

# 上載荷重의 影響을 考慮한 Diaphragm Wall의 3次元 安定度 解析

The Three-Dimensional Stability Analysis of the Diaphragm  
Wall under the Influence of External Loads

구 자 갑\*<sup>1</sup>  
Koo, Ja - Kap  
이 상 덕\*<sup>2</sup>  
Lee, Sang - Duk  
전 몽 각\*<sup>3</sup>  
Jeon, Mong - Gag

---

## Abstract

To analyze the effects of ground water levels and external loads on the stability of a Diaphragm wall, the three models of Bell, Piaskowski/Kowalewski, and Washbourne were modified and extended to develop a new program SL3D. Comparing to the other two models, Washbourne's model shows the stability in on safes at the beginning of the excavation and increase as the excavation continue. Also the effects of various design factors, such as the density of slurry, ground water levels, the friction angle of soil, external loads and the length of trench, have been analyzed and a nomogram was developed.

## 요 지

굴착 中 slurry로 支持되고 있는 상태에서 地下水와 上載荷重의 影響을 고려한 diaphragm wall의 安定度를 해석하기 위하여 Bell, Piaskowski/Kowalewski, Washbourne의 모델을 확장하고, 확장된 이론으로 프로그램 SL3D를 개발하였다.

Washbourne의 모델에서는 Bell, Piaskowski/Kowalewski의 모델에 비해, 굴착깊이가 증가함에 따라 安定度가 매우 큰 폭으로 증가하고, 비교적 초기굴착단계에서 부터 安全側에 속한다. 또한 slurry의 密度, 地下水位, 흙의 内部摩擦角, trench의 길이, 上載單位荷重등이 安定度에 미치는 影響을 분석하였고, 이것을 근거로 nomogram을 작성하였다.

---

\*<sup>1</sup> 정희원, 성균관대학교 공과대학 토목공학과, 박사과정

\*<sup>2</sup> 정희원, 아주대학교 공과대학 토목공학과, 조교수

\*<sup>3</sup> 정희원, 성균관대학교 공과대학 토목공학과, 교수

## 1. 序 論

diaphragm wall 工法은 굴착면의 붕괴를 방지하고 지반내의 應力變化를 최소화 하기 위해, 굴착된 trench를 安定液(bentonite slurry)으로 지지하고 이 속에 조립된 철근을 삽입한 후, 콘크리트를 타설하여 panel을 구축하면서 所要延長까지 반복 시행하는 工法이다. 최근들어 굴착 기계의 개발로 인한 굴착기술의 발달과, 적용범위의 다양성등으로 시공이 급속히 증가하고 있다.

diaphragm wall(이하 D. W) 工法을 적용할 때는 굴착 中 slurry로 支持되고 있는 상태에서 흙벽의 입자가 분리되어 slurry에 섞이는 경우, slurry수위가 굴착중에 지하수위보다 낮아지는 경우등에 대한 內的 安定과, 주변지반이 굴착공간으로 활동 파괴를 일으키는 경우에 대한 外的 安定을 검토해야 하며, 굴착 후 완성된 地中 壁體의 安定도 검토해야 한다.<sup>(4, 17)</sup>

굴착 中 D. W의 外的 安定度는 일반적으로 slurry의 有效支持力에 대한 主動土壓의 比<sup>(5)</sup>로서 정의 한다. slurry의 有效支持力은 지하수의 영향에 의해 감소된 slurry의 支持力이며, slurry의 압력은 定水壓的으로 작용한다. 主動土壓은 지반의 自重뿐만 아니라 上載荷重의 영향을 고려한 값이다. D. W은 한정된 길이로 굴착하므로 아칭 효과에 의해 지반내 응력이 D. W 주변 지반에 전이되어, 길이가 무한정한 2次元 상태보다 主動土壓이 감소한다.<sup>(13, 15)</sup> 이러한 감소된 3次元 主動土壓은 數值解析法을 적용하여 구할 수 있으나, 대개의 경우 기존의 古典土壓理論을 확장하여 구하며, 접근 방법에 따라 Rankine의 이론을 기본으로 하는 statical method와 Coulomb 또는 Terzaghi의 이론을 기본으로 하여 직선 또는 곡선 파괴면의 파괴메카니즘을 생각하는 kinematical method로 분류할 수 있다.<sup>(4, 7)</sup>

