

강성사면에 인접한 옹벽의 거동에 관한 연구

Behavior of Retaining wall near Rigid slopes

유 남 재* 이 명 옥** 박 병 수***
Yoo, Nam-Jae Lee, Myoung-Woog Park, Byung-Soo

ABSTRACT

This thesis is an experimental and numerical research on bearing capacity acting on retaining walls close to rigid slopes with stiff angles.

Experiments were performed with changing the roughness of adjacent slope to the wall, its inclination, distance between wall and slope. Vertical stress and applied surcharge loads were measured by miniature earth cells and a load cell respectively.

Stress distribution Vertical Settlement of surcharge load of rigid model footing were measured by LVDTs.

Bearing capacities of surcharge loads were compared with theoretical estimations by using several different methods of limit equilibrium and numerical analysis.

For limit equilibrium methods, the modified silo and the wedge theories, proposed by Chung sung gyo and Chung jin gyo (1994) were used to analyze test results Based on those modified theories, the particular solution with the boundary condition of surcharge loads on the surface of backfill was obtained to find the stress distributions acting in the backfill and to compare with test results.

From results of surcharge test with model wall being very close to the slope, analyzed results by the modified silo theory and to be in the better agreements than other methods.

키워드 : 강성사면, 극한평형, 보완사이로, 보완흙쌓기

Keywords : Rigid Slopes, Limit Equilibrium, Modified Silo, Modified Wedge

1. 서론

1.1 연구의 목적

성토 및 굴착사면에서 그의 안정성을 확보하는 것은 지반공학적으로 오랜 기간 동안 관심있는 것중의 하나이다. 따라서 다양한 사면안정공법등이 개발 및 시공되어왔으며 옹벽을 비롯하여 앵커, 널막뚝, 현장콘크리트 타설 벽체 공법, 식생공법, 소일네일공법, 여러 종류의 토목섬유를 사용한 보강토공법 등이 최근 들어 새로이 개발되어 시공되어 왔다. 그중에서 가장 보편적으로 시행되고 있는 공법은 토류구조물의 대표

적인 것이라고 할 수 있는 옹벽구조물을 들 수 있다.

최근에 주거지의 부지조성, 기존도로의 확포장사업이 활발히 진행되면서 급경사면의 굴착과 함께 옹벽을 설치하는 경우가 많이 이루어지고 있으며 또한, 기존의 암사면이나 풍화대의 급사면에 인접하여 교대를 설치하거나 지하암거를 설치하는 경우가 흔히 발생하고 있는 실정이다. 이와같은 경우 채움재의 성토재료와 사면사이에서 발생하는 마찰 저항력으로 연직 및 수평토압의 재분배가 발생하는 것으로 알려져 있으나 국내에서 이에 대한 실험결과는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 사면에 인접한 옹벽의 안정성 및 그의 거동에 관한 연구를 수행하기 위하여 기존의 관련 토압이론에 대하여 문헌고찰을 실시하고 고찰 결과를 바탕으로 다양한 재하조건에 대하여 기존이론

* 정희원, 강원대학교 토목공학과 부교수

** 정희원, 강원대학교 토목공학과 시간강사

** 정희원, 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료

을 확장하였다. 또한, 실내 모형 실험을 수행하여 그 이론의 타당성을 검증하는 한편 실험결과 획득한 모형의 거동을 분석함으로써 사면에 인접한 옹벽에서 발생하는 토압의 재분배 효과 및 그의 안정성에 미치는 영향에 대하여 연구를 실시하였다.

2. 문헌고찰 및 제시

기존의 안정사면에 인접하게 설치되는 옹벽구조물에 작용하는 토압을 구하는 이론은 옹벽의 배면과 기존의 안정사면이 모두 연직하게 평행한 상태에 놓여있는 조건에 대하여 사용가능한 사이로이론에 거의 국한되어 있으며 옹벽과 기존의 안정사면이 서로 연직하게 설치되어있지 않은 경우에는 Coulomb의 토압이론과 같이 흠쇄기이론을 사용하여 옹벽배면에 작용하는 토압을 산출하는 흠쇄기 이론이 사용되어왔다.

그러나 정진교 [15]는 평면아치개념을 이용하여 옹벽과 기존의 안정사면이 서로 평행하지 않고 임의의 경사면을 갖는 경우에 대하여 옹벽의 상부에서는 사이로이론을 옹벽의 하부에서는 Coulomb의 흠쇄기이론을 이용하여 토압을 산정하는 보완 흠쇄기 이론을 유도하였다.

그러나 이 해석식은 뒷채움재 자중에 의해 옹벽 배면에 작용하는 주동토압을 산정는데 국한되어 있으므로 본 연구에서는 옹벽의 뒷채움표면에 상재하중이 재하되는 경우에 대하여 상기이론의 지배방정식을 근거로하여 재하조건에 따른 경계조건하에서 토압분포에 관한 특별해를 유도 하였다. 또한, 상재하중 재하 실험중 관찰된 파괴면을 바탕으로 극한평형식을 유도하여 극한하중을 산정하는 식을 유도 하였다.

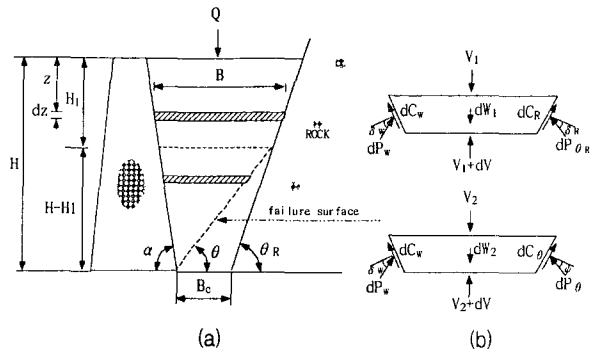
2.1 보완흠쇄기 이론

2.1.1 흠쇄기상층에 관한 이론식

<Fig. 1> (a)는 높이가 H 이며 배면의 경사각 α , 인 강성옹벽이 경사각 θ_R , 인 강성고정벽체 또는 암벽에 인접하게 설치된 경우를 나타내고 있다.

<Fig. 1> (b)는 옹벽의 상단에서 깊이 z 아래에 있는 미소요소의 두께 dz, 폭이 B 인 임의의 미소 막대 요소에 작용하고 있는 각종 힘들을 나타내고 있다.

여기서, V 와 dV 는 각각 이 미소막대요소에 작용하는 연직력과 그 증분을 나타낸것이며, dw 는 미소막대의 자중이며, dP_w 및 $dP_{\theta R}$ 는 그 측면에 작용하는 반력들을, 그리고 dC_w , dC_R 은 부착력을 각각 나타내고 있다.



