

c- ϕ 흙으로 뒤채움한 중력식 옹벽에 작용하는 정적토압

Lateral Earth Pressure against Gravity Walls Backfilled by c- ϕ Soil

정 성 교*¹

Chung, Sung - Gyo

허 대 영*²

Huh, Dai - Yeong

이 만 렬*³

Lee, Man - Yeol

Abstract

Of the classical theories on lateral earth pressure, the Coulomb's and the Rankine's theories, which have been usually used in practice for design of retaining walls, assumed that the lateral earth pressure was a triangular distribution. However, the experimental results obtained by Terzaghi(1934), Tsagrelis(1967), Fang & Ishibashi(1986), etc showed that lateral pressure were not triangular distribution.

In this study, for rigid walls with inclined backfaces and inclined surfaces backfilled by c- ϕ soils, an analytical method of earth pressure distribution has been newly suggested by using the concept of the flat arch. The results calculated by the newly suggested equations were compared with ones by the existed theories. And the influence factors of the earth pressures by the suggested equations were investigated. As a result, the thrusts obtained by this method agree well with those by the existing theories, except the Rankine's solution. It was showed that the height to the centre of pressure(\bar{h}) depends mainly upon the inclinations of the backface and the backfilled surface, the angle of internal friction, and the adhesion between the wall and the backfilled soil, instead of 0.33H, where H is the wall height.

요 지

고전 토압이론 중에서 Coulomb 및 Rankine 토압이론식을 실무에 주로 사용되고 있는데, 이들에 의한 토압은 삼각형 분포로 간주하고 있다. 그러나 Terzaghi(1934), Tsagrelis(1967), Fang & Ishibashi(1986) 등에 의한 실험결과에서 토압은 삼각형 분포가 아님이 밝혀졌다.

*¹ 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정회원, 부산광역시 도시계획과 도시개발계장

*³ 정회원, 동아대학교 공대부설 건설기술연구소 특별연구원

본 연구에서는 $c-\phi$ 흙으로 뒤채움된 지표면이 경사지며, 강성옹벽의 뒷면이 경사진 일반적인 경우에 적용할 수 있는 토압이론식이 아취개념을 사용하여 새로이 제안되었다. 새로이 제안된 이론식에 의한 계산결과는 기존 이론들에 의한 것들과 비교되었으며, 이 이론식에 의하여 토압에 영향을 미치는 요소들을 분석하였다. 비교 및 분석결과를 보면, 전주동토압은 새로이 제안된 이론식에 의한 값이 기존이론에 의한 값들과 잘 일치하였다. 그러나 Rankine이론에 의한 전토압은 비교된 기타 이론들에 의한 값과 상이하였다. 그리고 작용점 위치(\bar{h})는 삼각형 분포의 중심 위치인 0.33이 아니라 옹벽 뒷면의 경사각, 뒤채움 지면의 경사각, 흙의 내부마찰각 및 부착력에 의하여 주로 지배되었다.

Keywords : Flat arch, Analytical solution, Backfill of $c-\phi$ soil, Earth pressure, Influence factor

1. 서론

옹벽은 각종 건설공사에서 가장 흔히 사용되고 있는 흙막이 구조물 중의 하나로써, 이러한 옹벽에 작용하는 토압을 정확히 산출하는 문제는 토질역학에서 가장 기초적이고 필수적인 사항이다.

옹벽에 작용하는 토압을 구하는 이론 중에서 고전적 이론으로 지지벽체와 가상파괴면 사이의 흠쇄기가 극한평형상태에 있을 때, 힘의 평형을 고려하여 토압을 산정하는 Coulomb(1773)이론과 흙을 균질하고 등방인 반무한체로 가정하여 지반이 소성평형상태에 도달했을 때 응력상태를 다룬 Rankine(1856)이론이 있으며, 이 이론들은 현재까지 가장 널리 실제현장에 적용되고 있다. 그러나 Rankine의 토압이론은 벽체와 뒤채움 흙사이의 마찰력을 고려하지 못하였으며 벽체의 뒷면이 경사진 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있어 Coulomb의 토압이론보다 신뢰성이 떨어진다. Coulomb이론은 마찰력을 고려하여 Rankine이론의 단점을 해소하였으나 토압이 삼각형 분포로 작용한다고 가정하여 작용점 위치가 옹벽 저판으로부터 $H/3$ 지점에 있다고 하였다.

그 후에는 Terzaghi(1954), Sokolovskii(1965), Handy(1985), Kingsley(1989), 김(1990 a, b) 등에 의한 새로운 이론과 Terzaghi(1934), Sherif(1982), Terzaghi & Peck(1967),

Tsagrelis(1965), Fang & Ishibashi(1986), Matsuo(1978) 등에 의한 모형 및 현장실험의 결과를 보면, 토압을 삼각형분포로 볼 수 없으며 작용점의 위치도 옹벽 저판으로부터 $H/3$ 에 있지 않다는 것이 입증되고 있다.

옹벽에 작용하는 전토압의 작용위치는 토압 분포에 따라 결정되므로 옹벽의 설계에서 정확한 토압분포를 구하는 것이 대단히 중요하다. 최근에 이르러 위의 두 고전이론이 갖는 단점인 전토압의 작용 위치를 보다 정확히 구하고자 Handy(1985)와 Kingsley(1989)는 아취(arching)개념을 도입하여 벽면마찰을 고려한 토압분포의 이론식을 유도하였으며, 이 방법은 Terzaghi(1954, 1967)에 의해서도 시도된 바 있으나 이들은 단지 벽체가 연직이고 뒤채움면이 수평인 경우에 한해서 연구되었다. 그리고 정성교·백승훈(1993)은 비점성토로 수평하게 뒤채움한 경사진 중력식 옹벽에 작용하는 토압을 아취개념을 도입하여 유도하였다. 여기서, Handy(1985)는 옹벽 배면의 파괴면을 Rankine이론으로부터 구하고 흠쇄기 내에서 동일한 최소주응력의 연결고리(곡면아취)를 이용하여 토압분포를 유도하였었다. 그리고 Kellogg(1993)는 흠쇄기의 경사면을 고려하여 Handy의 이론식을 보완하였다. 그러나 Kingsley(1989)와 정성교·백승훈(1993)은 흠쇄기내에 임의의 깊이에서의 연직 및 수평응력이 각각 동일하다고 가정한 평면아취개념을 도입하여

토압을 산출하였다. 후자의 방법에 의하면 전자에 비하여 오차가 작으며 간단하게 토압을 산출할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 일반적으로 적용될 수 있는 토압이론으로 옹벽의 뒷면이 경사지고 $c-\phi$ 흙(점성토)으로 경사지계 뒤채움된 강성옹벽에 작용하는 토압이론식을 Coulomb의 흙쇄기와 평면아칭개념을 도입하여 새로이 유도하였다. 그리고 그 결과를 기존의 이론식에 의한 결과와 비교하였고, 또한 새로이 제안된 이론식에 의하여 토압계수, 작용점 위치 등의 여러가지 경향을 분석하였다.

