

10 土構造物の設計－ 1 (斜面安定)

10.1 自然斜面と人工斜面

- 自然斜面の大規模崩壊は、ある層理面（地層の境界面）に沿って滑ることによって発生することが多い
 - － 地形の成り立ちやその中をどのように水が流れているのかを把握することが重要
 - － 後期の「地盤調査・施工学」で、地盤の地質的捉え方を学ぶ
- 比較的若い地盤に対しては、地盤工学的考え方が有効
 - － 沿岸域の軟弱地盤や崩積土，人工地盤での盛土や掘削・切土
 - － 本講義では，こちらを主に対象とする

10.2 設計で想定すべき条件

- 地盤の幾何学形状の変化に加え，これにより地盤内の水位・水の流れも変化する → 土構造物の安定性を左右
- 盛土（道路面等を確保するために，地盤上に土を盛る．恒久的）
 - 多くの場合，盛土構築中・直後がもっとも不安定で，その後，安定化（短期安定問題）
 - ただし，長期的な変形・沈下は重要
 - 盛土内の水の制御は，切土・掘削に比して容易だが，崩壊の原因の多くは排水機能不足等であり，きわめて重要

設計で想定すべき条件（続き）

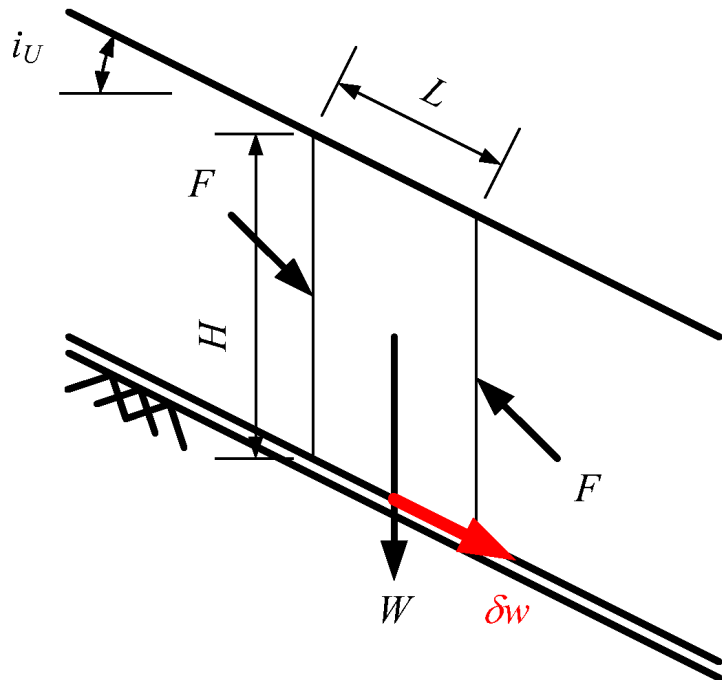
- 切土（道路面等を確保するために、地盤を掘削．恒久的）
 - － 掘削中・直後は安定なことが多いが、負の過剰間隙水圧消散に伴い不安定化（長期安定問題＋短期も）
 - － 地盤の幾何学形状の変化に伴う水位・水の流れの変化大
- 掘削（何かを建設するために地盤を掘って、その後（構造物と共に）埋め戻し）
 - － （どうせ埋め戻すので）経済的理由から、掘削面は急勾配
若しくは、最低限の土留め（本体利用する場合を除く）
 - － 通常、一時的な除荷の問題であるため、短期安定問題
 - － 採掘場などでは、長期安定も問題となる（切土に近い）
- その他（水位変化によるダムของ安定性の変化等）

10.3 無限斜面の安定性

- ここでは、最も簡単な無限斜面の問題をまず解くことを考える
一流れ盤の自然斜面崩壊，土構造物や崩積土の表層崩壊に相当
- 非排水 ($c_u, \phi_u = 0$)，及び，排水 ($c' = 0, \phi'$) 条件に対して
極限解析（上界法・下界法）により斜面の崩壊角を求める
- 極限平衡法により，地下水の浸透がある場合についても検討

