

PERBANDINGAN PENURUNAN KONSOLIDASI

Hanny Tangkudung

ABSTRAK

Pada tulisan ini ditinjau tanah tiga lapisan dengan ketebalan total 14 meter. Tinjauan perhitungan penurunan konsolidasinya dilakukan pada setiap ketebalan 0,5 meter dan jarak drain vertikal yang ditinjau adalah pada 0,60 meter; 3,00 meter; 4,80 meter dan 6,00 meter dengan jari-jari drain yang sama yaitu 3 cm. Jadi $n = R / r$ bervariasi sebagai berikut : 10, 50, 80 dan 100. Dari hasil tinjauan tiga dimensi terlihat setelah diplot ke grafik, ternyata asimtotis ke suatu garis horisontal yang bila dibandingkan dengan yang satu dimensi berbanding 2,2 : 1,0 (2,2 kali lebih besar penurunannya). Dari hasil perhitungan dapat dilihat bahwa jika jarak drain diambil bervariasi untuk waktu t yang besar, hasilnya akan tetap menuju ke suatu harga yang relatif sama yang harga penurunannya S_c adalah 2,2 kali harga penurunan S_c untuk satu dimensi. Berdasarkan hasil tersebut, bisa disimpulkan tinjauan penurunan konsolidasi satu dimensi bisa digunakan untuk tiga dimensi dengan memakai faktor keamanan sebesar 2,2 atau lebih.

Kata kunci : *konsolidasi satu dimensi, konsolidasi tiga dimensi, faktor keamanan*

1. PENDAHULUAN

Penurunan tanah akibat beban bangunan di alam sifatnya tiga dimensi, tetapi untuk menghitung penurunan konsolidasi di laboratorium diadakan tes konsolidasi yang sifat-sifatnya satu dimensi. Berdasarkan hasil dari parameter-parameter tanah yang didapat dari tes konsolidasi yang bersifat satu dimensi, diperkirakan keadaan di alam yang tiga dimensi, tentu dibagi dengan suatu faktor (faktor keamanan). Untuk hal tersebut di atas, diteliti kemungkinan bila proses konsolidasi terjadi pada tiga dimensi yaitu arah vertikal dan arah radial dengan cara memasang drain-drain vertika, sehingga bisa terjadi drainasi ke arah horisontal.

2. TEORI KONSOLIDASI DAN PENURUNAN

2.1. Teori Konsolidasi

Secara teoritis, konsep proses konsolidasi telah dikembangkan oleh Terzaghi pada tahun 1923 sehingga muncul teori yang dikenal sebagai Teori Konsolidasi Terzaghi Satu Dimensi. Rumusnya adalah :

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

dimana : u = tekanan air pori lebih; t = waktu; C_v = koefisien konsolidasi; z = jarak vertikal.

Rumus ini menjelaskan tentang proses konsolidasi satu dimensi ke arah vertikal (sumbu z), dimana anggapan penurunan ke arah z sama dengan jumlah tekanan air pori lebih yang berkurang. Di sini harga C_v didapat dari tes konsolidasi dengan alat

konsolidometer yang sifatnya satu dimensi. Juga teori Terzaghi tersebut di atas dibatasi oleh beberapa anggapan sebagai berikut : 1.) Tanah dianggap jenuh 100%. ; 2.) Tanah homogen. ; 3.) Berlaku hukum Darcy. ; 4.) Koefisien permeabilitas k adalah konstan. ; 5.) Air dan partikel-partikel tanah tidak termampatkan. ; 6.) Tekanan yang bekerja dan perubahan volume berubah secara linier. ; 7.) Tegangan total dan tekanan air pori terbagi rata pada setiap bidang horizontal. ; 8.) Proses konsolidasi sifatnya satu dimensi (aliran hanya ke arah vertikal, tidak ada ke arah horisontal). ; 9.) Beban dan deformasi sifatnya satu arah (arah sumbu z).

Jadi terlihat bahwa bila teori konsolidasi satu dimensi tersebut kita aplikasikan di alam yang sifatnya tiga dimensi harus ada faktor koreksi supaya tepat. Hal tersebut yang akan dibahas selanjutnya.

