

第 1 1 章 斜面の安定

1. 序論

■ スライス法を中心に説明する。

スライス法は、 c 、 ϕ 、 γ 、 u 、荷重が斜面内で場所により異なっても解析できる。

■以下、間隙水圧（地下水の浸透圧）、外荷重、地震力が無い簡単化した状況で説明する。

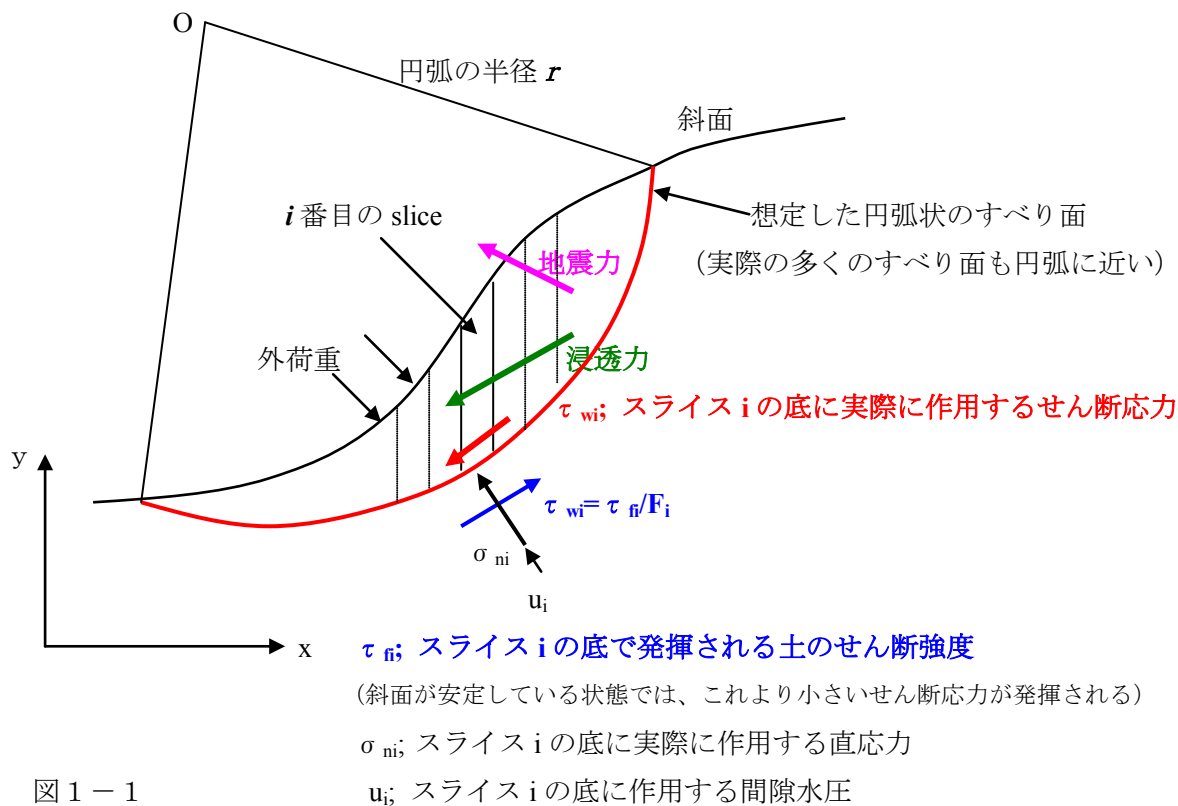


图 1-1

■すべりに対する局所的な安全率 (個々の slice i に対して成り立っている式)

$$F_i = \frac{\tau_{fi}}{\tau_{wi}} \quad (1-1)$$

- a) すべり面全体として平均的に見て最小値 $F_{\min}$ になるすべり面の形（通常は円弧に仮定）、位置、大きさを捜す。→課題：これをどうやって捜すのか？
- b) $F_{\min}$ の意味。
- {

$F_{\min} > 1.0$: 破壊しない状態

$F_{\min} = 1.0$: 破壊するかしないかの境界

$F_{\min} < 1.0$: 有り得ない状態
- c) しかし、作用せん断応力 τ_{wi} は、土の自重・地震力・境界荷重・浸透力等の関数である「高度な不静定力*」である。→どうやって求めるのか？

* この値は、以下で説明する Fellenius 法・Bishop 法等の斜面の安定解析法では、直ちに求められない。全体の安全率 F が求まった後に求まる。
(静定問題、不静定問題の例を考察)。

d) 土のせん断強度も、 ϕ がゼロでない限り 不静定力である σ_{ni} の関数となり、**不静定力**である；

$$\tau_{fi} = c_i + (\sigma_{ni} - u_i) \cdot \tan \phi_i \quad (1-2)$$

・つまり、不静定力である σ_{ni} が求まっていないと、 τ_{fi} は求まらない。

・→ σ_{ni} を、どうやって求めるのか？ → これも容易ではない！！

→ 即ち、(1-1)式の右辺の分母・分子とも、**不静定力**であり、単純ではない高度の不静定問題である。

先人は、実に様々な仮定を巧みに導入して、解が求まるようにした。

2. 先人が導入した様々な仮定

2. 1 すべり面の形に関する仮定

Step 1

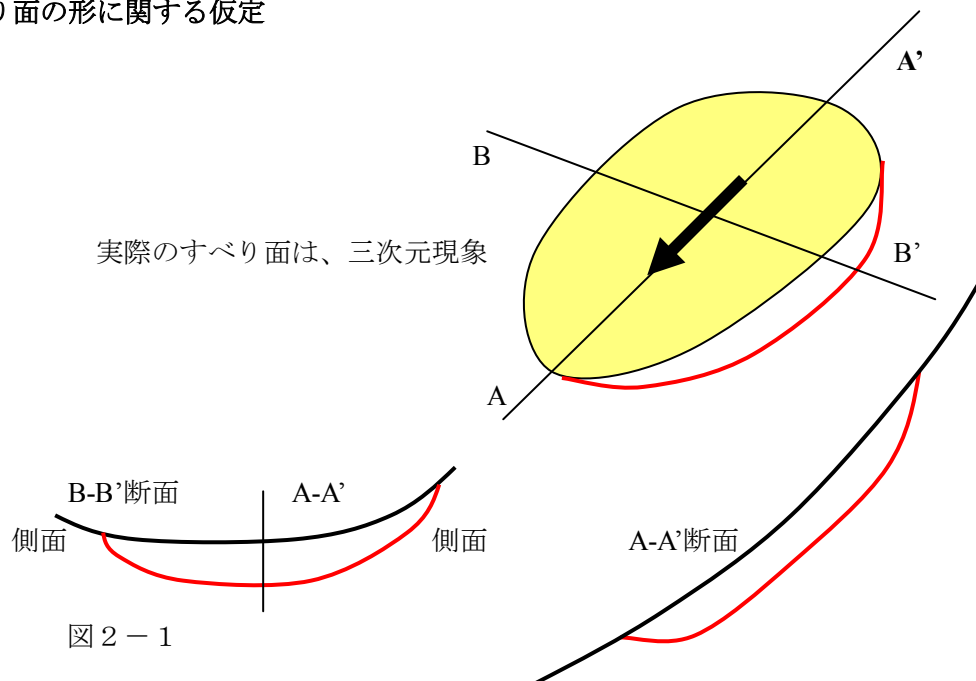


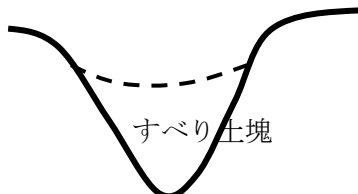
図 2 - 1

■ 三次元現象を、二次元現象に単純化する。 **A-A'断面** で、二次元のすべりに対して検討する。

- a) 側面のせん断抵抗を無視している（安全側）。
- b) 三次元解析は、非常に複雑である。
- c) この単純化による誤差よりも、他の仮定による誤差の方が大きい場合が多い。