10.3.1 浸透流がない場合の無限斜面の安定性

非排水条件に対する上界値



斜面方向に長さ L の領域を考えると,

$$W = \rho g H L \cos i_U.$$

外部仕事率は

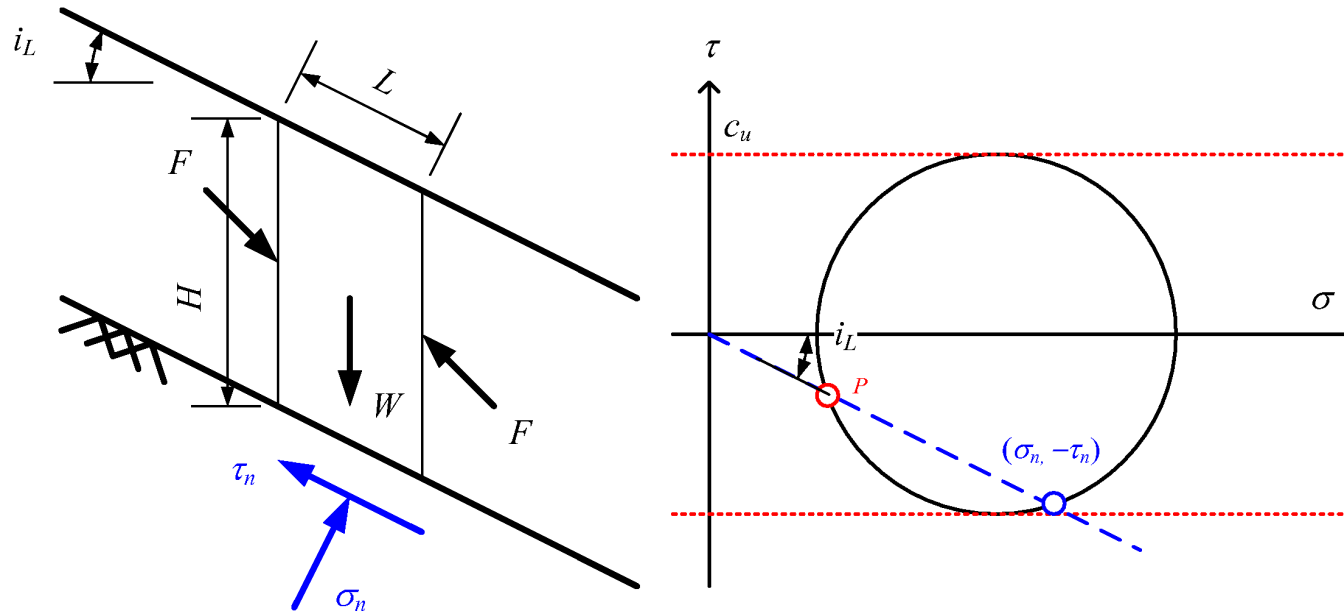
$$\delta W_{\text{ext}} = W \delta w \sin i_U = \frac{1}{2} \rho g H L \delta w \sin 2i_U,$$

内部消散率は $\delta W_{\text{int}} = c_u L \delta w$ なので,

$$\delta W_{\text{ext}} = \delta W_{\text{int}} \text{ より,}$$

$$i_U = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2c_u}{\rho g H} \right).$$