<Fig. 1> Retaining wall adjacent to the inclined slope
(a) Configuration of boundaries
(b) Forces acting on flat arch element

이 미소의 막대요소에 작용하는 힘들에 대하여 연직 및 수평 평형방정식을 취하여 정리하면 식(1), (2)와 같다.

$$dW_1 = dV_1 + dP_w \cos(\alpha - \delta_w) + dP_{\theta R} \cos(\theta_R - \delta_R) + dC_w \sin \alpha + dC_R \sin \theta_R \quad (1)$$

$$dP_{\theta R} = \frac{1}{\sin(\theta_R - \delta_R)} [dP_w \sin(\alpha - \delta_R) - dC_w \cos \alpha + dC_R \cos \theta_R] \quad (2)$$

한편, 옹벽배면에 작용하는 주동토압력 dP_w 는 평균 연직응력을 $\bar{\sigma}_z = V/B$ 라 가정하여, 이 평균연직응력에 대한 옹벽의 배면에 작용하는 수평응력의 비를 토압계수 K^* $\left(= \frac{\sigma_w + C \cot \phi}{\sigma_z \cos^2 \beta + C' \cot \phi} \right)$ 라 정의하여 해를 구하면 다음과 같다.

$$dP_w = (K\sigma_z + (K-1)c' \cot \phi) \operatorname{cosec} \alpha \cdot \sec \delta_w \cdot dz \quad (3)$$

한편, 미소막대의 자중 dW_1 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dW_1 = \gamma \cdot B \cdot dz = \gamma \cdot [(H-Z)C_1 + B_c] \cdot dz \quad (4)$$

식(1)에 식(2) 대입하여 정리하면 다음과 같이 식(5)로 나타낼수 있으며 식(6)으로 간소화 시킬수 있다.

$$dW_1 = dV_1 + dP_w (\cos(\alpha - \delta_w) + \sin(\alpha - \delta_w) \cot(\theta_R - \delta_R)) + dC_w (\sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta_R - \delta_R)) + dC_R (\sin \theta_R + \cos \theta_R \cot(\theta_R - \delta_R)) \quad (5)$$

여기서, $dC_w = a_w \cdot c' \cdot \operatorname{cosec} \alpha \cdot dz$

$$dC_R = a_r \cdot c' \cdot \operatorname{cosec} \theta_R \cdot dz$$

$$C_1 = \frac{\sin(\alpha + \theta_R)}{\sin \alpha \cdot \sin \theta_R}$$

$$C_2 = \cos(\alpha - \delta_w) + \sin(\alpha - \delta_w) \cdot \cot(\theta_R - \delta_R)$$

$$C_3 = a_w \cdot \operatorname{cosec} \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta_R - \delta_R)) + a_r \cdot \operatorname{cosec} \theta_R (\sin \theta_R + \cos \theta_R \cot(\theta_R - \delta_R))$$

$$\therefore dW_1 = dV_1 + dP_w C_2 + C_3 c' dz \quad (6)$$

한편, 식(6)에 식(3)과 식(4) 대입하여 정리하면 다음과 같이 식(7)로 정리 할 수 있다.

$$\gamma[(H-Z)C_1 + B_c] = \frac{dV}{dz} + C_4 \sigma_z + C_5 C \quad (7)$$

여기서, $\sigma_z = V/B$, $B = (H-Z)C_1 + B_c$

$$C_4 = C_2 K \operatorname{cosec} \alpha \cdot \sec \delta_w$$

$$C_5 = C_2(K-1) c' \cot \phi \cdot \operatorname{cosec} \alpha \cdot \sec \delta_w + C_3$$

상기의 식(7)은 다음과 같이 식(8)의 선형 일계 미분 방정식의 형태로 나타낼수 있으며

$$\frac{dV}{dz} + C_4 \frac{V}{(H-z)C_1 + B_c} = \gamma[(H-z)C_1 + B_c] - C_5 C \quad (8)$$

이 식의 일반해는 다음과 같다.

$$V = (B_c + (H-z)C_1)^{C_6} \left[\frac{\gamma}{C_1(C_6-2)} (B_c + (H-z)C_1)^{2-C_6} - \frac{C_5 C}{C_1(C_6-1)} (B_c + (H-z)C_1)^{1-C_6} + C \right] \quad (9)$$

상기의 식(9)에 경계조건 $V=Q$, $z=0$ 을 대입하여 적분 상수 C 를 구하여 정리하면 다음과 같다.

$$\therefore V_1 = (B_c + (H-z)C_1)^{C_6} \left[\frac{\gamma}{C_1(C_6-2)} \{ (B_c + (H-z)C_1)^{2-C_6} - (B_c + HC_1)^{1-C_6} \} - \frac{C_5 C}{C_1(C_6-1)} \{ (B_c + (H-z)C_1)^{1-C_6} - (B_c + HC_1)^{1-C_6} \} + (B_c + HC_1)^{-C_6} \cdot Q \right] \quad (10)$$

따라서, 벽면에 작용하는 주동토압은 식(11)로 구할 수 있다.

$$P_{(z_1)} = \left[K^* \cdot \frac{V_1}{B} + (K^* - 1) c' \cot \phi \right] \sec \delta_w$$

$$P_{(z_0)} = \frac{K^* \cdot \sec \delta_w}{C_1(C_6-2)} \{ (DH_1) - (DH)^{2-C_6} \cdot (DH_1)^{C_6-1} \} \gamma \cdot H + \left[(K^* - 1) \cot \phi - \frac{C_5 \cdot K^*}{C_1(C_6-1)} \{ 1 - (DH)^{1-C_6} \cdot (DH_1)^{C_6-1} \} \right] c' \cdot \sec \delta_w + K^* \cdot \sec \delta_w (DH)^{-C_6} \cdot (DH_1)^{C_6-1} \cdot \frac{Q}{H} \quad (11)$$

여기서, $(\frac{B_c}{H} + C_1) = DH$

$$(\frac{B_c}{H} + (1 - \frac{z}{H})C_1) = DH_1$$

한편, 벽면에 작용하는 전주동토압 P_{w_1} 은 수직응력 σ_w 와 전단응력 τ_w 의 합력에 해당하므로 작용방향은 벽면의 수직방향에서 δ_w 만큼 기울어져 작용하며, 그 크기는 $P_{(z_0)}$ 를 깊이 H_1 까지 적분하여 구할 수 있다.

$$P_{w_1} = \frac{1}{\sin \alpha} \int_0^{H_1} P_{(z_0)} dz$$

$$P_{w_1} = \frac{K \cdot \sec \delta_w \cdot \gamma \cdot H^2}{\sin \alpha \cdot C_1^2 (C_6-2)} \left[\frac{1}{2} \{ (DH)^2 - (DH_2)^2 \} - \frac{1}{C_6} \{ (DH)^2 - (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{2-C_6} \} \right] + \frac{H \cdot C' \cdot \sec \delta_w}{\sin \alpha} \left[\cot \phi (K-1) \frac{H_1}{H} + \frac{C_5 \cdot K}{C_1^2 (C_6-1)} \cdot \left\{ C_1 \frac{H_1}{H} - \frac{1}{C_6} (DH) - (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{1-C_6} \right\} \right] + \frac{K \cdot \sec \delta_w \cdot Q}{C_1 \cdot \sin \alpha} \cdot \left\{ \frac{1 - (DH)^{-C_6} \cdot (DH_2)^{C_6}}{C_6} \right\} \quad (12)$$

