

Pertemuan XI, XII, XIII

VII. Penurunan

VII.1 Pendahuluan

Jika tanah dibebani maka akan terjadi penurunan (settlement), penurunan akibat beban ini terdiri dari *penurunan segera* dan *penurunan konsolidasi*.

a. Penurunan segera

Penurunan segera terjadi pada tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus kering (tidak jenuh) terjadi segera setelah beban bekerja. Penurunan ini bersifat elastis, dalam praktek sangat sulit diperkirakan besarnya penurunan ini. Penurunan segera ini banyak diperhatikan pada fondasi bangunan yang terletak pada tanah granuler atau tanah berbutir kasar.

b. Penurunan konsolidasi

Penurunan konsolidasi terjadi pada tanah berbutir halus yang terletak dibawah muka air tanah. Penurunan ini butuh waktu yang lamanya tergantung pada kondisi lapisan tanah. Bila tanah mengalami pembebanan dan berkonsolidasi maka penurunan tanah tersebut berlangsung 3 fase yaitu ;

- **Fase awal**

Penurunan terjadi segera setelah beban bekerja, diakibatkan oleh keluarnya udara dari rongga pori. Proporsi penurunan awal dapat diberika dalam perubahan angka pori dan dapat ditentukan dari kurva waktu terhadap penurunan dari uji konsolidasi.

- **Fase konsolidasi primer**

Penurunan yang dipengaruhi oleh kecepatan aliran air pori yang meninggalkan rongga pori tanah akibat beban. Sangat dipengaruhi sifat tanah.

- **Fase konsolidasi sekunder**

Merupakan proses lanjutan dari konsolidasi primer, proses ini berjalan sangat lambat.

Bila dinyatakan dalam persamaan, penurunan total adalah ;

$$S = S_i + S_c + S_s$$

dengan ;

S = penurunan total

S_i = penurunan segera

S_c = penurunan konsolidasi primer

S_s = penurunan konsolidasi sekunder

VII.2. Penurunan segera (immediate settlement)

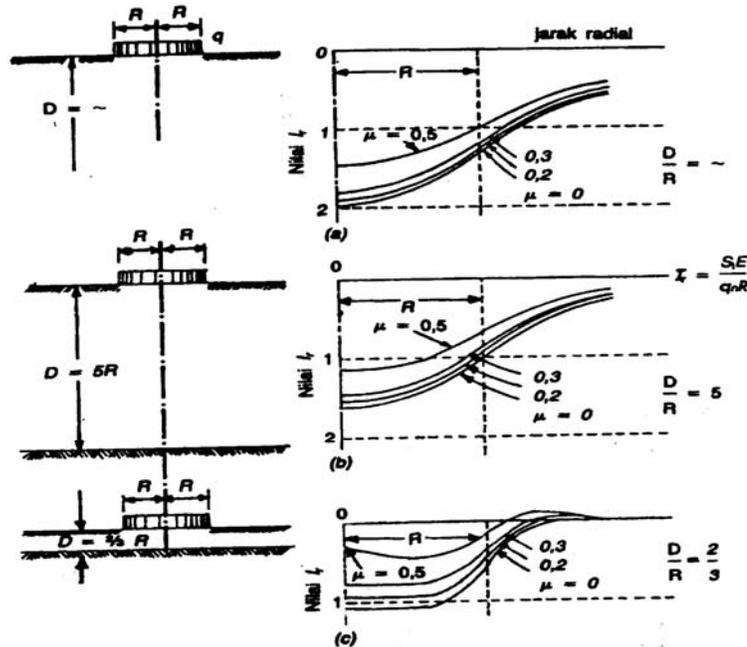
1 Akibat beban terbagi rata pada luasan lingkaran fleksibel di permukaan.

Jika tanah elastis dengan tebal tak berhingga, penurunan akibat beban terbagi rata pada luasan fleksibel yang berbentuk lingkaran dengan jari-jari R adalah ;

$$S_i = \frac{q_n R}{E} I_r$$

dengan ;

- S_i = penurunan segera (m)
- q_n = tambahan tegangan atau tekanan pondasi netto (kN/m^2)
- E = modulus elastisitas tanah (kN/m^2)
- I_r = faktor pengaruh untuk beban lingkaran tergantung pada angka poisson (μ) dan jarak dari titik pusat beban.



Gambar VII.1 Faktor pengaruh beban terbagi rata berbentuk lingkaran.

Penurunan segera dipusat beban lingkaran felsibel adalah;

$$S_i = \frac{2q_n R}{E} (1 - \mu^2)$$

Contoh soal

Suatu tangki dengan diameter 10 m mengalami beban terbagi rata $q = 150 \text{ kN/m}^2$. Dasar tangki terletak pada kedalaman 1 m. Tanah fondasi berupa pasir homogen , isotropis, sangat

tebal dengan $\partial b = 16,68 \text{ kN/m}^3$, $E = 34335 \text{ kN/m}^2$ dan $\mu = 0,45$. Tentukan penurunan segera yang terjadi di pusat beban

Penyelesaian ;

Tekanan fondasi neto

$$q_n = q - \partial_b D_f = 150 - 16,68 \times 1 = 133,32 \text{ kN/m}^2.$$

Penurunan segera dipusat beban adalah

$$S_i = \frac{2 \times 133,32 \times 5}{34335} (1 - 0,45^2) = 0,031 \text{ m} = 3,1 \text{ cm}.$$

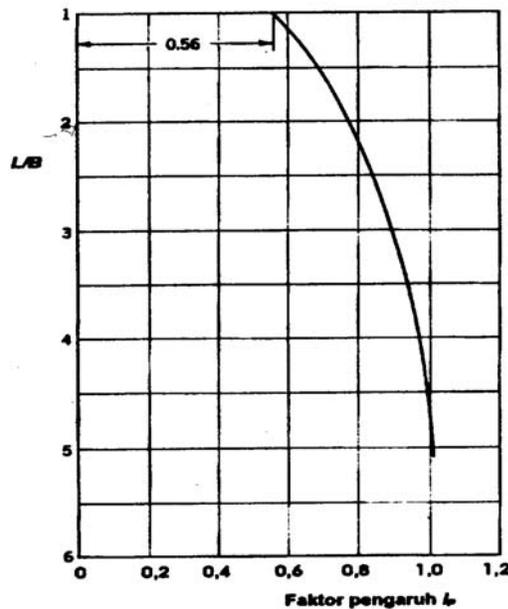
2 Penurunan segera pada pondasi empat persegi panjang fleksibel.

Penurunan segera pada sudut dari beban berbentuk luasan empat persegi panjang fleksibel adalah ;

$$S_i = \frac{2q_n B}{E} (1 - \mu^2) I_p$$

dengan ;

- S_i = penurunan segera (m)
- q_n = tambahan tegangan (kN/m^2)
- B = lebar area pembebanan (m)
- I_p = faktor pengaruh
- μ = angka poisson



Gambar VII.2 Faktor pengaruh penurunan di sudut luasan segi empat fleksibel (Terzaghi)

Untuk penurunan selain sudut luasan segi empat dapat dihitung dengan membagi bagi luasan dalam bentuk segi empat (superposisi).

