

# 흙막이 구조물(V)

최 정 범\*

## - 엄지말뚝과 흙막이 널 벽체

흙막이 구조물을 강성벽체(rigid wall)와 연성벽체(flexible wall)로 구분하여 지칭하는 것이 보편화되어 있다. 본 강좌에서는 후자인 연성벽체 중에서도 현재 도심지 지하굴착공사시 널리 사용하고 있는 엄지말뚝을 주체로 한 흙막이 공법에 관하여 기술하기로 한다.

### 1. 개요

이 공법은 미리 지중에 타입되었거나 매입되어 있는 강재 엄지말뚝에 굴착에 따라 목재의 수평널판을 끼워서 토류벽을 시공하는 공법이다. 강재말뚝은 일반적으로 1.5m, 1.8m, 2.0m 간격으로 설치되는데, 이 강재말뚝을 엄지말뚝(soldier pile)이라 부른다.

엄지말뚝으로서는 통상 H-300 × 200 × 9 × 14 또는 H-300 × 300 × 15 × 15가 주로 사용된다.

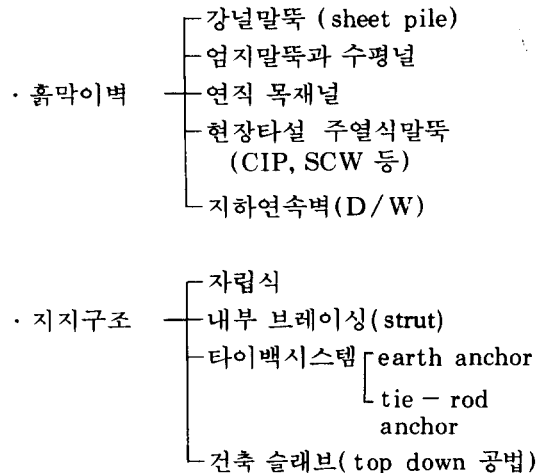
또한 CIP(주열식 현장타설말뚝)와 SCW(소일 시멘트 벽) 공법에 일정간격으로 H형 강재를 삽입함으로써 벽체의 강성을 높이고 아울러 수평널판 시공으로 인한 문제점을 보완하여 배면지반 침하를 최소화 시키는 변형된 엄지말뚝

공법도 많이 사용되고 있다.

### 1.1 흙막이 벽의 종류

흙막이 벽은 토질조건 및 지형조건, 부지 주변에 미치는 영향과 공사비, 공기 및 시공성 등을 고려하여 적합한 형식이 선정되어야 한다.

일반적으로 사용되는 흙막이 벽과 지지구조(지보공)는 다음과 같다.



이들 중에서 흙막이 벽으로 많이 사용되는 엄지말뚝 + 수평널공법과 현장타설 주열식 말

\* 정희원, 새길엔지니어링 대표이사

뚝공법 그리고 지지구조체로 일반적인 버팀대 (strut)와 어스앵커 공법에 대해 그 장단점을 비교하면 다음 표 1.1 및 1.2와 같다.

표 1.1 흙막이 벽의 비교

공 법	엄지말뚝 + 수평널 벽체	현장타설 주열식 말뚝
시 공 순 서	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 엄지말뚝 시공</li> <li>2. 지반굴착</li> <li>3. 수평널 시공</li> <li>4. 지지체 시공</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. auger로 소정의 깊이까지 천공</li> <li>2. auger의 선단에서 몰탈을 압입 하면서 auger를 끌어 올림.</li> <li>3. 몰탈중에 철골 혹은 철근 삽입</li> <li>4. 지반굴착</li> <li>5. 지지체 시공</li> </ol>
장 점	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 일반적으로 경제적</li> <li>2. 엄지말뚝 타입에 따른 공기가 타 공법에 비해 짧다.</li> <li>3. 개수성 공법이기 때문에 수압이 작용하지 않음.</li> <li>4. 엄지말뚝의 회수시 재사용이 가능하다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 소음·진동이 적고, 주변 지반침하를 적게 유발시킴.</li> <li>2. 천공중에 공벽의 붕괴가 없다.</li> <li>3. 기계의 성능이 향상되어 견고한 지반에서도 시공이 가능하다.</li> <li>4. 말뚝의 주변마찰력이 증대되어 지지력이 증가됨.</li> <li>5. overlap시켜 시공할 경우 차수성이 높은 흙막이 구조체로 활용이 가능.</li> </ol>
단 점	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 수위조절이 불가함.</li> <li>2. 지층이 느슨하거나 연약하여 일시적인 자립이 불가능한 곳에서는 시공 불가</li> <li>3. 엄지말뚝을 타입할 경우 소음, 진동이 발생된다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 교차하여 시공이 이루어지므로 작업대설치가 이중이 된다.</li> <li>2. 공기가 길어 공사비가 증가됨.</li> <li>3. 말뚝이 매설되므로 회수 및 재사용이 불가능함.</li> </ol>

표 1.2 지지구조체의 비교

공 법	Earth + Anchor 공법	Strut 공법
시 공 법	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 흙막이 벽 시공</li> <li>2. 단계별 굴착후 띠장(wale)설치</li> <li>3. earth anchor hole 천공</li> <li>4. earth anchor 시공</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 흙막이 벽 시공</li> <li>2. 단계별 굴착후 띠장(wale)설치</li> <li>3. 버팀대(strut) 설치</li> </ol>
적 용 조 건	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 굴착면적이 넓을 때</li> <li>2. 양호한 anchor 정착층이 있고 지하수위가 높지 않을 때</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 굴착면적이 중규모 이하로서 평면형상이 사각형일 때</li> <li>2. 주위 지반이 연약한 경우</li> <li>3. 외부 용지에 여유가 없을 때</li> </ol>
장 점	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 작업공간을 최대한 이용하여 중기운용이 가능하므로 시공능률이 좋다.</li> <li>2. 굴착 평면이 큰 경우에는 버팀 공법보다 편리하다.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 비교적 변형이나 파괴를 일찍 판별할 수 있다.</li> <li>2. 굴착면적이 좁으면 anchor 보다 저렴할 수도 있다.</li> </ol>

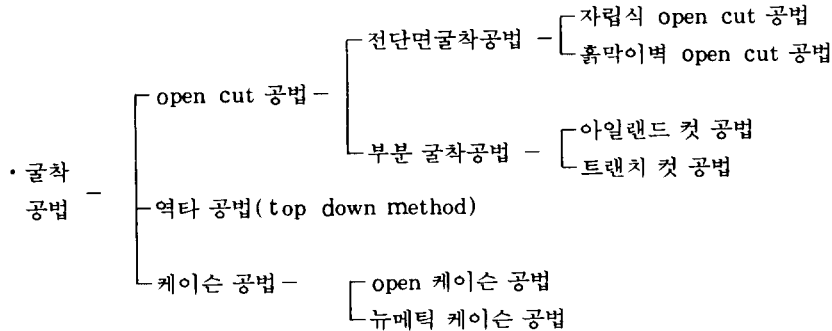
	3. anchor의 국부적인 파괴가 토류 구조물 전체의 파괴로 이어지지 않는다.	
단 점	1. 이웃대지에 까지 anchor가 침범하여 민원발생 요지가 있다. 2. 정착지반이 연약한 경우 적합치 않다.	1. strut의 국부적 파괴가 토류 구조물 전체에 치명적이다. 2. 넓은 지역에서는 사용이 곤란하며 고가이어서 시공이 곤란하다.

## 1.2 굴착공법의 종류

지하에 구조물을 구축하려면 지반을 어떤 공법에 의해서든 굴착해야 하는데 이때 어떤 공법을 채택하여 시공할 것인지는 경제성 및 시공의 안정성을 고려하여 대지의 조건이나 토질 조건이 각 굴착공법의 특징과 일치하는지를 검토하여 선정할 필요가 있다.

