

대수나선 파괴면을 고려한 수동토압계수의 계산

이승현

선문대학교 건축사회환경공학부

Computation of Passive Earth Pressure Coefficient considering Logarithmic Spiral Arc

Seung-Hyun Lee

Division of Architecture, Architectural Engineering, Civil Engineering, Sunmoon University, Asan, Korea

요약 본 연구에서는 한계평형법에 근거한 수동토압계수 산정에 있어서의 간단한 방법을 제시하고 그로부터 계산된 수동토압계수를 기존의 연구자들에 의한 값들과 비교해 보았다. 옹벽 배면에서의 파괴면을 구성하는 대수나선과 직선 중에서 직선 파괴면의 경사각을 유도하여 수동토압계수 산정방법에 반영하였다. 그리고 수동토압계수 산정시 Rankine 수동영역에 작용하는 토압력의 분력을 고려하기 보다는 전체를 고려하였다. 본 연구를 통해 제안된 방법을 통해 구한 수동토압계수는 Coulomb 수동토압계수와 같이 뒤채움 흙의 지표면의 경사각이 증가할수록 커지고 벽체의 경사각이 감소할수록 작아지는 경향을 보였다. 또한 본 연구를 통해 얻은 수동토압계수는 비교를 위해 고려한 거의 모든 경우에 있어 Coulomb 수동토압계수 보다 작게 계산되었다. 벽마찰각의 변화에 따른 수동토압계수를 비교해 보면 제안된 방법을 통해 계산된 수동토압계수가 Coulomb 수동토압계수 보다 작게 계산되었는데 흙의 내부마찰각이 클수록, 벽마찰각이 증가할수록 그 차이는 컸다. 본 연구에서 고려한 5개의 내부마찰각 중에서 일반적인 사질토의 내부마찰각의 범주에 해당되는 25°, 30°, 35° 그리고 40°와 3개의 벽마찰각에 대하여, 본 연구를 통해 얻은 수동토압계수와 기존의 연구자들에 의한 수동토압계수를 비교해보면 Kerisel and Absi 방법, Sobra 방법, Lancellotta 방법, Antão 등에 의한 방법, Kame 방법 그리고 Reddy 등에 의한 방법에 대한 최대 차이율은 각각 4.8%, 3.8%, 31.1%, 4.0%, 20.6% 그리고 12.8% 였는데 전체적으로 볼 때 기존의 연구자들에 의한 값들과 큰 차이를 보이지는 않았다.

Abstract In this study, a simple method of calculating the passive earth pressure coefficient, which is based on the limit equilibrium method, was proposed and the calculated earth pressure coefficients were compared with those of several researchers. The angle of the linear failure surface, which is combined with the logarithmic spiral arc, to the failure surfaces of the passive zone was derived and the whole passive thrust acting on the Rankine passive zone was considered in the proposed method instead of considering the horizontal component of passive thrust. The variations of the passive earth pressure coefficients of the proposed method showed the same tendency as that of the Coulomb's passive earth pressure coefficients with an inclined angle of backfill and internal friction angle. The magnitude of passive earth pressure coefficients of the proposed method were smaller than those of the Coulomb in almost all cases. A comparison of the passive earth pressure coefficients with the wall friction angle revealed the passive earth pressure coefficients of the proposed method to be smaller than those of the Coulomb and the differences between the two values increased with increasing internal friction angle and wall friction angle. A comparison of the passive earth pressure coefficients of the proposed method with those of the existing researchers for the considered internal friction angles of 25°, 30°, 35°, and 40° and three wall friction angles revealed the maximum percentage differences for the Kerisel and Absi method, Sobra method, Lancellotta method, Ant?o et al. method, Kame method, and Reddy et al. method to be 4.8%, 3.8%, 31.1%, 4.0%, 20.6%, and 12.8% respectively. The passive earth pressure coefficient and existing pressures were similar in all cases.

Keywords : Angle of linear failure surface, Existing researcher, Logarithmic spiral arc, Passive earth pressure coefficient, Simple method

*Corresponding Author : Seung-Hyun Lee(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2328 email: shlee02@sunmoon.ac.kr

Received October 11, 2018

Revised (1st November 5, 2018, 2nd November 6, 2018)

Accepted February 1, 2019

Published February 28, 2019

1. 서론

강성옹벽에 수동토압이 작용하는 경우 벽마찰각이 작을 때에만 파괴면이 평면에 가깝게 된다. 수동상태에 놓인 뒤채움 지반의 경우 지반의 거동은 자중뿐만 아니라 벽체에 의한 압축력에 지배되기 때문에 주동상태일 때와는 달리 곡선형태의 파괴면이 발생하게 된다[1]. 평면 형태의 파괴면을 가정한 Coulomb 썩기를 가정하는 경우 수동토압이 과대평가 되는 것으로 알려져 있는데 Terzaghi에 따르면 벽마찰각이 흙의 내부마찰각의 1/3 보다 작은 경우에만 Coulomb 수동토압이 합리적인 결과를 보인다 하였다[2]. 따라서 벽마찰이 있는 경우의 수동토압을 합리적으로 결정하기 위해서는 곡선 형태의 파괴면을 고려한 해석이 수행되어야 하며 다양한 시도들이 있어 왔다. 선행 연구에서 고려한 수동토압계수 결정법은 그 방법들에 따라 차이가 있으며 적절한 가정에 근거한 경우도 있다. 본 연구에서는 한계평형법(limit equilibrium method)에 근거하여 수동토압계수를 비교적 쉽게 계산하는 과정을 정립하고자 하였다. 본 연구에서는 해석에 고려한 대수나선과 직선으로 조합된 파괴면 중에서 직선파괴면의 경사각을 유도하고 벽체 배면 지표면 경사방향의 수동토압력의 수평분력이 아닌 수동토압력을 그대로 계산에 반영되도록 하였다. 또한 본 연구를 통해 유도된 수동토압계수를 기존 연구를 통해 제안된 값들과 비교함으로써 제안된 방법의 적용성을 평가해보았다.