여기서, $(\frac{B_c}{H} + (1 - \frac{H_1}{H})C_1) = DH_2$

2.1.2 흠쇄기하층에 관한 이론식

한편, <Fig. 1> (b)의 흠쇄기 하층에 대한 미소요소에 수평 및 수직의 평형방정식에 대한 해는 식 (13), (14) 와 같으며

$$dW_2 = dV_2 + dP_w \cos(\alpha - \delta_w) + dP_\theta \cos(\theta - \phi) + dC_w \sin \alpha + dC_\theta \sin \theta \quad (13)$$

$$dP_\theta = \frac{1}{\sin(\theta - \phi)} [dP_w \sin(\alpha - \delta_w) - dC_w \cos \alpha + dC_\theta \cos \theta] \quad (14)$$

위 두 식을 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dW_2 = dV_2 + dP_w (\cos(\alpha + \delta_w) + \sin(\alpha - \delta_w) \cot(\theta - \phi)) - dC_w \cos \alpha \cot(\theta - \phi) + dC_\theta \cos \theta \cot(\theta - \phi) + dC_w \sin \alpha + dC_\theta \sin \theta \quad (15)$$

한편, 미소막대의 자중 dW_2 는 다음과 같이 정리할 수 있으며

$$dW_2 = \gamma \cdot B \cdot dz = \gamma \cdot [(H - z)D_1] \cdot dz \quad (16)$$

$$\text{여기서, } D_1 = \frac{\sin(\alpha + \theta)}{\sin \alpha \cdot \sin \theta}$$

옹벽의 배면에 작용하는 미소막대요소의 주동토압 dP_w 은 앞절의 흠쇄기 상층에서의 정의와 같이 식 (17)로 구할 수 있다.

$$dP_w = (K \cdot (\sigma_z + C \cot \phi)) \cdot \operatorname{cosec} \alpha \cdot \sec \delta_w \cdot dz \quad (17)$$

식 (15)에 식 (16), (17)을 대입하면 다음과 같은 선형일계 미분방정식의 형태로 정리 할 수 있으며

$$\frac{dV_2}{dz} + \frac{V_2}{(H - Z)D_1} D_4 = \gamma(H - Z)D_1 - c'D_5 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } D_2 &= \cos(\alpha - \delta_w) + \sin(\alpha - \delta_w) \cdot \cot(\theta - \phi) \\ D_3 &= a_w \cdot \operatorname{cosec} \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \cot(\theta - \phi)) \\ &\quad + \operatorname{cosec} \theta (\sin \theta + \cos \theta \cdot \cot(\theta - \phi)) \\ D_4 &= D_2 \cdot K \operatorname{cosec} \alpha \cdot \sec \delta_w, \\ D_5 &= D_2(K - 1) \cot \phi \cdot \operatorname{cosec} \alpha \cdot \sec \delta_w + D_3 \end{aligned}$$

사기의 식(18)의 일반해를 구한 뒤 경계조건 $z = H_1, V_1 = V_2$ 를 대입하여 적분상수 C를 구한 뒤 정리하면 다음과 같다.

$$V_{1(z=H_1)} = \frac{\gamma \cdot H^2}{C_1(C_6 - 2)} \{ (DH_2)^2 - (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{2-C_6} \}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{C_5 \cdot C \cdot H}{C_1(C_6 - 1)} \{ (DH_2) - (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{1-C_6} \} \\ & + (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{1-C_6} \cdot Q \end{aligned} \quad (19)$$

상기의 식 (19)는 다음과 같이 정리 할수 있으며

$$V_{1(z=H_1)} = D_7 \cdot \gamma - D_8 \cdot C + D_9 \cdot Q \quad (20)$$

여기서,

$$\begin{aligned} D_7 &= \frac{H^2}{C_1(C_6 - 2)} \{ (DH_2)^2 - (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{2-C_6} \} \\ D_8 &= \frac{C_5 \cdot C \cdot H}{C_1(C_6 - 1)} \{ (DH_2) - (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{1-C_6} \} \\ D_9 &= (DH_2)^{C_6} \cdot (DH)^{1-C_6} \\ D_{10} &= \frac{D_7}{H^2}, \quad D_{11} = \frac{D_8}{H} \end{aligned}$$

따라서 흠쇄기 하층의 수직력은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_2 &= [D_7 \cdot \gamma ((DH_3)D_1)^{D_6} \cdot ((DH_4)D_1)^{-D_6} \\ &\quad + \frac{\gamma \cdot H^2}{D_1(D_6 - 2)} \{ ((DH_3)D_1)^2 \\ &\quad - ((DH_3)D_1)^{D_6} \cdot ((DH_4)D_1)^{2-D_6} \}] \\ &\quad - \frac{D_5 \cdot c' \cdot H}{D_1(D_6 - 1)} \{ ((DH_3)D_1) \\ &\quad - ((DH_3)D_1)^{D_6} \cdot ((DH_4)D_1)^{1-D_6} \} \\ &\quad - D_8 \cdot c' \cdot ((DH_3)D_1)^{D_6} \cdot ((DH_4)D_1)^{-D_6} \\ &\quad + D_9 \cdot Q \cdot ((DH_3)D_1)^{D_6} \cdot ((DH_4)D_1)^{-D_6} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{여기서, } (1 - \frac{z}{H}) = DH_3, (1 - \frac{H_1}{H}) = DH_4$$

따라서 벽면에 작용하는 주동토압은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{(z_2)} &= \sigma_w \cdot \sec \delta_w \\ &= \left[K \cdot \frac{V_2}{B} + (K^* - 1) C \cot \phi \right] \sec \delta_w \end{aligned}$$

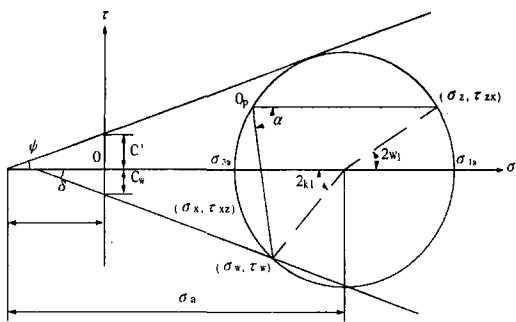
$$\begin{aligned} P_{(z_2)} &= K^* \left[\frac{1}{D_1} \cdot \frac{D_7}{H^2} (DH_3)^{D_6-1} \cdot (DH_4)^{-D_6} \right. \\ &\quad - \frac{1}{(2 - D_6)} \{ (DH_3) \\ &\quad \left. - (DH_3)^{D_6-1} \cdot (DH_4)^{2-D_6} \} \right] \gamma \cdot H \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[(K^* - 1) \cot \phi + \frac{D_5 K^*}{D_1 (1 - D_6)} \right. \\
 & \cdot \left. \{ 1 - (DH_3)^{D_6 - 1} \cdot (DH_4)^{1 - D_6} \} \right. \\
 & - \frac{D_8 \cdot K^*}{D_1 H} \left. \left((DH_3)^{D_6 - 1} \cdot (DH_4)^{-D_6} \right) \right] c' \\
 & + \frac{D_9 Q K^*}{D_1 H} \left((DH_3)^{D_6 - 1} \cdot (DH_4)^{-D_6} \right). \quad (22)
 \end{aligned}$$