도심지역에서의 굴착공사 대부분은 흙막이에 의한 개착공법(흙막이 open cut 공법)이다. 흙막이 open cut 공법이란 흙막이벽이나 버팀대·띠장등의 지보공을 설치하여 이에 의해 토사의 붕괴를 막으며 굴착을 진행하는 공법으로 지보공의 종류와 굴착방법에 의해 아래 표 1.3과 같이 분류할 수 있다.

표 1.3 굴착공법의 종류



## 2. 연성 흙막이 벽의 토압분포

흙막이 벽에 작용하는 수평하중은 토압과 수압, 그리고 상재하중과 활하중과 활하중의 충격등에 의한 영향이 모두 고려된 합계치로서 이 값의 크기나 분포상태는 지반조건, 벽체의 변형, 배수조건 및 굴착의 시공조건에 따라 변화하기 때문에 이론적인 수식으로 나타내기는 곤란하다. 따라서 흙막이 구조물 계산에 있어서는 과거의 실측이나 경험에 의해 제시되고 있는 측압분포형을 여러가지로 비교 검토하고 덧붙여, 토질의 제정수는 지반조사 결과를 기

준으로 추정하고 여기에 시공의 실정을 고려한 다음, 안전하다고 생각되는 측압을 결정한다.

즉, 흙막이벽 설계시 사용되는 토압으로는 여러가지 규준과 이론중 가장 적당하다고 판단되는 것을 사용하여 구조계산을 실시하는 것이 일반적이다.

본 강좌에서는 연성벽체의 시공시 가장 널리 사용되고 있는 Terzaghi - Peck 방법에 관하여만 기술하기로 하고, 기타 방법론에 관해서는 이전에 발표된 강좌를 참조하기 바란다.

Terzaghi - Peck 방법에서의 토압이라는 것은 토류벽 배면에서 작용하는 토압을 균등하게

분포시킨 것이 아니고, 토류벽 strut에 가해지는 최대하중을 산정하기 위해 만든 토압의 포락선이며 이러한 토압 형태를 겉보기 토압(apparent earth pressure) 또는 경험토압이라 한다. 토압분포도에서의 strut 하중의 산정은 그림 2.1에 표시되어 있듯이, 엄지말뚝이나 sheet pile은 각단 strut에 대해 지점의 위치로 분할한 단순보로 간주하고 그 반력을 구한다. 단, 최상단의 엄지말뚝에 관해서는 2단의 strut 설치 위치까지를 하나의 보로 간주해서 반력을 구한다. 그림 2.2는 각 지반에 대한 겉보기 토압분포도를 나타낸 것이다.

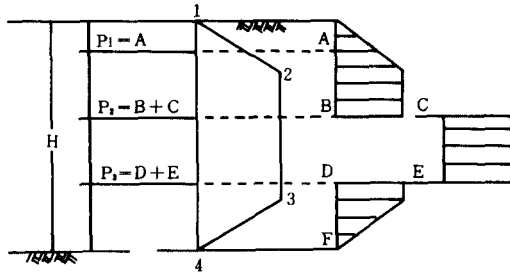


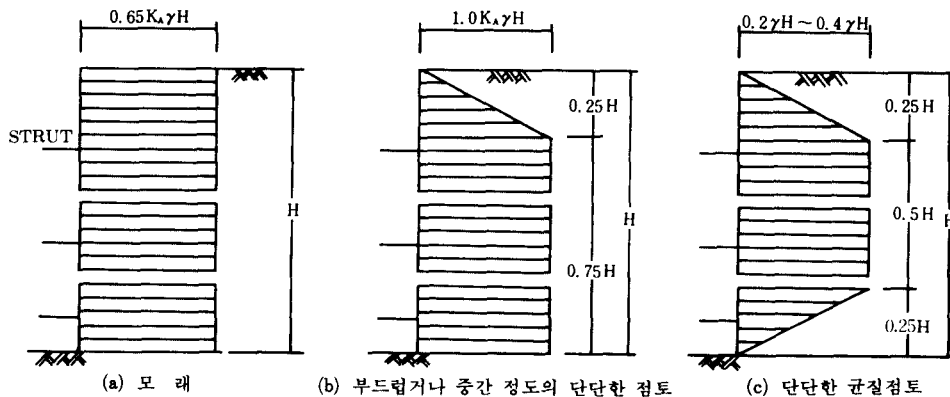
그림 2.1 겉보기 토압 분포도에서 Strut 하중의 산정방법

겉보기 토압 분포도는 엄지말뚝 기초지반의 지지가 충분하고 또 엄지말뚝이 어느 정도의 강도를 가지고 있는 경우에 적용되는 것이다. 가설구조물의 대형사고는 엄지말뚝의 밀넣기 부가 배면에 작용하는 토압에 의해 굴착측의 방향으로 크게 휘어서 생기는 경우가 많다. (그림 2.3 참조)

이 경우 엄지말뚝의 정점부는 그림 2.3에 보듯이 굴착측과 반대방향(배면 방향)으로 회전한다. 이 때문에 최상단의 strut 하중은 '0'이 되고 엄지말뚝 배면의 토압은 주로 2단 이하의 strut에서 받는다. 그림 2.4에서 보듯이 하방의 하중은  $m = 0.4$ 로 산정된 겉보기 토압 분포도의 값 보다는 훨씬 커진다.

여기서,

- $P_A$  : 설계용 최대 주동토압
- $K_A$  : 주동 토압계수
- $\gamma$  : 흙의 습윤 단위 체적중량
- $H$  : 굴착깊이
- $\phi$  : 흙의 내부 마찰각
- $C$  : 흙의 점착력
- $m$  : 토압 보정 계수(체감률)



$$K_a = 1 - m \frac{4C_u}{\gamma H}$$

$m$  : 체감률

그림 2.2 Tezaghi - Peck의 겉보기 토압 분포도 (1969)

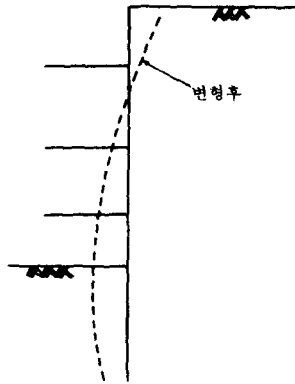


그림 2.3 엄지말뚝의 변형

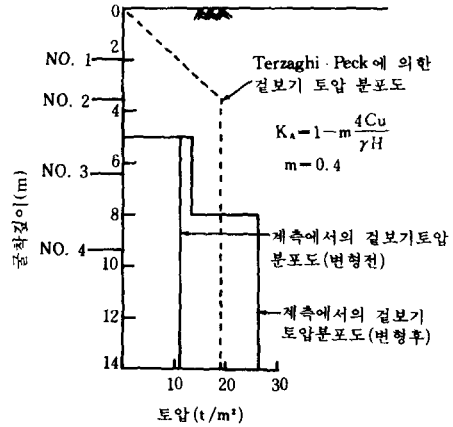


그림 2.4 엄지말뚝의 큰 변형시 Strut 하중에서 구한 토압분포도(Terzaghi - Peck 토압분포도와 비교)

사에서 추가적으로 고려해야 할 항목이다.

(1) 안전율

다음 표 3.2는 각종 토류구조물 설계시 적용하고 있는 안전율의 기준치의 일례를 나타낸 것이다.

(2) 허용 응력도

흙막이용 강재 SS41의 허용응력도는  $\sigma_{sa} = 1,400\text{kg/cm}^2$ 을 사용하고 있는데 가설구조물에 대해서는 이 값의 1.5배를 취하고 있다.

다음 표 3.3 및 표 3.4는 국내 서울지하철 기준과 구조물 설계지침에 명시된 강재 및 목재의 허용응력도이다.

### 3. 가설흙막이 구조물의 설계방법

#### 3.1 개요

굴착공사를 위한 가설구조물 설계시에는 표 3.1에 표시된 각각의 항목에 관해서 검토하는 것이 일반적이다.

