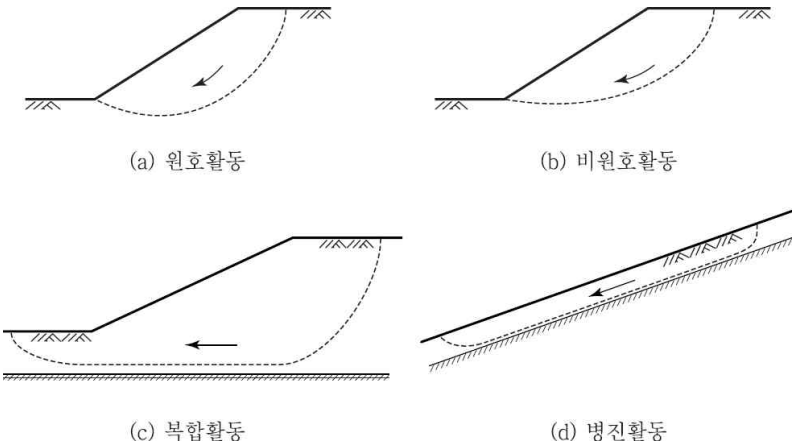
13장 사면 안정

사면의 파괴형태

1. 원호활동 2. 비원호활동 3. 복합(블럭)활동 4. 병진활동(무한사면)



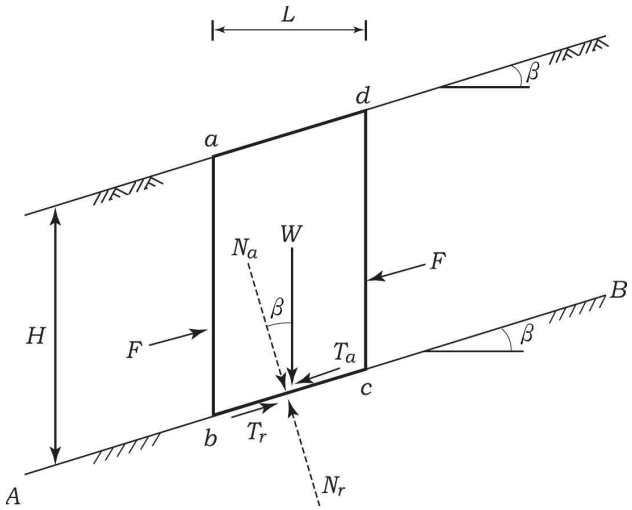
(a) 원호활동 (b) 비원호활동

(c) 복합활동 (d) 병진활동

안전율정의: $F_s = \dfrac{M_r}{M_d}$ (모메트 평형조건) or $F_s = \dfrac{F_f}{F_d} = \dfrac{\tau_f}{\tau_d}$ (힘평형 조건)

무한사면의 안전율

(1) 침투가 없는 경우



$W = (abcd\text{의 체적}) \times \gamma = (L \times H \times 1) \times \gamma = \gamma LH$

$N_a = W\cos\beta = \gamma LH\cos\beta$

$T_a = W\sin\beta = \gamma LH\sin\beta$

$\sigma_d = \dfrac{N_r}{\text{면적}} = \dfrac{\gamma LH\cos\beta}{\dfrac{L}{\cos\beta}\times 1} = \gamma H\cos^2\beta$; 활동 수직응력

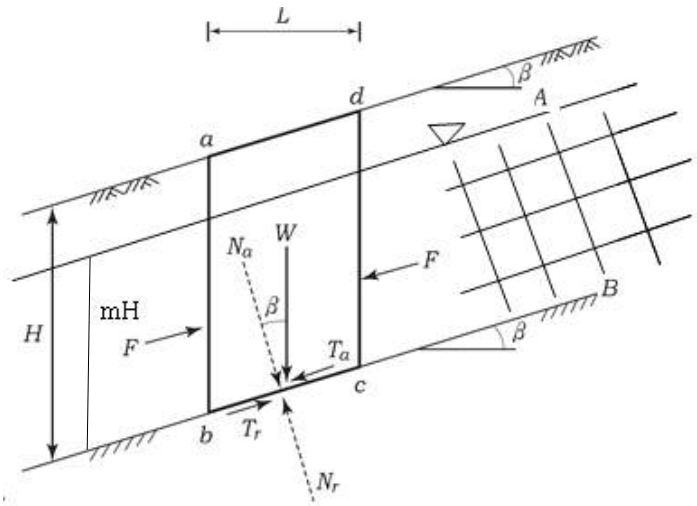
$\tau_d = \dfrac{T_r}{\text{면적}} = \dfrac{\gamma LH\sin\beta}{\dfrac{L}{\cos\beta}\times 1} = \gamma H\sin\beta\cos\beta$; 활동 전단응력