본 연구에서는 이론 전개 과정이 간단하면서도 복잡한 경계조건을 비교적 많이 수용할 수 있어서 현장 적용이 용이한 kinematical meth-

od를 채택하여, 上載荷重을 考慮할 수 있도록 이론을 확장하였으며, 이 확장모델을 적용한 Diaphragm Wall의 安定度 解析프로그램(SL3D)을 개발하였다. 또한 trench의 길이, slurry의 密度, 지표면으로부터의 地下水 깊이(이하 지하수 깊이), 흙의 內部摩擦角, 上載荷重등이 安定度에 미치는 영향을 分析하였고, 이 분석결과를 근거로 현장에서 쉽게 安定度를 판단할 수 있도록 上載荷重, 地下水位등을 고려한 nomogram을 작성하였다.

## 2. 基本 理論

diaphragm wall은 限定된 길이로 施工하므로, 굴착 中 인접한 지반으로 地中應力이 轉移되어서 길이가 무한정한 2次元 상태보다 작은 土壓이 작용한다.

Schneebeli(1964),<sup>(13)</sup> Huder(1972),<sup>(3)</sup> Cox(1981)<sup>(1)</sup>등에 의한 statical methods에서는 단위두께를 갖는 벽체의 측면에 작용하는 마찰에 의한 剪斷抵抗을 가정하여 3次元 主動土壓을 구한다. Prater(1973),<sup>(10)</sup> Gussmann/Lutz(1981),<sup>(2)</sup> Walz/Pulsfort(1983),<sup>(16)</sup> Pulsfort(1986)<sup>(11)</sup> 등에 의한 kinematical methods에서는 trench와 길이가 같고 trench 內로 활동하는 썩기의 측면에 작용하는 剪斷抵抗을 가정하여 3次元 효과를 고려하였으며, Piskowski/Kowalewski(1965),<sup>(9)</sup> Karstedt(1982),<sup>(5)</sup> Washbourne(1984)<sup>(15)</sup>등은 썩기가 아닌 실제 파괴모양과 유사한 파괴체를 가정하였다.

본 연구에서는 上載荷重을 고려한 D. W의 安定度 해석을 위해 Bell에 의한 썩기형 모델과, 실제상황과 유사한 파괴체를 가정한 Piskowski/Kowalewski, Washbourne(이하 B, P/K, W)의 모델을 上載荷重을 고려할 수 있도록 확장하였다.

### 2.1 Bell의 모델

Coulomb의 土壓理論을 그대로 적용하였으며, 그림 1의 abcde와 같이 限定된 길이(L)의

썰기가 수직면에  $45^\circ - \phi/2$  만큼 경사진 滑動面을 따라 trench 內로 활동하며, 滑動面에서 활동에 抵抗하는 방향으로 剪斷抵抗이 작용한다고 가정하였다. Bell의 이러한 提案은 土壓을 구할 수 있는 가장 간단한 방법이며,<sup>(15)</sup> 上載荷重은 썰기의 上部 표면에 작용하는 등분포하중으로 환산하여 적용할 수 있다. 上載荷重을 고려한 主動土壓  $P_a$ 는 자중  $W$ 와 상재하중  $Q$  및 滑

動面에서의 마찰저항  $R$ 와 전단저항  $C$ 에 힘의 平衡式을 적용하여 구할 수 있다.

