

지진시 주동토압계수에 대한 이론적 연구

이승현

선문대학교 건설시스템안전공학과

A Theoretical Study on Seismic Active Earth Pressure Coefficient

Seung-Hyun Lee

Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

요약 지진시의 주동토압계수를 구하기 위해 4차방정식을 유도하였는데 방정식의 해를 통해 지진시의 주동파괴면의 경사각과 주동토압계수를 얻을 수 있었다. 본 연구에서 유도한 지진시의 주동토압계수와 파괴면의 경사각을 Mononobe-Okabe에 의해 유도된 지진시의 주동토압계수 및 파괴면의 경사각과 비교해 보았는데 일치함을 알 수 있었다. 지진시의 주동토압계수 또한 지진이 없는 경우의 주동토압계수와 마찬가지로 내부마찰각이 증가할수록 감소함을 알 수 있었으며 본 연구에서 고려한 설계수평지진계수(k_h)값에 관계없이 지진시의 주동토압계수가 Coulomb 주동토압계수보다 크음을 알 수 있었다. 옹벽배면이 연직이고 배면지반의 지표면이 수평인 간단한 옹벽에 대하여 지진을 고려하지 않은 경우의 안전계수에 대하여 지진을 고려한 경우의 안전계수의 비를 비교해 보았다. 옹벽의 활동과 관련하여 지진을 고려하지 않은 경우의 기준안전계수에 대하여 지진을 고려한 경우의 기준안전계수의 비보다 계산을 통해 얻어진 안전계수의 비가 작아서 본 연구에서 고려한 거의 모든 경우에 대하여 지진을 고려한 활동검토가 설계에 지배적임을 알 수 있었다. 이러한 결론은 옹벽의 전도검토에 있어서도 동일함을 알 수 있었다.

Abstract To obtain the seismic active earth pressure coefficient, a quartic equation was derived and solved to get the inclination angle of the active failure surface and the seismic active earth pressure coefficient. The inclination angle of the failure surface and the seismic active earth pressure coefficient were compared with those derived using the Mononobe-Okabe method. It can be seen from this comparison that these values were identical. As with the active earth pressure coefficient not considering an earthquake, the seismic active earth pressure coefficients decreased as the internal friction angles increased. It can also be seen that the seismic active earth pressure coefficients were greater than the static Coulomb active earth pressure coefficients regardless of the design horizontal earthquake factor (k_h). For a simple retaining wall with a vertical back face and a horizontal backfill surface, safety factors considering an earthquake were compared with those not considering an earthquake. Ratios of the computed seismic factor of safety against sliding of the retaining wall to the computed static factor of safety against sliding of the same wall were smaller than the ratio of the required seismic factor of safety to the required static factor of safety. So, it is seen that the check for wall sliding considering earthquake dominates the design of the wall and the same conclusion can be made in case of checking of the overturning of the retaining wall.

Keywords : Design Horizontal Earthquake Factor, Inclination Angle of Active Failure Surface, Ratio of Factor of Safety, Seismic Active Earth Pressure Coefficient, Simple Retaining Wall

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

email: shlee02@sunmoon.ac.kr

Received July 15, 2021

Accepted September 3, 2021

Revised August 19, 2021

Published September 30, 2021

1. 서론

국내에서의 내진설계 규정은 1988년 ‘건축물의 구조기준 등에 관한 규칙[1]’에 명시된 이후 1991년 고속철도, 1992년 도로교 그리고 1993년 댐에 대하여 내진설계 기준이 제정되어 왔다. 옹벽의 경우 국토교통부가 제정한 다수의 세부규정에 내진설계가 명시되고 있지만 일반적으로 규정마다 상이한 내용이 다수 존재한다[2]. 지진시 옹벽에 작용하는 토압에 관해서는 유사정적해석(pseudo-static analysis)을 적용하는 경우가 대부분이다[3-7]. 즉, 옹벽 자중의 일정부분이 옹벽에 횡방향하중으로 작용한다고 보고 옹벽의 안정성을 검토하는 것이다. 옹벽의 안정성 검토에는 활동, 전도 그리고 지지력 검토가 있다. 이전에는 옹벽의 안정성과 관련하여 정적인 조건에 대한 검토가 주로 이루어져 왔으나 최근에 국내에서도 지진이 발생함에 따라 지진시에 대한 옹벽의 안정성 검토 또한 중요하게 되었다. 본 연구에서는 고차방정식의 해를 통해 지진시 주동토압계수를 유도하는 방법을 제안하였으며 간단한 옹벽에 대하여 지진의 유무에 따라 옹벽의 안정성에 대한 안전계수를 비교해봄으로써 지진이 작용하는 경우와 작용하지 않은 경우 둘 중 어떠한 경우가 설계를 지배하는지를 살펴보고자 하였다.

2. 이론적 배경

동적 주동토압계수를 유도하기 위해 Fig. 1을 고려한다. Fig. 1에는 연직방향 지진력(F_v)과 수평방향 지진력(F_h)을 받고 있는 주동 파괴체기 ABC 에 작용하는 힘들이 나타나 있다. Fig. 1에서 H 와 θ , α , δ , ϕ 그리고 β 는 각각 벽체의 높이와 벽체 배면의 경사각, 배면 지표면의 경사각, 벽마찰각, 뒤채움흙의 내부마찰각 그리고 가정한 주동파괴면의 경사각을 의미한다. 또한 W 와 P_{ac} 그리고 F 는 각각 주동체기 ABC 의 무게와 주동토압력 그리고 파괴면 BC 에 작용하는 힘들의 합력을 의미한다 [8].

Fig. 1로부터 주동체기에 작용하는 힘들의 x 방향 및 z 방향으로의 힘의 평형조건식은 각각 식 (1), (2)와 같게 된다.

$$P_{ac} \cos(\theta + \delta) - F_h - F \sin(\beta - \phi) = 0 \quad (1)$$

$$P_{ac} \sin(\theta + \delta) - W + F_v + F \cos(\beta - \phi) = 0 \quad (2)$$

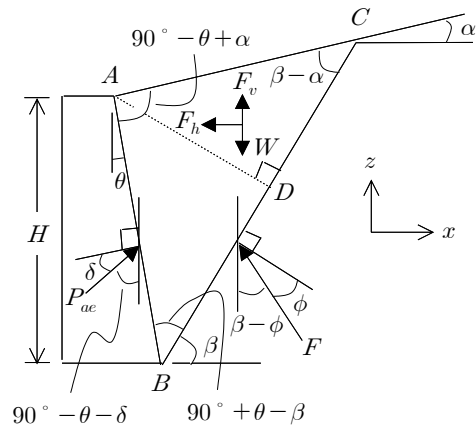


Fig. 1. Failure wedge under seismic force

중력가속도(g)에 대한 수평방향 지진가속도(α_h)의 비를 $k_h = \alpha_h/g$ 라 하고 중력가속도에 대한 연직방향 지진가속도(α_v)의 비를 $k_v = \alpha_v/g$ 라 하면 수평방향 지진력 및 연직방향 지진력은 식 (3)과 같이 표현된다. 보통 k_h 를 설계수평지진계수라 한다.

$$F_h = k_h W, \quad F_v = k_v W \quad (3)$$

Fig. 1로부터 $\overline{AB} = H/\cos\theta$ 임을 알 수 있고 $\triangle ABC$ 및 $\triangle ABD$ 에 대하여 sine 정리를 적용하면 $\overline{BC}$ 와 $\overline{AD}$ 를 각각 구할 수 있으며 따라서 $\triangle ABC$ 의 무게(W)를 얻을 수 있다. 식 (1)을 F 에 대하여 정리한 다음 식 (2)에 대입하면 식 (4)를 얻는다.

$$P_{ac} \left\{ \sin(\theta + \delta) + \frac{\cos(\theta + \delta)}{\tan(\beta - \phi)} \right\} = W - F_v + \frac{F_h}{\tan(\beta - \phi)} \quad (4)$$

식 (4)에 대하여 식 (3)의 관계와 W 를 적용한 다음 P_{ac} 에 대하여 정리하고 $\eta = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{1 - k_v} \right)$ 라 두면 식 (5)와 같게 된다.

$$P_{ac} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) \times \frac{\sin(\beta - \phi)}{\cos(\beta - \theta - \delta - \phi)} \times \frac{\cos(\alpha - \theta) \cos(\beta - \theta)}{\cos^2 \theta \sin(\beta - \alpha)} \times \left\{ \frac{\tan \eta}{\tan(\beta - \phi)} + 1 \right\} \quad (5)$$

식 (5)의 우변에서 $0.5\gamma H^2(1-k_v)$ 를 제외한 부분을 K'_{ae} 이라 두면 K'_{ae} 는 식 (6)과 같게 된다.

$$K'_{ae} = \frac{\cos(\alpha - \theta)}{\cos^2\theta \cos\eta} \times \frac{\cos(\beta - \theta) \sin(\beta - \phi + \eta)}{\cos(\beta - \theta - \delta - \phi) \sin(\beta - \alpha)} \quad (6)$$

3. 지진시의 주동토압계수의 유도

식 (6)의 우변에서 $\cos(\alpha - \theta) / (\cos^2\theta \cos\eta)$ 를 제외한 부분을 K 라 두면 K 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$K = \frac{\sin(2\beta - \phi + \eta - \theta) + \sin(\eta + \theta - \phi)}{\sin(2\beta - \alpha - \theta - \delta - \phi) + \sin(\theta + \delta + \phi - \alpha)} \quad (7)$$

식 (7)을 β 에 대하여 편미분한 다음 $\partial K / \partial \beta = 0$ 로 두고 정리하면 식 (8)을 얻을 수 있다.

$$\frac{1 - \tan\beta \tan(\eta - \phi)}{\tan\beta + \tan(\eta - \phi)} - \frac{\tan\beta - \tan\theta}{1 + \tan\beta \tan\theta} - \frac{1 + \tan\beta \tan\alpha}{\tan\beta - \tan\alpha} + \frac{\tan\beta - \tan(\theta + \delta + \phi)}{1 + \tan\beta \tan(\theta + \delta + \phi)} = 0 \quad (8)$$

식 (8)에서 $x = \tan\beta$, $A = \tan(\eta - \phi)$, $B = \tan\theta$, $C = \tan\alpha$, $D = \tan(\theta + \delta + \phi)$ 라 두고 식 (8)의 좌변을 $f(x)$ 라 하면 $f(x)$ 는 식 (9)와 같은 4차방정식으로 나타낼 수 있다.

$$f(x) = x^4 + ax^3 + bx^2 + cx + d = 0 \quad (9)$$

Where,

$$a = \frac{ABC - 2AD + C - CD - 2BC - ABCD}{B - BCD - ABD - D}$$

$$b = \frac{ACD - BCD - ABC - C + B - A - ABD - D}{B - BCD - ABD - D}$$

$$\text{Where, } G = \sqrt[3]{\frac{1}{2} [2f^3 - 9efg + 27e^2h + \sqrt{(2f^3 - 9efg + 27e^2h)^2 - 4(f^2 - 3eg)^3}]}$$

$$H = \sqrt[3]{\frac{1}{2} [2f^3 - 9efg + 27e^2h - \sqrt{(2f^3 - 9efg + 27e^2h)^2 - 4(f^2 - 3eg)^3}]}$$

식 (14)를 통해 λ_1 이 결정되었으므로 식 (10)의 우변과 식 (11)의 좌변($\lambda = \lambda_1$)을 같게 놓으면 식 (15)를 얻을 수 있는데 식 (15)에서 l , m 값은 식 (12)로부터 얻을 수 있다.

$$c = \frac{-2BC - 2AD}{B - BCD - ABD - D}$$

$$d = \frac{ACD - ABC - C - A}{B - BCD - ABD - D}$$

식 (9)로 표현되는 4차방정식의 해를 구하기 위해 Ferrari의 해법[9]을 적용하는데 식 (9)의 양변에 $(lx + m)^2$ 를 더하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$x^4 + ax^3 + (b + l^2)x^2 + (c + 2lm)x + d + m^2 = (lx + m)^2 \quad (10)$$

식 (10)의 왼쪽 항을 다음의 식 (11)과 같은 완전제곱 형태로 표현하고 식 (10)의 좌변과 식 (11)의 우변의 각 항을 비교하면 식 (12)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\left(x^2 + \frac{a}{2}x + \lambda\right)^2 \quad (11)$$

$$= x^4 + ax^3 + \left(\frac{a^2}{4} + 2\lambda\right)x^2 + a\lambda x + \lambda^2$$

$$b + l^2 = \frac{a^2}{4} + 2\lambda, \quad c + 2lm = a\lambda, \quad d + m^2 = \lambda^2 \quad (12)$$

식 (12)로부터 l , m 을 소거하면 식 (13)과 같이 λ 에 대한 3차방정식을 얻을 수 있다.

$$8\lambda^3 - 4b\lambda^2 + (2ac - 8d)\lambda - a^2d + 4bd - c^2 = 0 \quad (13)$$

식 (13)에서 $e = 8$, $f = -4b$, $g = 2ac - 8d$, $h = 4bd - a^2d - c^2$ 라 두면 식 (13)을 만족시키는 실근(λ_1)은 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\lambda_1 = -\frac{1}{3e}(f + G + H) \quad (14)$$

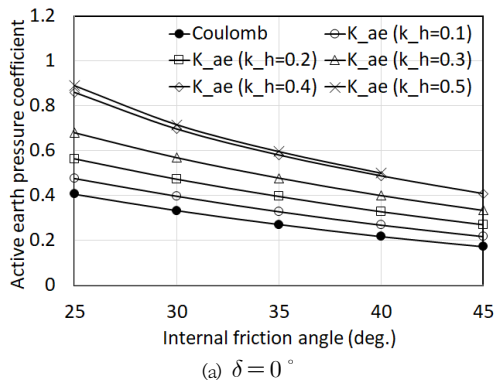
$$x^2 + \frac{a}{2}x + \lambda_1 = \pm (lx + m) \quad (15)$$

본 연구를 통한 계산결과에 따르면 식 (15)에서 우변의 $(lx+m)$ 로 표현되는 2차방정식의 해가 구하고자 하는 해가 된다. 식 (15)를 만족시키는 해를 $x_{ac} = \tan\beta_{ac}$ 라 하면 파괴면의 경사각은 $\beta_{ac} = \tan^{-1}x_{ac}$ 로 구할 수 있다. β_{ac} 를 식 (6)에 대입하면 지진시의 주동토압계수(K_{ae})를 얻을 수 있으며 지진시의 주동토압력(P_{ae})은 식 (16)과 같이 표현된다.

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\phi - \theta - \eta)}{\cos^2\theta \cos\eta \cos(\delta + \theta + \eta) \left\{ 1 + \left[\frac{\sin(\delta + \phi) \sin(\phi - \alpha - \eta)}{\cos(\delta + \theta + \eta) \cos(\theta - \alpha)} \right]^{1/2} \right\}^2} \quad (17)$$

$$\beta_{ac} = \phi + \arctan \frac{-k_h C^* + A^* B^* - \sqrt{(1 + k_h C^*)(A^* - k_h)(1 + A^* B^*)(B^* - C^*)}}{C^* + A^* B^* C^* - B^* - k_h B^* C^*} \quad (18)$$

Mononobe-Okabe 주동토압계수식으로부터 $\phi - \alpha - \eta \geq 0$ 의 조건이 만족되어야 한다[14]. 본 연구에서 유도한 지진시의 주동토압계수와 파괴면의 경사각을 Mononobe-Okabe에 의해 유도된 지진시의 주동토압계수 및 파괴면의 경사각과 비교해 보기 위해 $\alpha = \theta = k_v = 0$ 인 경우에 대하여 내부마찰각(ϕ)이 $25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$ 그리고 45° 일 때 벽마찰각(δ)이 $0^\circ, \phi/2$ 그리고 $2\phi/3$ 이고 k_h 가 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 그리고 0.5인 경우를 고려하여 계산을 해 보았는데 동일한 값을 보임을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 얻어진 지진시의 주동토압계수를 Coulomb 주동토압계수(K_{ac})와 비교해 보았는데 비교결과를 나타내면 Fig. 2와 같다.



$$P_{ae} = \frac{1}{2} \gamma H^2 (1 - k_v) K_{ae} \quad (16)$$

지진시의 주동토압계수는 Mononobe-Okabe [10,11]에 의해 유도된 바 있는데 식 (17)과 같이 표현된다 [12,13]. 식 (17)를 만족시키는 β_{ac} 값인 β_{ac} 는 식 (18)과 같다. 식 (18)에서 $A^* = \tan(\phi - \alpha)$, $B^* = \tan(\phi + \theta)$, $C^* = \tan(\theta - \delta)$ 이다.

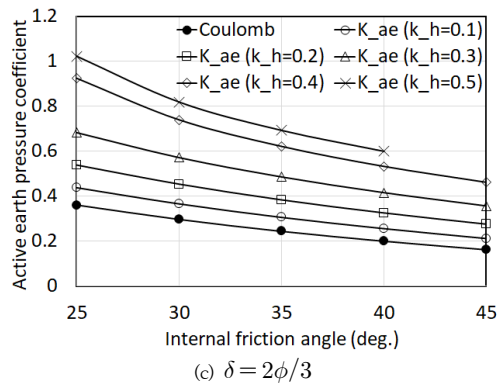
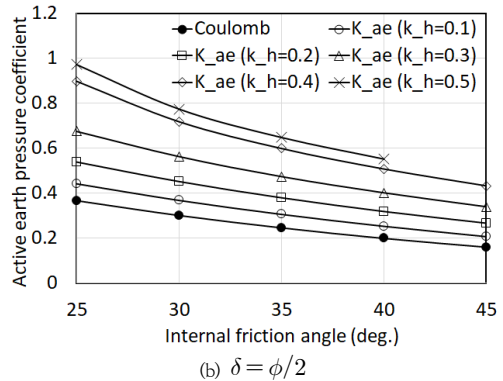


Fig. 2. Comparison of K_{ae} with K_{ac}

Fig. 2를 통해 알 수 있듯이 주동토압계수는 내부마찰각이 증가할수록 감소함을 알 수 있으며 k_h 값에 관계없

이 지진시의 주동토압계수가 Coulomb 주동토압계수보다 큼을 알 수 있다. Fig. 2에서 k_h 가 0.5 이고 ϕ 가 45° 인 경우는 식 (28)의 G 와 H 를 나타내는 표현에서 제곱근안의 값이 음수가 되어 평형상태가 성립되지 않는다. 이는 $\phi - \alpha - \eta \geq 0$ 조건을 만족하지 못하는 경우와 동일한 결과를 보인다.

4. 지진의 고려여부에 따른 옹벽의 안정성

옹벽에 대한 활동, 전도에 대해 지진을 고려한 경우와 고려하지 않는 경우 중 옹벽조건과 지반조건에 따라 어떤 경우가 설계를 지배하는지 알아보고자 하였다. 지진을 고려하지 않는 경우 옹벽의 활동과 전도에 대한 기준안전율은 각각 1.5 및 2.0 이며 지진을 고려하는 경우 옹벽의 활동과 전도에 대한 기준안전율은 각각 1.2 및 1.5 이다[15]. 안전율의 비교를 위해 높이가 H 이고 $\theta = \alpha = 0^\circ$ 인 옹벽을 고려한다. 이 옹벽에 대하여 지진을 고려하지 않은 경우의 활동에 대한 기준안전율에 대하여 지진을 고려한 기준안전율의 비는 $1.2/1.5=0.8$ 로 계산된다. 한편, 지진을 고려하지 않은 경우의 활동에 대한 안전율($(F_s)_{sliding, static}$)과 지진을 고려한 경우의 안전율($(F_s)_{sliding, seismic}$)은 각각 식 (19) 및 (20)과 같은데 R_s 는 활동에 대한 저항력을 의미한다.

$$(F_s)_{sliding, static} = \frac{R_s}{\frac{1}{2}\gamma H^2 K_{ac} \cos \delta} \quad (19)$$

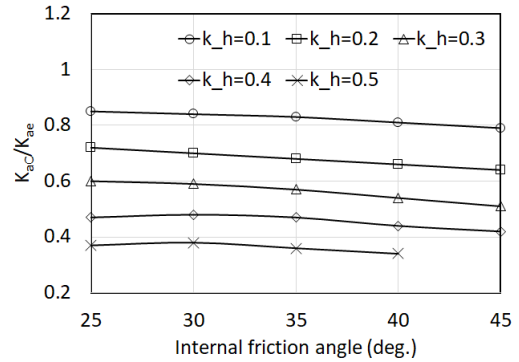
$$(F_s)_{sliding, seismic} = \frac{R_s}{\frac{1}{2}\gamma H^2 K_{ae} \cos \delta} \quad (20)$$

식 (19) 및 (20)으로부터 지진을 고려하지 않은 경우의 활동에 대한 안전율에 대하여 지진을 고려한 경우의 활동에 대한 안전율의 비를 나타내면 식 (21)과 같이 표현된다.

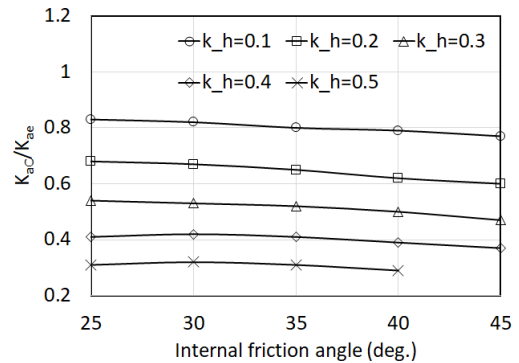
$$\frac{(F_s)_{sliding, seismic}}{(F_s)_{sliding, static}} = \frac{K_{ac}}{K_{ae}} \quad (21)$$

식 (21)의 K_{ac}/K_{ae} 의 값이 0.8보다 작은 경우 지진시의 안전율이 충분하지 않다는 의미이므로 지진을 고려한

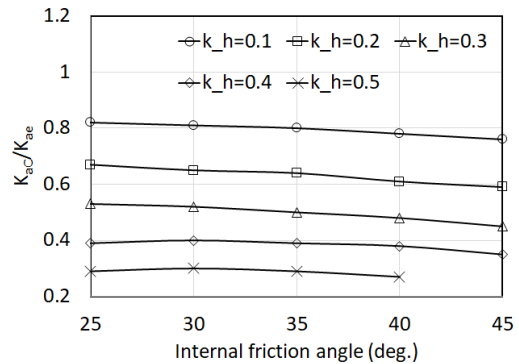
경우의 활동에 대한 검토가 설계를 지배한다고 볼 수 있다. 이때의 기본 전제는 지진을 고려하지 않은 경우의 안전율이 기준안전율을 만족한다는 점이 된다. 벽마찰각(δ)이 0° , $\phi/2$, $2\phi/3$ 인 경우에 대하여 내부마찰각에 따른 K_{ac}/K_{ae} 를 나타내면 Fig. 3과 같다.



(a) $\delta = 0^\circ$



(b) $\delta = \phi/2$



(c) $\delta = 2\phi/3$

Fig. 3. Values of K_{ac}/K_{ae} vs. internal friction angle

Fig. 3을 통해 볼 때 설계지진계수(k_h)가 증가할수록 K_{ac}/K_{ae} 값은 감소함을 알 수 있는데 k_h 가 0.1일 때의 K_{ac}/K_{ae} 값에 대하여 k_h 가 0.5일 때의 K_{ac}/K_{ae} 값은 0.35배~0.45배의 값을 보인다. 일정한 k_h 에 대하여 내부마찰각에 대한 K_{ac}/K_{ae} 값은 크게 변화되지 않았는데 K_{ac}/K_{ae} 의 최소값에 대한 최대값은 1.17배를 넘지 않았다. 지진을 고려하지 않은 경우의 기준안전율에 대하여 지진을 고려한 경우의 기준안전율의 비의 하한값을 0.8로 볼 때 Fig. 3을 통해서 내부마찰각에 상관없이 $k_h = 0.1$ 인 경우만 K_{ac}/K_{ae} 값이 0.8에 가까운 값을 보이는 경우를 제외하고 나머지 경우에는 0.8 보다 작은 값을 보이므로 지진을 고려한 경우가 설계를 지배한다고 볼 수 있다. Seed and Whitman[16]은 지진시의 주동토압력의 작용위치를 결정하는 간단한 방법을 제안한 바 있는데 다음과 같다.

가) Coulomb의 주동토압력(P_{ac})을 식 (22)와 같이 계산한다.

$$P_{ac} = \frac{1}{2} K_{ac} \gamma H^2 \quad (22)$$

나) 식 (16)과 같이 P_{ae} 를 계산한다.

다) $\Delta P_{ae} = P_{ae} - P_{ac}$ 를 계산한다.

라) P_{ac} 는 벽체바닥으로부터 $H/3$ 높이에 작용하며 ΔP_{ae} 는 벽체바닥으로부터 $0.6H$ 높이에 작용하는 것으로 간주한다. 따라서 P_{ae} 의 벽체바닥으로부터의 작용위치($\bar{z}$)는 식 (23)과 같이 계산된다.

$$\bar{z} = \frac{P_{ac}(H/3) + \Delta P_{ae}(0.6H)}{P_{ae}} \quad (23)$$

P_{ae} 는 벽체배면의 법선과 δ 의 각도를 이루게 된다. 지진을 고려하지 않은 경우의 전도에 대한 기준안전율에 대하여 지진을 고려한 기준안전율의 비는 $1.5/2.0=0.75$ 로 계산된다. 지진을 고려하지 않은 경우의 전도에 대한 안전율($(F_s)_{overturning,static}$)과 지진을 고려한 경우의 안전율($(F_s)_{overturning,seismic}$)은 각각 식 (24) 및 (25)와 같은데 R_0 는 전도에 대한 저항력을 의미한다. 식 (25)에서 $\bar{z}$ 는 식 (23)과 같다.

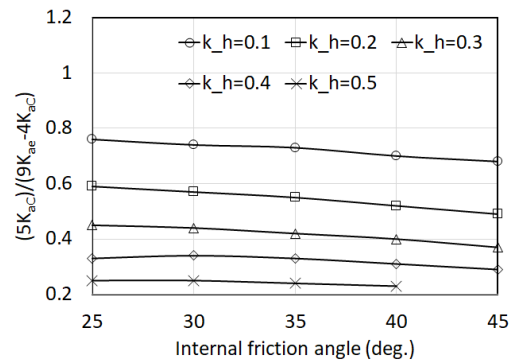
$$(F_s)_{overturning,static} = \frac{R_0}{\frac{1}{2} \gamma H^2 K_{ac} \cos \delta \times \left(\frac{H}{3}\right)} \quad (24)$$

$$(F_s)_{overturning,seismic} = \frac{R_0}{\frac{1}{2} \gamma H^2 K_{ae} \cos \delta \times (\bar{z})} \quad (25)$$

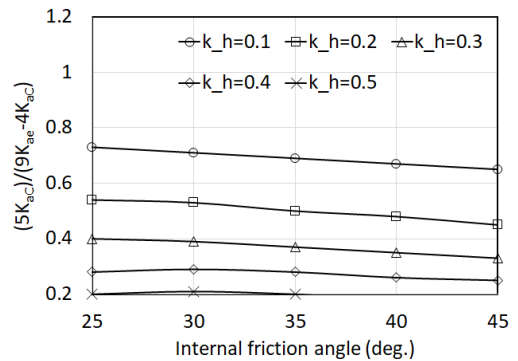
따라서 지진을 고려하지 않은 경우의 전도에 대한 안전율에 대하여 지진을 고려한 경우의 안전율의 비를 나타내면 식 (26)과 같다.

$$\frac{(F_s)_{overturning,seismic}}{(F_s)_{overturning,static}} = \frac{HK_{ac}}{3K_{ae}\bar{z}} = \frac{5K_{ac}}{9K_{ae} - 4K_{ac}} \quad (26)$$

벽마찰각(δ)이 0° , $\phi/2$, $2\phi/3$ 인 경우에 대하여 내부마찰각에 따른 $5K_{ac}/(9K_{ae} - 4K_{ac})$ 를 나타내면 Fig. 4와 같다.



(a) $\delta = 0^\circ$



(b) $\delta = \phi/2$

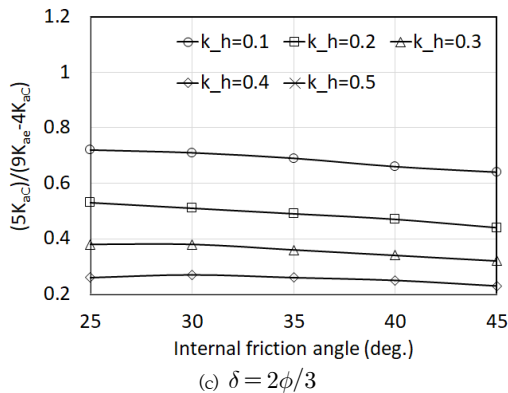


Fig. 4. Values of $5K_{ac}/(9K_{ae}-4K_{ac})$ vs. internal friction angle

Fig. 4를 통해 볼 때 설계지진계수(k_h)가 증가할수록 $5K_{ac}/(9K_{ae}-4K_{ac})$ 값은 감소함을 알 수 있는데 k_h 가 0.1일 때의 $5K_{ac}/(9K_{ae}-4K_{ac})$ 값에 대하여 k_h 가 0.5일 때의 $5K_{ac}/(9K_{ae}-4K_{ac})$ 값은 0.27배~0.34배의 값을 보인다. 일정한 k_h 에 대하여 내부마찰각에 대한 $5K_{ac}/(9K_{ae}-4K_{ac})$ 값은 크게 변화되지 않았는데 $5K_{ac}/(9K_{ae}-4K_{ac})$ 의 최소값에 대한 최대값은 1.2배를 넘지 않았다. 지진을 고려하지 않은 경우의 기준안전율에 대하여 지진을 고려한 경우의 기준안전율의 비의 하한값을 0.75로 볼 때 Fig. 4를 통해서 $\delta=0^\circ$ 이고 내부마찰각이 25° 이며 $k_h=0.1$ 인 경우를 제외하고 모든 경우의 안전율비의 값이 0.75보다 커서 지진을 고려한 경우가 설계를 지배한다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 지진시의 주동토압계수를 구하기 위해 4차방정식을 유도하였는데 방정식의 해를 통해 지진시의 주동파괴면의 경사각과 주동토압계수를 얻을 수 있었다.
- 2) 본 연구에서 유도한 지진시의 주동토압계수와 파괴면의 경사각을 Mononobe-Okabe에 의해 유도된 지진시의 주동토압계수 및 파괴면의 경사각과 비교해 보았는데 일치함을 알 수 있었다.
- 3) 지진시의 주동토압계수 또한 지진이 없는 경우의

주동토압계수와 마찬가지로 내부마찰각이 증가할수록 감소함을 알 수 있었으며 본 연구에서 고려한 설계수평지진계수(k_h)값에 관계없이 지진시의 주동토압계수가 Coulomb 주동토압계수보다 큼을 알 수 있었다.

- 4) 옹벽배면이 연직이고 배면지반의 지표면이 수평인 간단한 옹벽에 대하여 지진을 고려하지 않은 경우의 안전계수에 대하여 지진을 고려한 경우의 안전계수의 비를 비교해 보았다. 옹벽의 활동과 관련하여 지진을 고려하지 않은 경우의 기준안전계수에 대하여 지진을 고려한 경우의 기준안전계수의 비보다 계산을 통해 얻어진 안전계수의 비가 작아서 본 연구에서 고려한 거의 모든 경우에 대하여 지진을 고려한 활동검토가 설계에 지배적임을 알 수 있었다. 이러한 결론은 옹벽의 전도검토에 있어서도 동일함을 알 수 있었다.
- 5) 본 연구로부터 유도된, 지진 고려 유무에 따른 옹벽의 안정성과 관련하여 지진 유무에 따른 기준안전율의 상대적 차이와 설계 연직가속도비의 고려 여부에 따라 절대적으로 지진시의 옹벽 안정성 검토가 설계를 지배하는 것으로 볼 수 없음을 유의해야 한다.

References

- [1] Regulatory Guide on Building Code. Ministry of Construction and Transport, 1988.
- [2] R. G. Mikola and N. Sitar, Seismic earth pressure on retaining structures in cohesionless soils, Report submitted to the California Department of Transportation (Caltrans), 2013.
- [3] Ausilio E, Conte E, Dente G, "Seismic stability analysis of reinforced slopes". International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 19, pp. 159-172, 2000.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00005-1)
- [4] Bonaparte R, Schemertmann G, Williams N. D., "Seismic design of slopes reinforced with geogrids and geotextiles". *Third international conference on geotextiles*, Vienna, pp. 273-278, 1986.
- [5] Chen H. T., Hung W. Y., Chang C. C., Chen Y. J., Lee C. J., "Centrifuge modeling test of a geotextile-reinforced wall with a very wet clayey backfill". *Journal of Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 25, pp. 346-359, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2007.01.003>

- [6] Choudhury, D. and Nimbalkar, S., "Pseudo-dynamic approach of seismic active earth pressure behind retaining wall", *Journal of Geotechnical and Geological Eng.*, Vol. 24(5), pp. 1103-1113, 2005.
- [7] Das, B. M., *Principle of soil dynamics*, Boston, Massachusette: PWS-KENT Publishing Company, 1993.
- [8] S. B. Jo, J. G. Ha, J. S. Lee, D. S. Kim, "A Discussion on the Improvement of Pseudo-Static Seismic Design Criteria of Retaining Wall in Domestic", *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea* Vol. 19, No. 2, pp. 45-53, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5000/EESK.2015.19.2.045>
- [9] S. NEUMARK, *Solution of cubic and quartic equations*, Pergamon Press Ltd. Published by Elsevier Ltd. pp. 1-4, 1965.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-011220-6.50004-4>
- [10] Mononobe, N. and Matsuo, H., *On the Determination of Earth Pressure during Earthquakes. Proceedings of the World Engineering Conference*, 9, 176. 1929.
- [11] Okabe, S., "General Theory of Earth Pressure". *Journal of the Japanese Society of Civil Engineers*, Tokyo, vol. 12, No. 1, 1926.
- [12] Jumikis, Alfred R., *Soil Mechanics*, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1962.
- [13] NCMA, *Design Manual for Segmental Retaining Walls*, 2nd ed., National Concrete Masonry Association, 2002.
- [14] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, Thomson Learning, pp. 483-494, 2006.
- [15] KISTEC, *Design criteria for slopes in construction*, Korea Infrastructure Safety Corporation, 2011.
- [16] H. B. Seed, R. V. Whitman, "Design of earth retaining structures for dynamic loads", *Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures*, ASCE, pp. 103-147, 1970.

이 승 현(Seung-Hyun Lee)

[정회원]



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

〈관심분야〉

토질역학, 기초공학