이중 흙막이벽의 안정성, 지보공의 안정성, 굴착저면의 안정성은 항시 어느 경우나 검토할 필요가 있고, 주변 구조물에 대한 안정성 검토와 지하수 처리에 관한 문제는 도십지 굴착공

표 3.1 굴착공사 설계에 있어서 검토 항목

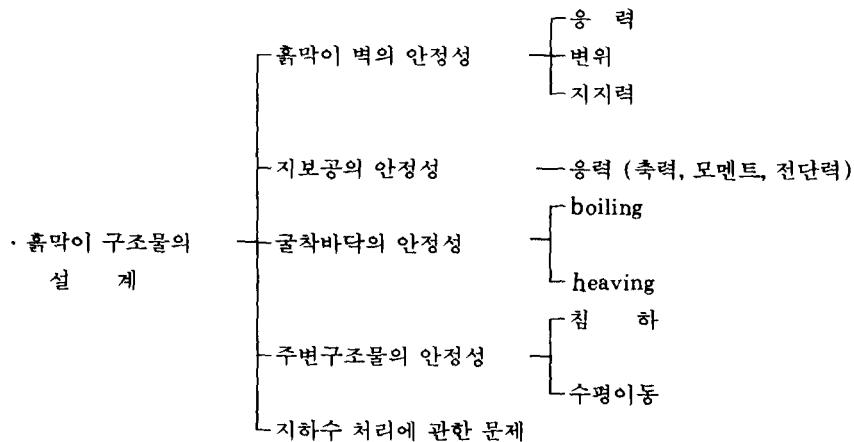


표 3.2 구조물 설계시 적용되는 안전율의 일 예

조 건	기 준 치	비 고
지반의 지지력	3.0	
옹벽의 전도, 미끄러짐	1.5	
가설 흙막이 벽의 경우 극한 지지력에 대해	1.3	
가설 구조물에 쓰이는 앵커	1.3~1.5	통상 1.5
영구 구조물에 쓰이는 앵커(단기하중)	2.0	
영구 구조물에 쓰이는 앵커(장기하중)	3.0	

표 3.3 강재의 허용응력도

(단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

종 류		일반구조용 압연강재 SB - 41, SWS41	SB - 50	비 고
축 방 향 인 장 (순 단 면)		2,100	2,550	1,400×1.5 = 2,100 1,700×1.5 = 2,500
축 방 향 압 축 (총 단 면)		$\frac{\ell}{r} \leq 20$ 일 경우 2,100	$\frac{\ell}{r} \leq 17$ 일 경우 2,550	$\ell$ (cm) : 유효좌굴장 $r$ (cm) : 단면 2차반경
		$20 < \frac{\ell}{r} \leq 93$ 일 경우 $2,100 - 13(\frac{\ell}{r} - 20)$	$17 < \frac{\ell}{r} \leq 86$ 일 경우 $2,550 - 16.9(\frac{\ell}{r} - 17)$	
		$\frac{\ell}{r} > 93$ 일 경우 $\frac{18,000,000}{2,700 + (\frac{\ell}{r})^2}$	$\frac{\ell}{r} > 86$ 일 경우 $\frac{18,000,000}{2,700 + (\frac{\ell}{r})^2}$	
휨 응 력	인 장 연(순 단 면)	2,100	2,550	
	압 축 연(총 단 면)	$\frac{\ell}{b} \leq 4.5$ : 2,100	$\frac{\ell}{b} \leq 4.5$ : 2,550	$\ell$ : flange의 고정점간 거리 $b$ : 압축 flange의 폭
		$4.5 < \frac{\ell}{b} \leq 30$ $2,100 - 36(\frac{\ell}{b} - 4.5)$	$4.5 < \frac{\ell}{b} \leq 30$ $2,550 - 48(\frac{\ell}{b} - 4.3)$	
전 단 응 력(총 단 면)		1,200	1,500	
지 압 응 력		3,150	3,750	강판과 강관
용 접 강 도	공 장 현 장	모재의 100% 모재의 90%		

표 3.4 목재의 허용응력도

(단위 : kg/cm<sup>2</sup>)

목재의 종류		침엽수	활엽수
허용응력도 종류			
인장응력도	섬유에 평행	160	200
휨응력도	-	180	240
지압응력도	-	160	220
	섬유에 직각	40	70
전단응력도	- 평행	16	24
	- 직각	24	36
축방향 압축응력도	섬유에 평행	$\frac{l}{r} \leq 100$ $140 - 0.96 (\frac{l}{r})$	$\frac{l}{r} \leq 100$ $160 - 1.16 (\frac{l}{r})$
	-	$\frac{l}{r} > 100$ $440,000 (\frac{l}{r})^2$	$\frac{l}{r} > 100$ $440,000 (\frac{l}{r})^2$

표 3.5 좌굴장 기준

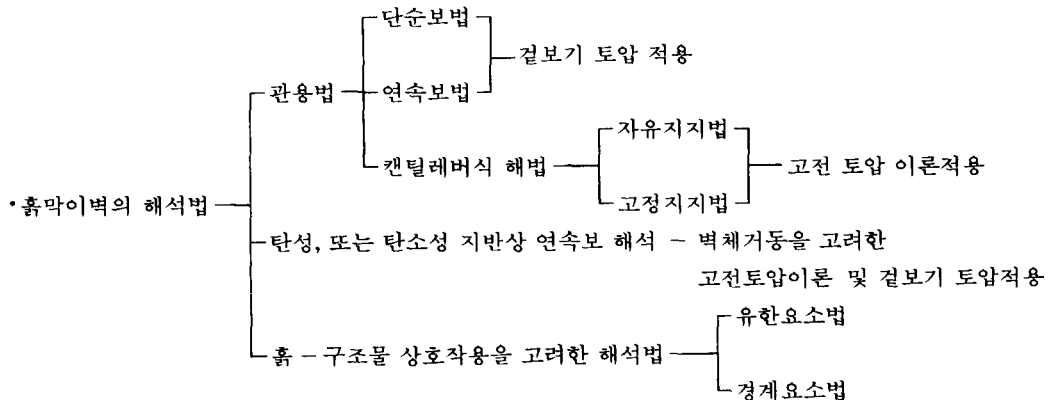
	양단힌지	양단고정	1단힌지타단고정	1단자유타단고정
단부의 지지상태				
K.L	l	0.5l	0.7l	2l

이때 사용되는 각부재의 좌굴장은 Euler's Formula를 따르며 서울 지하철 규정에 다음 표 3.5와 같이 제시하였다.

3.2 설계 방법

흙막이 가설 구조물은 굴착의 진행에 따라 띠장(어스앵커용 또는 버팀대용)이 가설 되며, 버팀대의 철거, 되메우기가 차례로 진행되므로 그 순서에 맞추어서 각 공사 단계마다의 하중,

표 3.6 흙막이벽 해석법 분류



외력, 지지조건을 대상으로 하여 가설구조물을 검토할 필요가 있다. 표 3.6은 현재 이용되고 있는 흙막이벽의 응력과 변형의 계산방법을 분류하고 있다. 여기서 겉보기 토압은 굴착후 Strut 등 지지체의 설치가 완료된 후의 재분배된 토압임을 명심하여야 한다.

흙막이 구조물의 계산방법에는 아직 확립된 이론이 없다. 이것은 흙의 성질이 극히 복잡하고, 실제로 흙막이 가설구조물에 작용하는 측압이나 지반의 파괴, 혹은 침하의 상태 등에 대해서 아직 불분명한 점이 많기 때문이다. 본 강좌에서는 토질역학과 구조역학의 기초적인 해석방법으로써 예전부터 자주 이용되는 관용계산법에 관해 기술하고자 한다. 현재 사용되고 있는 보통의 흙막이벽 계산법은 밀წ기 길이 1.0~2.0m인 곳에 가상지지점을 생각하여 이와 버팀대 위치를 지점으로 해서 연속보 또는 단순보로서 흙막이 벽의 휨모멘트를 계산하고 있다.

수평버팀대 공법에 의한 흙막이벽 설계시의 계산순서는 다음 표 3.7과 같은 순서로 행한다. 여기서는 H - pile 단면계산에 중점을 두어 설명하기로 한다.