$$P_a = (Q+W) \tan(45^\circ - \phi/2) - 2C \sin(45^\circ - \phi/2)$$

$$\text{여기서 } W = 1/2 \gamma L D^2 \tan(45^\circ - \phi/2)$$

$$Q = q L D \tan(45^\circ - \phi/2)$$

$$C = c D L \sec(45^\circ - \phi/2)$$

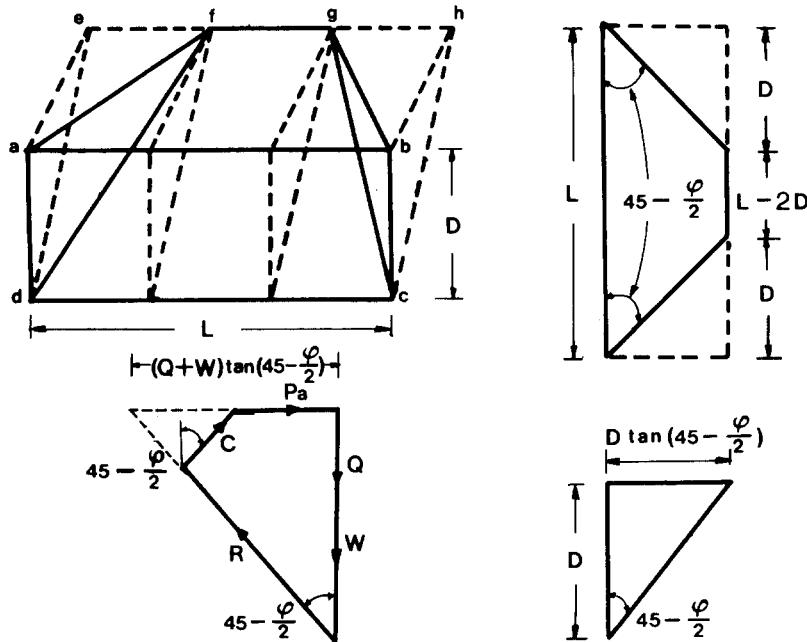


그림 1 Oblique view of simple idealized wedge

## 2.2 Piaskowski/ Kowalewski의 모델

Coulomb 토압론을 적용하며, 수평면에 대하여  $\alpha$ 의 각도로 절단된 拋物線形 단면을 갖는 기둥(그림 2)을 파괴형태로 가정하였으며, 절단면의 각도를 변화시키면서 최대 主動土壓을 구할 수 있다. 拋物線形인 단면은 trench의 굴착 깊이와 길이에 의해 결정되며, 파괴체 측면에서의 剪斷抵抗은 무시한다. 따라서 활동에 대한 저항은 활동면에서의 摩擦抵抗뿐이며 파괴체의 체적이 썰기형보다 작기 때문에 활동면에서의

摩擦抵抗이 작고, 결국 2次元보다 작은 토압이 구해진다.<sup>(9)</sup> 上載荷重은 지표면에 작용하는 등분포하중으로 환산하여 적용하며 중력의 방향이다. 上載荷重을 고려한 主動土壓  $P_a$ 는 상재하중  $Q$ , 자중  $W$  및 滑動面에서의 마찰저항  $R$ 에 힘의 平衡式을 적용하여 구한다. 이때 지하수의 영향을 아울러 고려할 수 있다.

$$P_a = (Q+W) \tan(\alpha - \phi)$$

여기서  $A = 1/3 L^2 \cot \phi$ ,  $B = 1/2 L \cot \phi \tan \alpha$ 로 놓으면

- ① 초기굴착단계의 경우( $D < B$ )  
 $W = A\gamma\{D - 2/5B + 0.4(B - D)(1 - D/B)^{3/2}\}$   
 $Q = qA\{1 - (1 - B/D)\}^{3/2}$
- ② 굴착깊이가 깊은 경우( $D \geq B$ )  
 $W = A\gamma(D - 2/5B)$   
 $Q = qA$

- $C = cD(L - D) \sec(45^\circ - \phi/2)$
- ② 굴착깊이가 깊은 경우( $L < 2D$ )  
 $W = (1/4L^2D - 1/24L^3) \gamma \tan(45^\circ - \phi/2)$   
 $Q = 1/4qL^2 \tan(45^\circ - \phi/2)$   
 $C = 1/4cL^2 \sec(45^\circ - \phi/2)$