2. 대수나선의 성질

토질역학에서 다루는 대수나선(logarithmic spiral arc)의 식은 식 (1)과 같으며 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다[3,4].

$$r = r_0 e^{\theta \tan \phi} \tag{1}$$

식 (1) 및 Fig. 1에서 r 은 대수나선의 반지름을 의미하는데 r_0 는 $\theta=0$ 에 대응하는 대수나선의 반지름을, θ 는 r 과 r_0 사이의 각도를, 그리고 ϕ 는 흙의 내부마찰각을 의미한다. Fig. 1에서 반지름 r 과 대수나선 AB 에 대한 법선이 이루는 각은 흙의 내부마찰각 ϕ 가 된다.

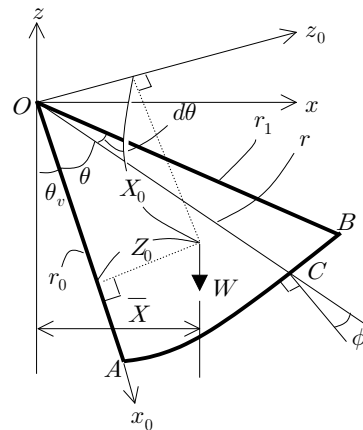


Fig. 1. Properties of logarithmic spiral arc

Fig. 1로부터 반지름 r_1 에 대응하는 중심각을 θ_1 이라 하면 OAB 의 면적(A_{ls})은 다음과 같게 된다.

$$A_{ls} = \int_0^{\theta_1} \left(\frac{1}{2} \times r \times rd\theta \right) = \frac{r_1^2 - r_0^2}{4 \tan \phi} \tag{2}$$

대수나선 OAB 의 도심위치는 Fig. 1에서 다음의 식 (3) 및 (4)와 같이 주어진다[5].

$$X_0 = \left(\frac{4}{3} r_0 \right) \left(\frac{\tan \phi}{1 + 9 \tan^2 \phi} \right) \tag{3}$$

$$\times \left\{ \frac{\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^3 (\sin \theta + 3 \tan \phi \cos \theta) - 3 \tan \phi}{\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 - 1} \right\}$$

$$Z_0 = \left(\frac{4}{3} r_0 \right) \left(\frac{\tan \phi}{1 + 9 \tan^2 \phi} \right) \tag{4}$$

$$\times \left\{ \frac{1 - \left(\frac{r_1}{r_0} \right)^3 (\cos \theta - 3 \tan \phi \sin \theta)}{\left(\frac{r_1}{r_0} \right)^2 - 1} \right\}$$

Fig. 1에서 대수나선의 극점(pole) O 로부터 대수나선의 도심까지의 거리 \bar{X} 는 다음과 같이 표현된다[6].

$$\bar{X} = X_0 \sin \theta_v + Z_0 \cos \theta_v \tag{5}$$

3. 수동토압

수동과괴시 높이 H 인 옹벽배면에 발생하는 파괴면을 그림으로 나타내면 Fig. 2와 같은데 수동과괴면은 대수나선과 직선의 조합으로 구성되어 있다. Fig. 2에서 AB 는 옹벽 배면을 의미하고 O 는 대수나선의 극점이다. Fig. 2에서 δ , α , i 는 각각 벽마찰각, 옹벽배면의 기울기, 옹벽배면 지표면의 기울기를 의미한다.

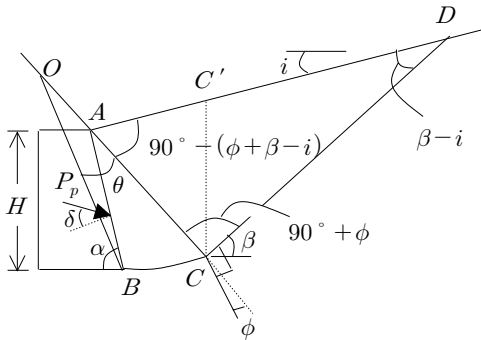


Fig. 2. Passive failure surface

Fig. 2에서 토체 ACD 는 Rankine의 수동상태에 있게 되는데 CD 면의 수평면에 대한 경사각(β)을 결정하기 위해 Fig. 3을 고려한다.

