

## 지진시 주동토압계수에 대한 매개변수 연구

이승현, 김응석\*

선문대학교 건설시스템안전공학과

### Parametric study on seismic active earth pressure coefficient

Seung-Hyun Lee, Eung-Seok Kim\*

Department of Civil Infrastructure Systems and Safety Engineering, Sunmoon University

**요약** 국내에서도 최근 들어 지진이 빈번해짐에 따라 지진에 대한 구조물의 안전성이 점차 중요해지고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 지진시 주동토압계수에 미치는 다양한 인자들에 의한 영향을 살펴보고자 매개변수연구를 수행하고 그 결과를 정적상태일 때의 주동토압계수와 비교하여 어느 경우가 설계를 지배하는지 알아보았다. 또한 간편법에 의한 지진시 주동토압계수 산정법의 적용성을 살펴보고자 간편법 및 Mononobe-Okabe 방법을 통한 지진시 주동토압계수를 비교해 보았다. 매개변수연구에서 고려한 인자들에 대하여 수평지진계수가 0.08 이상인 경우 지진시 주동토압계수가 상시의 Rankine 토압계수보다 컸다. 매개변수연구에서 고려한 인자들 중 벽체 배면의 경사각과 연직지진계수를 제외한 나머지 매개변수들에 대한 Mononobe-Okabe 와 BIS에 규정된 지진시 주동토압계수값은 같게 계산되었다. 간편법에 의한 지진시 주동토압계수의 적용성을 살펴보고자 뒤채움흙의 내부마찰각을  $30^\circ$ ,  $35^\circ$  그리고  $40^\circ$  로 가정하여 간편법에 의한 지진시 주동토압계수를 Mononobe-Okabe에 의한 값과 비교해 보았을 때 수평지진계수가 각각 0.2, 0.3 그리고 0.4 이하인 범위에 대해서는 간편법에 의한 지진시 주동토압계수가 Mononobe-Okabe에 의한 값보다 약간 커서 이들 수평지진계수 범위에 대해서는 간편법에 의한 설계가 보수적임을 알 수 있었다.

**Abstract** Recently, earthquakes are occurring frequently in domestic areas, and the importance of structural safety against earthquakes is increasing. Parametric studies were conducted to determine the effects of various parameters on the seismic active earth pressure coefficient. The static and seismic active earth pressure coefficients were compared to judge which active earth pressure coefficient dominates the design of the retaining wall. In addition, seismic active earth pressure coefficients computed by the simplified method in literature and the Mononobe-Okabe method were compared to investigate the adaptability of the simplified method. The results of the parametric studies showed that seismic active earth pressure coefficients are greater than static Rankine's active earth pressure coefficients when horizontal seismic coefficients are 0.08 or more. The seismic active earth pressure coefficients obtained from the Mononobe-Okabe and BIS were the same for the parameters except for the inner face of the wall angle and the vertical seismic coefficient. Seismic active earth pressure coefficients obtained from the simplified method were slightly greater than those from the Mononobe-Okabe method in the respective ranges of horizontal seismic coefficients of less than 0.2, 0.3, and 0.4, which correspond to the assumed internal friction angle of backfill of  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ , and  $40^\circ$ , respectively. The conservative seismic design of a retaining wall using the simplified method can be considered in those ranges of horizontal seismic coefficients.

**Keywords** : Parametric Study, Seismic Active Earth Pressure Coefficient, Simplified Method, Mononobe-Okabe, Horizontal Seismic Coefficient

\*Corresponding Author : Eung-Seok Kim(Sunmoon Univ.)

email: shlee02@sunmoon.ac.kr

Received August 31, 2022

Accepted November 4, 2022

Revised October 11, 2022

Published November 30, 2022



$$K_{ac} = \frac{(1+k_v)\cos^2(\phi-\lambda-\theta)}{\cos\lambda\cos^2\theta\cos(\delta+\theta+\lambda)} \times \left[ \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sin(\phi+\delta)\sin(\phi-\alpha-\lambda)}{\cos(\theta-\alpha)\cos(\delta+\theta+\lambda)} \right\}^{1/2}} \right]^2 \quad (4)$$

$$\lambda = \tan^{-1}\left(\frac{k_h}{1+k_v}\right) \quad (5)$$

### 2.2 지진시 주동토압계수 간편 산정법

Seed and Whitman[11]은 Eq. (6)과 같이 지진시의 주동토압력( $P_{ac}$ )을 상시의 주동토압력( $P_a$ )과 동적 주동토압력 증분( $\Delta P_{ac}$ )의 합으로 표현할 수 있고 지진시 주동토압계수( $K_{ac}$ ) 역시 Eq. (7)과 같이 상시의 주동토압계수( $K_a$ )와 지진시 주동토압계수 증분( $\Delta K_{ac}$ )의 합으로 표현할 수 있다 하였다. 또한 옹벽의 배면이 연직이고 뒤채움흙의 지표면 경사가 수평인 경우  $\Delta K_{ac}$ 는 실용적으로 Eq. (8)과 같이 적용할 수 있다 하였다.