#### (1) 토질정수의 추정

토류벽에 작용하는 측압을 결정하는 단계에서 대상 지반의 고유성질을 표시하는  $r_i, c, \phi$  등의 구체적인 수치가 필요하다.

이것들은 통상 지반조사보고서 또는 기타 조사결과에 의하여 가정하고 있으나 토질시험결과가 자연상태의 흙과 다른 결과를 나타내는 경우도 있으므로 잘못이 없도록 판단을 신중하게 해야 한다.

#### (2) 응력계산

가. H - pile의 밀წ기 길이 검토

H - pile 밀წ기장은 연직하중이나 측압, heaving, boiling에 대해서 안전하도록 검토한다. 측압에 대한 H - pile 밀წ기 길이의 검토는 다음 식에 의한다.

$$F_s = \frac{M_p}{M_A} > 1.2$$

여기서,  $F_s$  : 안전율

$M_A$ : 최하단 버팀대 위치를 지점으로 하는 주동 측압에 의한 모멘트

$M_p$ : 최하단 버팀대 위치를 지점으로 하는 수동 측압에 의한 모멘트

#### 나. 가상 지지점 산정

일반적으로 가상 지지점의 위치는 밀წ기 깊이가 검토시 사용되는 수동측압의 합력위치를 사용하거나 Lohmeyer에 의해 제안된 추정치를 사용한다.

아래에 각 방법에 대한 계산방법을 기술한다.

#### ① 기초파기 바닥 이하의 수동측 토압 중심점

그림 3.1에 도시된 바와 같이 최하단 지지점을 중심으로  $M_r = M_d$ 가 되는 저항토압의 중심점을 구하여 이것을 가상지지점으로 생각한다.

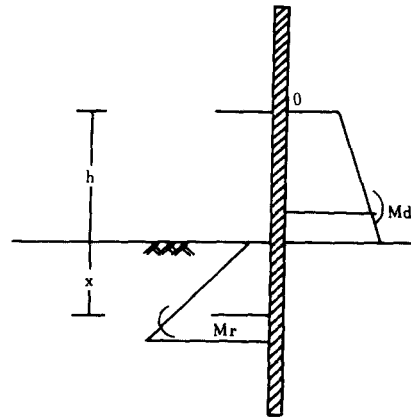


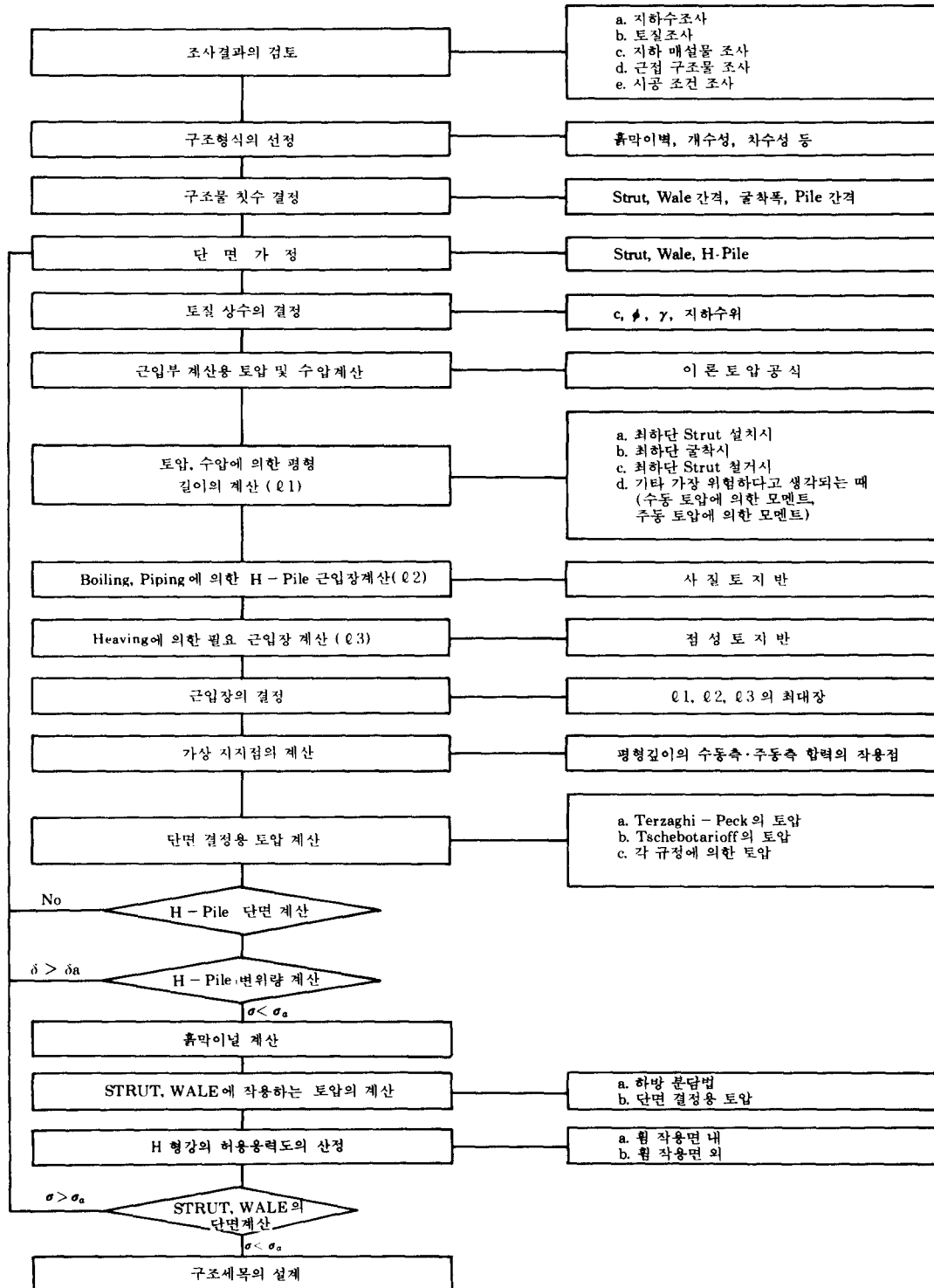
그림3.1 가상지지점 위치

#### ② 모래지반에 대한 $\phi$ 에서의 추정치

그림 3.2와 같은 흙막이구조물에서 모래지반의 경우, Lohmeyer는  $\phi$ 값에 따라 지지점 위치를 표 3.8과 같이 추정하였다.



표 3.7 가설흙막이 구조물의 설계 순서



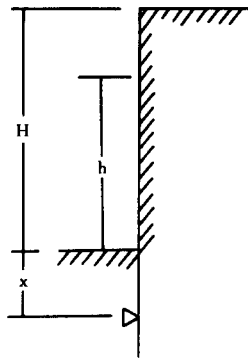


그림3.2 가상 지지점의 위치

표 3.8 Lohmeyer 의 토중지점

X	$\phi$
0.25 h	20°
0.16 h	25°
0.08 h	30°
0.035 h	35°

다. 흙막이 벽의 응력산정

① 약산법 1

굴착지반이 비교적 양호하거나 주변에 중요 구조물이 없는 경우에는 현재까지 가장 널리 사용된 관용 설계법에서는 최종적으로 굴착을 완료하고 버팀대 가설을 끝낸 상태에서 엄지말뚝을 버팀대 지점간의 단순보 혹은 연속보로서 취급하여 전장에서 구한 하중에 관한 반력 및 휨모멘트를 구한다.

즉 굴착바닥을 고정단으로 가정하거나 혹은 가상 지지점을 한지로 취급하여 엄지말뚝을 연속보로 취급하고 구조역학적으로 부정적 구조물 해석을 하게 된다.

② 약산법 2

전술한 약산법 1의 방법은 계산 과정은 비교적 간단하나 일반적으로 휨모멘트 값이 위험측의 결과를 주게 된다. 따라서 흙막이벽의 응력은 굴착의 각 단계에 있어서 토류벽의 내측에 의 이동, 변형과 관련되어 산정할 필요가 있다.