한편, 벽면에 작용하는 전주동토압 P_{a2} 는 식(22)을 H_1 에서 H 까지 적분하여 전주동토압을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_{a2} & = \int_{H_1}^H P(z_2) dz \\
 & = \frac{K^*}{\text{Sina} \cdot \text{Cos} \delta_w \cdot D_6} \cdot \left[\frac{1}{2} \left\{ (DH_3)^2 + \frac{D_7}{D_1} \right\} \cdot 2 \right. \\
 & + \left. \left(\frac{1}{\text{Sina} \cdot \text{Cos} \delta_w} \right) \cdot \left(\frac{1}{\text{Tan} \phi} \right) \cdot (k - 1) \cdot (DH_4) \right. \\
 & - \left. \left(\frac{K}{D_1 \cdot D_6} \right) \cdot (D_8 + D_5 \cdot (DH_4)) \cdot \frac{2c}{\gamma H} \right. \\
 & + \left. \frac{1}{\text{Sina} \cdot \text{cos} \delta_w} \frac{Q \cdot D_9 \cdot K}{D_1 \cdot D_6} \cdot \frac{2}{\gamma H^2} \right] \quad (23)
 \end{aligned}$$

한편, 토압계수 K^* 의 값은 <Fig. 1> 와 <Fig. 2>에서와 같이 깊이 z 아래에서 옹벽과 흙의 접촉면의 미소요소에 대한 응력들을 Mohr 응력원으로 나타낸 것이다. 여기서, 벽면을 따라 유발되는 전단응력은 전단강도는 Lee & Herington [6]에서와 같이 $\tau_w = \tau_f$ 로 가정하였으므로 <Fig. 2>로부터 다음과 같이 유도하였다.



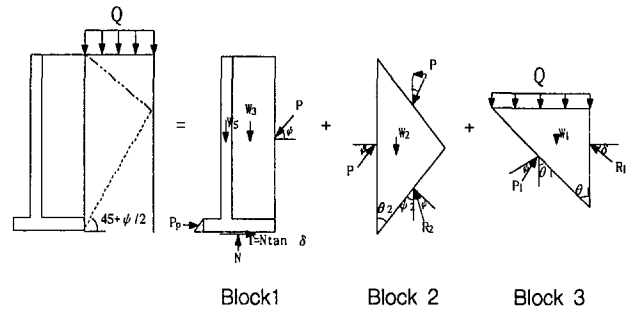
<Fig. 2> Mohr's circle for soil-wall interface

$$\begin{aligned}
 K^* & = \frac{\sigma_w + c' \cot \phi}{\sigma_z \cos^2 \beta + c' \cot \phi} \\
 & = \frac{1 - \sin \phi \cos (180 - 2\alpha - 2\beta + 2\omega)}{1 + \sin \phi \cos 2\omega} \quad (24)
 \end{aligned}$$

2.1.3 극한 평형이론식

한편, 본 연구에서는 상재하중 재하실험시 관찰된 임계활동면을 통해 모형옹벽의 인접사면의 벽마찰각과 인접사면의 간격을 변수로하여 극한평형식을 유도하였다.

<Fig. 3>, <Fig. 4>, <Fig. 5>는 본 실험에서 관찰된 임계활동면을 나타내고 있다.

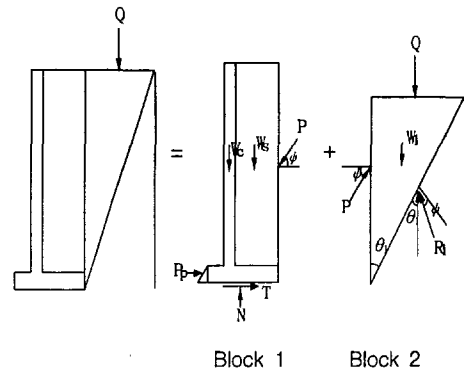


<Fig. 3> Failure mechanism (b=4cm)

위의 <Fig. 3>의 경우는 재하판의 크기가 4cm 경우에 나타나는 활동선으로 모형기초아래 삼각형 Block3가 활동을 시작하여 Block3의 활동이 Block2로 전달되어 파괴각도인 $45 + (\phi/2)$ 의 각도로 Block2가 활동을 일으키며 이 활동력이 옹벽의 구체로 전달되어 옹벽에 활동이 일어나는 형태로 진행되었다.

따라서 각각의 활동췌기에 작용하는 토체의 힘의 평형관계를 통해 다음과 같은 극한하중 산정식을 얻었다.

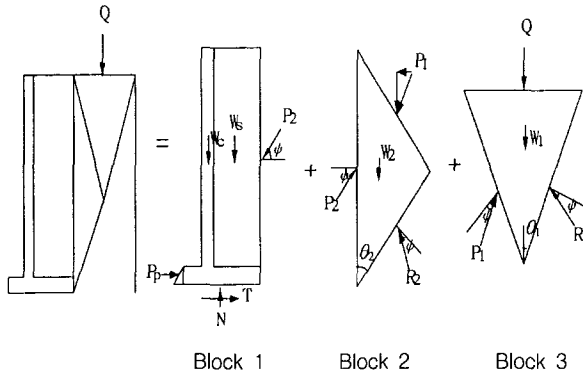
$$Q = P_1 \cos (90 - \phi - \theta_1) + R_1 \sin \delta - W_1 \quad (25)$$



<Fig. 4> Failure mechanism (b=7cm)

위의 <Fig. 4>의 흙췌기는 재하판의 크기가 7cm 인 경우에 나타나는 활동선으로 이 활동췌기에 대한 극한하중 산정식은 다음과 같다.

$$Q = \frac{Wt \cdot \tan \delta + P_p}{(\cos \phi - \sin \phi \cdot \tan \delta)} \frac{\cos \phi}{\tan(90 - \phi - \theta)} + \frac{Wt \cdot \tan \delta + P_p}{(\cos \phi - \sin \phi \cdot \tan \delta)} \sin \phi - W \quad (26)$$



<Fig. 5> Failure mechanism (b=10 cm)

위의 <Fig. 5>의 파괴형태는 이론적인 파괴면(45+φ/2)밖에 사면이 위치한 경우로서 모형옹벽에 10 cm 기초로 상대하중을 재하하여 옹벽의 활동 파괴를 유도한 결과 나타나는 파괴 메카니즘이다.

