

CRITICAL STATE LINE, ROSCOE DAN HVORSLEV SURFACE : STUDI KASUS SAMPEL TANAH U.K. MARANATHA BANDUNG

Andrias Suhendra Nugraha^[1]

ABSTRAK

Stabilitas merupakan salah satu unsur perhitungan yang regular dalam rekayasa geoteknik. Perhitungan stabilitas berhubungan dengan keruntuhan dari massa tanah dengan *large deformation* yang terjadi pada bidang runtuh yang diikuti oleh keruntuhan dari struktur geoteknik. Hal ini menunjukkan bahwa analisa terhadap perilaku tegangan regangan pada kondisi *critical state* sangat penting. Perilaku tanah tidak hanya tergantung pada kondisi awal dan akhir dari tegangan tetapi juga pada lintasan di mana kondisi tegangan dan regangan berubah serta sejarah pembebanan sebelumnya. Lintasan tersebut berbeda untuk setiap jenis dan kondisi konsolidasi sampel tanah. Namun, jejak lintasan tersebut akan cenderung menuju suatu *boundary surface* yang unik untuk kemudian menyusuri *surface* menuju suatu *critical state line* yang juga tunggal dan unik. Tulisan ini hendak menjabarkan mengenai *critical state line*, yang merupakan tujuan akhir dari runtuhnya tanah yang dibebani serta menjabarkan suatu *boundary surface* yang terdiri dari Roscoe *surface* yang tipikal dilewati oleh sampel tanah *normally consolidated*, dan Hvorslev *surface*, yang tipikal dilewati oleh sampel tanah *overconsolidated*. Studi kasus dilakukan pada sampel tanah lempung di U.K. Maranatha Bandung. Uji geser yang dilakukan adalah uji *triaxial consolidated undrained*. Studi kasus menunjukkan bahwa sampel tanah termasuk ke dalam tanah lempung *normally consolidated*. Parameter-parameter *critical state* yang diperoleh adalah M dan λ .

Kata kunci : *critical state line*, Roscoe *surface*, Hvorslev *surface*

1. PENDAHULUAN

Stabilitas merupakan salah satu unsur perhitungan yang regular dalam rekayasa geoteknik. Perhitungan stabilitas berhubungan dengan keruntuhan dari massa tanah dengan *large deformation* yang terjadi pada bidang runtuh yang diikuti oleh keruntuhan dari struktur geoteknik. Hal ini menunjukkan bahwa analisa terhadap perilaku tegangan (stress) regangan (strain) pada kondisi *critical state* sangat penting.

Selain kondisi awal dan kondisi akhir dari tegangan, lintasan dari tegangan dan regangan serta sejarah pembebanan akan mempengaruhi perilaku tanah. Lintasan tersebut berbeda untuk setiap jenis dan kondisi konsolidasi sampel tanah. Namun, jejak lintasan tersebut akan cenderung menuju suatu *boundary surface* yang unik untuk kemudian menyusuri *surface* menuju suatu *critical state line* yang juga tunggal dan unik.

Sejarah pembebanan pada tanah lempung dapat dinyatakan dari nilai *Over Consolidated Ratio* (OCR). Tanah lempung *normally consolidated* adalah tanah yang memiliki nilai OCR = 1.0 ($P'_c/P'_o = 1.0$), dengan kata lain nilai tekanan pra konsolidasi (P'_c) sama dengan tekanan *overburden* (P'_o). Sedangkan tanah lempung *overconsolidated* adalah tanah yang menerima beban lebih besar dari beban yang bekerja saat ini atau nilai OCR > 1.

Tulisan ini membahas introduksi mengenai *critical state line*. Kemudian introduksi mengenai Roscoe *surface*, suatu *boundary surface* yang dilalui oleh tanah lempung *normally consolidated* serta introduksi mengenai Hvorslev *surface*, suatu *boundary surface* yang dilalui oleh tanah lempung *overconsolidated*.

Selanjutnya, introduksi mengenai jejak pembebanan pada tanah pasir, baik padat (dense) maupun lepas (loose).

Sampel tanah UK. Maranatha Bandung dijadikan sebagai studi kasus pada tulisan ini.

2. KRITERIA KERUNTUHAN MOHR-COULOMB

Menurut kriteria Mohr-Coulomb (Gambar 1.1), kuat geser (shear strength) meningkat seiring dengan meningkatnya tegangan normal (normal stress) pada bidang runtuh (failure plane) :

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

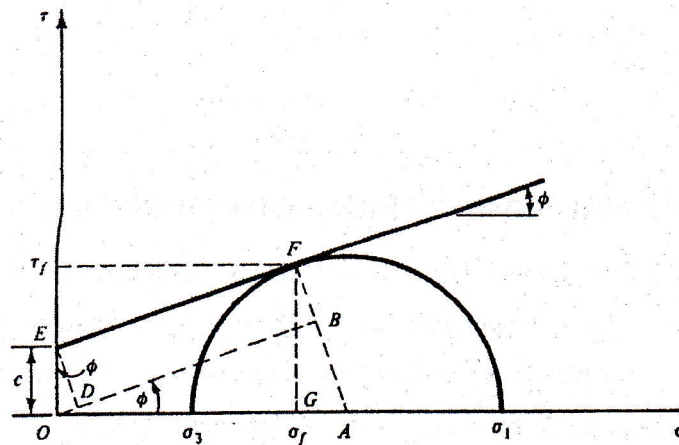
di mana :

τ = tegangan geser pada bidang runtuh

c = kohesi tanah

σ = tegangan normal

ϕ = sudut geser dalam



Gambar 1.1 Kriteria Mohr-Coulomb

Tegangan-tegangan efektif prinsipal dinyatakan sebagai :

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u \quad (2)$$

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u \quad (3)$$

di mana :

σ'_1 = tegangan efektif prinsipal mayor

σ'_3 = tegangan efektif prinsipal minor

σ_1 = tegangan total prinsipal mayor

σ_3 = tegangan total prinsipal minor

u = tegangan air pori

3. LINTASAN TEGANGAN (STRESS PATH)

Sejarah tegangan dari elemen tanah dapat dinyatakan dengan penggambaran lintasan tegangan. Untuk kondisi *axial symmetry* ($\sigma'_2 = \sigma'_3$) sumbu-sumbunya adalah :

$$q' = (\sigma'_1 - \sigma'_3) \quad (4)$$

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + 2\sigma'_3) \quad (5)$$

Critical State Line, Roscoe Dan Hvorslev Surface :

Studi Kasus Sampel Tanah U.K. Maranatha Bandung (Andrias S. N)