2.2. Teori Penurunan

Sesuai dengan penjelasan pada awal, yang akan dibahas hanya penurunan konsolidasi primer (S_c) karena hal ini yang merupakan masalah yang paling berbahaya untuk tanah jenis lempung. Penurunan konsolidasi primer biasanya dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma}{\sigma_0}$$

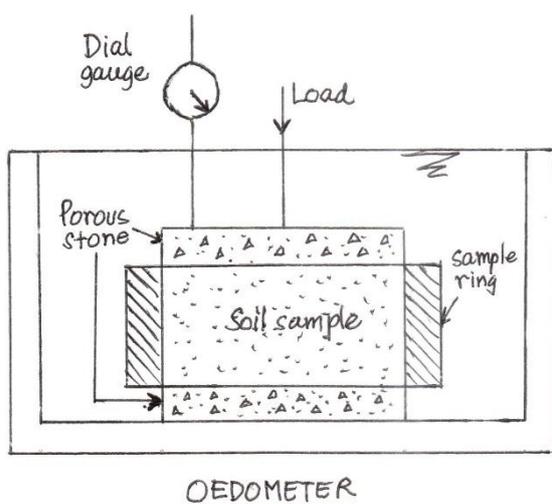
dimana : C_c = indeks kompresibilitas; H = tebal lapisan tanah; e_0 = angka pori awal; σ_0 = tegangan awal; $\Delta \sigma$ = tambahan tegangan.

Rumus tersebut di atas sesuai dengan proses konsolidasi satu dimensi dari Terzaghi. Hasilnya akan menggambarkan penurunan yang sifatnya satu dimensi. Untuk mendapatkan penurunan yang sifatnya tiga dimensi, harus terjadi proses konsolidasi pada tiga arah yaitu vertikal dan radial. Tinjauan tiga dimensi tersebut akan dibahas selanjutnya.

3. PENURUNAN KONSOLIDASI SATU DIMENSI

3.1. Percobaan Di Laboratorium

Untuk memeriksa proses konsolidasi pada tanah lempung di laboratorium, digunakan alat konsolidometer (oedometer).



Gbr 1. Skema Alat Oedometer Di Laboratorium

Terlihat dari konsolidometer (oedometer) pada gambar di atas. Bila contoh tanahnya dibebani maka deformasi yang dimungkinkan hanya ke arah vertikal saja sedangkan deformasi ke arah horizontal/radial dibatasi oleh cincin besi yang kaku sehingga tidak dimungkinkan terjadi deformasi. Timbul masalah di sini yaitu bagaimanakah jika proses konsolidasi di alam (tiga dimensi) yang tidak ada "cincin besi". Apakah deformasi vertikalnya masih seperti yang didapat di laboratorium? Jelas tidak dan hal tersebut yang akan dibahas selanjutnya.

3.2. Menentukan Penurunan Satu Dimensi

Berdasarkan tes di laboratorium (yang sifatnya satu dimensi) kita bisa memperoleh parameter-parameter tanah yang dibutuhkan untuk menghitung penurunan. Data-data yang diperlukan antara lain : C_c , C_v , σ_0 , $\Delta\sigma$, e_0 dan H didapat dari tes di lapangan. Untuk ketelitian perhitungan dianjurkan tebal lapisan H dibagi atas beberapa lapisan yang tipis (disini diambil 0,50 m) kemudian digunakan

rumus berikut untuk menghitung besarnya penurunan :

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

Untuk menghitung waktu penurunan menggunakan rumus berikut :

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

4. PENURUNAN KONSOLIDASI TIGA DIMENSI

4.1. Teori-Teori Dasar

Disini digunakan vertikal drain supaya bisa terjadi aliran horisontal/radial sehingga bisa didapat tinjauan proses konsolidasi tiga dimensi. Selain teori Terzaghi juga akan dibahas teori-teori vertikal drain lainnya. Teori Terzaghi untuk proses konsolidasi tiga dimensi bisa ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\delta u}{\delta t} = C_v \cdot \frac{\delta^2 u}{\delta z^2} + C_{vr} \cdot \left[\frac{\delta^2 u}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\delta u}{\delta r} \right]$$

$$U_v \% = 100 \cdot f(T_v)$$

Teori Carillo untuk aliran radial tiga dimensi adalah sebagai berikut :

$$U = 1 - (1 - U_r) \cdot (1 - U_v)$$

dimana : U = derajat konsolidasi yang disebabkan oleh drainase gabungan vertikal dan radial; U_r = derajat konsolidasi rata-rata akibat drainase radial pada waktu t ; U_v = derajat konsolidasi akibat drainase vertikal pada waktu t .