Contoh soal

Suatu tangki dengan ukuran (10 x 10) m mengalami beban terbagi rata $q = 150 \text{ kN/m}^2$. Dasar tangki terletak pada kedalaman 1 m. Tanah fondasi berupa pasir homogen , isotropis, sangat tebal dengan $\rho_b = 16,68 \text{ kN/m}^3$, $E = 34335 \text{ kN/m}^2$ dan $\mu = 0,45$. Tentukan penurunan segera yang terjadi disudut luasan (titik A) dan dipusat luasan (titik P)

Penyelesaian ;

Tekanan fondasi neto

$$q_n = q - \rho_b D_f = 150 - 16,68 \times 1 = 133,32 \text{ kN/m}^2.$$

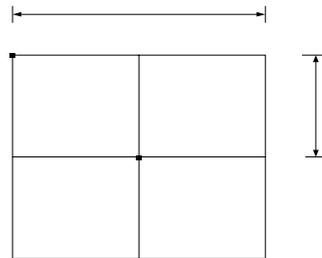
Penurunan segera pada sudut luasan (titik A)

$$L/B = 10/10 = 1 \text{ dari Gambar VII.2 diperoleh } I_p = 0,56$$

$$S_i(A) = \frac{133,32 \times 10}{34335} (1 - 0,45^2) 0,56 = 0,0173 \text{ m} = 1,73 \text{ cm}$$

Penurunan segera pada pusat luasan (titik P)

$$L/B = 5/5 = 1 \text{ dari Gambar VII.2 diperoleh } I_p = 0,56$$



Gambar CVII.1

$$S_i(P) = 4 \left(\frac{133,32 \times 5}{34335} (1 - 0,45^2) 0,56 \right) = 4 \times 0,00867 = 0,0347 \text{ m} = 3,47 \text{ cm}.$$

3 Penurunan segera akibat beban terbagi rata luasan fleksibel pada lapisan dengan tebal terbatas.

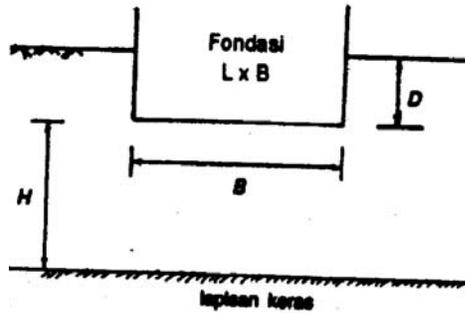
Penurunan segera akibat luasan beban empat persegi panjang yang terletak pada lapisan tanah dengan tebal H yang terletak diatas lapisan yang keras (Steinbrenner – 1934) adalah ;

$$S_i = \frac{q_n}{E} I_p B$$

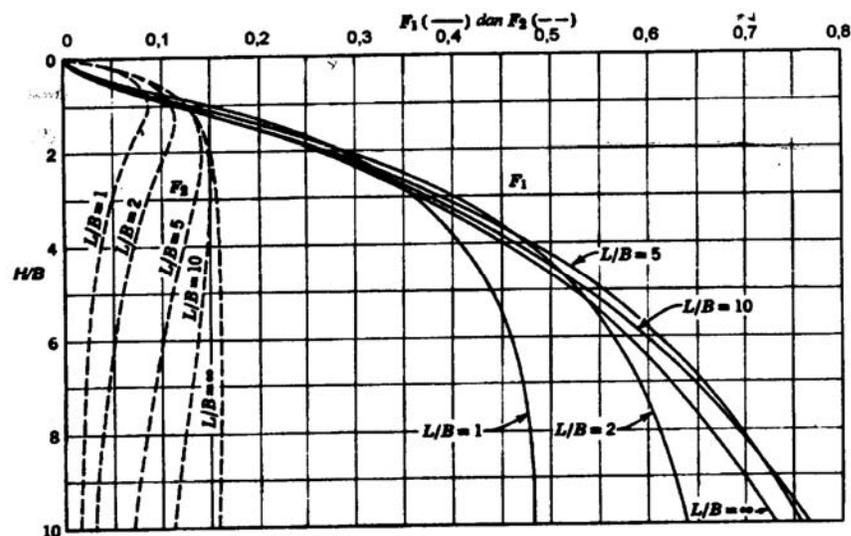
dengan

$$I_p = (1 - \mu^2)F_1 + (1 - \mu - 2\mu^2)F_2$$

F_1 dan F_2 adalah koefisien yang dapat diperoleh pada **Gambar VII.4**, dan S_i adalah penurunan segera di sudut luasan empat persegi panjang



Gambar VII.3 Penurunan segera beban terbagi rata empat persegi panjang fleksibel



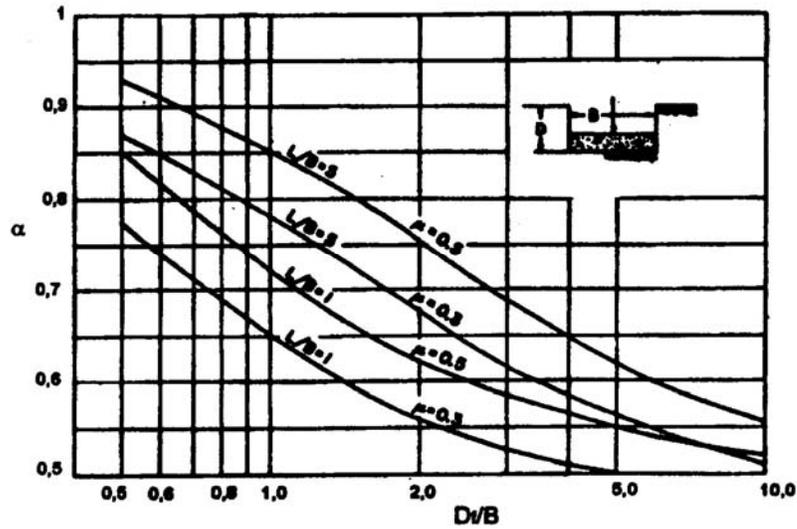
Gambar VII.4 Diagram menentukan F_1 dan F_2 (Steinbrenner, 1934)

Jika tanah elastis dan pondasi tidak terletak dipermukaan tanah, koreksi penurunan perlu diadakan. Fox dan Bowles (1977), nilai koreksi merupakan fungsi dari D_f/B , L/B , dan μ dimana L dan B adalah dimensi fondasi, D_f kedalaman pondasi.

$$S_i' = \alpha S_i$$

Dengan ;

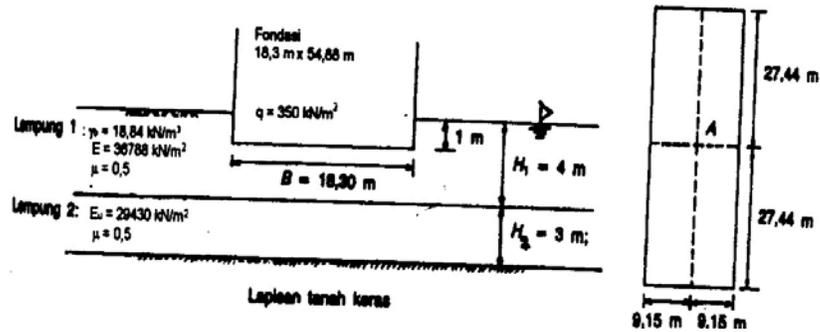
- S_i' = penurunan elastis yang telah dikoreksi
- S_i = penurunan elastis pada hitungan dengan dasar pondasi di permukaan
- α = faktor koreksidasar pondasi kedalaman D_f .



Gambar VII.5 Faktor koreksi penurunan elastis pondasi empat persegi (Fox & Bowles, 1977)

Contoh soal

Sebuah fondasi empat persegi panjang dengan beban terbagi rata diatas dua lapisan tanah lempung seperti tergambar, tentukanlah penurunan segera pada pusat fondasi dengan cara Steinbrenner



Gambar CVII.2

Penyelesaian ;

Pembebanan netto $q_n = q - \gamma_b \cdot D_f = 350 - 18,84 \times 1 = 331,16 \text{ kN/m}^2$

Untuk menghitung penurunan segera pada pusat fondasi (titik A) maka fondasi dibagi 4 bahagian, sehingga titik A berada disudut-sudut luasan sesuai teori Steinbrenner.