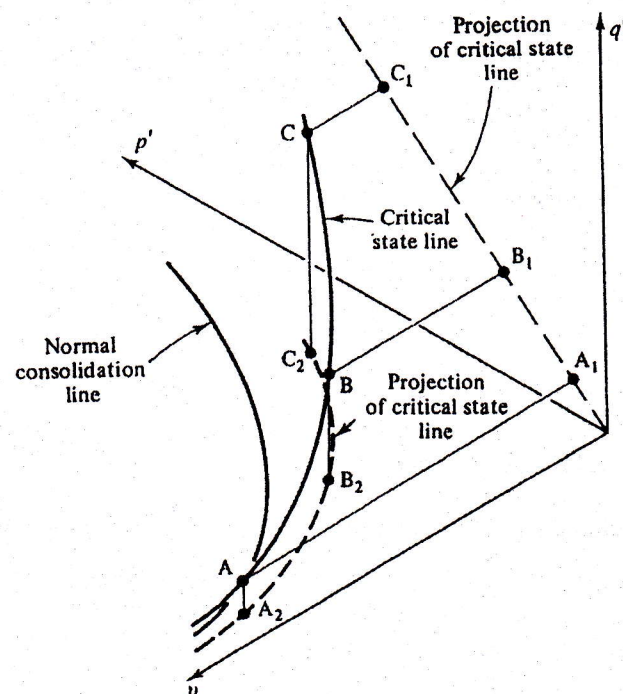
$$q = q' \quad (6)$$

$$p' = p - u \quad (7)$$

4. CRITICAL STATE LINE, ROSCOE SURFACE DAN HVORSLEV SURFACE

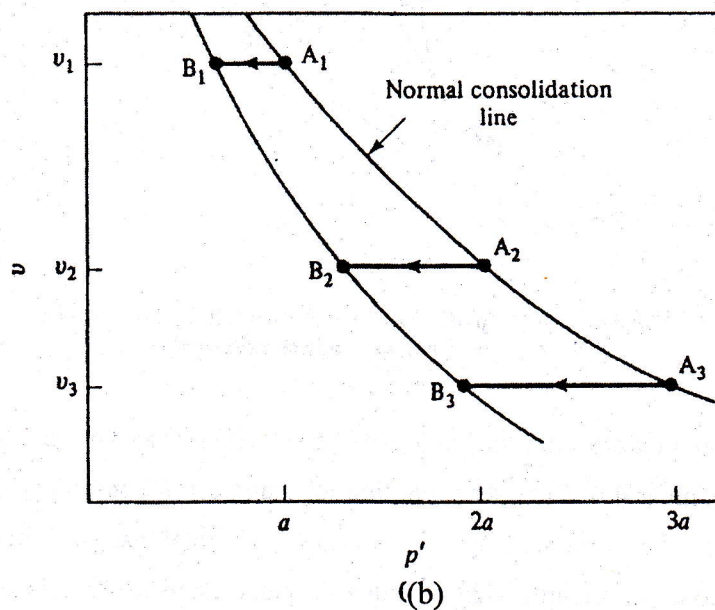
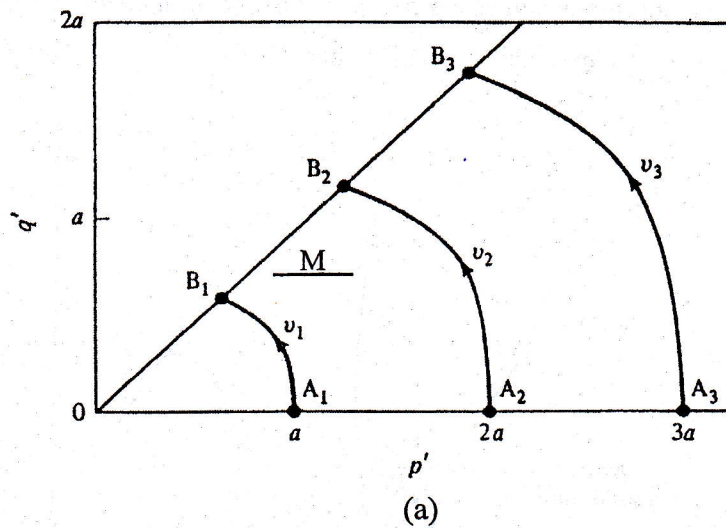
Ketika pada suatu sampel tanah lepas (loose) dilakukan uji geser maka akan melewati *progressive state of yielding* sebelum mencapai suatu kondisi runtuh, sehingga lintasan tegangan melalui beberapa *yield surface* yang menyebabkan *plastic deformation*. *Yielding* berlanjut hingga tanah mencapai suatu *critical void ratio*, yang mana angka pori (void ratio) tetap konstan selama deformasi berikutnya, sehingga tanah akan mencapai kondisi dimana tidak terjadi perubahan volume selama uji geser. Kondisi ini dinyatakan sebagai *critical state* dari tanah.

Sedangkan jika pada suatu sampel tanah padat (dense) dilakukan uji geser maka akan dicapai suatu puncak (peak) kemudian menuju suatu *residual stress*. Pada awalnya tanah menjadi *compacts*, kemudian mengalami *dilation* hingga *volumetric strain* mencapai suatu nilai yang konstan yang mana disebut sebagai *critical value*.



Gambar 4.1 Critical state line pada ruang $q' : v : p'$ dan proyeksinya pada bidang $q' : p'$ dan $v : p'$

Critical State Line (Gambar 4.1) adalah garis yang tunggal dan unik dari titik-titik keruntuhan tanah baik kondisi pengujian *drained* maupun *undrained*. Suatu sampel tanah yang dikompresi secara isotropis pada awalnya, akan melalui jejak uji menuju *critical state line*. Keruntuhan terjadi ketika kondisi tegangan mencapai garis tersebut, apapun jejak uji yang dilalui. Keruntuhan akan dinyatakan sebagai kondisi dimana distorsi geser yang besar terjadi tanpa perubahan tegangan.

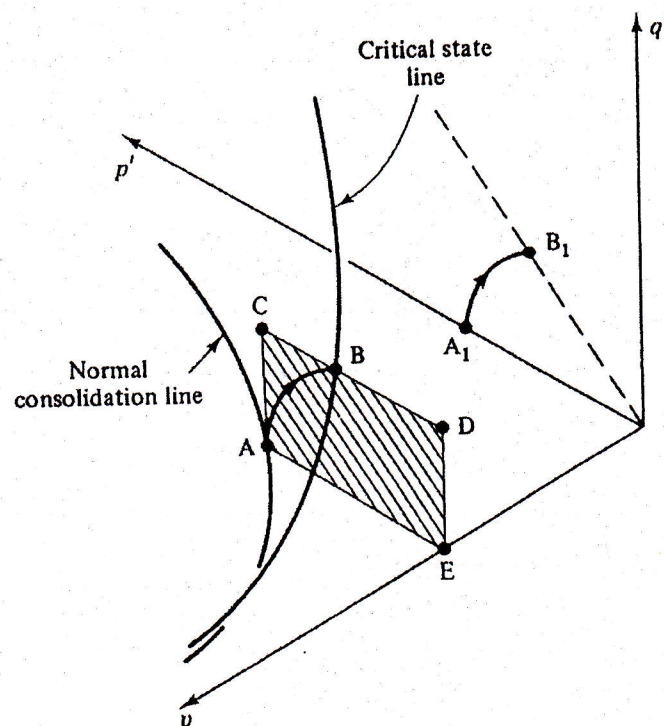


Gambar 4.2 Lintasan tegangan pada (a) bidang $q' : p'$ dan (b) bidang $v : p'$ untuk uji *undrained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated*

Hasil penjejakan lintasan pengujian *undrained* pada tanah *normally consolidated* dapat dilihat pada Gambar 4.2. Pada pengujian ini, terdapat peningkatan tekanan pori, u , sehingga terjadi penurunan nilai tekanan efektif p' seiring dengan meningkatnya q' . Adapun pada pengujian ini nilai *specific volume*, v adalah konstan.

Posisi *critical state* dari sampel tanah merupakan fungsi dari q' , p' , dan v , sehingga *critical state line* biasanya dinyatakan dalam bidang tiga dimensi $q' : p' : v$.

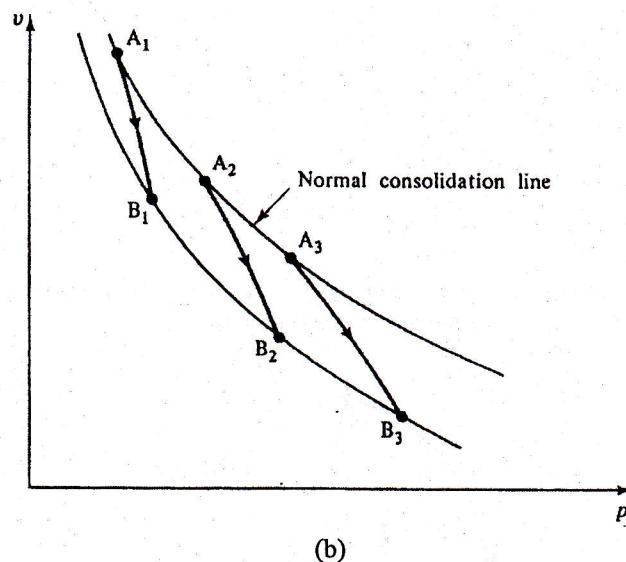
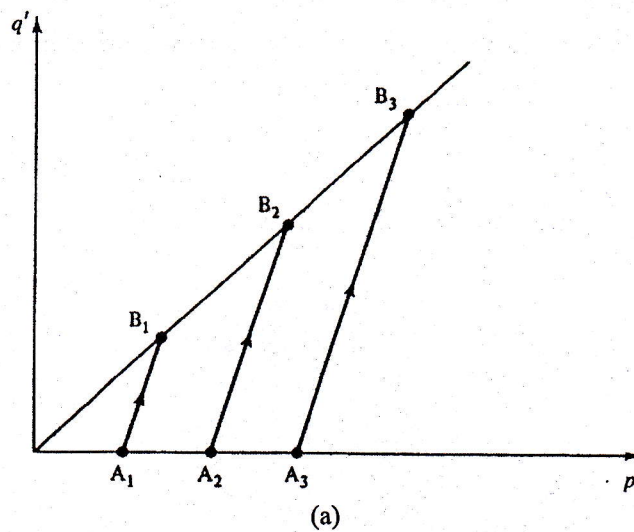
Critical state line dalam ruang $q' : p' : v$ untuk uji *undrained* pada tanah lempung *normally consolidated*, dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 *Critical state line* pada ruang $q' : p' : v$ untuk uji *undrained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated*

Hasil penjejakan lintasan pengujian *drained* pada tanah *normally consolidated* dapat dilihat pada Gambar 4.4. Pada pengujian ini, tekanan pori, u konstan, sehingga bentuk jejak tekanan efektif, p' tipikal dengan bentuk tekanan totalnya, p . Bentuk kurva $p' : q'$ membentuk slope 3. Adapun pada pengujian kondisi *drained* ini nilai *specific volume*, v menurun, seiring dengan meningkatnya p' .