2. 토압 이론식

그림 1은 높이 H이며, 뒷벽면의 경사각이 α 인 중력식옹벽에서 뒤채움 경사면이 β 각을 이

루고 있을 때 파괴면이 수평면과 θ 각을 이루고 있는 강성옹벽과 흙쇄기 내의 미소평면요소(평면아칭)에 작용하는 힘들을 주동과 수동상태에 대하여 각각 나타내고 있다.

옹벽상단으로부터 깊이 z아래에 미소높이 dz, 폭 B이며, 무게가 dW인 임의의 미소평면요소를 가정하면 V와 dV는 연직력과 그 증분이며, 두 측면에서 작용하는 반력은 각각 dP_w 및 dP_s 이다. 또한 수평면과 θ 각을 이루는 파괴면의 흙상호간에 작용하는 점착력 dC, 뒷벽면과 흙 사이의 부착력이 dC_w 이다. 여기서 δ 및 ϕ 는 각각 벽면 및 흙의 내부마찰각이다.

그리고 미소평면요소의 상하면에 작용하는 전단력은 상쇄된다고 가정하였다. 이 미소평면 요소에 작용하는 힘에 대하여 연직평형방정식을 취하여 정리하면 다음과 같다.

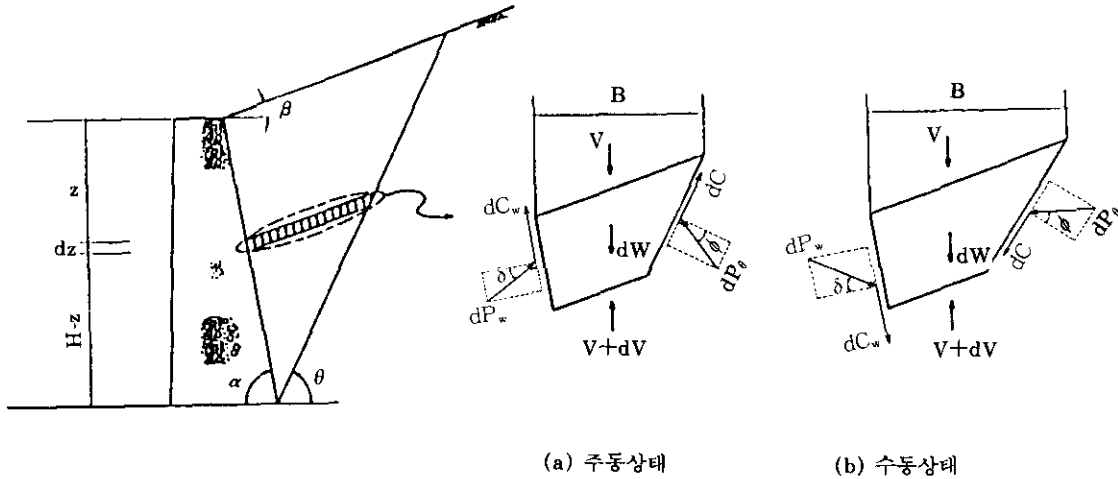


그림 1. 흙쇄기 및 미소평면요소에서 힘의 평형상태

$$dV + dP_w \cos(\alpha \mp \delta) + dP_s \cos(\theta \mp \phi) \pm dC_w \sin \alpha \pm dC \sin \theta = dW \quad (1)$$

여기서 표현된 이중부호에서 위쪽은 주동상태, 아래쪽은 수동상태의 것들을 의미한다. 수평평형방정식을 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$dP_w = [dP_w \sin(\alpha \mp \delta) \pm dC \cos \theta \mp dC_w \cos \alpha] / \sin(\theta \mp \phi) \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$dV + [\cos(\alpha \mp \delta) + \cot(\theta \mp \phi) \sin(\alpha \mp \delta)] dP_w \mp [\sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta \mp \phi)] dC_w + [\sin \theta + \cos \theta \cot(\theta \mp \phi)] dC = dW \quad (3)$$

여기서 평균연직응력 $\bar{\sigma}_z = V/B$ 라 가정하고,

토압계수 $K^* = (\sigma_w \pm c' \cot \phi) / (\bar{\sigma}_v \cos^2 \beta \pm c' \cot \phi)$
 라 정의하면, 미소평면요소에 작용하는 벽체의
 토압력 및 계수들은 다음과 같이 표현된다. 여
 기서 σ_w 는 벽면에 작용하는 수직응력이다.(부
 록의 그림 7 참조).

$$\begin{aligned} dP_w &= [\sigma_w^2 + (\sigma_w \tan \delta)^2]^{1/2} dz \operatorname{cosec} \alpha \\ &= \sigma_w \sec \delta \operatorname{cosec} \alpha dz \\ &= [K^* \bar{\sigma}_v \cos^2 \beta \pm (K^* - 1)c' \cot \phi] \\ &\quad \sec \delta \operatorname{cosec} \alpha dz \quad (4) \\ &= \left[\frac{K^* \cos^2 \beta}{C_1} \frac{V}{(H-z)} \pm (K^* - 1)c' \cot \phi \right] \end{aligned}$$

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

$$C_2 = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \cos \beta} C_1 \left(= \frac{C_1(1 + C_1 \tan \beta) \sin(\theta - \beta)}{\cos \beta \sin \theta} \right)$$

$$C_3 = \cos(\alpha \mp \delta) + \sin(\alpha \mp \delta) \cot(\theta \mp \phi)$$

$$C_4 = \operatorname{cosec} \alpha [\sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta \mp \phi)] a_n + \operatorname{cosec} \theta [\sin \theta + \cos \theta \cot(\theta \mp \phi)] \\ \cdot (1 + C_1 \tan \beta) \pm C_3(K^* - 1) \cot \phi \sec \delta \operatorname{cosec} \alpha$$

$$C_5 = (K^* C_3 / C_1) \cos^2 \beta \sec \delta \operatorname{cosec} \alpha$$

V = 미소평면에 작용하는 연직력

dV = 미소평면에 작용하는 연직력의 증분

$a_n = c_w / c' =$ 무차원의 점착력

$c_w =$ 벽면에 작용하는 부착력, c' : 흙의 점착력

위에서 기술한 미소평면요소에 작용하는 토압력 및 계수들을 대입하여 다시 정리하면 식 (3)
 은 식(5)와 같이 된다.

$$\frac{dV}{dz} + \frac{C_5}{(H-z)} V = C_2 \gamma (H-z) \mp C_4 c' \quad (5)$$

식(5)의 선형 일계 미분방정식 해를 구하면 식(6)과 같다.

$$V = (H-z)^{C_5} \left[\frac{C_2 \gamma}{C_5 - 2} (H-z)^{2-C_5} + \frac{C_4 c'}{C_5 - 1} (H-z)^{1-C_5} + C_0 \right] \quad (6)$$

여기서 C_0 는 적분상수이다.

