안정사면에 인접한 옹벽에 작용하는 수평토압

Lateral Pressure on Retaining Wall Close to Stable Slope

정 성 교*1
Chung, Sung-Gyo
정 진 교*2
Chung, Jin-Gyo
이 만 렬*3
Lee, Man-Yeol

Abstract

Classical earth pressure theories normally assume that ground condition remains uniform for considerable distance from the wall, and that the movement of the wall is enough to result in the development of an active pressure distribution. In the case of many low gravity walls in cut, constructed, for example, by using gabions or cribs, this is not commonly the case. In strong ground a steep temporary face will be excavated for reasons of economy, and a thin wedge of backfill will be placed behind the wall following its construction. A designer then has the difficulty of selecting appropriate soil parameters and a reasonable method of calculating the earth pressure on the wall.

This paper starts by reviewing the existing solutions applicable to such geometry. A new silo and a wedge methods are developed for static and dynamic cases, and the results obtained from these are compared with two experimental results which more correctly model the geometry and strength of the wall, the fill, and the soil condition. Conclusions are drawn concerning both the magnitute and distribution of earth pressures to be supported by such walls.

요 지

고전토압이론들은 뒤채움흙이 벽체로 부터 충분히 길게 또한 균등하게 형성되어 있으며, 벽체가 주동(또는 수동)상태에 도달할 수 있도록 충분히 이동된다고 가정하였다. 그러나, 조립식옹벽과 같이 비교적 높이가 낮은 중력식옹벽은 지반을 굴착한 후에 설치되므로 보통 그러한 경우와 다르다. 그리고 경제적인 이유 때문에 견고한 지반 내에 급사면으로 굴착을 수행한 후 좁은 공간 내에 뒤채움하는 경우에도 역시 그러하다. 이러한 경우에 설계자는 적절한 토질상수의 선택과

*1 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 부산전문대학 토목과 전임강사
*3 정회원, 동아대학교 건설기술연구소 특별연구원

벽체에 작용하는 토압을 계산할 수 있는 합리적인 방법을 선택하는 어려움에 직면하게 된다. 여기서는 좁은 공간의 뒤채움에 적용이 가능한 기존의 연구결과들을 검토하였다. 그리고 정적 및 동적경우에 적용할 수 있는 사일로 및 쐐기이론을 새롭게 유도하였으며, 비교적 정교하게 실험된 2경우와 비교하였다. 결론적으로, 새롭게 유도된 토압이론에 의한 토압분포 및 전토압은 그러한 기하학적 구조에 적용가능한 것으로 판단된다.

Keywords : Lateral pressure, Modified silo theory, Modified wedge theory, Backfilled -thin wedge.

1. 서 론

우리나라는 지형적으로 산지가 많은 곳으로 주거지, 도로 등을 조성하기 위하여 산지를 굴착한 후 발생된 굴착면 또는 기존 암반 및 풍화대의 급사면에 인접하여 옹벽, 지하박스, 교대 등과같은 다양한 토목구조물이 설치되곤 한다. 이러한 토목구조물 중에서 옹벽구조물이 차지하는 비중이 대부분이라고 하여도 과언이 아니다. 이와같이 인위적 및 자연적인 안정사면에 인접하여 설치되는 옹벽에서는 가상파괴면이 안정사면을 가로질러 존재하기 때문에 옹벽에 작용하는 토압은 고전적 이론인 Rankine 및 Coulomb이론에 의한 값보다 일반적으로 작은 것으로 평가되었다. 그러나, 이러한 경우에 적용할 수 있는 이론 및 실험적인 연구결과는 특별한 경우에 국한되어 있어 안타까운 실정이다.

기존사면에 인접하게 설치되는 옹벽에 작용하는 토압을 구하는 이론은 옹벽과 기존사면이 모두 연직하게 평행한 상태로 놓여있는 조건에 대하여 유도된 사일로(Silo)이론에 거의 국한되어 있다(Bowles, 1985; Frydman & Keissar, 1987; Kingsley, 1989; Mackey & Mason, 1972; Myslivec, 1981; Okabe, 1924). 한편으로, 홍콩정부 토목부의 옹벽설계편람(GCO, 1982)에서는 쐐기이론으로 토압을 산출하여야 한다고 기술되어 있으나 구체적인 이론식은 제안하지 못하였다. 따라서, 임의의 기울기를 지닌 기존사면과 토압을 받는 옹벽배면의 기하학적인 형상을 고려한 새로운 토압이론식의 유도가 절실히 요구된다.

여기서는 기존사면에 인접하여 설치되는 옹벽에 대하여 기존사면과 옹벽배면의 기울기를 고려한 새로운 토압이론을 사일로 및 쐐기이론을 각각 확장하여 유도하였다. 그리고 본 제안이론의 타당성을 입증하기 위하여 기존의 실험결과와 비교하고자 한다.

2. 기존의 이론적 접근

기존의 안정사면에 인접하게 설치되는 옹벽에 작용하는 토압을 구하는 이론적 연구는 드물며, 다음의 두 경우로 구분될 수 있다. 먼저, 연직한 안정면에 인접하게 설치되는 옹벽의 뒷면이 연직할 경우, 즉 뒤채움 흙의 내외측인 두 면이 서로 평행한 경우에 적용가능한 것으로써 일반적으로 사일로(Silo)이론의 토압이론이다. 다른 경우는 두면이 서로 평행하지 않은 조건에 대한 것이며, Coulomb토압이론과 같이 흙쐐기를 사용하여 주동토압을 구하는 방법이다.

2.1. 사일로(Silo) 이론

그림 1은 사일로, 암거 등과 같이 연직한 두 벽면 사이에 흙을 뒤채움할 때 흙의 자중을 부분적으로 벽면마찰력이 부담하는 경우를 보여주고 있다. 이 그림에서 지표면 아래로 깊이 z에 위치한 두께 dz의 미소 수평요소를 생각하자. 평형상태에서 이 요소에 작용하는 힘들은 이 요소의 윗면에 작용하는 연직력 V, 바닥면에서의 반력 V+dV, 요소의 자중 W(=γ Bdz), 그리고 요소의 양측에 작용하는 수평력

은 K(V/B)dz이다. 여기서, 이 요소에 작용하는 연직응력은 뒤채움 폭 B의 전폭에 걸쳐 균등하게 분포한다고 가정하였다. 그러면, 수평토압 σ_h는 미소요소에 작용하는 힘들에 대하여 연직평형방정식을 취하면 쉽게 구할 수 있으며, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_h = K\frac{V}{B} \tag{1}$$

벽면에 작용하는 수평토압 σ_h는 식 (1)으로 구할 수 있지만, K값을 정의하는 것은 쉽지 않은 문제이다. K값은 초기에 Janssen(1895)에 의하여 실험적으로 산출하였지만, 그후 Marston & Anderson(1913) 및 Spangler & Handy(1982)는 Rankine의 주동토압계수인 $K_a=\sigma_1/\sigma_3=(1-\sin\phi)/(1+\sin\phi)$를 사용하였다. Krynine (1945)은 K_a가 벽면의 마찰력이 없을 때 적용할 수 있는 토압계수라는 모순점을 감안하여, 벽체의 마찰력이 완전동원된(fully mobilized) 경우에 대하여 아래와 같이 정의하였다.

$$K=\frac{\sigma_h}{\sigma_v}=\frac{1-\sin^2\phi}{1+\sin^2\phi} \tag{2}$$

한편으로, Handy(1985)는 최소 주응력 아취로부터 K값을 제안하고 있다. 벽면마찰력이 완전동원된 경우에는 식 (3)과 같다.

$$K=\frac{\sigma_h}{\sigma_v}=1.06(\cos^2\theta+K_a\sin^2\theta) \tag{3}$$

여기서 θ는 최대 주응력 σ_1이 작용하는 방향과 수평면이 이루는 각도이다. 그리고 벽면마찰력이 부분동원될 경우에는 동원된 벽면마찰각 δ로부터 θ를 구하여 식 (3)에 대입하면 K값을 얻을 수 있다. 여기서 벽면마찰각이 완전동원될 경우에 $\theta=45°+\phi/2$이다.