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c + \sigma_d \tan\phi}{\gamma H \sin\beta\cos\beta} = \frac{c + \gamma H\cos^2\beta \tan\phi}{\gamma H \sin\beta\cos\beta}$$

조립토(사질토)경우 $c = 0$ 이므로 $F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\beta}$ if $F_s = 1$이면 $\phi = \beta$(안식각)

(2) 침투가 있는 무한사면의 안정해석

절편 $abcd$의 중량 W은 다음과 같다.



$$W = \gamma(1-m)HL + \gamma_{sat} m HL = [\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]HL$$

$$N_r = W\cos\beta = [\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]HL\cos\beta$$
$$T_r = W\sin\beta = [\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]HL\sin\beta$$

여기서, AB면에 평행한 성분 T_r는 활동을 일으킬려는 힘이다.

$$\sigma_d = \frac{N_r}{\text{면적}} = \frac{[\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]HL\cos\beta}{\frac{L}{\cos\beta}\times 1} = [\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]H\cos^2\beta$$

$$\tau_d = \frac{T_r}{\text{면적}} = \frac{[\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]HL\sin\beta}{\frac{L}{\cos\beta}\times 1} = [\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]H\cos\beta\sin\beta$$

여기서 τ_d는 절편의 저면에서 활동을 일으킬려는 전단응력이다.

간극수압은 유선망에서 구한다; $h_{t(A)} = h_{e(A)} + h_{p(A)} = h_{e(A)} + 0 = h_{e(B)} + h_{p(B)} = h_{t(B)}$에서

$h_{p(B)} = h_{e(A)} - h_{e(B)} = mH\cos^2\beta$ 따라서 $u = \gamma_w h_{p(B)} = \gamma_w m H\cos^2\beta$

$$\tau_f = c + \sigma' \tan\phi = c + (\sigma - u)\tan\phi$$

$$= c + [\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m]H\cos^2\beta - \gamma_w m H\cos^2\beta)\tan\phi$$

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} = \frac{c + [\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m] H\cos^2\beta - \gamma_w m H\cos^2\beta) \tan\phi}{[\gamma(1-m) + \gamma_{sat} m] H\cos\beta\sin\beta}$$

지하수위가 지표면과 일치할 경우에는 $m = 1$ 이므로 다음식과 같이 된다.

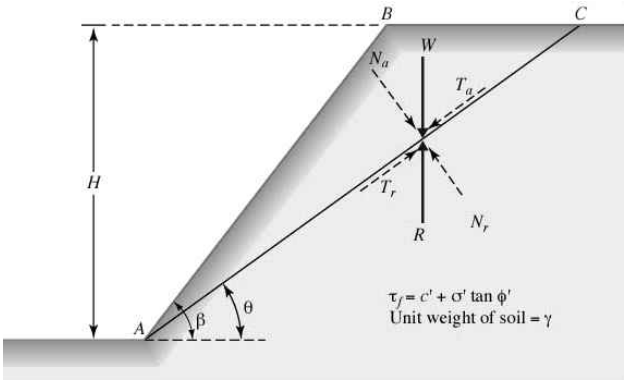
$$F_s = \frac{c + (\gamma_{sat} H\cos^2\beta - \gamma_w H\cos^2\beta)\tan\phi}{\gamma_{sat} H\cos\beta\sin\beta} = \frac{c + \gamma' H\cos^2\beta\tan\phi}{\gamma_{sat} H\cos\beta\sin\beta}$$

조립토(사질토)에서는 $c = 0$ 이므로 안전율은 다음과 같이 매우 간단하게 표현된다.

$$F_s = \frac{\gamma'}{\gamma_{sat}} \frac{\tan\phi}{\tan\beta} \simeq \frac{1}{2} \frac{\tan\phi}{\tan\beta}$$; 즉 포화되면 안전율은 반감된다.