식(6)에 대하여 경계조건 $z=0, V=0$ 를 만족시켜 적분상수 C_0 를 구하면 식(7)과 같다.

$$C_0 = \mp \frac{C_2 \gamma}{C_5 - 2} H^{2-C_5} \pm \frac{C_4 c'}{C_5 - 1} H^{1-C_5} \quad (7)$$

$\cdot \sec \delta \operatorname{cosec} \alpha dz$

여기서

$dP_w =$ 미소평면요소에 작용하는 전주동토압

$dC_w = c_w \operatorname{cosec} \alpha dz$: 미소평면요소에 작용하

는 전부착력

$dC = c'(1 + C_1 \tan \beta) \operatorname{cosec} \theta dz$: 미소평면요

소에 작용하는 전점착력

$dW \approx \gamma C_2 (H-z) dz$: 미소평면요소의 무게

$B = (H-z) C_1$: 미소평면요소의 폭

식(7)을 식(6)에 대입하여 정리한 결과는 식(8)과 같이 된다.

$$V = (H-z)^{c_3} \left[\frac{C_2 \gamma}{(C_3-2)} [(H-z)^{2-c_3}] \mp \frac{C_4 c'}{C_5-1} [(H-z)^{1-c_3} - H^{1-c_3}] \right] \quad (8)$$

벽체에 작용하는 임의의 깊이 z 에 따른 정적토압 $p_w(z) (= \sigma_w \sec \delta)$ 은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_w(z) = \sigma_w \sec \delta = \left\{ \left[\frac{K_{ay}(z)}{K_{py}(z)} \right] (\gamma H) \mp \left[\frac{K_{ac}(z)}{K_{pc}(z)} \right] c' \right\} \sec \delta \quad (9)$$

여기서 []속의 상단은 주동상태, 하단은 수동상태를 의미한다.(이하적용) 그리고,

$$\begin{aligned} \sigma_w &= [K^* \bar{\sigma}_z \cos^2 \beta \pm (K^*-1)c' \cot \phi] \\ &= \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{C_1 (C_3-2)} \left[\left(1 - \frac{z}{H}\right) - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{c_3-1} \right] (\gamma H) \\ &\quad \mp \left[\frac{K^* C_4 \cos^2 \beta}{C_1 (C_5-1)} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{c_5-1} \right] \pm (K^*-1) \cot \phi \right] (c') \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left[\frac{K_{ay}(z)}{K_{py}(z)} \right] &= \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{C_1 (C_3-2)} \left[\left(1 - \frac{z}{H}\right) - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{c_3-1} \right] \\ \left[\frac{K_{ac}(z)}{K_{pc}(z)} \right] &= \frac{K^* C_4 \cos^2 \beta}{C_1 (C_5-1)} \left[1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{c_5-1} \right] \mp (K^*-1) \cot \phi \end{aligned}$$

식(9)를 무차원의 토압 $K_w(z) (= p_w(z) / \gamma H)$ 로 표시하면 식(10)과 같다.

$$K_w(z) = \left[\frac{K_a(z)}{K_p(z)} \right] = \left\{ \left[\frac{K_{ay}(z)}{K_{py}(z)} \right] \mp \left[\frac{K_{ac}(z)}{K_{pc}(z)} \right] M \right\} \sec \delta \quad (10)$$

여기서, $M = c' / (\gamma H)$ 로 정의하며 무차원 점착력(dimensionless cohesion)이라 부른다.

높이 H 인 벽체에 작용하는 전토압 P_w 는 식(9)를 벽체의 전높이 H 에 대하여 적분하면 식(11)과 같이 얻을 수 있다.

$$P_w = \int_0^H p_w(z) (dz / \sin \alpha) = \frac{1}{\sin \alpha \cos \delta} \int_0^H \sigma_w dz \quad (11)$$

또는

$$P_w = \left[\frac{K_A}{K_P} \right] = \left[\frac{K_{Ay}}{K_{Py}} \right] \left(\frac{\gamma H_z}{2} \right) \mp \left[\frac{K_{Ac}}{K_{Pc}} \right] (c' H) \quad (11a)$$

여기서,

$$\left[\frac{K_{Ay}}{K_{Py}} \right] = \frac{K^* C_2 \cos^2 \beta}{\sin \alpha \cos \delta C_1 C_3} = \frac{C_2}{C_3}$$

$$\left[\frac{K_{AC}}{K_{PC}} \right] = \frac{K^* C_4 \cos^2 \beta}{\sin \alpha \cos \delta C_1 C_5} \mp \frac{(K^* - 1) \cot \phi}{\sin \alpha \cos \delta} = \frac{C_4}{C_5} \mp \frac{(K^* - 1) \cot \phi}{\sin \alpha \cos \delta}$$

식(11a)를 무차원의 전도압 $K_w (= P_w / (\gamma H^2 / 2))$ 로 표시하면 식(12)와 같다.

$$K_w = \left[\frac{K_{AY}}{K_{PY}} \right] \mp \left[\frac{K_{AC}}{K_{PC}} \right] M \quad (12)$$

벽체 저면으로 부터 전도압의 작용점 위치 \bar{h} 는 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{h} = \left[\begin{array}{c} H_A \\ H_P \end{array} \right] = \frac{\int_0^H \sigma_w \sin(\alpha \mp \delta) (H-z) (dz / \sin \alpha)}{\int_0^H \sigma_w \sin(\alpha \mp \delta) (dz / \sin \alpha)} = \left[\begin{array}{c} \bar{h}_a \\ \bar{h}_p \end{array} \right] H \quad (13)$$

여기서 $\left[\begin{array}{c} \bar{h}_a \\ \bar{h}_p \end{array} \right]$ 는 작용점 위치를 나타내는 무차원 값으로 \bar{h}/H 에 해당한다.

$$\left[\begin{array}{c} \bar{h}_a \\ \bar{h}_p \end{array} \right] = \frac{C_5 \left[\frac{C_2}{3} \mp \frac{C_7}{2} M \right]}{(C_5 + 1) \left[\frac{C_2}{2} \mp C_8 M \right]}$$

$$C_7 = C_4 \mp \frac{C_1 (C_5 + 1)}{K^* \cos^2 \beta} (K^* - 1) \cot \phi$$

$$C_8 = C_4 \mp \frac{C_1 C_5}{K^* \cos^2 \beta} (K^* - 1) \cot \phi$$

3. 기존이론과의 비교

앞의 2장에서 유도된 토압이론을 이용하여 기존의 토압이론들에 의한 결과를 비교하고자

한다. 표1과 표2는 각각 비점성토($c=0, \phi$ 흙)와 점성토($c-\phi$ 흙)에 대하여 전주동토압의 무차원 값인 $K_A (= P_A / (\gamma H^2 / 2))$ 을 비교하여 나타내고 있다.