■ 三次元解析の方法が幾多提案されている。

深い谷の中のすべり土塊の安定問題では、三次元解析が必要な場合がある。



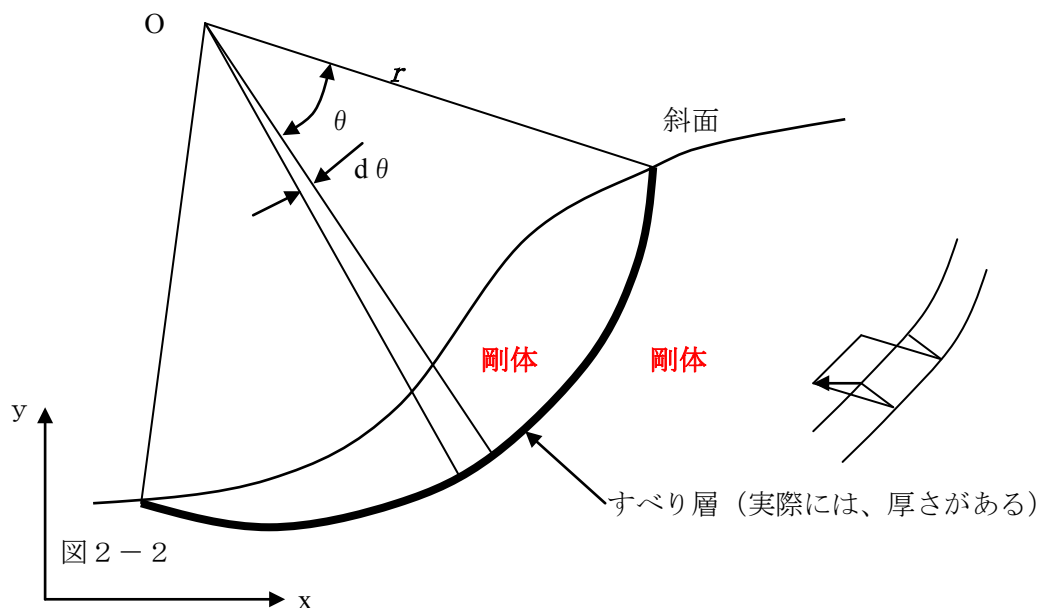
しかし、通常の実務では殆ど用いられていない。

Step 2

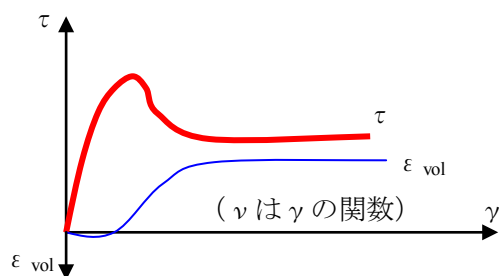
■すべり面以外の領域は剛体と仮定（実際はそうではない。従って、以下の議論は近似）。

■すべり面の形：通常は直線（半径無限大の円弧）、あるいは円弧に仮定。

（実際は、そうであるとは限らない）



せん断層の実際の挙動



すべり層の変形

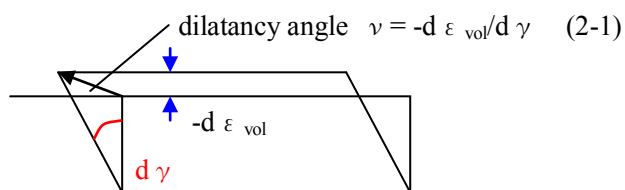


図 2 - 3

すべり土塊が剛体でせん断層が変位が大きくなっても一定の dilatancy 角を維持し続ける場合、Kinematically admissible（運動学的に可能）なすべり面の形は、

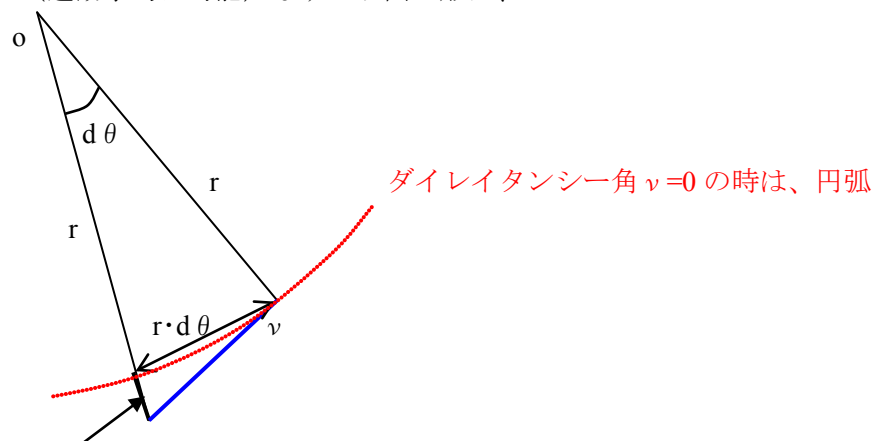


図 2 - 5

$$dr = (r \cdot d\theta) \tan \nu \quad (2-2) :$$

$$dr/r = \tan \nu \cdot d\theta \quad (2-3) \quad d\ln(r) = \tan \nu \cdot d\theta \quad (2-4)$$

$$\theta = 0, r = r_0 \text{ から } \theta, r \text{ まで積分して、} \ln(r/r_0) = \tan \nu \cdot \theta \quad (2-5a)$$

$$r = r_0 \cdot \exp(\tan \nu \cdot \theta) \quad (2-5b); \text{ 対数螺旋 (Logarithmic spiral)}$$

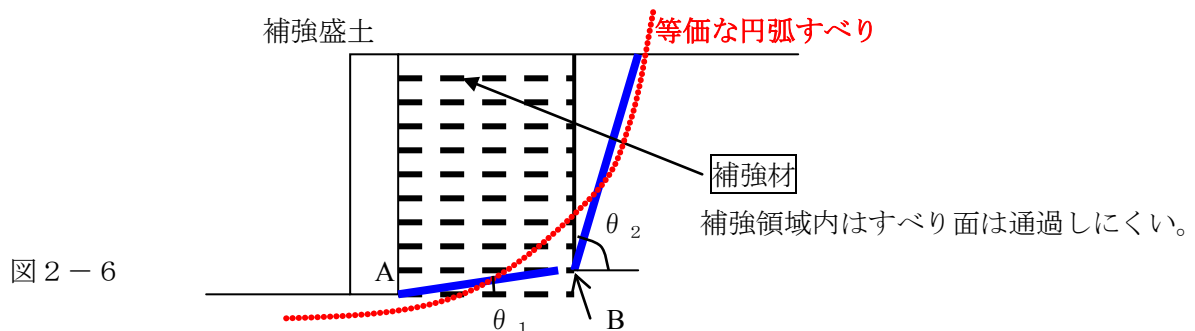
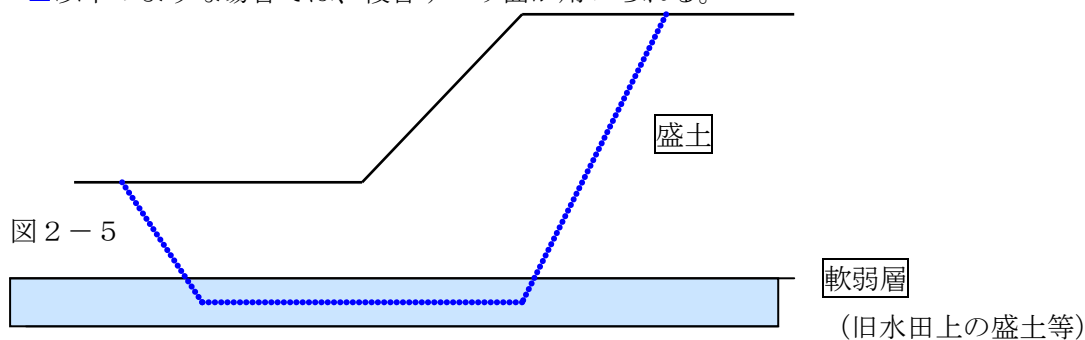
$\nu = 0$ の場合は、 $r = r_0$ (円弧)

■ $\nu = 0$ の場合は、 $r = r_0$ (円弧)

$\nu = 0$ でない時も円弧に仮定することが多い。その三つの理由。

- 全体として見ると、実際に観察される破壊面の形は円弧に近い場合が多い。大変更後の残留状態では $\nu = 0$ になり、大変形後でないとは破壊面は観察できない。
- 円弧だと計算が簡単になる。
- 円弧と仮定することによる誤差よりも、他の単純化仮定による誤差の方が遙かに大きいことが多い。