이 활동쇄기에 대한 극한하중 산정식은 다음과 같다.

$$Q = P_1 \cos(90 - \phi - \theta_1) + R_1 \cos(90 - \phi - \theta_1) - W_1 \quad (27)$$

3. 실험

3.1 기본 물성시험

본 연구에서 사용된 공기 건조된 주문진 표준사의 기본적인 실내물성시험 및 전단강도 정수와 응력-변형 거동을 구하기 위한 삼축압축 시험, 기존의 안정사면의 벽마찰각 변화에 따른 뒤채움지반과 기준사면의 마찰계수를 획득하기 위해 마찰시험결과 모형지반으로 사용된 공기건조시킨 주문진 표준사의 물리적 특성은 <Table 3.1>과 같으며, 입경가적곡선은 <Fig. 6>과 같다.

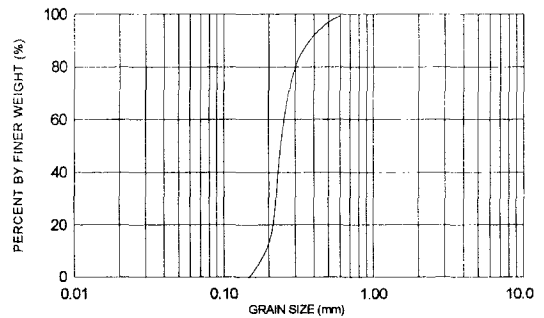
한편, 모형실험과 동일한 조건하에서 수행된 주문진 표준사의 삼축압축시험 및 마찰저항시험을 실시한 결과는 <Table 2>, <Table 3>에 나타난 바와 같다.

한편, 지반의 내부마찰각이 구속응력수준에 따라 비선형적 거동을 한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 낮은 구속응력하에서는 Dilatancy의 체적팽창효과를 고려하여 내부마찰각이 증가하는 반면에 구속응력이 증가할수록 내부마찰각이 감소경향이 있음을 알 수 있다. 따라서, 이와같은 실험조건을 반영하기 위하여 구속응력변화에 따른 마찰각의 변화를 <Fig. 7>과

같이 고려하여 해석의 입력자료로 사용하였으며 마찰저항역시 구속응력 수준에 따라 비선형적 거동을 한다고 판단되어 <Fig. 8>과 <Table 4>에 나타낸 바와 같이 구속조건을 반영하여 해석에 적용하였다.

<Table 1> Basic soil properties of Ju Mun Jin standard sand

Grain Size Distribution	D ₁₀ = 0.21 mm C _u = 1.19 C _w = 1.01
Maximum Dry Density	1.682 kg/cm ³
Minimum Dry Density	1.384 kg/cm ³
Maximum Void Ratio	0.879
Minimum Void Ratio	0.546
Specific Gravity	2.6



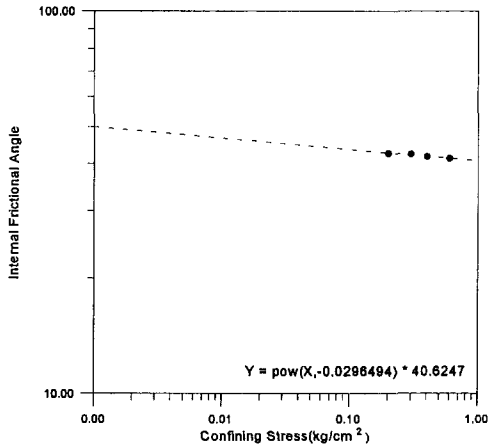
<Fig. 6> Ju Mun Jin standard sand grain size distribution

<Table 2> Triaxial test results

상대 밀도 (%)	삼축압축 시험결과				p-q 공간상의 파괴라인 tan α	σ-τ 공간상의 마찰각 φ	점착력
	구속응력 (kg/cm ²)						
	파괴시 축차응력 σ ₁ -σ ₃ (kg/cm ²)						
	0.2	0.3	0.4	0.6			
80	1.083	1.535	1.590	2.316	0.699	42.00	0.0

<Table 3> Frictional test results

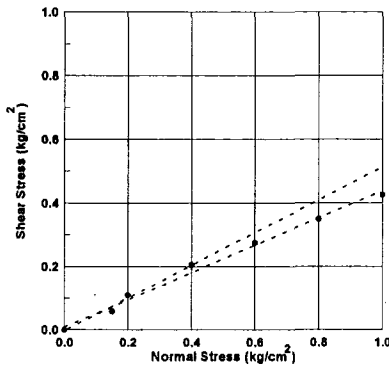
재질	상대 밀도 (%)	진단응력(kg/cm ²)					마찰 계수 f	마찰각 (°)	
		연직응력(kg/cm ²)							
		0.064	0.078	0.122	0.162	0.202			
알루미나	80	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	0.203	11.48	
		0.08	0.13	0.205	0.275	0.35	0.426	0.446	24.0
콘크리트	80	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	0.8		
		0.120	0.250	0.438	0.632	0.827	0.997	46.5	
사포	80	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8			



<Fig. 7> Changes of internal friction angle with confining stress

<Table 4> Frictional test result

Material	Aluminum	Concrete	Sand Paper
Friction Angle	11.48 °	31 °	46.5 °



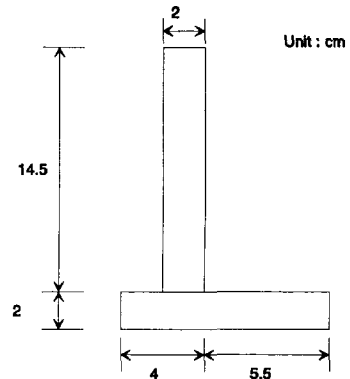
<Fig. 8> Direct shear test result with concrete

한편, 상재하중 재하실험은 높이 2.5 cm, 길이 19.8 cm, 폭 4, 7, 10 cm인 세가지 모형기초를 사용하였으며 복동식 하중재하장치를 이용하여 하중을 재하하였으며, 하중재하장치에 load cell 및 LVDT 를 장착하여 상재하중의 크기 및 연직침하량을 각각 측정하였으며, 옹벽의 상단으로부터 각각 2.9, 6.9, 10.9 cm 깊이에 토압계를 설치하여 실험중 옹벽배면에 발생하는 연직토압을 측정하였다.

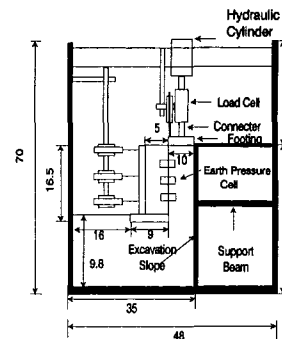
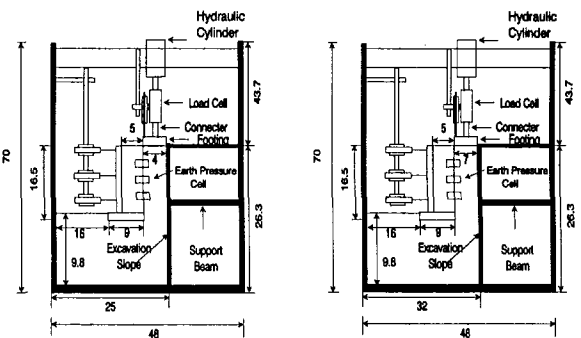
<Table 5>는 본 연구에서 수행된 에 상재하중 재하실험의 종류를 나타내고 있다.