Critical state line dalam ruang $q' : p' : v$ untuk uji *drained* pada tanah lempung *normally consolidated*, dapat dilihat pada Gambar 4.5.

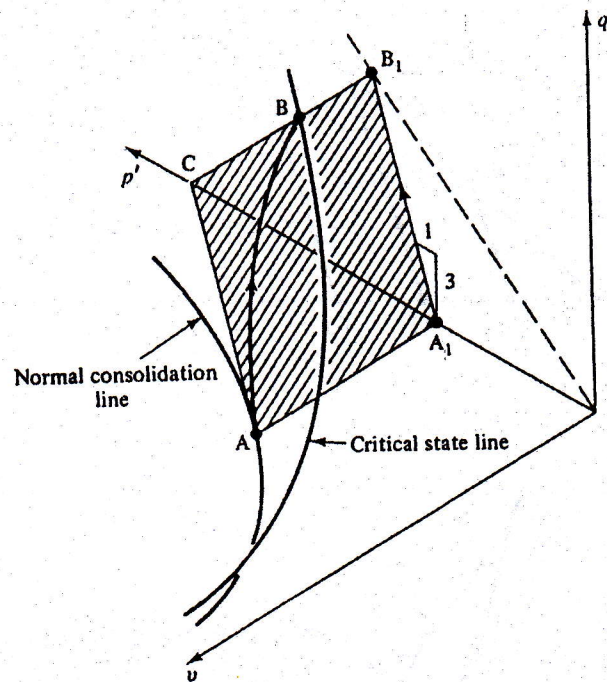


Gambar 4.4 Lintasan tegangan pada (a) bidang $q' : p'$ dan (b) bidang $v : p'$ untuk uji *drained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated*

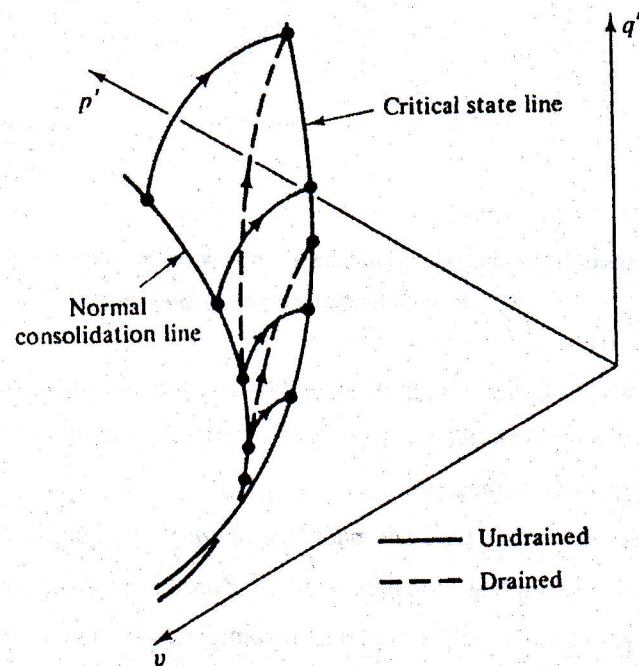
Baik kondisi *drained* maupun *undrained*, tanah lempung *normally consolidated* mengikuti jejak yang terletak pada *surface* yang sama. *Surface* yang sama tersebut dikenal sebagai Roscoe *surface* (Gambar 4.6)

Specific volume yang berubah pada uji *drained* mengakibatkan lintasan uji akan bergerak melewati penampang konstan v pada Roscoe *surface*, masing-masing dengan ukuran yang berbeda. Mengingat bentuk dari penampang konstan v adalah sama untuk nilai yang berbeda, maka untuk masing-masing penampang, dapat diskalakan dengan membagi q'

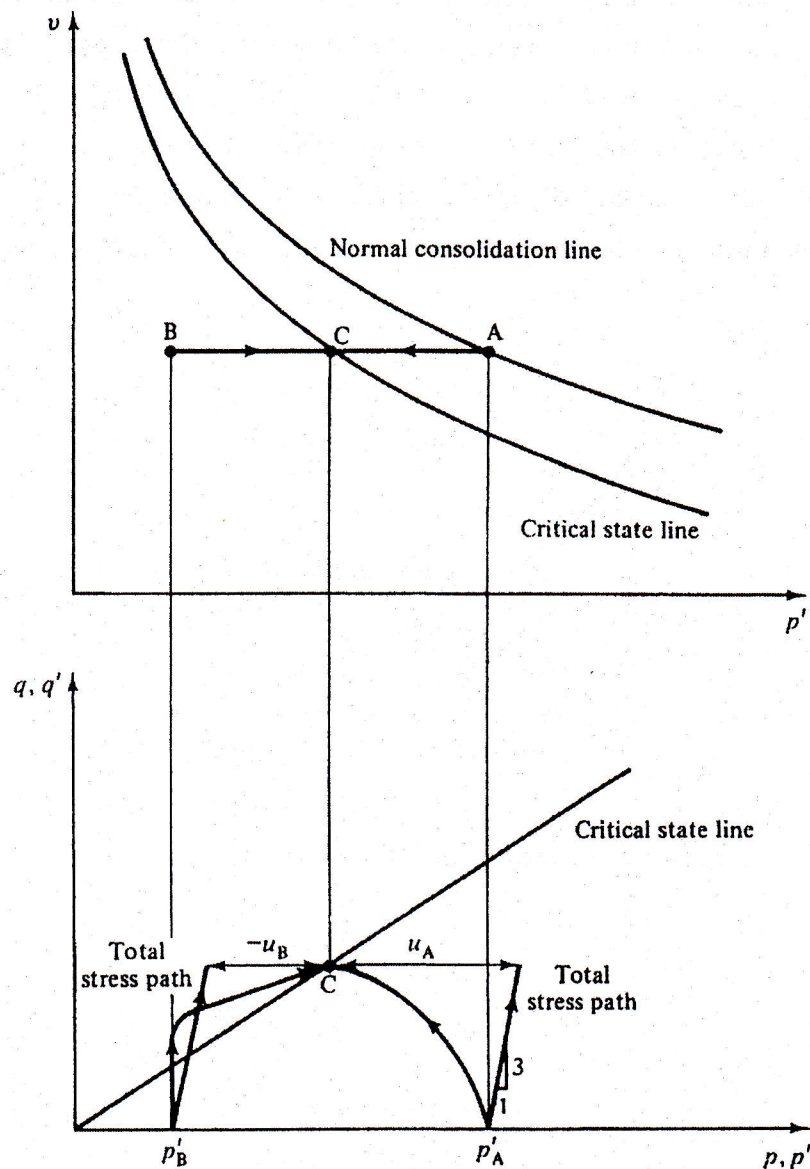
dan p' dengan p'_e tegangan ekuivalen dari tegangan efektif normal rata-rata dari *normally consolidation line* pada *specific volume* yang bersangkutan. Pada akhirnya, kurva Roscoe *surface* menjadi unik.