약산법 2에서는 이와 같은 점을 고려하기 위하여 그림 3.3에 표시한 것 처럼 2차 굴착 이후에는 각 굴착 단계마다 전술한 바와 같이 지중에 가상의 지지점을 가정하여 그 가상 지지점과 상부의 버팀대를 단순보로 가정하고 각 버팀대로 부터 각 단계 굴착바닥면까지의 측압을 받는다고 생각하여 반력, 휨모멘트를 구한다.

여기서 전단계의 가상 지지점이 굴착된 경우에는 그 전단계에서 구한 가상 지지점 반력을 그점에서의 집중하중으로 생각한다. 이상의 과정을 반복하여 최종 굴착까지의 각 단계의 휨모멘트를 모두 합한 것을 흙막이벽 전체에 생기는 휨모멘트로 한다. 물론, 변형을 구하는 경우에도 각 단계마다 계산하여 처짐을 누가하는 것으로 한다. 또한 여기서 구한 버팀대 점의 반력을 그대로 지보공 계산의 띠장 반력으로 써도 좋다.

3단계로 나누어 터파기하는 경우의 엄지말뚝의 최대 휨모멘트를 구하는 방법을 그림 3.3에서 설명하였다. 그림중 기호는 아래와 같다.

2M(x) : 1단 버팀대 점을 0으로 해서 아래쪽에 거리 X점의 측압에 의한 휨모멘트

3M(x) : 2단 버팀대 점을 0으로 해서 아래쪽에서 거리 X점의 측압에 의한 휨모멘트

3M'(x) : 2단 버팀대 점을 0으로 해서 아래쪽에서 거리 X점의 2차 굴착 가상 지지점 반력 2Rz의 해방에 의한 휨모멘트

3X<sub>m</sub> : 3M(x)가 최대가 되는 2단 버팀대 점에서의 거리

(3) 엄지말뚝의 변위검토

엄지말뚝의 변위는 자립식 흙막이 벽의 변형량이나 제1단 버팀대 설치 위치를 결정하기 위해 버팀대 설치전의 처짐을 검토할 목적으로 행한다.

① 기준치

엄지말뚝의 변위를 검토하기 위해서는 일반적으로 굴착바닥면에서의 변위와 말뚝 상단에서의 변위를 구하여 이들 값이 선정된 기준치를 넘지 않도록 설계해야 한다. 엄지말뚝 변위

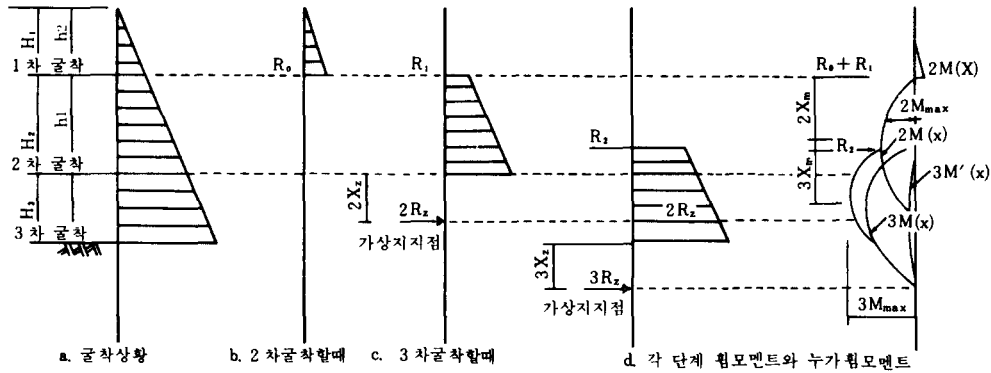


그림3.3 홑막이벽 응력산정법 설명도

의 기준치로는 각 현장마다 다소 차이가 있으나 통상 아래의 값을 억제 기준치로 사용한다 (서울지하철 설계기준 참조).

○ 굴착바닥

점성토 - 1cm

사질토 - 0.3 cm

○ 엄지말뚝 상단 - 3cm

단, 엄지말뚝 상단의 변위가 3cm를 넘는 경우에는 두부연결 부재를 별도로 설치하던가 사용부재를 변경해야 한다.

② 자립식 엄지말뚝의 처짐검토 방법

아래 그림 3.4에서 굴착바닥의 변위와 하중점에서의 변위는 Chang의 이론식으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\delta_r = \frac{Pa}{2EI} \cdot \frac{(1-\beta h')}{\beta^3}$$

$$\text{여기서 } \beta = \left( \frac{Kh \cdot B}{4EI} \right)^{1/4}$$

$K_h$  : 수평방향 지반반력계수 ( $\text{kg/cm}^3$ )

$B$  : 엄지말뚝의 플렌지 폭 (cm)

$I$  : 엄지말뚝 단면 2차모멘트 ( $\text{cm}^4$ )

$E$  : 엄지말뚝 탄성계수 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$P_a$  : 주동 토압 (kg)

$$\delta_o = \frac{Pa}{3HI} \cdot \frac{\{(1+\beta h')^3 + 1/2\}}{\beta^3}$$

엄지말뚝 두부의  $\delta$ 는 다음 그림 3.5에서 도출한 바와 같이 하중점에서의 변위  $\delta_o$ 와 경사각  $\alpha$ 로부터 구한다.

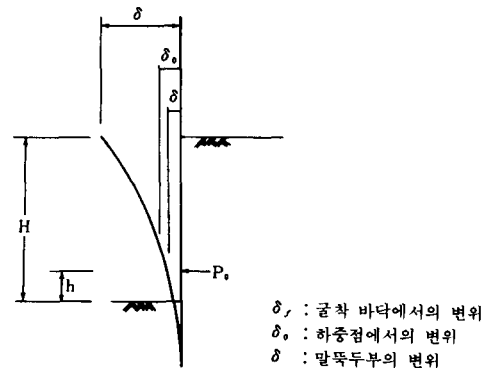


그림3.4 엄지말뚝의 변위

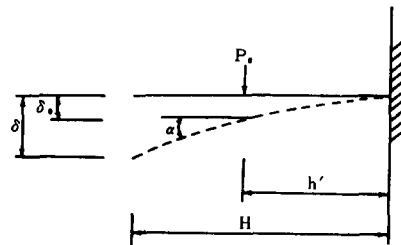


그림3.5 엄지말뚝 두부의 변위

하중점에서의 경사각  $\alpha$ 는 다음식에 의하여 산정한다.

$$\alpha = \frac{Pa}{2EI} \cdot \left( \frac{1+\beta h'}{\beta} \right)^2$$

윗 식으로부터 경사각  $\alpha$ 가 구해졌으며 다음식에 의해 엄지말뚝 상단의 변위  $\delta$ 를 구한다.

$$\delta = \delta_0 + \alpha (H - h')$$

#### (4) 단면검토

응력 산정에서 얻은 모멘트와 전단력에 대해서 다음과 같이 단면을 검토한다.

엄지말뚝의 경우 흙막이벽 전체로서의  $M_{max}$ ,  $Q_{max}$ 에 대해서 단일 부재로 설계되어야 하며 보통 sheet pile과는 달리 응력을 엄지말뚝 간격마다 환산해서 산정한다. 엄지말뚝은 재사용이 되기도 하므로 실제로 사용하는 것에 대해서 단면 결손이나 이음 상황을 고려해서 저감된 단면의 허용 응력을 고려해야 한다.

단면검토식은 다음과 같다.

