

SOIL MECHANIC II

Slope Stability

Sherly Meiwa , ST., MT



Department of Civil Engineering
Universitas Komputer Indonesia
Bandung, 2020

Penilaian

UTS	: 30%
UAS	: 30%
KUIS + Tugas	: 40%

Referensi

1. 2013, Prof I Wayan Sengara, Persentation : Workshop Sertifikasi Geotkenik Muda dan Madya Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI)
2. 2001, W Abramson, Lee : Slope Stability and Stabilization Method
3. 2017, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia (HATTI) : Modul Workshop Sertifikasi G-1

Outline

1. Concept of Slope Stability
2. Input Soil Parameter
3. Calculation of Safety Factor

1. Concept of Slope Stability

Introduction

Stabilitas lereng merupakan salah satu aspek penting dalam analisis desain geoteknik. Untuk dapat melakukan analisis stabilitas lereng dengan baik, maka perlu diketahui dan dipahami metoda analisis stabilitas lereng. Analisis stabilitas lereng ini memerlukan pemahaman mengenai cara perhitungan lereng secara mekanika serta penguasaan terhadap pemilihan parameter-parameter tahanan geser tanah yang bersesuaian dengan kondisi-kondisi yang ada pada lereng tersebut.

Kondisi yang perlu diperhatikan dalam analisis stabilitas lereng

1. Geometri lereng
2. Lapisan, komposisi dan karakteristik masing-masing lapisan tanah
3. Kondisi pembebanan dan kecepatan pembebanan
4. Kondisi tegangan awal
5. Over consolidation rasio
6. Lintasan tegangan
7. Kondisi muka air tanah
8. Kondisi tegangan air pori atau drainasenya

Analisis stabilitas lereng harus sesuai dengan kondisi-kondisi tertentu di lapangan yang dicerminkan dalam penggunaan **parameter-parameter** tahanan geser tanah yang **representatif**

Tujuan Analisis Stabilitas Lereng

1. Melakukan kajian potensi kelongsoran lereng yang melibatkan lereng-lereng baik lereng alami maupun lereng buatan
2. Melakukan analisis kelongsoran dan mengerti mekanisme keruntuhan yang terjadi dan memahami pengaruh faktor-faktor lingkungan dan design lereng
3. Melakukan analisis terhadap stabilitas lereng untuk kondisi jangka pendek (*during construction*) dan jangka panjang
4. Untuk memungkinkan melakukan *redesign* terhadap lereng yang telah longsor dan merencanakan dan mendesign Langkah-langkah preventif jika diperlukan
5. Untuk mempelajari efek dari beban seismik pada lereng atau tanggul

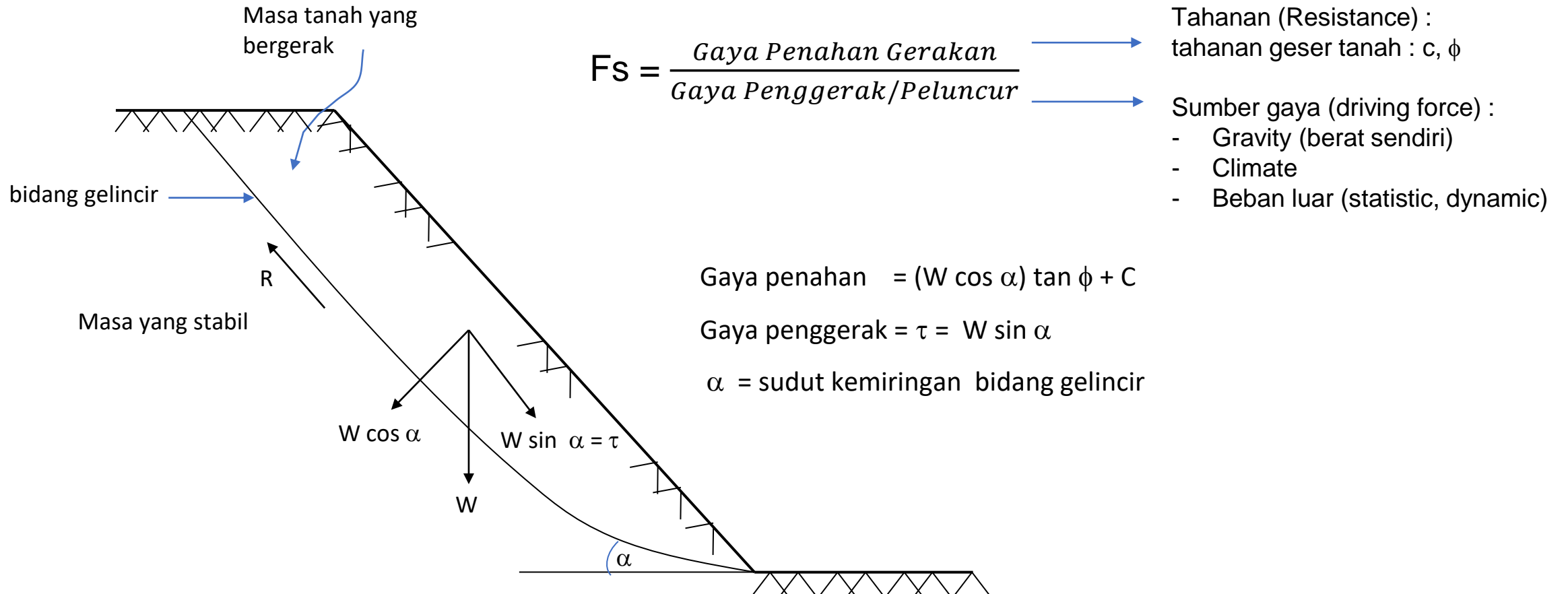
Macam-macam Lereng

1. Lereng alam
2. Lereng buatan : timbunan dan galian
3. landfills

Kapan terjadi Longsor?

Mekanisme Kelongsoran

Slope Movement terjadi akibat gaya yang bekerja melebihi batas tahanan tanah



Penyebab Longsor / Sliding

1. Naiknya tegangan geser

- a. Hilangnya lateral support (erosi, galian, tidak adanya dinding penahan tanah, dsb)
- b. Beban/surcharge (berat bangunan, hujan, dsb)
- c. Gempa, ledakan, getaran mesin
- d. Tekanan lateral akibat swelling (swelling clays)

2. Turunnya tahanan geser tanah

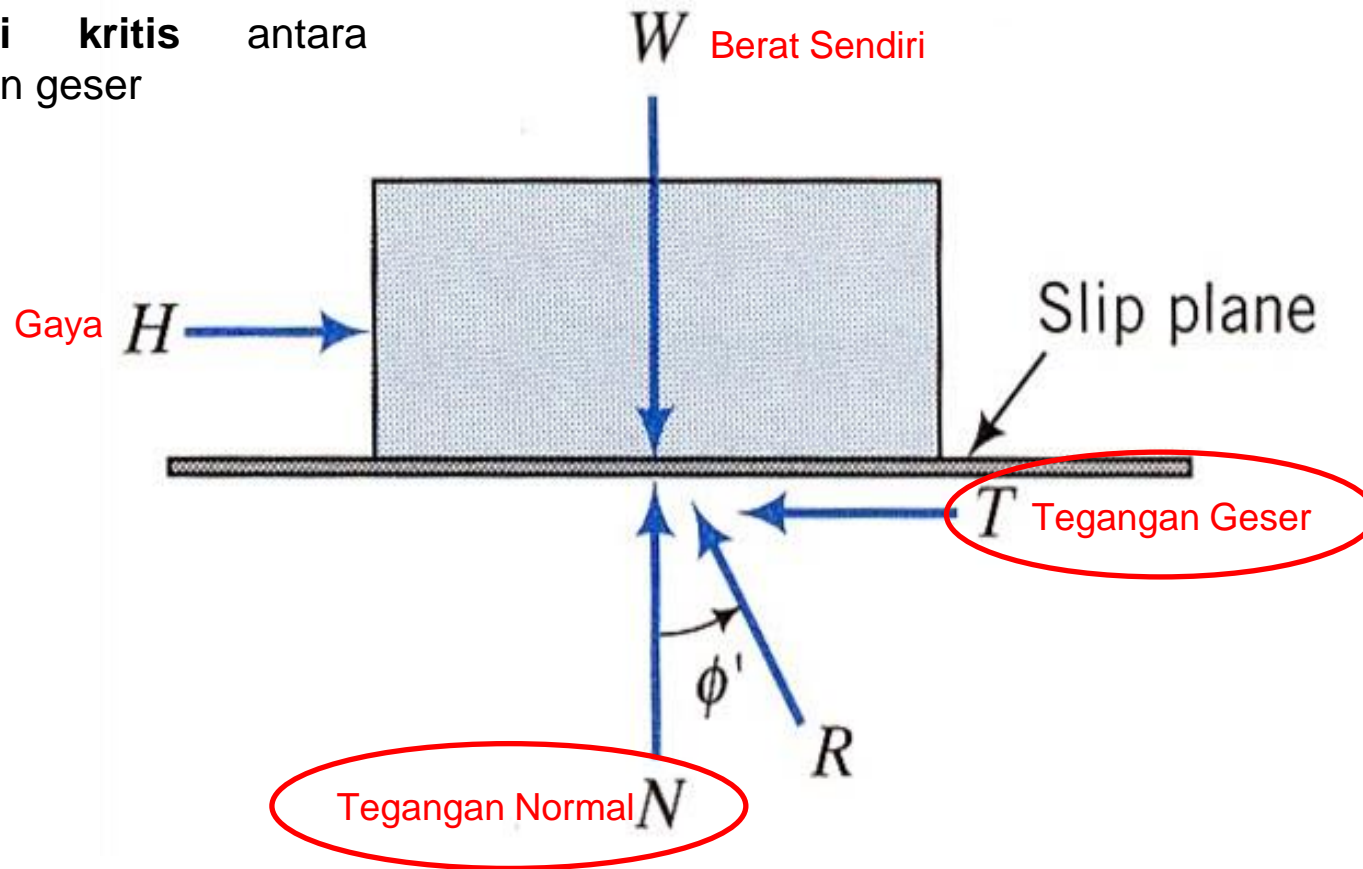
- a. Initial state : komposisi, texture, geometri lereng
- b. Pelapukan tanah
- c. Perubahan intergranular forces : tekanan air tanah, fractures

2. Input Soil Parameter

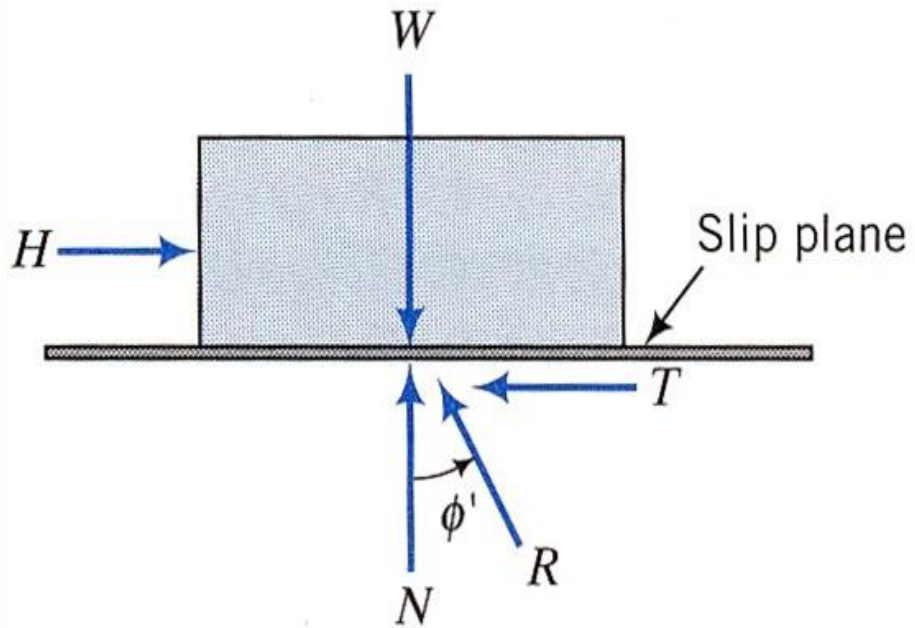
Kriteria Keruntuhan (Mohr-Coulomb)