$$P_{ac} = P_a + \Delta P_{ac} \quad (6)$$

$$K_{ac} = K_a + \Delta K_{ac} \quad (7)$$

$$\Delta K_{ac} \approx (3/4)k_h \quad (8)$$

그들은 또한 Mononobe and Matsuo[12]에 의한 실험결과 고찰을 통해 동적 주동토압력 증분은 옹벽바닥으로부터 옹벽높이의 0.6배 되는 위치에 작용하는 것으로 제안하였다[13].

## 3. 매개변수해석 결과 및 분석

Fig. 1과 Eq. (1)~(5)를 통해 알 수 있듯이 지진시 옹벽의 주동토압계수( $K_{ac}$ )에 영향을 미치는 매개변수는 벽체 배면 경사각( $\theta$ ), 뒤채움흙의 지표면 경사각( $\alpha$ ), 벽마찰각( $\delta$ ), 뒤채움흙의 내부마찰각( $\phi$ ), 수평지진계수( $k_h$ ) 그리고 연직지진계수( $k_v$ )임을 알 수 있다. 매개변수해석은 수평지진계수를 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 그리고 0.5로 가정하고 각각의 수평지진계수에 대하여 나머지 매개변수를 달리하여 지진시 주동토압계수에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 지진시 주동토압의 작용방향은 벽마찰각과 벽체 배면 경사각에 영향을 받으므로 주동토압의 수평성분에 대응하는 토압계수( $K_{ah}$ )를 비교하였는데

Mononobe-Okabe에 의한 토압계수와 관련해서는 Fig. 1과 Eq. (1)을 참조하여 Eq. (9)와 같이 지진시 주동토압계수의 수평성분이 표현된다. BIS에 의한 토압계수의 경우에는 Eq. (3)을 참조하여 Eq. (10)과 같이 지진시 주동토압계수의 수평성분이 표현된다.

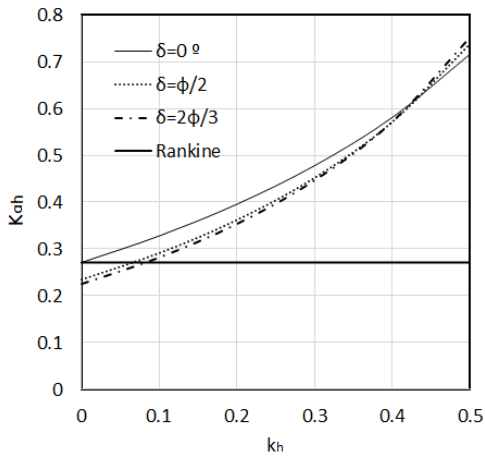
$$K_{ah} = (1-k_v)K_{ac}\cos(\delta+\theta) \quad (9)$$

$$K_{ah} = K_{ac}\cos(\delta+\theta) \quad (10)$$

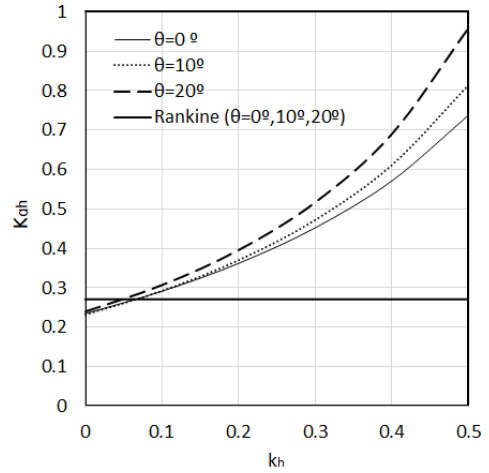
상시 및 지진시의 토압계수 비교를 위해 상시의 경우 Rankine 토압계수의 수평성분[14]을 계산하였는데 Rankine 토압계수를 적용한 이유는 옹벽설계시 일반적으로 Rankine 토압을 적용하는 경우가 다수이기 때문이다. Table 1에는 매개변수연구를 위한 일반조건(basic condition)과 변경조건(changing condition)을 나타내었다. 매개변수연구를 통해 각각의 매개변수가 지진시 주동토압계수에 미치는 영향을 얻은 결과는 Fig. 2와 같은데 매개변수 해석에서 고려한 매개변수들 중에서 벽체 배면 경사각과 연직지진계수를 제외한 나머지 매개변수들에 대해서는 M-O와 BIS의 지진시 주동토압계수가 같게 계산되었음에 유의할 필요가 있다.