非排水条件に対する下界値



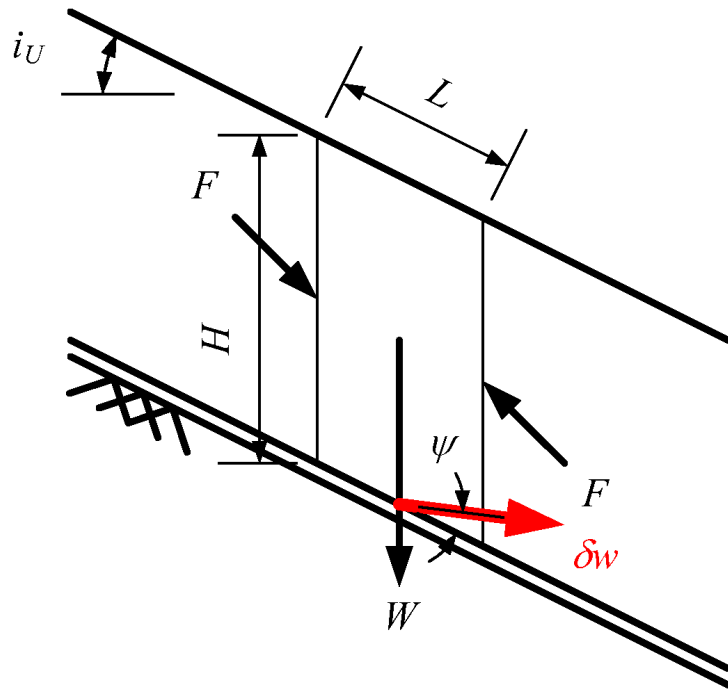
斜面に直交，及び，平行な方向の応力 (σ_n, τ_n) は，

$$\sigma_n = \frac{W}{L} \cos i_L = \rho g H \cos^2 i_L \quad \tau_n = \frac{W}{L} \sin i_L = \rho g H \sin i_L \cos i_L.$$

斜面の崩壊角の下界値を最大にすると， $\tan i_L = \frac{\tau_n}{\sigma_n} = \frac{c_u}{\rho g H \cos^2 i_L}.$

$$i_L = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2c_u}{\rho g H} \right) = i_U \text{ となり，正解}$$

排水条件に対する上界値



ここでは，浸透流がない場合を想定
斜面方向に長さ L の領域を考えると，

$$W' = \rho' g H L \cos i_U.$$

外部仕事率は，

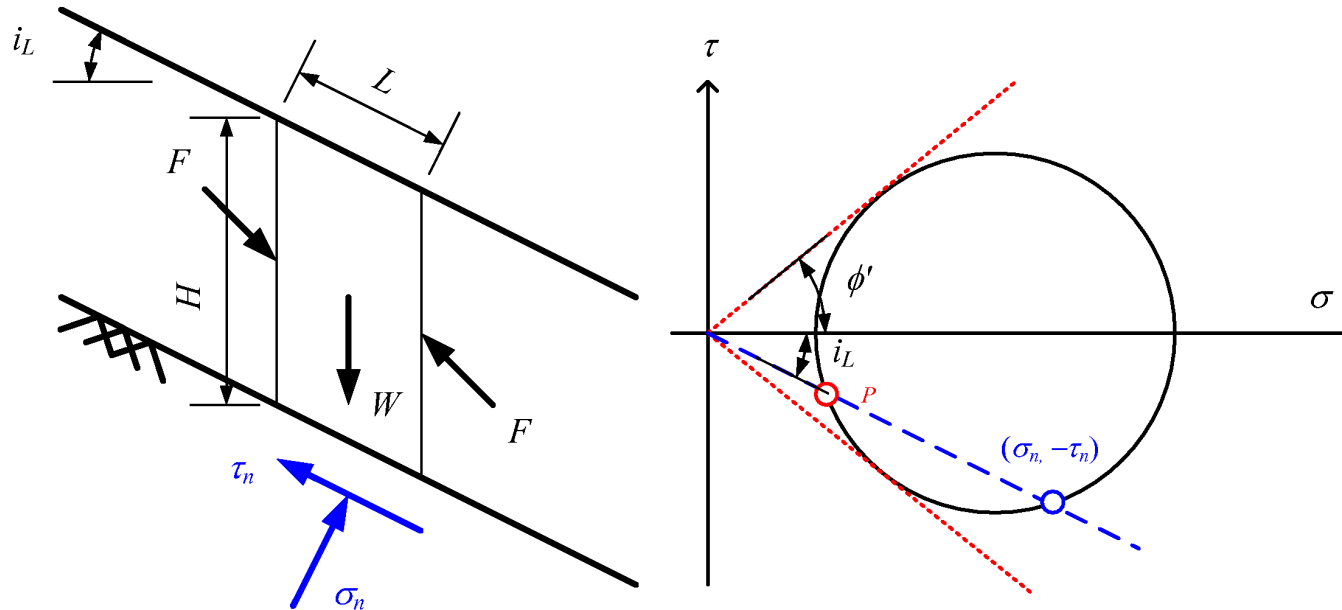
$$\delta W_{\text{ext}} = W' \frac{\delta w}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - i_U + \psi\right)} = W' \frac{\delta w}{\sin(i_U - \psi)}$$