Frydman & Keissar(1987)는 Handy에 의한 최소 주응력 아치와 평면아치로 구한 K값의 차이가 10%이내 이므로 평면아취로 간주하였으며, 벽면마찰이 부분동원될 경우의 K값을 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$K=\frac{(\sin^2\phi+1)-\sqrt{(\sin^2\phi+1)^2-(1-\sin^2\phi)}}{(4\tan^2\delta-\sin^2\theta+1)}\sqrt{(4\tan^2\delta-\sin^2\phi+1)} \tag{4}$$

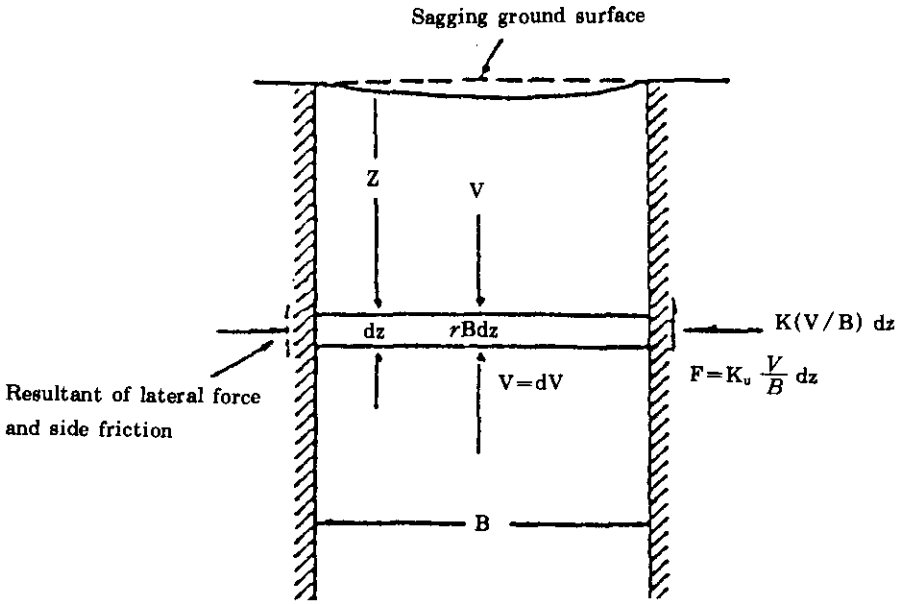


그림 1. 흙의 아칭 및 미소요소(Handy, 1985)

김(1990)은 옹벽의 이동형태에 따라 유발되는 벽면마찰각을 깊이별로 모형화하여 Sokolovskii응력특성법(1960, 1965)을 사용하여 사일로 이론을 확장하였으나 현실적으로 적용이 어려우며, 수치해석으로 수평토압을 계산해야 하는 번거러운 점이 있다.

2.2. 흙쐐기 이론

Mackey & Mason(1972)은 사일로의 하부영역에 작용하는 수평토압을 쐐기이론으로 유도하였다. 이들이 사용한 쐐기의 파괴면은 벽면마찰력을 무시한 Rankine의 가설을 근거로 하여서 가상파괴면을 $45°+\phi/2$로 사용하였다. Myslivec(1981)은 연직한 두 강성벽체 사이에 느슨하게 뒤채움된 모래로 부터 유발되는 수평토압은 쐐기이론을 사용하여 구하였으며, 최대토압은 도해법을 이용하여 결정하였다. 그 후, 옹벽과 기존사면이 연직하지 않는 일반적인 조건에 대해서는 홍콩정부 토목부(GCO, 1982)에서 발간된 옹벽설계편람을 참조할 수 있다. 이 편람에 의하면, 기존사면을 구성하고 있는 재료가 큰 강도를 가지며, 옹벽에 인접한 뒤채움 흙으로 계산된 파괴면이 기존사면을 가로질러 존재하게 될 경우에는 뒤채움 흙이 옹벽과 기존사면의 두 경계면을 따라 미끄러진다고 가정하였다. 이 경우에 토압계산은 쐐기이론을 사용하여 결정하여야 하며, 이 토압은 깊이에 따라 비선형으로 분포하지만 뒤채움 공간이 무한한 경우에 대해 계산된 주동토압보다는 작은 값이라고 하였다. 그러나 이 편람에서는 구체적인 토압산출을 하지 않고 단순한 제안만 하였다. 그리하여 정성교 등(1994. b)은 옹벽과 기존사면이 임의의 조건에서 뒤채움면이 수평인 경우에 대하여 Kingsley(1989. a 및 b), 정성교 등(1991, 1992, 1993. a, 1993. b, 1993. c, 1994. a)이 무한 뒤채움 공간에 적용하였던 평면 아취개념을 이용하여 토압 이론식을 유도하였다.

3. 이론식의 유도

3.1. 보완 사일로(Silo) 이론식

2장에서는 기존의 사일로이론으로 벽체와 기존사면이 모두 연직할 경우에 대해서 유도된 것이다. 본 절에서는 두면이 서로 평행하지 않고 뒤채움 표면이 경사진 일반적인 경우에 대하여 기존의 사일로 이론을 확장하고자 한다.

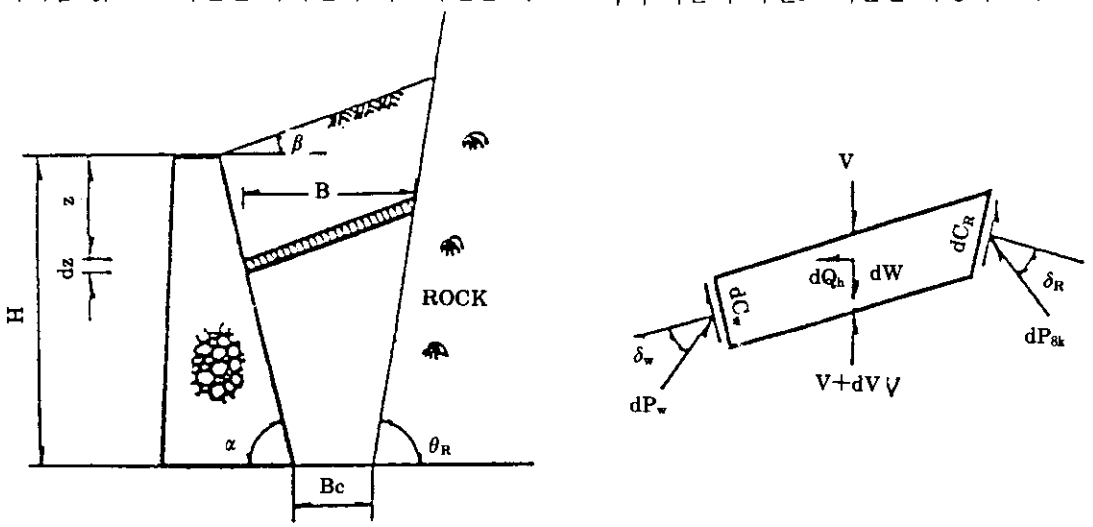


그림 2. 보완 사일로이론을 위한 미소평면요소

그림 2(a)는 높이 H이며, 뒷면의 경사각이 α인 강성 옹벽을 경사각이 θ_R인 강성 고정벽체 또는 암벽에 인접하게 설치된 경우를 나타내고 있다. 그림 2(a)는 주동토압 발생시를 나타낸 것이며, (b)는 수동상태를 나타내고 있다. 옹벽의 상단에서 깊이 z아래에 있는 미소요소의 두께 dz, 폭이 B인 임의의 미소막대요소에 작용하고 있는 각종 힘들을 나타내고 있다. 여기서 V와 dV는 이 미소막대요소에 작용하는 연직력과 그 증분을 포함한 것이며, dW는 이 미소막대의 자중이며, dP_w 및 $dP_{\theta R}$는 그 측면에 작용하는 반력들을, 그리고 dC_W 및 dC_R은 부착력을 각각 나타내고 있다.