표 3. 각종 이론에 의한 무차원의 전주동토압 $K_A (= P_A / (\gamma H^2 / 2))$ 의 비교($c=0, \phi$ 흙)

토압이론	$\alpha = 90^\circ$						$\phi = 30^\circ$			
	$\phi = 20^\circ$		$\phi = 30^\circ$		$\phi = 40^\circ$		$\alpha = 70^\circ$		$\alpha = 110^\circ$	
	$\delta=0$	$\phi/2$	0	$\phi/2$	0	$\phi/2$	$\delta=0$	$\phi/2$	$\delta=0$	$\phi/2$
Writers	0.49	0.45	0.33	0.30	0.22	0.20	0.50	0.48	0.21	0.18
Coulomb	0.49	0.45	0.33	0.30	0.22	0.20	0.50	0.48	0.21	0.18
Zero-extension	0.49	0.41	0.33	0.27	0.22	0.17	-	-	-	-
Slip-line	0.49	0.45	0.33	0.30	0.22	0.20	0.52	0.49	0.23	0.21
Limit analysis	0.49	0.45	0.33	0.30	0.22	0.20	0.52	0.48	0.23	0.19

표 2. 각종 이론에 의한 무차원의 전주동토압 $K_A(=P_A/(\gamma H^2/2))$ 의 비교($c-\phi$ 흙)

토압이론	δ	a_n ($=c_w/c'$)	ϕ					비 고
			5°	10°	15°	20°	25°	
Writers	0	0.0	0.84	0.70	0.59	0.49	0.41	
	ϕ	1.0	0.79	0.64	0.52	0.43	0.36	
Coulomb	0	0.0	0.84	0.70	0.59	0.49	0.41	
	ϕ	1.0	0.79	0.64	0.52	0.43	0.36	
Packshaw (1946)	0	0.0	0.85	0.70	0.59	0.48	0.40	도식법
	ϕ	1.0	0.78	0.64	0.50	0.40	0.32	

표 1은 점착력을 고려하지 않은 경우 전주동토압에 대하여 새로이 제안된 이론식에 의한 값과 기존의 각종 이론에 의한 결과를 비교한 것이다. 여기서 영신축선(zero-extension) 이론은 Habibagahi & Ghahramani(1977), 활동선(slip-line)이론은 Sokolovskii(1965) 그리고 극한해석(limit analysis)이론은 Chen & Liu(1990)에 의한 값이다. 이표에서 보면, 벽면의 뒷면이 연직인 경우($\alpha=90^\circ$)에는 영신축선이론에 의한 값을 제외하면 새로이 제안된 이론을 포함한 모든 이론에 의한 값이 정확히 일치하고 있으며, 영신축선이론에 의한 값은 기타 이론에 비하여 조금 작게 산출되고 있다. 뒤채움 흙의 내부마찰각 ϕ 가 30° 이며, α 가 70° 및 110° 일 경우를 보면, 제안이론과 Coulomb 이론에 의한 계산값들은 벽면마찰각(δ)의 크기에 무관하게 정확히 일치하며, 활동선 이론 및 극한해석이론의 것들에 비하여 아주 작은 값으로 산출되었다.

표 2는 뒤채움 흙의 점착력이 있으며, 벽면의 부착력(c_w)이 존재할 경우 전주동토압에 대하여 새로이 제안된 이론식에 의한 값과 Coulomb이론 및 Packshaw방법(1945)으로 산출된 결과를 비교한 것이다. 표 2에서 보면, 벽면의 부착력이 존재할 경우에도 표 1에서와 같이 새로이 제안된 이론에 의한 값은 Coulomb 이론에 의한 값과 정확히 일치한다. 이것은 이론의 유효를 위한 근본적인 가정이 동일하다는 이유인 것으로 사료된다. Packshaw 방법은 Cou-

lomb이론에 근거하여 만들어진 도해법이지만, 전자의 두 이론에 의한 결과보다 다소 작은 값으로 나타내고 있다.

표 3은 새로이 제안된 토압이론식과 Coulomb토압이론식으로 계산된 토압의 작용모멘트비(M_R)를 나타낸 것이다. 여기서는 옹벽 뒷면의 경사각 α 가 $80^\circ, 90^\circ$ 및 100° 로 뒤채움 지면의 경사각 β 가 $0^\circ, 10^\circ$ 및 20° 로, 뒤채움 흙의 내부마찰각 ϕ 가 $20^\circ, 30^\circ$ 및 40° 로 변하며, 벽면 마찰각 δ 가 $\phi/2$ 이고 점착력이 없을 경우에 두 이론에 의한 결과를 이용한 것이다. 그리고 K_w 는 무차원의 전주동토압($P_A/(\gamma H^2/2)$), \bar{h} 는 무차원의 작용점위치(h/H) 또한 M_R 는 $K_w \cdot \bar{h}$ 를 나타내고 있다. 표 1 및 표 2에서 보았던 바와 같이 두 이론에 의한 전토압은 동일하지만, 표 3에서와 같이 작용점 위치는 서로 상이하다. 즉, Coulomb이론에서는 작용점 위치를 구할 수 없으므로 Rankine 이론에서와 같이 옹벽저면에서 $H/3$ 지점을 작용점위치라고 가정하였다. 그러나 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 제안된 이론식에 의한 작용점의 위치는 각종 조건에 따라 $H/3$ 보다 작게 또는 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 따라서 토압에 의한 회전 모멘트는 동일한 전토압에도 불구하고 작용점의 깊이 \bar{h} 에 따라 달라지게 될 것이다. 이 표에서 회전 모멘트비 M_R 은 제안된 이론식에 의한 회전모멘트에 대하여 Coulomb 이론에 의한 회전모멘트의 비를 나타내고 있다. 여기서 보면 α 가 90° 보다 클 경우, 즉 옹벽 뒷면이 연직이거

나 또는 응력의 배면 쪽으로 기울어져 있을 때에는 M_R 이 대개 1.0을 초과하므로 Coulomb이론에 의한 설계는 과소평가되고 있음을 알 수

있다. 그리고 M_R 은 β 및 ϕ 가 작을수록 크게 산출됨을 나타내고 있다.

표 3. 제안된 이론식과 Coulomb 이론에 의한 모멘트의 비교

α (deg.)	β (deg.)	ϕ (deg.)	$\delta(=\phi/2)$ (deg.)	K_A	\bar{B}	M_0	$M_R=M_0/M_C$
80	0	20	10	0.520	0.334	0.174	1.003
		30	15	0.378	0.327	0.124	0.982
		40	20	0.273	0.315	0.086	0.946
	10	20	10	0.626	0.306	0.192	0.919
		30	15	0.437	0.305	0.133	0.916
		40	20	0.406	0.297	0.091	0.892
	20	20	10	1.064	0.220	0.234	0.661
		30	15	0.535	0.271	0.145	0.814
		40	20	0.354	0.272	0.096	0.817
90	0	20	10	0.447	0.359	0.160	1.078
		30	15	0.301	0.364	0.110	1.093
		40	20	0.199	0.366	0.073	1.099
	10	20	10	0.531	0.333	0.177	1.000
		30	15	0.343	0.347	0.119	1.042
		40	20	0.220	0.353	0.078	1.060
	20	20	10	0.897	0.245	0.220	0.736
		30	15	0.415	0.315	0.131	0.946
		40	20	0.250	0.335	0.084	1.006
100	0	20	10	0.385	0.394	0.152	1.183
		30	15	0.237	0.414	0.098	1.243
		40	20	0.140	0.433	0.061	1.300
	10	20	10	0.455	0.369	0.168	1.108
		30	15	0.267	0.400	0.107	1.201
		40	20	0.153	0.426	0.065	1.279
	20	20	10	0.773	0.277	0.214	0.832
		30	15	0.320	0.372	0.119	1.117
		40	20	0.177	0.412	0.070	1.237

(주) M_C : Coulomb에 의한 회전모멘트
 M_0 : 필자에 의한 회전모멘트
 Coulomb의 작용점 위치 $\bar{H}(=H_A/H)=1/3$

4. 토압의 영향인자에 대한 분석

새로이 제안된 토압이론식에 의하여 토압의 크기, 작용점 위치 및 회전모멘트에 미치는 영향요소를 분석하기도 한다. 여기에서는 지면의 제한으로 단지 토압분포 및 3장의 표3에 의존하여 분석을 수행토록 하며, 구체적인 분석은 허대영의 논문(1992)을 참조할 수 있다.