##### ① 휨에 대한 검토

$$\sigma_b = \frac{M_{max} \cdot a \cdot y}{I}$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_b} < 1$$

여기서,  $\sigma_a$  : 엄지말뚝의 허용 응력(표 3.3 참조)

$\sigma_b$  : 외력에 의해 발생된 응력

$M_{max}$  : 외력에 의한 최대 휨모멘트

$a$  : 엄지말뚝 간격

$y$  : 엄지말뚝 단면의 중심선에서 최외곽까지의 거리

$I$  : 엄지말뚝의 단면 2차 모멘트

##### ② 전단에 대한 검토

$$\tau_b = \frac{Q_{max} \cdot a}{As}$$

$$\frac{\tau_a}{\tau_b} < 1.0$$

여기서  $\tau_a$  : 엄지말뚝의 허용전단응력(표 3.3 참조)

$\tau_b$  : 외력에 의해 발생된 전단 응력

$Q_{max}$  : 외력에 의해 발생된 최대 응력

$As$  : 엄지말뚝 단면의 면적

## 4. 굴착바닥면의 안정

### 4.1 일반적 고려 사항

굴착바닥면이 안정되기 위한 흙막이 벽의 밀내기 깊이는 다음의 각 조건에 대하여 고려하여 결정되어야 한다.

흙막이 벽의 밀내기 깊이의 계산시 다음 조건에 대하여 고려해야 한다.

- 상재하중에 대한 말뚝의 지지력
- 밀내기부에 작용하는 주동토압과 수동토압에 대한 안정
- 연약한 점토지반에 있어서 heaving 현상에 대한 안정
- 차수성 벽체인 경우의 모래지반에 있어서의 boiling 현상에 대한 안정

일반적으로 밀내기 깊이 계산은 (b)항의 주동토압과 수동토압의 모멘트가 균형을 이루는 깊이로부터 구하고 (a), (c) 및 (d)항에 대한 안정 검토를 수행한다.

#### 4.1.1 흙막이의 말뚝의 지지력

각종 조사결과 및 시공 경험상 흙막이 말뚝의 지지력은 N 치 30이상의 사질토층과 고결 점토층 및 N 치 10이상의 점토층에 3m 이상 관입시키면 지지력을 계산하지 않아도 된다.

여기서 관입이란 earth auger 등으로 pre-boring 한 것이 아니고 타격에 의해 관입시킨 것이다. 밀내기깊이에 연약지반이 있는 경우에는 허용지지력을 계산하여 축방향 수직력에 충분히 안전해야 한다.

일반적으로 양질의 지반에 3m 이상 관입시키는 경우 이외에는 극한 지지력을 계산에 의해 구하고 그 값을 안전율 2로 나눈 값을 허용 지지력으로 한다.

- 극한 지지력

극한지지력은 다음의 정역학적 공식에 의해 구하는 것이 가장 보편적이고 편리하다.

$$Q = A \cdot q_d + \alpha \cdot \beta \cdot R_c$$

여기서,

Q : 극한 지지력(t)

A : 말뚝의 양 플랜지로 둘러 쌓인 면적 (m<sup>2</sup>)

q<sub>d</sub> : 말뚝 선단지반의 극한지지력 (t/m<sup>2</sup>)

α · β : 시공에 따른 상수 (표 4.1)

R<sub>c</sub> : 극한 주변 마찰력 (= U · ℓ · C)

c : 말뚝 주변의 점착력

U : 말뚝 주변 길이

ℓ : 각 지층내의 말뚝 길이

표 4.1 α · β의 값

α	Pre-boring에 의한 시공	물 탈 충전	0.8
		모래 충전	0.5
	충격에 의한 시공(Vibrating Hammer 시공)		1.0
β	말뚝주위에 흙이 있을 때(밀넣기 부분)		1.0
	말뚝의 일면이 굴착될 때(흙막이 말뚝의 굴착부분)		0.5

말뚝의 지지력을 구하는 식은 여러가지가 있으나 부산지하철 건설공사 설계지침서에는 말뚝이 선단지지력에 의해 지지될 때는 Meyerhof식을, 말뚝이 마찰말뚝으로 지지될 때는 Dörr 식을 이용하도록 권장하고 있다.

(2) 축방향 수직력

흙막이 말뚝에 작용하는 축방향 수직력은 노면 복공자중과 그 위에 상재하게 될 자동차 하중 및 중장비 자중의 합으로 계산될 수 있다. 또한 강말뚝 배면 흙이 배수 등으로 침하할 우려가 있는 경우에는 부마찰력을 축하중으로 가산해야 한다.

$$F_n = S \cdot L \cdot U$$

여기서,

F<sub>n</sub> : 부의 주변 마찰력

S : 흙의 전단저항력

L : 말뚝의 관입길이

U : 말뚝의 주변장

4.1.2 밀넣기부에 작용하는 주동토압과 수동 토압에 대한 안정

밀넣기 깊이 계산에 이용되는 토압은 각 기 업체나 공단이 각각 다른 계산방법을 취하고 있으나 이들은 모두 극한 평형상태에 있어서 주동토압과 수동토압의 평형을 생각하는 것으로서 최하단 stir에 관한 모멘트의 균형을 생각하여 안전율을 구한다는 점에서 모두 같은 개념을 사용하고 있다고 할 수 있다.

모멘트 균형에 의한 밀넣기 깊이를 구하는 방법중 일본의 수도고속도로 공단의 규정과 서울지하철의 3, 4호선 깊게 규정을 소개하면 다음과 같다.

(1) 일본 수도고속도로 공단의 규정

가. 말뚝의 밀넣기 깊이는 균형 깊이의 1.2배로 한다.

나. 균형 깊이는 어느 버팀대 위치에 관한 주동토압에 의한 모멘트와 수동토압 및 말뚝의 측면저항에 의한 모멘트가 같게 되는 경우 (M<sub>b</sub>/M<sub>A</sub> = 1.0)의 굴착 바닥면 이하의 깊이이다.

다. 균형 깊이의 계산은 그림 4.1과 같이 굴착 완료시 및 최하단 버팀위치 직전의 양자에 대해서 실시하고 큰 쪽의 밀넣기 깊이를 취한다.

라. 균형 깊이를 구할 때의 토압은 Rankine - Resal의 토압을 사용한다.

마. 굴착 바닥면에서 토압의 작용폭은 주동측, 수동측 공히 말뚝쪽으로 한다.

바. 말뚝의 측면 저항은 흙의 점착력으로 한다.

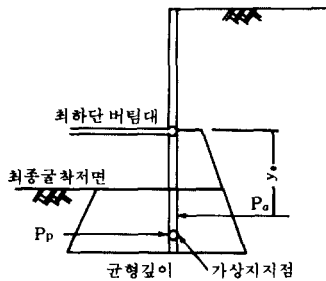
사. 굴착 바닥면에서 상부의 흙의 단위 체적 중량은 습윤 중량으로 한다.

굴착 바닥면 하부의 지하수면 이상에서는 역시 습윤 중량을 사용하고, 지하수면 이하에서는 투수성의 모래인 경우에는 부력을 빼고 점성토에서는 습윤중량을 사용한다.

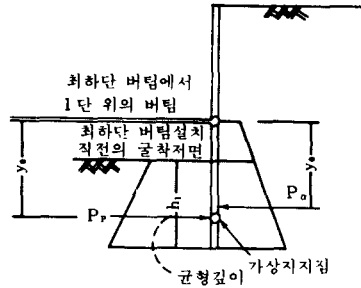
아. 토질이 좋고 주동토압이 계산상 나타나지 않든가 나타나더라도 작은 경우의 최

소 밀내기 길이는 「시가지 토목공사 공중재해 방지대책 요강」에 의해 1.5m로 한다.

흙막이 말뚝의 밀내기 길이는 이상의 안정검토와 지지력 계산중에서 큰편을 취한다.



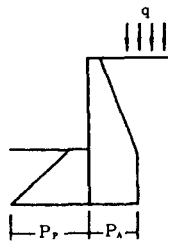
(a) 굴착완료시 계산 (최하단 버팀점에서의 계산)



(b) 최하단 버팀설치점에서의 계산 (최하단 버팀에서 1단위의 버팀점에서의 계산)

그림4.1 균형 길이의 계산

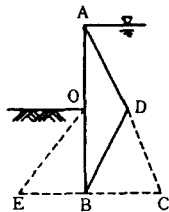
(2) 서울지하철 3, 4호선 설계규정  
가. 토압(Rankine - Resal의 토압)



$$P_A = (\gamma h + q) \tan^2(45^\circ - \phi/2) - 2c \tan(45^\circ - \phi/2)$$

$$P_P = (\gamma h + q) \tan^2(45^\circ + \phi/2) - 2c \tan(45^\circ + \phi/2)$$

나. 수압



$$\text{수압} = \Delta ABD$$

$$= \Delta ABC - \Delta OBE$$

$$(BC = BE)$$

다. 계산방법

Ma = Mp가 될 때의 De(균형 길이)의 1.2배를 밀내기 길이로 한다. 흙막이용 강말뚝의 안정은 최하단 버팀보 위치를 중심으로 하는 주동토압과 수동토압에 의한 모멘트가 서로 평

형을 이루도록 한다. 이 때 굴착면 하부의 주동토압은 굴착면에서의 주동토압과 동일하다고 하여 계산한다.