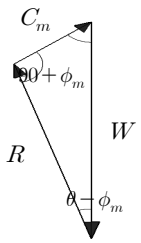
3 유한사면의 안정해석

$$W = \frac{1}{2}(H)(\overline{BC})(1) \times \gamma = \frac{1}{2} H(H\cot\theta - H\cot\beta)\gamma$$
$$= \frac{1}{2}\gamma H^2(\cot\theta - \cot\beta) = \frac{1}{2}\gamma H^2 \frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}$$



$$N_r = W\cos\theta = \frac{1}{2}\gamma H^2 \frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}\cos\theta$$
$$T_r = W\sin\theta = \frac{1}{2}\gamma H^2 \frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}\sin\theta$$

옆 그림의 힘다각형에서 $\frac{c_m L}{\sin(\theta-\phi_m)} = \frac{W}{\sin(90+\phi_m)}$ (사인법칙 적용)



$$N_s(\text{안정수}) = \frac{c_m}{\gamma H} = \frac{1}{2}\gamma L \frac{H}{\sin\beta} sin(\beta-\theta) \frac{\sin(\theta-\phi_m)}{\cos\phi_m}$$

임의의 파괴면을 찾기 위해서는 윗식에서 변수인 θ를 알아야 하고, 최적화이론에 의하여 다음과 같이 미분을 적용하여 구할 수 있다.

$$\frac{\partial N_s}{\partial\theta} = 0 \rightarrow \sin(2\theta - \beta - \phi_m) = 0 \rightarrow \theta_{cr} = \frac{\beta + \phi_m}{2}$$

$$\sigma = \frac{N_r}{\overline{AC} \times 1} = \frac{N_r}{\frac{H}{\sin\theta}} = \frac{1}{2}\gamma H \frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}\cos\theta\sin\theta$$

$$\tau = \frac{T_r}{\overline{AC} \times 1} = \frac{T_r}{\frac{H}{\sin\theta}} = \frac{1}{2}\gamma H \frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}\sin^2\theta$$

$$\tau_f = c + \sigma\tan\phi = c + \frac{1}{2}\gamma H \frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}\cos\theta\sin\theta\tan\phi$$

전단응력과 전단강도가 같다고 가정하면 다음과 같이 된다($\tau=\tau_f$).

$$\frac{1}{2}\gamma H\frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}\sin^2\theta = c+\frac{1}{2}\gamma H\frac{\sin(\beta-\theta)}{\sin\beta\sin\theta}\cos\theta\sin\theta\ \tan\phi \qquad c=\frac{1}{2}\gamma H\frac{\sin(\beta-\theta)\ (\sin\theta-\cos\theta\tan\phi)}{\sin\beta}$$

$\theta=\theta_{cr}$ 을 위식에 대입하면, c 는 다음과 같이 된다. $$c=\frac{\gamma H}{4}\frac{1-\cos(\beta-\phi)}{\sin\beta\cos\phi}$$