Tinjau satu luasan

$B = 18,3 / 2 = 9,15 \text{ m}$

$L = 54,88 / 2 = 27,44 \text{ m}$

$\mu = 0,5$, maka $I_p = (1 - 0,5^2)F_1 + (1 - 0,5 - 2 \times 0,5^2)F_2 = 0,75 F_1 + 0F_2 = 0,75 F_1$

Penurunan segera pada lempung 1 untuk keempat luasan

$$L/B = 27,44/9,15 = 3$$

$$H/B = 3 / 9,15 = 0,33 \quad \text{Dari Gambar VII.4 diperoleh } F_1 = 0,03$$

$$Si_1 = \frac{331,16 \times 9,15}{36788} \times 0,75 \times 0,03 \times 4 = 0,007 \text{ m}$$

Penurunan segera pada lempung 2 untuk keempat luasan, H diperhitungkan = 6 m

$$L/B = 27,44/9,15 = 3$$

$$H/B = 6 / 9,15 = 0,66 \quad \text{Dari Gambar VII.4 diperoleh } F_1 = 0,05$$

$$Si_2 = \frac{331,16 \times 9,15}{29430} \times 0,75 \times 0,05 \times 4 = 0,015 \text{ m}$$

Tebal tanah lapisan 2 sebenarnya 3 m, untuk itu dilakukan pengurangan penurunan sebesar ;

$$Si_3 = \frac{331,16 \times 9,15}{29430} \times 0,75 \times 0,03 \times 4 = 0,009 \text{ m}$$

Penurunan segera ;

$$Si = Si_1 + Si_2 - Si_3 = 0,007 + 0,015 - 0,009 = 0,013 \text{ m} = 1,3 \text{ cm.}$$

Janbu, Bjerrum dan Kjaernsli (1956) mengusulkan penurunan segera rata-rata untuk beban terbagi rata fleksibel berbentuk empat persegi panjang dan lingkaran dengan $\mu = 0,5$ adalah

$$Si = \mu_1 \mu_o \frac{q_n B}{E} \quad (\text{hanya untuk } \mu = 0,5)$$

dengan ;

Si = penurunan segera rata-rata (m)

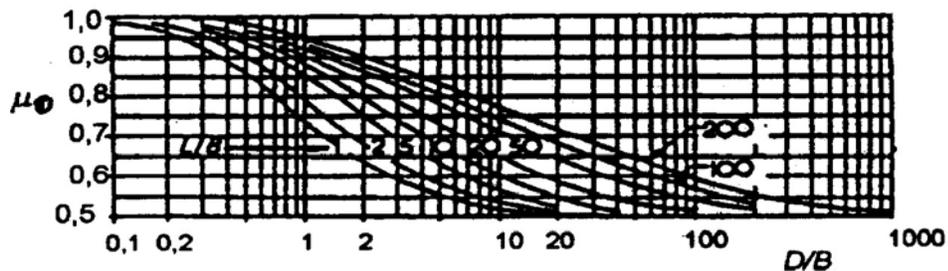
μ_o = faktor koreksi untuk kedalaman fondasi D_f

μ_1 = faktor koreksi untuk lapisan tanah tebal terbatas H

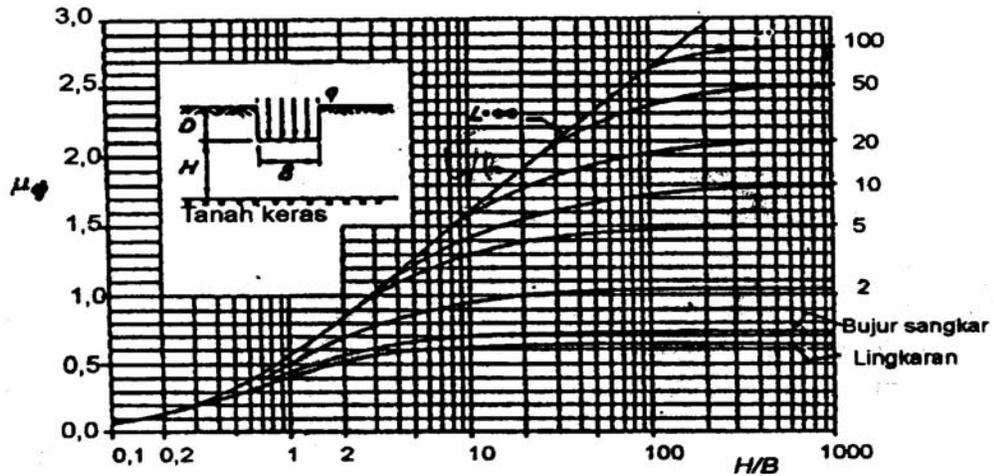
B = lebar beban terbagi rata luasan empat persegi, diameter untuk lingkaran

q_n = tambahan tegangan netto (kN/m^2)

E = modulus elastisitas



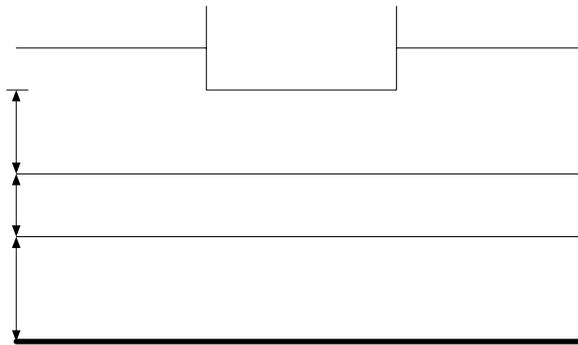
Gambar VII.6 Grafik harga μ_o (Janbu dkk - 1956)



Gambar VII.7 Grafik harga μ_1 (Janbu dkk, 1956)

Contoh soal

Sebuah fondasi fleksibel terletak diatas lapisan tanah seperti tergambar,



Gambar CVII.3

Angka poisson $\mu = 0,5$ untuk seluruh lapisan tanah, hitung penurunan segera rata-rata dengan cara Janbu dkk

Penyelesaian ;

$$L/B = 40/10 = 4$$

$$D/B = 3/10 = 0,3$$

Gambar VII.6 diperoleh $\mu_0 = 0,96$

Lapisan 1

$$H/B = 10/10 = 1$$

$$L/B = 40/10 = 4$$

Gambar VII.7 diperoleh $\mu_1 = 0,55$

$$Si(1) = 0,55 \times 0,96 \frac{100 \times 10}{20000} = 0,026 m$$

Lapisan 2 dengan anggapan $H = 10 + 5 = 15 \text{ m}$

$$H/B = 15/10 = 1,5$$

$$L/B = 40/10 = 4$$

Gambar VII.7 diperoleh $\mu_1 = 0,67$

$$Si(2) = 0,67 \times 0,96 \frac{100 \times 10}{30000} = 0,022 \text{ m}$$

Tebal lapisan 2 sebenarnya 5 m, maka diadakan pengurangan sebesar

$$Si(3) = 0,55 \times 0,96 \frac{100 \times 10}{30000} = 0,018 \text{ m}$$

Lapisan 3 dengan anggapan $H = 10 + 5 + 10 = 25 \text{ m}$

$$H/B = 25/10 = 2,5$$

$$L/B = 40/10 = 4$$

Gambar VII.7 diperoleh $\mu_1 = 0,88$

$$Si(4) = 0,88 \times 0,96 \frac{100 \times 10}{40000} = 0,022 \text{ m}$$

Tebal lapisan 3 sebenarnya 10 m, maka diadakan pengurangan sebesar

$$Si(5) = 0,67 \times 0,96 \frac{100 \times 10}{40000} = 0,016 \text{ m}$$

Penurunan segera rata-rata pada seluruh lapisan adalah ;

$$Si = Si(1) + Si(2) - Si(3) + Si(4) - Si(5)$$

$$= 0,026 + 0,022 - 0,018 + 0,022 - 0,016$$

$$Si = 0,036 \text{ m} = 3,6 \text{ cm.}$$

4 Penurunan segera pada pondasi kaku.

Penurunan segera pada pondasi kaku di permukaan sekitar 7% lebih kecil dari penurunan rata-rata pondasi fleksibel dengan dimensi yang sama (Schleicher, 1926), sehingga penurunan pondasi kaku = 0,93 x penurunan pondasi fleksibel.

