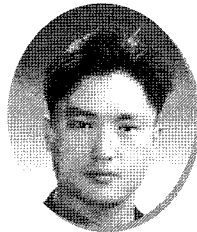


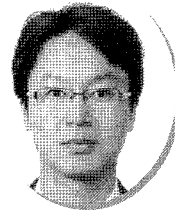
점착력, 벽면부착력, 외력, 지진력 등을 고려할 수 있는 새로운 주동토압 일반식 소개



남 현우
서명엔지니어링 지반터널설계실
실장/전무
(hwnam@seoyeong.co.kr)



김 정 관
롯데건설 기술연구원 과장
(kwan@lottenc.com)



이 정 훈
쌍용건설 토목기술부 대리
(hanlijh@ssyenc.com)

개요

일반적으로 광범위하게 사용되고 있는 Coulomb, Rankine, Bell의 주동토압은 뒷채움재의 물성과 옹벽 및 배면 지표 기하 형상을 고려하는데 한계가 있으며, 잘 알려지지 않은 Chen의 주동토압공식도 배면 선하중이나 벽면부착력(adhesion : 옹벽 체와 토사간의 부착력)을 고려할 수는 없다. 지진과 같은 동적 영향을 고려하기 위해 많이 사용되는 Mononobe-Okabe 토압 공식(이하 M-O 공식)은 Coulomb 토압으로부터 발전되어 동일한 한계를 지니고 있다.

본 원고에서는 최근 “Geotechnique의 Technical Note”에 채택된 김원철 박사의 개선된 주동토압공식의 기술적 요소에 대해 소개하고자 한다. 이 제안식(이하 김원철 주동토압 제안식)은 힘평형원리(the force equilibrium principle)에 근거하여 배면 지표 경사, 내측 옹벽면 경사, 벽마찰각, 선하중, 등분포하중, 점착력 및 벽면부착력, 지진 등의 영향을 종합적으로 고려할 수 있으므로, 옹벽과 관련된 거의 모든 영향 요소를 고려할 수 있어 정확도 높고, 경제적인 설계가 가능한 방법이다.

김원철 주동토압 제안식의 정확성을 증명하기 위해, 그래프를 이용한 도식적 방법 및 Coulomb, Rankine, Bell, Chen 및 Mononobe-Okabe 주동토압과 비교하였으며, 결과적으로 거의 일치하는 것으로 나타났다. 단, 기존 5개의 제안식들은 적용 상 한계로 인해 특정 조건에 대해서만 비교가 가능했으며, 기존 제안식에서 고려할 수 없는 매개변수들은 값을 변화시키면서 기존 결과와의 차이를 확인하였다. 또한, 김원철 주동토압 제안식은 Fang 등의 실험적 연구결과와도 부합되었다. 본 주동토압 일반식으로 기존 주동토압공식의 한계를 충분히 극복할 수 있으며, 이론적으로나 실질적으로 매우 우수하고 유용한 제안식이라는 결론을 얻었다.

1. 서론

벽마찰각의 영향을 포함한 Coulomb 제안 주동토압 공식(Coulomb, 1776)은 선형 파괴면을 가정하여 합평형조건을 적용하였으며, 최대 주동토압을 구하기 위해 파괴면에 대한 시행착오법을 시도하여 임계상태 파괴면을 선택할 수 있다. Coulomb 주동토압은 토사중량에 의한 토압만을 산출할 수 있으나, 실무적 문제에서는 선하중, 등분포하중과 같은 외력 등에 의한 영향을 받는다. 외력이 작용하는 경우에는 Culmann의 도해법(1875)을 적용하여 해답을 구할 수 있으나 여러번의 작도 작업이 필요하므로 많은 시간을 요하게 된다. 도해적 주동토압 추정 방법은 복잡하고 번거로우며 부정확하여 엔지니어의 숙련도나 능력에 많이 좌우된다.

흙의 전단강도는 점착력과 내부마찰각의 2가지 인자로 구성되며, 토립자의 파괴, 입자 회전에 의한 파괴, 기타 여러 요인들이 이 2가지 인자에 내제되어 있다(Bowles, 1997). Coulomb 주동토압공식에서는 점착력을 고려할 수 없었기 때문에 실제 주동토압은 과대평가된다.

소성평형 상태의 흙에 대한 토압결정방법인 Rankine 토압(1875)도 벽마찰각과 점착력이 0이라는 가정을 제외한 나머지 가정사항은 Coulomb 토압공식과 동일하다(Bowles, 1997). 그러나, Sherif 등(1982)에 의하면 벽마찰각은 주동토압 결정시 매우 중요한 인자중 하나이다. 초기 Rankine 주동토압의 또다른 한계는 내측 옹벽면 경사가 수직이어야 하며, 배면 지표 경사각은 흙의 내부마찰각 보다 작아야만 사용가능하다는 점이다.