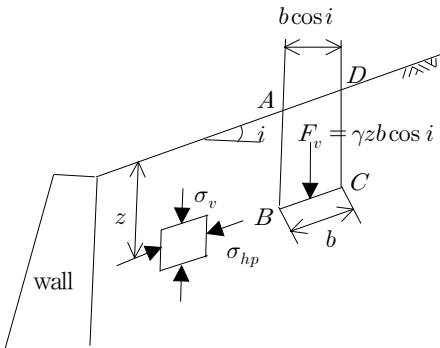


Fig. 3. Rankine earth pressure for the case of inclined backfill surface

Fig. 3에서 BC 면에 작용하는 연직응력(σ_v)은 식 (6)과 같다.

$$\sigma_v = \frac{F_v}{b} = \gamma z \cos i \quad (6)$$

Fig. 3에 나타나 있는 수동상태에서의 흙요소에 작용하는 응력상태를 모어원을 이용하여 나타내면 Fig. 4와 같다.

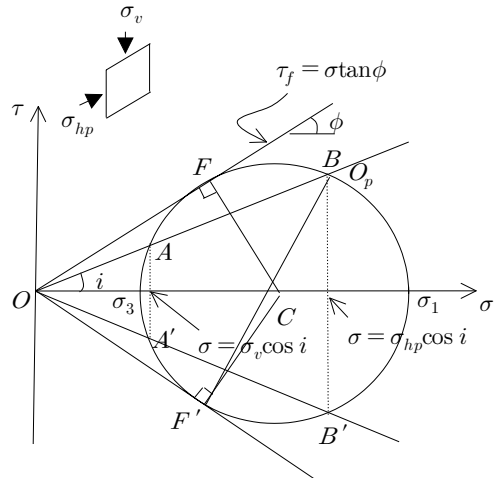


Fig. 4. Passive state for the case of inclined backfill surface

Fig. 4에서 \overline{OB} 가 Rankine 수동토압(σ_{hp}) 이 되며 \overline{OA} 가 연직응력(σ_v) 이 된다. Fig. 2에서의 CD 면은 Fig. 4에서 BF' 를 지나는 선과 일치하게 된다. BF' 를 지나는 직선의 수평면에 대한 경사각(β)을 구하기 위해 점 F' 와 점 B 의 좌표를 결정하도록 한다. Fig. 4에서 파괴시 모어원의 방정식은 다음과 같다.

$$\left(\sigma - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right)^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \right)^2 \quad (7)$$

파괴포락선이 파괴시의 모어원과 만나는 교점의 좌표 F' (σ_f, τ_f)은 다음과 같다.

$$\sigma_f = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin \phi \quad (8)$$

$$\tau_f = -\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos \phi \quad (9)$$

Fig. 4에서 점 B 의 좌표 (σ_B, τ_B)는 $\tau = \sigma \tan i$ 와 식 (7)을 연립하여 다음과 같이 결정된다.

$$\sigma_B = \frac{\cos^2 i (\sigma_1 + \sigma_3) + \cos i \sqrt{\cos^2 i (\sigma_1 + \sigma_3)^2 - 4\sigma_1 \sigma_3}}{2} \quad (10)$$

$$\tau_B = \frac{\cos i \sin i (\sigma_1 + \sigma_3) + \sin i \sqrt{\cos^2 i (\sigma_1 + \sigma_3)^2 - 4\sigma_1 \sigma_3}}{2} \quad (11)$$

따라서 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \frac{\tau_B - \tau_f}{\sigma_B - \sigma_f} \\ &= \frac{\cos i \sin i + \cos \phi \sin \phi + \sin i \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}{\cos^2 i - \cos^2 \phi + \cos i \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}} \end{aligned} \quad (12)$$

Fig. 2에서 경사각 β 가 결정되면 수동토압력 결정법으로서 시험쪼개기(trial wedge)를 이용한 방법[7]과 절편법(method of slices)[8]을 생각해 볼 수 있는데 본 연구에서는 시험쪼개기를 이용하는 방법을 고려하였다. 시험쪼개기를 이용하는 방법에서는 먼저 Fig. 2의 점 A로부터 뒤채움흙의 지표면과 $90^\circ - (\phi + \beta - i)$ 의 각도를 이루도록 직선 CA를 긋는다. 다음으로 중심이 O이고 $OB=r_0$, $OC=r_1$ 이 되도록 대수나선을 작도한다. 이때 ABCD가 시험쪼개기가 된다. 수동토압력을 구하기 위해서는 Fig. 2의 토체 ABCC'의 안정성을 평가하게 되는데 이를 위해 Fig. 5를 고려한다.

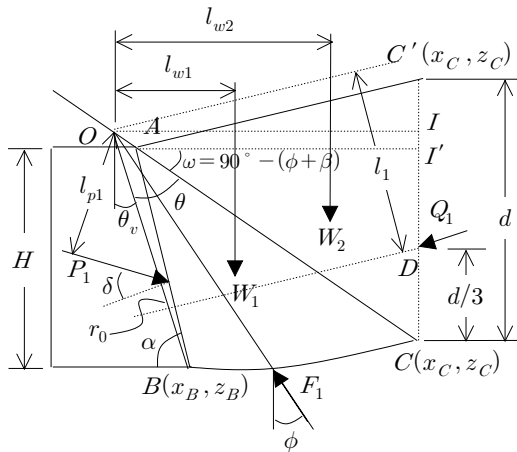


Fig. 5. Stability of soil mass ABCC'

Fig. 5에 대하여 다음의 힘들을 고려한다.