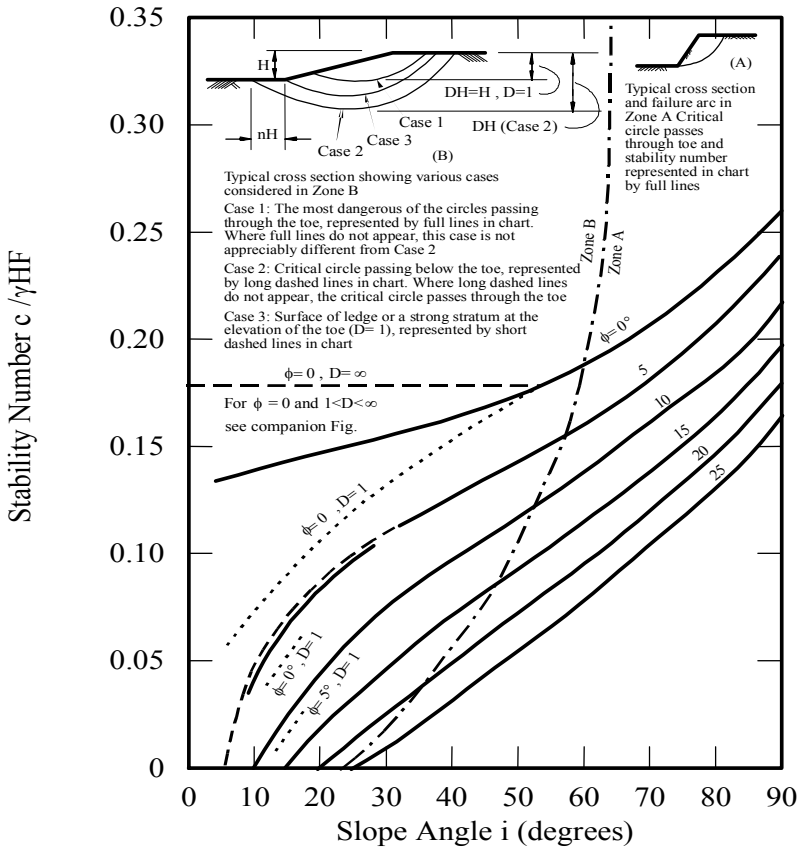
위식에서 임계 평형상태를 이루는 사면의 최대높이는 다음과 같이 구해진다.

$$H_{cr}=\frac{4c}{\gamma}\frac{\sin\beta\cos\phi}{1-\cos(\beta-\phi)}$$ β=90° 인 직립사면의 최대높이를 구하면 다음과 같다.

$$H_{cr}=\frac{4c}{\gamma}\tan\left(45+\frac{\phi}{2}\right)=\frac{4c}{\gamma}\sqrt{K_p}$$

Taylor 도표법

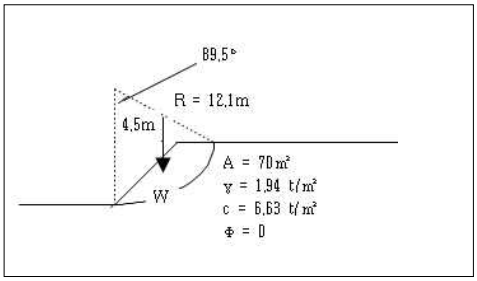
안정수 $$N_s=\frac{c_u}{\gamma HF_s}$$ 를 이용하여 사면안정율 계산



3. 해석법

- 일체법

$$F_s = \frac{c_u L_a r}{W_1 l_1} \quad (L_a : \text{호의길이})$$



ex) 그림에서 활동에 대한 안전율은?

sol) 호의길이(L_a) = $R\theta = 12.1 \times 2\pi \frac{89.5°}{360°} = 18.9m$

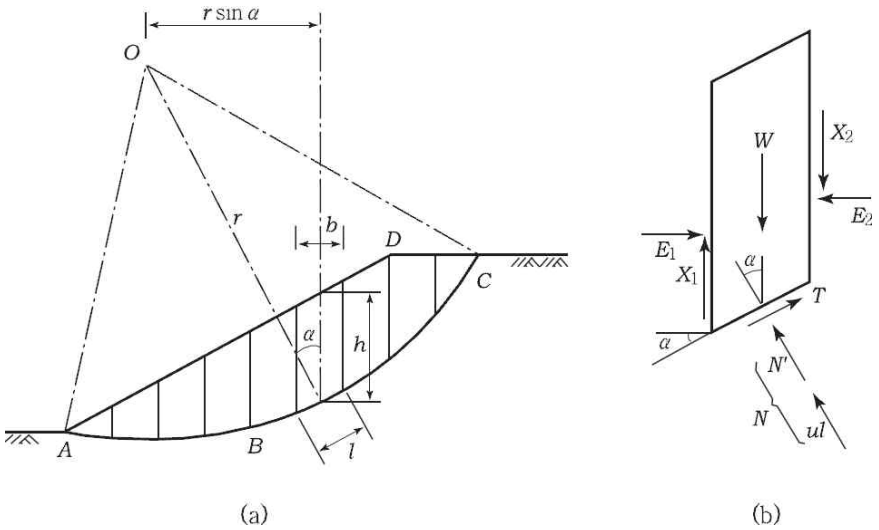
활동면 내의 무게 $W = A \times \gamma \times 1 = 70 \times 1.94 \times 1 = 135.8t/m$