■ 以下のような場合では、複合すべり面が用いられる。



■ Two-wedge (二重楔) 法と呼ばれている。

角度 θ_1 、 θ_2 、点 A、B の座標を任意に変化させて、安全率が最小になるすべり面を求める。

円弧すべりとの差は意外に少ない。

Step 3

■ 円弧の中心位置 θ と半径 r を仮に決める。

- なるべく、「安全率が最小になる円弧 (臨界すべり面)」に近いすべり面を仮定した方が、 $F_{\min}$ を求めるまでの収束が早い。

3. 直線すべり (r=∞の場合)

■ 仮定 1 : 直線すべり面は、斜面に平行。しかし、その深さ **H** は不明。

■ 仮定 2 : スライス間力に関して: 斜面は直線で無限長であると、斜面方向の条件は変化しないので、「**E=E'**」であり、それぞれ斜面に平行」と仮定できる。

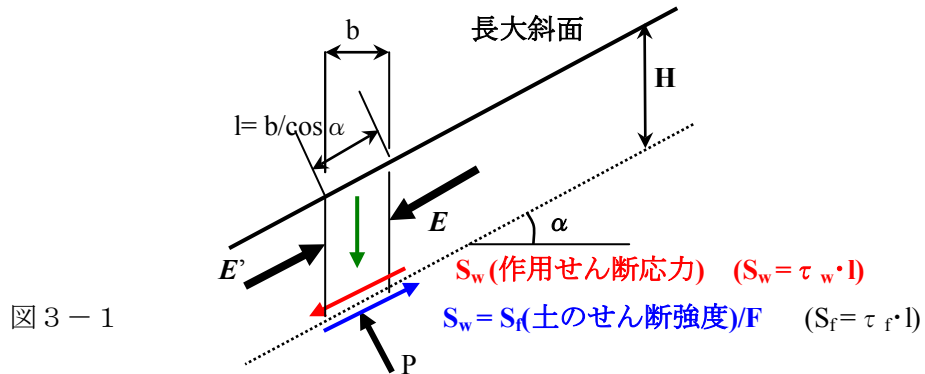


図 3 - 1

■ 仮定 2 から、不静定力であるスライス間力を考えないで静定問題として極限釣り合いを考察できる。

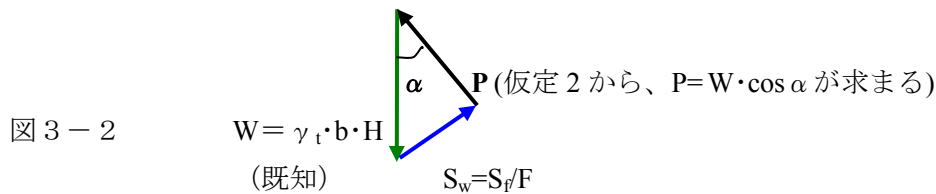


図 3 - 2

$$F = \frac{S_f}{S_w} \quad (3-1)$$

$$S_w = W \cdot \sin \alpha \quad (\text{この場合は静定力}) \quad (3-2)$$

$$S_f = \tau_f \cdot l = c \cdot l + (\sigma_n \cdot l) \cdot \tan \phi = c \cdot l + P \cdot \tan \phi = c \cdot l + W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi \quad (3-3)$$

$$\tau_f = c + \sigma_n \cdot \tan \phi$$

$$P = W \cdot \cos \alpha \quad (\text{この場合は静定力})$$

(3-2), (3-3)式を(3-1)式に代入して、

$$F = \frac{c \cdot l + W \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi}{W \cdot \sin \alpha} = \frac{c \cdot l}{W \cdot \sin \alpha} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} = \frac{2 \cdot c}{\gamma_t \cdot H \cdot \sin(2\alpha)} + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (3-4) \quad (\text{教科書 11.5})$$

[説明] $c \cdot l / W \cdot \sin \alpha = [c \cdot (b/\cos \alpha)] / [\gamma_t \cdot b \cdot H \cdot \sin \alpha] = [c] / [\gamma_t \cdot H \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha]$

$$W = \gamma_t \cdot b \cdot H$$

●この式に物性ではない **H** が入っていることに注目

■ $c \neq 0$ の時、 $c \rightarrow \text{大}$ $F \rightarrow \text{大}$ 特に浅いすべり面では、 c の増加による F の増加は大きい。
 $H \rightarrow \text{大}$ $F \rightarrow \text{小}$ 従って、すべり面は深くなる。

$$\text{■ } c=0 \text{ の時 } F = \tan \phi / \tan \alpha \quad (H \text{ に関わらず}) \quad (3-5) \quad (\text{教科書 11.6})$$

すべり面の深さ不定となる。

[演習問題]

$\alpha = 30^\circ$ 、 $c = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ (19.6 kPa)、 $\phi = 20^\circ$ 、 $\gamma_t = 1.7 \text{ gf/cm}^3$
 の時の $F = 1.0$ になるすべり線の深さ H (m) を求めよ。

Step 5 すべり面に沿っての安全率の分布に対する仮定

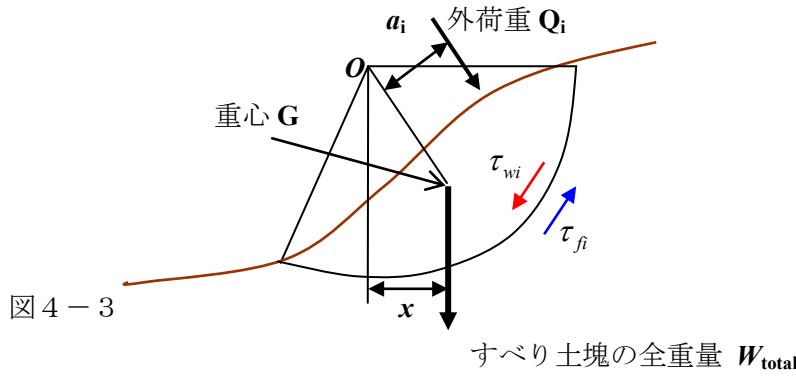
- slice 1 から slice n まで、安全率 $F_i = \frac{\tau_{fi}}{\tau_{wi}}(1-1)$ が全て等しいと仮定する。

$$F = F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_i = \dots = F_n \quad (4-1)$$

本来は、斜面は進行的に破壊するので、 F_i はすべり面に沿って決して一定ではない。重要であるが、すぐ忘れられる仮定。

- 点 O 周りの全体の moment に対する安全率 $F(\text{global})$ を定義する。

$$F(\text{global}) = \frac{M_r(\text{抵抗moment}) = \sum \{r \cdot (\tau_{fi} \cdot l_i)\}}{M_d(\text{滑動moment}) = \sum \{r \cdot (\tau_{wi} \cdot l_i)\}} \quad (4-2)$$



実際の $M_d(\text{滑動 moment})$ の値は、次式で求める。

$$\text{力の釣り合いから、} \quad M_d = \sum \{r \cdot [\tau_{wi} \cdot l_i]\} = W_{\text{total}} \cdot x + \sum (a_i \cdot Q_i) \quad (4-3)$$

- $F(\text{global})$ は、(4-1)式が成り立っているときは、局所安全率 ($F = F_1 = F_2 = F_3 = \dots = F_i = \dots = F_n$) と同じ値になる。なぜならば、

$$\begin{aligned} F(\text{global}) &= \frac{M_r(\text{抵抗moment})}{M_d(\text{滑動moment})} = \frac{\sum \{r \cdot (\tau_{fi} \cdot l_i)\}}{\sum \{r \cdot (\tau_{wi} \cdot l_i)\}} \\ &= \frac{\sum \{r \cdot (F_i \cdot \tau_{wi} \cdot l_i)\}}{\sum \{r \cdot (\tau_{wi} \cdot l_i)\}} = \frac{\sum \{r \cdot (F \cdot \tau_{wi} \cdot l_i)\}}{\sum \{r \cdot (\tau_{wi} \cdot l_i)\}} = \frac{F \cdot \sum \{r \cdot (\tau_{wi} \cdot l_i)\}}{\sum \{r \cdot (\tau_{wi} \cdot l_i)\}} = F \end{aligned} \quad (4-4)$$