이 미소막대요소에 작용하는 힘들에 대하여 연직 평형방정식을 취하여 정리하면 식 (5)와 같다.

$$dW=dV+dP_w\cos(\alpha-\delta_w)=dP_{\theta R}\cos(\theta_R-\delta_R)+dC_w\sin\alpha+dC_R\sin\theta_R \quad (5)$$

이 요소에 대하여 수평 평형방정식을 취하여 정리하면 식 (6)과 같다.

$$dP_{\theta R}=\frac{1}{\sin(\theta_R-\delta_R)}\left[dP_w\sin(\alpha-\delta_w)-dC_w\cos\alpha+dC_R\cos\theta_R-k_h\,dW\right] \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\{1+\cot(\theta_R-\delta_R)k_h\,dW=dV+dP_w[\cos(\alpha-\delta_w)+\sin(\alpha-\delta_w)\cot(\theta_R-\delta_R)]+dC_w[\sin\alpha-\cos\alpha\cot(\theta_R-\delta_R)]+dC_R[\sin\theta_R+\cos\theta_R\cot(\theta_R-\delta_R)] \quad (7)$$

여기서,

$dQ_h=k_h\,dW$: 미소평면요소에 작용하는 수평 관성력

$k_h=\alpha_h/g$: 지진시의 수평가속도 계수

α_h=지진시의 수평가속도

g=중력가속도

$a_W=\frac{c_w}{c'}$: 흙의 점착력에 대한 벽면의 부착력의 비

$a_R=\frac{c_R}{c'}$: 흙의 점착력에 대한 암면의 부착력의 비

c_w=벽면에 작용하는 부착력

c_R=암벽면에 작용하는 부착력

c'=흙의 점착력

$dC_w=c_w\,\mathrm{cosec}\,\alpha\,dz=c'a_w\,\mathrm{cosec}\,\alpha\,dz$

$dC_R=c_R\,\mathrm{cosec}\,\theta_R dz=c'a_R\,\mathrm{cosec}\,\theta_R\,dz$

$$C_0=\frac{\cos\beta\sin\theta_R}{\sin(\theta_R-\beta)}$$

$$C_1=\frac{\cos\beta\sin(\alpha+\theta_R)}{\sin\alpha\sin(\theta_R-\beta)}$$

$$C_2=\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha\cos\beta}$$

$$B=\frac{\cos\beta\sin\theta_R}{\sin(\theta_R-\beta)}\left[B_c+\frac{\sin(\alpha+\theta_R)}{\sin\alpha\sin\theta_R}H\right]=C_0B_C+C_1(H-z)$$

미소막대요소의 자중 dW는 미소항을 무시하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$dW=\gamma[C_0B_C+C_1(H-z)]C_2dz \quad (8)$$

여기서,

$C_3=\{\cos(\alpha-\delta_w)+\sin(\alpha-\delta_w)\cot(\theta_R-\delta_R)\}$

$C_4=a_w\,\mathrm{cosec}\alpha\{\sin\alpha-\cos\alpha\cot(\theta_R-\delta_R)\}+a_R\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha\sin(\theta_R-\beta)}\{\sin\theta_R+\cos\theta_R\cot(\theta_R-\delta_R)\}+C_3\sec\delta_w\,\mathrm{cosec}\alpha\,(K^*-1)\cot\phi'$

옹벽의 뒷면에 작용하는 미소 막대요소에 작용하는 주동토압력 dP_w는 평균 연직응력 $\bar{\sigma}_z=V/B$라 가정하고, 이 평균 연직응력에 대한 옹벽의 뒷면에 작용하는 수직응력의 비는 토압계수 $K^*\left(=\frac{\sigma_w+c'\cot\phi}{\bar{\sigma}_z\cos^2\beta+c'\cot\phi}\right)$라 정의하면 식 (9)와 같이 된다.

$$dP_w=[K^*\cos^2\beta\,\bar{\sigma}_z+(K^*-1)c'\cot\phi]\,\mathrm{cosec}\alpha\sec\delta_w\,dz=[K^*\cos^2\beta\,\frac{V}{B}+c'\cot\phi(K^*-1)]\sec\delta_w\,\mathrm{cosec}\alpha\,dz \quad (9)$$

식 (8)및 식 (9)를 식 (7)에 대입하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{dV}{dz}+C_5\frac{V}{[C_0B_C+C_1(H-z)]}$$
$$=C_6[C_0B_C+C_1(H-z)]\gamma-C_4\,c' \qquad (10)$$

여기서,

$C_5=K^*C_3\cos^2\beta\ \sec\delta_w\ \mathrm{cosec}\alpha$

$C_6=\{1+\cot(\theta_R-\delta_R)k_h\}C_2$.

선형 1계 미분방정식인 식 (10)의 해를 구하기 위하여 경계조건 z=0, V=0를 대입하여 적분상수 C를 구한 후 정리하면 식 (11)과 같이 된다.

$$V=[C_0B_C+C_1(H-z)]^{C_7}$$
$$\left[\frac{C_6\gamma}{C_1(C_7-2)}\{[C_0B_C+C_1(H-z)]^{(2-C_7)}-(C_0B_C+C_1H)^{(2-C_7)}\}-\frac{C_4c'}{C_1(C_7-1)}\{[C_0B_C+C_1(H-z)]^{(1-C_7)}-(C_0B_C+C_1H)^{(1-C_7)}\}\right] \qquad (11)$$

여기서, $C_7=C_5/C_1$

벽체에 작용하는 임의의 깊이 z에 따른 토압 $p(z_o)$은 다음과 같다.

$$p(z_o)=\sigma_w\sec\delta_w$$
$$=[K^*\cos^2\beta\ \sigma_z+(K^*-1)c'\cot\phi]\sec\delta_w$$
$$=\frac{C_5K^*\cos^2\beta\ \sec\delta_w}{C_1(C_7-2)}\left\{\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\left(1-\frac{z}{H}\right)\right)\cdot-\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\right)^{(2-C_7)}\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\left(1-\frac{z}{H}\right)\right)^{(C_7-1)}\right\}\gamma H$$
$$+\left[\cot\phi(K^*-1)-\frac{C_4K^*\cos^2\beta}{C_1(C_7-1)}\left\{1-\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\right)^{(1-C_7)}\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\left(1-\frac{z}{H}\right)\right)^{(C_7-1)}\right\}\right]c'\sec\delta_w \qquad (12)$$

벽면에 작용하는 전주동토압 Pa_o는 수직응력 σ_w와 전단응력 τ_w의 합력에 해당하므로 작용방향은 벽면의 수직방향에서 δ_w만큼 기울어져 작용하며, 그 크기는 식(13)으로 나타낼 수 있다.

$$Pa_o=\frac{1}{\sin\alpha}\int_o^H p(z_o)dz=\frac{C_6\,K^*\cos^2\beta}{[\sin\alpha\cos\delta_w\,C_1^2(C_7-2)]}\left\{\frac{1}{2}\left[\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\right)^2-\left(\frac{C_0B_C}{H}\right)^2\right]-\frac{\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\right)^2-\left(\frac{C_0B_C}{H}\right)^{C_7}\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\right)^{(2-C_7)}}{C_7}\right\}\gamma H^2$$
$$\frac{1}{\sin\alpha\cos\delta_w}\left[\cot\phi(K^*-1)-\frac{C_4K^*\cos^2\beta}{C_1^2(C_7-1)}\left\{C_1-\frac{\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\right)^2-\left(\frac{C_0B_C}{H}\right)^{C_7}\left(\frac{C_0B_C}{H}+C_1\right)^{(2-C_7)}}{C_7}\right\}\right]c'H \qquad (13)$$

벽체 저면으로부터 전주동토압의 작용점위치 $\bar{h}_o$는 다음 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{h}_o=\frac{\int_o^H p(z_o)(H-z)dz}{\int_o^H p(z_o)dz}=\frac{Q_o}{R_o}H \qquad (14)$$

여기서,

$$Q_0=\frac{C_6}{(C_7-2)}\Big[\frac{C_0B_c}{2H}+\frac{C_1}{3}-\{\frac{1}{C_1^2(C_7+1)}((\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^3-(\frac{C_0B_c}{H})^{(C_7+1)}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(2-C_7)})$$
$$-\frac{1}{C_1^2C_7}\frac{C_0B_c}{H}((\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^2-(\frac{C_0B_c}{H})^{C_7}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(2-C_7)})\}\Big]$$
$$+\Big[\frac{C_1}{2K^*\cos^2\beta}\cot\phi(K^*-1)-\frac{C_4}{(C_7-1)}\{\frac{1}{2}-\frac{1}{C_1^2(C_7+1)}((\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^2$$
$$-(\frac{C_0B_c}{H})^{(C_7+1)}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(1-C_7)}-\frac{1}{C_1^2C_7}$$
$$\frac{C_0B_c}{H}((\frac{C_0B_c}{H}+C_1)-(\frac{C_0B_c}{H})^{C_7}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(1-C_7)})\}\Big]\frac{c'}{\gamma H}$$

$$R_0=\frac{C_6}{C_1(C_7-2)}\Big\{\frac{1}{2}((\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^2-(\frac{C_0B_c}{H})^2)$$
$$\frac{1}{C_7}((\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^2-(\frac{C_0B_c}{H})^{C_7}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(2-C_7)})\Big\}$$
$$-\Big[\frac{C_1}{K\cos^2\beta}\cot\phi(K^*-1)-\frac{C_4}{C_1(C_7-1)}\{C_1-\frac{1}{C_7}((\frac{C_0B_c}{H}+C_1)$$
$$-(\frac{C_0B_c}{H})^{C_7}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(1-C_7)})\}\Big]\frac{c'}{\gamma H}$$

3.2 보완 흙쐐기 이론

일반적으로 극한 평형상태의 Coulomb이론은 뒤채움 흙을 반무한체로 가정하여 흙쐐기 이론식을 유도하였다. 그러나 본 절에서는 벽면이 경사지고 뒤채움 면이 임의의 경사를 지닐 때 옹벽과 기존사면이 인접해 있을 경우 평면 아칙개념을 도입하여 흙쐐기 이론식을 보완하고자 한다.