4.1 옹벽뒷면의 경사각 α 의 영향

그림 2는 $\phi=30^\circ$, $\delta=\phi/2$, $c'=0$ 및 $\beta=0$ 일 경우에 α 가 80° , 90° 및 100° 로 변할 때의 주동토압분포를 나타내고 있다. 이 그림과 표 3을 참조하면, 전주동토압은 α 가 증가할수록 상당히 감소함을 알 수 있다. 주동토압 분포는 α 가 100° 일 때에 포물선 형태로 보이다가 α 가 감소함에 따라 점차 직선형태로 되었다가 다시 확산형태로 바뀌어 감을 볼 수 있다. 따라서 α 가 80° , 90° 및 100° 일 때 작용점 깊이 \bar{h} 는 각각 0.327H, 0.364H 및 0.414H로 되며, 모멘트비 M_R

은 각각 0.98, 1.09 및 1.24로 나타난다. 결과적으로 α 가 90° 를 초과할 때 Coulomb 토압이론에 의한 옹벽의 설계는 모멘트에 대하여 과소평가된 결과를 산출한다는 것을 의미한다.

그림 2에서 보면, α 가 80° 및 90° 일 때 포물선 형태로 보이다가 α 가 100° 일 때는 확산하는 토압분포를 나타내고 있다. 이러한 토압분포들은 삼각형의 흙체기에 의한 자중이 깊이가 깊어질 수록 증가비가 둔화되는 반면에, 벽면 및 파괴면에서의 마찰력이 깊이에 따라 비례적으로 증가하는 원인 때문에 포물선 또는 확산형 분포를 나타내고 있다. 그러나 두 분포의 구분은 본 장에서 취급하는 영향인자의 정량적인 값에 따라 결정될 것이다.

4.2 내부마찰각 ϕ 의 영향

그림 3은 $\alpha=90^\circ$, $\beta=0$, $\phi=30^\circ$ 및 $c'=0$ 일 때에 ϕ 의 변화에 따른 주동토압 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 ϕ 가 20° , 30° 및 40° 로 증가할 때 토압이 급격하게 감소하고 있음을 나타

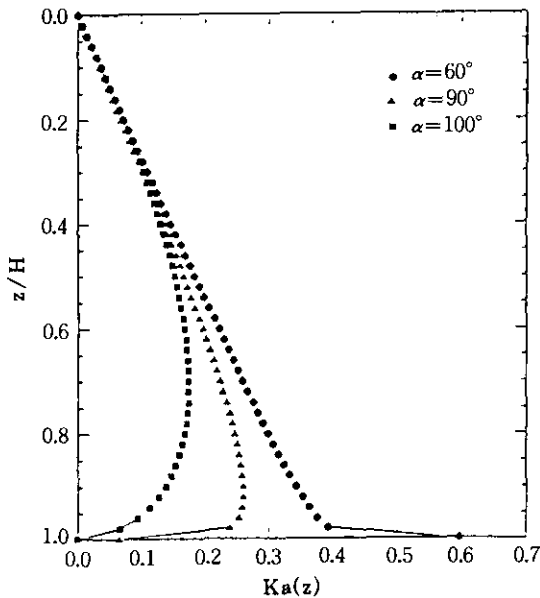


그림 2. α 의 변화에 따른 주동토압분포
($\beta=0$, $\delta=\phi/2$, $\phi=30^\circ$, $M(=c'/\gamma H)=0$)

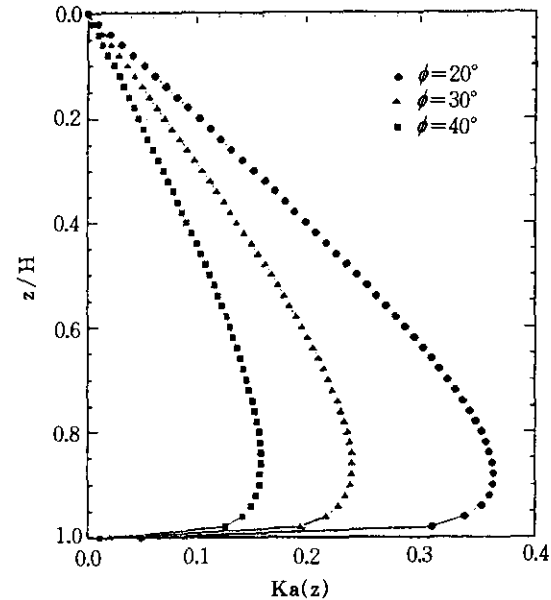


그림 3. ϕ 의 변화에 따른 토압분포
($\alpha=90^\circ$, $\beta=0$, $\delta=\phi/2$, $M(=c'/\gamma H)=0$)

내고 있다. 그러나 표 3에서 볼 수 있는 바와 같이 작용점 위치는 $(0.36 \sim 0.37)H$ 사이에서 변하므로, 작용점 위치에 미치는 영향은 미소하다. 따라서 모멘트에 영향을 미치는 작용점 위치는 ϕ 에 거의 무관하므로 모멘트는 전토압의 크기에 의존하게 된다.

4.3 뒤채움 지면의 경사각 β 의 영향

그림 4는 $\alpha=90^\circ$, $\phi=30^\circ$, $\delta=\phi/2$ 및 $c'=0$ 일 때 β 의 변화에 따른 주동토압분포를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면, β 가 증가할 수록 전주동토압은 증가하며, 토압분포는 $\beta=0$ 일 때 포물선 형태를 나타내다가 $\beta=20^\circ$ 일 때에 확산되는 토압형태를 보여주고 있다. 따라서 전주동토압은 β 가 클수록 증가하지만, 작용점의 위치는 낮아짐을 알 수 있다. 표 3에서 보면 M_R β 가 0 및 10° 일 때 각각 1.09 및 1.04로써 제안된 이론에 의한 모멘트가 Coulomb의 것보다 크게 산출되지만, $\beta=20^\circ$ 일 때는 오히려 M_R 이 1.0보다 작은 값인 0.95로 얻어졌다.