Step 6 力の釣り合いから、 S_{wi} と S_{fi} を求める。すなわち、 F を求める。

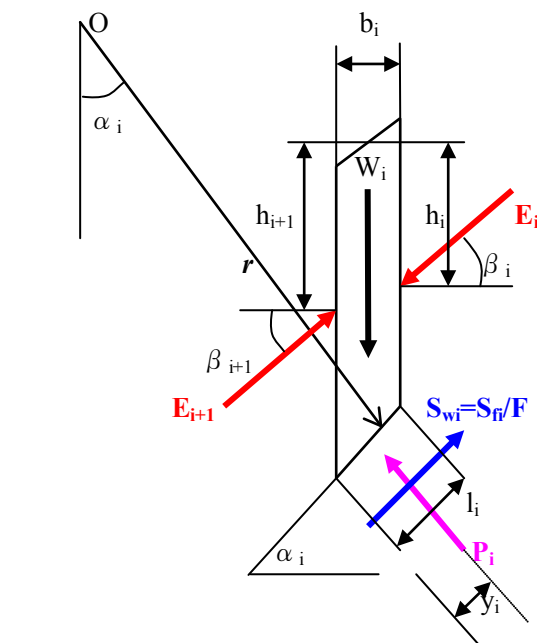


図 4-4

■ しかし、 $E_i, E_{i+1}, P_i, S_{wi}, S_{fi}$ は何れも不静定力であり、土の物性の関数でもある。
すなわち、高次の不静定問題である。

a) unknowns; $E_i, E_{i+1}, P_i, S_{wi}, S_{fi}, h_i, h_{i+1}, \beta_i, \beta_{i+1}, y_i$ 合計 **10**

b) knowns;

力の釣り合い式：鉛直方向、水平方向、moment; 合計 3 つ。

土のせん断強度； $\tau_{fi} = c_i + (P_i/l_i) \cdot \tan \phi_i$ (4-4a) } 1 つ。

もしくは、 $S_{fi} = \tau_{fi} \cdot l_i = c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i$ (4-4b) }

$S_{wi} = S_{fi}/F$ (4-5) 1 つ

F は known と同じ。なぜならば、 F を求める式が出れば良い。

(F を求める式が出れば、全体の F_{global} の最小値を求める問題に収まる)。

合計 **5** つ

10 - **5** = 5 → 解けない。従って、問題を静定化できる仮定が必要。→ Step 6

Step 6-1 Fellenius の仮定 (Sweden 法)

■ 仮定： スライス間力 E_i と E_{i+1} の大きさは、同じ値とは限らないが、スライスの底 ab の方向と平行であり、かつ同じ高さに作用している (E_i と E_{i+1} は同一線上に作用していて、 $\beta_{i+1} = \beta_i = \alpha_i$) と仮定。

この仮定は、無限斜面で用いた仮定と似ている（注：無限斜面では $E_i = E_{i+1}$ ）。

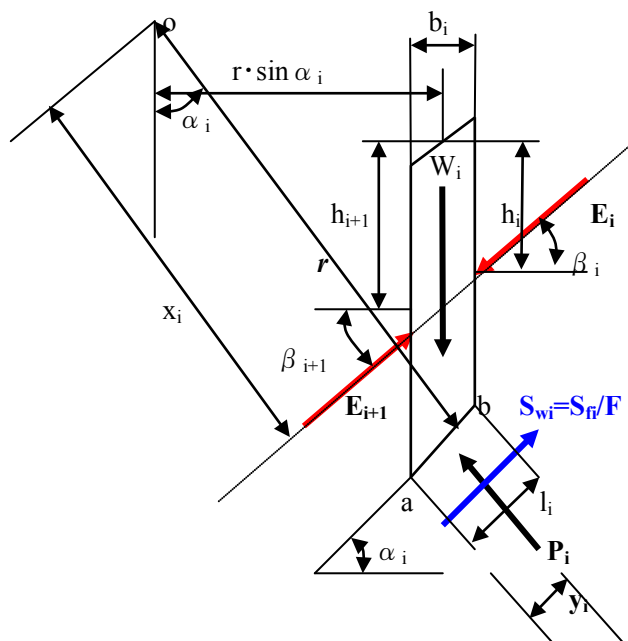


图 4-5

a) unknowns; $(E_{i+1} - E_i), P_i, S_{wi}, S_{fi}, h_{i+1}$ (もしくは x_i), y_i 合計 6

(注) E_{i+1} と E_i は同じ方向に作用しているので、それぞれ別個に求める必要はない。

b) knowns; 力の釣り合い式: 鉛直方向、水平方向、moment; 合計 3 つ。

$$\tau_{fi} = c_i + (P_i/l_i) \cdot \tan \phi_i \quad (4-4a)$$

もしくは、 $S_{fi} = \tau_{fi} \cdot l_i = c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i$ (4-4b) 1 つ。

$$\underline{S_{wl}=S_{fl}/F} \quad (4-5) \quad 1 \curvearrowright$$

合計 5

○6対5 → まだ、完全には解けない。 $y_i = b_i / (2 \cdot \cos \alpha_i)$ と仮定すれば、全て求まる。

○通常、上記の仮定をしないで、「 $\underline{E_i - E_{i+1}, x_i, y_i}$ 」とは無関係な $\mathbf{P_i}$ の方向の力の釣り合いは静定問題となることを利用して P_i を求める。すると、以下に示すように S_{fi} が求まり、 F に関する式が出る。

この場合、「 $(E_{i+1} - E_i, h_{i+1}, y_i)$ 」の全ては直ちには求まらない。 $(E_{i+1} - E_i)$ は、 F が求まった後に求まる。

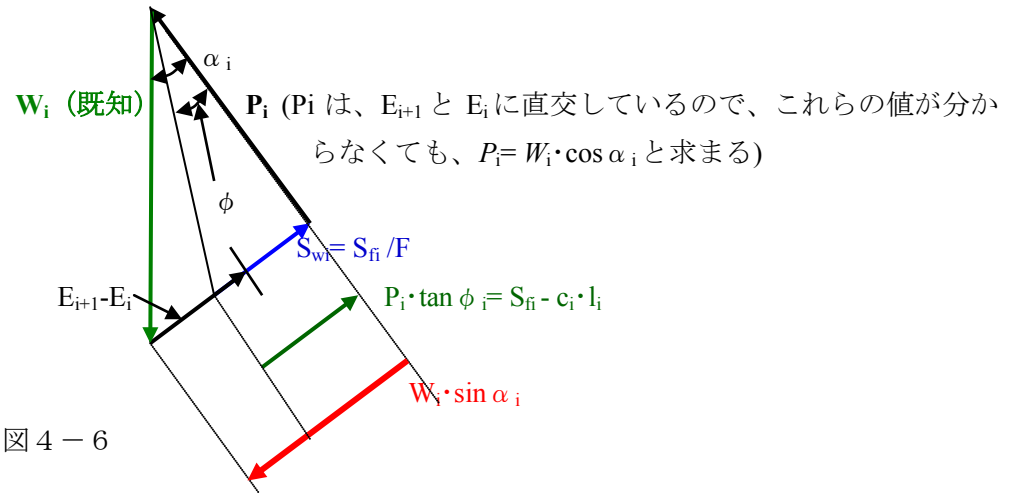


図 4-6

図 4-6 を参照して、 $P_i = W_i \cdot \cos \alpha_i$ (4-6)

従って、 $S_{fi} = c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i = c_i \cdot l_i + W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi_i$ (4-7)

- 従って、全体に対するモーメントの釣り合い式(4-1)は、各 slice での点 O に対するモーメントを求めれば、外力 $Q=0$ の時、以下ようになる。

図 4-6 を参照して、 $S_{wii} = W \cdot \sin \alpha_i - (E_{i+1} - E_i)$ であるので、

滑動モーメントは、 $M_d = \sum (S_{wi} \cdot r) = \sum [W \cdot \sin \alpha_i - (E_{i+1} - E_i)] \cdot r$ であるので、

$$F(global) = \frac{M_r(\text{抵抗moment})}{M_d(\text{滑動moment})} = \frac{\sum (r \cdot S_{fi})}{\sum [r \cdot (W \cdot \sin \alpha_i)] - \sum [r \cdot (E_{i+1} - E_i)]}$$

$$= \frac{\sum (S_{fi})}{\sum (W \cdot \sin \alpha_i) - \sum (E_{i+1} - E_i)} \quad (4-8a)$$