$$Si \text{ (kaku)} \approx 0,93 \times Si \text{ (rata-rata fleksibel)}$$

$$Si \text{ (rata-rata fleksibel)} \approx 0,85 \times Si \text{ (dipusat, fleksibel)}$$

$$Si \text{ (kaku)} \approx 0,80 \times Si \text{ (dipusat, fleksibel)}$$

5 Perkiraan penurunan pada tanah pasir dengan korelasi empiris.

A. Perkiraan penurunan dengan menggunakan hasil uji pelat beban.

Terzaghi dan Peck (1967) menyarankan persamaan penurunan untuk pondasi pada tanah pasir dengan insensitas beban q dan lebar B adalah ;

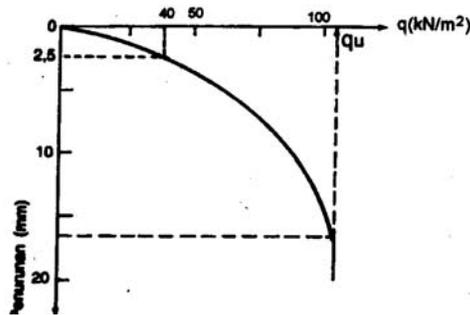
$$S_B = \left(\frac{2B}{B+b} \right)^2 \times S_b$$

dengan ;

S_B = penurunan pondasi sebenarnya S_b = penurunan pada uji beban plat
 b = lebar plat pengujian B = lebar plat sebenarnya.

Contoh soal,

Hasil uji plat beban pada pasir seperti tergambar ;



Gambar CVII.4

Hitung penurunan fondasi dengan lebar $B = 2$ m, pada penurunan beban plat 2,5 mm. Dimensi plat uji 30 x 30 cm.

Penyelesaian ;

$$S_B = \left[\frac{2B}{B+b} \right]^2 \times S_b = \left[\frac{2 \times 2}{2+0,3} \right]^2 \times 2,5 = 7,6 \text{ mm}$$

B. Perkiraan penurunan dengan menggunakan hasil uji SPT.

Meyerhoff (1965) mengadakan uji SPT pada tanah pasir mendapatkan hubungan ;

$$S_i = \frac{4q}{N} \text{ untuk } B \leq 1,2m$$

dan

$$S_i = \frac{6q}{N} \left(\frac{B}{B+1} \right)^2 \text{ untuk } B > 1,2m$$

dengan ;

q = intensitas beban yang diterapkan dalam kip/ft² (kip/ft² = 0,49 kg/cm²)
 B = lebar pondasi dalam fit (1 ft = 30,48 cm)
 S_i = penurunan segera dalam inchi (1 inchi = 2,54 cm)
 N = jumlah pukulan pada uji SPT

Boyles (1977) menyarankan ;

$$S_i = \frac{2,5q}{N} \text{ untuk } B \leq 1,2m$$

dan

$$S_i = \frac{4q}{N} \left(\frac{B}{B+1} \right)^2 \text{ untuk } B > 1,2m$$

dengan satuan sama dengan persamaan Meyerhoff

Berdasarkan data lapangan Schultze dan Sherif (1973), Meyerhof (1974) memberikan hubungan empiris untuk penurunan pondasi dangkal sebagai berikut ;

$$S_i = \frac{q\sqrt{B}}{2N} \text{ untuk pasir dan kerikil}$$

$$S_i = \frac{q\sqrt{B}}{N} \text{ untuk pasir berlanau}$$

dengan ;

- S_i = Penurunan dalam inchi
- q = intensitas beban yang diterapkan dalam ton / ft²
- B = lebar pondasi dalam inchi.

C. Perkiraan penurunan menggunakan hasil uji penetrasi kerucut statis (sondir).

Penurunan pondasi pada tanah granuler dari hasil uji sondir, **De Beer dan Marten (1957)** mengusulkan persamaan angka kompresi (C) dikaitkan persamaan Buismann ;

$$C = \frac{1,5q_c}{p_o'}$$

dengan ;

- C = angka pemampatan (angka kompresibilitas)
- q_c = tahanan kerucut statis
- p_o' = tekanan overburden efektif

satuan q_c dan p_o' harus sama , nilai C disubsitusikan ke persamaan Terzaghi untuk penurunan pada lapisan tanah

$$S_i = \frac{H}{C} \ln \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'}$$

dengan ;

- S_i = penurunan akhir dari lapisan setebal H
- p_o' = overburden efektif awal, tegangan efektif sebelum beban bekerja
- Δp = tambahan tegangan vertikal ditengah lapisan akibat beban pondasi netto.

Sebagai pendekatan antara nilai q_c dan N SPT, Meyerhof menyarankan ;

$$q_c = 4 N \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Schemertmann (1970) mengusulkan untuk menghitung penurunan pada tanah granuler adalah ;

$$S_i = C_1 C_2 q \sum_0^{2B} \frac{I_z}{E} \Delta z$$

dengan

- C_1 = faktor koreksi kedalaman
- C_2 = faktor rangkak (creep)
- q = tambahan tegangan neto pada dasar pondasi akibat beban yang bekerja
- B = lebar beban
- I_z = faktor pengaruh regangan vertikal
- E = modulus deformasi
- Δz = tebal lapisan

Faktor koreksi kedalaman

$$C_1 = 1 - 0,5 \left(\frac{p_o'}{q} \right)$$

p_o' = overburden efektif pada dasar fondasi q = beban netto pada dasar fondasi

Faktor koreksi akibat rangkak dihitung ;

$$C_2 = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right)$$

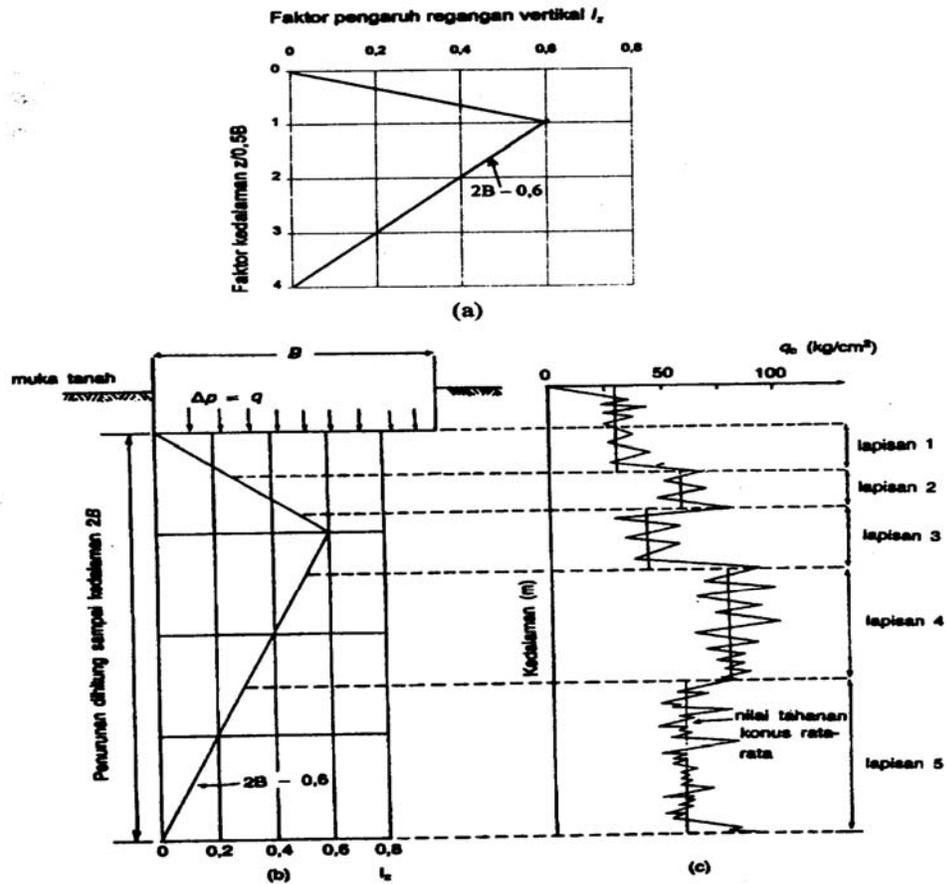
t = waktu yang ditinjau dinyatakan dalam tahun.