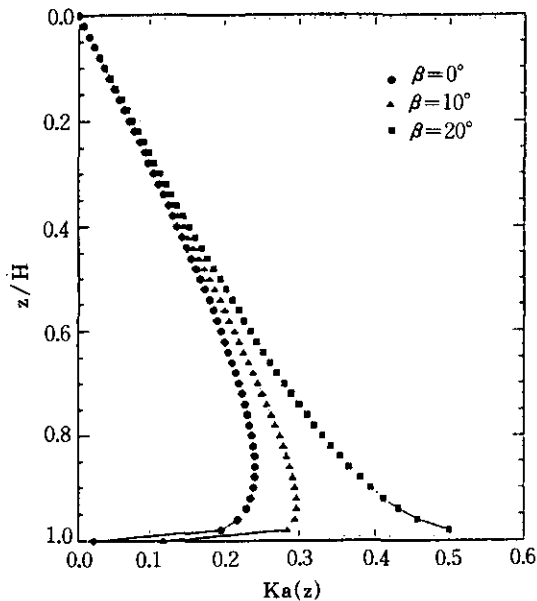


그림 4. β 의 변화에 따른 토압분포
($\alpha=90^\circ$, $\delta=\phi/2$, $\phi=30^\circ$, $M(=c'/\gamma H)=0$)

4.4 벽면마찰각 δ 의 영향

그림 5는 $\alpha=90^\circ$, $\beta=0$, $\phi=30^\circ$ 및 $c'=0$ 일 경우 δ 의 변화에 따라 주동토압분포를 나타내고 있다. 이 그림은 δ 가 0 , $\phi/3$, $\phi/2$, $(2/3)\phi$ 로 변할 경우인데, $\delta=0$ 일 경우에는 Rankine 토압에서와 같이 직선분포를 보여 주지만 $\delta>0$ 일 때에는 포물선 형태의 분포를 나타내고 있다. 그리고 $\delta>0$ 일 때, δ 의 변화에 따라 전토압 및 작용점 위치에 미치는 영향은 작음을 그림 5에서 볼 수 있다.

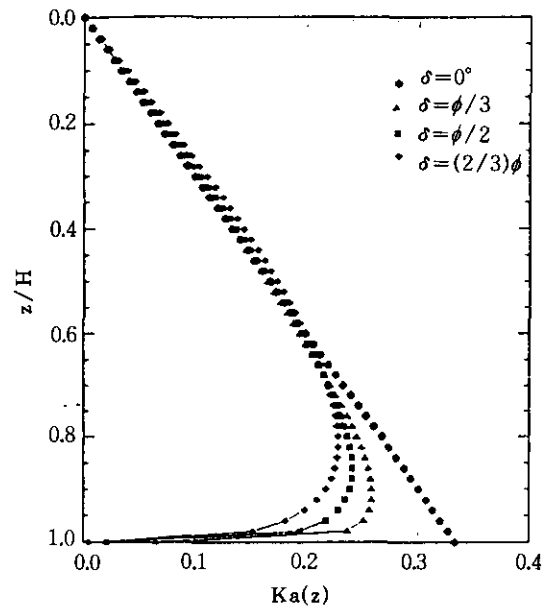


그림 5. δ 변화에 따른 토압분포
($\alpha=90^\circ$, $\beta=0$, $\phi=30^\circ$, $M(=c'/\gamma H)=0$)

4.5 벽면 부착력 c_w 의 영향

그림 6은 $\alpha=90^\circ$, $\beta=0$, $\phi=30^\circ$, $M=0.02$ 일 때 c_w 의 변화에 따른 주동토압분포를 나타내고 있다. 여기서 c_w 는 무차원 계수인 $a_n(=c_w/c')$ 으로 표현하기로 한다. c_w 는 식(16) 및 (20)에서 보면 δ 의 함수이므로, 그림6에서는 δ 가 0 , $\phi/3$, $\phi/2$ 및 $(2/3)\phi$ 이며 a_n 이 0 , 0.035 , 0.464 및 0.630 일 경우를 각각 나타내고 있다.

이 그림에서 $\delta=0$ 및 $c_w=0$ 이며, $c' \neq 0$ 인 경우에는 Rankine 이론에서와 같이 부(-)의 주동토압이 옹벽의 상단에서 발생하며, 토압분포는 직선적임을 볼 수 있다. 그리고 δ 및 c_w 가 증가할 수록 토압분포는 포물선 형태로 바뀌며, 옹벽의 $H/3$ 보다 낮은 깊이에서 토압이 점차 작아지며, 그 상단에서는 거의 직선적인 분포를 나타내고 있다. 역시 뒤채움 흙의 점착력 때문에 옹벽의 상부에서 부(-)의 토압이 발생하고 있다. 그림 6을 $c'=c_w=0$ 이며 δ 의 영향을 살펴본 그림 5와 함께 비교하면, 토압분포 형태가 두 경우에 아주 유사함을 알 수 있지만, 단지 옹벽의 상부에서 부(-)의 토압이 발생하는 여부에 차이가 있다. 따라서 부착력 c_w 가 토압에 미치는 영향은 δ 와 마찬가지로 비교적 작음을 알 수 있다. 그리고 점성토의 뒤채움에 따른 영향은 정성교 등(1996)에서 심도있게 다루도록 한다.

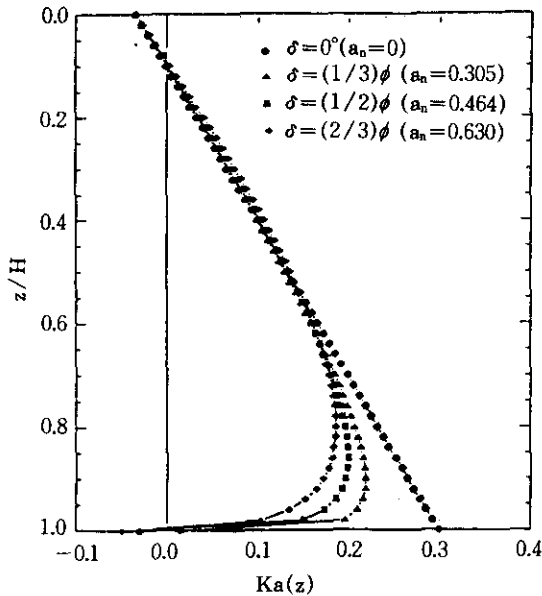


그림 6. c_w 변화에 따른 토압분포
($\alpha=90^\circ, \beta=0, \phi=30^\circ, \delta=\phi/3, M=0.02$)

5. 결론

$c-\phi$ 흙으로 뒤채움된 지표면과 옹벽의 배면이

모두 경사진 일반적인 경우에 적용가능한 토압 이론식을 아칭개념의 도입으로 새로이 유도되었다. 이 이론식을 이용하여 기존의 이론들에 의한 토압을 비교하였으며, 또한 토압에 미치는 영향인자들을 관찰한 결과 다음을 얻을 수 있었다.