Teori Rendulic untuk aliran arah radial horizontal adalah sebagai berikut :

$$U_r \% = 100 \cdot f(T_r)$$

$$T_r = \frac{C_{vr} \cdot t}{(2R)^2}$$

dimana : T_r = faktor waktu untuk aliran radial horizontal; $2R$ = diameter efektif silinder tanah yang airnya mengalir dalam butir-butir tanah.

Berdasarkan teori-teori tersebut di atas dan dengan membuat beberapa variasi jarak drain R , maka dihitung penurunan konsolidasi untuk proses konsolidasi primer tiga dimensi.

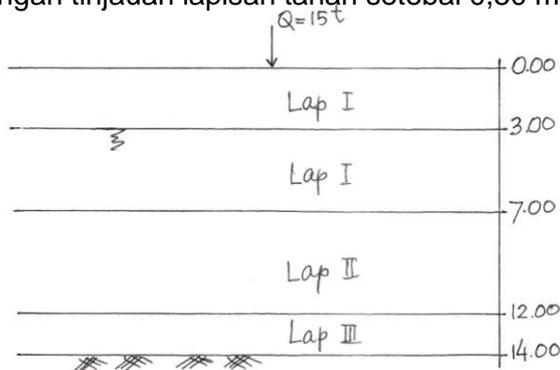
4.2. Menentukan Penurunan Tiga Dimensi

Mula-mula kita tentukan dahulu parameter-parameter tanah (C_{vr}) arah radial, besar drainase vertikal (r) dan jaraknya ($2R$). Kemudian kita gunakan rumus Rendulic untuk mencari harga T_r dan U_r . Selanjutnya harga U_r dari Rendulic tadi dimasukkan dalam rumus Carillo untuk mencari harga U (derajat konsolidasi yang sifatnya tiga dimensi). Untuk mendapat harga U perlu juga U_v dari Terzaghi. Setelah U didapat, kemudian

dibandingkan dengan Teori Terzaghi dan didapat S_c yang bersifat tiga dimensi.

5. APLIKASI DAN PERBANDINGAN

Untuk contoh perhitungan digunakan tanah lempung yang contohnya mempunyai data-data seperti terlihat di bawah ini. Beban yang dipakai sebagai contoh adalah $Q = 15$ ton (beban terpusat) dan ditinjau tiga lapisan tanah yang berbeda (lapisan I, II dan III) dengan tinjauan lapisan tanah setebal 0,50 m.



Data Tanah	Tanah Lap. I	Tanah Lap. II	Tanah Lap. III
γ (t/m^3)	1,71	1,61	1,80
c (kg/cm^2)	0,25	0,20	0,25
C_v (cm^2/det)	$6,67 \cdot 10^{-4}$	$6,67 \cdot 10^{-4}$	$6,67 \cdot 10^{-4}$
C_c	0,2	0,2	0,2
e_0	1,381	1,381	1,381

Langkah-langkah perhitungan penurunan konsolidasi satu dimensi adalah sebagai berikut :

1. Bagi lapisan tanah menjadi sub lapisan dengan ketebalan (z) yang sama yakni 0,5 m.
2. Hitung tegangan tanah efektif dengan persamaan :

$$\sigma_0' = \sigma - u$$

dimana : σ_0' = tegangan efektif vertikal; σ = tegangan vertikal total pada kedalaman z ; u = tekanan air pori

3. Hitung tegangan akibat beban luar ($Q = 15$ ton) dengan menggunakan persamaan :

$$\sigma_z = \frac{Q \cdot K_b}{z^2}$$

dimana : $K_b = 0,4775$

4. Hitung penurunan konsolidasi satu dimensi dengan persamaan :

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}$$

5. Hitung waktu penurunan dengan menggunakan persamaan :

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

Hasil perhitungan ditampilkan dalam tabel-tabel berikut :