(1) 흙쐐기의 상층에 대한 이론식

그림3은 뒤채움흙에 임계각 θ로 파괴된다고 가정한 흙쐐기와 미소막대요소에 작용하는 힘들을 나타내고 있다. 그림 3(a)에서 깊이 H_1까지는 앞 절에서의 수정사일로이론으로 해석할 수 있으며, 하부의 쐐기에 대해서는 본절의 (2)에서 유도하기로 한다.

앞 절에서 구한 보완 사일로(Silo) 이론식으로부터 벽면에 작용하는 토압 $p(z_1)$은 식 (15)와 같다.

$$p_w(z_1)=\frac{C_6K^*\cos^2\beta\sec\delta_w}{C_1(C_7-2)}$$
$$\Big\{(\frac{C_0B_c}{H}+C_1(1-\frac{z}{H}))-(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(2-C_7)}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1(1-\frac{z}{H}))^{(C_7-1)}\Big\}$$
$$+\sec\delta_w\Big[\cot\phi(K^*-1)-\frac{C_4K^*\cos^2\beta}{C_1(C_7-1)}\{1-(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(1-C_7)}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1(1-\frac{z}{H}))^{(C_7-1)}\}\Big]\frac{c'}{\gamma H}\quad(15)$$

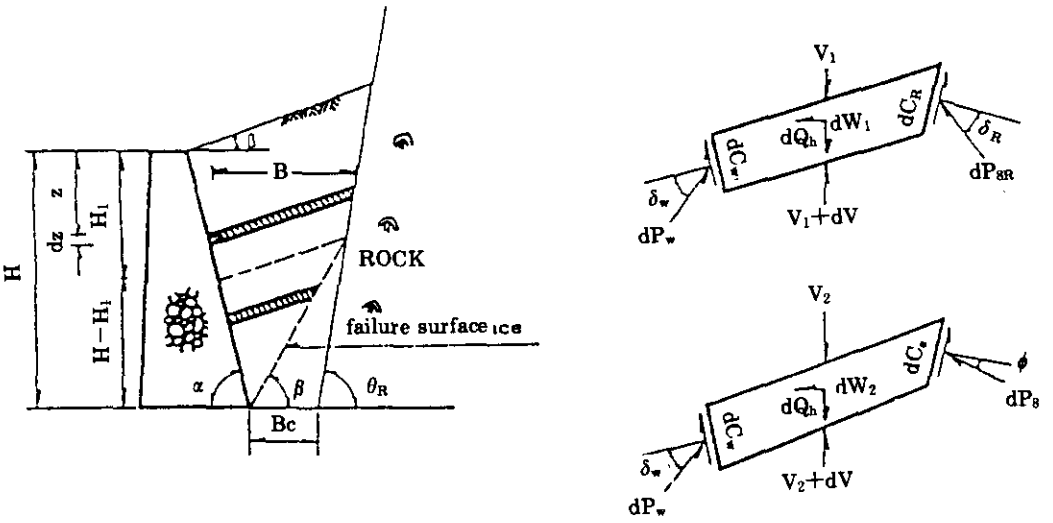


그림 3. 보완 흙쐐기이론을 위한 미소평면요소

벽면에 작용하는 무차원의 전주동토압 P_{w1}은 수직응력 σ_w와 전단응력 τ_w의 합력에 해당하므로 작용방향은 벽면의 수직방향에서 δ_w만큼 기울어져 작용하며, 그 크기는 $p(z_1)$을 0에서 H_1까지 적분하여 구하면 식 (16)과 같이 된다.

$$P_{w1}=\frac{2C_6K^*\cos^2\beta}{\{\sin\alpha\cos\delta_w C_1^2(C_7-2)\}}\left[\frac{1}{2}\{(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^2-(\frac{C_0B_c}{H}+C_1(1-\frac{H_1}{H}))^2\}\right.$$
$$-\frac{1}{C_7}\{(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^2-(\frac{C_0B_c}{H}+C_1(1-\frac{H_1}{H}))^{C_7}(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(2-C_7)}\}\Big]$$
$$+\frac{1}{\sin\alpha\cos\delta_w}\Big[\cot\phi(K^*-1)\frac{H_1}{H}-\frac{C_4K^*\cos^2\beta}{C_1^2(C_7-1)}$$
$$\{C_1\frac{H_1}{H}-\frac{1}{C_7}\{(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)-(\frac{C_0B_c}{H}+C_1(1-\frac{H_1}{H}))^{C_7}$$
$$(\frac{C_0B_c}{H}+C_1)^{(1-C_7)}\}\Big]\frac{2c'}{\gamma H} \tag{16}$$

여기서 H_1은 그림 3에서의 기하학적인 관계로 부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$H_1=H-\frac{\sin\alpha\sin\theta_R\sin(\theta-\beta)}{\sin(\alpha+\beta)\sin(\theta_R-\theta)}B_c$$

전주동토압의 작용점의 위치는 식(17)과 같이 된다.

$$\bar{h}_1=\frac{\int_0^{H_1} p(z_1)(H_1-z)dz}{\int_0^{H_1} p(z_1)dz}=\frac{Q_1}{R_1}H_1 \tag{17}$$

여기서,

$$B_0=B_C+C_1(H-H_1)$$

$$Q_1=\frac{C_6}{(C_7-2)}\Big[\frac{C_0B_0}{2H_1}+\frac{C_1}{3}-\Big\{\frac{1}{C_1^2(C_6+1)}\{(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^3$$

$$-(\frac{C_0B_0}{H_1})^{(C_7+1)}(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^{(2-C_7)}\}+\frac{1}{C_1^2C_7}\frac{C_0B_0}{H_1}$$

$$\{(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^2-(\frac{C_0B_0}{H_1})^{C_7}(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^{(2-C_7)}\}\Big\}\Big]\gamma H_1^2$$

$$+\Big[\frac{C_1}{2K^*\cos^2\beta}\cot\phi(K^*-1)-\frac{C_4}{(C_7-1)}\Big\{\frac{1}{2}-\frac{1}{C_1^2(C_7+1)}$$

$$\{(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^2-(\frac{C_0B_0}{H_1})^{(C_7+1)}(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^{(1-C_7)}\}$$

$$+\frac{1}{C_1^2C_7}\frac{C_0B_0}{H_1}\{(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)-(\frac{C_0B_0}{H_1})^{C_7}(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^{(1-C_7)}\}\Big\}\Big]c'H_1$$

$$R_1=\frac{C_6}{C_1(C_7-2)}\Big[\frac{1}{2}\{(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^2-(\frac{C_0B_0}{H_1})^2\}$$

$$-\frac{1}{C_7}\{(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^2-(\frac{C_0B_0}{H_1})^{C_7}(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^{(2-C_7)}\}\Big]\gamma H_1^2$$

$$+\Big[\frac{C_1}{K^*\cos^2\beta}\cot\phi(K^*-1)-\frac{C_4}{C_1(C_7-1)}\{C_1-\frac{1}{C_7}\{(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)$$

$$-(\frac{C_0B_0}{H_1})^{C_7}(\frac{C_0B_0}{H_1}+C_1)^{(1-C_7)}\}\Big]c'H_1$$

(2) 흙쐐기의 하층에 대한 이론식

그림 3에서 옹벽 상단으로 부터 깊이 z아래에 미소요소 dz, 폭 B인 임의의 미소요소를 가정하면, V_2와 dV_2는 연직력과 그 증분이며, dW_2와 dQ_h는 미소요소 무게와 지진력의 수평분력을 나타낸다. 그리고, 두 측면에 작용하는 반력은 각각 dP_w 및 dP_θ이며, 부착력은 dC_w 및 dC_θ이다. 여기서 δ_w 및 ϕ는 벽면 및 흙의 내부마찰각이다.