- 가) 토체 ABC의 무게 W_1 과 토체 ACC'의 무게 W_2

- 나) CC'면은 Rankine의 수동상태에 있으므로 CC'면에 작용하는 토압력 Q_1 은 식 (13)과 같으며 Q_1 의 작용방향은 뒤채움흙의 지표면과 나란하게 된다. 식 (13)에서 K_{pR} 는 식 (14)와 같다[9].

$$Q_1 = \frac{1}{2} K_{pR} \gamma d^2 \cos i \quad (13)$$

$$K_{pR} = \frac{\cos i + \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}}{\cos i - \sqrt{\cos^2 i - \cos^2 \phi}} \quad (14)$$

- 다) F_1 은 대수나선 BC를 따라 작용하는 전단저항력과 수직력의 합력을 의미한다. 대수나선의 성질에 의해 반지름과 대수나선에 대한 법선이 이루는 각이 흙의 내부마찰각 ϕ 와 같은데 Fig. 5로부터 F_1 의 작용방향이 대수나선의 반지름 방향과 일치하므로 F_1 의 작용선은 점 O를 지나게 된다.
- 라) P_1 은 수동토압력을 의미하고 벽체바닥으로부터 상향으로 $H/3$ 되는 위치에 작용한다.

Fig. 5에 대하여 모멘트평형을 고려하면 식 (15)와 같으며 식 (15)로부터 식 (16)과 같이 P_1 을 얻을 수 있다.

$$W_1 l_{w1} + W_2 l_{w2} + Q_1 l_1 = P_1 l_{p1} \quad (15)$$

$$P_1 = \frac{W_1 l_{w1} + W_2 l_{w2} + Q_1 l_1}{l_{p1}} \quad (16)$$

식 (16)을 이용하여 최종적인 수동토압력을 구하기 위해서는 다양한 대수나선에 대하여 구해진 수동토압력의 최소값을 결정해야 하는데 수동토압계수는 $K_p = 2P_p / (\gamma H^2)$ 로 계산된다.

4. 모멘트 평형의 고려

Fig. 5에 나타난 토체 ABCC'의 모멘트 평형을 고려함에 있어 본 연구에서는 CC'면에 작용하는 수동토압력 Q_1 의 작용방향을 기존 연구에서와 같이 수평분력

을 고려하지 않고 뒤채움흙의 지표면과 평행한 방향으로 고려하였다. Fig. 5에서 $x-z$ 좌표계의 중심을 대수나선의 극점과 일치하게 둔다. 이때 점 A 의 좌표 (x_A, z_A)를 비롯하여 각 점들의 좌표와 작용하중 및 모멘트 팔길이는 다음과 같이 계산된다.

$$x_A = \frac{q}{\tan\alpha - \tan\omega}, \quad z_A = \frac{-q \tan\omega}{\tan\alpha - \tan\omega} \quad (17)$$

$$x_B = \frac{q}{\tan\alpha - \tan\omega} + H \cot\alpha, \quad z_B = -H - \frac{q \tan\omega}{\tan\alpha - \tan\omega} \quad (18)$$

$$q = (\tan\alpha - \tan\omega)(r_0 \sin\theta_v - H \cot\alpha) \quad (19)$$

$$r_0 = \frac{H(1 - \tan\omega \cot\alpha)}{\cos\theta_v - \sin\theta_v \tan\omega} \quad (20)$$

$$\theta_v = 90^\circ - (\omega + \theta) \quad (21)$$

$$x_C = r_1 \cos\omega \quad (22)$$

$$z_C = -r_1 \sin\omega \quad (23)$$

$$x_{C'} = x_C = r_1 \cos\omega \quad (24)$$

$$\overline{AI'} = x_C - x_A \quad (25)$$

$$z_{C'} = z_A + \overline{AI'} \tan i \quad (26)$$

Fig. 5에서 OBC 의 무게(W_{la})는 식 (27)과 같고 O 으로부터의 팔길이(\bar{X})는 식 (28)과 같다.

$$W_{la} = \frac{r_1^2 - r_0^2}{4 \tan\phi} \times \gamma \quad (27)$$

$$\bar{X} = Y_0 \cos\theta_v + X_0 \sin\theta_v \quad (28)$$

삼각형 OAB 에 해당하는 무게(W_{tr})와 무게중심의 좌표 (x_G, z_G)는 각각 다음과 같다.

$$W_{tr} = \frac{1}{2} r_0 \gamma \cos(\omega + \theta) |x_A \tan(\omega + \theta) + z_A| \quad (29)$$

$$x_G = \frac{x_A + x_B}{3}, \quad z_G = \frac{z_A + z_B}{3} \quad (30)$$

모멘트 계산을 위한 삼각형 OAB 의 팔길이(l_{tr})는 다음과 같다.

$$l_{tr} = x_G \quad (31)$$

따라서 $W_1 l_{w1}$ 은 다음과 같게 된다.

$$W_1 l_{w1} = W_{la} \bar{X} - W_{tr} l_{tr} \quad (32)$$

점 C 와 점 C' 사이의 거리인 d 는 다음과 같다.

$$d = z_{C'} - z_C \quad (33)$$

Q_1 의 작용점 D 의 좌표 (x_D, z_D)는 다음과 같다.

$$x_D = x_C, \quad z_D = z_C + \frac{d}{3} \quad (34)$$

l_1 은 다음과 같이 계산된다.

$$l_1 = \cos i \times |x_D \tan i - z_D| \quad (35)$$

Fig. 5의 l_{p1} 을 계산하기 위해서 다음의 Fig. 6을 고려한다. Fig. 6에서 점 J 는 벽체 배면의 수동토압 작용점을 의미한다.