ここで、 $(E_{i+1} - E_i)$ は unknowns であるが、 E_{i+1} と E_i は内力であるので、

$\sum (E_i - E_{i+1}) = 0$ となる。従って、分母は外力 $Q=0$ の場合は (4-3) 式の右辺と同じになる。

以上纏めると、(4-7)式を用いて次式が得られて、この式から $F(global)$ を求めることができる。

$$F(global) = \frac{\sum (S_{fi})}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} = \frac{\sum (c_i \cdot l_i + W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi_i)}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (4-8b)$$

→ 次の $F(global)$ の最小値を求める step に移ることができる。

注意) (4-8b) 式を見ると、

$$S_{wi} = W_i \cdot \sin \alpha_i \quad (4-9)$$

のように、一見見える。しかし、図 4-6 を見ても分かるように、これは誤りである。この図では、

$$S_{wi} < W_i \cdot \sin \alpha_i \quad (4-10)$$

となっている。実際は、 S_{wi} は、 F が求まったあとで、

$$S_{wi} = S_{fi} / F = [c_i \cdot l_i + W_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \tan \phi_i] / F \quad (4-11)$$

のようにして求めることが出来る。

Step 6-2 Bishop*の仮定

* Imperial College の元教授。 正しくは、Simplified Bishop 法。

- 仮定： スライス間力 E_i と E_{i+1} の大きさは、同じ値とは限らないが、
水平であり、かつ同じ高さに作用している ($h_{i+1} = h_i$, $\beta_{i+1} = \beta_i = 0$) と仮定する。

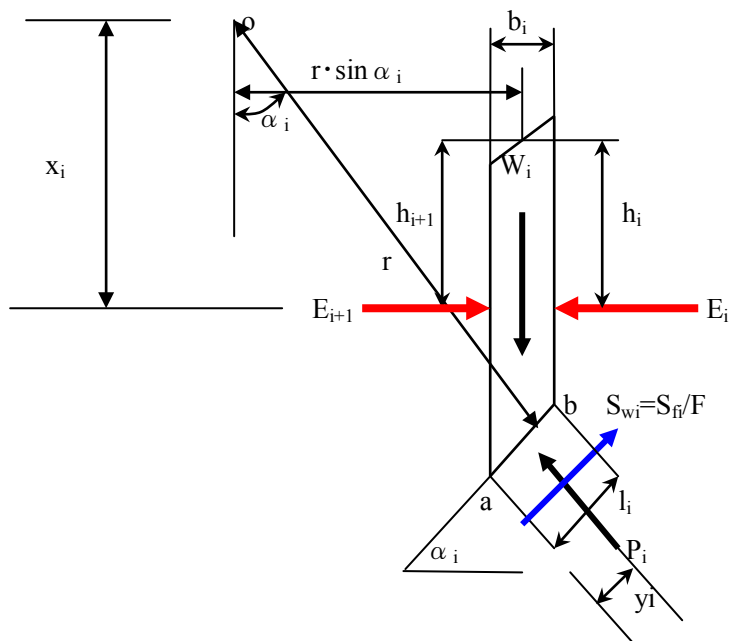


図 4 - 7

a) unknowns; $(E_{i+1} - E_i)$, P_i , S_{wi} , S_{fi} , h_{i+1} (もしくは x_i), y_i 合計 6

b) knowns; 力の釣り合い式: 鉛直方向、水平方向、moment; 合計 3 つ。

$$\tau_{fi} = c_i + (P_i / l_i) \cdot \tan \phi_i \quad (4-4a)$$

$$\text{もしくは、} S_{fi} = \tau_{fi} \cdot l_i = c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i \quad (4-4b) \quad 1 \text{ つ。}$$

$$S_{wi} = S_{fi} / F \quad (4-5) \quad 1 \text{ つ}$$

合計 5

- 6 対 5 → まだ、完全には解けない。 $y_i = b_i / (2 \cdot \cos \alpha_i)$ と仮定すれば、全て求まる。

- しかし、鉛直方向の力の釣り合いでは、「 $(E_{i+1} - E_i)$, x_i , y_i 」は無関係になり、静定問題となって P_i が求まることを利用すると、以下に示すように S_{fi} が求まるので、 F に関する式が出る。

- 「 $(E_{i+1} - E_i)$, h_{i+1} , y_i 」は全ては直ちには求まらないが、 F が求まった後には $(E_{i+1} - E_i)$ は求まる。

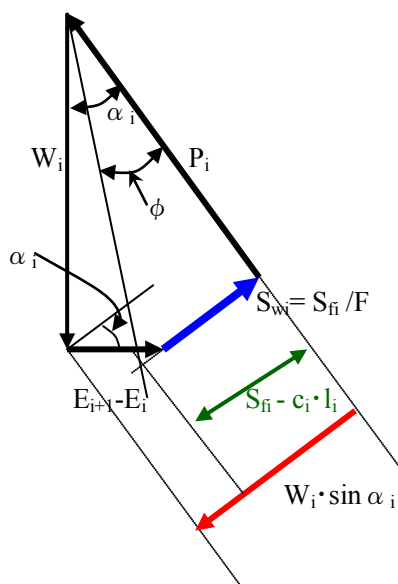


図 4 - 8

図 4-8 を参照して、

$$P_i \cdot \cos \alpha_i + S_{wi} \cdot \sin \alpha_i = W_i \quad (4-12)$$

$$\text{一方、} \quad S_{wi} = S_{fi}/F = (c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i)/F \quad (4-13)$$

(4-13)式を(4-12)式に代入すると、以下のように P_i が求まる。

$$P_i \cdot \cos \alpha_i + \{(c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i)/F\} \cdot \sin \alpha_i = W_i \quad (4-13a)$$

$$P_i \cdot \{\cos \alpha_i + (\sin \alpha_i \cdot \tan \phi_i)/F\} + (c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i)/F = W_i \quad (4-13b)$$

$$P_i \cdot \{1.0 + (\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i)/F\} \cos \alpha_i + (c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i)/F = W_i \quad (4-13b)$$

$$P_i = \frac{W_i - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{F}}{(1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F}) \cos \alpha_i} \quad (4-14)$$

(4-14)式を、

$$S_{fi} = \tau_{fi} \cdot l_i = c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i \quad (4-4b)$$

に代入すると、 S_{fi} が求まる。

$$S_{fi} = c_i \cdot l_i + \frac{(W_i - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{F}) \tan \phi_i}{(1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F}) \cos \alpha_i}$$

$$= \frac{c_i \cdot l_i \cdot \cos \alpha_i + c_i \cdot l_i \cdot \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F} \cdot \cos \alpha_i + W_i \cdot \tan \phi_i - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F}}{(1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F}) \cos \alpha_i} = \frac{W_i \cdot \tan \phi_i + c_i \cdot l_i \cdot \cos \alpha_i}{m_{ai}} \quad (4-15)$$

$$b_i = l_i \cdot \cos \alpha_i \text{ を用いて、} \quad S_{fi} = \frac{W_i \cdot \tan \phi_i + c_i \cdot b_i}{m_{ai}} \quad (4-16)$$

ここで、

$$m_{ai} = (1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F}) \cos \alpha_i \quad (4-17) \quad (11.4)$$

この式は、まだ求まっていない安全率 F を含んでいることに注意。

○従って、全体に対するモーメントの釣り合い式(4-1)は、Fellenius 法に対する式と同じく、外荷重 $Q=0$ の時、以下ようになる (x_i の定義が異なることに注意)。

図 4-6 を参照して、 $S_{wii} = W \cdot \sin \alpha_i - (E_{i+1} - E_i) \cdot \cos \alpha_i$ であるので、

$$F(\text{globl}) = \frac{M_r (\text{抵抗moment})}{M_a (\text{滑動moment})} = \frac{\sum (r \cdot S_{fi})}{\sum [r \cdot (W_i \cdot \sin \alpha_i)] - \sum [r \cdot \{(E_{i+1} - E_i) \cdot \cos \alpha_i\}]} \quad (4-18)$$

ここで、 $(E_i - E_{i+1})$ は unknowns であるが、 E_{i+1} と E_i は内力であるので、

$\sum [(E_i - E_{i+1}) \cos \alpha_i] = 0$ となる。従って、(4-16)式を用いて、

$$F(\text{global}) = \frac{\sum (r \cdot S_{fi})}{\sum (r \cdot W_i \cdot \sin \alpha_i)} = \frac{\sum (S_{fi})}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} = \frac{\sum (\frac{c_i \cdot b_i + W_i \cdot \tan \phi_i}{m_{ai}})}{\sum (W_i \cdot \sin \alpha_i)} \quad (4-19) \quad (11.5)$$