Gambar 4.5 *Critical state line* pada ruang $q' : p' : v$ untuk uji *drained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated*



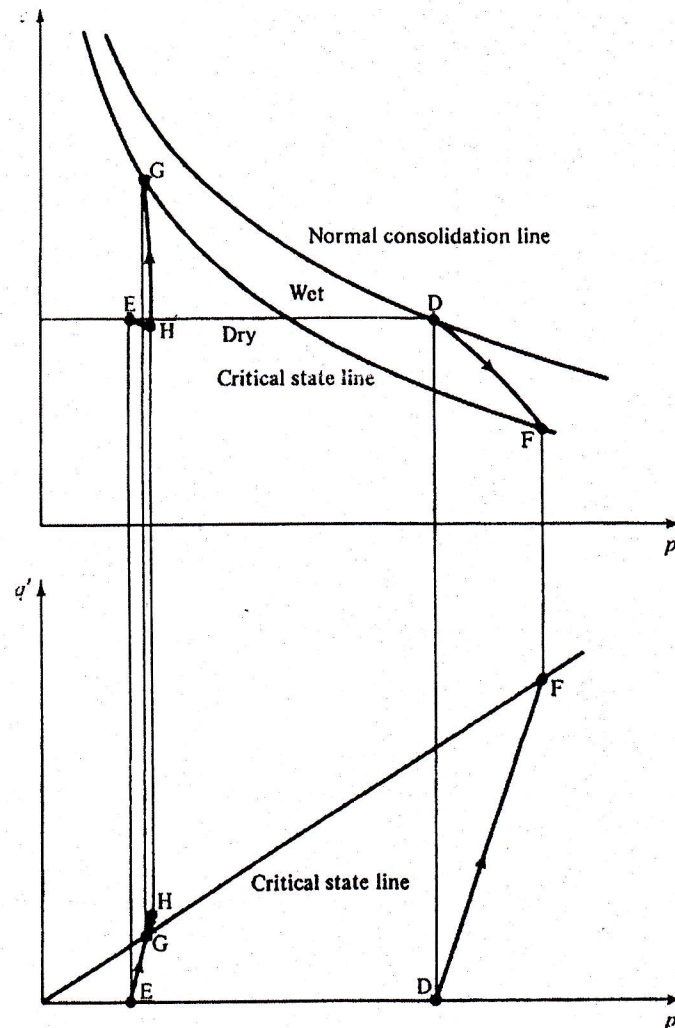
Gambar 4.6. Roscoe surface



Gambar 4.7 Lintasan tegangan untuk uji *undrained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated* dan *overconsolidated*

Hasil penjejukan lintasan pengujian *undrained* pada tanah *overconsolidated* dapat dilihat pada Gambar 4.7. Pada pengujian ini, tanah bergerak dari *overconsolidation line* menuju *critical state line* (B-C), dalam *specific volume* yang sama. Terdapat penurunan tekanan pori, u sehingga terjadi peningkatan nilai tekanan efektif p' seiring dengan meningkatnya q' . Dalam Gambar 4.7 juga dapat dilihat perbandingan antara lintasan tegangan untuk uji *undrained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated* dan *overconsolidated*.

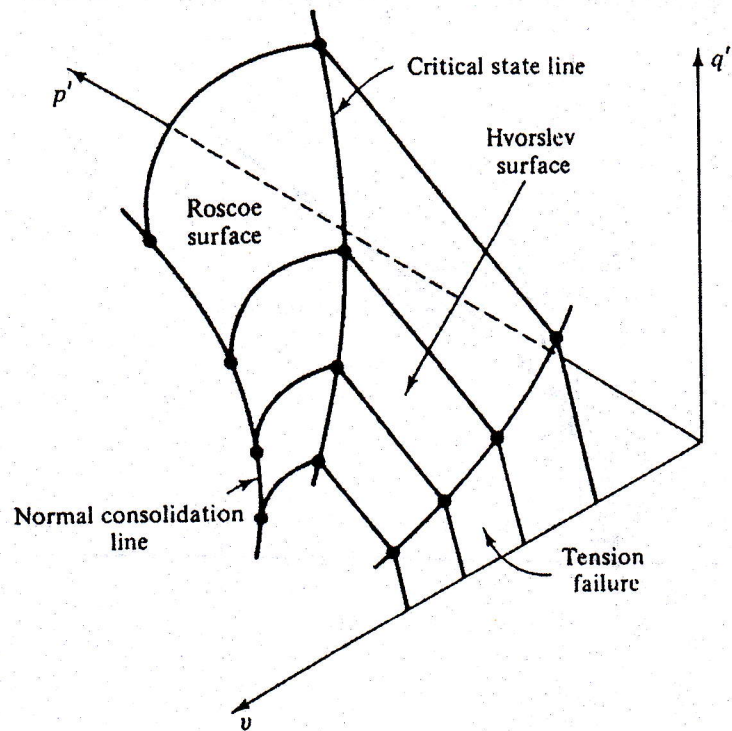
Hasil penjejakan lintasan pengujian *drained* pada tanah *overconsolidated* dapat dilihat pada Gambar 4.8. Pada pengujian ini, tanah bergerak dari *overconsolidation line* menuju *critical state line* (E-H-G). Tekanan pori, u konstan, sehingga tekanan efektif p' tipikal dengan bentuk tekanan totalnya, p . Seiring dengan meningkatnya q' , p' meningkat dengan slope 3. Dalam Gambar 4.9 juga dapat dilihat perbandingan antara lintasan tegangan untuk uji *drained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated* dan *overconsolidated*.



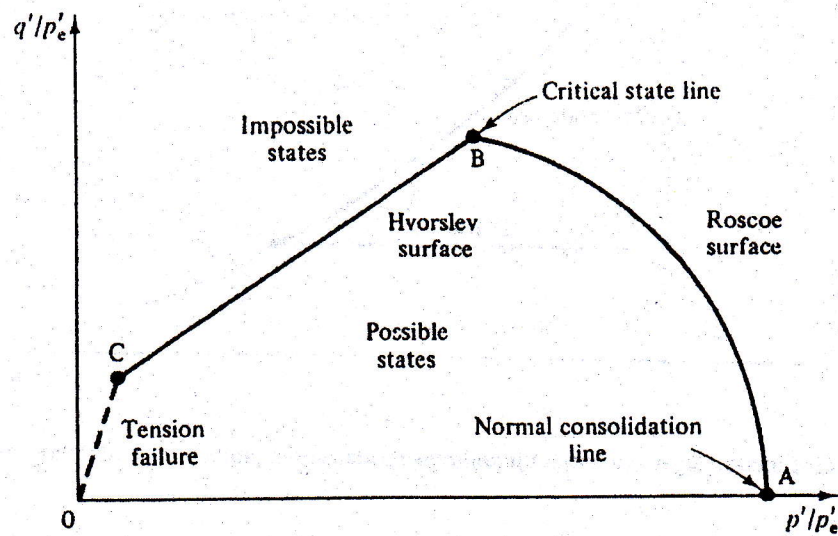
Gambar 4.8 Lintasan tegangan untuk uji *drained* pada contoh tanah lempung *normally consolidated* dan *overconsolidated clay*

Baik kondisi *drained* maupun *undrained*, tanah lempung *overconsolidated* mengikuti jejak yang terletak pada *surface* yang sama. *Surface* yang sama tersebut dikenal sebagai Hvorslev *surface* (Gambar 4.9). Mengingat bentuk dari penampang konstan v adalah sama untuk nilai yang berbeda, maka untuk masing-masing penampang, dapat diskalakan dengan membagi q' dan p' dengan p'_e , tegangan ekuivalen dari tegangan efektif normal rata-

rata dari *normally consolidation line* pada *specific volume* yang bersangkutan. Pada akhirnya, kurva Hvorslev surface menjadi unik.