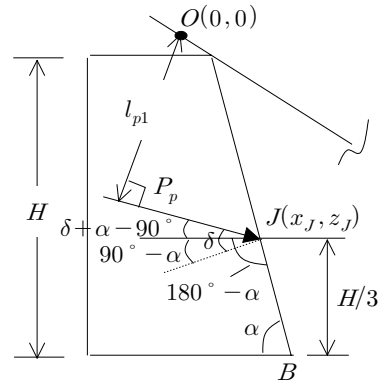


Fig. 6. Determination of l_{p1}

Fig. 6으로부터 P_p 의 작용선이 x 축과 이루는 경사각이 $\eta = \delta + \alpha - 90^\circ$ 임을 알 수 있으며 점 J 의 좌표는 다음과 같고 모멘트 팔길이 l_{p1} 은 식 (37)과 같게 된다.

$$x_J = x_B - \frac{H}{3} \cot \alpha, z_J = z_B + \frac{H}{3} \quad (36)$$

$$l_{p1} = \cos \eta \times [x_J \tan \eta + z_J] \quad (37)$$

Fig. 5에 나타나 있는 토체 ACC'의 무게중심의 x 좌표 x_2 는 다음과 같다.

$$x_2 = \frac{x_A + x_C + x_{C'}}{3} \quad (38)$$

따라서 모멘트 팔길이 l_{w2} 는 다음과 같게 된다.

$$l_{w2} = x_2 \quad (39)$$

Fig. 5에서 토체 ACC'의 무게 W_2 는 다음과 같게 된다.

$$W_2 = \frac{1}{2} \overline{AI'} d \times \gamma \quad (40)$$

5. 수동토압계수의 비교분석

이상에서 나타난 방법을 통해 얻어진 수동토압계수를 기준에 발표된 수동토압계수와 비교분석해 보았다. 본 연구에서 고려한 수동토압계수 산정과정의 중간 계산단계에서 옹벽의 높이(H)와 뒤채움흙의 단위중량(γ)이 사용되지만 최종적인 계산결과에 이들이 미치는 영향을 없음을 알 수 있었다. 따라서 수동토압계수 산정에 영향을 미치는 인자는 흙의 내부마찰각(ϕ)과 벽마찰각(δ), 벽체 배면의 경사각(α), 배면 지표면의 경사각(i)임을 알 수 있었다. Fig. 5로부터 최소 수동토압력에 대응하는, OB와 OC 사이의 각도가 $\beta - i$ 라 언급한 선행 연구자도 있는데[10] 본 연구를 통한 계산결과에 따르면 $\theta = \beta - i$ 에서 최소 수동토압력이 얻어지지는 않았다. 본 연구에서 고려한 계산방법을 통해 얻은 수동토압계수를 기준의 수동토압계수와 비교해 보기 위해 먼저 $\delta = 0.5\phi$, $\alpha = 90^\circ$ 인 경우에 대하여 $i = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 로 변화시켜가며 계산을 하였는데 고려한 내부마찰각은 $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 그리고 45° 였다. 계산결과를 Coulomb 수동토압계수와 비교하여 나타내면 Table 1 같다. Table 1에서 $K_{p(P)}$ 와 $K_{p(C)}$ 는 각각 본 연구에서

제안한 방법에 의한 수동토압계수와 Coulomb 방법에 의한 수동토압계수를 의미한다.

Table 1. Comparison of K_p ($\alpha = 90^\circ$)

$\phi(^{\circ})$	$i = 0^\circ$		$i = 5^\circ$		$i = 10^\circ$	
	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
20	2.67	2.64	3.1	3.12	3.64	3.7
25	3.5	3.55	4.13	4.34	4.8	5.33
30	4.72	4.98	5.68	6.31	6.73	8.15
35	6.59	7.36	8.1	9.84	9.85	13.64
40	9.63	11.77	12.18	17.08	15.23	26.57
45	15.01	21.38	19.62	35.72	25.43	69.93

Table 1을 통해 알 수 있듯이 뒤채움 지표면의 경사각이 증가할수록 수동토압계수는 커지게 되고 $\phi = 20^\circ$, $i = 0^\circ$ 인 경우를 제외하고 $K_{p(P)}$ 가 $K_{p(C)}$ 보다 작게 계산됨을 알 수 있다. Table 1로부터 Coulomb 수동토압계수에 대하여 제안된 방법으로 구한 수동토압계수의 비는 최소 0.36배에서 최대 1.01배의 값을 보였다. 다음으로는 $\delta = 0.5\phi$, $i = 0^\circ$ 인 경우에 대하여 $\alpha = 90^\circ, 85^\circ, 80^\circ$ 로 변화시켜가며 계산을 하였는데 계산결과 Table 2와 같다.