<Fig. 9>는 본 연구에 사용된 역 T형 옹벽의 단면 제원을 나타내고 있으며 <Fig. 10>은 사용된 모형을 나타내고 있다.

옹 벽	사면의 벽마찰각 (°)	Dr (%)	사면의 경사 (°)	옹벽배면과 간격 (cm)	뒤채움 경사 (°)
T Wall	11.48	80	90	4	0
	42.00				
	46.50				
T Wall	11.48	80	90	7	0
	42.00				
	46.50				
T Wall	11.48	80	90	10	0
	42.00				
	46.50				



<Fig. 9> Dimension of retaining wall models



<Fig. 10> Layouts of surcharge testing model

4. 모형실험 결과 및 분석

상재하중 재하실험을 실시하여 획득한 연직토압 및

<Table 5> Surcharge Model test Parameters

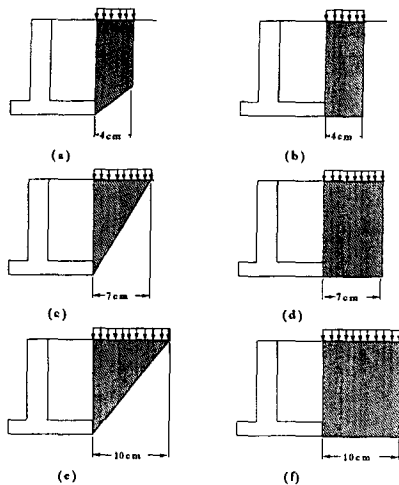
하중 - 침하 특성 결과를 실험중 관찰된 옹벽배면의 임계활동선을 바탕으로 한 극한평형이론, 정진교 [15] 이 제시한 흙쇄기이론을 수정보완한 확장이론을 [13] 사용하여 비교 분석을 실시하였다.

4.1 연직토압

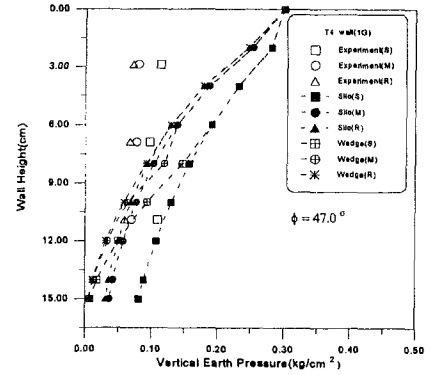
<Fig. 11>은 본 연구에서 사용된 역 T형 옹벽의 배면토압을 흙쇄기이론 및 사이로이론을 사용하여 산정할때 적용되는 전단영역을 나타내고 있다.

<Fig. 11>의 (a), (b)는 인접사면의 간격이 4 cm 인 경우의 흙쇄기이론 및 사이로이론의 전단영역으로 흙쇄기이론의 경우 옹벽의 상부에서는 사일로 이론의 연직전단면의 폭과 같으나 하부에서는 옹벽의 저판 뒷굽에서는 주동상태의 Coulomb 파괴면 각도 $(45 + \phi/2)$ 로 형성된 전단면으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 반면에 사이로 이론의 경우는 옹벽의 상단에서부터 옹벽의 최하단에 이르기까지 직사각형 전단영역으로 토압산정이 가정되고 있음을 볼 수 있다.

<Fig. 11>의 (c), (d), (e), (f)는 인접사면의 간격이 7, 10 cm 의 경우의 흙쇄기 이론 및 사이로이론의 전단영역으로 흙쇄기이론의 경우 옹벽의 뒷굽에서 인접사면의 시점을 연결하는 파괴면을 따라 형성되는 삼각형 전단영역으로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 반면에 사이로 이론의 경우는 옹벽의 상단에서부터 옹벽의 최하단에 이르기까지 인접사면의 폭과 옹벽의 높이로 구성된 직사각형 전단영역내에서 토압산정이 계산되고 있음을 볼 수 있다.



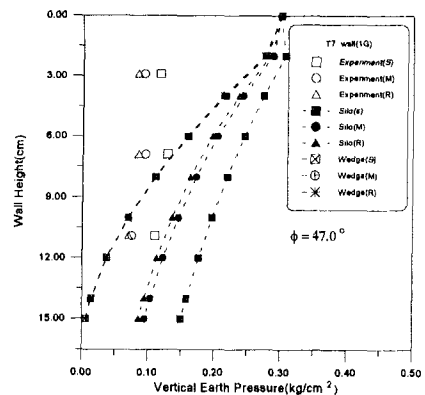
<Fig. 11> Failure zones for modified silo theory and modified wedge theory



<Fig. 12> Comparison of measured vertical pressures with theoretically estimated values (b=4cm, q=0.3 kg/cm²)

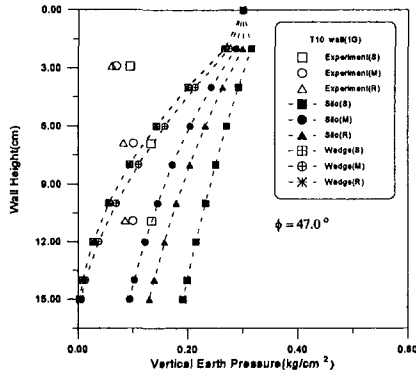
<Fig. 12>는 옹벽의 배면과 인접사면과의 간격 4 cm 인 경우에 상재하중 $q=0.3kg/cm^2$ 재하시 연직 토압분포 결과이다. 시험결과 측정된 연직토압은 굴착면의 벽마찰각이 가장 큰 경우의 연직토압이 가장 작게 측정되었으며 이는 인접사면의 벽마찰각이 증가할수록 뒷채움재와 인접사면의 경계면에서 발생하는 마찰력이 증가하기 때문이라 판단된다.

한편, 사이로이론 및 흙쇄기이론을 이용하여 산정한 토압분포의 역시 굴착면의 벽마찰각이 큰 경우 연직 토압이 가장 작게 산정되는 경향이 있음을 알 수 있다.



<Fig. 13> Comparison of measured vertical pressures with theoretically estimated values (b=7cm, q=0.3kg/cm²)

<Fig. 13> ~ <Fig. 14>은 옹벽의 배면과 인접사면의 간격이 7 cm, 10 cm의 결과로 앞서 4 cm의 결과와 마찬가지로 인접사면의 벽마찰각이 증가함에 따라 옹벽의 배면과 인접사면의 경계면에서 마찰력이 크게 작용하므로 측정된 연직토압이 감소하는 경향을 보이며 사이로이론 및 흙쇄기이론을 이용하여 산정한 연직토압 역시 인접사면과 옹벽배면 사이의 경계면에



<Fig. 14> Comparison of measured vertical pressures with theoretically estimated values (b=10cm, q=0.3 kg/cm²)

벽마찰각이 클수록 연직토압이 인접사면의 벽마찰각이 작은 경우에 비해 연직토압이 작게 산정됨을 볼 수 있다.