Mohr (1980)

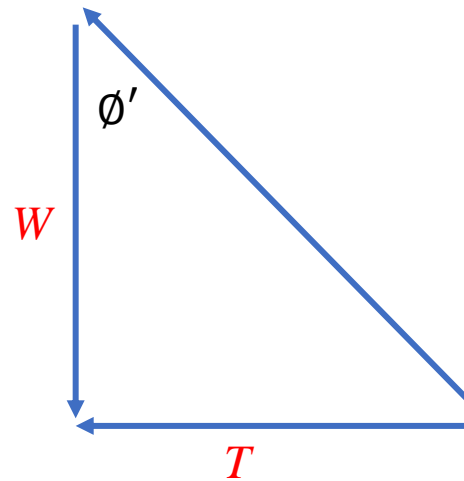
Keruntuhan terjadi pada suatu material akibat **kombinasi kritis** antara tegangan normal dan geser



Kriteria Keruntuhan (Mohr-Coulomb)



$$W = N$$



$$\tan \phi' = \frac{T}{W}$$

Dalam tegangan

$$\tan \phi' = \frac{T/A}{W/A}$$

$$\tan \phi' = \frac{\tau}{\sigma}$$

$$\tau = \sigma \tan \phi'$$

$$\tau = c + \sigma \tan \phi'$$

Kriteria Keruntuhan (Mohr-Coulomb)

Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb

Keruntuhan pada Material diakibatkan oleh kombinasi kritis antara teg. normal dan geser serta sifat-sifat mekanis tanah yang dinyatakan dalam bentuk:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi$$

τ_f = Teg. Geser pada runtuh (Gaya/luas kN/m²)

c = Kohesi (Gaya/luas kN/m²)

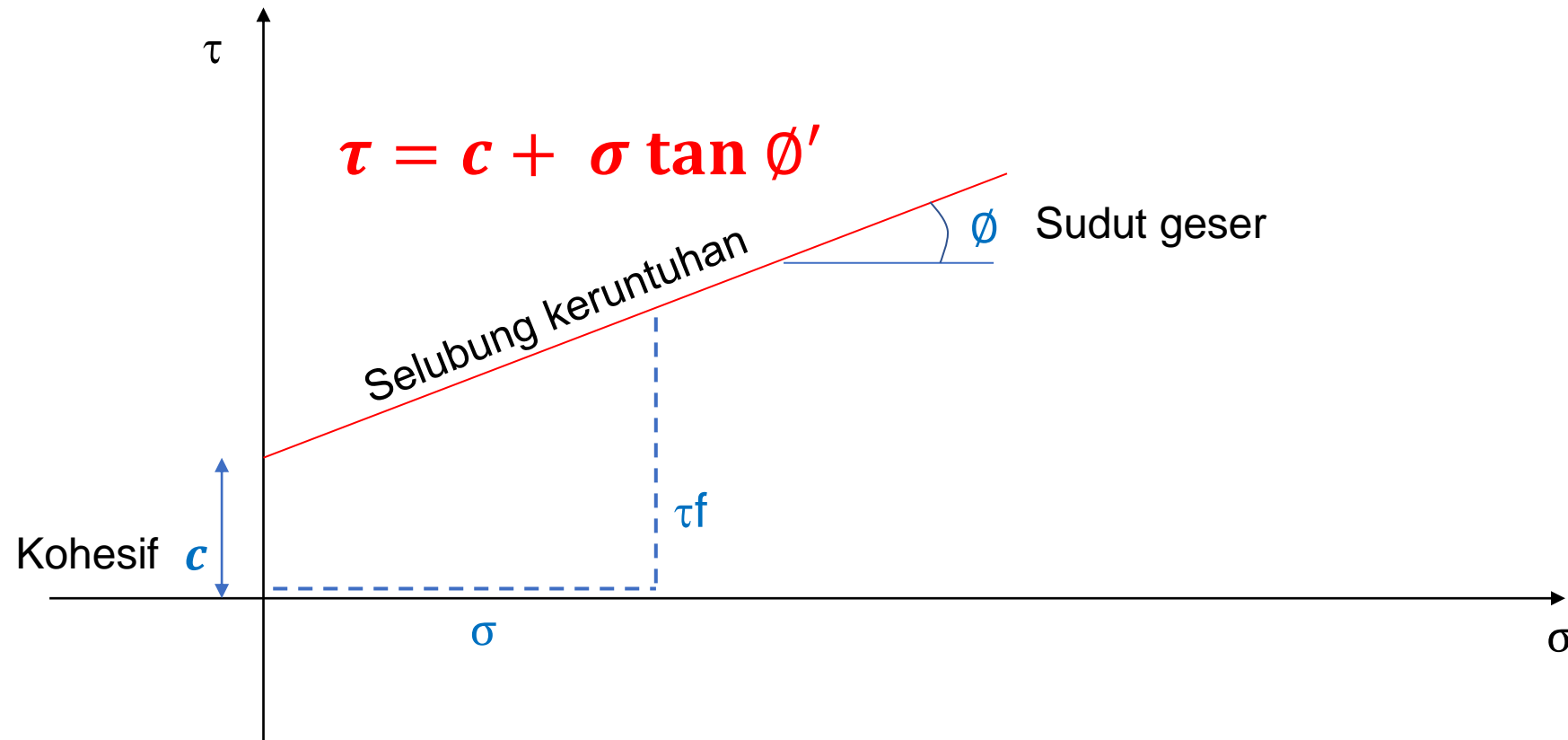
ϕ = Sudut geser dalam (degrees atau °)

σ = Teg. Normal (Gaya/luas kN/m²)

Kriteria Keruntuhan (Mohr-Coulomb)

(Kondisi tegangan **total**)

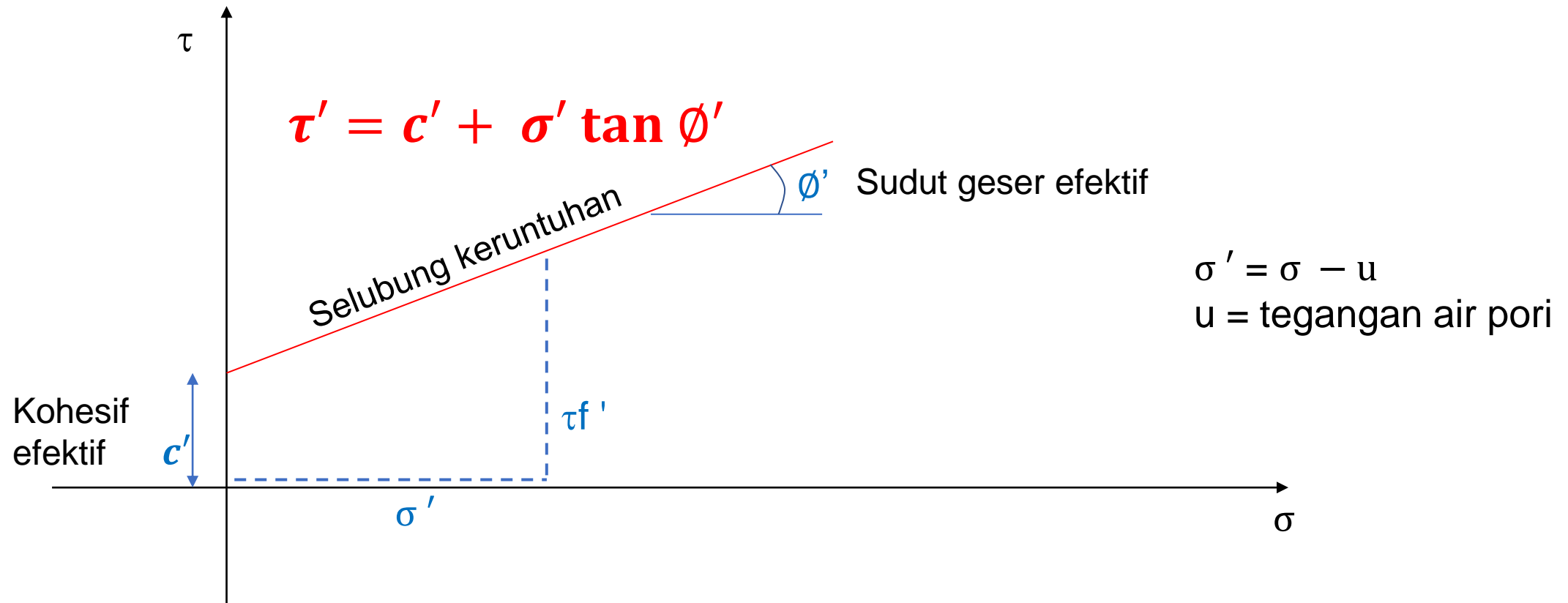
τ_f adalah tegangan geser maksimum tanah pada tegangan normal σ sebelum terjadi keruntuhan



Kriteria Keruntuhan (Mohr-Coulomb)