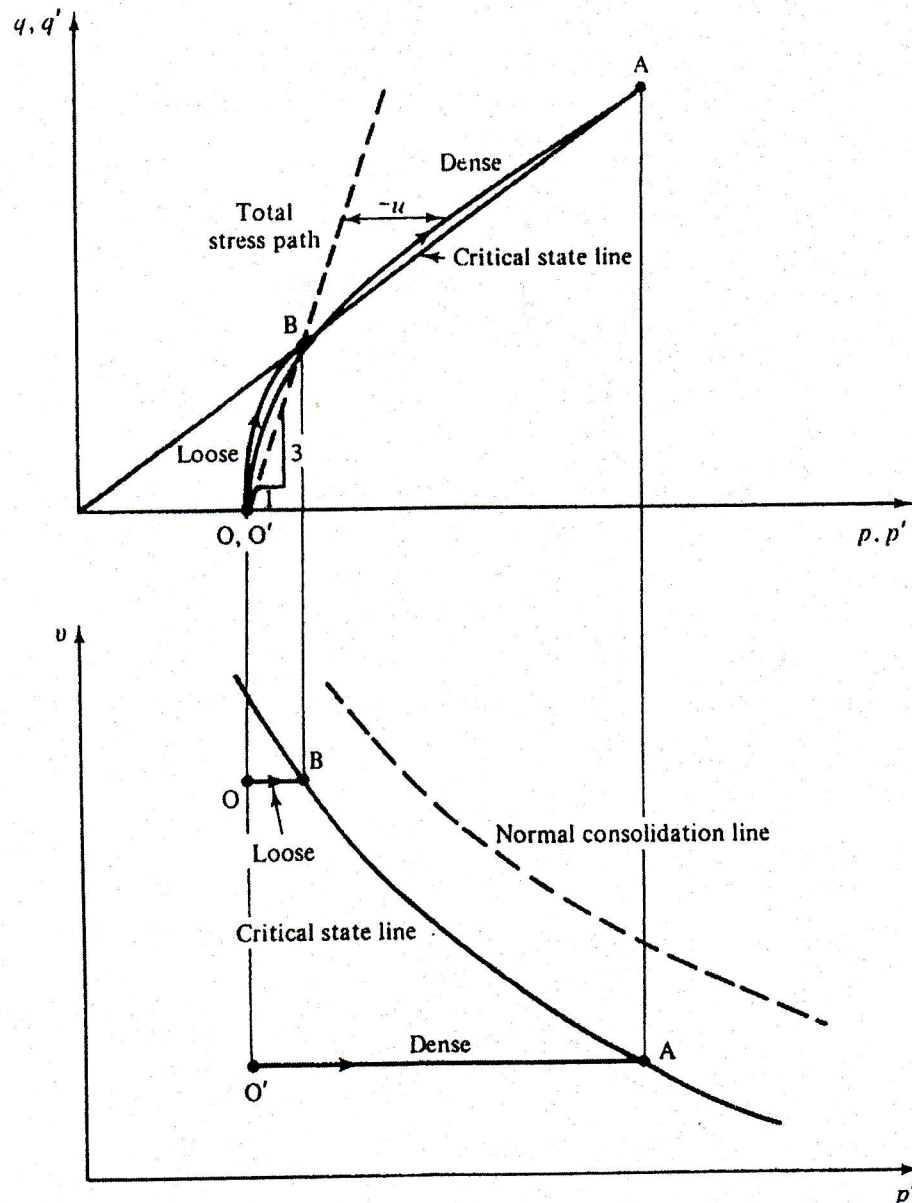


Gambar 4.9 Hvorslev surface



Gambar 4.10 Boundary surface lengkap pada bidang q'/p'_e : p'/p'_e .

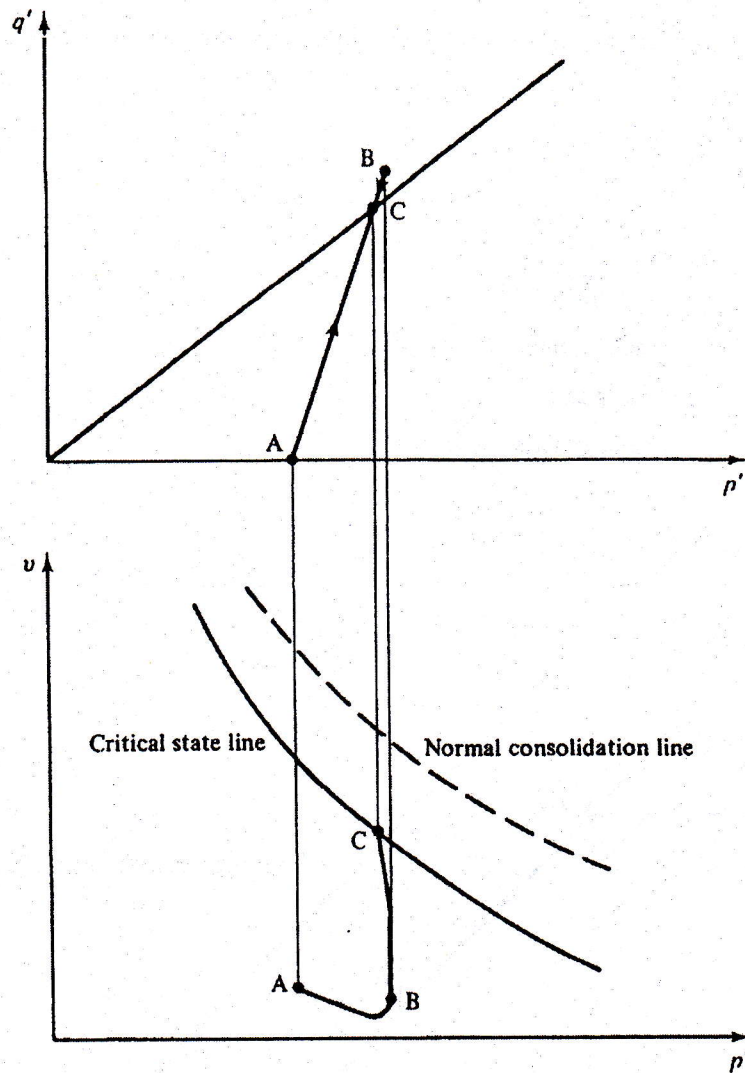
Bentuk akhir dari *boundary surface* setelah Hvorslev *surface* adalah garis dengan slope 3 yang mencerminkan kondisi batas. Representasi dari *boundary surface* secara lengkap dapat dinyatakan pada bidang $q'/p'_e : p'/p'_e$, seperti terlihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.11 Lintasan tegangan untuk uji *undrained* pada contoh tanah pasir padat dan pasir lepas.

Critical state line untuk tanah pasir, baik tanah pasir padat maupun pasir lepas dapat dilihat pada Gambar 4.11 (kondisi *undrained*) dan Gambar 4.12 (kondisi *drained*). Secara umum, bentuk lintasan pembebanan pada tanah pasir mirip dengan tanah lempung. Tanah pasir padat memiliki bentuk lintasan tegangan yang tipikal dengan tanah lempung *highly*

over consolidated, baik untuk uji *drained* maupun *undrained*. Sedangkan tanah pasir lepas, memiliki bentuk lintasan tegangan yang mirip dengan tanah lempung *normally consolidated*.



Gambar 4.12 Lintasan tegangan untuk uji *drained* pada contoh tanah pasir padat dan pasir lepas.

5. PARAMETER-PARAMETER CRITICAL STATE

Slope dari *critical state line* pada bidang $q' : p'$ dapat dinyatakan sebagai,

$$q' = M p' \quad (8)$$

Nilai M dapat diperoleh dari nilai ϕ' (sudut geser dalam efektif) hasil uji *triaxial compression test* dengan persamaan sebagai berikut :

Critical State Line, Roscoe Dan Hvorslev Surface :

Studi Kasus Sampel Tanah U.K. Maranatha Bandung (Andrias S. N)

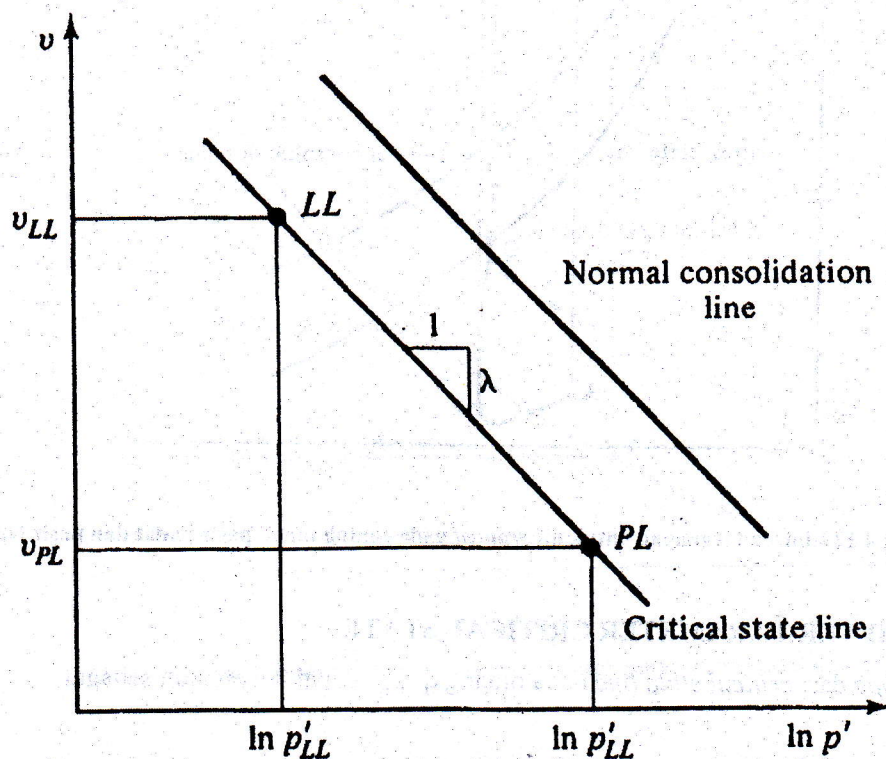
$$M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (9)$$