Kedalaman	σ_0'	$\Delta\sigma$	S_c (cm)
0,5	0,0855	2,86500	6,45910
1,0	0,1710	0,71625	3,00310
1,5	0,2565	0,31833	1,47190
2,0	0,3420	0,17906	0,76800
2,5	0,4275	0,11460	0,43320
3,0	0,5130	0,07958	0,26300
3,5	0,5485	0,05847	0,18480
4,0	0,5840	0,04477	0,13470
4,5	0,6195	0,03537	0,10130
5,0	0,6550	0,02865	0,07808
5,5	0,6905	0,02368	0,06149
6,0	0,7260	0,01990	0,04931
6,5	0,7615	0,01695	0,04015
7,0	0,7970	0,01462	0,03314
7,5	0,8275	0,01273	0,02785
8,0	0,8580	0,01119	0,02365
8,5	0,8885	0,00991	0,02024
9,0	0,9190	0,00884	0,01747
9,5	0,9495	0,00794	0,01520
10,0	0,9800	0,00716	0,01327
10,5	1,0105	0,00650	0,01168
11,0	1,0410	0,00592	0,01033
11,5	1,0715	0,00542	0,00920
12,0	1,1020	0,00497	0,00819
12,5	1,1420	0,00458	0,00731
13,0	1,1820	0,00424	0,00655
13,5	1,1220	0,00393	0,00584
14,0	1,2620	0,00365	0,00525
Penurunan Total =			13,263

Tabel 1. Hasil Perhitungan Penurunan Konsolidasi Satu Dimensi

Derajat Konsolidasi	Waktu Penurunan (t) (tahun)		
	Tanah Lap. I $H = 7,0$ m	Tanah Lap. II $H = 5,0$ m	Tanah Lap. III $H = 2,0$ m
$U_v = 90\%$ $T_v = 0,848$ $t_{90} =$	19,75	10,08	1,61
Total waktu penurunan = 31,44 tahun			
$U_v = 75\%$ $T_v = 0,478$ $t_{75} =$	11,135	5,68	0,909
Total waktu penurunan = 17,724 tahun			
$U_v = 50\%$ $T_v = 0,197$ $t_{50} =$	4,59	2,34	0,37
Total waktu penurunan = 7,3 tahun			
$U_v = 25\%$ $T_v = 0,051$ $t_{25} =$	1,188	0,606	0,907
Total waktu penurunan = 1,89 tahun			
Penurunan pada $U_v = 75\%$	$S_{75} = (75\% / 90\%) \times S_{tot}$ $S_{75} =$		11,0525
Penurunan pada $U_v = 50\%$	$S_{50} = (50\% / 90\%) \times S_{tot}$ $S_{50} =$		7,368
Penurunan pada $U_v = 25\%$	$S_{25} = (25\% / 90\%) \times S_{tot}$ $S_{25} =$		3,684

Tabel 2. Hasil Perhitungan Waktu Penurunan

Langkah-langkah perhitungan penurunan konsolidasi tiga dimensi adalah sebagai berikut :

1. Tentukan C_{vr} . Nilai $C_{vr} = C_v = 6,67 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{det}$.
2. Tentukan diameter efektif dari silinder tanah yang airnya mengalir dalam butir-butir tanah ($2R$). Dalam perhitungan ini dipilih $2R = 60 \text{ cm}, 300 \text{ cm}, 480 \text{ cm}$ dan 600 cm . Dengan demikian $R = 30 \text{ cm}, 150 \text{ cm}, 240 \text{ cm}$ dan 300 cm .
3. Tentukan jari-jari drain, r . r ditentukan 3 cm
4. Tentukan n untuk masing-masing R dengan persamaan : $n = R / r$
5. Hitung T_r pada tiap-tiap lapisan dengan $U_v = 25 \%, 50 \%, 75 \%$ dan 90% untuk setiap n dengan persamaan :

$$T_r = \frac{C_{vr} \cdot t}{(2R)^2}$$

6. Hitung U_r dari hasil pada langkah 4.
7. Hitung penurunan konsolidasi dengan menggunakan persamaan :

$$U = 1 - (1 - U_r) \cdot (1 - U_v)$$

Hasil perhitungan dilampirkan dalam tabel-tabel berikut :