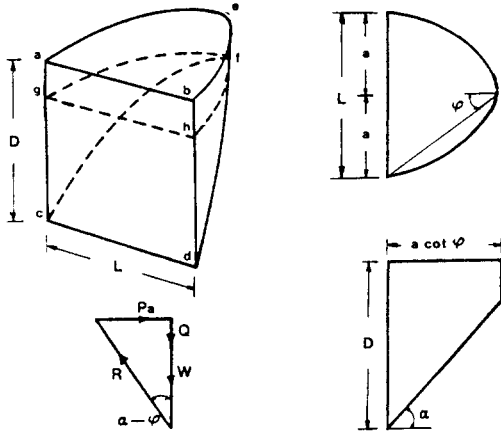


그림 2 Oblique view of simple idealized wedge

### 2.3 Washbourne의 모델

Washbourne은 굴착단계에 따라 두 가지 파괴형태로 구분하였다. 초기 굴착단계( $L \geq 2D$ )에서는 Bell의 썩기형 파괴체의 양쪽에서 四面體만큼 줄어든 체적을 갖는 파괴형태(그림 1)가 되며, P/K의 모델에서 처럼 측면에서의 마찰은 무시하였다. 깊은 굴착단계( $L < 2D$ )에서는 굴착 低部의 수직면에  $45^\circ - \phi/2$ 인 滑動面을 따라 활동을 일으키는 수직프리즘 형태의 파괴체를 가정하였다.<sup>(15)</sup> 主動土壓 Pa는 상재하중 Q와 자중 W 및 滑動面에서의 마찰저항 R와 전단저항 C에 힘의 평형식을 적용하여 구한다.

$$Pa = (Q + W) \tan(45^\circ - \phi/2) - 2C \sin(45^\circ - \phi/2)$$

여기서 ① 초기굴착단계의 경우( $L \geq 2D$ )

$$W = (1/2D^2L - 1/3D^3) \gamma \tan(45^\circ - \phi/2)$$

$$Q = qL(L - D) \tan(45^\circ - \phi/2)$$

### 3. 프로그램의 構成

diaphragm wall 공법에서 地下水位와 上載荷重을 고려한 外的 安定度를 구하기 위하여 B, P/K, W의 이론을 확장하고, 확장된 이론을 적용하여 개인용컴퓨터에서 수행가능토록 프로그램 SL3D를 개발하였다. 본 프로그램에서는 資料入力を 포맷(format)이 필요없는 대화식으로 入力하고, 각 모델을 선택하여 굴착깊이별로 安定度를 算定할 수 있으며, 또한 上載荷重, 地下水 깊이, 흙의 內部摩擦角, slurry의 密度, trench의 길이가 安定度에 미치는 영향을 쉽게 파악할 수 있도록 비교적 단순한 구조로 프로그램을 구성하였다. 본 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같다.

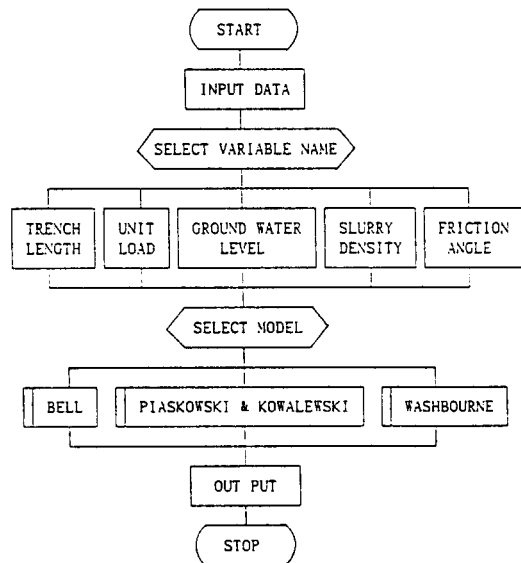


그림 3 Block diagram of SL3D program

#### 4. 結果 分析 및 考察

上載荷重이 없는 경우에 地下水位를 境界로 굴착깊이에 따른 安定度를 계산하면, B의 모델에서 地下水位 上部는 일정하나 下部는 서서히 감소하고, P/K의 모델에서 上部는 일정하나 下部는 B보다 더욱 서서히 감소하다 어느 깊이 부터는 약간 증가하고, W의 모델에서 지표면 근처에 地下水位가 있으면 上部는 약간 증가하나 下部는 약간 감소하다 큰 폭으로 증가한다. 이는 上載荷重이 없는 경우에는 地下水位가 安定度에 매우 큰 영향을 미치기 때문이다. 그러나 上載荷重을 고려한 安定度는 그림 4와 같이 각 모델 모두 지표면 부근에서 매우 不安定하