Table 1. Parametric study scheme

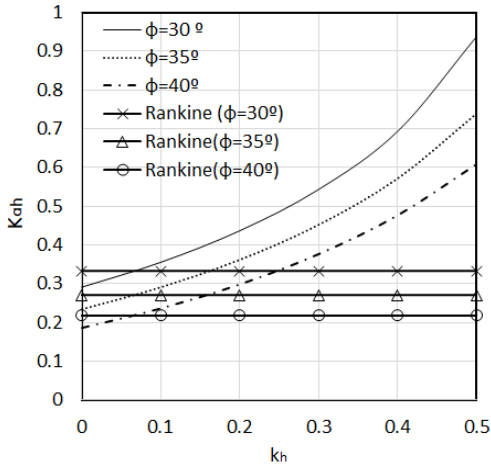
Parameter	Basic condition	Changing condition
$\delta$	$\alpha = \theta = k_v = 0$ $\phi = 35^\circ$	$0^\circ, \phi/2$ $2\phi/3$
$\phi$	$\alpha = \theta = k_v = 0$ $\delta = \phi/2$	$30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$
$\alpha$	$\theta = k_v = 0^\circ$ $\phi = 35^\circ$ $\delta = \phi/2$	$0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$
$\theta$	$\alpha = k_v = 0^\circ$ $\phi = 35^\circ$ $\delta = \phi/2$	$0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$
$k_v$	$\alpha = \theta = 0$ $\phi = 35^\circ$ $\delta = \phi/2$	$0, 2k_h/3$



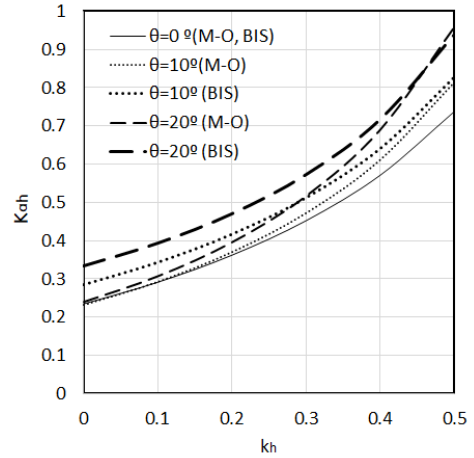
(a) Effect of wall friction angle



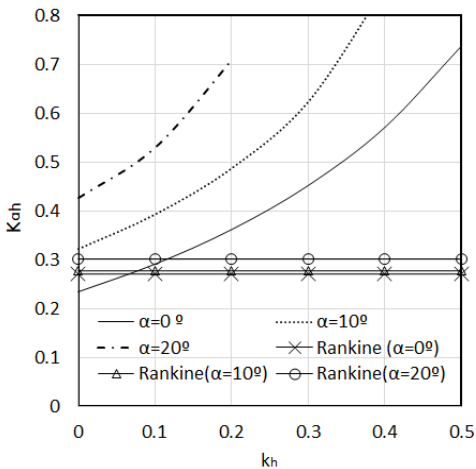
(d) Effect of inner face of wall angle (M-O)



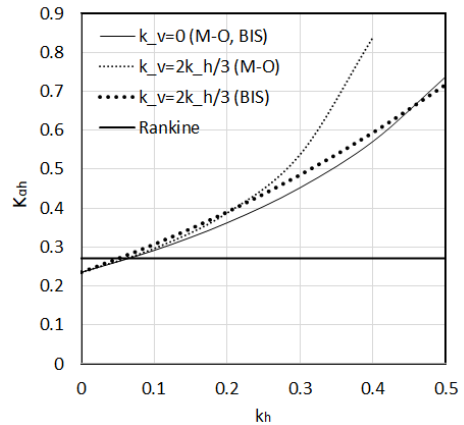
(b) Effect of internal friction angle of backfill



(e) Effect of inner face of wall angle (M-O vs BIS)