Hubungan N dan q_c disarankan sebagai berikut ;

- a. Lanau, lanau berpasir dan sedikit kohesif, $N = 2 q_c$
- b. Pasir bersih halus s/d sedang, sedikit berlanau $N = 3,5 q_c$
- c. Pasir kasar sedikit berkerikil $N = 5 q_c$
- d. Kerikil atau sedikit berpasir $N = 6 q_c$

Tahap – tahap perhitungan

- a. **Gambar VII.8a.** Mengambarkan **faktor pengaruh (I_z)** diperoleh dari kurva **(2B-0,6)** dihubungkan dengan faktor tak berdimensi **$z/0,5B$** .
- b. **Modulus deformasi E** diperoleh dari perkalian nilai kerucut q_c dengan faktor empiris 2 sehingga **$E = 2 q_c$** . Hubungan N dan q_c seperti diatas.



Gambar VII.8 penurunan Schemertmann.

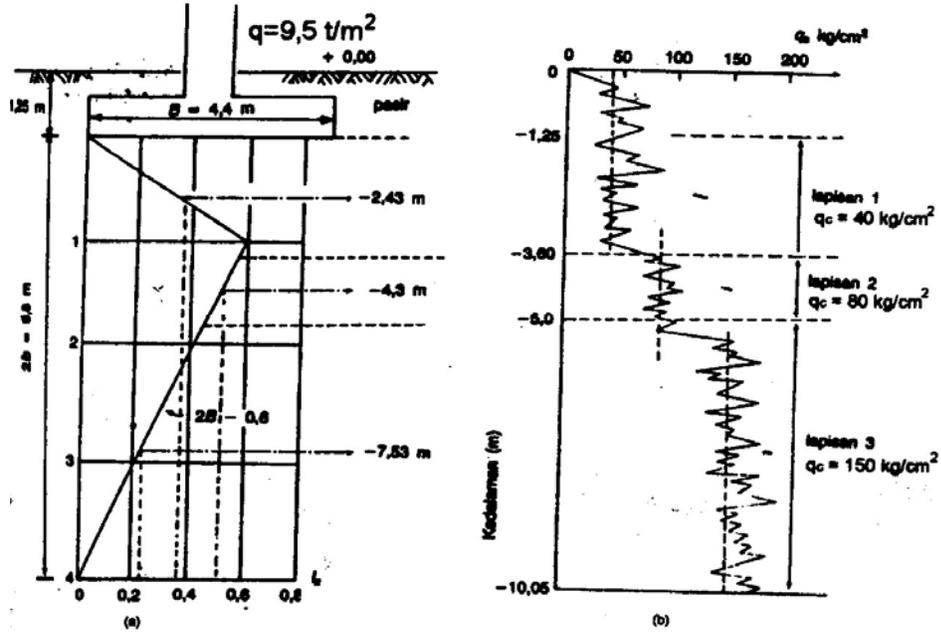
- Gambar VII.8c. Diagram tahanan kerucut dibagi dalam lapisan-lapisan yang nilai tahanan konusnya mewakili sama besar.
- Gambar VII.8b. Kurva $(2B-0,6)$ diletakkan dibawah dasar fondasi dan digambar dengan skala tertentu.
- Nilai penurunan akibat beban dihitung dari hitungan nilai E dan I_z yang sesuai untuk setiap lapisannya.
- Jumlah penuruna setiap lapisan dikoreksi terhadap faktor kedalaman dan faktor rangkai.

Contoh soal

Fondasi bangunan dirancang dengan menggunakan hasil uji kerucut statis (hasil uji terlampir). Beban terbagi rata didasar fondasi $q = 9,5 \text{ t/m}^2$. fondasi yang dipakai adalah fondasi telapak bujur sangkar $4,4 \times 4,4 \text{ m}$ dengan kedalaman $1,25 \text{ m}$. Berat volume tanah sebesar $\rho_b = 1,85 \text{ t/m}^3$. Hitunglah penurunan akibat beban fondasi dengan cara

- De Beer dan Marten
- Schmertmann

Penyelesaian ;



Gambar CVII.5

Besarnya kompresi yang diperhitungkan adalah $2B = 2 \times 4,4 = 8,8$ m dibawah dasar fondasi. Berdasarkan hasil uji kerucut sondir lapisan tanah dapat dibagi 3 lapisan dengan q_c yang dirata-ratakan.

Tabel CVII.1

Kedalaman (m)	Nilai q_c (kg/cm^2)
1,25 – 3,60	40
3,60 – 5,00	80
5,00 – 10,05	150

a. Penurunan dengan cara De Beer dan Martin

* Menghitung overburden efektif awal ditengah tengah tiap lapisan

Tabel CVII.2

Lapisan	Kedalaman titik tengah lapisan (m)	p_o' (t/m^2)
I	$1,25 + (3,6-1,25)/2 = 2,43$	$2,43 \times 1,85 = 4,50$
II	$3,60 + (5 - 3,6)/2 = 4,3$	$4,30 \times 1,85 = 7,96$
III	$5 + (10,05-5)/2 = 7,53$	$7,53 \times 1,85 = 13,93$

* Menghitung tambahan tegangan netto akibat beban

$$q_n = q - \gamma_b D_f = 9,5 - 1,85 \times 1,25 = 7,19 \text{ T/m}^2 = 0,719 \text{ kg/cm}^2$$

* Menghitung tambahan tegangan (Δp) akibat beban fondasi dipusat fondasi pada tengah setiap lapisan sedalam z (z = kedalaman dari dasar fondasi)

Tabel CVII.3

D (m)	z = D - 1,25(m)	B (m)	L (m)	m = B/z	n = L/z	I	$\Delta p = 4q_0 I$ (kg/cm ²)
2,43	1,18	2,20	2,20	1,86	1,86	0,229	0,659
4,30	3,05	2,20	2,20	0,72	0,72	0,135	0,388
7,53	6,28	2,20	2,20	0,35	0,35	0,050	0,144

* Menghitung penurunan dengan rumus – rumus

$$C = \frac{1,5q_c}{p_o'}$$

dan

$$S_i = \frac{H}{C} \ln \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'}$$

Tabel CVII.4

D (cm)	H (cm)	q _c	p _o '	C	Δp (kg/cm ²)	Si (cm)
125 - 360	235	40	0,449	133,63	0,659	1,59
360 - 500	140	80	0,796	150,75	0,388	0,37
500 – 1005	505	150	1,393	161,52	0,144	0,31
Jumlah						2,27

Jadi penurunan terjadi adalah 2,27 cm

b. Schmertmann

Pada dasar fondasi digambarkan diagram Schmertmann, tinggi diagram $2B = 8,8$ m. Diagram ini untuk menghitung I_z , hitungan selanjutnya adalah;

$$C_1 = 1 - 0,5 \left(\frac{p_o'}{q} \right) \quad C_2 = 1 + 0,2 \log \left(\frac{t}{0,1} \right) \quad S_i = C_1 C_2 q \sum_0^{2B} \frac{I_z}{E} \Delta z \quad E = 2 q_c$$

p_o' = overburden didasar fondasi t = waktu tinjau 50 tahun

q = beban netto pada dasar fondasi Δz = tebal lapisan

Tabel CVII.5

D (cm)	Iz	Δz (cm)	C1	C2	q _c (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	Si (cm)
2,43	0,33	235	0,84	1,54	40	80	0,90
4,3	0,52	140	0,84	1,54	80	160	0,42
7,53	0,23	505	0,84	1,54	150	300	0,36
Jumlah							1,68

Penurunan = 1,68 cm.