Slope dari *critical state line* pada bidang $v : \ln p'$ dapat dinyatakan sebagai,

$$\lambda = \frac{G_s \cdot IP}{461} \quad (10)$$

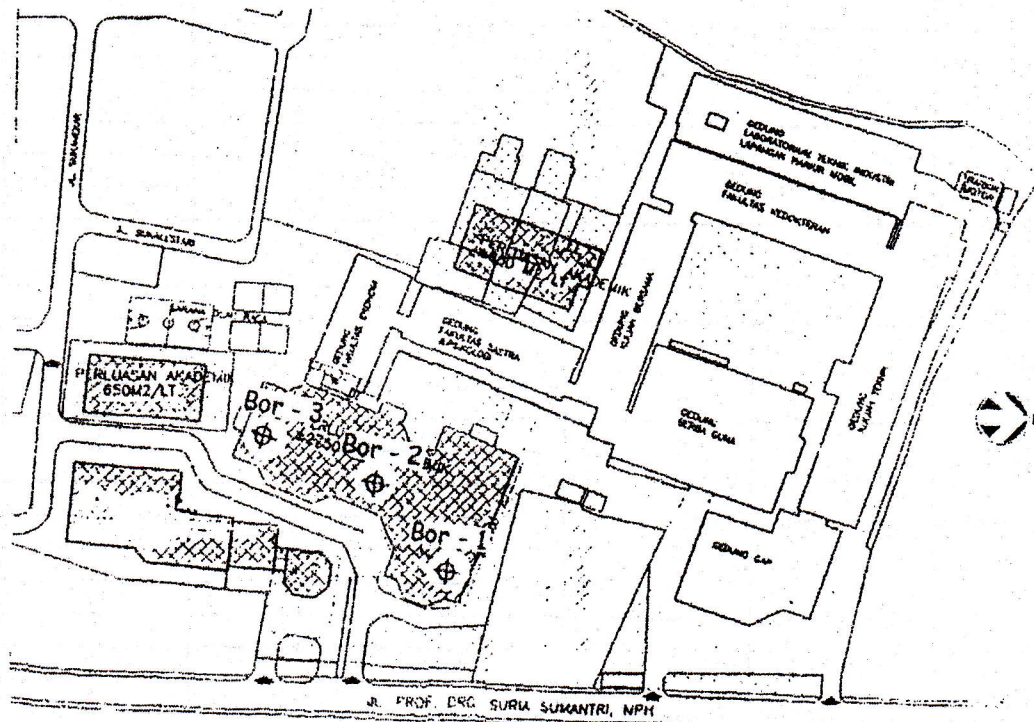
di mana :

- G_s = specific gravity
- IP = indeks plastis = $LL - PL$
- LL = batas cair
- PL = batas plastis



Gambar 5.1 *Critical state line* pada bidang $v : \ln p'$

Sampel tanah yang digunakan pada studi ini adalah sampel tanah pada proyek pembangunan gedung kampus Universitas Kristen Maranatha, Jl. Prof. Drg. Suria Sumantri 65 Bandung. Sampel tanah diperoleh dari titik pengeboran yang tampak pada Gambar 6.1.



Pengujian laboratorium yang dilakukan pada studi ini adalah :

- Uji Indeks Properti
- Uji *Atterberg Limits*
- Uji *Triaxial Consolidated Undrained (CU)*

Jumlah sampel tanah, *cell pressure* dan *back pressure* pada uji triaxial CU yang dilakukan tampak pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Jumlah sampel tanah, Cell Pressure dan Back Pressure uji Triaxial CU

Titik Bor	Kedalaman (m)	Nomor Uji	Nomor Sampel Tanah	Cell Pressure (kPa)	Back Pressure (kPa)
1	1.45 - 2.00	A	A1	250	200
			A2	300	200
			A3	400	200
	4.45 - 5.00	B	B1	250	200
			B2	300	200
			B3	400	200
	6.45 - 7.00	C	C1	250	200
			C2	300	200
			C3	400	200
2	1.45 - 2.00	D	D1	250	200
			D2	300	200
			D3	400	200
	3.45 - 4.00	E	E1	250	200
			E2	300	200
			E3	400	200
	6.45 - 7.00	F	F1	250	200
			F2	300	200
			F3	400	200
3	3.45 - 4.00	G	G1	250	200
			G2	300	200
			G3	400	200
	5.45 - 6.00	H	H1	250	200
			H2	300	200
			H3	400	200

7. PEMBAHASAN

Hasil uji *Atterberg Limits* dan indeks properti dari sampel tanah tampak pada Tabel 7.1.

Tabel 7.1 Indeks properti sampel tanah

Titik Bor	Kedalaman (m)	Kadar Air Alami W _n (%)	Liquid Limit LL (%)	Plastic Limit PL (%)	Indeks Plastis IP (%)	Specific Gravity G _s
1	1.45 - 2.00	43.53	50.00	30.00	20.00	2.62
	4.45 - 5.00	41.12	59.00	29.00	30.00	2.65
	6.45 - 7.00	40.17	67.00	28.00	39.00	2.66
2	1.45 - 2.00	44.89	73.00	29.00	44.00	2.6
	3.45 - 4.00	45.98	68.00	29.00	39.00	2.62
	6.45 - 7.00	48.27	71.00	29.00	42.00	2.64
3	3.45 - 4.00	50.52	64.00	31.00	33.00	2.63
	5.45 - 6.00	58.31	79.00	31.00	48.00	2.63

Dari nilai indeks plastis, IP dan *specific gravity*, Gs pada Tabel 7.1 dapat diperoleh parameter *critical state* yaitu λ dengan menggunakan persamaan (10). Nilai λ untuk setiap kedalaman sampel tanah tampak pada Tabel 7.2

Tabel 7.2 Parameter λ

Titik Bor	Kedalaman (m)	λ
1	1.45 - 2.00	0.114
	4.45 - 5.00	0.172
	6.45 - 7.00	0.225
2	1.45 - 2.00	0.248
	3.45 - 4.00	0.222
	6.45 - 7.00	0.241
3	3.45 - 4.00	0.188
	5.45 - 6.00	0.274

Hasil pengujian Triaxial CU kemudian diolah sedemikian rupa sehingga diperoleh kurva q' - regangan aksial, ϵ dan kurva Δu - regangan aksial, ϵ , yang tampak pada Gambar 7.1 dan Gambar 7.2

Nampak bahwa tiga buah kurva dengan *cell pressure* yang berbeda, namun memiliki bentuk tipikal yang sama. Dari kurva $q' - \epsilon$ dan $\Delta u - \epsilon$ kita dapat menentukan bahwa jenis tanah yang diuji adalah tanah lempung *normally consolidated*.

Setelah diperoleh kurva $q' - \epsilon$, maka dapat digambarkan lingkaran Mohr untuk memperoleh nilai c' dan ϕ' . Gambar lingkaran Mohr untuk sampel tanah yang diuji tampak pada Gambar 7.3.

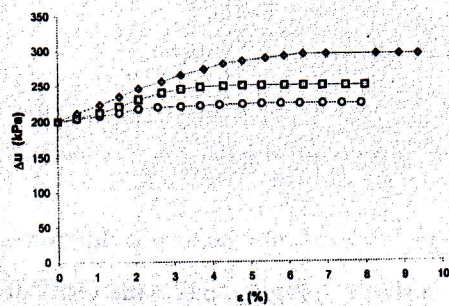
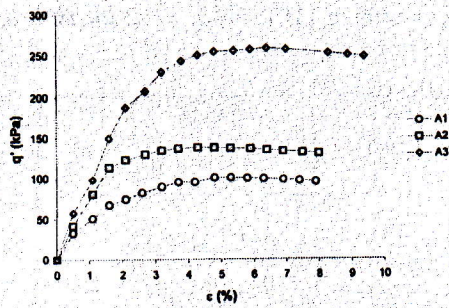
Setelah memperoleh nilai c' dan ϕ' dapat ditentukan parameter *critical state* yaitu M dengan menggunakan persamaan (9). Nilai c' , ϕ' dan M dari sampel tanah yang diuji tampak pada Tabel 7.3.