→次の $F(\text{global})$ の最小値を求める step に移ることができる。

(4-19)式での m_{ai} には、求まっていない安全率 F を含んでいるので、この式を満足する F が見つかるまで、繰り返し計算を行う必要があることに注意。

注意) (4-19)式を見ると、

$$S_{wi}=W_i \cdot \sin \alpha_i \quad (4-9)$$

のように、一見見える。しかし、図4-8を見ても分かるように、これは誤りである。この図では、

$$S_{wi} < W_i \cdot \sin \alpha_i \quad (4-20)$$

となっている。実際は、 S_{wi} は、 F が求まったあとで、

$$S_{wi} = S_{fi} / F = (c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i) / F \quad (4-11)$$

のようにして求めることが出来る。 P_i は、(4-14)式から求める。

■ Fellenius 法と Bishop 法（正しくは、Simplified Bishop 法）の比較は、後ほど行う。

Step 7

- 1) 円弧の半径 r を変化させて、それぞれの r に対して安全率 F の最小値を求める。
- 2) 上記の計算を、円弧の中心 O の座標を変える。
- 3) 1), 2)の計算を繰り返して、 F の最小値 $F_{\min}$ を探す。
- 4) 設計問題では、「 F の最小値 $F_{\min}$ 」 $\geq$ 「規定値(1.2 等)」であることを確認する。

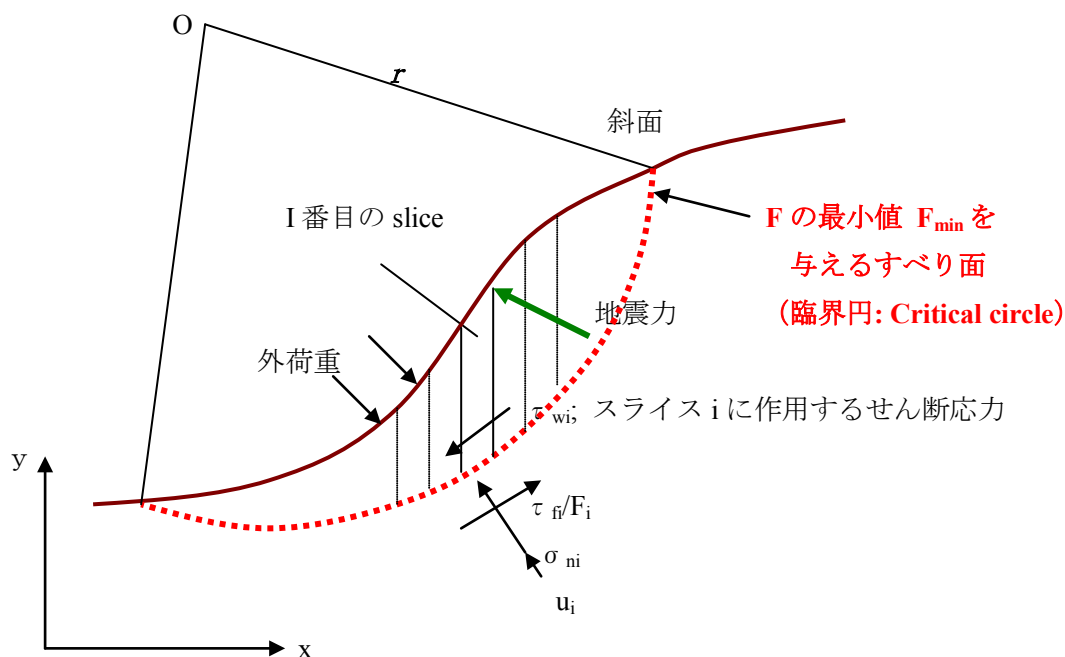


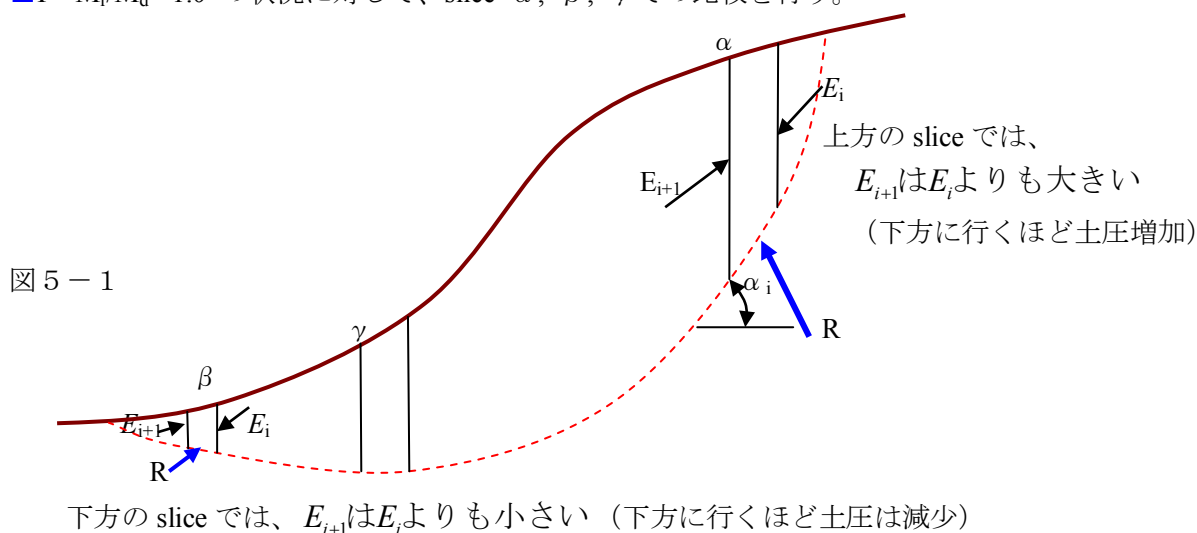
图 4-9

■教科書 280-281 頁に示してある計算例は、一つのすべり面に対するものだけ。

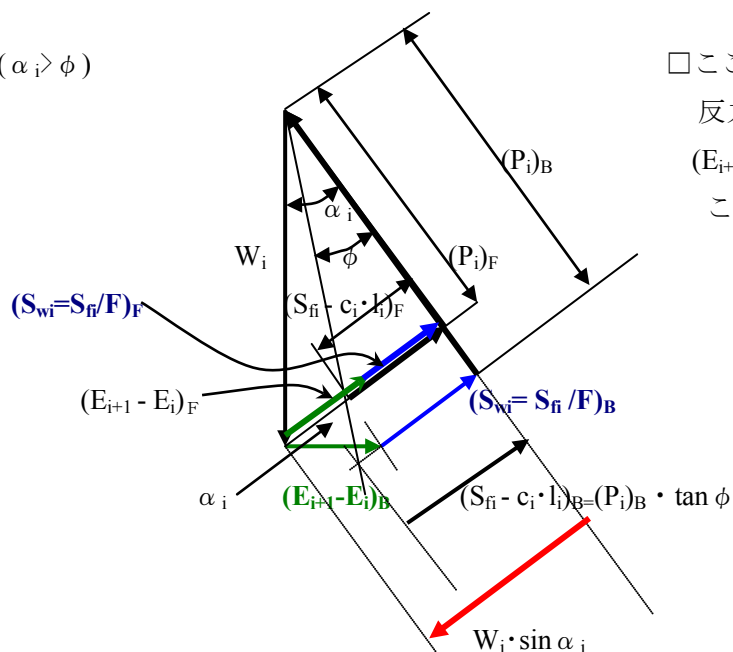
■ $F_{\min}$ を求める計算は、手計算では、死ぬ。

5. Fellenius 法と Simplified Bishop 法による安全率の比較

■ $F = M_r/M_d > 1.0$ の状況に対して、slice α, β, γ での比較を行う。



Slice α ($\alpha_i > \phi$)