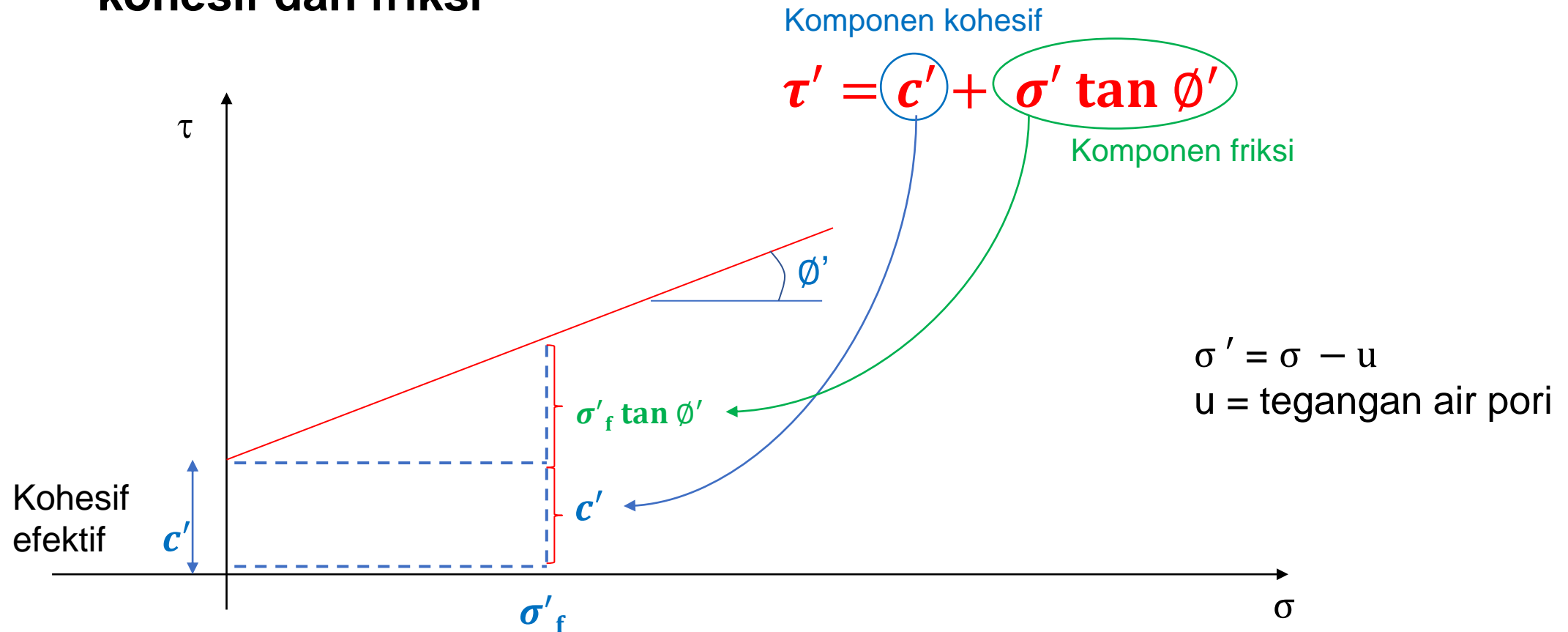
(Kondisi tegangan **efektif**)

τ_f 'adalah tegangan geser maksimum tanah pada tegangan normal efektif σ' sebelum terjadi keruntuhan



Kriteria Keruntuhan (Mohr-Coulomb)

Kuat geser terdiri atas dua komponen:
kohesif dan friksi

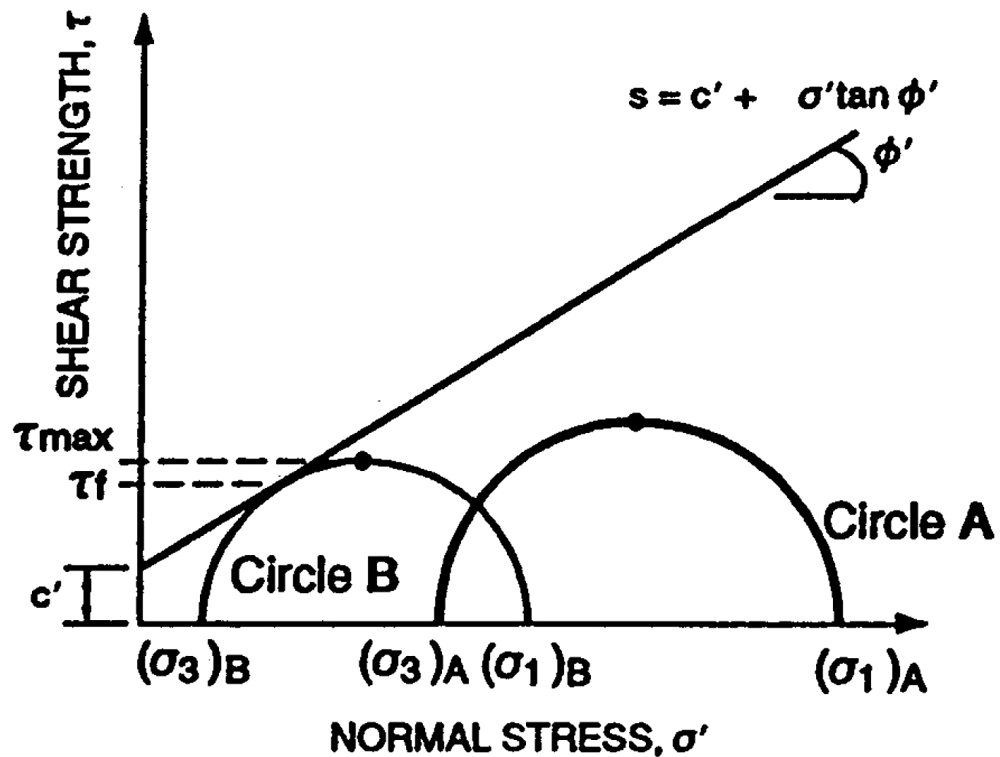


c dan ϕ adalah parameter dalam kuat geser tanah. semakin tinggi nilainya, semakin besar kuat geser tanah tersebut.

Kriteria Keruntuhan (Mohr-Coulomb)

Stress Independent component (c)

Stress dependent component (ϕ)



Kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb ditunjukkan oleh garis lurus yang dikenal dengan nama *Mohr-Coulomb failure envelope*. Garis ini menunjukkan batas kondisi stabil dan keruntuhan

Setiap tegangan yang berada di bawah garis adalah keadaan stabil. Sedangkan keruntuhan terjadi kalau tegangan menyentuh atau melewati garis keruntuhan Mohr-Coulomb.

Besaran-besaran c' dan ϕ' merupakan parameter-parameter tahanan geser tanah efektif yang merepresentasikan sifat-sifat atau besarnya tahanan geser dari tanah tersebut.

Pemilihan Parameter Tanah

Dua pendekatan yang biasa digunakan untuk analisis masalah geoteknik termasuk masalah stabilitas lereng. Kedua pendekatan ini adalah :

- a. Total Stress Approach*
- b. Effective Stress Approach*

Total Stress Approach

Keadaan dimana excess tekanan air pori belum terdisipasi, sehingga parameter tanah yang bersesuaian adalah tegangan total, yaitu parameter tahanan geser **undrained** (diperoleh dari test triaxial undrained)

Effective Stress Approach

Keadaan dimana excess tekanan air pori sudah terdisipasi, sehingga parameter tanah yang bersesuaian adalah tegangan efektif, yaitu parameter tahanan geser **drained** (diperoleh dari test triaxial *drained* atau *undrained* dengan pengukuran tekanan air pori)

Pendekatan yang harus dipakai dalam analisis stabilitas lereng berdasarkan pada kondisi tekanan air pori dari lereng yang akan dianalisis. Jika kita tidak tahu apakah kondisi total atau efektif yang menentukan keruntuhan lereng, maka kedua kasus perlu ditinjau dan desainnya ditentukan oleh keadaan yang lebih kritis.

Pemilihan Tipe Test Triaxial

Jenis Tanah	Jenis Konstruksi	Jenis Test dan Kekuatan Geser
Kohesif	Jangka Pendek (<i>Short Term/ end of construction</i>)	Test UU dan CU untuk <i>undrained strength</i> dengan level tegangan <i>in situ</i> yang sesuai
	Konstruksi Bertahap (<i>staged of construction</i>)	Test CU untuk <i>undrained strength</i> dengan level tegangan yang sesuai
	Jangka Panjang (<i>long term</i>)	Test CU dengan pengukuran pore pressure, atau tes CD untuk parameter kuat geser efektif
Granular	Semua jenis	Parameter strength ϕ' didapatkan dari tes lapangan atau <i>direct shear</i>
C- ϕ material	Jangka Panjang (<i>long term</i>)	Test CU dengan pengukuran <i>pore pressure</i> atau tes CD untuk parameter kuat geser efektif

(Lee, 1996)

Analisis stabilitas lereng tidak dapat dilakukan tanpa pengetahuan mengenai parameter kuat geser tanah yang digunakan.

Dua jenis kekuatan geser tanah yang digunakan di dalam analisis stabilitas adalah kuat geser *undrained* C_u dan kuat geser tanah drained c' dan ϕ' . Kuat geser undrained digunakan di dalam analisis tegangan total (*total stress analysis*) sedangkan kuat geser drained digunakan di dalam analisis tegangan efektif (*effective stress analysis*)

Kuat Geser *undrained* (undrained shear strength)

Natural deposit tanah lempung jenuh (saturated clay) yang terkena beban secara cepat relatif terhadap konsolidasi atau drainase yang terjadi dapat diasumsikan mengalami kondisi *undrained* yang ideal. Kadar air dan volumenya tetap constant selama pembebanan *undrained*. Dalam kondisi ini, kenaikan beban akan menyebabkan terjadinya tekanan air pori eksek (excess pore water pressure). Kuat geser yang bersesuaian dengan kondisi ini adalah kuat geser *undrained* C_u .

Kuat Geser *undrained* (undrained shear strength)

Apabila kondisi *undrained* dari suatu lempung jenuh dianalisis dengan menggunakan pendekatan tegangan total maka evaluasi tekanan air pori tidak diperlukan. Pada kondisi ini, analisis dengan metode $\phi=0$ diasumsikan dan kuat geser *undrained* C_u sama dengan nilai kohesi pada selubung keruntuhan Mohr-Coulomb untuk tegangan total. Dengan asumsi ini maka *undrained strength* dari lempung jenuh ini tidak dipengaruhi oleh perubahan *confining pressure* sepanjang kadar air tidak mengalami perubahan.

Kuat Geser *drained* (drained shear strength)

Berdasarkan prinsip tegangan efektif maksimum tahanan geser pada suatu tanah :

$$S = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi'$$

Dimana :

S' = kuat geser drained tanah

c' = kohesi efektif

σ_n = tegangan normal

u = tekanan air pori

ϕ' = sudut geser dalam efektif

Pada umumnya tekanan air pori terdiri atas tekanan air pori awal, u_0 , dan perubahan tekanan air pori, Δu (*excess pore water pressure*), yang diakibatkan adanya perubahan beban