$$n = (R / r) = (30 / 3) = 10$$

U_v (%)	t_v (tahun)	T_r	U_r	U	Sc (cm)
$U_v = 0,25,$ $T_v = 0,051$					
Lapisan I	1,188	6,9417	0,99	0,9925	9,925
Lapisan II	0,606	3,5417	0,99	0,9925	9,925
Lapisan III	0,097	0,5667	0,9414	0,95605	9,5605
Total	1,89				29,411
$U_v = 0,50,$ $T_v = 0,197$					
Lapisan I	4,59	26,8139	0,99	0,995	9,95
Lapisan II	2,34	13,681	0,99	0,995	9,95
Lapisan III	0,37	2,1889	0,99	0,995	9,95
Total	7,3				29,85
$U_v = 0,75,$ $T_v = 0,478$					
Lapisan I	11,135	65,061	0,99	0,9975	9,975
Lapisan II	5,68	33,194	0,99	0,9975	9,975
Lapisan III	0,909	5,311	0,99	0,9975	9,975
Total	17,724				29,925
$U_v = 0,90,$ $T_v = 0,848$					
Lapisan I	19,75	115,422	0,99	0,999	9,99
Lapisan II	10,08	58,889	0,99	0,999	9,99
Lapisan III	1,61	9,442	0,99	0,999	9,99
Total	31,44				29,97

Tabel 3. Hasil Perhitungan Penurunan Pada $n = 10$

$$n = (R / r) = (150 / 3) = 50$$

U_v (%)	t_v (tahun)	T_r	U_r	U	Sc (cm)
$U_v = 0,25,$ $T_v = 0,051$					
Lapisan I	1,188	0,2777	0,5044	0,6283	6,283
Lapisan II	0,606	0,1417	0,3012	0,4579	4,759
Lapisan III	0,097	0,0227	0,0561	0,2921	2,921
Total	1,89				13,963
$U_v = 0,50,$ $T_v = 0,197$					
Lapisan I	4,59	1,0726	0,9295	0,9647	9,647
Lapisan II	2,34	0,5472	0,7495	0,8747	8,747
Lapisan III	0,37	0,0876	0,199	0,5996	5,996
Total	7,3				24,39
$U_v = 0,75,$ $T_v = 0,478$					
Lapisan I	11,135	2,602	0,99	0,9975	9,975
Lapisan II	5,68	1,3278	0,959	0,9897	9,897
Lapisan III	0,909	0,2124	0,4153	0,8538	8,538
Total	17,724				28,41
$U_v = 0,90,$ $T_v = 0,848$					
Lapisan I	19,75	4,6169	0,99	0,999	9,99
Lapisan II	10,08	2,3556	0,99	0,999	9,99
Lapisan III	1,61	0,3769	0,6141	0,9641	9,641
Total	31,44				29,594

Tabel 4. Hasil Perhitungan Penurunan Pada $n = 50$

$$n = (R / r) = (240 / 3) = 80$$

U_v (%)	t_v (tahun)	T_r	U_r	U	Sc (cm)
$U_v = 0,25,$ $T_v = 0,051$					
Lapisan I	1,188	0,108	0,2117	0,409	4,09
Lapisan II	0,606	0,055	0,113	0,335	3,35
Lapisan III	0,097	0,0089	0,0561	0,261	2,61
Total	1,89				10,05
$U_v = 0,50,$ $T_v = 0,197$					
Lapisan I	4,59	0,419	0,602	0,801	8,01
Lapisan II	2,34	0,214	0,375	0,687	6,87
Lapisan III	0,37	0,034	0,056	0,528	5,28
Total	7,3				20,16
$U_v = 0,75,$ $T_v = 0,478$					
Lapisan I	11,135	1,016	0,892	0,973	9,73
Lapisan II	5,68	0,519	0,688	0,922	9,22
Lapisan III	0,909	0,083	0,167	0,792	7,92
Total	17,724				26,87
$U_v = 0,90,$ $T_v = 0,848$					
Lapisan I	19,75	1,803	0,974	0,997	9,97
Lapisan II	10,08	0,92	0,866	0,987	9,87
Lapisan III	1,61	0,147	0,276	0,928	9,28
Total	31,44				29,12