- (1) 제안된 이론식에 의한 전토압은 Coulomb이론에 의한 것과 정확히 일치하며, Rankine 이론을 제외한 기타 이론들에 의한 것과 아주 좋은 일치를 보여주었다. 그러나 토압분포는 Coulomb과 Rankine이론에서 보여 주었던 삼각형 분포가 아니라 영향인자에 따라 포물선 또는 확산형 분포를 나타내었다.
- (2) 제안된 이론식에 의한 전토압과 작용점 위치는 주로 옹벽배면의 기울기, 흙의 내부마찰각 및 뒤채움면의 기울기에 따라 좌우되며 벽면마찰각 및 부착력의 크기에 따라서는 영향이 작았다.

뒤채움한 흙에서 점착력이 존재할 경우에는 옹벽상단에서 부(-)의 토압이 발생하게 되므로, 앞으로 $c-\phi$ 흙으로 뒤채움된 옹벽에 대해서는 인장균열을 고려한 토압이론식의 제안이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 1994년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었으므로, 학교당국에 감사함을 밝히고자 한다.

참고 문헌

1. Chen, W.F. & Liu, X.L.(1990), Limit analysis in soil mechanics, Elsevier, 477p.
2. Fang, F.S. & Inshibashi. (1986), "Static earth pressure with various wall movements", JGE, ASCE, Vol.112, No.3, pp. 317~333.
3. Handy, R.I.(1985), "The arch in soil arching", JGE, ASCE, Vol. 111, No.3, March,

pp.302~318.

4. Habibagahi, K. & Ghahramani, A.(1977), "Zero extension theory of earth pressure", JGE, ASCE, Vol. 105, GT7, pp.881~896.
5. Lee, I. K. & Herington, J.R.(1972), "Effect of wall movement on active and passive pressure, JGE, ASCE, 98(6), pp.625~640.
6. Kellogg, C.G.(1993), "Vertical earth loads on buried engineered works", JGE, ASCE, 119 (3), pp. 487~506.
7. Kingsley, H.W.(1989), "The arch in soil arching", JGE, ASCE, Vol. 115, No.3, pp. 415~419.
8. Mastsuo, et al.(1978), "Experimental study on earth pressure of retaining wall by field tests", Soils & Foundations, Vol. 18, No.3, pp.27~41.
9. Packshaw, S.(1945), "Earth pressure and earth resistance", Journal of Institute of Civil Engineers, Vol.25, pp.233~256.
10. Sherif, M. A., Ishibashi, I. and Lee, C.D. (1982), "Earth pressures against rigid retaining walls", JEG, ASCE, Vol.108, No.5, May, pp.679~695.
11. Sokolovskii, V.V.(1965), Statics of granular media, Pergamon Press, London, 267p.
12. Terzaghi, K.(1954), Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons, Inc, New York, pp.77~117.
13. Terzaghi, K.(1974), "Large retaining wall tests : I. Pressure of dry sand", Engineering News Record, Vol.112, No.5, Feb., pp. 136~140.
14. Terzaghi, K. & Peck, R. B.(1967), Soil mechanics in engineering practice, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 729p.
15. Tsagareli, Z.V.(1965), "Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining wall with a vertical backfill and horizontal backfill surface", Soil Mechanics (USSR), No.4, pp.1~3.
16. 김홍택(1990a), "연직 또는 경사진 강성벽체에 작용하는 정적 및 동적 수평토압", 대한토질공학회지, 제6권, 제2호, pp.35~46.

17. 김홍택(1990b), "암 근처에 설치되는 옹벽의 발생 토압에 관한 연구", 대한토질공학회지, 제6권 제4호, pp.7~17.
18. 정성교·백승훈(1993), "비점성토로 뒤채운한 강성옹벽에 작용하는 정적토압", 한국지반공학회지, 제9권, 제1호, pp.69~75.
19. 정성교·이만렬·김문규(1996), "Coulomb이론을 이용한 인장균열 및 수평토압", 한국지반공학회(투고중)
20. 허대영(1972), "점성토로 뒤채운한 강성옹벽에 작용하는 정적토압", 공학석사 학위논문, 동아대학교, 93p.

(접수일자 1996. 1. 10)

부 록

토압계수 K*의 결정

그림 7은 그림 1에서와 같이 깊이 z아래에서 옹벽과 흙의 접촉면의 미소요소에 대한 응력들을 Mohr응력원으로 나타낸 것이다. 여기서 벽면을 따라 유발되는 전단응력은 (a)는 주동상태, (b)는 수동상태에 대한 것으로 Lee & Herington(1972)에서와 같이 $\tau_w \neq \tau_r$ 로 가정하였다. 여기서 τ_w 와 τ_r 는 각각 벽체에 작용하는 전단력과 뒤채움흙의 전단강도를 나타내고 주동상태인 경우에는 K*, 수동상태인 경우에는 K₂로 표시하였다.

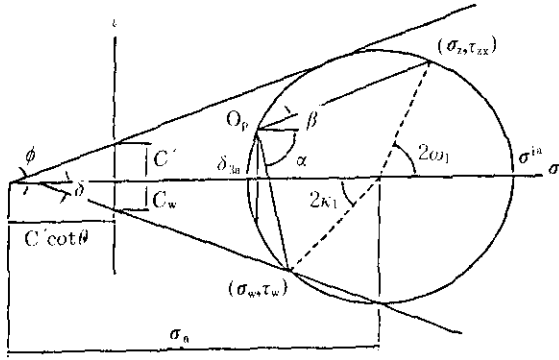
그림 7에서 τ_w 와 τ_r 의 관계는 식(14)와 같이 표현된다.

$$\frac{\tau_w}{\sigma_w \pm c' \cot \phi} = \frac{\sin \phi \sin 2\kappa}{1 \mp \sin \phi \cos 2\kappa} \quad (14)$$

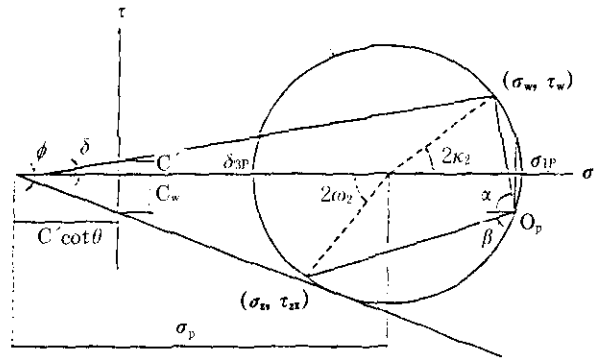
식(14)를 다시 정리하면 τ_w 는 식(15)와 같다.

$$\tau_w = \mp \left(\frac{\cos \phi \sin 2\kappa}{1 \mp \sin \phi \cos 2\kappa} c' \right) + \sigma_w \left(\frac{\sin \phi \sin 2\kappa}{1 \mp \sin \phi \cos 2\kappa} \right) \quad (15)$$

그림 7에서 $\tau_w = c_w + \sigma_w \tan \delta$ 의 관계가 있으므로, 여기서 벽면에 작용하는 부착력 c_w 및 벽면의 마찰각 $\tan \delta$ 는 식(16) 및 식(17)과 같이 표현할 수 있다.