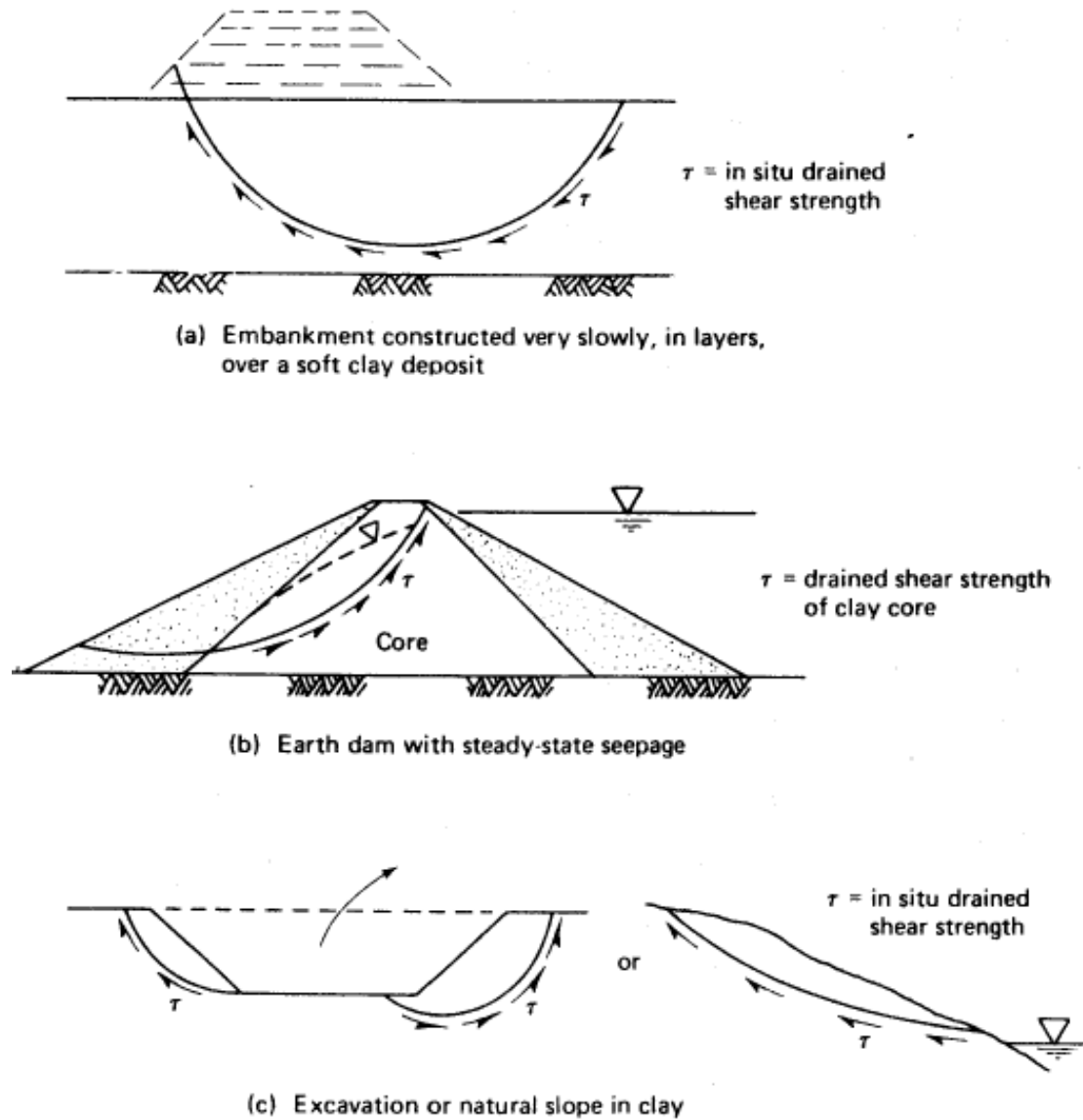
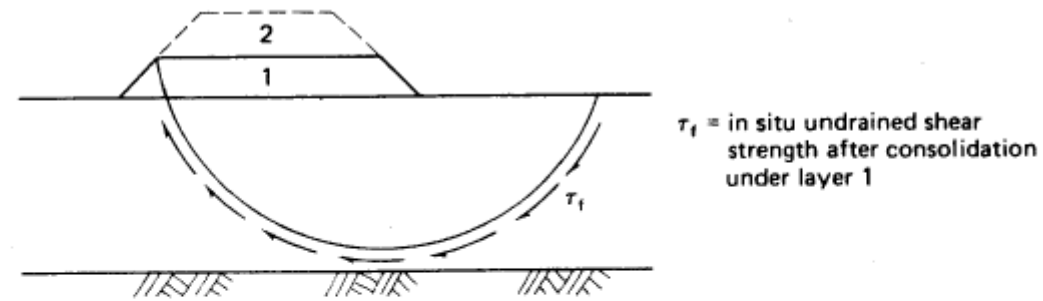
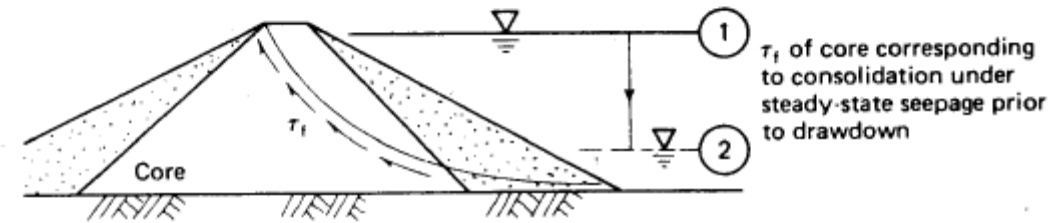


Fig. 11.28 Some examples of CD analyses for clays (after Ladd, 1971b).

(Holtz and Kovacs, 1981)



(a) Embankment raised (2) subsequent to consolidation under its original height, (1).



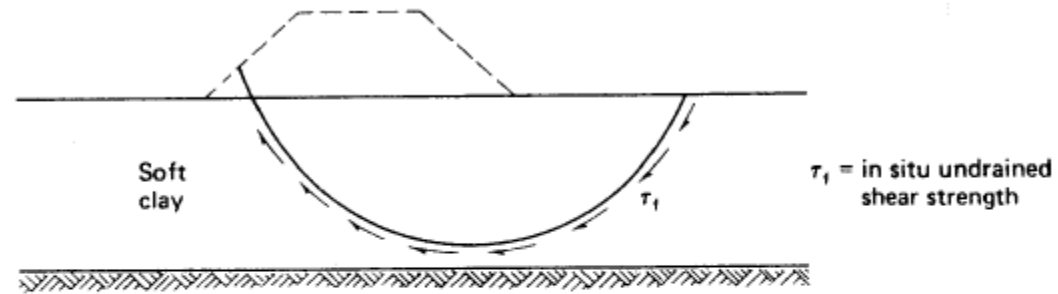
(b) Rapid drawdown behind an earth dam. No drainage of the core. Reservoir level falls from ① → ②.



(c) Rapid construction of an embankment on a natural slope.

Fig. 11.37 Some examples of CU analyses for clays (after Ladd, 1971b).

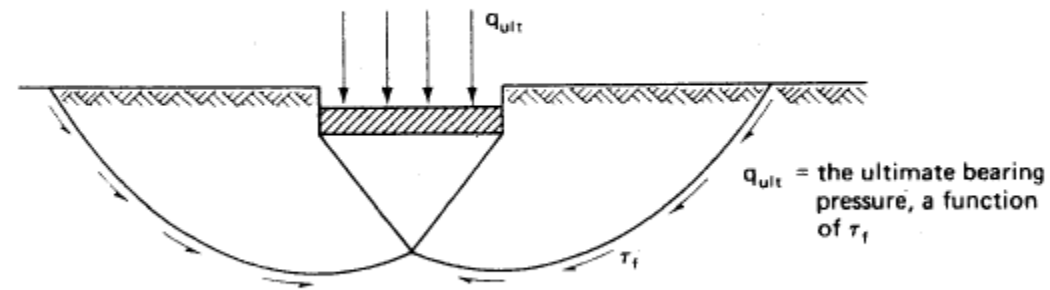
(Holtz and Kovacs, 1981)



(a) Embankment constructed rapidly over a soft clay deposit



(b) Large earth dam constructed rapidly with no change in water content of clay core



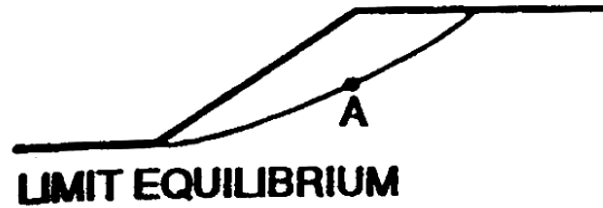
(c) Footing placed rapidly on clay deposit

Fig. 11.57 Some examples of UU analyses for clay (after Ladd, 1971b).

(Holtz and Kovacs, 1981)

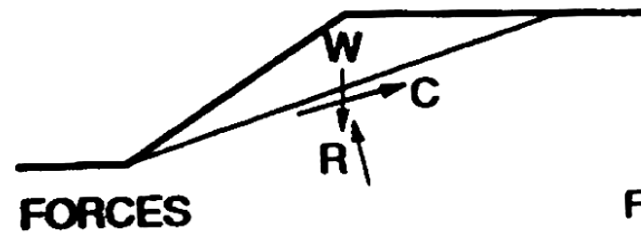
3. Calculation of Safety Factor

Faktor Keamanan

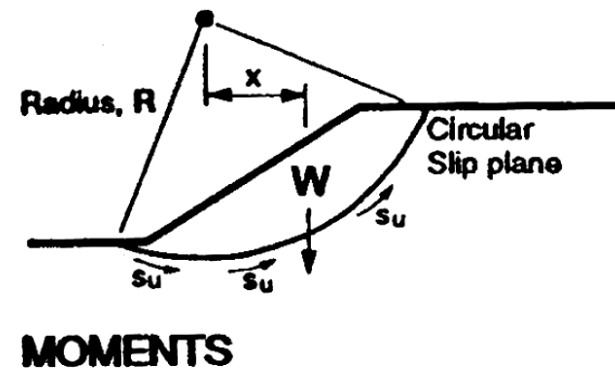


$$FOS = \frac{s_u}{\tau_{required}} \quad (\text{Total Stress})$$

$$FOS = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{\tau_{required}} \quad (\text{Effective Stress})$$



$$FOS = \frac{\text{Summation of resisting force}}{\text{Summation of mobilized force}}$$



$$FOS = \frac{\text{Resisting moment}}{\text{Overturning moment}} = \frac{R \int s_u ds}{W x}$$

Beberapa metode yang ada di dalam analisis stabilitas lereng

Kesetimbangan gaya :

Ordinary method of slices

Simplified Bishop

Simplified Janbu

Corps of Engineers

Lowe dan Karafith

Generalized Janbu

Kesetimbangan Gaya dan Moment

Bishop's rigorous

Spencer

Sarma

Morgenstern-Price

Circular Surface Analysis

Circular Arc($\phi_u = 0$) Method

$$F = \frac{c_u L R}{W_x} \quad (\text{Eq. 6-26})$$

where c_u = undrained shear strength

R = radius of circular surface

W = weight of sliding mass

x = horizontal distance between circle center, O , and the center of the sliding mass.

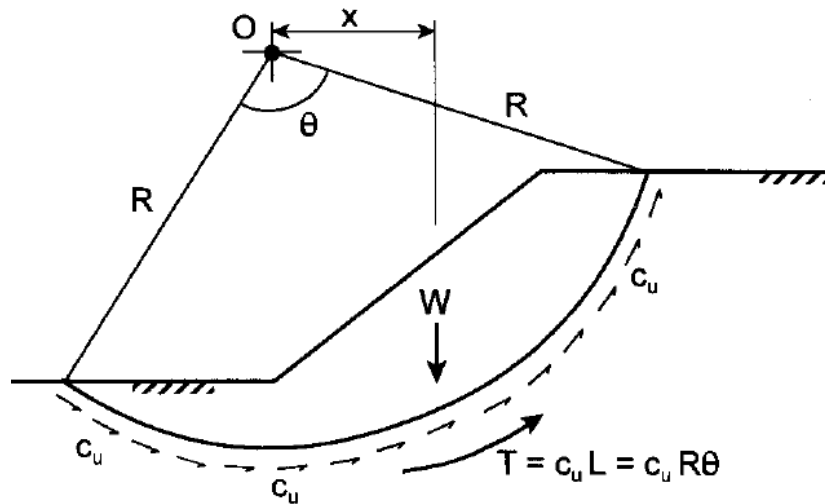


Figure 6.17 Circular failure surface in a $\phi_u = 0$ soil.