内部消散率は $\delta W_{\text{int}} = 0$ なので，

$$\delta W_{\text{ext}} = \delta W_{\text{int}} \text{ より, } W' \frac{\delta w}{\sin(i_U - \psi)} = 0$$

$W' \neq 0$ で， $\frac{\delta w}{\sin(i_U - \phi')}$ は土塊の鉛直変位速度を表し，
これが 0 でなければならない $\iff i_U = \psi = \phi'$.

排水条件に対する下界値



斜面に直交，及び，平行な方向の応力 (σ_n, τ_n) は，

$$\sigma_n = \frac{W}{L} \cos i_L = \rho g H \cos^2 i_L \quad \tau_n = \frac{W}{L} \sin i_L = \rho g H \sin i_L \cos i_L.$$

斜面の崩壊角の下界値を最大にすると， $\tan i_L = \frac{\tau_n}{\sigma_n} = \tan \phi'$.

$i_L = \phi' = i_U$ となり，正解

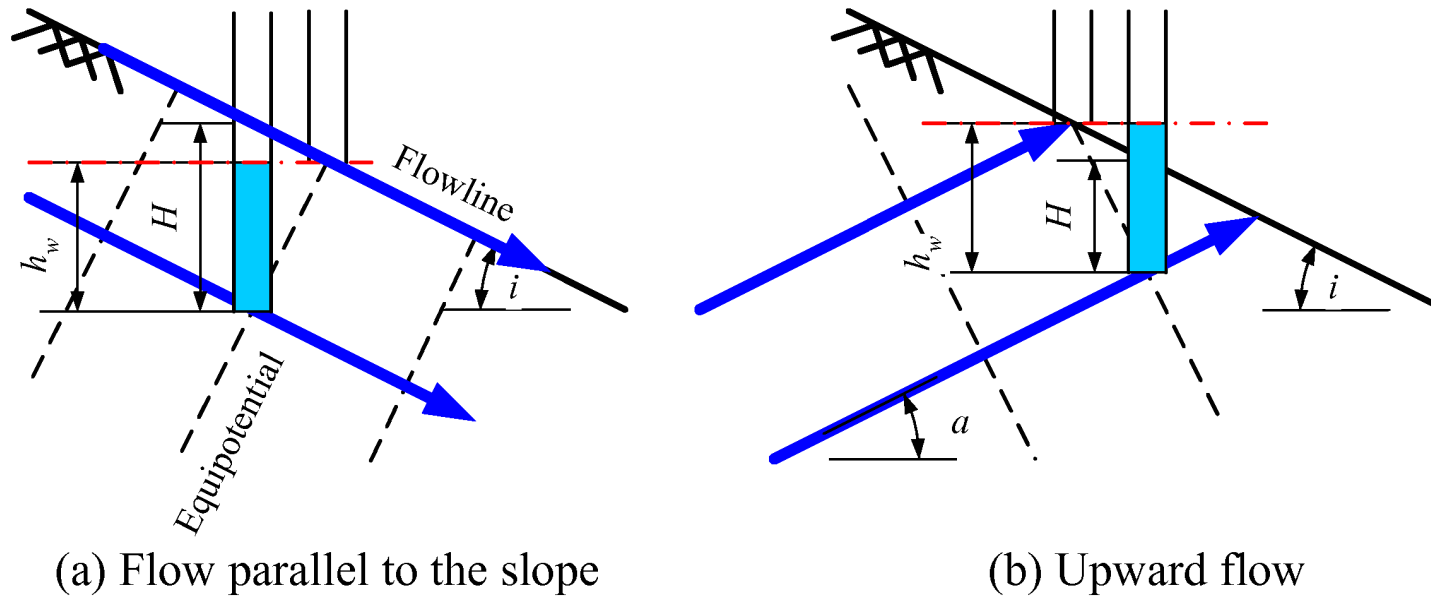
排水・非排水条件下における無限斜面崩壊角度と安全率

- これまでに示した排水*・非排水条件下における無限斜面の崩壊角度と安全率を整理
- 崩壊角度：
 - 排水条件： $i_c = \phi'$ （乾燥砂山の安息角が ϕ' に近いことと同じ）
