektif di titik A:
 $\sigma'_{VA} = \sigma_{VA} - U_A = 102 \text{ kPa}$

b. Compression index $C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log \frac{\sigma'_{v1}}{\sigma'_{v0}}} = \frac{0.92 - 0.50}{\log \frac{800}{150}} = 0.578$
 Swelling index $C_s = \frac{0.92 - 0.50}{\log \frac{150}{30}} = 0.072$
 Coefficient of volume compressibility:
 $(mv)_1 = \frac{1}{1 + e_0} \left(\frac{e_0 - e_1}{\sigma'_{v1} - \sigma'_{v0}} \right)$
 $= \frac{1}{1 + e_0} \left(\frac{e_0 - e_1}{\sigma'_{v1} - \sigma'_{v0}} \right)$
 $= \frac{1}{1 + 0.97} \left(\frac{0.97 - 0.92}{150 - 30} \right) = 2.11 \times 10^{-4}$
 $(mv)_2 = \frac{1}{1 + 0.92} \left(\frac{0.92 - 0.50}{800 - 150} \right) = 3.36 \times 10^{-4}$

BMH-Mei 2021 101

Di atas lapisan tanah tersebut kemudian diberikan beban timbunan yang menyebabkan pertambahan tekanan pada titik A sebesar $\Delta\sigma_{v0} = 90 \text{ kPa}$.

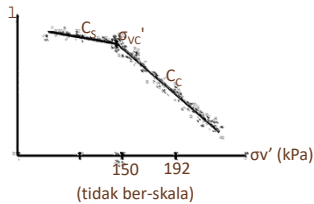
c) Hitung besarnya penurunan ultimit lapisan lempung akibat timbunan tersebut.

d) Hitung juga berapa nilai void ratio (e) dari lempung tersebut untuk kondisi penurunan ultimit pada soal no.c di atas.

e) Apabila penurunan ultimit tersebut dianggap telah tercapai untuk derajat konsolidasi rata-rata sebesar 90%, maka hitunglah waktu yang diperlukan untuk mencapai penurunan ultimit bila koefisien konsolidasi $c_v = 8.5 \text{ m}^2/\text{tahun}$.

- c. Di atas lapisan tanah kemudian diberikan timbunan yang memberikan $\Delta\sigma_{v0} = 90$ kPa di titik A.
 $\Delta\sigma_{v0}' A = 102$ kPa
 $\Delta\sigma_{v0}' A = 90$ kPa $\sigma_{v0,A}' + \sigma_{v0,A}' = 192$ kPa $> \sigma_{v0}' = 150$ kPa

Penurunan ultimit: $S = S_1 + S_2$



$$S_1 = \frac{C_s}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_{vC}'}{\sigma_{v0}'} = \frac{0.072}{1+0.87} \times 8 \times \log \frac{150}{102} = 0.05 \text{ m}$$

$$S_2 = \frac{C_c}{1+e_0} H \log \frac{\sigma_{v0}' + \Delta\sigma_{v0}'}{\sigma_{v0}'} = \frac{0.578}{1+0.87} \times 8 \times \log \frac{192}{150} = 0.27 \text{ m}$$

$$S = S_1 + S_2 = 0.32 \text{ m} = 32 \text{ cm}$$

- d. Nilai void ratio (e): $\Delta e_1 = C_s \log \frac{150}{102} = 0.012$

$$\Delta e_2 = C_c \log \frac{192}{150} = 0.062$$

$$\Delta e \text{ total: } \Delta e_1 + \Delta e_2 = 0.074$$

$$\therefore e = e_0 - \Delta e = 0.87 - 0.074 = 0.796$$

- e. $t = ?$ Time factor $T_v = \frac{t \cdot c_v}{H \cdot dr^2}$ atau $t = \frac{T_v \cdot x \cdot H \cdot dr^2}{c_v}$

$$\text{Untuk } U = 90\% \rightarrow T_v = 1.781 - 0.933 \log(100 - U\%) = 0.848$$

$$H_{dr} = \text{drainage length} = 8 \text{ m (single drainage)}$$

$$\therefore t = \frac{0.848 \times 8^2}{8.5} = 6.38 \text{ tahun}$$

BMH-Mei 2021

103

Untuk waktu $t = 1.2$ tahun setelah timbunan tersebut diberikan:

f) Hitunglah besarnya penurunan yang terjadi

g) Hitung juga berapa nilai void ratio (e).

h) Hitung besarnya tekanan eksese air pori yang ada pada titik A, apabila tekanan eksese air pori awal dianggap sama besar dengan $\Delta\sigma_{v0}$ yaitu = 90 kPa

Untuk mempercepat proses konsolidasi maka akan dipasang PVD (pre-fabricated vertical drains) dengan lebar = 100mm dan tebal = 5mm serta dipasang dengan pola segitiga dengan spasi = 1.2m. Apabila nilai c_v diambil = nilai $c_v = 8.5 \text{ m}^2/\text{tahun}$ dan smear effect dapat diabaikan, maka untuk waktu $t = 1.2$ tahun setelah timbunan diberikan:

i) Hitunglah derajat konsolidasi rata-rata apabila terjadi aliran pada arah vertikal dan arah radial.

j) Hitung juga berapa besar penurunan yang akan terjadi. Bandingkan jawaban anda dengan jawaban pada pertanyaan no.f di atas.