(c) Effect of slope angle of backfill



(f) Effect of vertical seismic coefficient

Fig. 2. Influence of parameters on  $K_{ah}$

Fig. 2(a)는 수평지진계수가 대략 0.42 이상인 범위에 대해서는 벽마찰각이 클수록 상대적으로 토압계수도 크게 되는 결과를 보여주고 있다. 상시의 Rankine 토압계수와와의 비교를 통해 벽마찰각이 0° 인 경우는 수평지진계수의 크기에 상관없이 지진시의 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 크을 알 수 있고 벽마찰각의 크기가 뒤채움흙의 내부마찰각의 1/2배 와 2/3배인 경우에 대해서는 수평지진계수가 대략 0.08 이상인 경우 지진시의 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 크을 알 수 있다. Fig. 2(b)를 통해서 는 뒤채움흙의 내부마찰각과 무관하게 대략 수평지진계수가 0.06 이상인 경우 지진시 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 크을 알 수 있다. Fig. 2(c)를 통해서 는 뒤채움흙의 지표면 경사각이 0° 인 경우 수평지진계수가 대략 0.06 이상인 범위에 대해서 지진시 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 크을 알 수 있으며 뒤채움흙의 지표면 경사각이 10° 및 20° 인 경우에는 수평지진계수에 상관없이 지진시 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 크을 알 수 있다. Fig. 2(d)를 통해서 는 벽체 배면 경사각의 크기에 상관없이 수평지진계수가 대략 0.06 이상인 경우 지진시 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 크을 알 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 매개변수 해석에서 고려한 매개변수들 중에서 벽체 배면 경사각과 연직지진계수를 제외한 나머지 매개변수들에 대해서는 M-O와 BIS의 지진시 주동토압계수가 같게 계산되었다. Fig. 2(e)는 벽체 배면 경사각에 따라 M-O와 BIS에 의한 지진시 주동토압계수가 다름을 보여 주고 있는데 두 값의 차이는 수평지진계수가 증가할수록 줄어들을 알 수 있다. Fig. 2(f)를 통해 연직지진계수가 커질수록 지진시 주동토압계수도 커지는 경향을 보여준다. 또한 수평지진계수가 대략 0.06 이상인 경우 연직지진계수의 크기에 상관없이 지진시 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 크을 알 수 있다. M-O 방법 및 간편법에 의한 지진시 주동토압계수를 비교해보기 위해 뒤채움 흙의 내부마찰각을 30°, 35° 그리고 40° 로 달리하여 수평지진계수에 따른 지진시 주동토압계수를 구해 보았는데 Fig. 3과 같다. Fig. 3의 결과는 벽체의 배면 경사각과 뒤채움흙의 지표면 경사각을 0° 로 보고 연직지진 계수와 벽마찰각을 각각 0 및 내부마찰각의 1/2로 가정 하여 얻은 것이다.

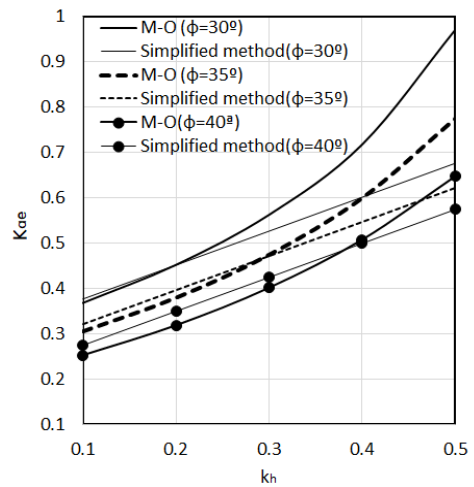


Fig. 3. Comparison of  $K_{ae}$  between M-O and simplified method

Fig. 3을 통해 뒤채움흙의 내부마찰각이 30° 인 경우 수평지진계수가 0.2 이하 범위에서는 두 방법에 의한 토압계수값이 거의 비슷하며 M-O 방법에 의한 토압계수가 간편법에 의한 토압계수보다 작음을 알 수 있다. 수평지진계수가 0.2 이상에서는 두 방법에 의한 값 사이의 차이도 커지며 M-O방법에 의한 토압계수가 간편법에 의한 토압계수보다 크을 알 수 있다. 뒤채움흙의 내부마찰 각이 35° 인 경우에는 수평지진계수 0.3을 기준으로 그 이하의 범위에서는 두 방법에 의한 토압계수값 사이에 큰 차이가 없으며 M-O 방법에 의한 토압계수가 간편법에 의한 토압계수보다 작음을 알 수 있다. 수평지진계수가 0.3 이상에서는 두 방법에 의한 값 사이의 차이가 커지며 M-O방법에 의한 토압계수가 간편법에 의한 토압 계수보다 크게 된다. 뒤채움흙의 내부마찰각이 40° 인 경우에는 수평지진계수값 0.4를 기준으로 그 이하의 범 위에서는 M-O방법에 의한 토압계수가 간편법에 의한 토압계수보다 작으며 그 차이는 M-O방법에 의한 값에 비해 최대 약 10% 차이를 보인다. 수평지진계수가 0.4 이상에서는 두 방법에 의한 토압계수의 차이가 커짐을 알 수 있다. 따라서 뒤채움흙의 내부마찰각이 30°, 35° 그리고 40° 의 경우에 대해 수평지진계수가 각각 0.2, 0.3 그리고 0.4 이하인 범위에 대해서는 간편법에 의한 지진시 주동토압계수를 적용하는 것이 보수적임을 알 수 있다.

## 4 결론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 매개변수연구결과에 따르면 벽마찰각이  $0^\circ$  인 경우 수평지진계수의 크기에 상관없이 지진시의 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 컸으며 벽마찰각의 크기가 뒤채움흙의 내부마찰각의 1/2배 와 2/3배인 경우 수평지진계수가 대략 0.08 이상인 경우 지진시의 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 큼을 알 수 있었다.
- 2) 매개변수로 고려한 뒤채움흙의 내부마찰각과 지표면 경사각, 벽체 배면 경사각 그리고 연직지진계수에 대해서 수평지진계수가 대략 0.06 이상인 경우 지진시 주동토압계수가 상시의 토압계수보다 큼을 알 수 있었다.
- 3) 매개변수연구에서 고려한 인자들 중 벽체 배면의 경사각과 연직지진계수를 제외한 나머지 매개변수들에 대한 Mononobe-Okabe 와 BIS에 의한 지진시 주동토압계수값은 같게 계산되었다.
- 4) 뒤채움흙의 내부마찰각을  $30^\circ$ ,  $35^\circ$  그리고  $40^\circ$  로 가정하여 얻은 간편법에 의한 지진시 주동토압계수를 Mononobe-Okabe에 의한 값과 비교해 보았을 때 수평지진계수가 각각 0.2, 0.3 그리고 0.4 이하인 범위에 대해서는 간편법에 의한 지진시 주동토압계수를 적용하는 것이 보수적임을 알 수 있었다. 연구에서 고려한 세 가지의 뒤채움흙의 내부마찰각에 대하여 수평지진계수가 0.2 이하인 범위에 대해서 간편법에 의한 지진시 주동토압계수가 Mononobe-Okabe 주동토압계수에 비해 최대 10% 큰 값을 보인다는 점과 설계시 적용되는 수평지진계수가 0.2보다 작다는 점을 고려해 볼 때 실용적으로 간편법의 적용이 가능할 것으로 생각된다.

## References

- [1] 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)
- [2] 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.
- [3] 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>
- [4] 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-005-1134-x>
- [5] Das, B. M., Principle of soil dynamics, Boston, Massachusetts: PWS-KENT Publishing Company, 1993.
- [6] Okabe, S., "General Theory of Earth Pressure". *Journal of the Japanese Society of Civil Engineers*, Tokyo, Vol. 12, No. 1, 1926.
- [7] BIS, IS:1893-1984, Criteria for earthquake resistant design of structure, fourth revision, pp.46-47, 1986.
- [8] Jumikis, Alfred R., Soil Mechanics, D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1962.
- [9] NCMA, Design Manual for Segmental Retaining Walls, 2nd ed., National Concrete Masonry Association, 2002.
- [10] B. M. Das, Principles of Geotechnical Engineering, Thomson Learning, pp.483-494, 2006.
- [11] Seed, H.B. and Whitman, R.V., "Design of Earth Retaining Structures for Dynamic Loads". *ASCE Specialty Conference, Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth Retaining Structures*. Cornell University, Ithaca, NY., pp.103-147, 1970.
- [12] Mononobe, N. and Matsuo, H., On the Determination of Earth Pressure during Earthquakes. *Proceedings of the World Engineering Conference*, Vol 9, pp.176, 1929.
- [13] Mikola, R.G, and Sitar, N., Seismic earth pressures on retaining structures in cohesionless soils, California Department of Transportation, pp.5-9, 2013.
- [14] Chu, S.C., "Rankine's analysis of active and passive pressures in dry sands", *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 4, pp.115-120, 1991.  
DOI: <https://doi.org/10.3208/sandf1972.31.4.115>

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

---

김 응 석(Eung-Seok Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (수공학박사)
- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 고려대학교 부설 방재과학연구센터 선임연구원

- 2004년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 건설시스템안전공학과 교수

〈관심분야〉

수자원시스템, 상하수도 관망시스템