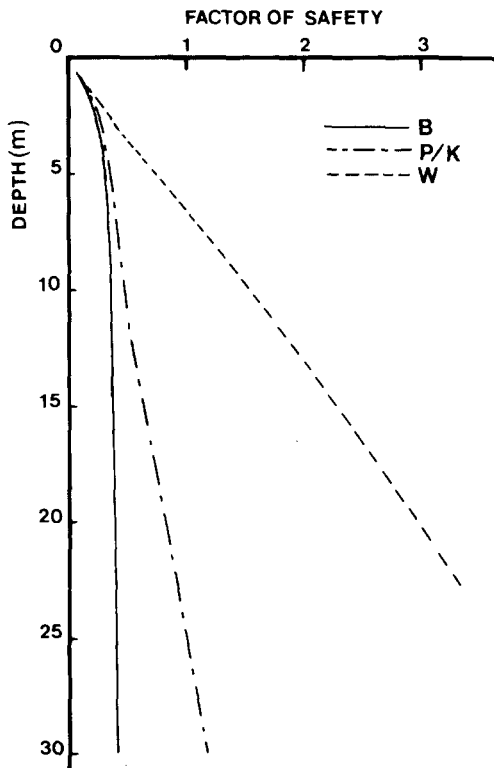


그림 4 Factor of safety against depth for slurry support ( $L=8.0$ ,  $q=15.0t/m^2$ ,  $C=0t/m^2$ ,  $\phi=30^\circ$ ,  $Z_w=2.0m$ ,  $r_s=1.05t/m^2$ )

며, 굴착깊이가 增加함에 따라 B에 의한 安定度는 큰 변화없이 전 깊이에서 不安定한데 반하여, P/K에 의한 安定度는 서서히 增加하고, W에 의한 安定度는 P/K의 모델보다 큰폭으로 增加한다. 여기서 W의 모델이 타 모델에 비해 굴착깊이가 增加함에 따라 安全側에 속함을 알 수 있다. 또한 地下水 깊이가 깊을수록 安定度는 증가하나, 지표면 부근에서는 地下水位에 관계없이 매우 不安定하다. 이는 지표면 부근에서는 地下水位보다 上載荷重이 安定度에 더욱 큰 영향을 미치기 때문이다.

安定度는 slurry의 密度, 地下水 깊이(그림 5), 흙의 内部摩擦角이 커지면 增加하지만, 上載單位荷重이 커지면 減少한다. 또한 trench의

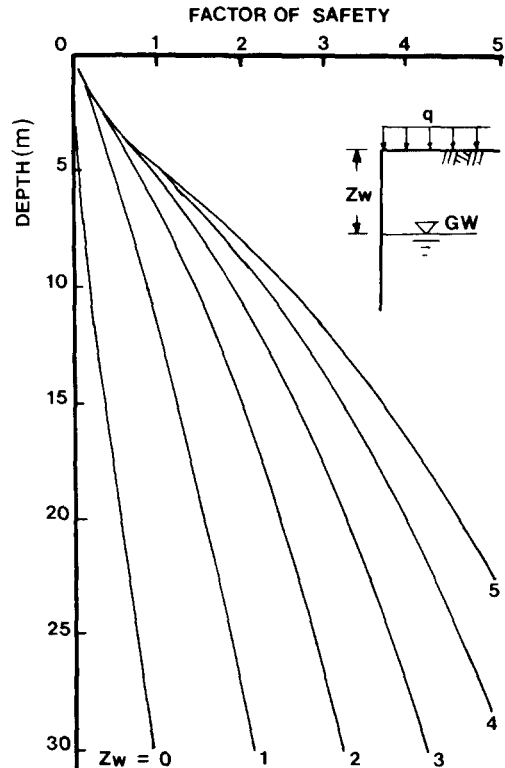


그림 5 Variation of FS for various ground water levels versus depth ( $L=8.0m$ ,  $q=15.0t/m^2$ ,  $C=0t/m^2$ ,  $\phi=30^\circ$ ,  $r_s=1.05t/m^2$ )

길이가 작아지면 B에 의한 安定度는 一定하지만, P/K에 의한 安定度는 서서히 增加하고, W에 의한 安定度는 P/K의 모델보다 큰 쪽으로 增加한다.