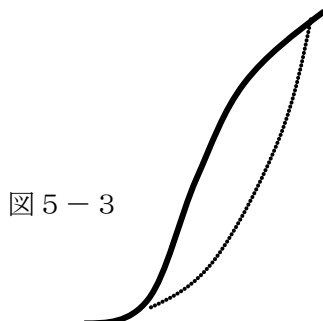


□ここでは、図 5-1 から
反力 R は左側を向いているので、
($E_{i+1}-E_i$)_B> 0.0 である
こと考えて作図してある。

图 5-2

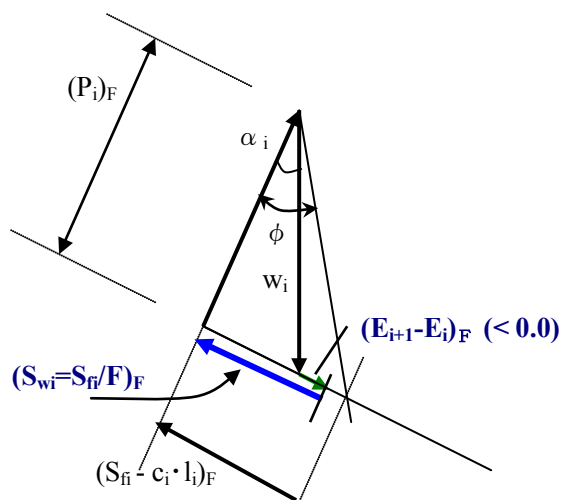
○明らかに、直応力 P_i とせん断強度 S_{fi} は、Fellenius 法による値の方が Simplified Bishop 法による値よりも小さい。

- a) α_i が大きくなるほど、両者の差は大きくなる。
- b) α_i が大きい slice が主である急斜面では、Fellenius 法は安全率 F を過小評価する。理由は、Fellenius 法の仮定「スライス間力 E_i と E_{i+1} は、ライスの底 ab の方向に平行」は妥当ではなく、実際のスライス間力 E_i と E_{i+1} は、その仮定よりも水平方向に近くなるためである。即ち、Fellenius 法と Simplified Bishop 法の仮定の間間方向になる。

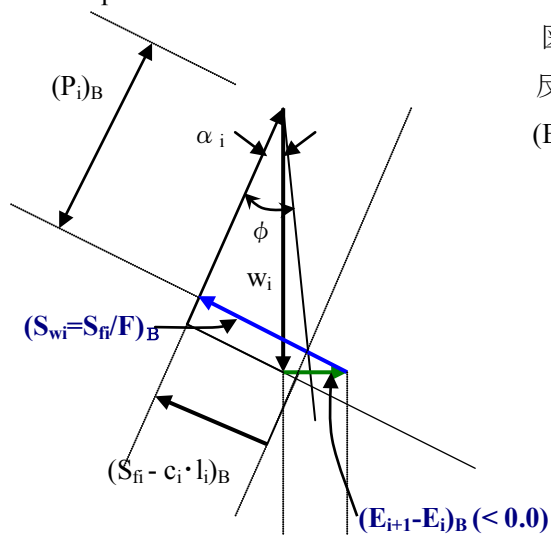


Slice β ($\alpha_i < \phi$)

Fellenius



Simplified Bishop



□ここでは、

図 5-1 から

反力 R は左側を向いているので、

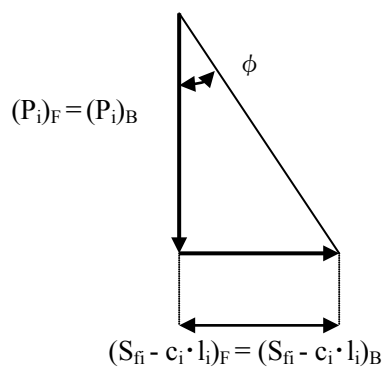
$(E_{i+1}-E_i)_B < 0.0$ である

ことを考えて作図してある。

■明らかに、直応力 P_i とせん断強度 S_{fi} は、Fellenius 法による値の方が Simplified Bishop 法による値よりも大きい。

Slice γ ($E_{i+1} = E_i$)

Fellenius と Simplified Bishop で、同一の力の多角形になる。



■全般的に見ると、斜面が急なほど、Fellenius が小さ目の F を与える傾向にある。

■安全側を見て、また計算の単純さから見て、Fellenius を使う傾向が強い。

$$\text{せん断強度;} \quad S_{fi} = (c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i) \quad (6-1)$$

$$\text{作用せん断力;} \quad S_{wi} = S_{fi} / F = (c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i) / F \quad (6-2)$$

(この段階では、安全率 F はまだ unknown である!)

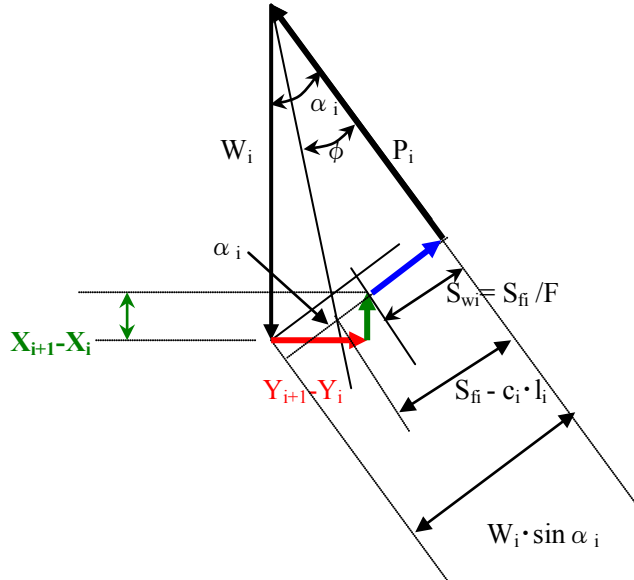


図 6 - 3

■ S_{wi} 方向の力の釣り合いを考える (この方向の力の釣り合いが最も精度が必要とされるから)。

$$S_{wi} + (Y_{i+1} - Y_i) \cdot \cos \alpha_i = \{W_i - (X_{i+1} - X_i)\} \cdot \sin \alpha_i \quad (6-3)$$

(6-2), (6-3)式から、

$$(Y_{i+1} - Y_i) = \{W_i - (X_{i+1} - X_i)\} \cdot \tan \alpha_i - \frac{\{c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i\} \cdot \sec \alpha_i}{F} \quad (6-4)$$

$\nwarrow$
 $S_{wi} \cdot \sec \alpha_i$

(6-4)式を全ての slice に適用すると、

$$\sum (Y_{i+1} - Y_i) = \sum [\{W_i - (X_{i+1} - X_i)\} \cdot \tan \alpha_i] - (1/F) \cdot \sum \{c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i\} \cdot \sec \alpha_i \quad (6-5)$$

Y_{i+1}, Y_i は、内力だから $\sum (Y_{i+1} - Y_i) = 0$ となる、したがって、

$$F(global) = \frac{\sum [(c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i) \sec \alpha_i]}{\sum [W_i - (X_{i+1} - X_i)] \cdot \tan \alpha_i} \quad (6-6)$$

ここで、 P_i と $(X_{i+1} - X_i)$ が不明であるので、まだ F は求まらない。

■ 次に、 P_i を求める。

鉛直方向の力の釣り合いを考える (Simplified Bishop と同じ)

$$P_i \cdot \cos \alpha_i + S_{wi} \cdot \sin \alpha_i = W_i - (X_{i+1} - X_i) \quad (6-7a)$$

$$S_{wi} = \frac{c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i}{F} \text{ であるので、(6-7a)式から}$$

$$P_i \cdot \cos \alpha_i + \frac{c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i}{F} \cdot \sin \alpha_i = W_i - (X_{i+1} - X_i)$$

$$P_i \cdot [\cos \alpha_i + \frac{\tan \phi_i}{F} \cdot \sin \alpha_i] = W_i - (X_{i+1} - X_i) - \frac{c_i \cdot l_i}{F} \cdot \sin \alpha_i \quad (6-7b)$$

を得る。

(6-2), (6-7b)式から、次式を得る。

$$P_i = \frac{W_i - (X_{i+1} - X_i) - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{F}}{m_{ai}} \quad (6-8)$$

$$m_{ai} = (1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F}) \cos \alpha_i \quad (4-17) \quad (11.4)$$