이 미소요소에 작용하는 힘에 대하여 연직평형방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$dW_2=dV_2+dP_w\cos(\alpha-\delta_w)+dP_\theta\cos(\theta-\phi)$$
$$dC_w\sin\alpha+dC_\theta\sin\theta \tag{18}$$

수평 평형방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$dP_\theta=\frac{1}{\sin(\theta-\phi)}\{dP_w\sin(\alpha-\delta_w)$$
$$-dC_w\cos\alpha+dC_\theta\cos\theta-k_h\,dW_2\} \tag{19}$$

식 (19)를 식 (18)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\{1+\cot(\theta-\phi)k_h\}dW_2=dV_2+dP_w$$
$$\{\cos(\alpha-\delta_w)+\sin(\alpha-\delta_w)\cot(\theta-\phi)\}$$
$$+\{\sin\alpha-\cos\alpha\cot(\theta-\phi)dC_w+$$
$$\{\sin\theta-\cos\theta\cot(\theta-\phi)\}dC_\theta \tag{20}$$

여기서,

$$a_w=\frac{c_w}{c'}$$

$$dC_w=c_w\ \mathrm{cosec}\alpha\ dz=a_w\ c'\ \mathrm{cosec}\alpha\ dz$$

$$dC_\theta=c'\sin(\alpha+\beta)/\sin\alpha\sin(\theta-\beta)dz$$

$$=c'(1+D_1\tan\beta)\mathrm{cosec}\theta\ dz.$$

그리고,

$$D_1=\frac{\cos\beta\sin(\alpha+\theta)}{\sin\alpha\sin(\theta-\beta)}$$

$$D_2=\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha\cos\beta}D_1$$

$$D_3=\{\cos(\alpha-\delta_w)+\sin(\alpha-\delta_w)\cot(\theta-\phi)$$

$$B=D_1(H-z)$$

미소 막대요소 자중 dW_2는 미소항을 무시하고 정리하면 식 (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$dW_2=D_2(H-z)dz\,\gamma \qquad (21)$$

옹벽의 뒷면에 작용하는 미소막대요소에 작용하는 주동토압력 dP_w는 앞절의 정의와 같이 하면, 아래 식 (22)와 같이 된다.

$$dP_w=\left[K^*\cos^2\beta\frac{V_2}{B}+c'\cot\phi(K^*-1)\right]\sec\delta_w\ \mathrm{cosec}\ \alpha\ dz \qquad (22)$$

식 (21) 및 식 (22)를 식 (20)에 대입하면 식 (23)과 같이 된다.

$$\frac{dV_2}{dz}+\frac{D_5}{(H-z)}V_2=D_6\gamma(H-z)-D_4c' \qquad (23)$$

여기서,

$$D_4=D_3(K^*-1)\cot\phi\ \sec\delta_w\mathrm{cosec}\alpha+a_w\ \mathrm{cosec}\alpha$$

$$\{\sin\alpha-\cos\alpha\ \cot(\theta-\phi)\}$$

$$+\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha\sin(\theta-\beta)}\{\sin\theta+\cos\theta\cot(\theta-\phi)\}$$

$$D_5=\frac{K^*D_3\cos^2\beta}{\cos\delta_w\ \sin\alpha D_1}$$

$$D_6=\{1+\cot(\theta-\phi)k_h\}D_2.$$

선형 1계 미분방정식 (23)의 해는 경계조건 $z=H_1$, $V_1=V_2$로부터 구할 수 있다.

$$V_2=\left[D_7\left(1-\frac{z}{H}\right)^{D5}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{-D5}-\frac{D_6}{2-D_5}\left\{\left(1-\frac{z}{H}\right)^2-\left(1-\frac{z}{H}\right)^{D5}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{-D5}\right\}\right]\gamma H^2+\left[\frac{D_4}{1-D_5}\right\}\left(1-\frac{z}{H}\right)$$

$$-\left(1-\frac{z}{H}\right)^{D5}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{-D5}\Big\}-D_8\left(1-\frac{z}{H}\right)^{D5}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{-D5}\Big]c'H \qquad (24)$$

여기서,

$$D_7=\frac{C_6H^2}{C_1(C_7-2)}\left[\left\{\frac{C_oB_c}{H}+C_1\left(1-\frac{H_1}{H}\right)\right\}^2-\left\{\frac{C_oB_c}{H}+C_1\left(1-\frac{H_1}{H}\right)\right\}^{C7}\left\{\frac{C_oB_c}{H}+C_1\right\}^{(2-C7)}\right]$$

$$D_8=\frac{C_4H}{C_1(C_7-1)}\left[\left\{\frac{C_oB_c}{H}+C_1\left(1-\frac{H_1}{H}\right)\right\}-\left\{\frac{C_oB_c}{H}+C_1\left(1-\frac{H_1}{H}\right)\right\}^{C7}\left(\frac{C_oB_c}{H}+C_1\right)^{(1-C7)}\right]$$

$D_9=D_7/H^2$, $D_{10}=D_8/H$.

따라서, 벽면에 작용하는 토압 $p(z_2)$은 식 (25)와 같다.

$$p(z_2)=\sigma_w\sec\delta_z=\left[K^*\cos^2\beta\frac{V_2}{B}+(K^*-1)c'\cot\phi\right]\sec\delta_w$$

$$=\frac{K^*\cos^2\beta}{D_1}\left[D_7\left(1-\frac{z}{H}\right)^{(D5-1)}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{-D5}-\frac{D_6}{2-D_5}\left\{\left(1-\frac{z}{H}\right)-\left(1-\frac{z}{H}\right)^{D5-1}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{2-D5}\right\}\right]\gamma H$$

$$+\left[\cot\phi(K^*-1)+\frac{D_4K^*\cos^2\beta}{D_1(1-D_5)}\left\{1-\left(1-\frac{z}{H}\right)^{D5-1}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{1-D5}\right\}-\frac{D_8K^*\cos^2\beta}{D_1}\left(1-\frac{z}{H}\right)^{D5-1}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^{-D5}\right]c' \qquad (25)$$

벽면에 작용하는 전주동토압 Pa_2는 식 (25)를 H_1에서 H까지 적분하면 전토압은 다음식과 같다.

$$Pa_2=\int_{H_1}^{H} p(z_2)dz=\frac{K^*\cos^2\beta}{\sin\alpha\cos\delta_w D_5 D_1}$$
$$\left\{\frac{D_5}{2}\left(1-\frac{H_1}{H}\right)^2+D_9\right\}\gamma H^2$$
$$+\left[\frac{D_1 D_5\cot\phi(K^*-1)(1-\frac{H_1}{H})}{\cos^2\beta\,K^*}\right.$$
$$\left.-\left\{D_{10}+D_4\left(1-\frac{H_1}{H}\right)\right\}\right]c'H \qquad (26)$$

전주동토압의 작용위치는 식 (27)과 같이 된다.

$$\bar{h}_2=\frac{\int_{H_1}^{H} p(z_2)(H-z)dz}{\int_{H_1}^{H} p(z_2)dz}=\frac{Q_2}{R_2}H \qquad (27)$$

여기서,

$$Q_2=\frac{1}{D_1(D_5+1)}$$
$$\left\{\frac{D_6}{3}(1-\frac{H_1}{H})^3+D_9(1-\frac{H_1}{H})\gamma H^2\right\}$$
$$+\left[\frac{1}{2K^*\cos^2\beta}\cot\phi(K^*-1)(1-\frac{H_1}{H})^2\right.$$
$$-\frac{1}{D_1(D_5+1)}$$
$$\left.\left\{\frac{D_4}{2}(1-\frac{H_1}{H})^2+D_{10}(1-\frac{H_1}{H})\right\}\right]c'H$$
$$R_2=\frac{1}{D_1D_5}\left\{\frac{D_6}{2}(1-\frac{H_1}{H})^2+D_9\right\}\gamma H^2$$
$$+\left[\frac{1}{K^*\cos^2\beta}\cot\phi(K^*-1)(1-\frac{H_1}{H})\right.$$
$$\left.-\frac{1}{D_1D_5}\left\{D_{10}+D_4(1-\frac{H_1}{H})\right\}\right]c'H$$

