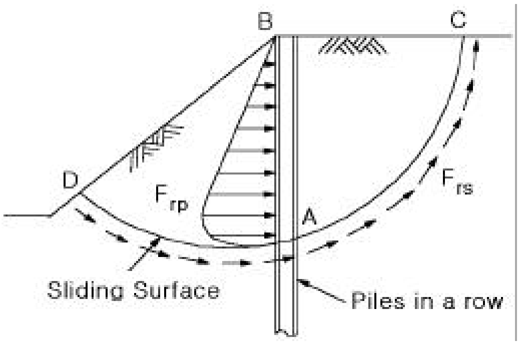
제 3 장 줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽

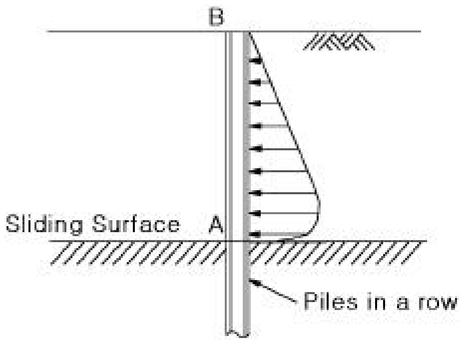
3.1 안정해석법

흙막이말뚝의 설계시에는 2가지 중요한 요인이 있다. 즉 말뚝간격을 보다 엄밀히 고려하는 것과 흙막이말뚝과 굴착사면 양자의 안정해석을 보다 유기적이고 계통적으로 행하는 것이다. 따라서 본 절에서는 말뚝이 설치된 굴착사면의 안정해석법을 흙막이말뚝이 설치된 굴착사면의 안정과 흙막이말뚝의 안정에 대해 설명하고자 한다.

흙막이말뚝이 설치된 굴착사면의 안정을 해석하기 위해서는 그림 3.1에 도시된 바와 같이 흙막이말뚝과 굴착사면의 두가지 안정에 대하여 해석하여야 한다. 만약 토괴활동에 의하여 말뚝에 작용하는 측방토압(혹은 말뚝으로부터 활동토괴에 대한 저항력)을 알 수 있다면 그림 3.1(b)에 도시된 바와 같이 말뚝의 안정을 먼저 검토할 수 있다. 이때 말뚝의 안정은 수평하중을 받는 말뚝의 해석법을 적용할 수 있다. 말뚝의 안정해석을 통하여 말뚝의 안정성이 확보되면 말뚝에 작용하던 수평하중을 그림 3.1(a)와 같이 말뚝의 수평저항력으로 간주할 수 있다. 이 수평저항력을 사면활동 저항력에 부가시켜 통상의 사면안정해석법을 적용하면 굴착사면의 안정을 검토할 수 있다.



(a) 사면의 안정



(b) 말뚝의 안정

그림 3.1 흙막이말뚝의 굴착사면 안정도

여기서, 측방토압의 산정은 굴착사면의 안정을 위한 흙막이말뚝 설계에 있어서 매우 중요한 사항이 되므로 이 값을 정확하게 예측하는 것이 대단히 중요하다. 왜냐하면, 말뚝의 안정과 사면의 안정에 미치는 측방토압의 영향이 서로 상반되기 때문이다. 즉, 측방토압을 실제보다도 크게 산정하여 설계할 경우, 말뚝의 안정에 관하여는 안전측이나 사면의 안정에 관하여는 위험측이 된다. 반대로 측방토압을 실제보다 적게 산정하여 설계할 경우에는 그 반대현상이 발생할 것이다(Ito et al., 1979a, 1979b).

3.1.1 흙막이말뚝의 안정해석법

흙막이말뚝의 안정에 관하여는 그림 3.1(a)에 표시된 바와 같이 활동면상의 토괴에 의하여 말뚝이 $P_{mi}(\overline{z})$의 측방토압을 받는다고 생각하면 주동말뚝에 대하여 이용하는 수평력을 받는 말뚝의 해석법이 적용될 수 있다(홍원표, 1983). 단, 수동말뚝의 경우는 활동면상의 말뚝에 작용하는 측방토압이 분포하중이 된다. 이 측방토압을 분포하중으로 취급할 경우 말뚝거동에 관한 기본방정식은 그림 3.2에 도시된 바와 같이 활동면 상부와 하부말뚝에 작용하는 측방토압 및 지반반력을 적용하여 다음 식으로 표현된다(한중근, 1989 ; 홍원표, 1991).

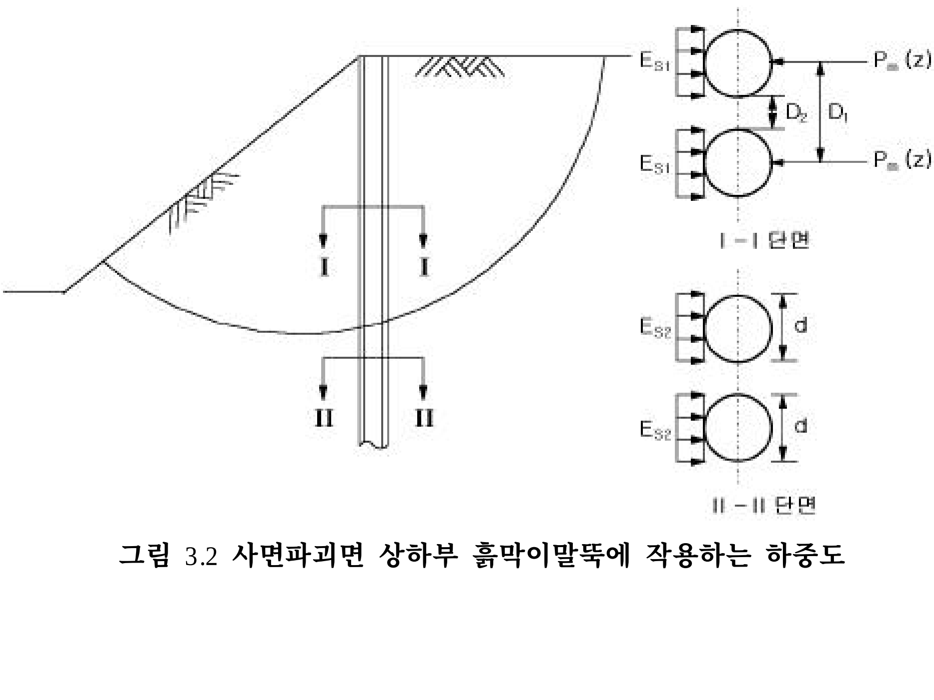


그림 3.2 사면파괴면 상하부 흙막이말뚝에 작용하는 하중도

$$E_pI_p\frac{d^4y_{1i}}{dz^4} = P_{mi(z)} - E_{s1i}y_{1i} \quad (0 \le z \le H)$$
$$E_pI_p\frac{d^4y_{2i}}{dz^4} = - E_{s2i}y_{2i} \quad (H < z \le L_p) \tag{3.1}$$

여기서 i 는 다층지반의 각 지층번호를 의미하며 z 는 지표면에서부터의 깊이, H 는 파괴면에서 말뚝머리까지의 거리, L_p 는 말뚝길이, y_{1i} 및 y_{2i} 는 각각 파괴면 상하의 각 지층의 말뚝의 변위, E_pI_p 는 말뚝의 휨강성, E_{1i} 및 E_{2i} 는 각각 사면파괴면 상하부의 각 지층의 지반계수이다. 파괴면 상부지층의 측방토압 $P_{mi}(z)$ 는 각 지층에 대하여 구하여진 말뚝 1개당의 측방토압으로 깊이 z에 대하여 $f_{1i} + f_{2i}z$ 의 직선분포로 작용한다.