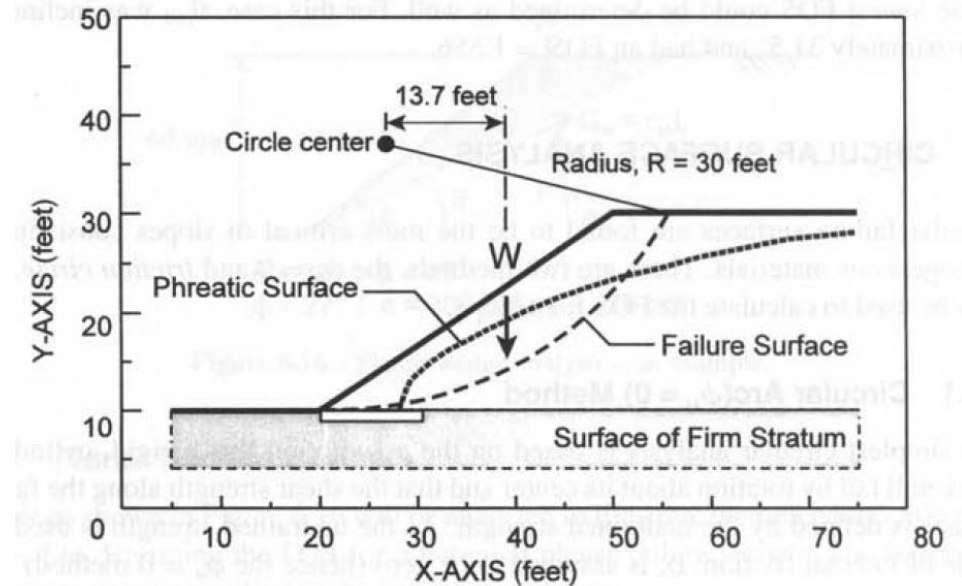


Figure 6.18 Example problem— $\phi_u = 0$ method.

Circular Surface Analysis

Circular Arc($\phi_u = 0$) Method

6.8.2 $\phi_u = 0$ Example

For this example, the circular failure surface shown in Figure 6.18 will be analyzed for the case where the soil parameters are: $c = 1,000$ pounds per square foot, $\phi_u = 0$, and $\gamma = 125$ pounds per cubic foot. The phreatic surface, shown in the figure, was neglected for this example. The failure surface configuration has:

- (1) Radius, $R = 30$ feet.
- (2) Arc length, $L_{\text{arc}} = 42.3$ feet.
- (3) Weight of the slide material, $W = 26.5$ kips.
- (4) Location of W , $x = 13.7$ feet.

With the above data, the FOS for the $\phi_u = 0$ method can be readily calculated as

$$\begin{aligned} F &= (1,000 \times 42.3 \times 30) \div (26,500 \times 13.7) \\ &= 3.495 \end{aligned}$$

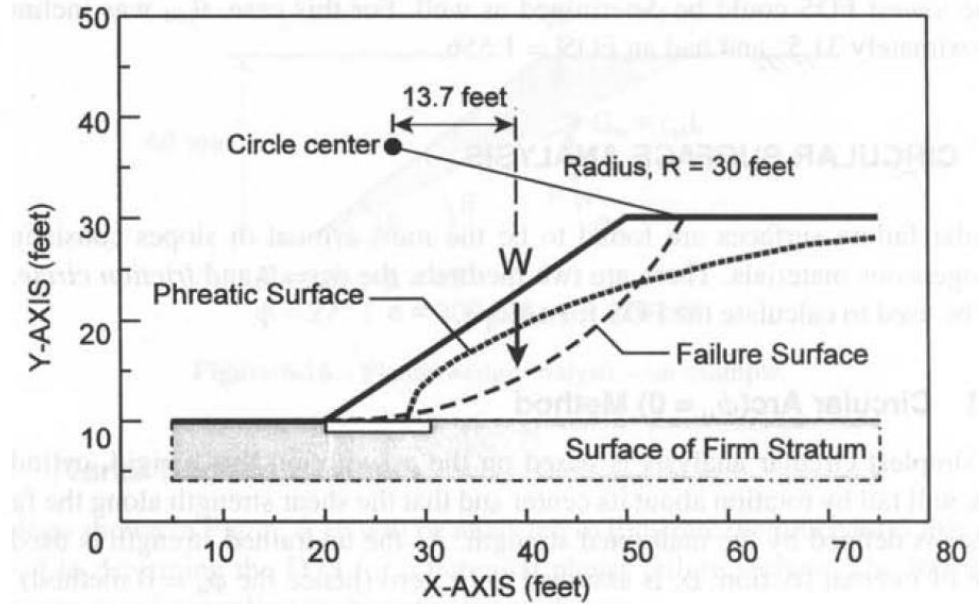


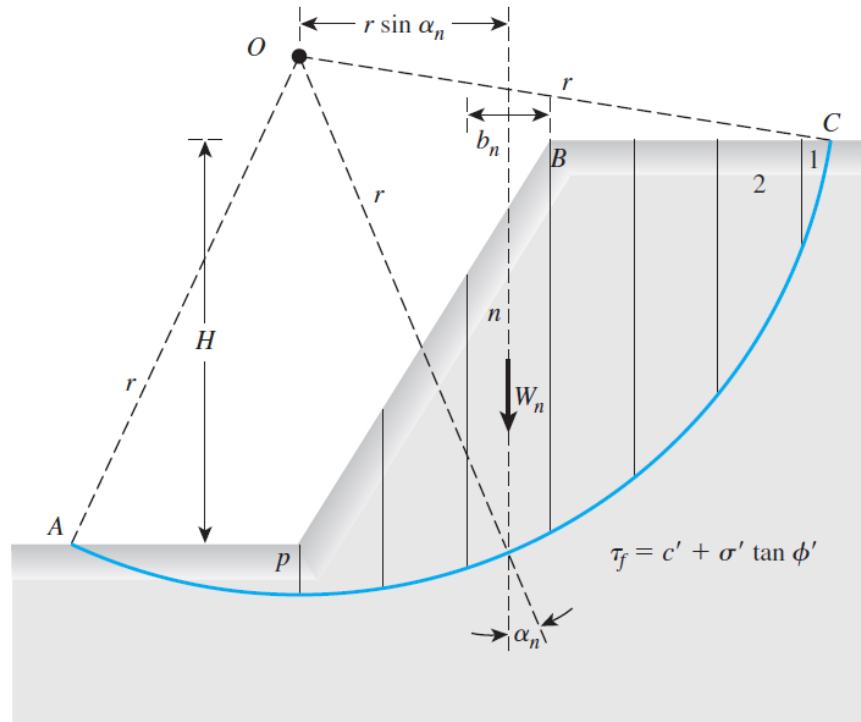
Figure 6.18 Example problem— $\phi_u = 0$ method.

Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)

Cara ini dapat digunakan untuk berbagai kondisi yaitu tanah (ϕ - c), tanah berlapis, bendungan yang terdiri dari beberapa jenis bahan, ada rembesan air dalam tanah, tanpa ataupun diperhitungkan pengaruh gempa.

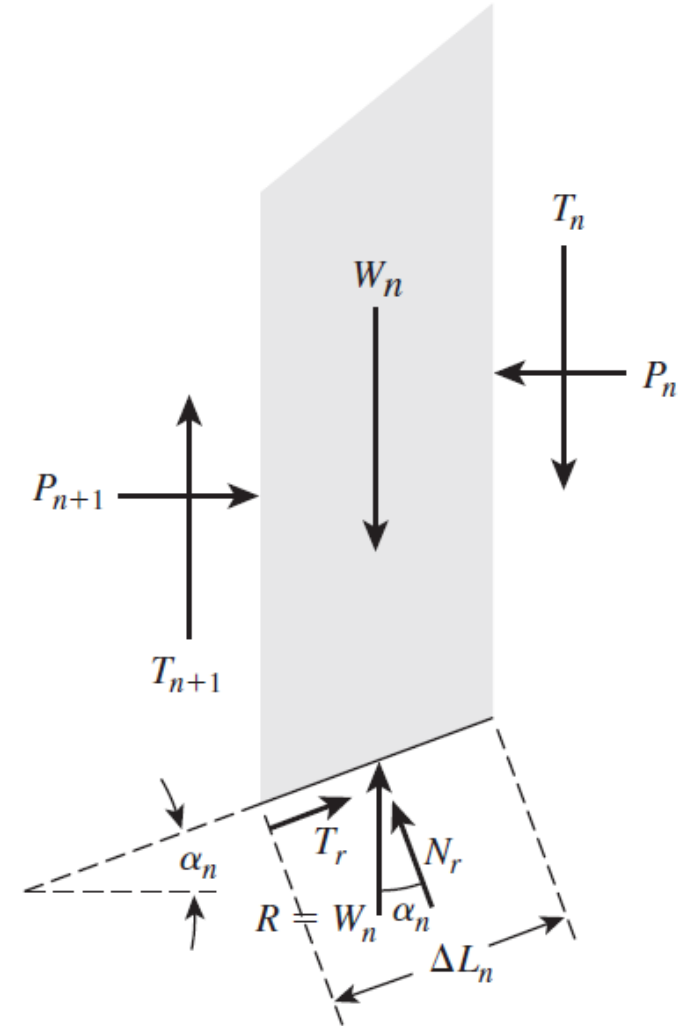
Pada metoda ini, longsoran diasumsikan berbentuk busur lingkaran. Untuk menentukan faktor keamanan yang paling kritis harus dilakukan “trial and error” untuk banyak lingkaran dengan berbagai titik pusat dan jari-jari.

Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)



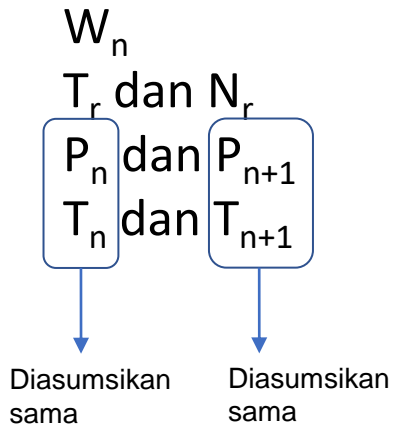
(a)

Tanah di atas (bagian longsor)
dibagi-bagi irisan vertikal yang
lebarnya sama = b , Tinjau 1 irisan
seperti gambar diatas:



(b)

Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)



- : berat irisan
- : komponen tegak dan sejajar dari reaksi R
- : gaya normal yang bekerja pada sisi-sisi irisan
- : gaya geser yang bekerja pada sisi-sisi irisan