라. H-Pile 밀내기 부분의 토압작용폭(일본 지하철 기술협의회)

· 점토에 대하여

N > 8 (단단한 지반) : 플렌지 폭의 3배

8 ≥ N > 4 (보통 단단한 지반) : 플렌지 폭의 2배

4 ≥ N (연약한 지반) : 플렌지의 폭

· 사질토에 대하여

N > 30 (단단한 지반) : 플렌지 폭의 3배

30 ≥ N > 10 (보통 단단한 지반) : 플렌지 폭의 2배

10 ≥ N (느슨한 지반) : 플렌지의 폭

#### 4.1.3 Heaving에 대한 안정 검토

heaving이란 연약한 점토지반을 굴착 할 때 굴착배면의 토괴 중량이 굴착면 이하의 지반지 지지력보다 크게 되어 지반내의 흙이 미끄러져 굴착저면이 부풀어 오르는 현상이며 이를 개략

적으로 나타낸 것이 그림 4.2 이다.

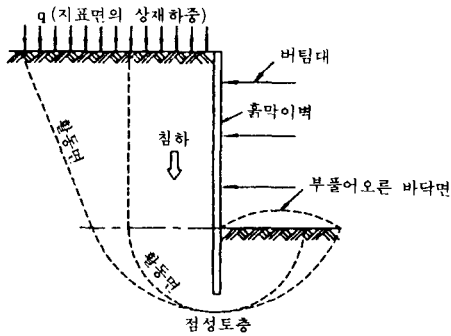


그림4.2 Heaving 현상의 설명도

(1) 안정검토

이에 대한 안정검토 방법은 여러가지가 있으나 2가지로 대별할 수 있다. 첫째는 지지력 식에 입각한 검토 방법은 Terzaghi - Peck의 방법, Tschebotarioff의 방법, Bjerrum - Eide

의 방법이며, 둘째는 모멘트 균형에 관한 검토 방법으로 일본 건축 기초구조 설계기준 등이 있다. 이들에 관한 중요한 검토식을 요약하면 다음 표 4.2와 같다.

또한 굴착지반 흙의 전단강도와 굴착 깊이와의 관계로서 굴착의 안정수(stability number)를 적용하도록 제안하였다.

$$N_s = \frac{\gamma \cdot H}{C}$$

- 여기서,  $N_s$  : 굴착의 안정수
- $\gamma$  : 흙의 단위 체적중량
- $H$  : 굴착 깊이
- $C$  : 흙의 점착력

이 안정수는 사면안정 문제에서 이미 D.W. Taylor가 이용한바 있는 것으로 Terzaghi는 이 식의 역수를 안정계수라 명명하였다. 새로이 제안된 식은 아니지만 굴착 문제에 이용하였는 데에 의의가 있다.

굴착의 안정수가 4이하 이면 거의 한계 자립

표4.2 Heaving 검토식의 비교

식 의 종 류	깊이에 대해서 흙의 비배수전단강도 $S_u$ 를 일정하게 한 경우	Heaving에 대한 한계 안정수	
		$F = 1.0$ $H/B, B/L \rightarrow 0$ $D > B$	$F$ : 각 식의 제안치 $H/B : 0.5 \sim 2.0$ $D > B$ : (보통지반의 굴착)
Terzaghi & Peck	$\frac{\gamma H}{S_u} = \frac{5.7}{F} + \frac{\sqrt{2}H}{B}$	5.7	4.5~6.63 ( $F = 1.5$ )
Tschebotarioff의 식 (국내설계기준)	$\frac{\gamma H}{S_u} = \frac{5.14}{F} + \frac{H}{B}$ ( $L/B > 2$ )	5.14	3.07~4.57 ( $F = 2.0$ )
Bjerrum & Eide의 식	$\frac{\gamma H}{S_u} = \frac{N_c}{F}$	5.1	6.0~7.5 ( $F = 1.5$ )
구규준식	$\frac{\gamma H}{S_u} = \frac{6.28}{F}$	6.28	5.23 ( $F = 1.2$ )
수 정 식	$\frac{\gamma H}{S_u} = \frac{1}{F} (\pi + 2a)$	4.28 ( $a = \frac{\pi}{5}$ )	4.4~5.1 ( $F = 1.2$ )
Peck의 식	$\frac{\gamma H}{S_u} = N_o$	5.14	6.5~7.5

(주) 점토층은 상당한 깊이까지 균일한 상태로 퇴적된 것으로 한다.

고 이내에서 굴착주변의 지반은 안정되어 있지만, 4를 넘으면 굴착 배면토의 저부 부근에 소성 영역이 발생한다. 안정수  $N_s$ 가 더욱 커지면 굴착 배면의 파괴면과 저부의 파괴면이 합류하여 결국에는 heaving 파괴를 일으키게 되고 그 상태에 근접한 만큼 토압도 커진다고 생각할 수 있다.

(2)연약한 점성토 지반에 대한 heaving 억제 대책

heaving 현상에 대한 안전성은 점토층의 전단강도와 터파기 깊이에 관계되므로 기본적으로는 계획상의 문제이나 설계 및 시공시 다음과 같은 배려가 필요하다.

- 튼튼한 흙막이 벽을 사용하여 밀წ기 깊이를 충분히 늘린다.
- 예정 굴착면 아래 깊이의 점성토를 지반 개량하여 점토의 전단강도를 크게한다.
- 부분적으로 모서리 부분의 흙을 남겨 굴착하며 골조의 일부를 시공한 후에 나머지 흙을 굴착한다.

이러한 방법은 heaving에 대한 안전율이 어떻게 개선될 것인가를 정량적으로 파악하지 않으면 대책으로서의 의미가 없으므로, 시공만으로 해결하기에는 곤란하다. 이와 같은 이유로 지반 굴착 때 시공상 가장 주의할 점은 주변지반의 흙을 되도록 흐트러지지 않도록 하는 것이다. heaving이 우려되는 연약한 점토는 일반적으로 예민비가 높고, 전단강도가 저하되기 쉽다.

이와 같은 지반에서는 계획상 강성이 높은 흙막이 벽을 사용하는 것은 물론이거니와 각 단계의 굴착 작업은 흙막이 부재 가설에 필요한 최소한으로 하고 신속히 가설을 완료한다.

#### 4.1.4 Piping에 대한 안정 검토

지하수위가 높은 모래 혹은 자갈층과 같은 투수성의 지반을 차수성이 큰 벽으로 차단하고 터파기 내부를 배수하면서 굴착하면 그림 4.3과 같이 벽의 배면과 터파기면의 지하수위차에 따라서 생기는 상향의 삼투압에 의해 모래의

유효응력이 감소 또는 소멸되어 벽부근의 모래가 boiling이 진행되어 작은 유로가 형성되는 piping 현상이 나타난다.