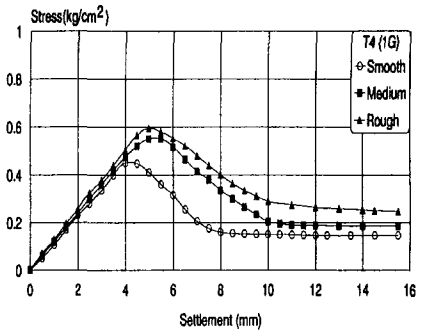
한편, 측정된 연직토압과 이론적으로 산정된 토압은 옹벽의 상단부에서는 큰 차이를 보이고 있으나 옹벽의 하부에서는 서로 근접함을 알 수 있는데 이는 강성의 재하판을 사용함에 따른 불균질한 접지압의 영향과 사일로이론과 흙쇄기이론의 경우 연직전단면을 강성벽체로 가정하고 있으나 모형실험의 역 T형 옹벽의 경우 가정된 연직전단면이 뒷채움재와 뒷채움재 사이의 경계면으로 구성되어 있으므로 상재하중 재하에 따른 뒷채움재의 변위 발생에 따른 연직응력의 이완현상에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 변위발생이 큰 상부에서 크게 나타날 것으로 예상되며 하부로 갈수록 그의 영향이 감소될 것으로 판단된다.

4.2 하중-침하 특성

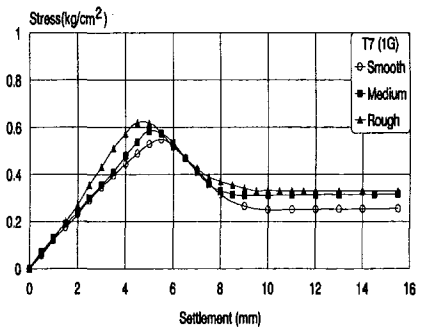
인접사면의 벽마찰각을 변화시키고 옹벽의 배면과 인접사면의 간격 4, 7, 10 cm 에 각각 대응하는 폭 4, 7, 10 cm 크기의 모형기초를 이용한 역 T형 옹벽의 상재하중 재하실험결과 하중 - 침하곡선은 <Fig. 15> ~ <Fig. 17>에 나타내었다.

<Fig. 15>는 옹벽의 배면과 인접사면의 간격이 4 cm 인 경우의 재하실험 결과로 인접사면의 벽마찰각이 가장 큰 경우의 극한하중값이 가장 크며 벽마찰각이 감소할수록 극한하중값이 감소함을 나타내고 있다. 한편, <Fig. 15>의 결과에 나타난 바와같이 인접사면의 벽마찰각이 클수록 하중-침하 곡선의 초기 접선 기울기, 즉 강성도가 증가함을 알 수 있다.

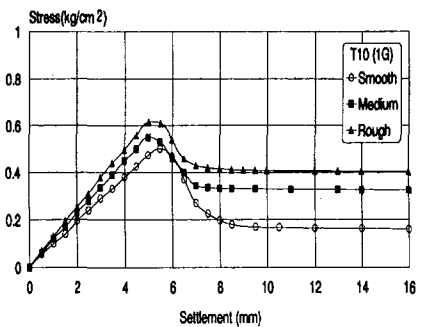
<Fig. 16> ~ <Fig. 17>은 옹벽의 배면과 인접사면의 간격이 7 cm, 10 cm의 재하실험 결과로서 앞서



<Fig. 15> Stress - settlement curves (b=4 cm)



<Fig. 16> Stress - settlement curves (b=7 cm)



<Fig. 17> Stress - settlement curves (b=10 cm)

4 cm 의 결과에서 언급한 바와 같이 인접사면의 벽마찰각이 클수록 극한하중값 및 초기접선기울기 증가하는 경향을 보이고 있다.

한편, 인접사면의 벽마찰각에 따른 잔류하중 값은 <Table 6>에 나타낸 바와 같이 벽마찰각이 클수록 잔류하중 값이 증가하는 경향을 보이고 있으며 이러한 이유는 인접사면의 벽마찰각의 영향 및 기초폭에 따른 활동선형성의 양상, 기초와 뒷채움재의 경계면에서 발생하는 마찰력등에 의하여 복합적으로 작용할 것으로 판단된다.

<Table 6> 벽마찰각에 따른 잔류하중

벽 마찰각	잔류하중 값 (kg/cm ²)		
	간격=4cm	간격=7cm	간격=10cm
11.48 °	0.17	0.25	0.18
42.0 °	0.19	0.3	0.25
46.5 °	0.28	0.31	0.4

<Table 7>은 상재하중 재하실험을 통해 측정된 극한하중값을 사이로이론, 흙쌓기이론 및 극한평형해석을 통해 계산된 값과 비교한 결과를 나타내고 있다. 한편, 마찰시험결과 뒷채움재와 콘크리트와의 마찰각은 <Fig. 8>에 보인바와 같이 벽마찰각은 $\delta_r = 31^\circ$ 을 보여준다. 그러나 본 모형실험의 경우 구속응력수준이 작음으로 인해 조밀한 사질토 모래에서는 Dilatancy에 의한 마찰각이 매우 큰 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 모형옹벽의 콘크리트 저판과 기초지반사이의 경계면에서의 마찰각은 실험결과에서 얻은 값과 문헌고찰에 의한 값을 사용하여 비교분석하였다.

Duncan(1971), Potyondy [10]는 조밀한 모래와 콘크리트의 접촉면 실험을 통해 뒷채움재의 내부마찰각, ϕ 에 대한 벽마찰각 δ 의 비($= \delta/\phi$)가 Duncan(1971)의 경우 $\delta/\phi=0.8$, Potyondy [9]의 경우 $\delta/\phi=0.83$ 으로 보고된 바가 있다. 따라서, 문헌고찰에 의한 마찰각을

고려하여 내부마찰각 $\phi=47^\circ$ 의 80%의 값인 $\delta = 37.6^\circ$ 을 사용하여 극한하중을 산정해 보았다.

<Table 7>에 나타난 바와같이 극한하중산정 결과 사이로해석, 흙쌓기해석, 극한평형해석에 의한 극한값은 기초폭, 뒷채움재와 인접사면과의 마찰각에 관계없이 실험값에 비하여 작게 산정되는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 <Fig. 12> ~ <Fig. 14>에 나타난 바와 같이 측정된 연직토압이 이론적으로 산정된 값에 비하여 작게 측정된 결과를 보이고 있다. 따라서 실험치보다 크게 산정된 연직토압은 모형옹벽의 활동을 유발시키기 위한 상재하중 값을 적게 산정하는 경향이 있다. 이와 같은 것은 전술한 바와 같이 활동면을 옹벽저판의 뒷굽에서 연직선의 강성벽체면으로 가정한 것에 기인한 것으로 판단된다.