Keseimbangan

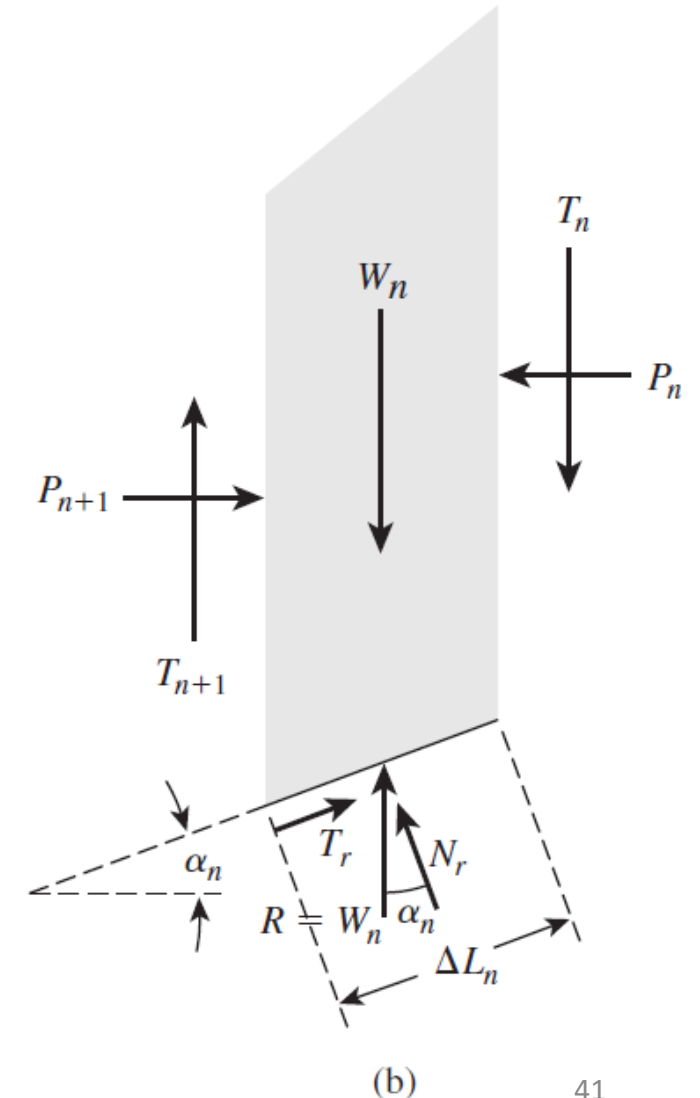
$$N_r = W_n \cos \alpha_n$$

Gaya geser perlawanan dapat dinyatakan sebagai berikut :

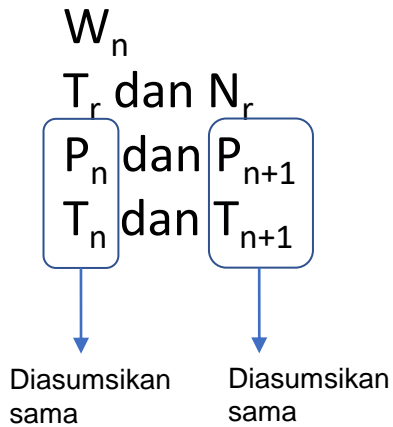
$$T_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{F_s} = \frac{1}{F_s} [c' + \sigma' \tan \phi'] \Delta L_n$$

Tegangan Normal

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n}$$



Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)



- : berat irisan
- : komponen tegak dan sejajar dari reaksi R
- : gaya normal yang bekerja pada sisi-sisi irisan
- : gaya geser yang bekerja pada sisi-sisi irisan

Keseimbangan

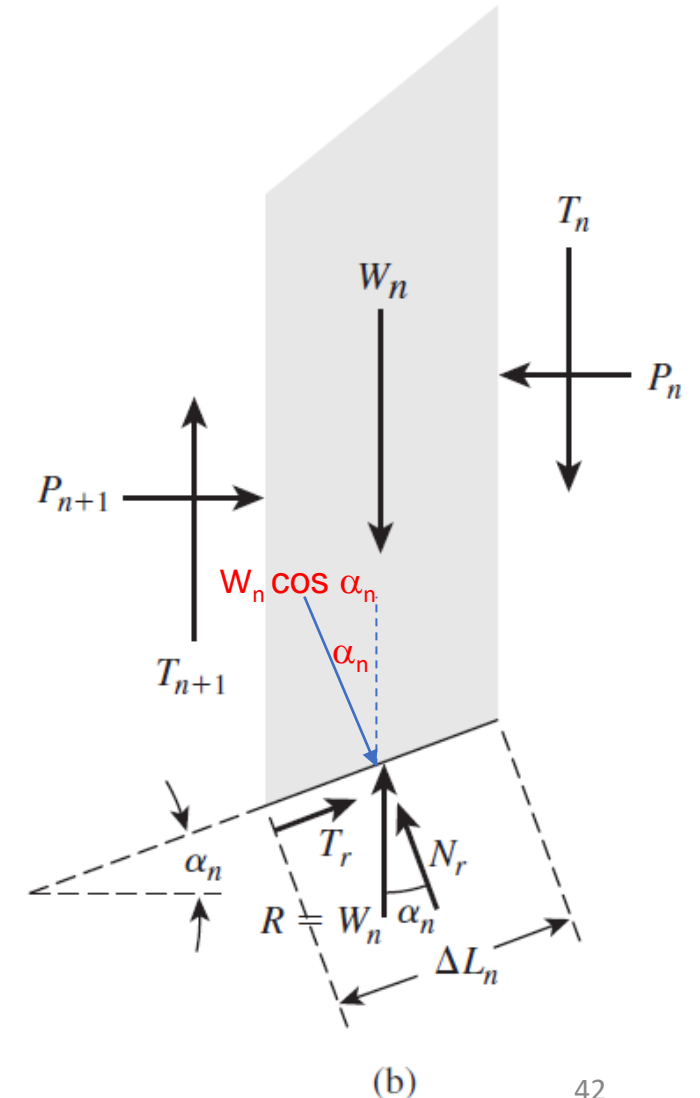
$$N_r = W_n \cos \alpha_n$$

Gaya geser perlawanan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$T_r = \tau_d(\Delta L_n) = \frac{\tau_f(\Delta L_n)}{F_s} = \frac{1}{F_s} [c' + \sigma' \tan \phi'] \Delta L_n$$

Tegangan Normal

$$\frac{N_r}{\Delta L_n} = \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n}$$



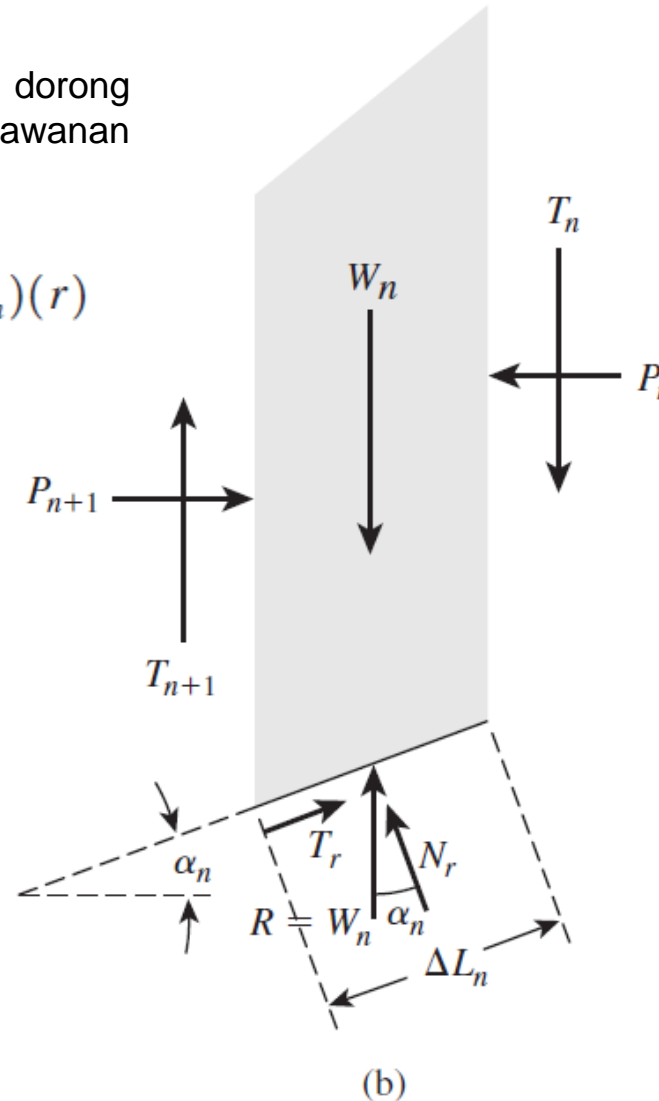
Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)

Untuk keseimbangan blok percobaan ABC, momen gaya dorong terhadap titik O adalah sama dengan momen gaya perlawanan terhadap titik O

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n r \sin \alpha_n = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{F_s} \left(c' + \frac{W_n \cos \alpha_n}{\Delta L_n} \tan \phi' \right) (\Delta L_n) (r)$$

Atau

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$



Nilai α_n bisa bertanda negative atau positif.

$\alpha_n +$ = berada pada kuadran yang sama dengan lereng (sisi atas irisan)

$\alpha_n -$ = berada sisi bawah irisan

Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)