 - 非排水条件： $i_c = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{2c_u}{\rho g H} \right) \quad \frac{\rho g H}{c_u} = \frac{2}{\sin 2i_c} \geq 2$
- 安全率 $\left(F_S = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \right. \text{と定義} \left. \right)$ ：
 - 排水条件： $F_S = \frac{\tan \phi'}{\tan i}$
 - 非排水条件： $F_S = \frac{c_u}{\rho g H \sin i \cos i} = \frac{2c_u}{\rho g H \sin 2i}$

*浸透流がない場合

10.3.2 浸透流がある場合の無限斜面の安定性

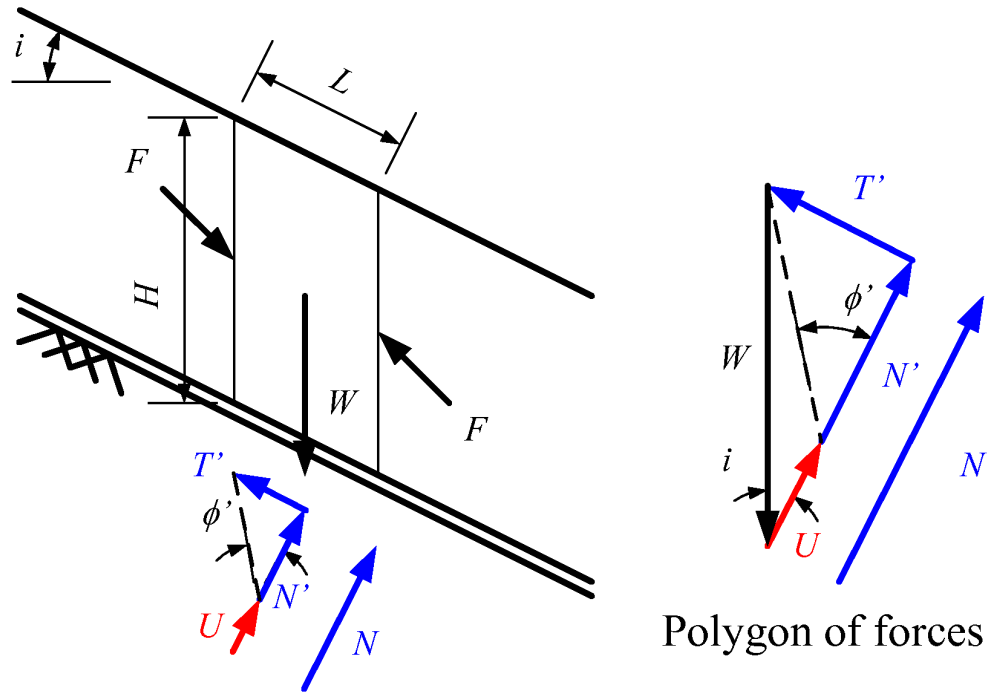
浸透流による地盤内の間隙水圧



地表面のスタンドパイプの根元の位置水頭を基準 (0) とすれば、
深さ H の位置での圧力水頭 $h_w = \frac{u}{\rho_w g}$ は以下の通り：

$$(a) h_w = H \cos^2 i \quad (b) h_w = \frac{H}{1 - \tan i \tan \alpha} \quad ((a) \text{ の場合も当然含む})$$