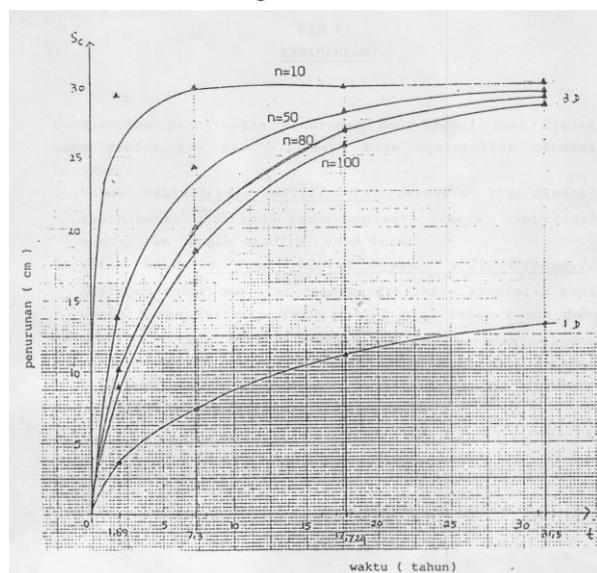
Tabel 5. Hasil Perhitungan Penurunan Pada $n = 80$

$$n = (R / r) = (300 / 3) = 100$$

U_v (%)	t_v (tahun)	T_r	U_r	U	S_c (cm)
$U_v = 0,25$, $T_v = 0,051$ Lapisan I Lapisan II Lapisan III Total	1,188 0,606 0,097 1,89	0,0694 0,0354 0,0057	0,1329 0,07 0,0114	0,3437 0,3025 0,2585	3,437 3,025 2,585 9,047
$U_v = 0,50$, $T_v = 0,197$ Lapisan I Lapisan II Lapisan III Total	4,59 2,34 0,37 7,3	0,2681 0,1368 0,0219	0,4263 0,2466 0,0438	0,7131 0,6233 0,5219	7,131 6,233 5,219 18,5835
$U_v = 0,75$, $T_v = 0,478$ Lapisan I Lapisan II Lapisan III Total	11,135 5,68 0,909 17,724	0,6506 0,3319 0,0531	0,7416 0,4977 0,1037	0,9354 0,8744 0,7759	9,354 8,744 7,759 25,857
$U_v = 0,90$, $T_v = 0,848$ Lapisan I Lapisan II Lapisan III Total	19,75 10,08 1,61 31,44	1,154 0,5889 0,0942	0,9066 0,7120 0,1771	0,9907 0,9712 0,9177	9,907 9,712 9,177 28,796

Tabel 6. Hasil Perhitungan Penurunan Pada $n = 100$

Selanjutnya adalah plot hasil perhitungan konsolidasi penurunan satu dimensi dan tiga dimensi pada kurva penurunan konsolidasi satu dimensi dan tiga dimensi.



Gbr 2. Kurva Penurunan Konsolidasi Satu Dimensi dan Tiga Dimensi

Keterangan :

- = Penurunan konsolidasi satu dimensi pada waktu t
- ▲ = Penurunan konsolidasi tiga dimensi pada waktu t
- = Kurva penurunan konsolidasi satu dimensi
- = Kurva penurunan konsolidasi tiga dimensi

6. KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan penurunan konsolidasi yang terlihat pada grafik, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Untuk waktu t yang relatif kecil, penurunan tiga dimensi lebih besar dibandingkan penurunan satu dimensi tapi tidak menunjukkan angka banding yang tetap.
2. Untuk waktu t yang relatif besar ($\geq 31,44$ tahun), terlihat penurunan tiga dimensi grafiknya asimtotis pada suatu harga tertentu yaitu 2,2 kali lebih besar dari pada penurunan satu dimensi. Angka ini merupakan suatu faktor koreksi (faktor keamanan) yang harus kita gunakan bila kita hanya melaksanakan tes dan perhitungan satu dimensi.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, J., "Physical and Geotechnical Properties of Soil" Mc Graw-Hill, Inc, 1984.
- Das, B. M., "Advanced Soil Mechanics", Mc Graw-Hill Book Co, 1985.
- Punmia, B. C., "Soil Mechanics and Foundations", Standard Book House, Delhi, 1981.
- Terzaghi, K., "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons Inc, 1967.