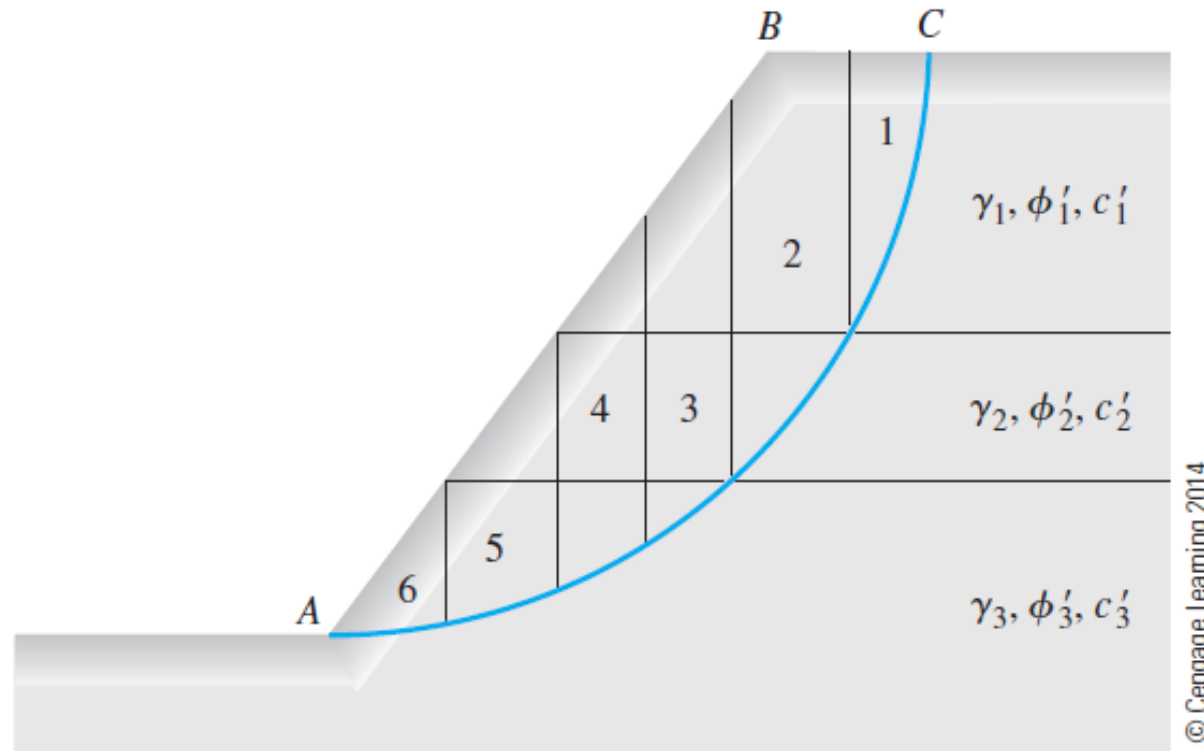
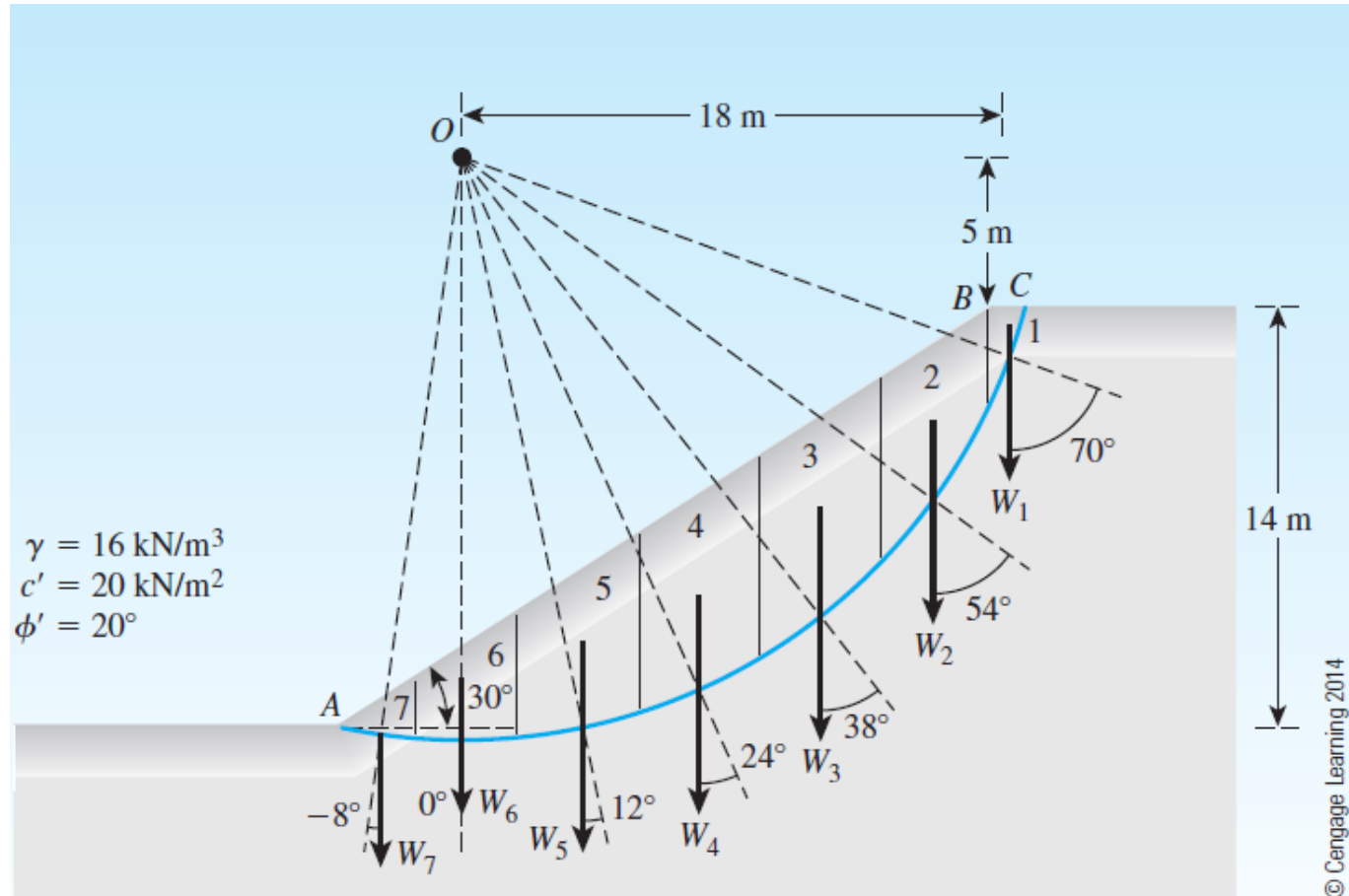


Figure 15.30 Stability analysis, by ordinary method of slices, for slope in layered soils

Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)

CONTOH 12-9:

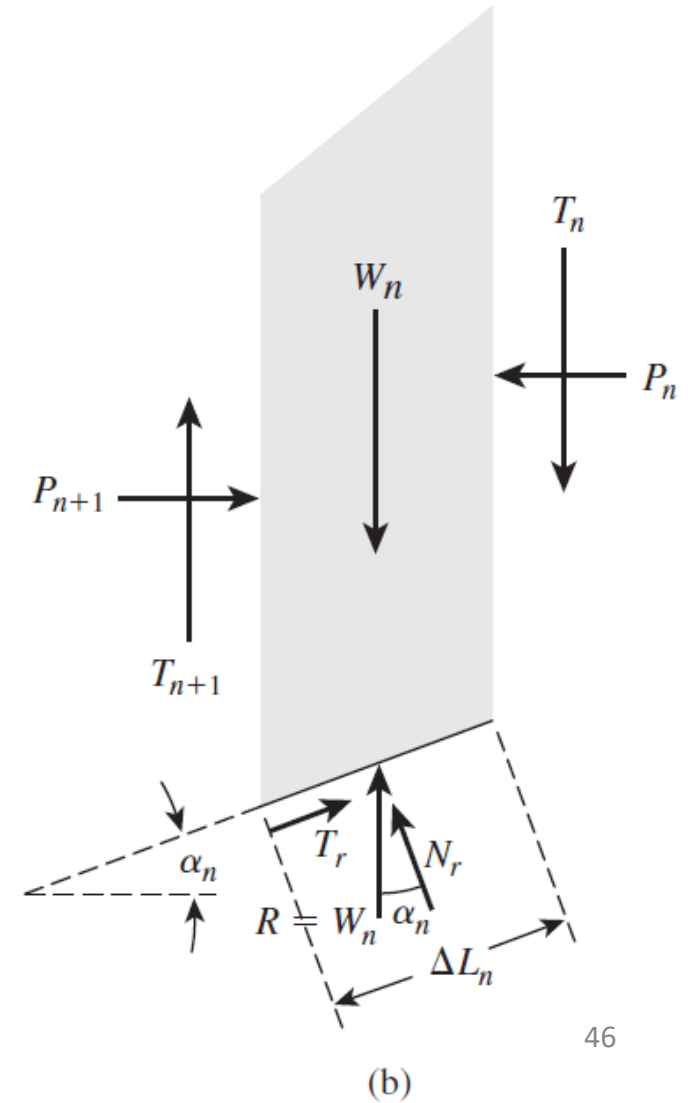
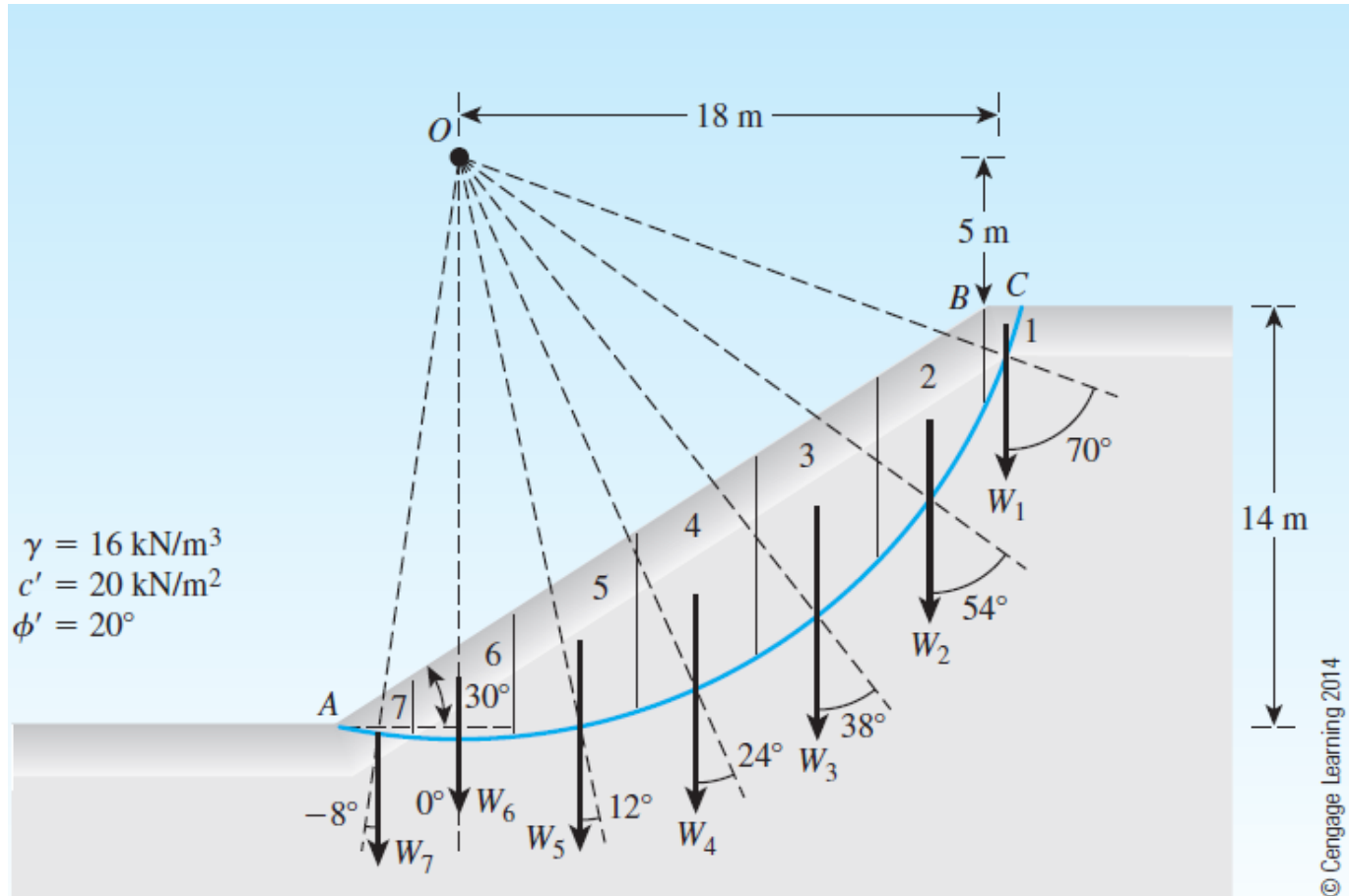
Untuk talud seperti ditunjukkan dalam Gambar 12-22, tentukan angka keamanan terhadap kelongsoran untuk bidang longsor AC yang dicoba. Gunakanlah metode irisan sederhana.



Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)

CONTOH 12-9:

Untuk talud seperti ditunjukkan dalam Gambar 12-22, tentukan angka keamanan terhadap kelongsoran untuk bidang longsor AC yang dicoba. Gunakanlah metode irisan sederhana.



Metoda Irisan Sederhana (Ordinary Methods of Slices)

CONTOH 12-9: _____

Untuk talud seperti ditunjukkan dalam Gambar 12-22, tentukan angka keamanan terhadap kelongsoran untuk bidang longsor AC yang dicoba. Gunakanlah metode irisan sederhana.

Penyelesaian:

Massa yang longsor dibagi menjadi tujuh irisan. Perhitungan yang lain ditunjukkan dalam tabel berikut ini.