VII.3 Penurunan konsolidasi primer.

Penurunan konsolidasi primer ;

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

Lempung normally consolidated

$$\Delta e = C_c \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'}$$

Lempung over consolidated

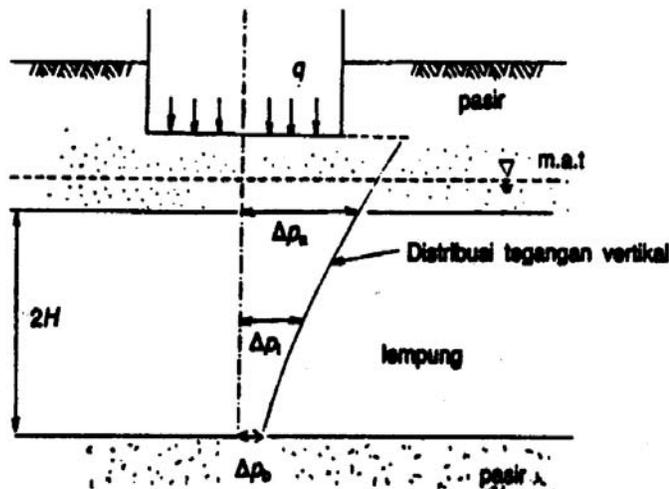
Jika $p_1' < p_c'$

$$\Delta e = C_r \log \frac{p_1'}{p_o'} = C_r \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad \text{dimana } p_1' = p_o' + \Delta p$$

Jika $p_o' < p_c' < p_1'$

$$\Delta e = C_r \log \frac{p_c'}{p_o'} + C_c \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_c'}$$

Cara I



Gambar VII.9 Penurunan konsolidasi primer

1. Hitung tekanan overburden efektif rata-rata (p_o') pada lapisan lempung.
2. Hitung tambahan tegangan pada puncak, tengah dan dasar lempung, hasilnya dirata-ratakan dengan cara Simpson,

$$\Delta p = \frac{1}{6} (\Delta p_a + 4\Delta p_t + \Delta p_b)$$

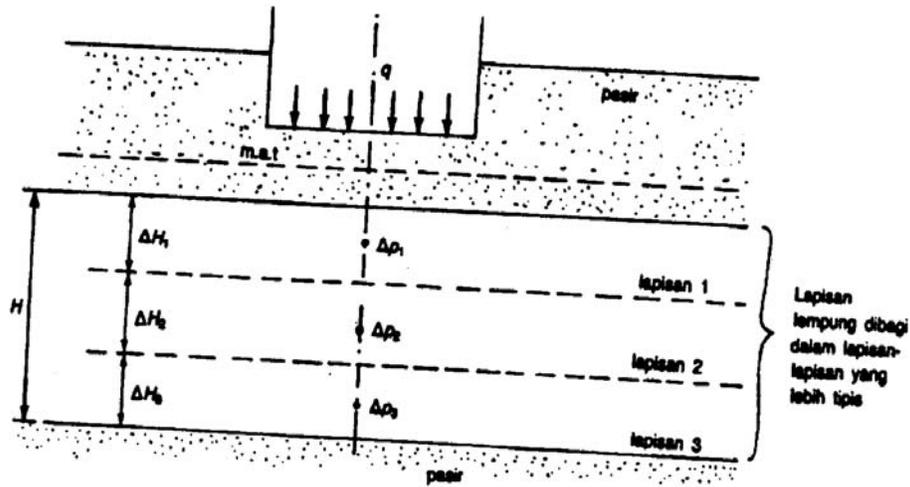
3. Gunakan p_o' dan Δp hasil hitungan untuk memperoleh nilai Δe
4. Hitung penurunan konsolidasi dengan rumus

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

Cara II.

1. Bagi lapisan lempung dalam n lapisan
2. hitung tegangan efektif p_0' untuk pada setiap tengah lapisan
3. hitung tambahan tegangan (Δp) di tiap-tiap pusat lapisan akibat beban luar
4. hitung Δe untuk setiap lapisan
5. hitung besarnya penurunan konsolidasi total dengan ;

$$S_c = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta S_c = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta e}{1 + e_0} \Delta H$$



Gambar VII.10 Penurunan konsolidasi primer cara 2

Penurunan konsolidasi berdasarkan koefisien perubahan volume (m_v)

1. bagi lapisan lempung dalam n lapisan
2. hitung tambahan tegangan disetiap tengah lapisan
3. penurunan dihitung

$$S_c = \sum_{i=1}^{i=n} m_v \Delta p \Delta H$$

Koreksi penurunan primer diakibatkan oleh deformasi lateral dari tanah lempung adalah ;

$$S_c = \beta S_{c(oed)}$$

Dengan

- $S_{c(oed)}$ = penurunan yang dihitung berdasarkan uji konsolidasi laboratorium.
- S_c = penurunan konsolidasi primer di lapangan
- β = nilai koreksi Skemton & Bjerrum

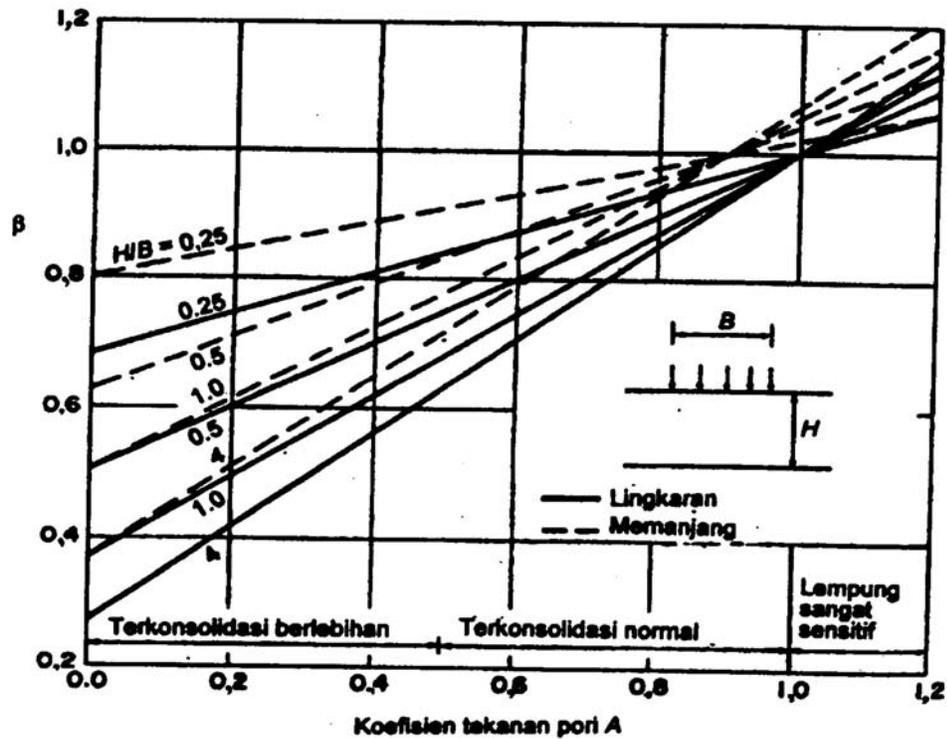
Tabel VII.1 Nilai α untuk koreksi penurunan konsolidasi (Skempton & Bjerrum, 1957)

H/B	Pondasi Lingkaran	Pondasi Memanjang
0	1,00	1,00
0,25	0,67	0,80
0,50	0,50	0,63
1,00	0,38	0,53
2,00	0,30	0,45
4,00	0,28	0,38
10,00	0,26	0,36
∞	0,25	0,25

Dalam tabel H adalah tebal lapisan dan B adalah lebar pondasi.