상층과 하층을 합한 전주동토압은 $P_a=P_{a1}+P_{a2}$이고, 전주동토압의 작용위치는 식 (28)과 같다.

$$P_a\cdot\bar{h}=P_{a1}(\bar{h}_1+H-H_1)/H+P_{a2}\bar{h}_2$$
$$\therefore\bar{h}=\frac{P_{a1}(\bar{h}_1+H-H_1)/H+P_{a2}\bar{h}_2}{P_a} \qquad (28)$$

이 이론식에 사용된 토압계수 K*는 Mohr응력원을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있었다 (정성교 등:1995; 1996 a, b 및 c 참조).

$$K^*=\frac{1-\sin\phi\cos(\pi-2\alpha-2\beta+2\omega)}{1+\sin\phi\cos 2\omega} \qquad (29)$$

여기서, $2\omega=2\alpha+2\beta-\delta_w+\sin^{-1}\left(\frac{\sin\delta_w}{\sin\phi}\right)-\pi$

흙쐐기에서 임계각 θ는 전토압 $P_a(=P_{a1}+P_{a2})$가 최대인 조건 즉, $\partial P_a/\partial\theta=0$로 부터 얻을 수 있으나, 그 결과는 아주 복잡하므로 정(1994)를 참조하도록 하자. 정(1994)의 연구결과에 의하면 θ는 Coulomb이론에서와 같이 $\theta=45°+\phi/2$를 사용하여도 Ingold(1978)의 연구결과와 비슷하게 토압은 큰 오차를 보이지 않았다.

4. 실험 결과와의 비교

4.1 Frydman & Keissar의 실험(1987)

Frydman & Keissar(1987)는 연직하며 평행한 두 벽체가 인접하여 있을 경우에 흙의 뒤채움으로 유발되는 정지토압 및 벽체의 이동으로 유발되는 주동토압을 측정하기 위하여 원심력 모형시험을 실시하였다. 이 시험에서 모형박스는 알루미늄으로 제작된 327×210×100mm의 크기이며, 옹벽의 높이×폭×두께가 195×100×20mm이었다. 그리고 하중계(Kyowa, LM-A형)는 옹벽높이의 1/3 및 2/3위치에 설치되었다.

뒤채움 흙은 0.1~0.3mm범위의 균등한 가는 모래가 사용되었으며, 균등계수 Cu=1.5이며, 최대 및 최소건조밀도가 각각 16.4 및 14.0kN/m³이었다. 이 모래는 3층으로 나누어 성층다짐을 실시하여 상대밀도가 70%가 되도록 하였다. 단순전단시험에 의한 뒤채움 흙의 내부 마찰각은 $\phi=36°$이며, 직접전단시험에 의한 옹벽의 벽면 마찰각(모래와 알루미늄 사이의 마찰각)은 20~25°이었다. 그리고 암벽의 마찰각은 뒤채움 모래를 벽체에 접착시켜서 뒤채움 흙의 내부 마찰각과 동일하도록 하였다.

시험조건은 B/H(뒤채움 폭/옹벽높이)가

1.1, 0.3, 0.22, 0.19 및 0.1이 되도록 조정하였으며, 가속도는 옹벽의 중간지점에서 43.7g가 되도록 실험하였는데, 이것은 약 8.5m높이의 옹벽에 해당하였다. 그리고 주동상태를 재현하기 위하여 옹벽의 저면에서 1°기울어지도록 조정되었다.

그림 4는 새로이 제안된 보완 흙쐐기 및 보완 사일로 이론에 의하여 계산된 수평토압들과 Frydman-Keissar(1987)의 실험결과를 비교한 것이다. 여기서, 세로축은 깊이 z를 뒤채움 폭 B로 나누어 무차원 깊이로 나타낸 것이며, 가로축은 수평응력 σ_x를 γz로 나누어 무차원화된 수평토압을 나타낸 것이다. 보완사일로이론에서 식 (12)에 의한 토압은 옹벽배면과 암벽이 모두 연직이며 비점성토로 뒤채움된 지표면이 수평인 조건 하에서 Frydman-Keissar에 의한 식 (4)를 이용한 것과 정확히 일치한다. 이들 사일로이론에 의한 토압분포는 상기의 조건 하에서 두 벽체의 이격거리 Bc에 크게 의존하지만, 그림 4에서와 같이 무차원 토압 $p(z)/\gamma z$ 및 무차원 깊이 z/B로 나타내면 한 곡선으로 얻어진다. 그리고 식 (15)와 (17)을 합성한 보완 흙쐐기이론에서도 보완 사일로이론에서와 같이 Bc에 무관하게 한 곡선으로 얻어지는 경향을 보여준다.

Frydman-Keissar에 의한 실험조건은 γ_d =15.6kN/m^3, ϕ=36°, δ_R=36°, δ_w=20~25°이며, B/H가 5가지 조건 하에서 얻어진 것이다. 만약 δ_w를 일정하게 놓으면 상기에서 언급한 무차원 좌표 상에서 동일조건으로 비교가 가능할 것이다.

그림 4에서 이론토압은 δ_w=25°로 가정하여 구한 것이다. 이 그림에서 보면, 실험조건인 ϕ =36°를 대입한 두 이론치는 대체로 실험값의

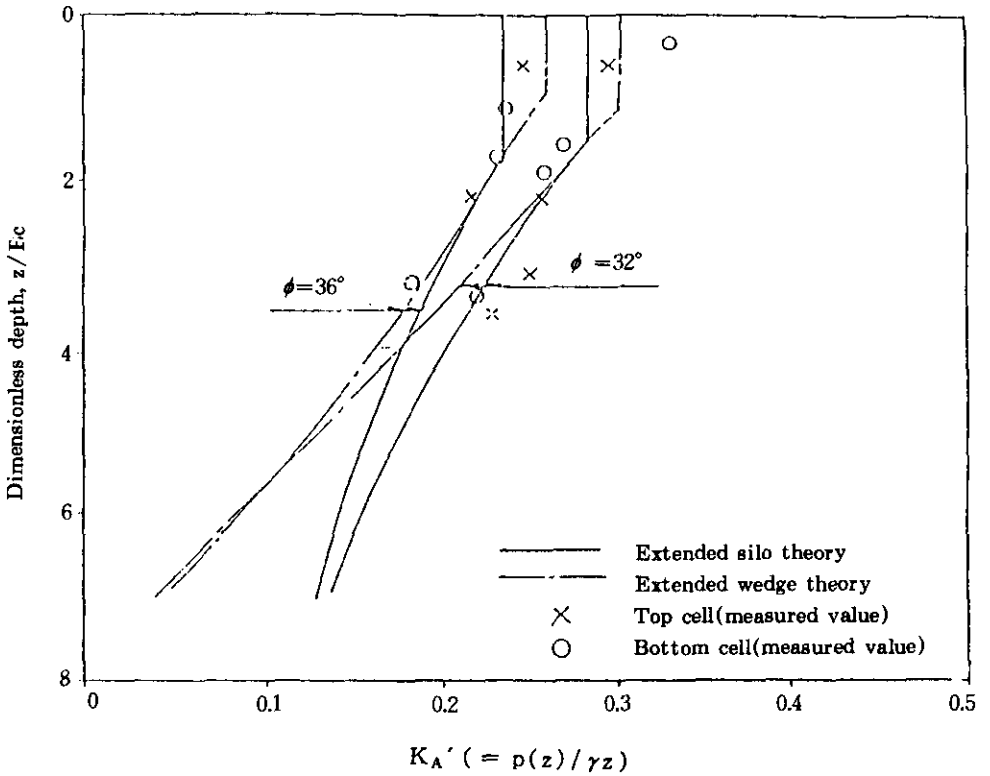


그림 4. Frydman-Deissar(1987)의 측정값과 해석해의 비교

하한계와 대체로 일치함을 알 수 있으며, 임의로 ϕ=32°로 대입하여 계산된 이론치들은 상한계를 나타내고 있다. 실험상의 오차를 고려하면, 보완 사일로 및 보완 흙쐐기이론은 실험범위 내에서 대체로 만족스러운 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 z/B의 값이 4.0을 초과할 경우에는 두 이론에 의한 계산결과는 상당히 어긋나고 있음을 볼 수 있는데, 실험범위가 제한되어 있어서 z/B>4.0에서는 두 이론의 적합성을 판단하기 어렵다.