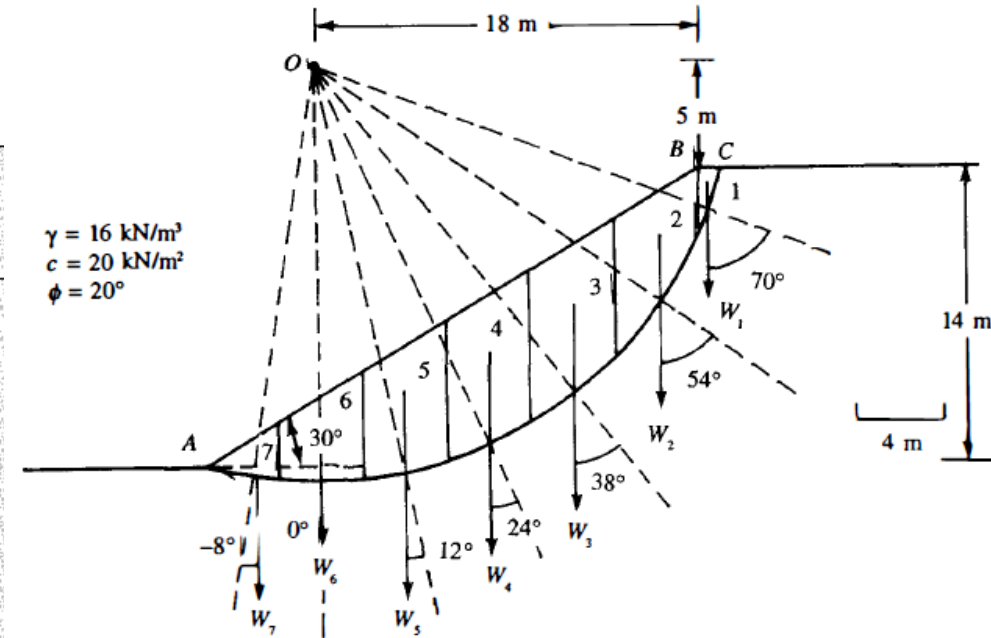
Irisan No. (1)	W_n (kN/m) (2)	α_n (deg) (3)	$\sin \alpha_n$ (4)	$\cos \alpha_n$ (5)	ΔL_n (m) (6)	$W_n \sin \alpha_n$ (kN/m) (7)	$W_n \cos \alpha_n$ (kN/m) (8)
1	22,4	70	0,94	0,342	2,924	21,1	7,7
2	294,4	54	0,81	0,588	6,803	238,5	173,1
3	435,2	38	0,616	0,788	5,076	268,1	342,94
4	435,2	24	0,407	0,914	4,376	177,1	397,8
5	390,4	12	0,208	0,978	4,09	81,2	381,8
6	268,8	0	0	1	4	0	268,8
7	66,56	-8	-0,139	0,990	3,232	-9,25	65,9
					$\Sigma \text{ col. 6} =$ 30,501 m	$\Sigma \text{ Col. 7} =$ 776,75 kN/m	$\Sigma \text{ Col. 8} =$ 1638,04 kN/m

$$F_s = \frac{(\Sigma \text{ Col. 6})(c) + (\Sigma \text{ Col. 8}) \tan \phi}{\Sigma \text{ Col. 7}}$$

$$= \frac{(30,501)(2) + (1638,04)(\tan 20)}{776,75} = 1,55$$

**Ralat :
c =20**

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' \Delta L_n + W_n \cos \alpha_n \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

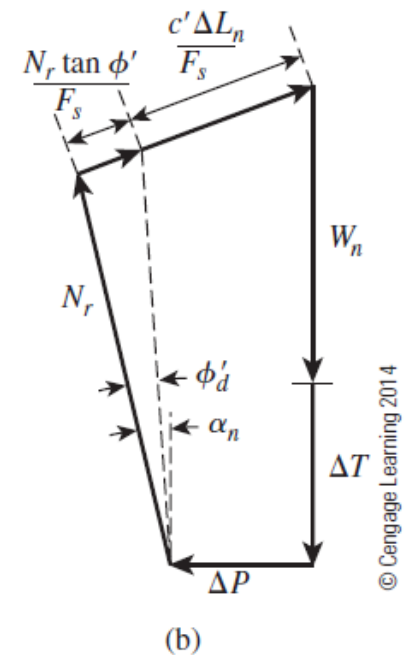
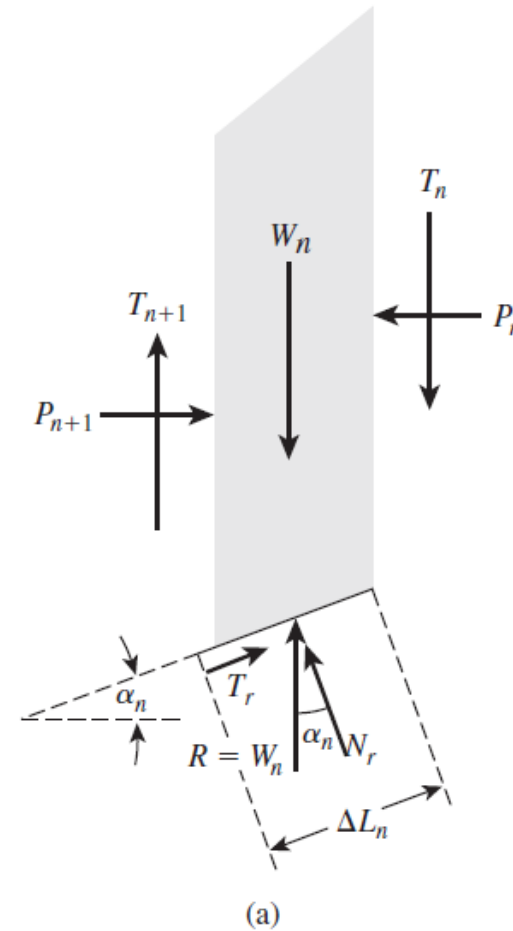


Gambar 12-22

Metoda Irisan Bishop

Tahun 1955 Bishop memperkenalkan suatu penyelesaian yang lebih teliti dari periode irisan sederhana (Ordinary Method of Slice). Dalam metode ini, pengaruh gaya-gaya pada sisi tepi irisan diperhitungkan.

Pada metoda ini semua gaya diuraikan dalam arah vertikal



Metoda Irisan Bishop

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c'b_n + W_n \tan \phi' + \Delta T \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

$$m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi' \sin \alpha_n}{F_s}$$

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c'b_n + W_n \tan \phi') \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n}$$

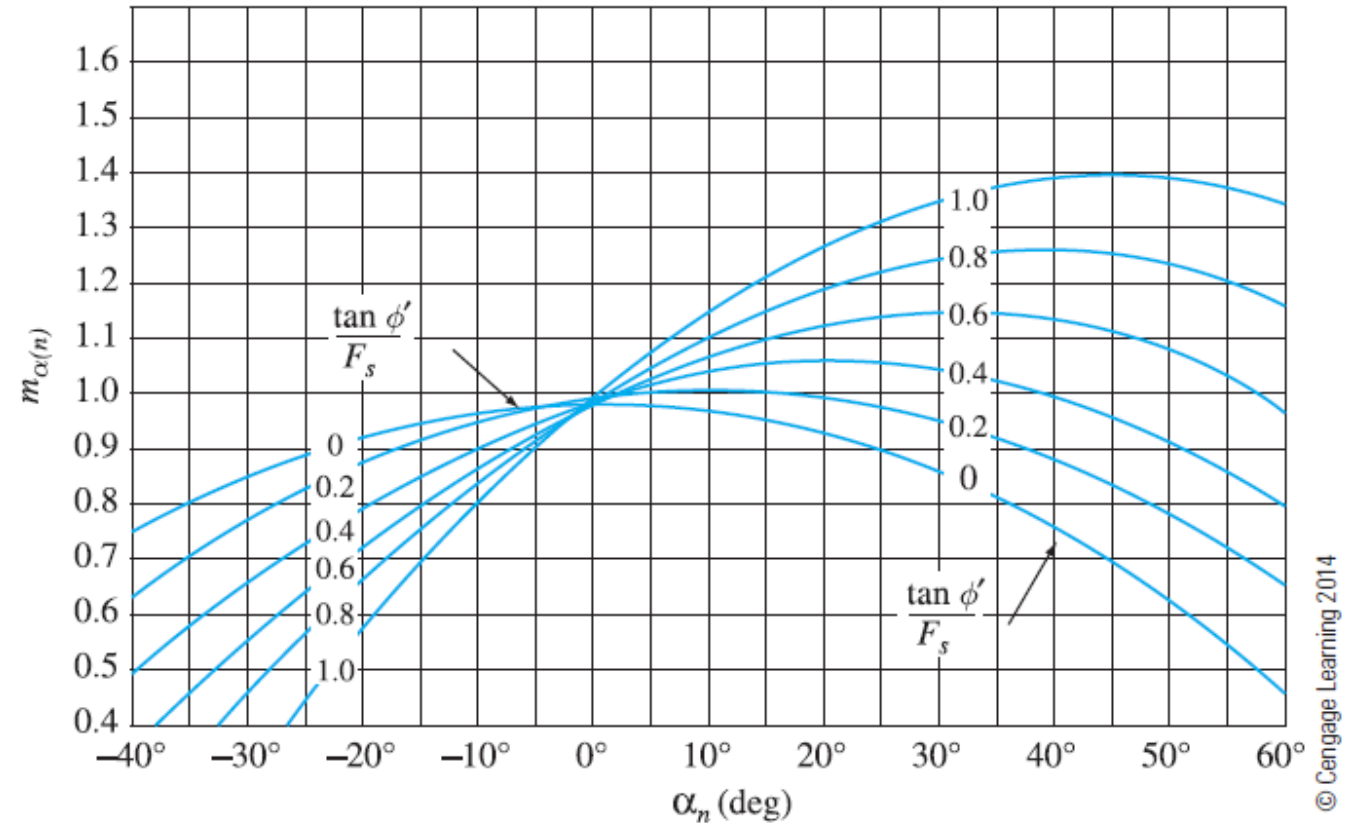


Figure 15.33 Variation of $m_{\alpha(n)}$ with α_n and $\tan \phi' / F_s$ [Eq. (15.62)]

Limit Equilibrium Method

All limit equilibrium methods for slope stability analysis divide a slide-mass into n smaller slices, as shown in Figure 6.21. Each slice is affected by a general system of forces, as shown in Figure 6.22. The thrust line indicated in the figure connects the points of application of the interslice forces, Z_i . The location of this thrust line may be assumed, as in the rigorous Janbu method (Janbu, 1954a, 1954b, 1973), or its location may be determined using a rigorous method of analysis that satisfies complete equilibrium. The popular simplified methods of analysis neglect the location of the interslice force because complete equilibrium is not satisfied for the failure mass.

Limit Equilibrium Method

Ordinary Method of Slices (OMS) This method (Fellenius, 1927, 1936) neglects all interslice forces and fails to satisfy force equilibrium for the slide mass as well as for individual slices. However, this is one of the simplest procedures based on the method of slices.

Bishop's Simplified Method Bishop (1955) assumes that all interslice shear forces are zero, reducing the number of unknowns by $(n - 1)$. This leaves $(4n - 1)$ unknowns, leaving the solution overdetermined as horizontal force equilibrium will not be satisfied for one slice.

Janbu's Simplified Method Janbu (1954a, 1954b, 1973) also assumes zero interslice shear forces, reducing the number of unknowns to $(4n - 1)$. This leads to an overdetermined solution that will not completely satisfy moment equilibrium conditions. However, Janbu presented a correction factor, f_0 , to account for this inadequacy.