동일한 조건하에서 사이로해석 결과는 흙쌓기해석 결과와 비교할 때 기초폭이 증가할수록 극한값이 작아지는 경향이 있는데 이는 사이로이론의 경우 <Fig. 11> (d), (e)의 인접사면의 폭에 대해 옹벽의 높이로 구성된 직사각형 크기의 전단영역을 토압을 산정하

<Table 7> Comparisons of test results of ultimate bearing capacity with various theories

Wall Type	Width (cm)	δ_r	Test (kg/cm ²)	Silo (kg/cm ²)	Wedge (kg/cm ²)	Limit Equilibrium (kg/cm ²)
				$\delta_w = 31^\circ$		$\delta_w = 31^\circ$
				$\delta_w = 37.6^\circ$		$\delta_w = 37.6^\circ$
T wall	4	11.48	0.45	0.16	0.198	0.105
				0.43	0.52	0.276
		42.0	0.55	0.218	0.25	0.119
				0.58	0.65	0.312
		46.5	0.60	0.233	0.26	0.128
				0.62	0.68	0.319
	7	11.48	0.52	0.12	0.19	0.16
				0.314	0.57	0.42
		42.0	0.58	0.15	0.19	0.16
				0.4	0.58	0.42
		46.5	0.62	0.154	0.19	0.16
				0.42	0.59	0.42
10	11.48	0.5	0.104	0.24	0.37	
			0.29	0.64	0.95	
	42.0	0.58	0.123	0.24	0.37	
			0.34	0.64	0.95	
	46.5	0.605	0.127	0.24	0.37	
			0.35	0.64	0.95	

$\delta_w =$ 뒷채움재와 콘크리트의 마찰각

$\delta_r =$ 뒷채움재와 인접사면사이의 마찰각

므로 사이로이론으로 계산된 연직토압이 상대적으로 크게 산정되기 때문이라 판단된다. 또한 실험결과와 비교할 때 흙쌓기이론에 의한 극한값이 실험값에 접근하고 있음을 알 수 있다.

옹벽저판과 기초지반사이의 마찰각의 영향은 <Table 7>에 보인 바와 같이 실험결과에 의한 $\delta=31.0^\circ$ 을 사용할 때에는 실험치 보다 현저히 낮게 평가되었으나 구속응력수준에 따른 Dilatancy 효과를 고려한 마찰각인 $\delta=37.6^\circ$ 을 사용하여 산정된 극한값은 비교적 실험치와 근접하고 있음을 알 수 있다. 따라서 응력수준에 따른 옹벽저판과 원지반사이의 마찰각의 적정한 값의 선정이 옹벽의 안정성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

역 T 형옹벽에 대한 상재하중 재하실험을 통해 재하하중에 따른 연직토압 및 하중 - 침하특성을 측정하였으며 실험결과를 사일로 이론, 흙쌓기 이론을 확장

한 이론, 극한평형해석의 해석결과와 비교분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상재하중 재하실험결과 측정된 상재하중에 의한 연직토압크기 분포는 사일로이론 및 흙췌기이론으로 계산된 연직토압에 비해 전반적으로 작게 분포되고 있으며, 흙췌기이론으로 예측된 연직토압이 실험값에 근접하고 있다. 이러한 현상은 상재하중에 의한 응력 전달시 뒷채움재의 변위 발생에 의한 응력 이완효과로 판단된다.
2. 상재하중 재하실험 결과 얻은 극한하중값에 비하여 사일로이론, 흙췌기이론, 임계 활동선 관찰에 의한 극한평형해석 결과가 작게 산정되었는데 이는 낮은 구속응력하의 체적팽창 효과에 따른 마찰각의 증가에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 이와 같은 체적팽창에 따른 마찰각의 증가효과를 보정한 마찰각을 사용하여 실험값과 비교한 결과, 보완흙췌기 이론에 의한 계산 결과가 실험값에 접근하였다.
3. 상재하중 실험에서 얻은 하중-침하곡선의 초기 접선 기울기를 나타내는 강성도는 옹벽과 인접사면의 폭이 작을수록, 인접사면의 벽마찰각이 클수록 증가함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Bransby, P. L. and Smith I. A. A., "Side Friction in Model Retaining Wall Experiments", JGE, ASCE, Vol.101, No.GT7, 1975, pp. 615-632.
- [2] Fang, Y. S. et al., "Earth Pressures with Sloping Backfill", JGE, ASCE, Vol.123, No.3, 1997, pp. 250-259.
- [3] Frydman, S. and Keissar I., "Earth Pressure on Retaining Wall near Rock Faces", JGE, ASCE, Vol.113, No.6, 1987, pp. 586 - 599.
- [4] Goh, A. T. C., "Behavior of Cantilever Retaining Walls", JGE, ASCE, Vol.119, No.11, 1993, pp. 1751-1770.
- [5] Handy, R. L., "The Arch in Soil Arching", JGE, ASCE, Vol.111, No.3, 1985, pp. 302-318.
- [6] Lee, F.H. and Herington J. R., "Effect of Wall Movement on Active and Passive Pressure", JGE, Vol.98, No.SM6, 1972, pp. 871-887
- [7] Kingsley O. Harrop-Williams., "Arch in Soil

- Arching", JGE, ASCE, Vol.115, No. 3, 1989, pp. 415-419.
- [8] Motta, E., "Generalized Coulomb Active-Earth Pressure for Distanced Surcharge", JGE, ASCE, Vol.120, No.6, 1994, pp. 1072-1079.
- [9] Myslivec, A., "Pressure of Loose Soil at Rest between Two Rigid Walls", 10th ICSMFE, Vol. 2, 1981, pp. 201-204.
- [10] Potyondy, J. G., "Skin Friction between Various Soils and Construction Material", Geotechnique, Vol.11, No.4, 1961, pp. 339-353.
- [11] Spangler, M. G. and Handy, R. L., "Soil Engineering", 4 th ED.", Harprt and Row, Publishers, INC., New York, 1982, pp. 572-574.
- [12] Tsagareli, Z. V., "Experimental Investigation of The Pressure of a Loose Medium on Retaining Walls with a Vertical Backface and Horizontal Backfill Surface", Soil Mechanics(USSR), No. 4, 1965.
- [13] 이명옥, "사면에 인접한 옹벽의 원심모델링", 공학박사 학위논문, 강원대학교, 1998
- [14] 정성교, 백승훈, "비점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 정적토압", 한국지반공학회지, 제 9 권, 제 1호, 1993d, pp. 69-75.
- [15] 정진교, "기존사면에 인접한 중력식옹벽에 작용하는 주동토압", 공학박사 학위논문, 동아대학교, 1994