4.2 Roth의 실험(1979)

Roth et al(1979)은 1975년 로스엔젤레스에 있는 한 건물의 지하벽체에 토압계를 부착하여 주로 지진이 발생할 경우에 시간별 토압을 기록하도록 하였다.

그림 5는 건물의 남측에 위치한 두 계측지점에 대한 단면을 나타내고 있다. 굴착깊이는 각각 34.4m 및 31.3m이며, 굴착 경사각은 1(v):(3h)/5 및 1(v):(2h)/3이었다. 이 그림에서 보여주는 그물형 망은 Roth et al이 수평토압을 구하기 위한 유한요소망이며, 화살표로 표시된 PE는 토압계의 위치를 나타내고 있다. 지반조건은 주로 연약한 퇴적암, 즉 부분적으로 혈암이 내재된 이암층이며, 이암층 위에 이토 및 모래질 층이 최대 10m까지 존재하였다. 뒤채움 흙은 이토질 모래로서 대표적인 입도분포는 통일분류법에 의하면 SM에 해당되었다. 뒤채움은 25cm 두께씩 성층한 후 진동 쉿푸드롤러(vibratory sheepsfoot roller)로써 수정 프록트(modified Proctor)밀도의 90% 가까이 되도록 다짐을 실시하였다. 그리고, 외측의 지하벽체는 방수 및 토압계를 보호하기 위하여 뒤채움이 추가되었다. 즉, 건조된 벤토나이트(bentonite)가루가 채워진 주름잡힌 판지(0.5cm 두께)를 토압계 전면에 놓고, 1cm두께의 섬유판지를 그 위에, 그리고 90cm두께의 자갈을 주 뒤채움재인 이토질 모래층 앞에 넣었다. 여기서 자갈층은 진동탬퍼(vibratory tamper)로써 다졌다고 한다. 토압계는 13cm의 직경이며, 수은이 얇게 채워진 스트레인 게이지형으로 Carlson토압계(1952)라고 명명되어 있다.

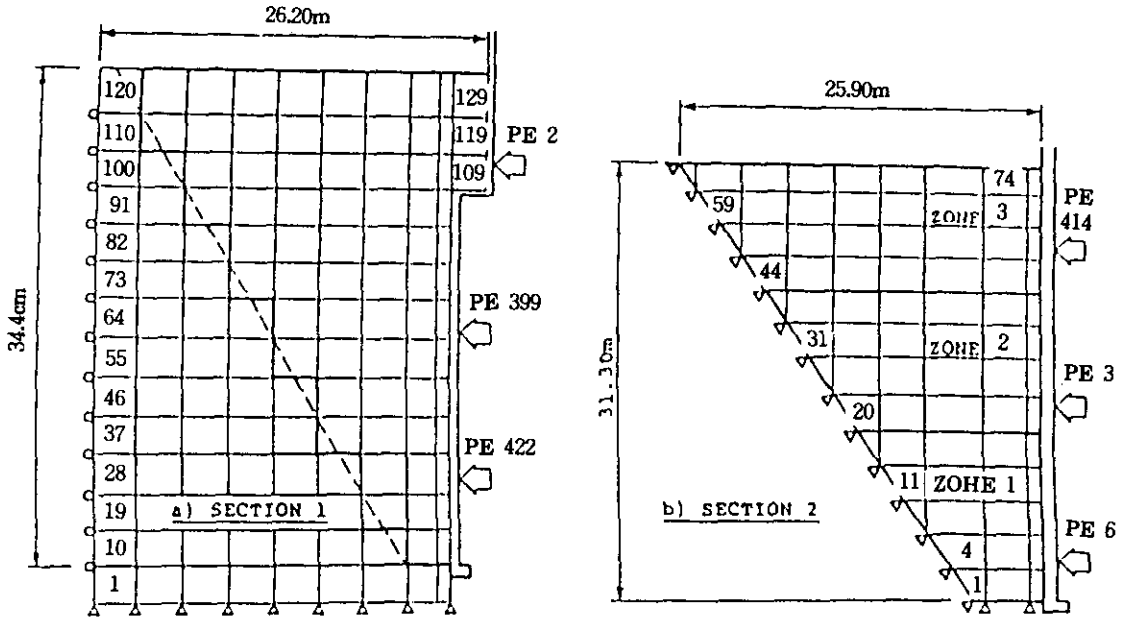
그림 6 과 7은 각각 그림 5에 나타낸 단면 1과 단면 2에 대한 계측결과 및 Roth et al에 의하여 계산된 유한요소해석의 결과(비선형 탄성해석)와 새로이 제안된 두 이론에 의한 수평토압을 나타내고 있다. 이들 그림에서 최상단의 토압계, 즉 PE2 및 PE414에 대한 계측결과는 신뢰할 수 없어서 제외하였다고 한다. 그리고 위의 두 조건들에서는 가상파괴면이 뒤채움 공간내에 존재하는 경우이므로 보완 흙쐐기이론의 직접적인 적용이 어려워서, 가상파괴면이 기존의 사면이며 벽마찰각 δ_R이 ϕ와 같다는 가정하에서 보완 흙쐐기이론으로부터 수평토압을 얻었다.

그림 6은 그림 5 (a) 단면 1의 경우로서, Roth et al에 의한 계측결과와 비선형 유한요소해석의 결과는 비교적 좋은 일치를 나타내지만, 보완 흙쐐기이론에 의한 수평토압은 정성적으로 전자의 두 결과들과 비슷한 양상을 보여주는 반면에 정량적으로는 다소 큰 차이임을 알 수 있다. 만약 보완 흙쐐기이론에 벽면 마찰각을 작게 사용하여 계산한다면 계측결과와 유사한 값으로 될 것이다. 한편, 보완 사일로이론에 의한 수평토압은 정성적 및 정량적으로 실측치와 상이한 양상을 보여주고 있다. 즉, 사일로이론에서는 임의의 깊이까지 토압이 증가하다가 그 지점을 넘어서면서 일정한 값으로 유지되는 일반적인 경향에 반하여, 본 그림에서는 그렇치가 못하다. 이것은 계산상 아직 토압이 일정하게 유지되는 임의 깊이에 도달되지 못하였음을 의미한다.

그림 7은 그림 5 (b)단면 2에 대한 비교이다. 그림에서 보면, 보완 흙쐐기이론과 Roth et al의 유한요소해석 결과에 의한 수평토압은 실측치와 함께 비교적 좋은 일치를 나타낸다. 비록 PE3의 토압계에서 다소 과소평과 되었을 것으로 추측되지만 유한요소해석 결과와 이론치의 비교를 통하여 전체적인 토압분포의 경향을 알 수 있을 것이다. 그러나, 그림 7에서 보

완 사일로 이론에 의한 수평토압은 위의 두 결과에 비하여 아주 상이한 결과를 나타내고 있다. 보완 사일로 이론에 의한 토압분포의 양상은 전자의 경우와 같은 이유 때문에 불일치되고 있다.

상기의 두 비교결과를 종합하여 보면, 보완 흙쐐기이론에 의한 수평토압이 실측치와 유한요소해석 결과는 비교적 잘 일치되지만, 보완 사일로이론에 의한 것은 아주 상이한 결과를 나타내고 있다. 본 현장의 조건은 건물 지하벽



(a) 단 면 1 (b) 단 면 2

그림 5. 유한요소망과 함께 표현된 측정단면 및 토압계의 위치 (Roth et al, 1979)