この式は、まだ求まっていない安全率 F と $(X_{i+1}-X_i)$ を含んでいることに注意。

■次に、 $(X_{i+1} - X_i)$ を求める。

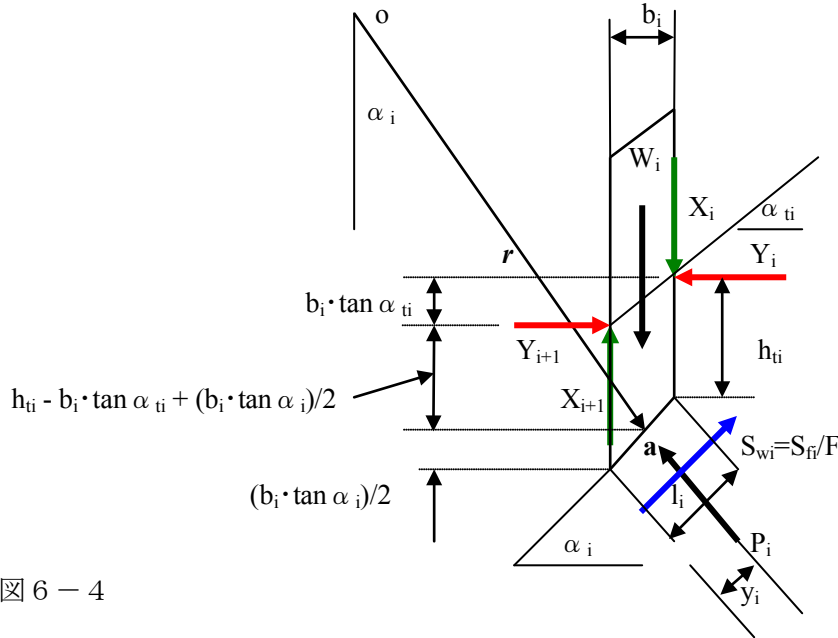


図 6 - 4

■スライスの底の中央点 a のまわりの moment を求めると、

$$Y_i \cdot \{h_{ti} + (b_i \cdot \tan \alpha_i) / 2\} - Y_{i+1} \cdot \{h_{ti} - b_i \cdot \tan \alpha_{ti} + (b_i \cdot \tan \alpha_i) / 2\} - (X_{i+1} + X_i) \cdot (b_i / 2) = 0 \quad (6-9a)$$

近似として、 $(X_{i+1} + X_i) \cdot (b_i / 2) = X_{i+1} \cdot b_i$ ；

$$(Y_i - Y_{i+1}) \cdot (b_i \cdot \tan \alpha_i) / 2 = 0 \quad \{ \text{この値は、} (X_{i+1} + X_i) \cdot (b_i / 2) = X_{i+1} \cdot b_i \text{ に比較すると、小さい} \}$$

を用いると、

$$Y_i \cdot h_{ti} - Y_{i+1} \cdot \{h_{ti} - b_i \cdot \tan \alpha_{ti}\} = X_{i+1} \cdot b_i \quad (6-9b)$$

$$X_{i+1} = Y_{i+1} \cdot \tan \alpha_{ti} - (Y_{i+1} - Y_i) \cdot (h_{ti} / b_i) \quad (6-10)$$

以上で解を求めるのに必要な全ての式を得たが、実際法は以下のように繰り返し計算が必要となる。

① $(X_{i+1} - X_i)_1 = 0$ を仮定。(6-6), (6-8)式から、

$$F_1 = \frac{\sum [(c_i \cdot l_i + (P_i)_1 \cdot \tan \phi_i) \sec \alpha_i]}{\sum [(W_i - (X_{i+1} - X_i)_1) \cdot \tan \alpha_i]} = \frac{\sum [(c_i \cdot l_i + (P_i)_1 \cdot \tan \phi_i) \sec \alpha_i]}{\sum [W_i \cdot \tan \alpha_i]} \quad (6-6)$$

$$(P_i)_1 = \frac{W_i - (X_{i+1} - X_i)_1 - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{F_1}}{m_{ai}} = \frac{W_i - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{F_1}}{m_{ai}} \quad (6-8)$$

$$m_{ai} = (1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F_1}) \cos \alpha_i \quad (4-17)$$

この三式を満足するような安全率 F_1 を繰返し計算により求める。

② (6-4)式から、 $(X_{i+1} - X_i)_1 = 0$, F_1 を用いて $(Y_{i+1} - Y_i)_2$ を求める。

$$\begin{aligned} (Y_{i+1} - Y_i)_2 &= \{W_i - (X_{i+1} - X_i)_1\} \cdot \tan \alpha_i - \{(c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i) \cdot \sec \alpha_i\} / F_1 \\ &= W_i \cdot \tan \alpha_i - \{(c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i) \cdot \sec \alpha_i\} / F_1 \end{aligned} \quad (6-4)$$

次に、このようにして求めた $(Y_{i+1} - Y_i)_2$ から、 $(Y_1)_2 = 0$ を用いて、 $(Y_i)_2$ ($i = 1 - n$) を求める。

次に、 $(Y_{i+1})_2, (Y_i)_2$ を (6-10)式に代入して、 $(X_{i+1})_2, (X_i)_2$ を求める。

$$(X_{i+1})_2 = (Y_i)_2 \cdot \tan \alpha_i - \{(Y_{i+1})_2 - (Y_i)_2\} \cdot (h_u / b_i) \quad (6-10)$$

次に、 $(X_{i+1} - X_i)_2$ から、 $(X_1)_2 = 0$ を用いて、 $(X_i)_2$ ($i = 1 - n$) を求める。

③ F_1 に対する $(Y_{i+1} - Y_i)_2$ と $(X_{i+1} - X_i)_2$ を用いて、(6-8)式から $(P_i)_2$ を求める。

$$(P_i)_2 = \frac{W_i - (X_{i+1} - X_i)_2 - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{F_1}}{m_{ai}} \quad (6-8)$$

$$m_{ai} = (1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F_1}) \cos \alpha_i \quad (4-17)$$

次に、 $(P_i)_2$ と (6-6)式から、 F_2 を求める。

$$F_2 = \frac{\sum [(c_i \cdot l_i + (P_i)_2 \cdot \tan \phi_i) \sec \alpha_i]}{\sum [(W_i - (X_{i+1} - X_i)_2) \cdot \tan \alpha_i]} \quad (6-6)$$

- ④ 常に、 X_i を one iteration 遅らせて、次のように F_k から F_{k+1} を求め、両者が殆ど一致するまで、繰り返す

$$(Y_{i+1}-Y_i)_{k+1} = \{W_i - (X_{i+1}-X_i)_k\} \cdot \tan \alpha_i - \{c_i \cdot l_i + P_i \cdot \tan \phi_i\} \cdot \sec \alpha_i / F_k \quad (6-4)$$

次に、 $(Y_{i+1}-Y_i)_{k+1}$ から、 $(Y_1)_{k+1}=0$ を用いて、 $(Y_i)_{k+1}$ ($i=0-n$)を求める。

$(X_{i+1})_{k+1}$, $(X_i)_{k+1}$ を、 $(Y_{i+1})_{k+1}$, $(Y_i)_{k+1}$ を (6-10)式に代入して求める。

$$(X_{i+1})_{k+1} = (Y_i)_{k+1} \cdot \tan \alpha_i - \{(Y_{i+1})_{k+1} - (Y_i)_{k+1}\} \cdot (h_{ti}/b_i) \quad (6-10)$$

次に、 $(X_{i+1}-X_i)_{k+1}$ から、 $(X_1)_{k+1}=0$ を用いて、 $(X_i)_{k+1}$ ($i=0-n$)を求める。

F_k に対する $(Y_{i+1}-Y_i)_{k+1}$ と $(X_{i+1}-X_i)_{k+1}$ を用いて、(6-8)式から $(P_i)_{k+1}$ を求める。

$$(P_i)_{k+1} = \frac{W_i - (X_{i+1} - X_i)_{k+1} - \frac{c_i \cdot l_i \cdot \sin \alpha_i}{F_k}}{m_{\alpha i}} \quad (6-8)$$

$$m_{\alpha i} = (1.0 + \frac{\tan \alpha_i \cdot \tan \phi_i}{F_k}) \cos \alpha_i \quad (4-17)$$

次に、 $(P_i)_{k+1}$ と (6-6)式から、 F_{k+1} を求める。

$$F_{k+1} = \frac{\sum [(c_i \cdot l_i + (P_i)_{k+1} \cdot \tan \phi_i) \sec \alpha_i]}{\sum [(W_i - (X_{i+1} - X_i)_{k+1}) \cdot \tan \alpha_i]} \quad (6-6)$$