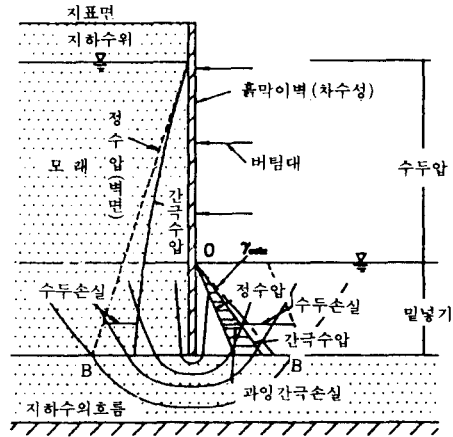


그림4.3 Boiling 현상의 설명도

이 경우 벽 전면의 수동측 저항과 벽 하단의 지지력이 없어질 뿐 아니라 토립자의 이동도 발생하기 때문에 구조물 및 주변지반이 파괴되고 예기치 못한 사고와 연결된다. 또한 boiling을 일으킨 지반은 그것이 정지된 후에도 일반적으로 대단히 느슨한 상태가 되므로 지지력이 크게 감소된다.

#### (1) 안정 검토

boiling에 대한 검토는 유선망으로부터 해석해야 하지만, 번잡하므로 실제로는 Terzaghi 이론이나 한계 동수 경사 방법을 취하고 있다.

##### ① Terzaghi의 방법

다음 그림 4.4에 도시된 바와 같이 boiling을 일으키려는 힘은 과잉수압  $U$ 이고 이것에 저항하는 힘은 흙의 중량  $W$ 이다. 따라서 안전율  $F_s$ 는 다음 식과 같다.

$$F_s = \frac{W}{U}$$

Terzaghi는 boiling이 생기는 폭을  $D_2/2$ 라 생각하고  $W$  및  $U$ 를 다음 식에 의해 구하였다.

$$U = \frac{\gamma D_z^2}{2}$$



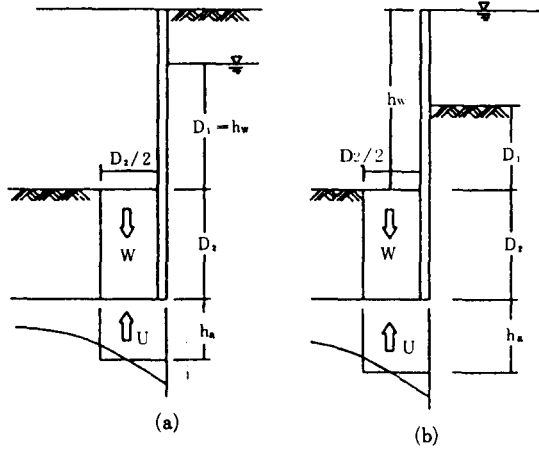


그림4.4 Boiling에 대한 검토

$$W = \gamma_w h a \frac{D_2}{2}$$

여기서,

$\gamma'$  : 모래의 수중 단위 중량

$\gamma_w$  : 물의 단위 중량

$h_a$  : Boiling 평균 과잉 수압

따라서 안전율  $F_s$ 는 다음 식과 같이 된다.

$$F_s = \frac{\gamma' D_2}{\gamma_w \cdot h_a}$$

이상이 Terzaghi가 제안한 boiling 검토 방법이지만, 뒷식에서는  $h_a$ 를 결정해야 하는 문제가 남는다. 일반적으로 종래의 계산예에서  $h_a$ 는 안전측으로  $h_w/2$ 로 간주할 수 있으므로 안전율  $F_s$ 를 다음 식으로 계산할 수 있다.

$$F_s = \frac{2\gamma' D_2}{\gamma_w \cdot h_w}$$

## ② 한계동수 경사방법

그림 4.5에 있어서 ab면의 유효응력  $\bar{P}$ 는 다음과 같다.

$$\bar{P} = z\gamma' - iz\gamma_w$$

여기서  $i$ 는 동수구배로서  $i = h/H$ 로 표시할 수 있다. 유효응력  $P = 0$ 이 될 때의 동수구배를 한계 동수경사  $i_c$ 라 한다면 위식으로부터  $i_c$ 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$$

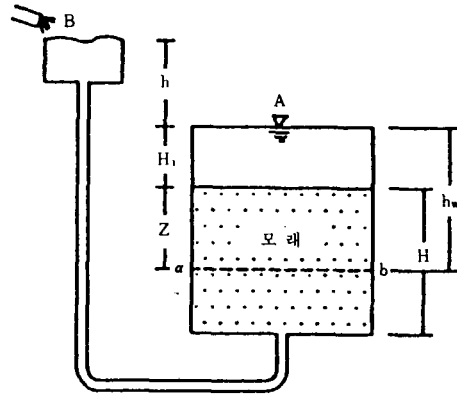


그림4.5 한계동수경사를 고려하는 방법

$i < i_c$ 인 경우에는 Darcy의 법칙이 성립하고, 유량은 동수경사에 비례해서 증대해간다.

$i = i_c$ 가 되면, 즉 유효응력이 0이 되면 모래의 전단저항은 0이 되고 유량이 급격하여 증대하여 모래는 마치 액체와 같이 되어 모래 입자가 들끓게 된다. 이것이 boiling이다.

따라서 boiling이 일어나지 않게 하기 위해서는  $i < i_c$ 이어야 한다. 이에 관한 안전율을  $F_s$ 라고 하면 이는 다음 식과 같이 정의될 수 있다.

$$F_s = \frac{i_c}{i} = \frac{\gamma' H}{\gamma_w \cdot h}$$

위 식에서 유선장  $H$ 를 그림 4.4의  $D_1 + 2D_2$ 로 취하고 수위차  $h$ 를 같은 그림의  $h_w$ 로 취하면 뒷식은 아래와 같이 변하게 된다.

$$F_s = \frac{\gamma' (D_1 + 2D_2)}{\gamma_w \cdot h_w}$$

## (2) Piping방지 대책

piping이나 boiling의 확실한 방지 방법은 월포인트 혹은 deep well 등 적당한 배수공법을 채용하는 것이나, 배수공법 외에 밀넣기 깊이 이하로 적당한 차수재를 주입하는 등의 차수공법도 효과가 있다. 그러나 이 경우 boiling 현상이 일어나서 물의 흐름이 부분적으로 생기면 차수효과가 감소하므로 신속히 시공하는 것이 바람직하다.

## 참 고 문 헌

1. 건설부, 구조물 기초설계 기준해설 (1986), pp. 459 ~ 475
2. Bowles, J. E. (1982). "Foundation Analysis and Design", 3Ed., McGra Hill. p. 816
3. Peck, R.B.(1969) "Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground," 7th ICSMFE, Mexico, State - of - the - Art. Volume pp. 225 ~ 290.
4. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1968), Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd Ed. p. 729.
5. NAVFAC(1971), Soil Mechanics, Foundation and Earth Structures, DM - 7. PP 7.2 - 52 ~ 7.2 - 126.
6. 土質工學會(日本) (1975), 土留ぬ 構造物の 設計法. p. 358
7. Caspe, M.S. (1966), "Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cuts,"
8. JSMFD, ASCE, Vol. 92. SM4, July. pp. 51 ~ 59
9. Petros P. Xanthakos (1979), Slurry Walls, pp. 458 ~ 610
10. (주)대우엔지니어링 기술연구소(1988), 도심지 굴착공사를 위한 지하가설 구조물의 설계 및 시공연구. pp. 77 ~ 300
11. 李鐘圭(1975), 土質力學, pp. 173 ~ 204
12. Braja M. Das (1985), Principles of Foundation Engineering, pp. 267 ~ 329
13. Braja M. Das (1985), Principles of Foundation Engineering pp. 217 ~ 370
14. M. Carter(1983), Geotechnical Engineering Handbook, pp. 152 ~ 178
15. J. C. Jaeger & N. G. W. Cook (1976), "Fundamentals of Rock Mechanics", A Halsted Press Book Co., pp. 208 ~ 211
16. R. D. Lama and V. S. Vutukuri (1978), "Handbook on Mechanics Properties of Rocks. -Testing Techniques and Results -. "Series on Rock and Soil Mechanics Vol. 3, No. 3, pp. 356 ~ 380
17. 尹志善 譯(1985), "岩盤力學", 구미서관, pp. 163 ~ 168
18. 金翔圭(1991), "土質力學", 清文閣, pp. 82 ~ 105
19. 安鐘弼 譯(1991), "最新 土木地質學", 구미서관, pp. 81