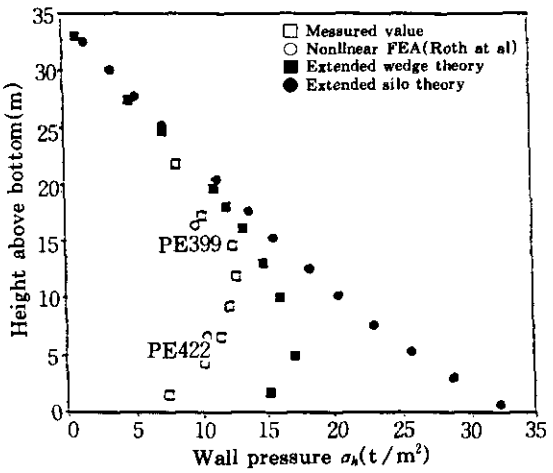


그림 6. 단면 1에 대하여 Roth et al에 의한 측정 및 유한요소해석결과들과 제안된 이론토압의 비교

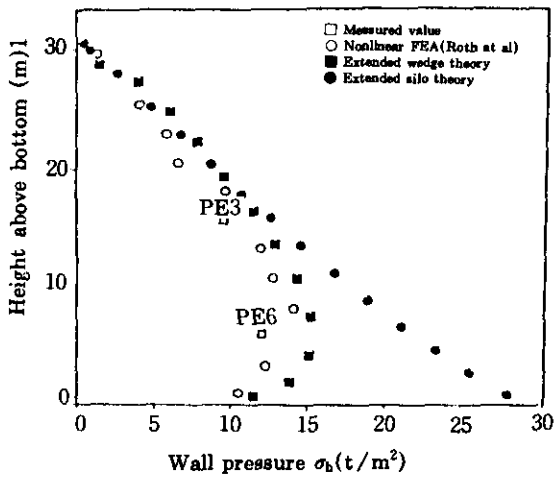


그림 7. 단면 2에 대하여 Roth et al에 의한 측정 및 유한요소해석결과들과 제안된 이론토압의 비교

체의 이동이 거의 없는 정지상태에 가까워서 가상파괴면의 적용 및 이 면에서 동원되는 내부 마찰각을 적절히 산정할 수 없었음에도 불구하고 보완 흙쐐기이론에 의한 수평토압은 실측치와의 비교적 좋은 일치를 보였다. 만약, 이러한 결과가 실제와 흡사했다고 하면 더욱 좋은 결론을 얻을 수 있었을 것으로 판단된다.

5. 결 론

기존의 안정사면에 인접하여 설치되는 중력식 옹벽에 작용하는 정적 및 동적주동토압을 사일로 및 흙쐐기이론을 확장하여 옹벽배면과 기존사면이 경사지며, $c'-\phi$흙으로 경사지게 뒤채움한 일반적인 경우에 적용 가능한 이론식을 유도하였다. 본 이론식은 평면 아취개념을 이용하여 전개된 것으로 토압분포 및 작용위치를 구할 수 있었으며, 또한 동적해석을 위하여 준 정적해석법이 적용되었다. 새로이 유도된 이론식은 기존의 실험결과치와 함께 비교·분석하였다.

새로이 제안된 이론식을 기존의 실험결과에 적용한 결과로 부터 다음을 얻을 수 있었다. 기존의 실험적 결과는 일반적인 기하학적 조건을 충족시킬 수 있는 경우는 아니지만, 옹벽배면과 기존사면이 모두 연직한 상태에서는 보완사일로 및 보완 흙쐐기이론에 의한 토압이 모두 실험결과와 좋은 일치를 보여주었다. 그러나, 두 면이 모두 연직한 상태가 아닌 경사벽면인 조건에서는 후자의 이론이 정성적으로 좋은 일치를 보여 주었다.

앞으로 다양한 기하학적 조건 및 뒤채움 흙에 대하여 실내 및 현장실험을 통하여 본 제안 이론의 적용성이 더욱 입증되기를 기대한다.

감사의 글

본 논문을 위하여 많은 토론에 임해주신 Prof. CRI Clayton(Univ. of Surrey)에게 감사의 뜻을 전한다.

참 고 문 헌

1. Bowles, J. E.(1985). Foundation Analysis and Design, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Co, 816p.
2. Carlson, R. W.(1952). "Development of a device for the direct measurement of Compressive stress", Proc. Am. Concrete Inst., Nov:207.
3. Frydman. S., and Keissar. I.(1987). "Earth Pressure on Retaining Walls near Rock Faces", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 113, 6, June, pp.586~599.
4. GCO(1982)., Geoguide 1, Guide to Retaining Wall Design, Geotechnical control office Civil Engineering Services Department HONG KONG, pp.28-29.
5. Handy, R. L.(1985). "The Arch in Soil Arching", Journal of Geotechical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, Mar., pp. 302~318.
6. Harrop-Williams, Kingsley,(1989.a). "Arch in Soil Arching", JGE, ASCE, Vol.115, No.3, pp. 415~419.
7. Harrop-Williams, Kingsley,(1989.b). "Geostatic Wall Pressure", JGE, ASCE, Vol. 115, No. 9, pp. 1321~1325.
8. Ingold, T. S.(1978). "Some Simplifications of Coulomb's Active Earth Pressure Theory", GROUND ENGINEERING, MICE, MASCE, FGS, May.
9. Janssen, H. A.(1985). "Versuche uber Getreidedruck in Silozellen", Partial English Translation in Proceeding of Institute of Civil Engineers, London, England, Vol.39, pp.1045~1049.
10. Krynine, D. P.(1945). "Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams", Karl Terzaghi, Transactions, ASCE, Vol. 110, pp.1175~1178.
11. Lee, I. K. and Herington, J. R.(1972). "Effect of Wall Movement on Active and Passive Pressure", J. of ASCE, Geotech., Div., Vol.98, No. SM6, pp. 625~640.
12. Mackey, R. D., and Mason, P. A.(1972). "Pres-

sure Distribution during Filling and Discharging a Silo", 5th European Conference on SMFE, Madrid, Vol.9, pp.55~62.
13. Marston, A., and Anderson, A. O.(1913). "Theory of Loads on Pipes in Ditches and Tests of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe", Bul. 31, Iowa Engrg., Experiment Station, Ames, Iowa.
14. Myslive, A.(1981). "Pressure of Loose Soils at Rest between two Rigid Walls", 10th ICSMFE, Vol. 2, pp. 201~204.
15. Okabe, S.(1926). "Gernal Theory of Earth Pressure", Journal of the Japanese Society of Civil Engineering, Tokyo.
16. Roth, W. H., and Lee, K. L., Crandall, L. (1979). "Calculated and Measured Earth Pressure on a Deep basement Wall", 3rd international Conference on Numerical Methods in Geomechanics, 2, pp.1179~1191.
17. Sokolovskii, V. V.(1960). Statics of Soil Media, Butterworths Scientific Publications, London, England.
18. Sokolovskii, V. V.(1965). Statics of Soil Granular Media, Translated from Russian by Luscher, Pergamon Press London.
19. Spangler, M. G., and Handy, R. L.(1982). Soil Engineering, 4th Edition, Harprt & Row, Publishers, Inc, New York, pp.572~574.
20. 김홍택(1990). "암 근처에 설치되는 옹벽의 발생토압 연구", 대한토질공학회지, 제6권, pp. 7~17.
21. 정성교, 이만렬, 윤계환, 백승훈(1991). "경사진 중력식 옹벽의 주동토압", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp. 577~580.
22. 정성교, 정진교, 이만렬, 백승훈(1992). "중력식 옹벽에 작용하는 동적토압", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp. 571~574.
23. 정성교, 이만렬, 이충래, 백승훈(1993.a). "동적하중을 고려한 주동토압", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp. 449~452.
24. 정성교, 백승훈(1993.b). "비점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 정적토압", 한국지반공학회지, 제 9권, 제 1호, pp. 69~75.
25. 정성교, 이만렬, 안창국, 허대영(1993.c). "점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 주동토압", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp. 453~456.
26. 정성교, 이만렬(1994.a). "동적하중을 고려한 주동토압", 동아대학교 한국자원개발연구소 연구논문집, 제 18권, 제1호, pp. 69~75.
27. 정성교, 정진교, 안창국, 허대영(1994.b). "기존사면에 인접한 중력식 옹벽의 수평토압", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp. 635~638.
28. 정성교, 허대영, 이만렬(1996. a). "$c-\varphi$흙으로 뒤채움한 중력식 옹벽에 작용하는 정적토압", 한국지반공학회지, 제 12호, 제 4호, 한국지반공학회, pp. 47~60.
29. 정성교, 조기영, 윤치관, 이대명(1996. b). "되채움(굴착)의 형상에 따라 매설박스에 유발되는 토압", 한국지반공학회지, 제 12권, 제 5호, 한국지반공학회, pp. 27~40.
30. 정성교, 이만렬, 김문규(1996. c). "Coulomb이론을 이용한 인장균열 및 주동토압", 한국지반공학회지, 제 12권, 제 6호, 한국지반공학회, pp. 101~114.
31. 정성교 등(1995). "도랑의 되채움으로 유발되는 연직력", 대한토목학회 논문집, Vol. 15, No. 2, 대한토목학회, pp. 491~500.
32. 정진교(1994). "기존사면에 인접한 중력식 옹벽에 작용하는 주동토압", 공학박사 학위논문, 동아대학교.
33. 허대영(1993). "점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 수평토압", 동아대학교 공학석사 학위논문, 93p.

(접수일자 1997. 3. 14)