BMH-Mei 2021

104

f. Untuk $t = 1.2$ tahun; $S_t = ?$

Derajat konsolidasi rata-rata = $U(T) = \frac{S_t}{S_U}$

$$T = \frac{t \cdot C_v}{H_{dr}^2} = \frac{1.2 \times 8.5}{8^2} = 0.159$$

$$T < 0.2 \rightarrow U = \sqrt{\frac{4T}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0.159}{\pi}} = 0.45$$

$$U(T) = \frac{S_t}{S_U} \rightarrow S_t = S_U \times U(T) = 32 \times 0.45 = 14.4 \text{ cm}$$

g. $e = ?$ Untuk $t = 1.2$ tahun

$$U(T) = \frac{S_t}{S_U} = \frac{\Delta V}{\Delta V_{t=\infty}} = \frac{\Delta e}{\Delta e_{t=\infty}}$$

$$\therefore \Delta e = U(T) \Delta e_{t=\infty} = 0.45 \times 0.074 = 0.033$$

$$e = e_0 - \Delta e = 0.87 - 0.033 = 0.837$$

$$\text{atau: } \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \frac{\Delta H}{H} \rightarrow \Delta e = (1 + e_0) \frac{\Delta H}{H} = (1 + 0.87 \cdot 0.97) \times \frac{14.4}{800} = 0.033$$

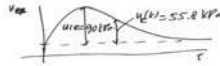
h. $U_{ekses} = ?$

$$t = 1.2 \text{ tahun} \rightarrow T_v = \frac{t \cdot C_v}{H_{dr}^2} = 0.159$$

$$Z = \frac{z}{H} = \frac{4}{8} = 0.50 \quad \left. \begin{array}{l} \text{dari grafik} \\ U(Z, T) = 0.38 \end{array} \right\}$$

$$U(Z, T) = 1 - \frac{U_{ie}}{U_{ie} - U_t}$$

$$\therefore U_e(t) = (1 - 0.38) \times U_{ie} = 0.62 \times 90 = 55.8 \text{ kPa}$$



BMH-Mei 2021

105

i. PVD: $a = 100 \text{ mm}$ dan $d_w = 2(a+b)$

$$b = 5 \text{ mm} \quad d_w = 66.88 \text{ mm}$$

$$r_w = \frac{d_w}{2} = 33.44 \text{ mm}$$

$$\text{Spacing } s = 1.2 \text{ m} \rightarrow d_e = 1.055 = 1.055 \times 1.2 = 1.26 \text{ m}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} = \frac{1260}{66.88} = 18.84$$

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} + \frac{kr}{\gamma_w \cdot k} \frac{n^2 - 1}{n^2}$$

$$T_h = \frac{t \cdot c_h}{r_w^2} = \frac{1.2 \times 8.5}{\left(\frac{1.26}{2}\right)^2} = 25.70$$

$$U_h = 1 - \exp\left[-\frac{2T_h}{F_n}\right] = 1 - \exp\left[-\frac{2 \times 25.70}{2.2}\right] \approx 0.99$$

$$U_{vh} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) = 1 - (1 - 0.45)(1 - 0.99) = 0.99$$

Kalau $t = 1$ bulan; $U_{vh} = ?$

$$T_h = \frac{t \cdot c_h}{r_w^2} = \frac{1 \times 8.5}{\left(\frac{1.26}{2}\right)^2} = 1.77$$

$$U_h = 1 - \exp\left[-\frac{2T_h}{F_n}\right] = 1 - 0.20 = 0.80$$

$$T_v = \frac{t \cdot C_v}{H_{dr}^2} = \frac{1 \times 8.5}{8^2} = 0.07 \rightarrow U_v = \sqrt{\frac{4T}{\pi}} = 0.30$$

$$U_{vh} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) = 1 - (1 - 0.30)(1 - 0.80) = 0.86$$

BMH-Mei 2021

106

2) Kalam \pm 1 bulan ; $U_{rh} = ?$

$$T_h = \frac{t \cdot C_h}{C_0} = \frac{1/2 \times 8.5}{(1.25)^2} = 1.77$$

$$U_h = 1 - \exp\left[-\frac{2T_h}{F_{rh}}\right] = 1 - 0.20 = 0.80$$

$$T_v = \frac{t \cdot C_v}{C_0} = \frac{1/2 \times 8.5}{8^2} = 0.07 \rightarrow U_v = \sqrt{\frac{2T_v}{F_{rv}}} = 0.30$$

$$U_{rh} = 1 - (1 - U_v)(1 - U_h) = 1 - (1 - 0.30)(1 - 0.80)$$

$$U_{rh} = 1 - (0.70)(0.20) = 0.86$$

Budi

BMH-Mei 2021

107

Sekian
dan
Terimakasih atas perhatiannya.

$6\sqrt{738}$ $8\sqrt{256}$ $7\sqrt{735}$ $4\sqrt{576}$ $6\sqrt{954}$ $5\sqrt{895}$

BMH-Mei 2021

108