Table 2. Comparison of K_p ($i = 0^\circ$)

$\phi(^{\circ})$	$\alpha = 90^\circ$		$\alpha = 85^\circ$		$\alpha = 80^\circ$	
	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
20	2.67	2.64	2.39	2.43	2.26	2.27
25	3.50	3.55	3.10	3.18	2.87	2.90
30	4.72	4.98	4.12	4.30	3.73	3.80
35	6.59	7.36	5.67	6.07	5.00	5.16
40	9.63	11.77	8.15	9.10	6.96	7.36
45	15.01	21.38	12.40	14.97	10.21	11.26

Table 2를 통해 알 수 있듯이 벽체 배면의 경사각이 감소할수록 수동토압계수는 작아짐을 알 수 있고 $K_{p(P)}$ 또한 $K_{p(C)}$ 보다 작게 계산됨을 알 수 있다. Table 2에 나타나 있는 Coulomb 수동토압계수에 대하여 본 연구를 통해 제안된 방법으로 구한 수동토압계수의 비를 계산해 보면 최소 0.7배에서 최대 1.01배의 값을 보인다. 다음으로 벽마찰각의 변화에 따라 본 연구에서 제안된 방법을 이용하여 구한 수동토압계수와 Coulomb 방법을 이용하여 계산된 수동토압계수의 변화양상을 상호 비교해보았는데 Table 3과 같다.

Table 3. Comparison of K_p ($i = 0^\circ, \alpha = 90^\circ$)

$\phi(^{\circ})$	20					
δ/ϕ	0		0.5		1.0	
K_p	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
	2.04	2.04	2.67	2.64	3.07	3.53
$\phi(^{\circ})$	25					
δ/ϕ	0		0.5		1.0	
K_p	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
	2.46	2.46	3.50	3.55	4.42	5.60
$\phi(^{\circ})$	30					
δ/ϕ	0		0.5		1.0	
K_p	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
	3.00	3.00	4.72	4.98	6.68	10.1
$\phi(^{\circ})$	35					
δ/ϕ	0		0.5		1.0	
K_p	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
	3.69	3.69	6.59	7.36	10.76	22.97
$\phi(^{\circ})$	40					
δ/ϕ	0		0.5		1.0	
K_p	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
	4.60	4.60	9.63	11.77	18.87	92.59
$\phi(^{\circ})$	45					
δ/ϕ	0		0.5		1.0	
K_p	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$	$K_{p(P)}$	$K_{p(C)}$
	5.83	5.83	15.01	21.38	36.95	-

Table 3으로부터 벽마찰각이 0° 인 경우 $K_{p(P)}$ 와 $K_{p(C)}$ 는 같음을 알 수 있다. 벽마찰각이 0.5ϕ 와 ϕ 인

경우 $K_{p(P)}$ 는 $K_{p(C)}$ 보다 작게 계산됨을 알 수 있으며 흙의 내부마찰각이 클수록, 벽마찰각이 증가할수록 $K_{p(P)}$ 와 $K_{p(C)}$ 의 편차가 커짐을 알 수 있다. Table 3에 나타나 있는 Coulomb 수동토압계수에 대하여 제안된 방법으로 구한 수동토압계수의 비를 계산해보면 최소 0.2배에서 최대 1.01배의 값을 보인다. 기존 연구자들에 의해 제안된 수동토압계수와 본 연구를 통해 얻은 수동토압계수를 비교해 보기 위해 $i = 0^\circ, \alpha = 90^\circ$ 이고 $\delta = 0^\circ, 0.5\phi, \phi$ 이며 ϕ 가 $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 그리고 45° 인 경우를 고려하고 계산결과를 표로 나타내면 Table 4와 같다. Table 4에는 비교를 위해 고려한 6개의 기존 연구결과가 나타나 있다. Table 4에서 Kame과 Reddy 등에 의한 연구는 한계평형법에 근거하고 있으며 Soubra에 의한 결과는 Boussinesq의 해에 근거하고 있다. Lancellotta에 의한 결과는 소성이론에 근거한 하계값(lower bound)을 의미하고 Antão 등에 의한 결과는 한계해석과 연계된 유한요소해석에 근거하고 있다.

Table 4에 나타나 있는 수동토압계수의 상대적 크기를 비교해 보면 대체로 본 연구를 통해 계산된 수동토압계수가 기존에 발표된 수동토압계수와 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 수동토압계수의 상대적 크기를 그래프로 표현하기 위해 기존의 제안자에 의한 토압계수에 대하여 본 연구를 통해 계산된 토압계수와 기존의 제안자에 의한 토압계수의 차이의 비를 나타내는 차이율

Table 4. Comparison of $K_{p(P)}$ with the other theoretical results ($i = 0^\circ, \alpha = 90^\circ$)