極限平衡法による安定計算



滑り面での全鉛直抗力を N ,
 間隙水圧合力を U ,
 有効鉛直抗力を N' とすれば,
 $T' = N \tan i = (N - U) \tan \phi'$

$$\tan i = \tan \phi' \left(1 - \frac{U}{N} \right) = \tan \phi' \left(1 - \frac{u}{\rho g H \cos^2 i} \right)$$

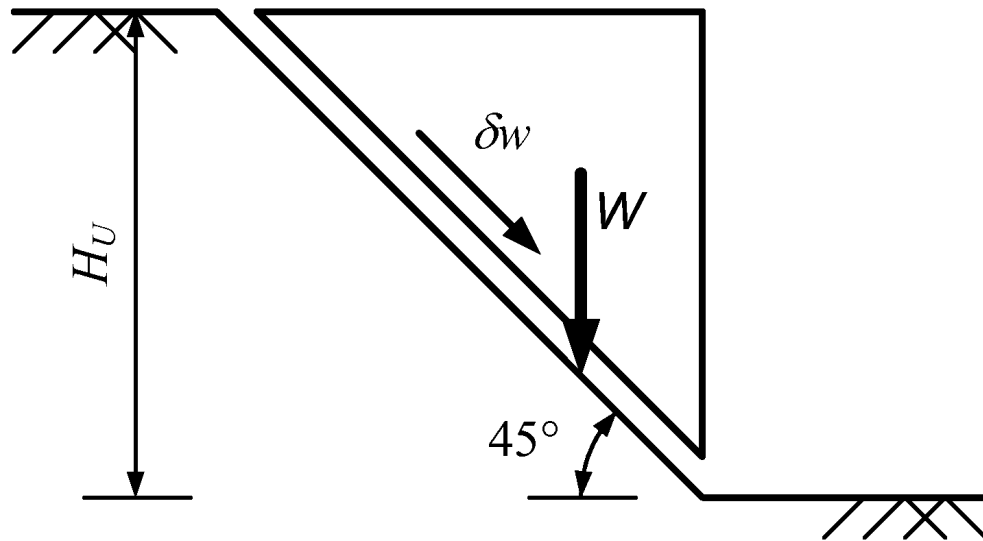
例えば地表面に地下水面があり，斜面と平行な浸透流があるとき

$$u = \rho_w g h_w = \rho_w g H \cos^2 i \text{ より, } \tan i = \tan \phi' \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho} \right) \quad \left(i \approx \frac{1}{2} \phi' \right)$$

10.4 鉛直斜面の限界高さ

- ここでは、鉛直斜面の限界高さを求めることを考える
一素掘り（土留めなし）により掘削可能な溝の深さに相当
- 排水条件 ($c' = 0, \phi'$) では鉛直斜面は自立し得ないため、
非排水条件 ($c_u, \phi_u = 0$) に対して、極限解析（上界法・下界法）
により鉛直斜面の限界高さを求める

上界法による鉛直斜面の限界高さ算定



土塊の重量は, $W = \frac{1}{2}\rho g H_U^2$.

外部仕事率は

$$\delta W_{\text{ext}} = W \frac{\delta w}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2\sqrt{2}}\rho g H_U^2 \delta w.$$

内部消散率は

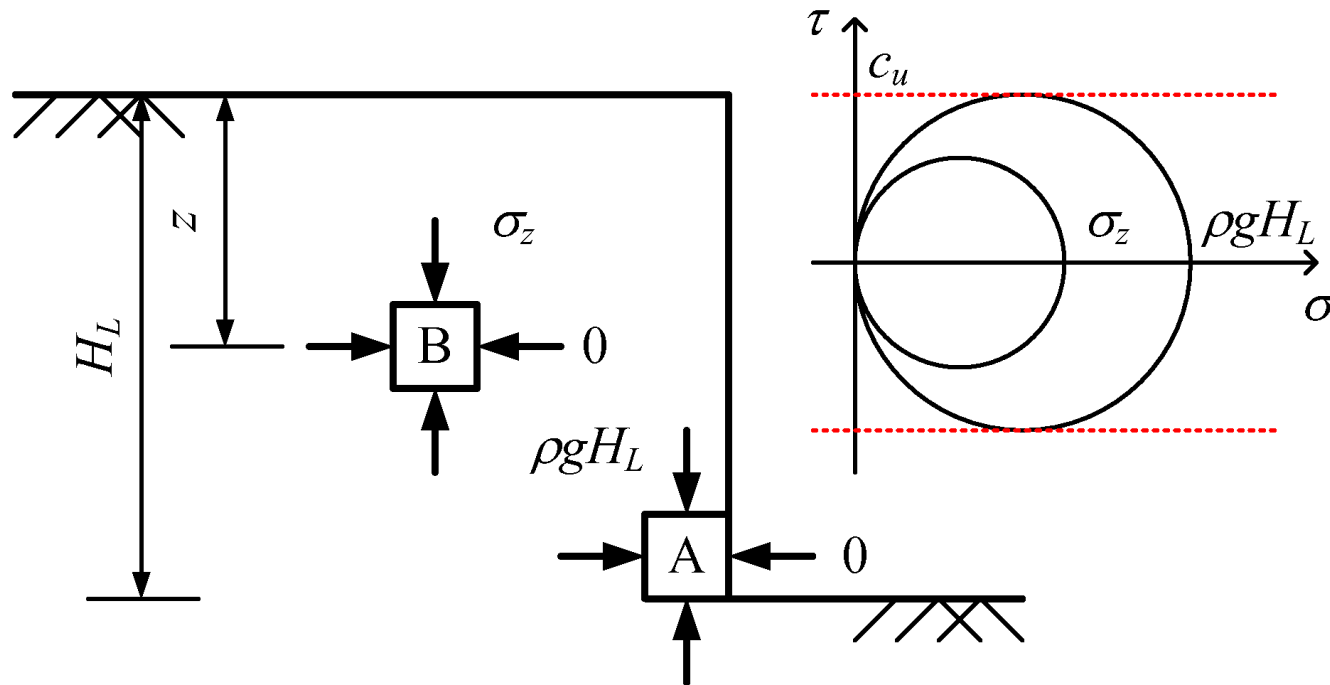
$$\delta W_{\text{int}} = c_u \sqrt{2} H_U \delta w \text{ なので,}$$

$$\delta W_{\text{ext}} = \delta W_{\text{int}} \text{ より, } H_U = \frac{4c_u}{\rho g}.$$

$$\text{安定係数 } N_s = \frac{\rho g H}{c_u / F_s} \quad \text{安定数 } N'_s = \frac{1}{N_s} = \frac{c_u / F_s}{\rho g H}$$

この問題では, $F_s = 1$ なら, $N_s = 4$

下界法による鉛直斜面の限界高さ算定



$\rho g H_L = 2c_u$ より, $H_L = \frac{2c_u}{\rho g}$. 従って正解の範囲は, $\frac{2c_u}{\rho g} \leq H_c \leq \frac{4c_u}{\rho g}$.
 (他の方法によって求められた) 正解は上界値に近く, $H_c \approx \frac{3.8c_u}{\rho g}$.