느슨한 조립토, 예민 점토등을 제외하면, 일반적으로 trench 주변의 흙은 아치작용에 의해 主動土壓이 감소하므로 W의 모델로 해석한 결과를 보면(그림 5), 上載荷重을 고려할 경우, 지표면 부근에서는 安定度가 매우 낮아 不安定하므로 극히 주의해서 다루어져야 하고, 地下水水位에 따라 비교적 초기굴착깊이에서부터 安全側に 屬하므로, 기존의 2次元 해석보다는 3次元 해석인 W의 모델로 設計하는 것이 유리할 것이다.

한편, 본 nomogram을 활용하면, 上載荷重, 地下水 깊이, trench의 길이, slurry의 密度, 흙의 内部摩擦角의 影響을 고려하여 굴착깊이별 安定度 算定과 現場에서 요구되는 安定度 維持에 필요한 slurry의 密度 決定을 쉽게 할 수 있을 것이다.

### 5. 安定度를 구하기 위한 Nomogram

복잡한 계산과정을 거치지 않고도, 사질토에서 地下水水位와 上載荷重을 고려하여 굴착깊이별로 diaphragm wall의 安定度를 算定하거나, 安定에 필요한 slurry의 密度를 간단하면서도 비교적 정확히 구할 수 있도록 nomogram을 작성하였다. 上載荷重, 地下水水位의 影響下에 前述한 여러 모델중 안전측에 속하는 W모델을 적용하였으며, 기본 data는 trench의 길이 8.0m, 흙의 단위중량 1.8t/m<sup>3</sup>, 포화단위중량 1.95t/m<sup>3</sup>, 지하수의 단위중량 1.0t/m<sup>3</sup>로 하였으며, 사용 방법은 다음과 같다.

① 地下水 깊이를 고려한 썬기의 무게 P1을 그림 6으로부터 구하고, 上載荷重이 있는 경우에는 上載荷重에 의한 P2를 구한다.

② 흙의 内部摩擦角을 고려한 主動土壓 Pa를 그림 7로부터 구한다.

③ slurry의 密度에 따른 slurry의 支持力 Ps를 그림 8로부터 구하고, 그림 9에서 구한 地下

水의 影響 Pw를 고려하여 slurry의 有效支持力 (Ps - Pw)을 구한다.

④ 安定度는 有效支持力에 대한 主動土壓의 비로서 구한다.

⑤ trench의 길이가 위와 다른 경우에도 그림 10을 이용하여 安定度를 구할 수 있다.

실제로 다음과 같은 경우에 즉, trench의 길이 : 8.0 m, 깊이 : 15.0 m, 흙의 전체단위중량 : 1.8 t/m<sup>3</sup>, 내부마찰각 : 30도, slurry의 밀도 :

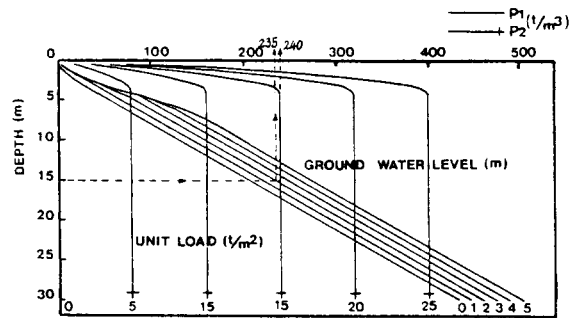


그림 6 Factor P1 for various ground water levels versus depth and Factor P2 for various unit loads versus depth