$\phi(^{\circ})$	δ/ϕ	$K_{p(P)}$	Kerisel and Absi [11]	Soubra [12]	Lancellotta [13]	Antão et. al. [14]	Kame [15]	Reddy et. al. [16]
20	0	2.04	2.05	2.04	2.04	2.04	2.58	2.04
	0.5	2.67	2.55	2.58	2.52	2.56	2.97	2.61
	1.0	3.07	3.1	3.12	2.87	3.05	3.29	3.4
25	0	2.46	2.45	2.46	2.46	2.47	3.1	2.46
	0.5	3.5	3.4	3.43	3.3	3.39	3.85	3.46
	1.0	4.42	4.4	4.51	4	4.36	4.56	4.95
30	0	3	3	3	3	3	3.7	3
	0.5	4.72	4.6	4.69	4.44	4.62	5.13	4.73
	1.0	6.68	6.5	6.86	5.8	6.56	6.57	7.58
35	0	3.69	3.7	3.69	3.69	3.7	4.6	3.69
	0.5	6.59	6.5	6.67	6.16	6.52	7.04	6.71
	1.0	10.76	10.5	11.13	8.85	10.58	10.02	12.33
40	0	4.6	4.5	4.6	4.6	4.61	5.7	4.6
	0.5	9.63	9.6	9.99	8.92	9.67	10.1	10
	1.0	18.87	18	19.62	14.39	18.15	16.46	21.64
45	0	5.83	5.8	5.83	5.83	5.84	-	-
	0.5	15.01	15	15.98	13.6	15.29	-	-
	1.0	36.95	35	38.61	25.47	34.99	-	-

(percentage difference)을 계산해 보았는데 Fig. 7과 같다.

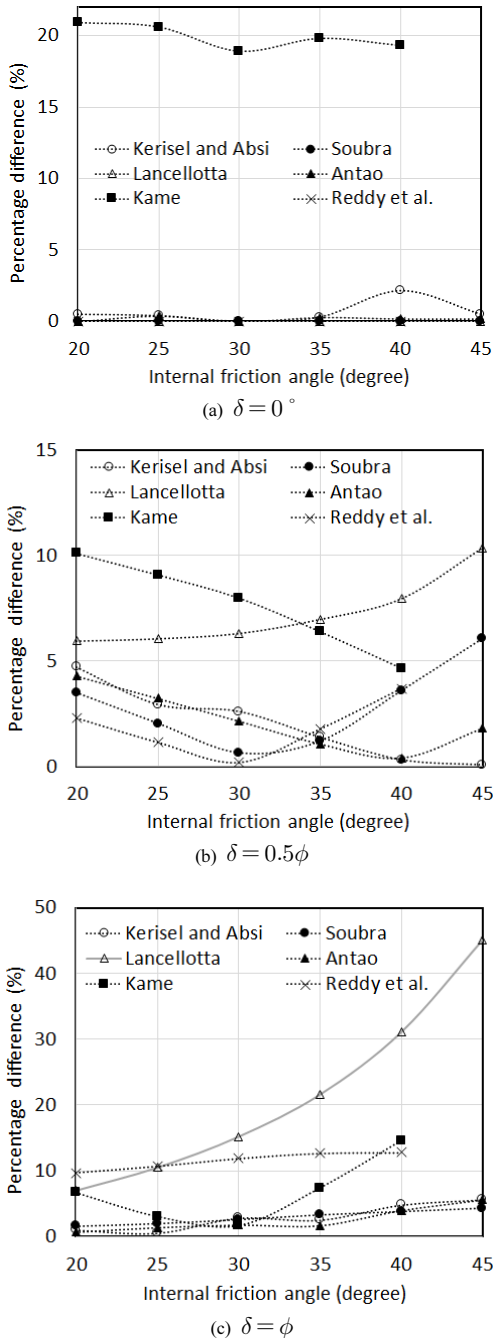


Fig. 7. Comparison of coefficients of passive earth pressure

Fig. 7(a)로부터 벽마찰각(δ)이 0° 인 경우 Kame방법에 의한 수동토압계수에 대한 차이율이 20% 정도인 경

우를 제외하고 나머지 제안자들에 의한 토압계수와의 차이는 상당히 작음을 알 수 있다. Kerisel and Absi 방법에 대한 차이율을 살펴보면 $\phi = 40^\circ$ 인 경우 차이율이 2.2%이고 이외의 내부마찰각에 대해서는 0.5% 이하의 값을 보인다. Soubra와 Lancellotta 방법 그리고 Reddy 등의 방법에 대한 차이율은 0% 이다. Antão 방법에 대한 차이율은 0.4% 이하의 차이율을 보인다. 벽마찰각이 $\delta = 0.5\phi$ 인 경우는 Kame과 Lancellotta 방법에 대한 차이율이 대체로 5~10%의 차이율을 보임을 알 수 있다. Kerisel and Absi 방법에 대한 차이율은 최대 4.7%에서 내부마찰각이 증가할수록 감소된다. Soubra 방법에 대한 차이율은 6.1% 이하이고 Antão 방법에 대한 차이율은 4.3% 이하이다. 그리고 Reddy 등의 방법에 대한 차이율은 3.7% 이하의 차이율을 보인다. 벽마찰각이 $\delta = \phi$ 인 경우는 Lancellotta 방법에 대한 차이율이 ϕ 가 20° 인 경우 7.0% 이고 내부마찰각이 증가할수록 차이율도 커짐을 알 수 있다. Reddy 등의 방법에 대한 차이율은 10%를 약간 상회하는 값을 보임을 알 수 있다. Kame 방법에 대한 차이율은 14.6% 이하이다. 그리고 나머지 세 개의 방법(Kerisel and Absi, Soubra, Antão)에 대한 차이율은 5.6% 이하의 값을 보인다.

6. 결론

본 연구에서는 한계평형법에 근거한 수동토압계수 산정법을 제시하고 그로부터 계산된 수동토압계수를 기존의 연구자들에 의한 값들과 비교해 보았다. 본 연구를 통해 유도된 결론은 다음과 같다.

- (1) 옹벽 배면에서의 파괴면을 구성하는 대수나선과 직선 중에서 직선 파괴면의 경사각을 유도하였으며 그에 따라 수동토압계수 산정방법을 제시하였다. 그리고 수동토압계수 산정시 Rankine 수동영역에 작용하는 토압력의 분력을 고려하기 보다는 그대로 적용하였다.
- (2) 본 연구를 통해 제안된 수동토압계수는 Coulomb 수동토압계수와 같이 뒤채움 흙의 지표면의 경사각이 증가할수록 커지고 벽체의 경사각(α)이 감소할수록 작아지는 경향을 보였다. 본 연구를 통해 제안된 방법을 통한 수동토압계수는 흙의 내부마찰각이 20° 이고 뒤채움흙의 지표면이 수평인

- 경우를 제외하고 모든 경우에 있어 Coulomb 수동토압계수 보다 작게 계산되었다.
- (3) 벽마찰각의 변화에 따른 수동토압계수를 비교해 보면 제안된 방법을 통해 계산된 수동토압계수가 Coulomb 수동토압계수 보다 작게 계산되었는데 흙의 내부마찰각이 클수록, 벽마찰각이 증가할수록 그 차이는 컸다.
- (4) 본 연구에서 고려한 5개의 내부마찰각 중에서 일반적인 사질토의 내부마찰각의 범주에 해당되는 25°, 30°, 35° 그리고 40° 와 3개의 벽마찰각에 대하여, 제안된 방법에 의한 수동토압계수와 기존의 연구자들에 의한 수동토압계수를 비교해 보면 Kerisel and Absi 방법, Soubra 방법, Lancellotta 방법, Antão 등에 의한 방법, Kame 방법 그리고 Reddy 등에 의한 방법에 대한 최대 차이율은 각각 4.8%, 3.8%, 31.1%, 4.0%, 20.6% 그리고 12.8% 였는데 전체적으로 볼 때 기존의 연구자들에 의한 값들과 큰 차이를 보이지는 않았다.

References

- [1] I. Smith, Smith's elements of soil mechanics, 8th ed., Blackwell Publishing, pp. 250-251, 2006.
- [2] K. Terzaghi, Theoretical soil mechanics, John Wiley, London and New York, 1943.
- [3] A. Caquot and J. Kerisel, Tables for the calculation of earth pressure, active pressure and bearing capacity of foundations, Gauthier-Villard, Paris, 1948.
- [4] T. S. Wu, Soil Mechanics, Allyn and Bacon, Inc., pp. 232-235, 1976.
- [5] W. A. Hijab, "A note on the centroid of a logarithmic spiral sector", *Geotechnique*, Vol. 6, Issue 2, pp. 96-99, 1956.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1956.6.2.66>
- [6] A. Patki Mrunal, N. M. Jnanendra and M. D. Moreshwar, "Computation of passive earth pressure coefficients for a vertical retaining wall with inclined cohesionless backfill", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol. 6, no. 4, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1186/s40703-015-0004-5>
- [7] K. Terzaghi and R. Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice. 2nd Edition, John Wiley, pp. 212-217, 1967.
- [8] D. H. Shields and A. Z. Tolunay, "Passive pressure coefficients by method of slices", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 99, no. SM12, pp. 1043-1053, 1973.
- [9] M. Budhu, Soil mechanics and foundations, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., pp. 502-503, 2007.
- [10] AbdelAziz Ahmed Ali senoon, "Passive earth pressure against retaining wall using log-spiral arc", *Journal of Engineering Sciences*, Assiut University, Vol. 41, no. 1, 2013.
- [11] J. Kerisel and E. Absi, Active and passive earth pressure tables, Rotterdam, The Netherlands: Balkema, 1990.
- [12] A. H. Soubra, R. Kastner and A. Benmansour, "Passive earth pressures in the presence of hydraulic gradients", *Géotechnique*, Vol. 49, no. 3, pp. 319-330, 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.319>
- [13] R. Lancellotta, "Analytical solution of passive earth pressure", *Géotechnique*, Vol. 52, no. 8, pp. 617-619, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.2002.52.8.617>
- [14] A. N. Antão, T. G. Santana, M. V. da Silva, N. M. da Costa Guerra, "Passive earth pressure coefficients by upper-bound numerical limit analysis", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.48, No.5, pp.767-780, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1139/t10-103>
- [15] G. S. Kame, "Analysis of a continuous vertical plate anchor embedded in cohesionless soil", PhD Dissertation, Bombay, India, Indian Institute of Technology, 2012.
- [16] N. Reddy, D. Dewaikar and G. Mohapatra, "Computation of passive earth pressure coefficients for a horizontal cohesionless backfill using the method of slices", *International Journal of Advanced Civil Engineering and Architecture Research*, Vol. 2, no. 1, pp. 32-41, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1939787913Y.0000000037>

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



- 1988년 8월 : 서울대학교 토목공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건축사회환경공학부 교수

<관심분야>
토질역학, 기초공학