식(3.1)을 풀면 말뚝의 변위에 대한 일반해는 다음식과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} y_{1i} &= e^{-\beta_{1i}z}(a_{1i}\cos\beta_{1i}z + a_{2i}\sin\beta_{1i}z) \\ &+ e^{\beta_{1i}z}(a_{3i}\cos\beta_{1i}z + a_{4i}\sin\beta_{1i}z) \\ &+ (f_{1i} + f_{2i}z)/E_{s1i} \end{aligned} \tag{3.2a}$$

$$\begin{aligned} y_{2i} &= e^{-\beta_{2i}z}(b_{1i}\cos\beta_{2i}z + b_{2i}\sin\beta_{2i}z) \\ &+ e^{\beta_{2i}z}(b_{3i}\cos\beta_{2i}z + b_{4i}\sin\beta_{2i}z) \end{aligned} \tag{3.2b}$$

여기서 a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i} 및 b_{4i}는 적분상수로, 말뚝의 두부와 선단에서의 구속조건 및 파괴면과 각 지층경계위치에서의 말뚝의 연속조건에 의하여 결정된다. 또한, β_{1i} 는 $\sqrt[4]{E_{s1i}/4E_pI_p}$이고 β_{2i} 는 $\sqrt[4]{E_{s2i}/4E_pI_p}$이다.
말뚝두부의 구속조건으로는 자유, 회전구속, 힌지 및 고정의 네종류를 생각할 수 있다.

이와 같은 구속조건은 다음과 같은 상태와 대응시켜 생각할 수 있다. 즉, 회전구속은 말뚝두부를 보로 연결한 형태에 해당되며 고정은 이 연결보를 타이로드나 앵커로 지지시킨 경우에 해당된다. 한편 힌지는 고정과 유사하나 말뚝두부의

연결보가 회전이 가능하도록 연결시킨 경우에 해당된다.

적분상수값들은 말뚝두부와 선단의 구속조건과 활동면상에서의 말뚝의 연속조건에 의하여 구하여 지며 말뚝의 구속조건은 다음과 같다.

자유 (변위와 회전이 모두 가능) $M=0$, $S=0$

회전구속 (변위만 가능) $M=0$, $\theta=0$

힌지 (회전만 가능) $Y=0$, $M=0$

고정 (변위와 회전이 모두 불가능) $Y=0$, $\theta=0$

또한, 연속조건은 다음과 같다.

$[Y]_{z=0}=[Y_1]_{z=0}=[Y_2]_{z=0}$

$[\theta]_{z=0}=[\theta_1]_{z=0}=[\theta_2]_{z=0}$

$[M]_{z=0}=[M_1]_{z=0}=[M_2]_{z=0}$

$[S]_{z=0}=[S_1]_{z=0}=[S_2]_{z=0}$

위의 말뚝두부 및 말뚝선단의 구속조건과 연속조건에 의한 식을 매트릭스로 표시하면 식(3.3)과 같다.

$$[A][X]=\{C\} \quad (3.3)$$

$[A]$: 계수 매트릭스

$[X]^T$: $[a_{1i},\ a_{2i},\ a_{3i},\ a_{4i},\ b_{1i},\ b_{2i},\ b_{3i},\ b_{4i}]$

$\{C\}$: 벡터

따라서, 구하고자 하는 $[X]$는 식(3.4)와 같이 된다.

$$[X]=[A]^{-1}\{C\} \quad (3.4)$$

식(3.4)에서 구한 a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}, b_{1i}, b_{2i}, b_{3i} 및 b_{4i}의 적분상수를 이용하여, 말뚝두부 및 선단의 구속조건 종류에 따라 말뚝의 거동을 고려할 수 있다.

사면파괴면 상부의 지반반력을 기대하기 어려운 경우 E_{s1i} 는 0이 되며, 이 경우의 흙막이말뚝의 거동을 해석하기 위한 적분상수는 표 3.1과 같다.

표 3.1 적분상수

Fixity condition		Free head	Unrotated head
Integral constants	a_0	$\frac{H'}{12E_pI_p\beta^3}\{3(2+\beta H')f_1 - H'(3+2\beta H')f_2\}$	$\frac{H'}{48E_pI_p\beta^3(1+\beta H')}\{4(2\beta^2(H')^2+6\beta H'+3)f_1$ $- H'(5\beta^2(H')^2+12\beta H'+6)f_2\}$
	a_1	$\frac{-H'}{12E_pI_p\beta^3}\{6(1+\beta H')f_1 - H'(3+4\beta H')f_2\}$	$\frac{-(H')^2}{24E_pI_p(1+\beta H')}\{4(3+2\beta H')f_1 - H'(6$ $+5\beta H')f_2\}$
	a_2	$\frac{H'^2}{12E_pI_p}(3f_1 - 2H'f_2)$	$\frac{H'}{48E_pI_p\beta(1+\beta H')}\{4(2\beta^2(H')^2-3)f_1$ $- H'(5\beta^2(H')^2-6)f_2\}$
	a_3	$\frac{H'^2}{12E_pI_p}(2f_1 - H'f_2)$	$\frac{H'}{12E_pI_p}(2f_1 - H'f_2)$
	A	$\frac{H'}{12E_pI_p\beta^3}\{3(2+\beta H')f_1 - H'(3+2\beta H')f_2\}$	$\frac{H'}{48E_pI_p\beta^3(1+\beta H')}\{4(2\beta^2(H')^2+6\beta H'+3)f_1$ $- H'(5\beta^2(H')^2+12\beta H'+6)f_2\}$
	B	$\frac{-(H')^2}{12E_pI_p\beta^2}(3f_1 - 2H'f_2)$	$\frac{H'}{48E_pI_p\beta(1+\beta H')}\{4(2\beta^2(H')^2-3)f_1$ $- H'(5\beta^2(H')^2-6)f_2\}$
Pile deflection		$y_1 = a_0 + a_1\bar{z} + a_2\bar{z}^2 + a_3\bar{z}^3 + \frac{f_1}{24E_pI_p}\bar{z}^4 + \frac{f_2}{120E_pI_p}\bar{z}^5 \quad (-H' \le \bar{z} \le 0)$ $y_2 = e^{-\beta\bar{z}}(A\cos\beta\bar{z} + B\sin\beta\bar{z}) \quad (\bar{z} \ge 0)$	
Maximum bending monent $(-H \le \bar{z} \le 0)$		$-2E_pI_pa_2 \quad at \quad \bar{z} = 0$	$-E_pI_p(2a_2 - 6a_3H' + \frac{f_1}{2E_pI_p}(H')^2$ $- \frac{f_2}{6E_pI_p}(H')^3) \quad at \quad \bar{z} = -H'$
Maximum bending monent $(\bar{z} \ge 0)$		$-2E_pI_p\beta^2e^{-\beta\bar{z}_2 - B\cos\beta\bar{z}_2}(A\sin\beta\bar{z}_2 - B\cos\beta\bar{z}_2)$ $at \quad \bar{z}_2 = \frac{1}{\beta}\tan^{-1}\frac{A+B}{A-B}$	$-2E_pI_p\beta^2e^{-\beta\bar{z}_2 - B\cos\beta\bar{z}_2}(A\sin\beta\bar{z}_2 - B\cos\beta\bar{z}_2)$ $at \quad \bar{z}_2 = \frac{1}{\beta}\tan^{-1}\frac{A+B}{A-B}$
Depth $\overline{z_3}$		$\infty \quad or \quad \frac{1}{\beta}\tan^{-1}(-\frac{A}{B})$	
Depth $\overline{z_4}$		$\infty \quad or \quad \frac{1}{\beta}\tan^{-1}(-\frac{A-B}{A+B})$	

표 3.1 적분상수(계속)

Hinged head	Fixed head
$\frac{(H')^3}{120E_pI_p\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}}\{15(2+\beta H')(3+\beta H')f_1 - H'(7\beta^2(H')^2+27\beta H'+30)f_2\}$	$\frac{(H')^4}{120E_pI_p(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}\{5(3+\beta H')^2 f_1 - H'(2\beta^2(H')^2+9\beta H'+12)f_2\}$
$\frac{-(H')^2}{120E_pI_p\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}}\{15(2\beta^3(H')^3+5\beta^2(H')^2-6)f_1 - H'(14\beta^3(H')^3+27\beta^2(H')^2-30)f_2\}$	$\frac{-(H')^3}{120E_pI_p(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}\{10(\beta^3(H')^3+3\beta^3(H')^2-6)f_1 - H'(4\beta^3(H')^3+9\beta^2(H')^2-15)f_2\}$
$\frac{(H')^2}{120E_pI_p\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}}\{15(\beta^3(H')^3-\beta H'-6)f_1 - H'(7\beta^3(H')^3-30\beta H'-30)f_2\}$	$\frac{\beta(H')^3}{120E_pI_p(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}\{5(\beta^3(H')^3-9\beta H'-12)f_1 - H'(2\beta^2(H')^3-12\beta H'-15)f_2\}$
$\frac{(H')^2}{120E_pI_p\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}}\{5(5\beta^2(H')^2+12\beta H'+6)f_1 - H'(9\beta^2(H')^2+20\beta H'+10)f_2\}$	$\frac{\beta^2(H')^3}{120E_pI_p(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}\{10(2+\beta H')f_1 - H'(5+3\beta H')f_2$
$\frac{(H')^3}{120E_pI_p\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}}\{15(2+\beta H')(3+\beta H')f_1 - H'(7\beta^2(H')^2+27\beta H'+30)f_2\}$	$\frac{(H')^4}{120E_pI_p(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}\{5(3+\beta H')^2 f_1 - H'(2\beta^2(H')^2+9\beta H'+12)f_2\}$
$\frac{-(H')^2}{120E_pI_p\beta\{1+2(1+\beta H')^3\}}\{15(\beta^3(H')^3-6\beta H'-6)f_1 - H'(7\beta^3(H')^3-30\beta H'-30)f_2\}$	$\frac{-(H')^3}{120E_pI_p(1+\beta H')\{2+(1+\beta H')^3\}}\{5(\beta^3(H')^3-9\beta H'-12)f_1 - H'(2\beta^2(H')^3-12\beta H'-15)f_2\}$
$y_1 = a_0 + a_1\bar{z} + a_2\bar{z}^2 + a_3\bar{z}^3 + \frac{f_1}{24E_pI_p}\bar{z}^4 + \frac{f_2}{120E_pI_p}\bar{z}^5 \quad (-H' \le \bar{z} \le 0)$ $y_2 = e^{-\beta\bar{z}}(A\cos\beta\bar{z} + B\sin\beta\bar{z}) \quad (\bar{z} \ge 0)$	
$-E_pI_p(2a_2 + 6a_3\bar{z}_1 + \frac{f_1}{2E_pI_p}(\bar{z}_1)^2 + \frac{f_2}{6E_pI_p}(\bar{z}_1)^3)$ $at \quad \bar{z}_1 = \frac{-f_1 \pm \sqrt{(f_1)^2 - 12E_pI_pa_3f_2}}{f_2}$	$-E_pI_p(2a_2 - 6a_3H' + \frac{f_1}{2E_pI_p}(H')^2 - \frac{f_2}{6E_pI_p}(H')^3)$ $at \quad \bar{z}_1 = -H'$
$2B\beta^2E_pI_p \quad at \quad \bar{z} = 0$	$2B\beta^2E_pI_p \quad at \quad \bar{z} = 0$
$\infty \quad or \quad \frac{1}{\beta}\tan^{-1}(-\frac{A}{B})$	
$\infty \quad or \quad \frac{1}{\beta}\tan^{-1}(-\frac{A-B}{A+B})$	

암반파괴와 같은 말뚝의 강성에 비하여 지반의 강성이 큰 경우를 제외하면 일반적으로 말뚝의 파괴는 휨응력에 의하여 발생된다. 따라서, 통상 말뚝의 안정에 대한 안전율 $(F_S)_{pile}$ 은 허용휨응력 σ_{allow} 와 최대휨응력 σ_{max} 의 비로 다음과 같이 구한다.

$$(F_S)_{pile} = \sigma_{allow} / \sigma_{max} \tag{3.5}$$

상기와 같이 휨파괴를 발생하지 않는 경우에는 말뚝의 전단응력에 의하여 다음과 같이 검토할 필요가 있다.

$$(F_S)_{pile} = \tau_{allow} / \tau_{max} \tag{3.6}$$

여기서, τ_{allow} 는 허용전단응력, τ_{max} 는 최대전단응력이다. 식(3.5) 및 식(3.6)의 안전율이 1보다 클때 말뚝의 안정이 확보될 수 있다.

3.1.2 굴착사면의 안정해석법

가. 말뚝효과를 고려하지 않은 사면

일반적으로 사면의 안정해석에는 한계평형이론을 도입한 여러 가지 방법의 사면안정해석법이 사용되어 오고 있다.

한계평형이론을 이용하여 안전율을 구하려면 활동면 각 점에서 전단응력과 전단강도를 구하여야 한다. 따라서 활동효과를 연직절편으로 분할하고 절편에 대한 평형을 고려하게 되는데 이러한 방법을 절편법이라 하고 이때 각절편에서 발생하는 3n개의 미지수를 가정을 통하여 해결해 나간다.

X_L, X_R : 절편측면의 전단력(미지)　　$T_m = \tau l$: 절편저면의 전단력(미지)

$P' = pl$: 절편저면의 유효수직력(미지)　　l : 절편저면의 길이

$U = ul$: 절편저면의 간극수압(기지)　　h : E 의 작용점

E_L, E_R : 절편저면의 유효수직응력(미지)　　W : 절편의 무게(기지)

U_L , U_R : **절편저면의 간극수압**(**기지**) a : P'**의 작용점**

α : **절편저면의 수평면과 이루는 각**(**기지**)

θ : E **와** X **의 합력이 수평면과 이루는 각**(**미지**)

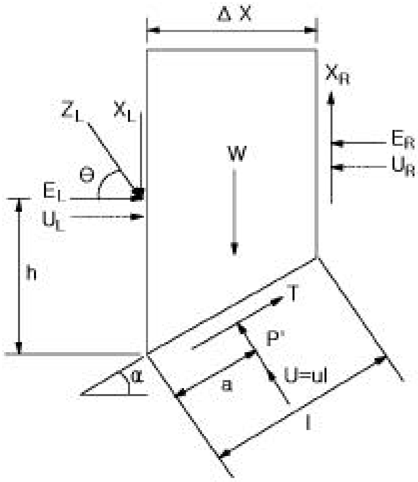


그림 3.3 **분할요소에 작용하는 힘**

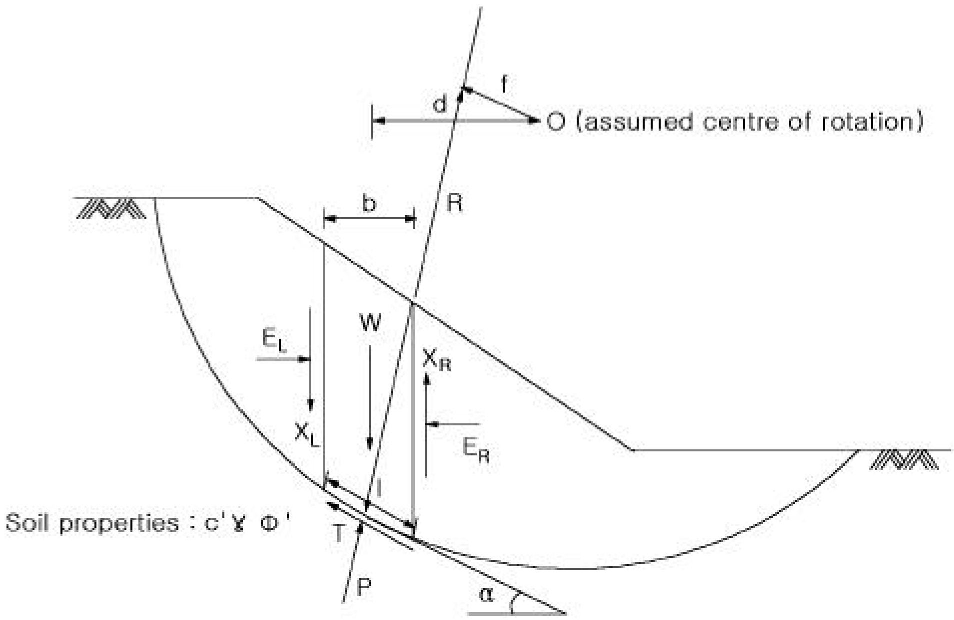


그림 3.4 GLE**법** (Fredlund and Krahn, 1977)

GLE법에 의한 사면안전율은 그림 3.4에 도시된 바와 같이 모멘트의 평형조건과 힘의 평형조건으로부터 다음과 같이 산정되어 진다.

연직방향의 힘의 평형조건으로부터 수직력 P를 구할 수 있다.

$$P = [W - (X_R - X_L) - \frac{1}{F}(c'l\sin\alpha - ul\tan\phi' \times \sin\alpha)]/m_\alpha \tag{3.7}$$

여기서, $m_\alpha = \cos(1 + \tan\alpha\frac{\tan\phi'}{F})$

O점에 대한 모멘트평형조건 $\sum W_d = \sum TR + \sum Pf$ 로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

$$F_m = \frac{\sum[c'l + (P - ul)\tan\phi']R}{\sum(W \cdot d - P \cdot f)} \tag{3.8}$$

한편, 힘의 평형조건 $\sum(E_R - E_L) = 0$, $\sum(X_R - X_L) = 0$으로부터 다음의 식을 구할 수 있다.

$$F_f = \frac{\sum[c'l + (P - ul)\tan\phi']\cos\alpha}{\sum P\sin\alpha} \tag{3.9}$$

식(3.7) (3.9)는 안전율 항에 대한 비선형형태의 식이므로 시행착오법으로 반복계산을 실시하여야 한다.

GLE법은 말뚝이 사면토괴내에 포함되어 있는 경우는 부정정 절편력을 명확히 알 수 없고, 말뚝거동해석을 전 가상파괴면 모두에 실시함으로써 계산과정이 너무 복잡하고 번거롭다. 따라서 말뚝의 사면안정효과를 고려한 사면안정을 해석하기 위하여는 비교적 간편하고 안전율의 산정시 다소 안전측으로 산정되어 말뚝설계시 유리한 Fellunius법을 사용하는 것이 효율적이다.

이 방법에서는 사면안전율을 활동면 중심에서의 모멘트평형으로 구하고 각 분할절편간의 작용력의 합력은 평형이라는 가정이 사용된다. **분할절편저면에서의 전 수직응력** σ**와** τ, **간극수압** u **에 대해서는 식**(3.10)**과 같이 된다**.

$$s = c' + (\sigma - u)\tan\phi' \qquad (3.10)$$

이때 수정전단강도 $\tau = S/F$, $P = \sigma l$, $T = \tau l$**을 대입하면 식**(3.11)**과 같이 된다**.

$$T = \frac{1}{F}\,[\,c' l + (P - ul)\tan\phi] \qquad (3.11)$$

여기서, $P = W\cos\alpha$

전체 분할절편에 대하여 고려하면 식(3.12)**과 같다**.

$$\sum W\sin\alpha = \frac{1}{F}\,[\,c' l + (P - ul)\tan\phi] \qquad (3.12)$$

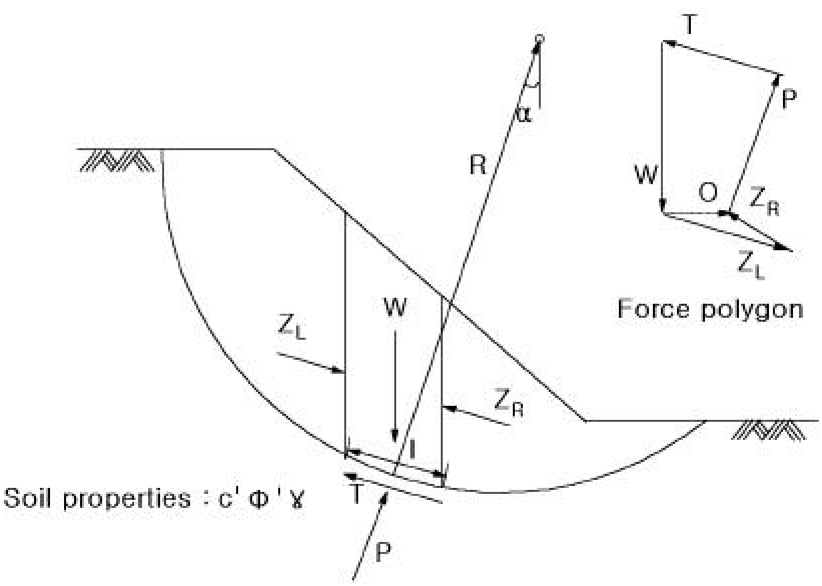


그림 3.5 Fellenius**법** (Fellenius, 1936)

여기서, 안전율 F를 말뚝안전율과 구분하기 위하여 $(F_s)_{slope}$로 표시하면 식 (3.13)과 같다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{[c'l + (W\cos\alpha - ul)\tan\phi]}{\sum W\sin\alpha} \tag{3.13}$$

표 3.2 사면안정 해석법의 분류

구 분	사면안정해석법
선형법	무한사면해석법 Sliding block 혹은 Wedge해석법 $\phi_u = 0$법 Fellenius법
비선형법	일반한계평형해석법(GLE) Bishop 간편법 Janbu 간편법 Janbu 정밀법 Spencer법 Morgenstern & Price법

표 3.3 비선형 안정해석법의 가정과 안전율 계산근거

Method	Assumption	Factor of safety based on	
		Moment Equilibrium	Force Equilibrium
Fellenius	$X/E = \tan x$	○	
Simplified Bishop	$X_R - X_L = 0$	○	
Spencer	$X/E = \tan\theta$	○	○
Janbu's Simplified	$X = 0$		○
Janbu's Rigorous	Thrust Line		○
Morgenstern & Price	$X/L = \lambda f(x)$	○	○

나. 말뚝효과를 고려한 사면

흙막이말뚝을 일렬로 사면에 설치하여 사면안정을 도모한 경우의 개략도는 그림 3.1(b)와 같으며 사면의 안정에 대한 안전율 $(F_s)_{slope}$는 다음 식과 같이 표현된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{F_r}{F_d} = \frac{F_{rs} + F_{rp}}{F_d} \qquad (3.14)$$

여기서, F_r 과 F_d 는 사면의 저항력과 활동력이며, F_{rs}는 사면파괴면의 전단저항력이고, F_{rp} 는 말뚝의 저항력이다. 식(3.14)에서 F_{rs} 및 F_d 는 통상의 사면안정해석에 있어서의 분할법에 의하여 얻어지며 식(3.13)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_{rs} = c'l + (W\cos\alpha - ul)\tan\phi \qquad (3.15)$$

$$F_d = \sum W\sin\alpha$$

F_{rp} 는 식(3.15)를 이용하여 얻어진 말뚝 1개당 측방토압(식(3.1)중 $P_{mi}(z)$항에 해당하는 저항력)과 말뚝배면의 지반반력(식(3.1)중 $E_{s1i}y_{1i}$ 항에 해당하는 저항력)을 말뚝 중심간격으로 나눈 값을 이용하여 산정된다. 만약 사면에 말뚝이 설치되어 있지 않다면 식(3.14)의 F_{rs}와 F_d 만 고려하여 사면안정해석을 한다. 식(3.14)의 안전율이 소요안전율보다 큰 경우 사면의 안정이 얻어질 수 있게 된다.

3.2 해석 프로그램

본 연구에서는 CHAMP(CHUNG-ANG ABUTMENT PILES, 과기처 등록번호 : 94-01-12-1022)를 줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 해석이 가능하도록 수정하여 사용하였다. 중앙대학교 토질역학연구실에서 개발한 프로그램 CHAMP는 연약지반속에 설치한 교대기초말뚝의 안정해석용 프로그램이다. 본 프로그램

에서는 먼저 가상원호활동면을 기준으로 활동면 상부의 활동토괴로 부터 줄말뚝에 작용하는 측방토압을 산정하여 말뚝의 안정해석을 실시하며, 말뚝이 저항할 수 있는 측방토압만을 저항력으로 활용하여 사면의 안전율계산에 말뚝의 저항력을 추가시켜 사면안정의 기여도를 평가할 수 있도록 되어 있다.

그림 3.6은 CHAMP 프로그램의 흐름도이다. 먼저, 가상원호활동면의 원점으로 예상되는 부분에 원점망을 작성하여 원점망의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상원호활동면에 대하여 사면안전율 계산을 반복하여 최소사면안전율이 구하여지는 원점과 가상원호활동면을 찾는다. 사면안전율계산은 한계평형원리에 입각한 분할법을 사용하였고 절편에 작용하는 부정정력은 서로 평형을 이루고 있다고 가정하였다. 각각의 가상원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다.

말뚝이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 저항모멘트로 사면안전율을 계산한다. 말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면상부의 말뚝부분은 활동토괴로 부터 측방토압을 받고 이 측방토압에 의하여 발생될 말뚝의 수평변위에 대하여, 말뚝이 지반으로 부터 지반반력을 받도록 한 상태에서 말뚝머리와 선단의 구속조건을 고려하여 말뚝의 강성매트릭스를 구성한다.

말뚝의 휨응력과 전단응력 및 변위량을 계산하여 말뚝의 안전율을 계산한다. 만약 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 낮으면 측압부가계수를 수정하여 말뚝의 측방토압을 줄여 계산을 반복하여 말뚝의 안전율이 소요안전율 이내가 될때까지 반복한다.

말뚝의 안전율이 소요안전율보다 크게 되면 말뚝의 안정에 사용한 측방토압을 사용하여 가상원호활동면의 원점을 기준으로 저항모멘트를 구한다. 사면안전율 계산시 구하였던 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트에 말뚝에 의한 저항모멘트를 가산하여 사면안전율을 계산하여 말뚝의 사면안정효과를 산정한다.

이러한 계산작업은 다른 가상원호활동면에 대하여도 반복실시하여 한 원점에 대한 무수한 가상원호활동면중 최소안전율을 가지는 활동면과 안전율을 구한다. 또한 이 원점을 원점망상의 각 절점으로 이동시키면서 동일한 계산을 반복한다.

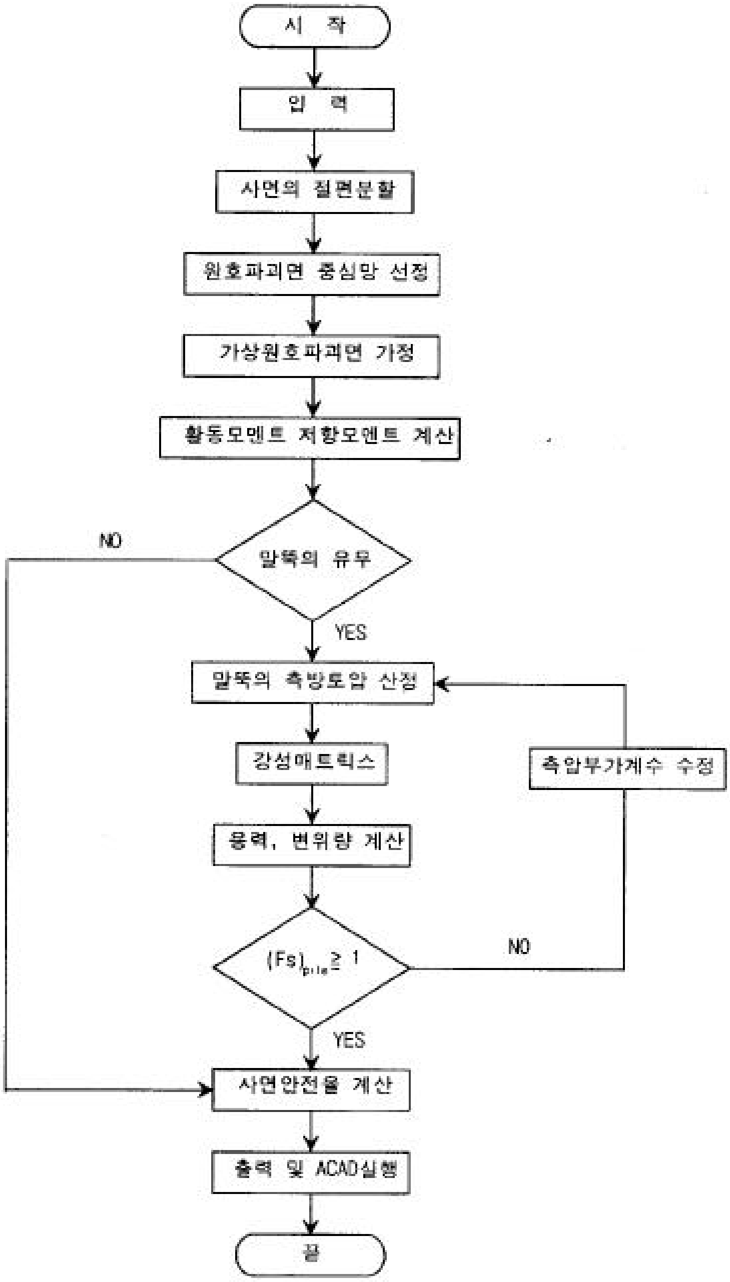


그림 3.6 CHAMP 프로그램 흐름도

3.3 설계법

줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 안정에 영향을 미치는 요소들로는 지반의 기하학적 형상, 토질정수, 부지의 제약조건, 그리고 말뚝 관련사항 등이 있다. 그러므로, 줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 설계시 이러한 조건들은 반드시 고려되어야 한다.

그림 3.7은 흙막이말뚝으로 보강된 굴착사면의 설계순서를 블럭차트로 나타낸 것이다. 따라서, 줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 설계는 그림에서와 같은 순서로 진행됨이 바람직하다. 이 그림에서 보는 바와 같이 굴착사면과 흙막이말뚝의 설계는 네단계로 크게 구분할 수 있다. 즉, 한가지 결정단계와 세가지 선택단계로 구성되어 있다.

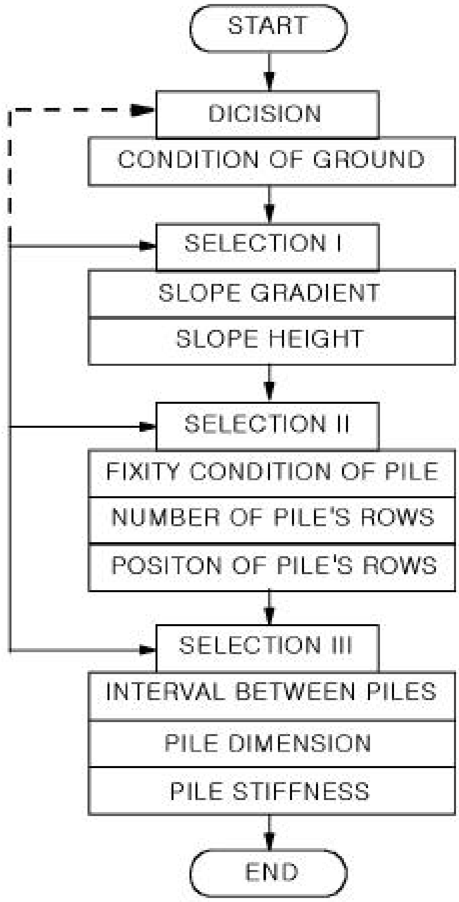


그림 3.7 줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 설계흐름도

첫번째 단계에서는 그림 3.7에서 보는 바와 같이 지반조건 결정단계로서 점성토지반 굴착사면의 설계를 위하여 우선적으로 대상지반에 대한 실내시험 및 현장시험을 실시하여 토질정수 및 지하수위 등의 지반조건을 정확히 조사·결정하여야 한다.

두번째 단계는 선택 I 의 단계로 지반조건이 결정되면 대상지역의 제약조건과 기하학적 형상을 고려하여 굴착사면의 기울기와 굴착사면높이를 선정한다. 이때, 사면기울기와 사면높이를 선정하기 위하여는 사면기울기(L_V/L_H)와 사면높이(H) 및 사면안전율 $(F_s)_{slope}$의 관계를 개략적으로 도시한 그림 3.8을 활용할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 횡축은 사면기울기(L_V/L_H)를 취하고 종축에는 사면안전율을 취하여 사면기울기에 따른 사면안전성의 관계를 나타내고 있다. 또한 그림중에는 사면지반의 굴착고 H의 영향도 도시하고 있다. 전단계에서 대상지반의 지반조건에 의하여 단위체적중량 γ_t와 비배수전단강도 c_u가 결정되므로 소요안전율을 고려하여 사면높이 H가 결정될 수 있다. 즉, 첫번째 단계에

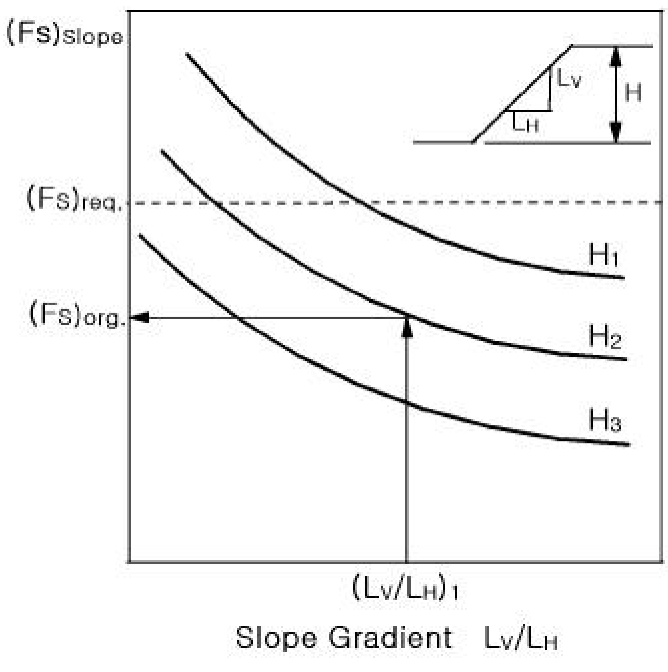


그림 3.8 굴착사면설계 개략도

서 정하여진 지반의 비배수전단강도 c_u와 단위체적중량 γ_t로 부터 예상굴착높이 H를 선정하여 그림내 해당되는 곡선을 정한다. 이렇게 결정된 사면높이 H에 사면기울기 L_V/L_H도 선정하면 사면높이와 사면기울기로부터 사면안전율을 구할 수 있다. 예를 들어, 그림 3.8에서 사면기울기를 $(L_V/L_H)_1$로 선정하고 H_2가 되는 사면높이를 선정하였다면 사면안전율은 $(F_s)_{org.}$이 된다. 만약 이 사면안전율이 소요안전율 $(F_s)_{req.}$보다 크면 설계가 완료되며 작으면 흙막이말뚝에 의한 굴착사면보강 설계단계로 진행되어야 한다.

굴착사면에 흙막이말뚝을 설계할 경우는 그림 3.7의 흐름도에서 보는 바와 같이 먼저 선택II단계에서 흙막이말뚝의 구속조건, 줄말뚝의 열수 및 설치위치를 선정하여야 한다. 여기서, 말뚝의 두부구속조건은 자유, 회전구속, 힌지, 고정의 네가지 경우를 생각할 수 있다. 자유는 말뚝두부를 구속하지 않는 상태로 둠으로서 말뚝두부의 수평변위와 회전이 모두 가능하게 한 상태이고, 회전구속은 말뚝두부의 수평변위는 발생되게 하나 회전은 구속되게 한 상태이다. 한편, 힌지는 말뚝두부의 수평변위는 구속된 상태에서 회전만 발생되게 하는 구속상태이고, 고정은 말뚝두부의 수평변위와 회전 모두 발생되지 않게 구속하는 경우에 해당된다. 통상적으로 회전구속은 말뚝두부를 보로 연결한 형태에 해당되며 고정은 이 연결보를 타이롯드나 앵커로 지지시킨 경우에 해당된다. 한편 힌지는 고정과 유사하나 말뚝두부의 연결보가 회전이 가능하도록 연결시킨 경우에 해당된다. 그러나 일반적으로 말뚝두부는 말뚝을 횡으로 연결시키기만 함으로서 회전구속 상태로 함이 가장 경제적이며 효과적이다. 즉 말뚝두부를 띠장이나 철근콘크리트 보로 서로 연결시켜 가급적 두부가 회전되지 않게 하고 수평방향으로 이동만 하도록 한다. 특히 두열이상의 말뚝열을 설치할 경우는 트러스모양으로 말뚝두부를 강제로 서로 연결시키므로서 두부회전구속의 조건이 된다. 한편 말뚝선단은 지지층에 관입되는 깊이에 따라 힌지나 고정의 상태가 된다. 말뚝의 두부 및 선단의 구속조건이 결정된 다음에는 설치할 말뚝의 열수 및 위치를 결정한다.

다음은 선택III의 단계로서 말뚝의 실질적인 설계단계가 된다. 여기서, 말뚝의 치수, 강성 및 설치간격을 선정하게 된다. 이 선정작업을 체계적으로 실시하기 위하여 그림 3.9와 같은 개략도를 활용한다. 즉 그림 3.9는 말뚝간격, 말뚝치수

및 말뚝강성을 설계하기 위한 개략도이며 횡축에는 말뚝간격비 D_2/D_1 (D_1은 말뚝중심간 거리이고, D_2는 말뚝순간격이다), 종축에는 사면안전율 $(F_s)_{slope}$을 취하였다. 말뚝폭(혹은 직경) 및 강성이 각각 B_1- $(E_p I_p)_1$인 말뚝 I 을 사용하는 경우, 말뚝의 설치간격에 따른 사면의 최소안전율의 변화는 그림 3.9의 말뚝 I 곡선과 같이 된다. 이 경우 사면의 소요안전율을 $(F_s)_{req.}$라 하면, 이 종류의 줄말뚝으로는 사면의 소요안전율을 얻을 수 있는 말뚝간격이 존재하지 않게 된다. 그러나 말뚝 I 보다 큰 강성 $(E_p I_p)_2$를 가지는 말뚝II를 사용하면, 그림 중 말뚝 II곡선으로 도시되는 바와 같이 말뚝간격은 간격비가 $(D_2/D_1)_1$과 $(D_2/D_1)_2$ 사이의 범위에서 설계가 가능하게 된다. 이 설계가능 말뚝간격비 중 제일 간격이 넓은 경우인 $(D_2/D_1)_2$가 최적말뚝간격비가 된다. 또한 말뚝강성이 더 큰 $(E_p I_p)_3$강성을 가지는 말뚝III을 선정하면 설계가능 말뚝간격비가 $(D_2/D_1)_3$ 이하가 되어 최적말뚝간격비는 $(D_2/D_1)_3$ 이 된다.

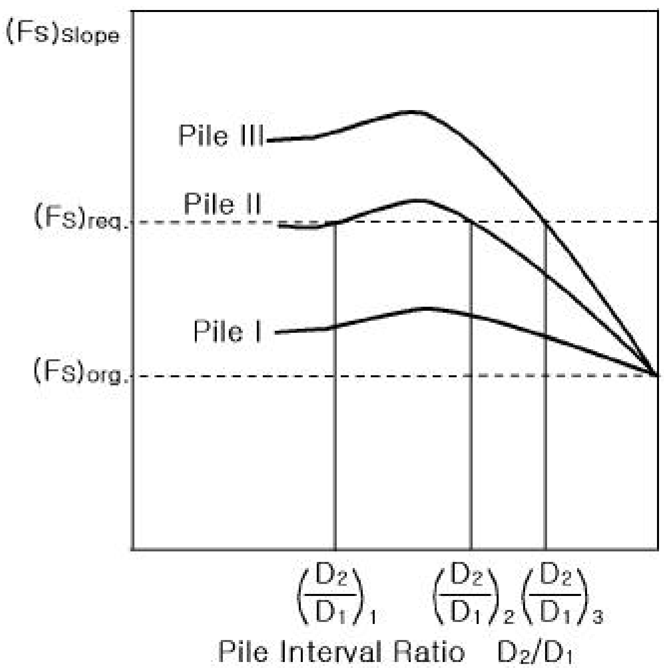


그림 3.9 흙막이말뚝설계 개략도

이러한 말뚝과 굴착사면에 대한 제반사항의 설계가 끝나면, 설치된 말뚝과 보강사면에 대한 안정검토를 실시하여 사면과 말뚝의 안정이 모두 만족되는가 여부를 검토한다. 만약 이들 안정이 확보되지 못하면 Feed Back선을 따라 선택III의 단계로 가서 말뚝의 치수, 강성 혹은 간격을 재선정한 후 말뚝안정을 재검토한다. 여기서 만약 말뚝의 안정이 확보되면 다음으로는 사면안정을 검토하여야 한다. 만약 여기서도 만족스러운 효과가 얻어지지 않으면 선택II단계로 가서 말뚝열의 수와 위치 혹은 말뚝구속조건을 다시 선정한후 계산과정을 반복한다. 이러한 흙막이말뚝으로 굴착사면의 안정을 확보하지 못할 경우는 사면기울기와 사면높이의 선정단계인 선택I단계 및 지반조건의 결정단계까지 Feed Back하여 이들 조건을 변경할 수 밖에 없다. 즉, 사면의 기울기와 사면높이를 완만하고 얕게 하거나 지반을 개량하여 지반강도를 증가시켜 소요안전율을 만족할 수 있도록 설계하여야 한다.

3.4 설계예

3.4.1 설계조건

위에서 제안된 설계법에 의거하여 줄말뚝을 이용한 자립식 흙막이벽의 설계를 실시하기 위하여 예를 그림 3.10과 같이 선정하고자 한다. 이 지반은 상당깊이의 점토질실트층으로 이루어져 있으며 비배수전단강도 c_u는 2t/m^{2}이고 단위체적중량 γ_t는 1.7t/m^{3}이다. 이는 그림 3.7의 설계흐름도에 의거하면 첫 번째 설계단계인 지반조건 결정단계에 해당된다.

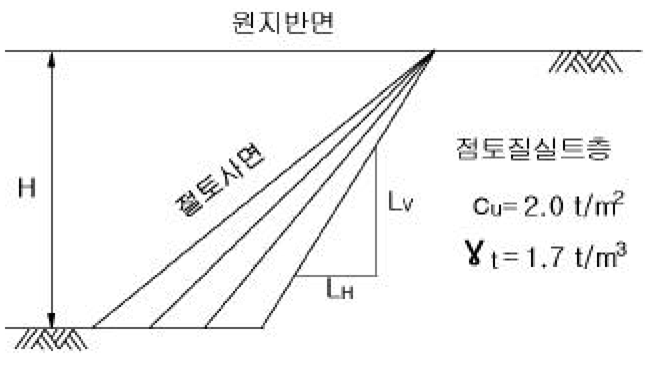


그림 3.10 설계예

3.4.2 굴착사면 및 흙막이말뚝의 설계

가. 굴착사면의 설계

두번째 설계단계는 그림 3.7에서 보는 바와 같이 사면의 기울기와 높이를 선정하는 선택I의 단계이다. 이들 사항을 선정하기 위하여는 그림 3.8과 같은 그림을 작성하여야 하므로 본 설계예를 대상으로 동일한 도면을 작성하면 그림 3.11과 같다. 그림 3.11은 사면지반의 굴착사면고 H가 5m에서 14m까지 증가하는 경우 사면의 기울기 L_V/L_H가 0.3에서 1.8사이를 갖는 경우 각각의 사면에 대한 사면안정해석결과를 도시한 것이다. 이 결과에 의하면 그림에서 보는 바와 같이 동일한 사면기울기를 가지는 경우 굴착사면의 높이가 높을수록 사면의 안전율이 낮아짐을 알 수 있다. 이는 사면의 높이가 클수록 사면이 불안전함을 의미한다. 만약, 사면의 높이가 일정한 경우는 사면의 기울기 L_V/L_H 값이 클수록(즉 사면이 가파를수록) 사면의 안전율이 감소한다.

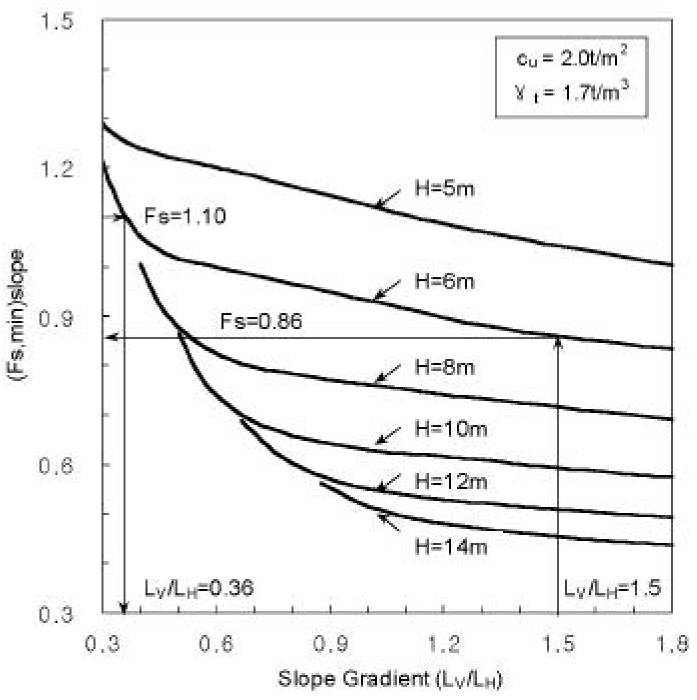


그림 3.11 굴착사면기울기에 따른 사면안전율의 변화

그림 3.11을 활용하면 본 설계예에 대한 사면의 기울기와 높이를 선정할 수 있을 것이다. 여기서, 만약 사면의 높이 H를 6m로 하고 사면의 소요안전율을 1.1이라 하면 사면의 기울기 L_V/L_H는 0.36이하가 되어야 하므로 사면의 수평거리는 약 17m이상이 되어야 한다. 그러나, 실제 현장에서는 주변부지가 제한되어 있는 상황이 많으므로 사면의 기울기를 0.36정도로 완만하게 선정하지 못하는 것이 일반적이다. 또한 사면의 소요안전율을 1.2라 하면 이를 만족시키는 사면의 기울기는 존재하지 않는다. 만약 사면기울기 L_V/L_H를 1.5로 가파르게 하면 사면안전율은 그림 3.11에 표시된 바와 같이 0.86으로 된다. 이 사면안전율은 소요안전율 1.2보다 훨씬 낮으므로 그림 3.7의 설계흐름도에 의하면 이 굴착사면에는 흙막이말뚝을 이용하여 보강대책이 강구되어야 한다.

나. 흙막이말뚝의 설계

앞에서 선정된 사면기울기와 높이를 가지는 굴착사면에 흙막이말뚝을 설치하여 보강을 실시하는 경우, 그림 3.7의 설계흐름도에 의하면 선택Ⅱ단계로 먼저 흙막이말뚝의 열수와 설치위치 및 구속조건을 선정하여야 한다. 먼저, 1열의 말뚝을 선정하고 말뚝의 위치를 그림 3.12 속 그림에서 보는 바와 같이 변화시키면서 사면안정해석을 실시하여 보았다. 이 사면안정해석에서는 흙막이말뚝으로 H-300×300×10×15의 H말뚝을 1.8m간격으로 설치한 경우를 대상으로 하였다. 즉, 1열의 흙막이말뚝을 사면의 정상위치에서 부터 좌측 수평방향으로 1m, 2m, 3m 그리고 4m위치에 각각 배치하여 사면안정검토를 실시하면 결과는 그림 3.12와 같이 된다. 이 결과에 의하면 사면정상위치에 흙막이말뚝열이 설치된 경우가 사면안전율이 가장 크므로 1열의 흙막이말뚝은 사면의 정상위치에 설치됨이 바람직하다.

이상과 같이 1열의 흙막이말뚝을 사면정상위치에 설치하기로 결정하면 다음은 그림 3.7의 설계흐름도에 따라 선택Ⅲ단계에서 말뚝의 간격비, 치수 및 강성을 선정하여야 한다. 이들 사항을 선정하기 위하여는 그림 3.9와 같은 도면을 작성하여 활용할 수 있다. 따라서 1열말뚝을 사면정상위치에 설치한 경우에 대한 말뚝치수와 강성의 변화에 따른 말뚝간격비와 사면안전율의 관계를 나타내면 그림 3.13과 같이 된다. 이 해석에서는 사용말뚝을 H-100×100에서 H-400×400까지의 네경우를 대상으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝의 폭, 두께 및 강성이 커질수

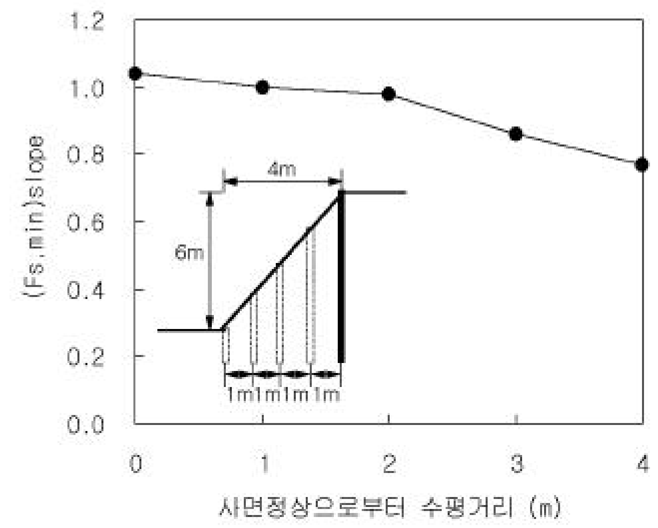


그림 3.12 1열말뚝위치에 따른 사면안전율의 변화

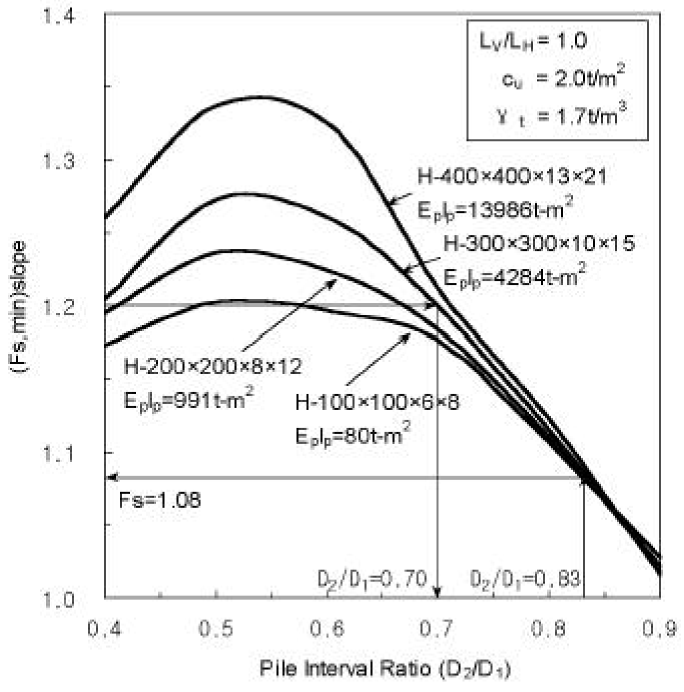


그림 3.13 말뚝치수와 강성에 따른 말뚝간격비와 사면안전율의 관계

록 사면안전율은 증가하고 있다. 그리고, 말뚝간격비(D_2/D_1)가 감소할수록 사면의 안전율은 간격비가 0.55일때까지 증가하였다가 그 이하에서는 감소하고 있다. 만약 H-300×300×10×15 말뚝을 사용하고, 말뚝간격비를 0.83으로 할 경우 소요안전율 1.2를 만족하지 못한다. 따라서, 이 사면의 안정성을 확보하기 위하여는 말뚝간격비를 0.7이하(말뚝중심간격이 1.0m이하)로 하거나 2열이상의 흙막이말뚝이 설치되어야 할 것이다. 만약 말뚝열수를 증가시킬 경우는 그림 3.7의 Feed Back선을 따라 선택II단계로 돌아가서 말뚝열의 수와 위치를 다시 선정하여야 한다.

2열의 흙막이말뚝을 설치할 경우에도 마찬가지로 먼저 흙막이말뚝의 설치위치를 결정하여야 한다. 그림 3.14 속 그림에서 보는 바와 같이 첫번째 말뚝열의 흙막이말뚝은 사면정상에 고정시키고 나머지 한 열은 고정배치된 말뚝열로부터 좌측 수평방향으로 1m, 2m, 3m 그리고 4m에 추가로 설치하여 사면안정검토를 실시한 결과는 그림 3.14와 같이 된다. 사면안전율은 사면정상에 설치된 첫번째 말뚝열로 부터 2m 떨어진 위치에 두번째 말뚝열이 설치된 경우가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이때 사면안전율은 1.22가 되어 소요안전율 1.2를 만족하게 된다. 따라서, 본 단면에 말뚝열 사이 간격이 2m인 두열의 흙막이말뚝을 그림 3.14 속에 도면처럼 설치할 경우 사면의 소요안전율을 만족하므로 설계를 종료하게 된다.

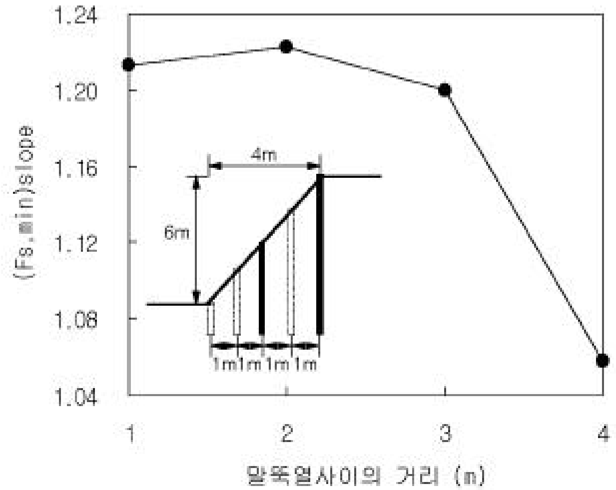


그림 3.14 2열말뚝위치에 따른 사면안전율의 변화