Tabel 7.3 Nilai c' , ϕ' dan M

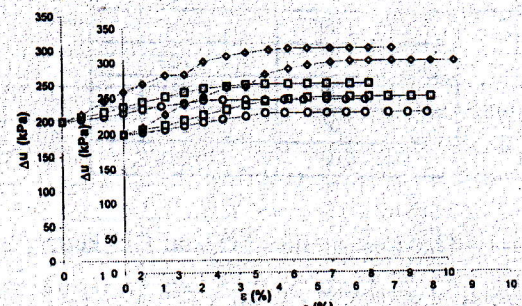
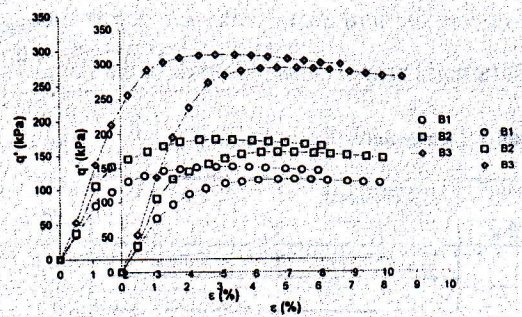
Titik Bor	Kedalaman (m)	c' (kPa)	ϕ' (deg)	M
1	1.45 - 2.00	15.0	29.0	1.157
	4.45 - 5.00	27.0	30.0	1.200
	6.45 - 7.00	15.0	29.0	1.157
2	1.45 - 2.00	27.0	29.0	1.157
	3.45 - 4.00	24.0	25.0	0.984
	6.45 - 7.00	13.0	29.0	1.157
3	3.45 - 4.00	9.0	21.0	0.814
	5.45 - 6.00	6.0	24.0	0.941

Critical State Line, Roscoe Dan Hvorslev Surface :

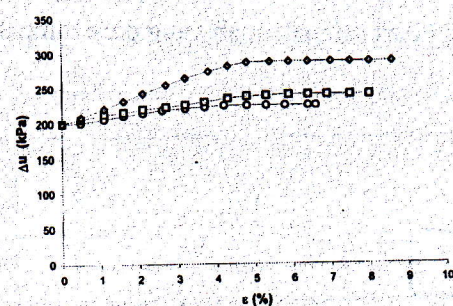
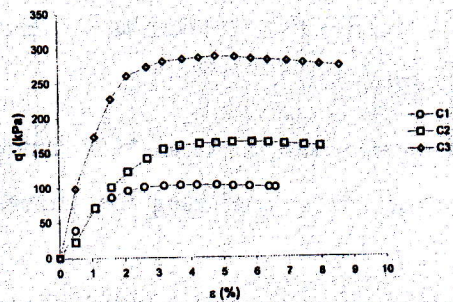
Studi Kasus Sampel Tanah U.K. Maranatha Bandung (Andrias S. N)



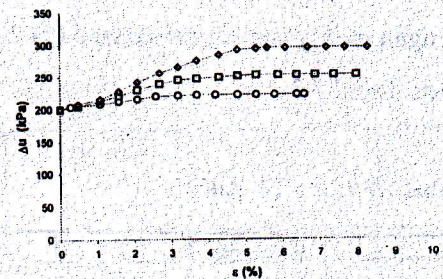
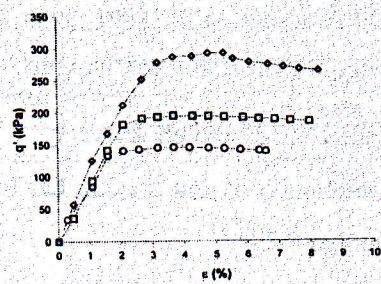
(a)



(b)

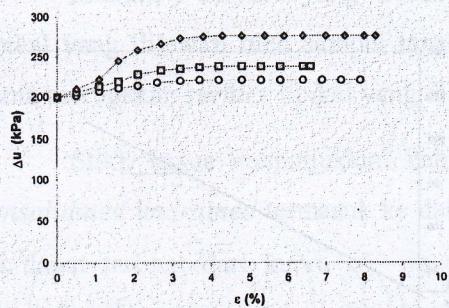
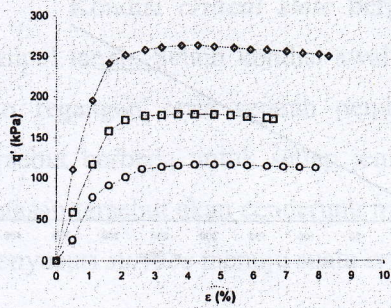


(c)

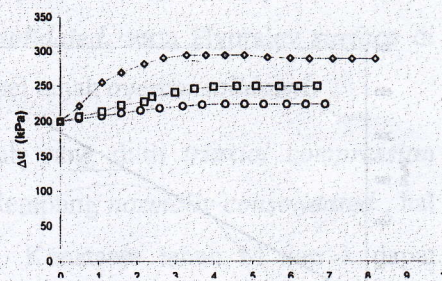
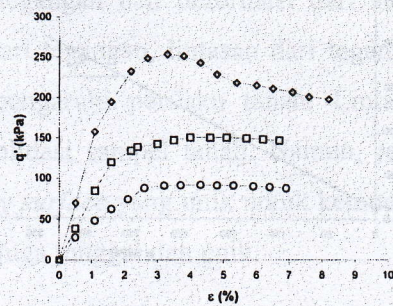


(d)

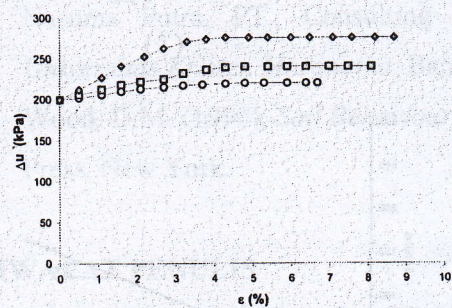
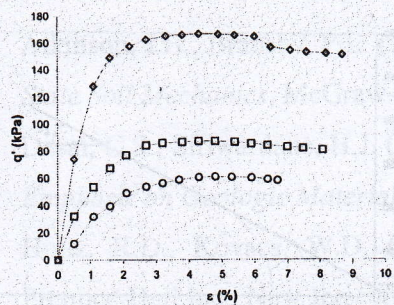
Gambar 7.1 Kurva $q' - \epsilon$ dan $\Delta u - \epsilon$ (a) sampel tanah A (b) sampel tanah B
(c) sampel tanah C (d) sampel tanah D



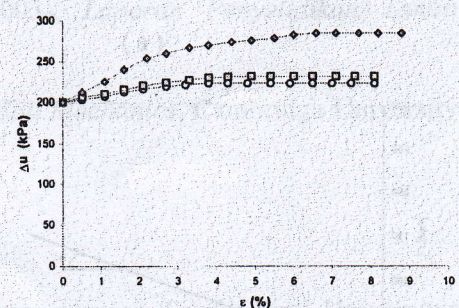
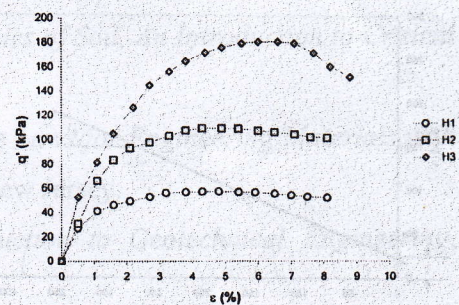
(a)



(b)



(c)

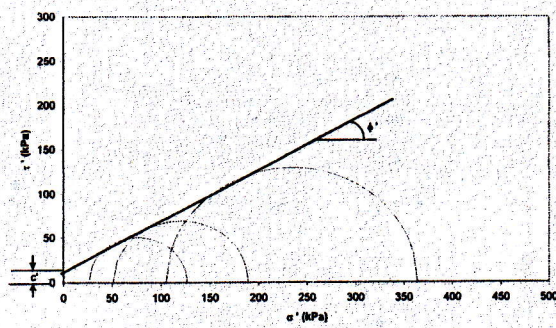


(d)

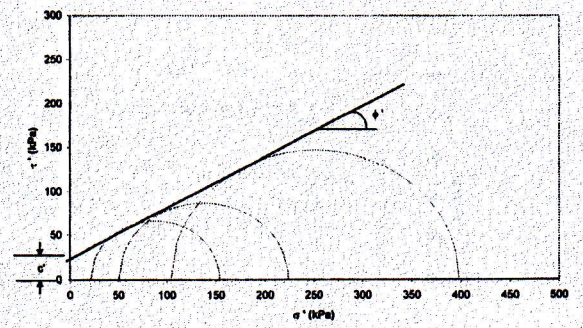
Gambar 7.2 Kurva $q' - \epsilon$ dan $\Delta u - \epsilon$ (a) sampel tanah E (b) sampel tanah F
(c) sampel tanah G (d) sampel tanah H