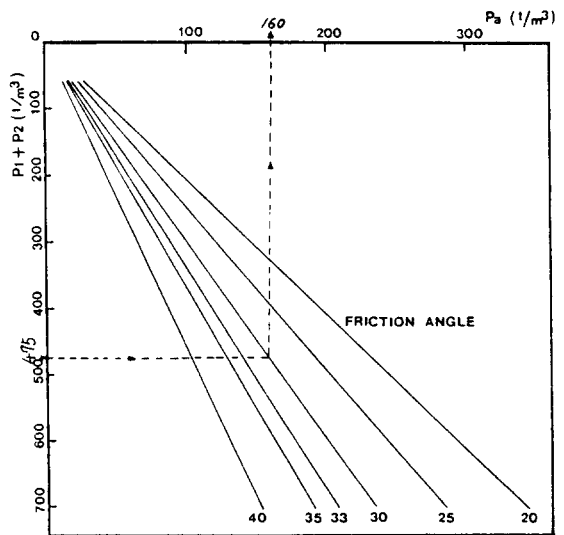


그림 7 Factor Pa for various friction angles versus P1+P2

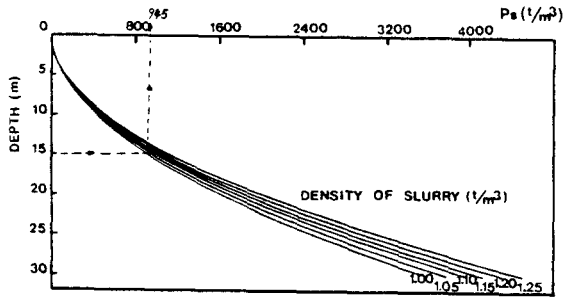


그림 8 Factor Ps for various density of slurry versus depth

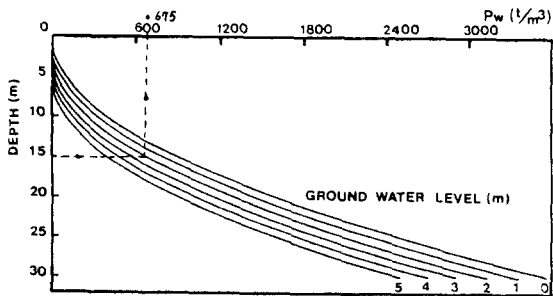


그림 9 Factor Pw for various ground water levels versus depth

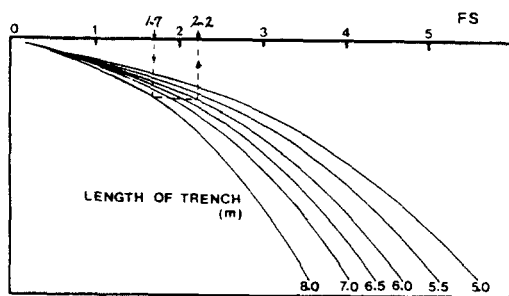


그림 10 Factor of safety for various length of trench

1.05 t/m<sup>3</sup>, 물의 단위중량 : 1.0 t/m<sup>3</sup>, 지하수 깊이 : 2.0 m, 상재단위하중 : 15.0 t/m<sup>2</sup>일때, 前述한 순서에 의해 nomogram을 이용하면 굴착 깊이가 15 m일때의 安定度는 FS=1.7이 되며, 이

는 SL3D로 계산한 값인 FS=1.699186에 근접한 값이다.

한편 같은 條件 下에서 trench의 길이를 6 m로 한다면, trench의 길이 8m일 때의 安定度 1.7을 이용하여 trench의 길이 6m일 때의 安定度는 그림 10에서 FS=2.2가 되며, 이는 SL3D로 계산한 값인 FS=2.241666에 근접한 값이다.

## 6. 結 論

地下水와 上載荷重의 영향을 고려한 diaphragm wall의 安定度를 구하기 위하여 Bell, Piaskowski/Kowalewski, Washbourne의 모델을 확장하고 프로그램 SL3D를 개발하였으며, 현장에서 간단히 安定度를 구할 수 있는 nomogram을 작성하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) Washbourne의 모델이 Bell, Piaskowski/Kowalewski의 모델에 비해 굴착깊이가 增加함에 따라 安定度가 매우 큰 폭으로 增加하고, 비교적 초기굴착단계에서 부터 安全側에 속한다. (그림 4)

2) 흙의 内部摩擦角, slurry의 密度, 地下水 깊이의 增加에 따라 安定度는 增加하지만 trench의 길이, 上載荷重의 增加에 따라 安定度는 減少한다.

3) 安定度에 미치는 영향은 地下水位보다 上載荷重이 더욱 크기 때문에 지표면 부근에서 매우 不安全측에 속한다.(그림 5) 따라서 上載荷重이 있을때 지표면 부근에서의 굴착은 극히 주의에서 다루어져야 한다.

4) 현장조건에 따른 安定度를 구하거나 요구되는 安定度에 따른 slurry의 密度를 구할 때 본 nomogram을 이용할 수 있다.