Tabel VII.2 Perkiraan nilai β untuk koreksi penurunan konsolidasi.

Macam lempung	β
Lempung sangat sensitif	1 – 1,2
Lempung normally consolidated	0,7 – 1,0
Lempung overconsolidated	0,5 – 0,7
Lempung sangat overconsolidated	0,2 – 0,5



Gambar VII.11 Koreksi konsolidasi β (Skempton & Bjerrum, 1957)

$$\beta = A + (1 - A)\alpha$$

Contoh soal - 1

Periode pelaksanaan bangunan berlangsung dari tahun 1960 sampai tahun 1962. pada tahun 1965 penurunan rata-rata 11,4 cm. Dari hasil hitungan diperkirakan penurunan 36,9 cm. Berapa penurunan pada tahun 1970 ?

Penyelesaian ;

Untuk menghitung kecepatan konsolidasi, $t = 0$ diambil pertengahan waktu penyelesaian pembangunan yaitu tahun 1961. pada periode 1961 – 1965 (4 th), terjadi penurunan 11,4 cm, yang akan dihitung penurunan pada tahun 1970 ($t = 9$ th),

Anggap $U < 60\%$, maka

$$T_v = \frac{\pi}{4} U^2 \qquad \frac{S_{c1}}{S_{c2}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{T_{v1}}}{\sqrt{T_{v2}}} = \frac{t_1}{t_2}$$

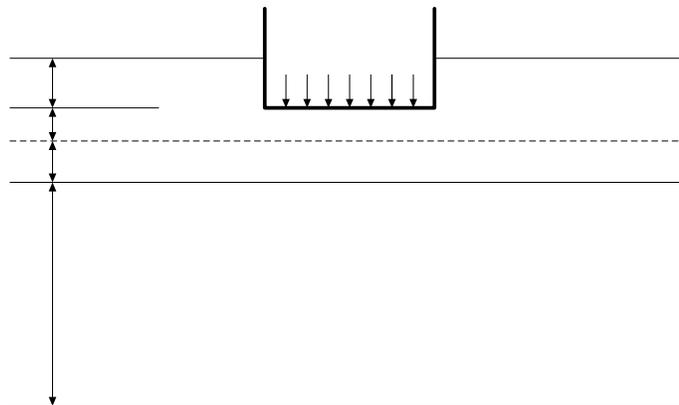
Karena $\frac{C_v}{Ht^2}$ konstan maka $\frac{11,4}{S_{c2}} = \frac{\sqrt{4}}{\sqrt{9}}$ diperoleh $S_{c2} = 17,1$ cm

Jadi pada $t = 9$ tahun (1970), penurunan konsolidasi 17,1 cm

Pada saat ini $U = \frac{17,1}{36,9} = 46,34\% < 60\%$, maka anggapan semula adalah benar.

Contoh soal - 2

Sebuah tangki berpenampang lingkaran terletak pada tanah seperti tergambar,



Gambar CVII.6

Tentukan penurunan konsolidasi yang terjadi pada tanah lempung dibawah pusat fondasi ?

Penyelesaian ;

Tekanan fondasi netto ;

$$q_n = q - \gamma_b D_f = 166,95 - 16,95 \cdot 1 = 150 \text{ kN/m}^2$$

Cara I

Menghitung tekanan overburden efektif ditengah – tengah lapisan lempung

$$\begin{aligned}
 p_o' &= 1,5 \sigma_b + 0,5 (\sigma_{sat} - \sigma_w) + 2,5 (\sigma_{sat} - \sigma_w) \\
 &= 1,5 \times 16,95 + 0,5 \times (18,91 - 9,81) + 2,5 \times (18,32 - 9,81) \\
 &= 25,425 + 4,55 + 21,275 \\
 &= 51,25
 \end{aligned}$$

Menghitung tambahan tegangan

$$\Delta p = q_n I$$

Tabel CVII. 6

	r (m)	z (m)	x (m)	z/r	x/r	I	Δp
Δp_a	1	1	0	1	0	0,63	94,50
Δp_t	1	3,5	0	3,5	0	0,12	18
Δp_b	1	6	0	6	0	0,04	6

$$\Delta p = 1/6 (\Delta p_a + 4\Delta p_t + \Delta p_b) = 1/6(94,50 + 72 + 6) = 28,75 \text{ kN/m}^2$$

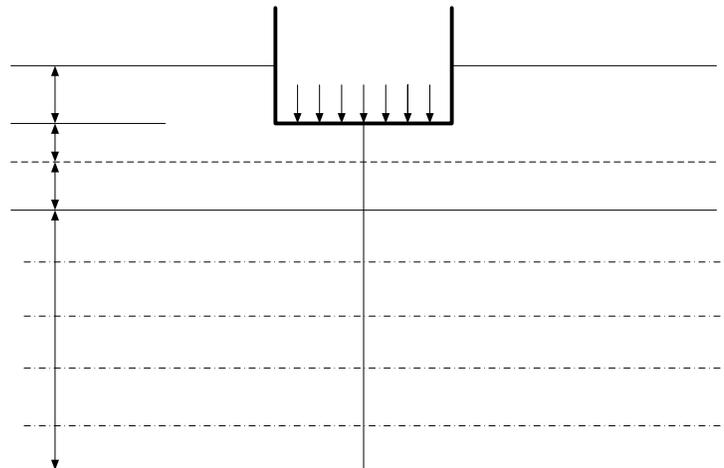
$$\Delta e = 0,159 \log \frac{51,25 + 28,75}{51,25} = 0,03075$$

$$S_c = \frac{0,03075}{1 + 0,851} 5 = 0,083 \text{ m} = 8,3 \text{ cm.}$$

Dengan memperhatikan koreksi Skempton dan Bjerrum, untuk lempung normally nilai β diantara 0,7 s/d 1. Jika dipilih $\beta = 1$, maka $S_c = 1 \times 8,3 \text{ cm} = 8,3 \text{ cm}$.

Cara II

Lapisan lempung dibagi dalam beberapa lapis, misalnya dibagi dalam lima lapis,



Gambar CVII.7

Menghitung overburden efektif (p_o') pada tengah-tengah setiap lapisan

$$\begin{aligned}
 p_{o1}' &= 16,95 \times 1,5 + (18,91 - 9,81) \times 0,5 + (18,32 - 9,81) \times 0,5 = 34,23 \text{ kN/m}^2. \\
 p_{o2}' &= 34,23 + (18,32 - 9,81) \times 1 = 42,74 \text{ kN/m}^2. \\
 p_{o3}' &= 42,74 + (18,32 - 9,81) \times 1 = 51,25 \text{ kN/m}^2. \\
 p_{o4}' &= 51,25 + (18,32 - 9,81) \times 1 = 59,76 \text{ kN/m}^2. \\
 p_{o5}' &= 51,25 + (18,32 - 9,81) \times 1 = 68,27 \text{ kN/m}^2.
 \end{aligned}$$

Menghitung tambahan beban akibat beban fondasi

Tabel CVII.7

Lapis	r (m)	z (m)	x (m)	z/r	x/r	l	$\Delta p = q_n l$
1	1	1,5	0	1,5	0	0,44	66,00
2	1	2,5	0	2,5	0	0,20	30,00
3	1	3,5	0	3,5	0	0,12	18,00
4	1	4,5	0	4,5	0	0,07	10,05
5	1	5,5	0	5,5	0	0,05	7,20