Critical State Line, Roscoe Dan Hvorslev Surface :

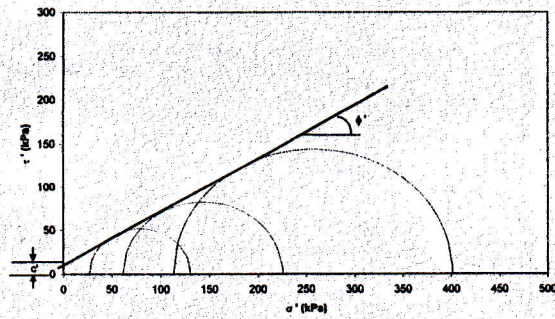
Studi Kasus Sampel Tanah U.K. Maranatha Bandung (Andrias S. N)



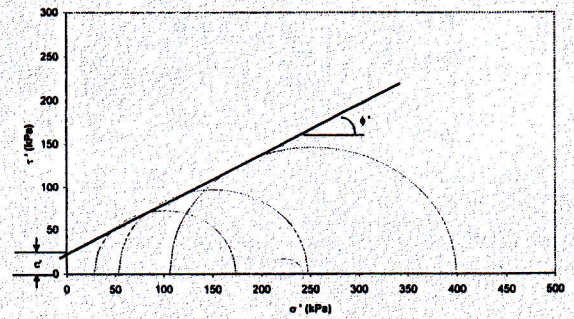
(a)



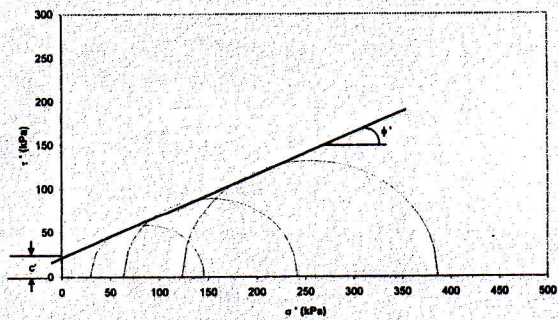
(b)



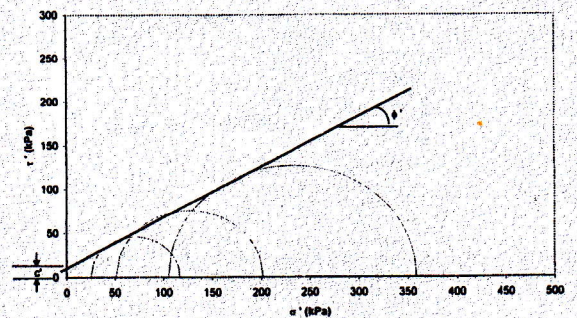
(c)



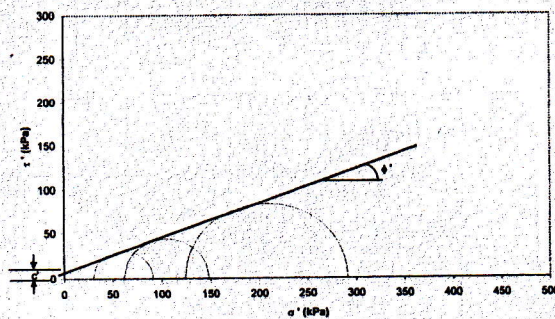
(d)



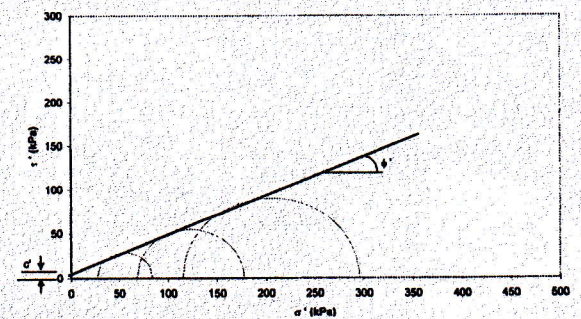
(e)



(f)



(g)



(h)

Gambar 7.3 Lingkaran Mohr (a) sampel tanah A (b) sampel tanah B (c) sampel tanah C (d) sampel tanah D (e) sampel tanah E (f) sampel tanah F (g) sampel tanah G (h) sampel tanah H

8. KESIMPULAN

Kondisi *critical state* berguna untuk analisa tegangan dan deformasi dari suatu sampel tanah. Selain kondisi awal dan kondisi akhir dari tegangan, lintasan dari tegangan dan regangan serta sejarah pembebanan akan mempengaruhi perilaku tanah. Lintasan tersebut berbeda untuk setiap jenis dan kondisi konsolidasi sampel tanah. Namun, jejak lintasan tersebut akan cenderung menuju suatu *boundary surface* yang unik untuk kemudian menyusuri *surface* menuju suatu *critical state line* yang juga tunggal dan unik.

Boundary surface yang terdiri dari Roscoe *surface* di mana merupakan *surface* tipikal yang dilewati oleh sampel tanah *normally consolidated*, serta Hvorslev *surface* di mana merupakan *surface* tipikal yang dilewati oleh sampel tanah *overconsolidated*.

Studi kasus menunjukkan bahwa sampel tanah yang diuji *triaxial compression consolidated undrained* termasuk ke dalam jenis tanah lempung *normally consolidated*, hal ini dapat terlihat dari kurva $q' - \epsilon$ yang dihasilkan. Konstanta tanah M dan λ dapat mendefinisikan posisi *critical state line* pada ruang $q' : p' : v$.

DAFTAR PUSTAKA

1. Atkinson, J.H., Bransby, P.L. (1978), *The Mechanics of Soil, An Introduction to Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill, London.
2. Desai, C.S., Siriwardane, H.J. (1984), *Constitutive Laws for Engineering Materials, with Emphasis on Geologic Materials*, Prentice-Hall, New Jersey.
3. Holtz, R.D., Kovacs, W.D. (1981); *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
4. Nasuma Putra, PT., Consulting Engineers (2003), *Laporan Penyelidikan Tanah Universitas Kristen Maranatha*, Bandung.
5. Wood, D.M. (1990), *Soil Behaviour and Critical Soil Mechanics*, Cambridge University Press, New York.

RIWAYAT PENULIS

[¹] **Andrias Suhendra Nugraha ST.,MT.**, adalah dosen jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha.

Kondisi critical state penting untuk analisis tegangan dan deformasi dari suatu sampel tanah. Selain kondisi awal dan kondisi akhir dari tegangan, tekanan dan tegangan saat uji, perbedaan akan mempengaruhi perilaku tanah. Lintasan tersebut berbeda untuk setiap jenis dan kondisi konsolidasi sampel tanah. Namun, jejak lintasan tersebut akan cenderung menuju suatu boundary surface yang unik untuk kebanyakan jenisnya. Untuk menuju suatu critical state line yang juga tunggal dan unik.

Boundary surface yang terdiri dari Roscoe surface di mana merupakan surface unik yang berbeda untuk sampel tanah normally consolidated, serta Hvorslev surface di mana merupakan surface tipikal yang berbeda untuk sampel tanah overconsolidated.

Studi kasus menunjukkan bahwa sampel tanah yang diuji dalam compression consolidated merupakan garis lurus dalam jejak tanjung normally consolidated, hal ini dapat terlihat dari kurva $q - \epsilon_v$ yang dihasilkan konstanis tanah M dan A dapat dibandingkan dengan critical state line pada gambar 7.

DAFTAR PUSTAKA

1. Atkinson, J.H., Bransby, P.L. (1978). *The Mechanics of Soil*, An Introduction to Critical State Soil Mechanics, McGraw-Hill, London.
2. Desai, C.S., Shawbridge, H.J. (1984). *Constitutive Laws for Engineering Materials*, Emphasis on Elastic Materials, Prentice-Hall, New Jersey.
3. Holtz, R.D., Kovacs, W.D. (1987). *An Introduction to Geotechnical Engineering*, Prentice-Hall Inc., New Jersey.
4. Nasirun Nizar, P.T. Consulting Engineers (2003). *Laporan Penyelidikan Tanah* Universitas Kristen Maranatha, Bandung.
5. Wood, D.M. (1990). *Soil Behaviour and Critical Soil Mechanics*, Cambridge University Press, New York.

Riwayat Penulis

(1) Andrian Sribandura Nugraha ST, MT, adalah dosen jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha.