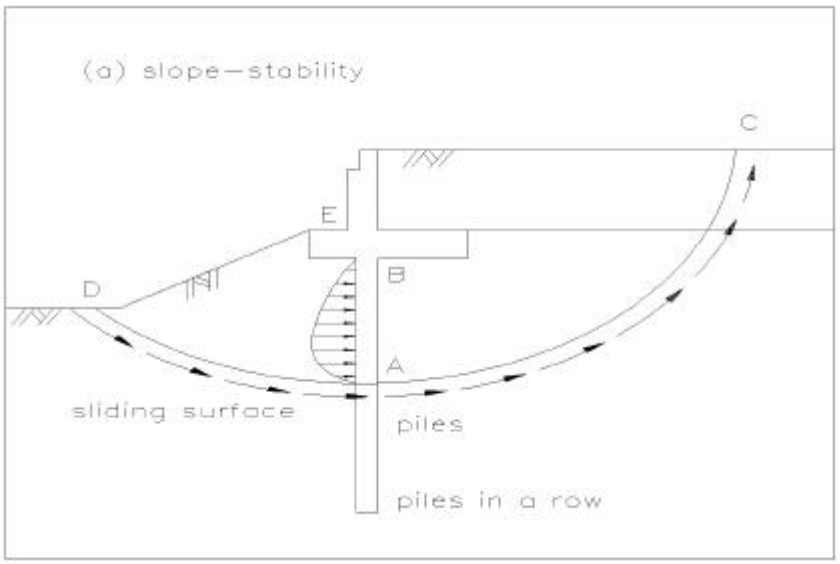
제 3 장 교대기초 말뚝의 안정해석법

3.1 개요

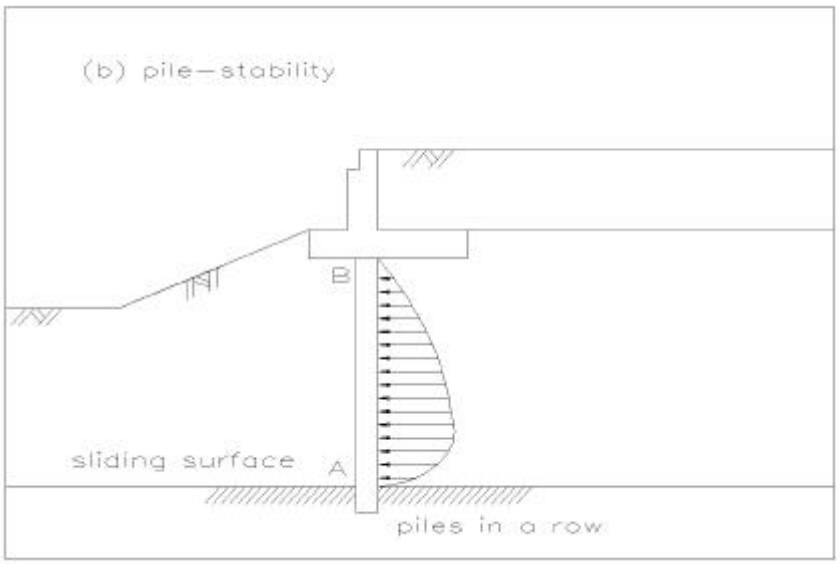
기초말뚝의 해석 시에는 사면의 안정검토와 말뚝의 안정검토가 반드시 실시되어야만 한다. 불안한 사면지반에 말뚝이 일렬로 설치되어 있으면 이 말뚝은 사면활동을 방지하는 역할을 하게 된다. 한편 이 경우 말뚝은 사면활동면 상부의 토괴로부터 측방유동을 받게 된다. 이 문제에 대처하기 위하여는 이 측방토압을 정확하게 산정하는 것이 매우 중요하다.

왜냐하면 측방토압은 사면의 안정과 말뚝의 안정 양쪽 모두에 동시에 연관되어 있기 때문이다. 한편으로 이 측방토압을 실제보다 크게 산정하여 설계하는 경우 말뚝의 안정에 관하여는 안정 측이나 사면의 안정에 관하여는 위험 측이 된다. 이와 반대의 경우에는 사면의 안정에 대하여는 안정 측이나 말뚝의 안정에 대하여는 위험 측이 된다. 따라서 교대측방이동 문제를 해석하기 위해서는 이 말뚝의 측방토압을 정확하게 산정하여 말뚝의 사면활동 저지능력 및 말뚝의 거동에 관한 분석을 정확하게 하여야만 한다.

그러나 말뚝에 작용하는 측방토압의 발생기구는 복잡하기 때문에 정확하게 하기가 매우 어려워 강성벽에 사용하는 고전적 토압론에 의거한 토압산정식을 사용하고 있는 실정이다. 일반적으로 교대기초말뚝이 설치된 사면의 안정문제에 있어서는 사면의 안정과 말뚝의 안정에 대한 두가지의 해석이 그림 3.1에서와 같이 실시되어야 한다. 왜냐하면 교대기초말뚝이 설치된 사면의 전체안정은 사면과 기초말뚝 모두의 안정이 확보되었을 경우에만 비로소 가능하기 때문이다.



(a) **사면의 안정**



(b) **말뚝의 안정**

그림 3.1 **교대기초말뚝이 설치된 지반의 안정**

만약, 말뚝에 작용하는 측방토압 (혹은 붕괴토괴에 저항하는 말뚝의 저항력)이 알려져 있다면, 먼저 말뚝의 안정이 수평하중을 받는 말뚝(주동말뚝)의 해석법을 응용하여 그림 3.1(b)와 같이 검토될 수 있다.

그러나, 주동말뚝의 경우는 수평하중이 말뚝머리 부분에 집중하중으로 작용하나 수동파괴말뚝은 사면파괴면 상부의 측방변형 지반을 통하여 말뚝에 분포하중으로 작용하게 된다.

이상의 말뚝안정 계산에서 말뚝의 안정이 확보되면 사면의 안정 계산이 그림 3.1(a)에서와 같이 파괴면의 전단저항 및 말뚝의 저항력을 고려하여 실시될 수 있다.

본 장에서는 교대기초말뚝의 거동 및 사면안정효과를 평가할 수 있는 해석법을 정리하고자 한다. 우선 측방유동지반속에 일정 간격으로 말뚝이 설치되어 있는 경우 이 줄말뚝에 작용하는 측방토압 산정식을 정리하고 이어서 말뚝의 안정해석법 및 사면의 안정해석법을 설명하고자 한다.[29,30,31]

3.2 말뚝에 작용하는 측방토압

3.2.1 개요

불안한 사면지반의 안정문제에 있어서 수동말뚝이 사면 파괴면을 관통하여 일열로 설치되어 있는 경우, 말뚝은 사면의 거동을 방지하는 역할을 하게되며, 말뚝은 사면의 파괴면 상부의 토괴로부터 측방유동압을 받게 된다. 이와 같이 수동말뚝의 거동을 검토하는데 있어서 가장 중요한 것은 수동말뚝에 작용하는 측방유동압의 산정이다. 이 측방유동압은 수동말뚝을 계통적으로 해석하는데 있어서 사면과 말뚝의 변형·안정에 동시에 관련되어 있기 때문에, 측방유동압을 정확하게 산정하여 수동말뚝의 사면거동 방지능력 및 수동말뚝의 거동에 관한 분석을 하여야만 한다. 그러나 측방유동압은 성토의 높이나 형상, 지반의

구성과 역학특성 및 말뚝의 배치와 강성 등의 여러 가지 요인의 영향을 받으므로 정량적으로 파악하기에는 많은 어려움이 수반된다.

여기서는 우선 수동말뚝에 작용하는 측방 유동압의 산정법에 대한 기존의 추정식 및 줄말뚝의 말뚝간격의 영향을 고려한 산정법에 대한 이론식에 대하여 설명하기로 한다.

3.2.2 간이산정법

현재까지 수동 말뚝에 작용하는 측방유동압에 관해 수많은 현장 계측과 모형실험이 이루어져 왔다. 이들은 말뚝에 일어나는 변형분포를 측정하는 것에 따라 해석적 기법을 이용해 측방유동압을 추정한 것이 대부분이다. 그림 3.2는 현재까지 추정 또는 가정된 측방유동압의 깊이 방향의 분포형을 도식적으로 나타낸 것이다.

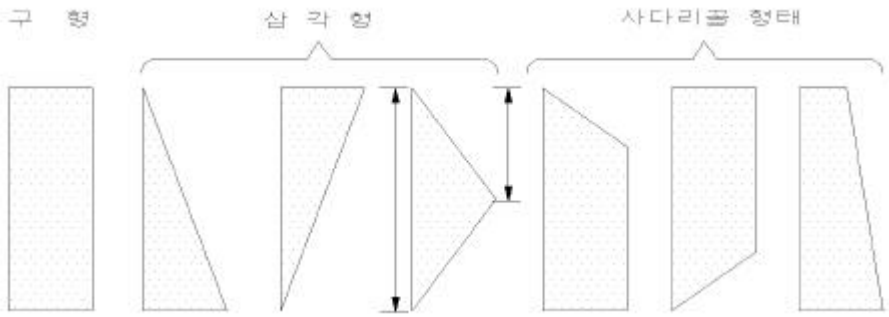


그림 3.2 측방유동압의 깊이방향별 분포도

그림 3.2의 (a)는 사각형 분포, (b) (d)는 삼각형 분포, (e) (g)는 사다리꼴 분포이다. 원래, 수동 말뚝에 작용하는 측방유동압은 지반의 측방 변형과 군말뚝 기초와의 상호 작용의 결과로써 생긴 것이다. 예를 들면, 같은 지반에 있어서 같은 말뚝기초이어도 시공 공정이 다르면 측방유동의 이력도 달라지기 때문에, 측방유동압의 분포형도 달라지는 것을 예상할 수 있다.

또, 매우 복잡한 지반과 시공 공정으로는 그림 3.2에 나타난 단순한 분포형은 아니고 더욱 복잡한 분포형을 취하는 것도 예상 된다. 따라서, 측방유동압을 일반적으로 또 정량적으로 정도 있게 파악하는 것은 매우 곤란한 상황에 있다고 할 수 있다.

그림 3.2에 나타난 측방유동압의 분포형태중 연약지반의 측방유동압을 받는 수동 말뚝의 대해 가장 자주 사용되는 것은 그림 (d)의 이등변 삼각형이다. 이 분포형은 그림 3.3과 같이 교대 기초 말뚝에 작용하는 측방유동압으로 나타낸 것이다.[49]

여기에서는 이등변 삼각형의 정점의 압력 P_{max}을 $0.4\gamma h$로 가정되어 있다. 여기에 γ은 성토의 단위 중량, h는 성토 높이이다. 그 후 일본에 있어서 실측 결과와 모형 실험 결과를 근거로 검토되고 다음 식에 제안되어 있다.

$$P_{max} = \alpha \cdot \gamma \cdot h \cdot B \qquad (3.3)$$

여기서, α : 유동 압력 계수 (0.8)

$\gamma \cdot h$: 성토 하중

B : 말뚝축 직각 방향의 작용폭 (2.5d, d: 말뚝의 직경)

Tschebotarioff는 연약지반상에 구축된 수동말뚝 기초 위에 교량교대를 설치한 후, 뒤채움 하중으로 인하여 연약지반이 측방으로 이동 변형할 경우 이러한 지반 하중으로부터 말뚝이 측방토압을 받는 것을 설명하였다.

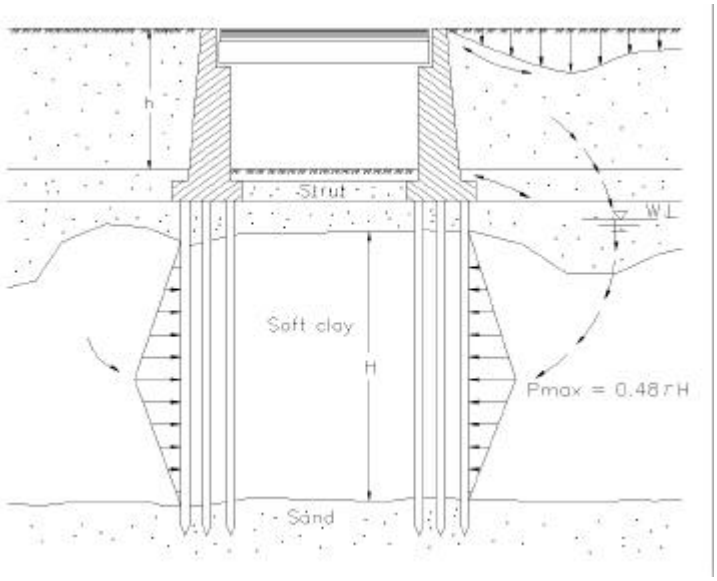


그림 3.3 측방유동압의 분포(Tchebotarioff)

말뚝에 작용하는 측방토압의 분포를 이등변삼각형 분포로 가정하고 다음 식과 같이 제안하였다.

$$P_{max} = K_0 \cdot \gamma \cdot H \qquad (3.4)$$

식 (3.4)는 식 자체의 간편성 때문에 설계에 자주 이용되고 있으나 여기서, K_0(정지토압계수)의 작용에 대해 신중해야 한다. 三木 등에 의한 실내시험 결과를 보면, 측방유동압의 크기는 급속재하를 실시한 경우 성토하중의 0.7 0.8배, 압밀촉진공법에 의한 경우 성토하중의 0.3 0.4배정도 되는 것으로 나타나는데 이를 Rankine의 토압이론에 의한 방법과 비교적 잘 일치하는 것으로 보인다.

그림 3.4는 실제의 교대 기초 말뚝으로 측정된 곡률 모멘트를 대상으로 해서 측방유동압 분포의 차이에 따른 해석치를 비교하고 실측치로도 비교하고 있다. 이 결과를 종합적으로 판단해서 이등변 삼각형 분포의 일치도가 좋다고 하지만 어쨌든 이 정도의 분포형의 차이에 따른 영향은 별로 큰 것이 아닌 것으로 추정된다.

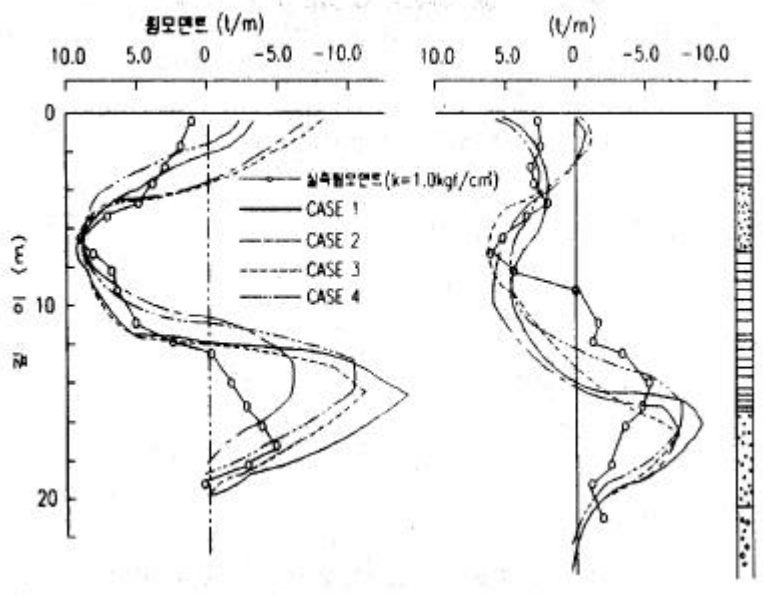


그림 3.4 기초말뚝의 휨모멘트 분포

3.3 교대기초말뚝의 해석법

3.3.1 해석법 개요

교대 말뚝기초의 해석 시에는 사면의 안정검토와 말뚝의 안정검토가 반드시 실시되어야만 한다. 불안한 사면지반에 말뚝이 일렬로 설치되어 있으면 이 말뚝은 사면활동을 방지하는 역할을 하게 된다. 이 경우 말뚝은 사면활동면 상부의 토괴로부터 측방유동을 받게 된다. 이 문제에 대처하기 위해서는 작용하는 측방토압을 정확하게 산정하는 것이 매우 중요하다. 말뚝의 사면안정 저지능력 및 말뚝의 거동에 관한 저지능력 및 말뚝의 거동에 관한 분석을 정확하게 하여야만 하나 말뚝에 작용하는 측방토압의 발생기구는 복잡하여 해석하기 어려우므로 강성벽에 사용하는 고전적 토압론에 의거한 토압산정식을 사용하고 있는 실정이다.

일반적으로 교대기초말뚝이 설치된 사면의 안정문제에 있어서는 사면의 안정과 말뚝의 안정에 대한 두 가지의 해석이 그림 3.1에서와 같이 실시되어야 한다. 왜냐하면 교대기초말뚝이 설치된 사면의 전체안정은 사면과 기초말뚝 모두의 안정이 확보되었을 경우에만 비로소 가능하기 때문이다.

만약 말뚝에 작용하는 측방토압이 알려져 있다면, 먼저 말뚝의 안정이 수평하중을 받는 주동말뚝의 해석법을 응용하여 그림 3.1(a)와 같이 검토될 수 있다. 그러나 주동말뚝의 경우는 수평하중이 말뚝머리 부분에 집중하중으로 작용하나 수동파괴 말뚝은 사면파괴면 상부의 측방변형지반을 통하여 말뚝에 분포하중으로 작용하게 된다. 이상의 말뚝안정 계산에서 말뚝의 안정이 확보되면 사면의 안정계산이 그림 3.1(a) 에서와 같이 파괴면의 전단저항 및 말뚝의 저항력을 고려하여 실시될 수 있다.

이하 절에서는 교대기초 말뚝의 거동 및 사면안정효과를 평가할 수 있는 해석법을 정리하여 측방유동지반속에 일정간격으로 말뚝이 설치되어 있는 경우 이 줄말뚝에 작용하는 측방토압산정식을 이용한 말뚝 및 사면의 안정해석법을 요약하고 그에 따른 프로그램 내용을 설명하고자 한다.

3.3.2 측방토압이론식

일반적으로 줄말뚝의 설계에 적용되는 측방토압은 단일말뚝에 작용하는 토압이 사용되어 왔지만 이들 이론식의 근거는 매우 빈약하고 이를 토대로 설계되므로 사고가 발생하는 경우가 종종 있었다. 즉 단일말뚝에 작용하는 측방토압을 줄말뚝에 적용할 경우 문제가 있고, 말뚝의 설치간격에 따라 말뚝주변지반의 변형양상이 다르게 되므로 측방토압을 산정하는데 어려움이 있다. 또한, 소성변형이나 측방유동이 발생되는 지반에 줄말뚝이 설치되어 있으면 지반의 측방유동이 수동말뚝의 안정에 중요한 영향을 미치게 된다. 왜냐하면 측방유동에 의하여 유발되는 측방토압은 말뚝과 주변지반의 상호작용에 의하여 결정되기 때문이다.

원래 이 줄말뚝의 전면과 배면에는 서로 평행상태인 토압이 작용하고 있었으나 뒤채움이나 성토 등의 편재하중으로 인하여 지반이 이동하게 되어 토압의 평형상태는 무너지게 되고 말뚝은 편토압을 받게된다. 여기서 취급하게 될 측방토압이란 줄말뚝의 전면과 배면에 각각 작용하는 토압의 차에 해당된다.

줄말뚝에 작용하는 측방토압의 산정식을 유도하는 경우에 특히 고려해야 할 점은 말뚝간격 및 말뚝주변지반의 소성상태의 설정이다. 만약 말뚝주변지반에 수동파괴가 발생한다고 하면 그 때에는 활동이 상당히 진행되어 사면파괴면의 전단저항력도 크게 저하되므로 말뚝에 작용하는 측방토압이 상당히 크게되어 말뚝자체의 안정이 확보되지 못할 염려가 있는 등 불안한 요소가 많다. 따라서 설계에 채용되어야 할 말뚝의 측방토압은 지반변형의 진행에 의한 사면파괴면상의 전단저항력의 저하가 거의 없는 상태까지의 값을 채용하는 것이 가장 합리적일 것이다.

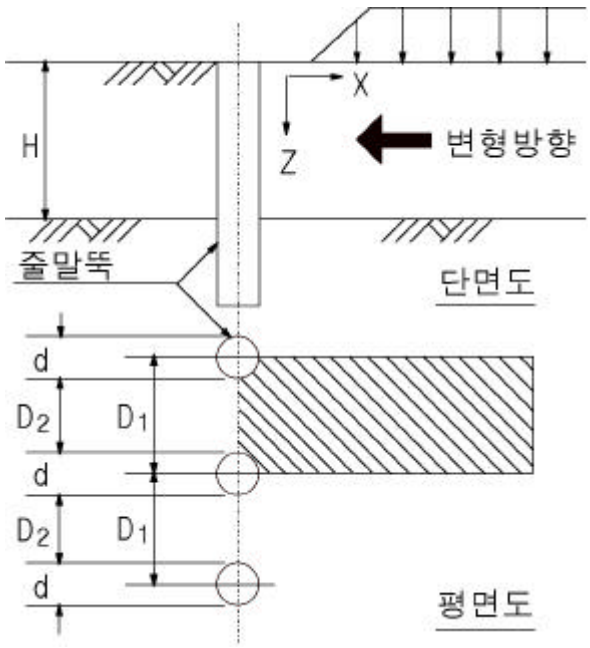


그림 3.5 측방변형지반속의 말뚝설치도

일렬의 말뚝이 그림 3.5와 같이 H 두께의 소성변형지반속에 설치되어 있을 경우 측방토압산정시 고려하여야 할 부분은 그림 3.5중에 빗금친 말뚝사이의 지반이다. 말뚝사이 지반의 소성상태를 확대하여 표시하면 그림 3.6과 같다. 측말뚝주변의 아칭현상에 의하여 그림 3.6의 빗금친 부분만이 소성상태에 도달할 경우의 측방토압을 산정하여야 할 것이다.

이상에서 열거한 조건을 고려하여 일렬로 설치된 줄말뚝에 작용하는 측방토압을 유도정리하면 식 3.5와 같이 제안된다.[14 20)]

$$p(z)/B_o = K_{p1} \times c + K_{p2} \times \sigma_H(z) \qquad (3.5)$$

여기서, B_0는 그림 3.7의 원형말뚝인 경우 말뚝직경 d이고 정방형 말뚝인 경우에는 말뚝폭 B_1이 되며, $\sigma_H(z)$는 말뚝 전면에 지반의 측방유동에 저항하여 작용하는 토압으로 주동토압을 사용함이 바람직하다. K_{p1} 과 K_{p2}는 측방토압계수로서 식 3.6과 같이 구할 수 있다.

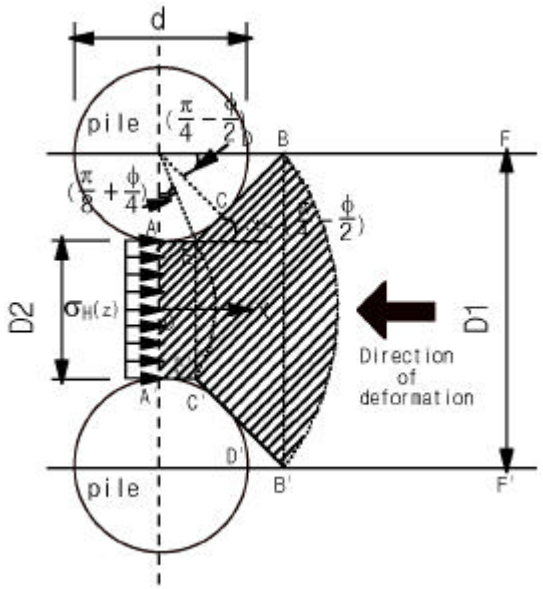


그림 3.6 말뚝주변지반의 소성상태

$$K_{p1} = \frac{1}{1 - D_2/D_1}\left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{G_1(\phi)}\left(\frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)}\left(\exp\left(2\xi\frac{D_1 - D_2}{D_2} \times G_3(\phi)\right)\right) - 1\right) + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)}\right) - \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)}\right] \quad (3.6)$$

$$K_{p2} = \frac{1}{1 - D_2/D_1}\left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{G_1(\phi)}\left(\exp\left(2\xi\frac{D_1 - D_2}{D_2} G_3(\phi)\right) - \frac{D_2}{D_1}\right]\right.$$

여기서 $G_1(\phi)$, $G_2(\phi)$, $G_3(\phi)$ 및 $G_4(\phi)$는 표 3.1에 기술된 바와 같으며 ξ는 말뚝의 형상계수이다.

점착력이 0인 사질토의 경우는 식 3.6에 c=0을 대입하면 측방토압 p/B_0는 $\sigma_H(z)$만의 항으로 다음과 같이 정리되어 진다.

$$\frac{p(z)}{B_0} = K_{p2}\,\sigma_H(z) \quad (3.7)$$

점성토 지반의 경우 내부마찰각이 0이므로 측방토압은 다음과 같이 산정된다.

$$p(z) = cD_1\left(3\ln\frac{D_1}{D_2} + 2\xi\frac{D_1 - D_2}{D_2}\frac{c_o}{c}\right) + (D_1 - D_2)\,\sigma_H(z) \quad (3.8)$$

식 3.8을 역시 B_0로 나누어 정리하면 식 3.5와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 단, 이 경우의 측방토압계수 K_{p1} 과 K_{p2}는 다음과 같이 별도의 식으로 정리되어야 한다.

$$K_{p1} = \frac{1}{1 - D_2/D_1}\left(3\ln\frac{D_1}{D_2} + 2\xi\frac{D_1 - D_2}{D_2}\frac{c_0}{c}\right) \quad (3.9)$$

$$K_{p2} = 1$$

이상에서 구하여진 측방토압계수 K_{p1}과 K_{p2}에 대한 단일말뚝의 경우를 포함하여 정리하면 표 3.1과 같이 정리되어 진다.

표 3.1 측방토압계수 K_{p1}과 K_{p2}

	K_{p1}		K_{p2}
	$\phi \neq 0$	$\phi = 0$	
줄말뚝	$\frac{1}{1-D_2/D_1}[(\frac{D_1}{D_2})^{G_1(\phi)}(\frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)}$ $(\exp(2\xi\frac{D_1-D_2}{D_2}G_3(\phi)))-1$ $+\frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)})+\frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)})$	$\frac{1}{1-D_2/D_1}\left(3\ln\frac{D_1}{D_2}+2\xi\right.$ $\left.\frac{D_1-D_2}{D_2}\frac{c_0}{c}\right)$	$\frac{1}{1-D_2/D_1}[(\frac{D_1}{D_2})^{G_1(\phi)}$ $(\exp(2\xi\frac{D_1-D_2}{D_2}G_3(\phi))$ $-\frac{D_2}{D_1}]$
단일말뚝	$G_2(\phi)+2\xi G_4(\phi)$		$G_1(\phi)+2\xi G_3(\phi)+1$
비 고	$G_1(\phi)=N_\phi^{1/2}\tan\phi+N_\phi-1$, $G_2\phi=2\tan\phi+2N_\phi^{1/2}+N_\phi^{-1/2}$, $G_3(\phi)=N_\phi\tan\phi_0$ $G_4(\phi)=2N_\phi^{1/2}\tan\phi_0+c_0/c$, $N_\phi=\tan^2(\pi/4+\phi/2)$ H형말뚝과 원형말뚝의 경우 $\phi_0=\phi$, $c_0=c$		

(1) 말뚝단면형상의 영향

말뚝에 작용하는 측방토압은 말뚝단면의 형상에 따라 다르게 된다. 그림 3.7은 4가지의 단면을 가지는 말뚝의 설치도를 보여주고 있다. 그림 3.7(a)는 두께가 얇은 판이 지반변형방향에 수직으로 놓여 있는 경우이다. 이 경우의 말뚝형상계수 ξ ($=t_0/B_1$)는 대단히 적어 0으로 생각할 수 있으므로 측방토압 산정식은 식(3.10) (3.12)와 같이 구하여 진다. 또한 $\overline{AE}$와 $\overline{A'E'}$에서의 전단저항을 무시하는 경우에도 ξ는 0으로 생각할 수 있다.

$$p(z)=cD_1\frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)}\left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{G_1(\phi)}-1\right]+\left[D_1\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{G_1(\phi)}-D_2\right]\sigma_H(z) \qquad (3.10)$$

$c=0$인 사질토의 경우는,

$$p(z)=D_1\left[\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{G_1(\phi)}-D_2\right]\sigma_H(z) \qquad (3.11)$$

$\phi = 0$인 점성토의 경우는,

$$p(z) = 3\,cD_1 \ln\frac{D_1}{D_2} + (D_1 - D_2)\sigma_H(z) \tag{3.12}$$

만약 이러한 얇은 판이 지반변형방향에 평행하게 놓여있다면, 말뚝의 형상계수는 B_2/t_0가 되고 D_2는 $D_1 - t_0$가 된다.

그림 3.7(b)와 같은 정방형말뚝은 $B_1 \times B_1$이므로, $\overline{AE}$ 는 B_1이 되고 형상계수 ξ는 1이 된다. 따라서 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$p(z) = c[D_1(\frac{D_1}{D_2})^{G_1(\phi)}(\frac{G_4(\phi)}{G_3(\phi)}(\exp(2\frac{D_1 - D_2}{D_2} \times G_3(\phi)) - 1) + \frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)}) - D_1\frac{G_2(\phi)}{G_1(\phi)}] + [D_1(\frac{D_1}{D_2})^{G_1(\phi)}(\exp(2\frac{D_1 - D_2}{D_2}G_3(\phi)) - D_2]\sigma_H(z) \tag{3.13}$$

$$p(z) = [D_1(\frac{D_1}{D_2})^{G_1(\phi)}\exp(2\frac{D_1 - D_2}{D_2}G_3(\phi)) - D_2]\sigma_H(z) \tag{3.14}$$

$$p(z) = c\,D_1(3\ln\frac{D_1}{D_2} + 2\frac{D_1 - D_2}{D_2}\frac{c_0}{c}) + (D_1 - D_2)\sigma_H(z) \tag{3.15}$$

그림 3.7(c)는 H형말뚝의 경우이며, 이 경우는 플랜지와 웨브사이의 흙이 일체로 되어 움직일 것이 예상되므로 구형단면의 경우와 동일하게 생각하여도 무방할 것이다. 단, 이 경우의 말뚝과 지반사이의 점착력 c_0와 마찰각 ϕ_0는 지반의 점착력 c와 내부마찰각 ϕ를 사용할 수 있다.

따라서 $G_3(\phi) = N_\phi \tan\phi$와 $G_4(\phi) = 2N_\phi^{\frac{1}{2}}\tan\phi + 1$를 사용하여야 할 것이다. 또한 그림 3.7(d)는 그림 2.6에서 보는 바와 같이 파괴면 $\overline{AE}$ (또는 $\overline{A'E'}$)의 길이가 $\frac{1}{2}(D_1 - D_2)\tan(\pi/8 + \phi/4)$이므로 원형말뚝의 형상계수 $\frac{1}{2}\tan(\pi/8 + \phi/4)$로 정하는 것이 타당할 것이다.

이상의 결과를 정리하면 표 3.2와 같다.

표 3.2 말뚝의 형상계수 ξ

말뚝단면	박판형	정방형	구형 및 H형	원형
형상계수 (ξ)	0	1	B2/B1	$\frac{1}{2}\tan(\frac{\pi}{8}+\frac{\phi}{4})$

설계에 적용 가능한 측방토압력은 0에서 식(3.12)로 주어지는 최대치 까지의 값이다. 즉, 활동토괴의 변형과 함께 줄말뚝에 측방토압이 차츰 증가되어 말뚝주변지반만이 소성상태가 될 때에 위식으로 나타내는 최대치에 도달하게 된다.

여기에, 이상의 측방토압 부가정도를 나타내기 위하여 측압부가계수 α_m ($0 < \alpha_m < 1$)를 도입하면 식(2.23)과 같이 된다.

$$p_m(z) = \alpha_m \times p(z) \qquad (3.16)$$

여기서 α_m은 측압부가계수이다.

이 측압부가계수 α_m은 변수로 사용할 수 있다. 우선 임의의 가상 활동파괴면에 대하여 말뚝의 안전율이 1보다 크게 되도록 α_m을 결정한 후 사면의 안전율을 계산한다.

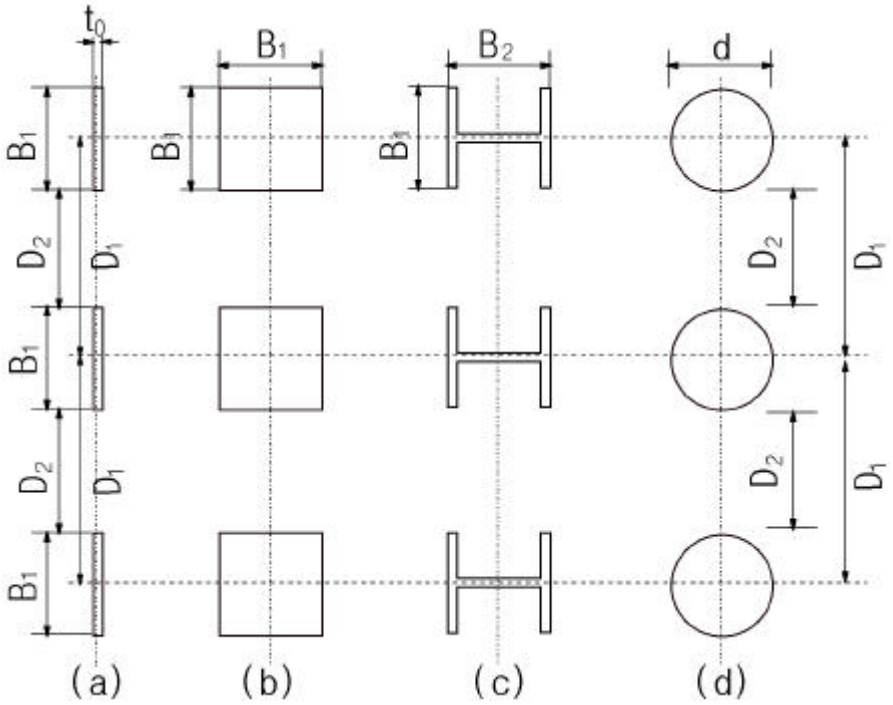


그림 3.7 각종 말뚝의 단면형상

3.3.3 사면안정 해석법

(1) 말뚝효과를 무시한 경우

일반적으로 사면의 안정해석에는 한계평형이론을 도입한 여러가지 방법의 사면안정해석법이 사용되어 오고 있다.

한계평형이론을 이용하여 안전율을 구하려면 활동면 각 점에서 전단응력과 전단강도를 구하여야만 한다. 따라서 활동효과를 연직절편으로 분할하고 절편에 대한 평형을 고려하게 되는데 이러한 방법을 절편법이라 하고 이때 각절편에서 발생하는 3n개의 미지수를 가정을 통하여 해결해 나간다. 각 절편에 작용하는 힘은 그림 3.8에 도시된 바와 같다.

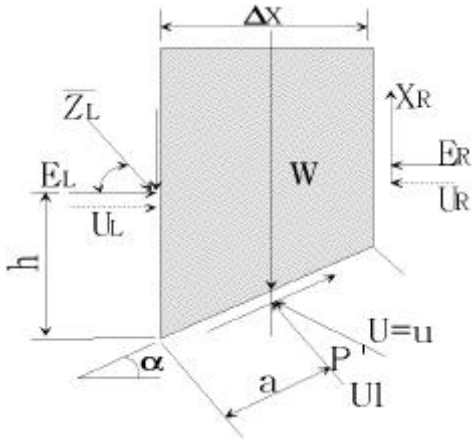


그림 3.8 분할요소에 작용하는 힘

X_L, X_R: **절편측면의 전단력(미지)**

W : **절편의 무게(기지)**

$T_m = \tau\, l$: **절편저면의 전단력(미지)**

$P' = p\ \ l$: **절편저면의 유효수직력(미지)**

$U = u\ \ l$: **절편저면의 간극수압(기지)**

E_L, E_R : **절편저면의 유효수직응력(미지)**

U_L, U_R : **절편저면의 간극수압(기지)**

α : **절편저면의 수평면과 이루는 각(기지)**

θ : E**와** X**의 합력이 수평면과 이루는 각(미지)**

h : E**의 작용점(미지)**

a : P'**의 작용점(미지)**

l : **절편저면의 길이(기지)**

GLE법에 의한 사면안전율은 모멘트의 평형조건과 힘의 평형조건으로 부터 다음과 같이 산정되어 진다.

$$F_m = \frac{\Sigma [c'l + (P - ul)\tan\phi']R}{\Sigma (W \cdot d - P \cdot f)} \quad (3.17a)$$

$$F_f = \frac{\Sigma [c'l + (P - ul)\tan\phi']\cos\alpha}{\Sigma P \sin\alpha} \quad (3.17b)$$

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

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

이 식은 안전율 항에 대한 비선형 형태의 식이므로 시행착오법으로 반복계산을 실시하여야 한다. 그러나 말뚝이 사면토괴내에 포함되어 있는 경우는 부정정 절편력을 명확히 알 수 없고 계산과정이 복잡하여 지므로 말뚝의 사면안정효과를 고려한 사면안정을 해석하기 위하여는 비교적 간단한 Fellenius법을 사용하는 것이 효율적이다.

이 방법에서는 사면안전율을 활동면 중심에서의 모멘트평형으로 구하고 각 분할절편간의 작용력의 합력은 평형하다는 가정이 고려된다. 분할절편저면에서의 전 수직응력 σ와 τ, 간극수압 u에 대해서는 식(3.19)와 같이 된다.

$$s = c' + (\sigma - u)\tan\phi' \quad (3.18)$$

이때 수정전단강도 $\tau = S/F$, $P = \sigma l$, $T = \tau l$를 대입하면 식(3.20)과 같이 된다.

$$T = \frac{1}{F}(c'l + (P - ul)\tan\phi') \quad (3.19)$$

여기서 $P = W \cdot \cos\alpha$

전체 분할절편에 대하여 고려하면 식 (3.20)과 같다.

$$\sum W\sin\alpha = \sum \frac{1}{F}(c'l + (P - ul)\tan\phi) \quad (3.20)$$

여기서 안전율 F를 말뚝안전율과 구분하기 위하여 $(F_s)_{slope}$로 표기하면 식 (3.21)과 같다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{(c'l + (W\cos\alpha - ul)\tan\phi)}{\sum W\sin\alpha} \tag{3.21}$$

(2) 말뚝효과를 고려한 경우

사면의 안정에 관하여는 그림 3.1(a)에 표시한 바와 같이 원호활동토괴 CADBC에 작용하는 활동모멘트 M_d와 저항모멘트 M_r의 비교에 의하여 그 안정이 검토된다. 따라서 사면의 안정에 대한 안전율 $(F_s)_{slope}$는 다음 식과 같이 표현된다.

$$(F_s)_{slope} = \frac{M_r}{M_d} = \frac{M_{rs} + M_{rp}}{M_d} \tag{3.22}$$

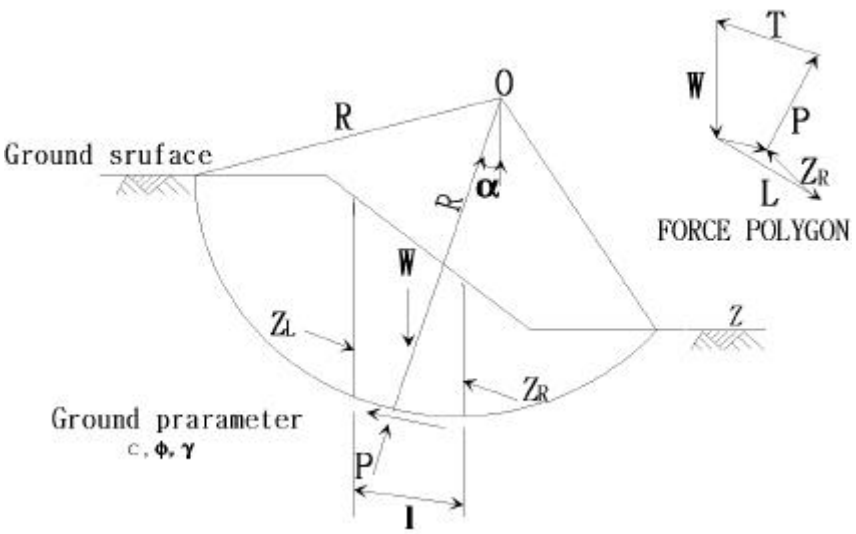


그림 3.9 Fellenius법

여기서 M_{rs}는 파괴면 DAC에서의 전단저항력에 의한 저항모멘트, M_{rp}는 AB면에서의 줄말뚝의 저항에 의한 저항모멘트이다. 식 (3.23)에서의 M_{rs} 및 M_d는 통상의 사면안정해석에 있어서의 분할법에 의하여 얻어진다.

3.3.4 "CHAMP" 프로그램

상기와 같은 이론에 의거하여 중앙대학교 기초연구실에서 개발된 프로그램(CHAMP : 과기처등록 프로그램)을 본 연구에 활용하였다. 이 프로그램은 통상적인 사면안정해석법에 말뚝의 효과를 고려할 수 있게 되어있다.

즉, 가상원호활동면을 기준으로 활동면이 교대기초와 교차하는 상부의 활동토괴로 부터 줄말뚝에 작용하는 토압을 산정하여 말뚝의 안정을 검토하며 말뚝이 안전한 범위내에서 말뚝이 저항할 수 있는 토압만을 사면의 안전율 계산에 추가시켜 사면안전의 기여도를 평가할 수 있도록 되어 있다. 그림 3.12는 본 프로그램의 흐름도이다.

가상원호활동면의 중심점으로 예상되는 부분에 Grid를 작성하여 Grid의 각 절점을 중심점으로 한 무수한 가상 원호활동면에 대하여 상기와 같은 계산작업을 반복하여 최소 사면안전율이 구하여지는 곳을 찾는다. 사면안정 계산은 한계평형원리에 입각한 분할법을 사용하였고 절편에 작용하는 부정정력은 서로 평형을 이루고 있다고 가정하였다.

각각의 원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다. 교대기초말뚝이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다. 교대기초말뚝이 설치되어 있지 않으면 곧바로 활동모멘트와 지반의 전단저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다. 말뚝이 설치되어 있으면, 먼저 줄말뚝에 작용하는 측방토압식을 사용하여 측방토압을 산정한다. 그 다음으로 원호활동면 상부의 말뚝부분은 활동토괴로부터 측방토압을 받고 이 측방

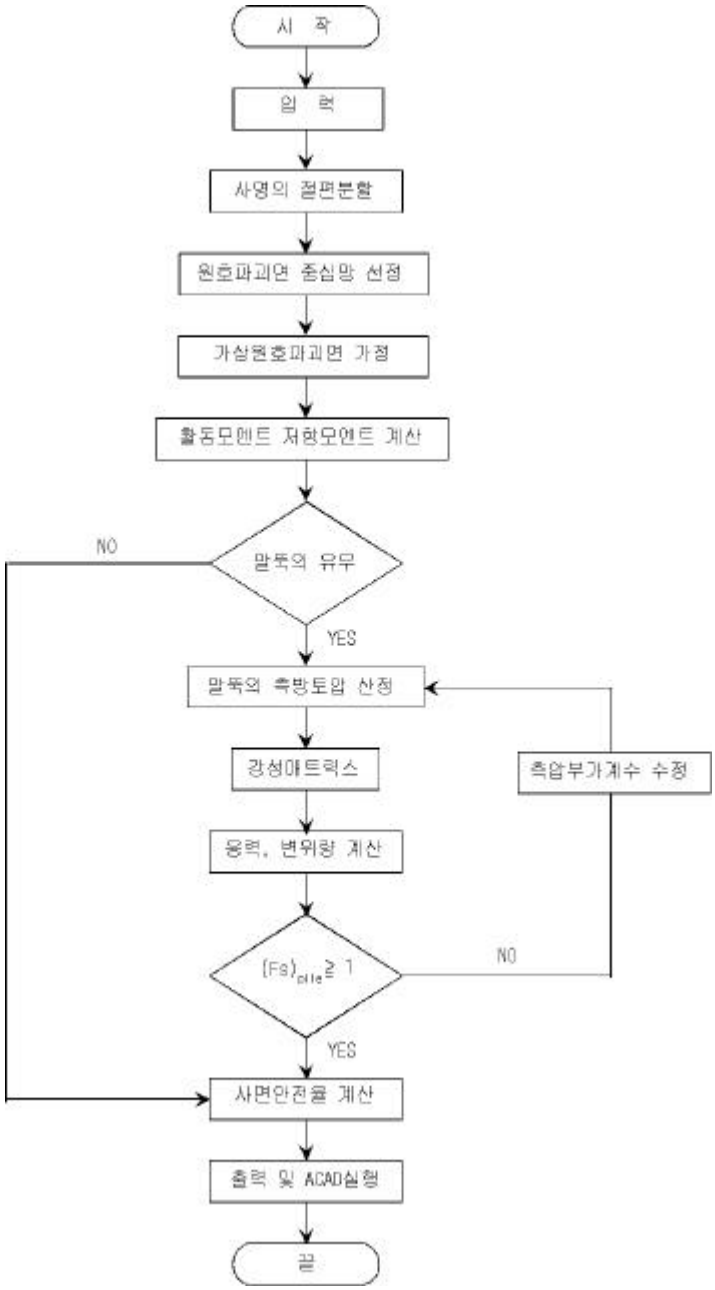


그림 3.10 CHAMP **프로그램의 흐름도**

토압에 의하여 발생된 말뚝의 수평변위에 대하여 말뚝이 지반으로부터 지반반력을 받도록 한 상태에서 말뚝머리와 선단의 구속조건을 고려하여 말뚝의 강성 Matrix를 구한다.

말뚝의 휨응력과 전단응력 및 변위량을 계산하여 말뚝의 안전율을 계산한다. 만약 말뚝의 안전율이 소요안전율보다 낮으면 측압부가계수 m값을 수정하여 말뚝의 측방토압을 감소시켜 반복 계산하여 말뚝의 안전율이 소요안전율 이내가 될 때까지 반복한다.

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

이러한 계산작업은 다른 가상원호활동면에 대하여도 반복 실시하여 한 중심점에 대한 무수한 가상원호활동면중 최소안전율을 가지는 활동면과 안전율을 구한다. 또한 이 중심점을 Mesh상의 각 절점으로 이동시키면서 동일한 계산을 반복 수행한다.