## 감사의 말

본 연구는 1990학년도 성균관대학교 대학원 공동연구 장학금 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 표합니다.

## 기 호

c	흙의 점착력(t/m <sup>2</sup> )
D	trench의 굴착깊이(m)
FS	안전율
L	trench의 길이(m)
M	흙썰기 저면으로부터의 지하수위에 대한 흙썰기의 길이 비
Pa	주동토압(t)
Ps	slurry의 압력(t)
Pw	지하수의 압력(t)
q	단위상재하중(t/m <sup>2</sup> )
W	흙썰기의 중량(t)
Zw	지표면으로부터의 지하수위(m)
$\alpha$	흙썰기의 경사각(degree)
$\phi$	흙의 내부마찰각(degree)
r	흙의 단위중량(t/m <sup>3</sup> )
$r_c$	slurry의 단위중량(t/m <sup>3</sup> )
$r_w$	물의 단위중량(t/m <sup>3</sup> )

## 참고문헌

1. Cox, A.D.(1981), "Axially Symmetric Plastic Deformations in Soils", Phil. Trans., A1036, 254. pp.1~45.
2. Gussmann, P. & Lutz, W.(1981), "Schlitzstabilität bei anstehendem Grundwasser", Geotechnik 2., pp.1~81.
3. Huder, J.(1972), "Stability of Bentonite Slurry Trenches with Some Experiences in Swiss Practice", Proc.5, Europ Conf. SMFE. Madrid, pp.517~522.
4. Lee, S.D.(1987), "Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlitzten im Sand neben Einzelfundamenten", Mitteilung 27, Grundbauinstitut, Uni-Stuttgart
5. Karstedt, J.(1982), "Untersuchungen zum aktiven räumlichen Erddruck im rolligen Boden bei Hydrostatischer Stützung der Erdwand", Veröff. Grundbauinstitut Tu-Berlin, Heft 10.
6. Müller-Kirchenbauer, H.(1977), "Stability of Slurry Trenches in Homogeneous Subsoil",

- Proc. Int. Conf. SMFE. Tokyo, Vol.2, pp. 125~132.
7. Müller-Kirchenbauer, H.(1979), "Berechnungsverfahren zum aktiven räumlichen Erddruck", Veröff. Grundbauinstitut, Tu-Berlin, Heft 5.
8. Petros P. Xanthakos(1979), "Slurry Walls", McGraw-Hill Book Co.
9. Piaskowski, A. & Kowalewski, Z.(1965), "Application of Thixotropic Clay Suspensions for Stability of Vertical Sides of Deep Trenches without Strutting", Proc. Conf. SMFE. Montreal, pp.526~529.
10. Prater, E.G.(1973), "Die Gewölbewirkung der Schlitzwände", Der Bauingenieur 48, pp. 125~131.
11. Pulsfort, M.(1986), "Untersuchungen zum Tragverhalten von Einzelfundamenten neben suspensionsgestützten Erdwänden begrenzter Länge", Diss. Bergische Uni Wuppertal, Bericht Nr.4.
12. Pulsfort, M., Waldhoff, P. & Walz, B. (1989), "Bearing Capacity and Settlement of Individual Foundations near Slurry Supported Trench Excavations", Proc. 12th, Int. Conf. SMFE. Janeiro, pp.1511~1514.
13. Schneebeli, G.(1964), "La Stabilité des Tranchées Profondes Forées en Présence de Boue", Etanchements et Foundation Spéciales.
14. Thelma J. Darwent(1975), "Diaphragm Walls & Anchorages", Institution of Civil Engineers, London.
15. Washbourne, J.(1984), "The Three-Dimensional Stability Analysis of Diaphragm Wall Excavations", Ground Engineering 17, pp. 24~29.
16. Walz, B. & Pulsfort, M.(1983), "Ermittlung der rechnerischen Standsicherheit suspensionsgestützter Erdwände auf der Grundlage eines Prismatischen Bruchkörpermodells", Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Hef 1 und Heft 2.
17. 藤井清光, 植田進武, 堀井陽三, 森喬(1982), "地下連續壁工法の理論と實際", 山海堂, pp.1~114.

(접수일자 1991. 6. 22)