$\therefore$ 안전율 $F_s = \frac{M_R}{M_D} = \frac{cL_aR}{Wx} = \frac{6.63 \times 18.9 \times 12.1}{135.8 \times 4.5} = 2.48$

- 절편법(분할법)

절편법 : 예상 파괴사면을 여러개의 절편으로 나누어 사면의 안전율을 구하는 방법

1. Felleunius (스웨덴 방법) : 절편력을 전부 무시, 과소평가
2. Bishop의 간편법: 절편의 연직방향력만 무시, 보다 정밀



$M_d = \Sigma\, Wr \sin\alpha$ (11.84)

$M_r = \Sigma\,(c' + \sigma' \tan\phi')\, lr$ (11.85)

$$F_s = \frac{M_r}{M_d} = \frac{\Sigma\,(c' + \sigma' \tan\phi')\, l}{\Sigma\, W \sin\alpha} = \frac{\Sigma\,(c' l + N' \tan\phi')}{\Sigma\, W \sin\alpha}$$; 사면의 안전율

이 식에서 N'을 결정하기 위해서는 가정을 하여야만 구할 수 있다. 따라서 절편법으로 구한 안전율은 정해(正解)가 아님을 알아야 한다.

(1) Fellenius 방법

가정: $X_1 - X_2 = 0$, $E_1 - E_2 = 0$

$N' = W\cos\alpha - ul$ N′값을 안전율공식에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$F_s = \frac{\Sigma\,(c'l + N'\tan\phi')}{\Sigma\, W\sin\alpha} = \frac{\Sigma\, c'l + (W\cos\alpha - ul)\tan\phi'}{\Sigma\, W\sin\alpha}$$

(2) Bishop의 간편법

가정: $X_1 - X_2 = 0$

$$T = \frac{1}{F_s}(c' + N'\tan\phi')$$

연직방향의 합력을 구하면

$$W = N'\cos\alpha + ul\cos\alpha + T\sin\alpha$$

$$= N'\cos\alpha + ul\cos\alpha + \frac{c'l}{F_s} + \frac{N'}{F_s}\tan\phi'\sin\alpha$$

위의 식을 정리하여 N'을 구하면 다음과 같다.

$$N' = \frac{W - \frac{c'l}{F_s}\sin\alpha - ul\cos\alpha}{\cos\alpha + \frac{\tan\phi'\sin\alpha}{F_s}}$$

그리고, $l = b\sec\alpha$

N'을 안전율공식에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$F_s = \frac{\Sigma(c'l + N'\tan\phi')}{\Sigma\, W\sin\alpha} = \frac{\Sigma\, c'b + (W - ub)\tan\phi'}{\Sigma\, W\sin\alpha}\left[\frac{\sec\alpha}{1 + \frac{\tan\alpha\tan\phi'}{F_s}}\right]$$

$$= \frac{\Sigma\, c'b + (W - ub)\tan\phi'/m_\alpha}{\Sigma\, W\sin\alpha} \quad \text{여기서} \quad m_\alpha = \cos\alpha\left(1 + \frac{\tan\alpha\,\tan\phi'}{F_s}\right)$$

사면안정을 해석법

(1) 전응력해석법 ; 강도정수는 c_u, ϕ_u를 사용한다. 간극수압을 고려하지 않는다

비배수조건, 시공직후에 적합.

(2) 유효응력해석법 강도정수는 c', ϕ'를 사용한다. 간극수압을 고려한다.

부분배수조건, 시공후 장기간후에 적합

4. 흙댐의 사면 안정

(1) 상류측이 가장 위험한 경우 : 시공 직후, 수위 급강하시

(2) 하류측이 가장 위험한 경우 : 시공 직후, 정상침투시