Bell(1915)은 최초로 흙의 점착력을 고려할 수 있는 주동토압을 제안하였으나, 배면측 지표면이 수평일 때에만 적용할 수 있다. 실질적으로, 옹벽은 배면측 지표면이 경사지거나 내측 벽면이 기울어져 있으며 점착력이 있는 토사로 뒷채움될 수 있다. 이러한 경우에는 Terzaghi의 도해적 접근법(1943)이 유용하게 사용될 수 있으나, 상기 도해법과 마찬가지로 여러번의 시행착오법을 시행하여 Mohr 원으로부터 측면토압을 결정하는 번거로움이 있다. 이러한 불편함을 해소하기 위해, Mazindrani와 Ganjali(1997)는 배면측 지표면이 경사지고, 점착성 흙으로 뒷채움될 경우의 주동토압 산출방법을 개발하였는데, Mazindrani의 주동토압공식은 Rankine 이론에 기초하였기 때문에 Rankine 토압과 동일한 한계를 갖고 있다. 즉, 벽마찰각 = 0, 옹벽 내측 벽면이 수직이어야 한다. 또한, 배면측 경사 지표면에 외력이 작용하는 경우에는 Rankine 및 Mazindrani 토압으로 주동토압을 결정할 수 없다.

Chen(1975)은 한계해석에 근거한 측면토압을 결정하는 the closed form 공식(근사값이 아닌 방정식으로 나타내어 해를 구할 수 있는 공식)을 유도하였다. 반복 루틴에 의한 컴퓨터 프로그램으로부터 해답을 구할 수 있으며, 이 반복 루틴은 특별히 어렵지는 않다(Bowles, 1997). 이 공식을 유도하기 위해 Chen은 증첩이론을 채택했으며, 점착력, 배면 지표 경사, 등분포하중, 벽마찰각을 고려할 수는 있으나, 선하중이나 벽면부착력을 고려하지 못한다.

Terzaghi(1932), Schofield(1961), Mackey와 Kirk(1967), Matteotti(1970), Bros(1972), Sherif와 Mackey(1977), Sherif 등(1982), Duncan 등(1991) 및 그 외 연구자들이 토압과 관련된 중요하고 가치있는 연구를 하였으며, 대부분의 연구는 배면측 지표면이 수평인 경우에 대해 수행되었다. Fang 등(1997)은 실험적 연구를 통해 경사진 지표면에서의 건조한 모래의 측면토압을 연구하였으며, 그 실험적 자료를 바탕으로 다양한 배면 지표 경사각에 대한 주동 및 수동토압이 Coulomb과 Terzaghi 해에 의해 결정된 값과 매우 일치하는 반면, 배면 지표 경사각이 20° 이하인 경우 Rankine 해는 주동토압을 과대평가하는 경향을 보인다는 것을 알게 되었다. 최종적으로 Fang 등은 배면측 지표면이 기울어진 강성벽체에 대해서는 Rankine 이론으로 주동 또는 수동토압을 결정하는데 적합하지 않을 수도 있다는 결론을 내렸다. 불행히도, 배면측 지표면이 기울어져 있고, 옹벽 내측 벽면도 기울어져 있으며, 뒷채움재가 점착력을 갖는 흙인 경우 지반공학자가 옹벽을 설계해야 한다면, 기존방식으로는 주동토압을 산출하는데 문제가 있다.

지진에 대한 옹벽 구조체의 안전성을 정확히 측정할 수 있어야 하나, 지반과 옹벽 구조체 상호간의 동적응답 거동은 매우 복

합하다(Kramer, 1996). 고려할 수 있는 요소로는 동적 흙-구조물 상호작용, 지진에 의한 토압 및 간극수압의 순간적·공간적 변화, 벽체 거동 형태에 관한 동적 토압의 분포 및 지진규모 의존성 등이다(Kramer, 1996). 이러한 난해하고 복잡한 거동 특성으로 인해, 의사정적하중으로 순간적인 지반거동을 단순화하여 사용하고 있다(Okabe, 1926; Mononobe & Matsuo, 1929; Wood, 1973; Sherif et al., 1982; Steedman & Zeng, 1990).