Menghitung penurunan konsolidasi

Lempung normally consolidated

$$\Delta e = Cc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'}$$

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

Tabel CVII.8

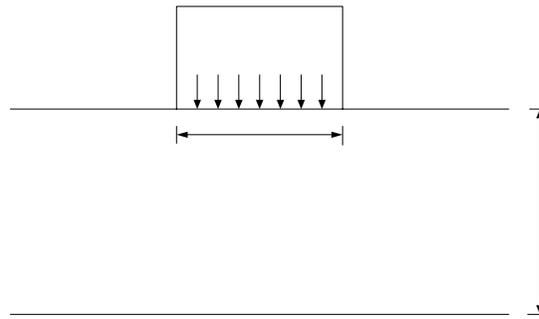
Lapis	ΔH (m)	p_o' (kN/m ²)	Δp (kN/m ²)	Δe	S_c (m)
1	1	34,23	66,00	0,074	0,040
2	1	42,74	30,00	0,037	0,020
3	1	51,25	18,00	0,021	0,011
4	1	59,76	10,05	0,011	0,006
5	1	68,27	7,20	0,007	0,004
Jumlah					0,081

Diperoleh penurunan konsolidasi $S_c = 0,081 \text{ m} = 8,1 \text{ cm}$

Dengan memperhatikan koreksi Skempton dan Bjerrum, untuk lempung normally nilai β diantara 0,7 s/d 1. Jika dipilih $\beta = 1$, maka $S_c = 1 \times 8,1 \text{ cm} = 8,1 \text{ cm}$.

Contoh soal - 3

Sebuah tangki perpenampang lingkaran mendukung beban 100 kN/m^2 , terletak diatas lempung normally consolidated jenuh seperti tergambar ;



Gambar CVII.8

Nilai rata – rata parameter tekanan air pori (A) diambil dari hasil uji triaksial dari sampel yang tidak terganggu adalah 0,61. Hitung penurunan konsolidasi

Penyelesaian ;

Menghitung overburden rata-rata atau ditengah lapisan lempung ;

$$p_o' = (\sigma_{sat} - \sigma_w) / 3 = (21,81 - 9,81) / 3 = 36 \text{ kN/m}^2$$

Menghitung tambahan beban akibat pembebanan fondasi

$$\Delta p = q_n I$$

Tabel CVII.9

	r (m)	z (m)	x (m)	z/r	x/r	I	Δp
Δp_a	2	0	0	0	0	1	100
Δp_t	2	3	0	1,5	0	0,43	43
Δp_b	2	6	0	3	0	0,15	15

$$\Delta p = 1/6 (\Delta p_a + 4\Delta p_t + \Delta p_b) = 1/6(100 + 172 + 15) = 47,83 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta e = 0,63 \log \frac{36 + 47,83}{36} = 0,23$$

$$S_c = \frac{0,23}{1+1} 6 = 0,69 \text{ m} = 69 \text{ cm.}$$

Koreksi Skempton dan Bjerrum, untuk $H/B = 6/4 = 1,5$ fondasi lingkaran diperoleh $\alpha = 0,34$

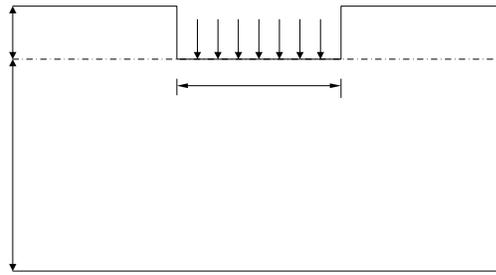
$$\beta = A + (1 - A)\alpha = 0,61 + (1 - 0,61) 0,34 = 0,61 + 0,13 = 0,74$$

$$S_c = 0,74 \times 69 = 51,06 \text{ cm}$$

$$\text{Penurunan konsolidasi} = 51,06 \text{ cm.}$$

Contoh soal - 4

Fondasi bujur sangkar (6 x 6) m, mendukung beban terbagi rata 199,62 kN/m². Fondasi berada pada tanah lempung seperti tergambar ;



Gambar CVII. 9

2 m

Hitung ;

- a. Penurunan total dibawah pusat luasan fondasi
- b. Hitung waktu penurunan konsolidasi 50% jika $C_v = 3,6 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{dt}$

Lempung

15 m

Penyelesaian ;

a. Penurunan total dibawah pusat fondasi

* Menghitung penurunan segera

Karena $\mu = 0,5$ maka penurunan segera rata-rata dibawah fondasi adalah ;

$$S_i = \mu_1 \mu_2 \frac{q_n B}{E} \quad (\text{Janbu dkk}) \quad q_n = 199,62 - 2 \times 19,81 = 160 \text{ kN/m}^2$$

$$H/B = 15/6 = 2,5 \quad L/B = 6/6 = 1 \quad D/B = 2/6 = 0,33$$

Dari grafik diperoleh $\mu_0 = 0,91$ $\mu_1 = 0,60$

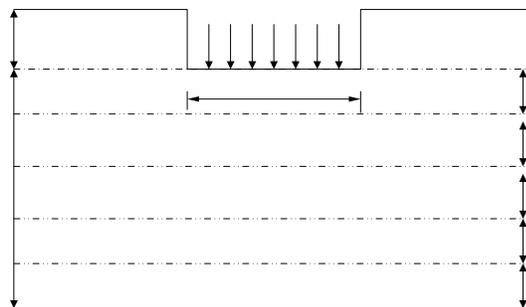
Penurunan segera adalah

$$S_i = 0,91 \times 0,60 \frac{160 \times 6}{50000} = 0,01 \text{ m} = 1 \text{ cm}$$

* Menghitung penurunan konsolidasi

$$S_c = \sum_{i=1}^{i=n} m_v \Delta p \Delta H$$

Tebal lapisan dibagi menjadi 5 lapisan dengan masing-masing ketebalan 3 m



Gambar CVII.10

Tabel CVII.10

Lapisan	z (m)	n = L/z	m = B/z	l	$\Delta p = 4ql$	$S_{c(oed)}$ (m)
1	1,50	2,00	2,00	0,232	148,48	0,058
2	4,50	0,67	0,67	0,125	80,00	0,031
3	7,50	0,40	0,40	0,060	38,40	0,015
4	10,50	0,29	0,29	0,035	22,40	0,009
5	13,50	0,22	0,22	0,025	16,00	0,006
$S_{c(oed)}$						0,119

Dari koreksi Skempton dan Bjerrum, yang ada fondasi lingkaran dan fondasi memanjang, untuk fondasi bujursangkar diinterpolasi ke fondasi lingkaran

$$\text{Luas fondasi} = 6 \times 6 = 36 = \pi D^2/4$$

$$D^2 = 4 \times 36 / 3,14$$

$$D = 6,77 \text{ m}$$

$$H/B = 15/6,77 = 2,22 \text{ diperoleh } \alpha = 0,29$$

$$\beta = 0,3 + (1 - 0,3) \times 0,29 = 0,5$$

Penurunan konsolidasi primer terkoreksi

$$\begin{aligned} S_c &= \beta S_{c(oed)} \\ &= 0,5 \times 0,119 \text{ m} = 0,0595 \text{ m} = 5,95 \text{ cm} \end{aligned}$$

Penurunan total adalah

$$S = S_i + S_c = 1 + 5,95 = 6,95 \text{ cm.}$$

b. Menghitung waktu penurunan konsolidasi 50%

$$U = 50\% \text{ dari tabel diperoleh } T_v = 0,197$$

$$t = \frac{T_v H t^2}{C_v} = \frac{0,197 \times 15^2}{3,6 \times 10^{-6}} = 12312500 \text{ dt} = 142,5 \text{ hari}$$