(a) 주동상태



(b) 수동상태

그림 7. Mohr의 응력원

$$c_w = \pm \frac{\cos\phi \sin 2\kappa}{1 \mp \sin\phi \cos 2\kappa} c' \quad (16)$$

$$\tan\delta = \frac{\sin\phi \sin 2\kappa}{1 \mp \sin\phi \cos 2\kappa} \quad (17)$$

여기서 식(16)을 무차원의 점착력 비(a_w)로 나타내면 식(18)과 같다.

$$a_w = c_w / c' = \pm \frac{\cos\phi \sin 2\kappa}{1 \mp \sin\phi \cos 2\kappa} \quad (18)$$

각도 2κ 는 Mohr 응력원에서 기하학적인 관계로부터 구할 수 있다.

$$2\kappa = \left[\frac{2\kappa_1}{2\kappa_2} \right] = 180^\circ - 2\alpha - 2\beta + \left(\frac{2\omega_1}{2\omega_2} \right) \quad (19)$$

식(19)로부터 미지의 2κ 를 구하면 식(20)과 같이 표현된다.

$$2\omega = \left[\frac{2\omega_1}{2\omega_2} \right] = 2\alpha + 2\beta - \delta + \sin^{-1}(\sin\delta / \sin\phi) - 180^\circ \quad (20)$$

따라서, 토압계수 K^* 는 앞의 정의에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K^* = \left[\begin{array}{c} K_1^* \\ K_2^* \end{array} \right] = \frac{1 \mp \sin\phi \cos(180^\circ - 2\alpha - 2\beta + 2\omega)}{1 \pm \sin\phi \cos 2\omega} \quad (21)$$

임계각 θ 의 결정

그림 8과 같이 흙체기 ABC는 토압에 의한

벽체의 반력 P_w 와 벽면의 전부착력 C_w , 흙체기의 무게 W , 활동선 BC에 따른 흙의 반력 P_o 와 전점착력 C_o 가 평형상태를 이룰 때 힘의 평형 방정식을 적용할 수 있다. 흙체기의 무게 W 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

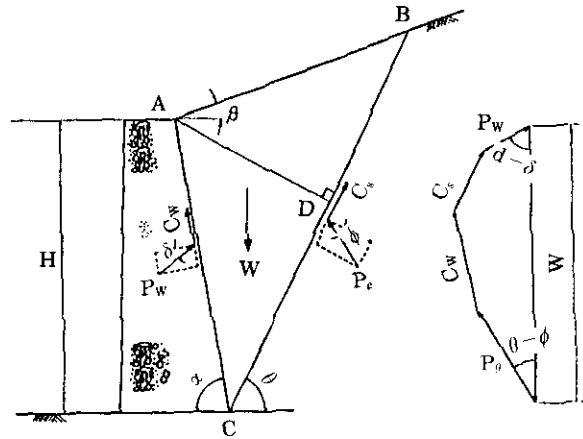


그림 8. 흙체기에 작용하는 힘의 다각형

$$W = (\overline{BC} \overline{AD} / 2)(\gamma) = \frac{\sin(\alpha + \beta) \sin(\alpha + \theta)}{\sin^2 \alpha \sin(\theta - \beta)} \left(\frac{\gamma H^2}{2} \right)$$

흡쇄기에 작용하는 힘들에 대해 연직 평형방정식을 취하여 그 결과를 정리하면 다음 식(22)와 같이 된다.

$$W = P_w \cos(\alpha \mp \delta) + P_\theta \cos(\theta \mp \phi) \pm C_w \sin \alpha \pm C_s \sin \theta \quad (22)$$

수평 평형방정식을 취하면 다음 식과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$P_\theta = \frac{\sin(\alpha \mp \delta)}{\sin(\theta \mp \phi)} P_w \mp \frac{\cos \alpha}{\sin(\theta \mp \phi)} C_w \pm \frac{\cos \theta}{\sin(\theta \mp \phi)} C_s \quad (23)$$

식(23)을 식(22)에 대입하면 식(24)와 같다.

$$W = [\cos(\alpha \mp \delta) + \sin(\alpha \mp \delta) \cot(\theta \mp \phi)] P_w + [\sin \alpha - \cos \alpha \cot(\theta \mp \phi)] C_w + [\sin \theta + \cos \theta \cot(\theta \mp \phi)] C_s \quad (24)$$

여기서,

$$C_w = \overline{AB} \quad c_w = c_w (H / \sin \alpha)$$

$$C_s = \overline{BC} \quad c' = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha \sin(\theta - \beta)} (c' H)$$

식(24)를 식(22)에 대입하여 정리하면 전도압은 P_w 는 식(25)와 같다.

$$P_w = \begin{bmatrix} P_A \\ P_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{AV} \\ K_{PV} \end{bmatrix} \left(\frac{\gamma H^2}{2} \right) \mp \begin{bmatrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{bmatrix} (c' H) \quad (25)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} K_{AV} \\ K_{PV} \end{bmatrix} = \frac{\cos a - \cos(b+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} q$$

$$\begin{bmatrix} K_{AC} \\ K_{PC} \end{bmatrix} = \frac{\sin e - \sin(f+2\theta)}{\cos c - \cos(d+2\theta)} r a_n$$

$$+ \frac{s}{\cos c - \cos(d+2\theta)}$$

$$a = \alpha \pm \phi$$

$$b = \alpha \mp \phi$$

$$c = \alpha + \beta \mp \delta \mp \phi$$

$$d = \alpha - \beta \mp \delta \mp \phi$$

$$e = \alpha + \beta \mp \phi$$

$$f = \alpha - \beta \mp \phi$$

$$q = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin^2 \alpha}$$

$$r = 1 / \sin \alpha$$

$$s = 2 \cos \phi \sin(\alpha + \beta) / \sin \alpha$$

그리고 식(25)에 의한 계산결과는 식(11)에 의한 것과 정확히 일치한다.

그림8에서 수평면과 파괴면이 이루는 한계 각 θ 를 구하기 위하여 전도압 P_w 가 최대가 되는 조건, 즉 $\partial P_w / \partial \theta = 0$ 로 하여 한계 각 θ 를 구하면 식(26)과 같다.

$$\theta = \sin^{-1}$$

$$\left[\frac{(A^2 + B^2 - BD) + A \sqrt{A^2 + B^2 - D^2}}{2(A^2 + B^2)} \right]^{1/2} \quad (26)$$

여기서,

$$A = \pm [(\cos b \cos c - \cos a \cos d)q(\gamma H/2) \pm [(\cos d \cos e - \cos c \sin f)r a_n + \cos d s]c']$$

$$B = \pm [(\sin b \cos c - \cos a \sin d)q(\gamma H/2) \pm [(\sin d \sin e - \cos c \cos f)r a_n + \sin d s]c']$$

$$D = \pm [(\sin g q(\gamma H/2) + \cosh r a_n c']$$

$$g = b - d = \beta \mp \delta, \quad h = d - f = \mp \delta$$