M-O 방법(Okabe, 1926; Mononobe & Matsuo, 1929)은 단순하기 때문에 항복중인 옹벽에 대한 지진영향을 평가하기 위해 가장 폭넓게 사용되는 방법이다. M-O 방법은 Coulomb의 고전적인 토압이론(1776)으로부터 유도되었으나, 추가적으로 수평 및 연직 관성력의 영향을 고려하였다. 그러나, M-O 방법이 Coulomb 공식에 기초하기 때문에 Coulomb 방법의 모든 한계를 그대로 유지하고 있는데, 점착력, 벽면부착력, 선하중 등을 고려할 수 없으므로 이 요소들을 고려하기 위해서는 Culmann의 도해법(1875)을 사용해야 한다.

이에 김원철 박사는 힘평형조건에 근거하여 동적특성을 포함한 주동토압 일반식을 개선하였으며, 뒷채움토의 점착력, 벽면부착력, 벽마찰각 및 내측 벽면 경사, 배면 지포 경사, 외력, 지진력 등을 고려할 수 있도록 하였다. 또한, 본 제안식에 의한 주동토압 값을 기존 발표논문의 이론적 방법 및 도식적 방법의 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 흙쌓기 주변에 작용하는 힘 분석 및 주동토압 일반식

2.1 정적상태

주동토압 산출시 기본 가정사항은 다음과 같다.

- ① 흙은 균질하다.
- ② 파괴평면의 형태는 선형이다.
- ③ 모든 외력은 쌓기 인에 작용하며 등분포하중도 파괴면에 의해 절단될 만큼 충분히 길다.
- ④ 전체 파괴면에 걸쳐 내부마찰각과 점착력은 일정하다.
- ⑤ 일시적인 지진하중은 수직 및 수평 의사정적하중으로 표현할 수 있다.

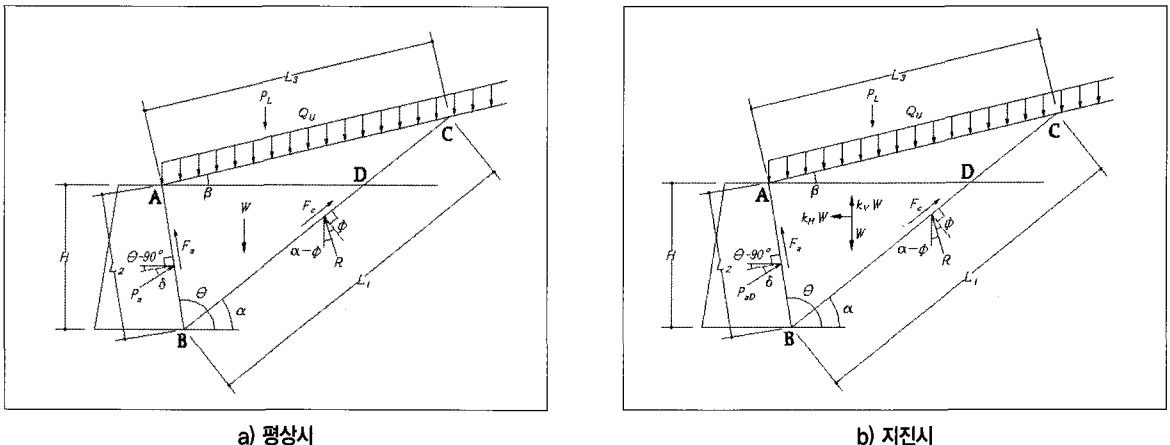


그림 1. 흙 쌓기에 작용하는 모든 힘

점착력, 벽면부착력, 외력, 지진력 등을 고려할 수 있는 새로운 주동토압 일반식 소개

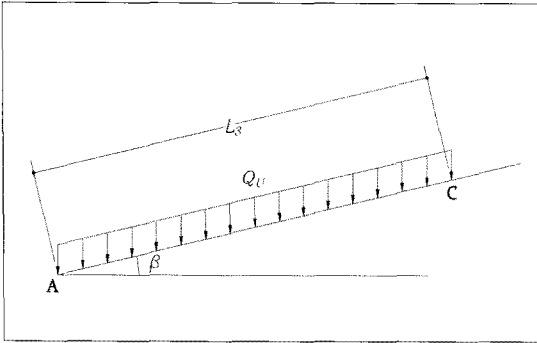


그림 2. 등분포하중 분력

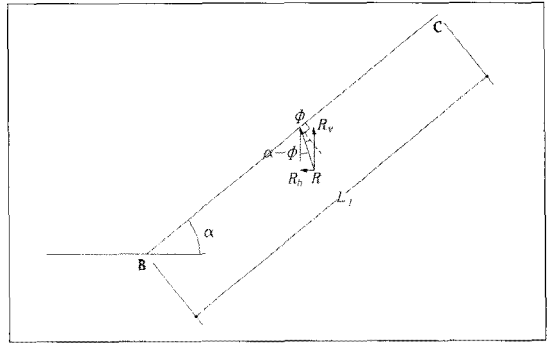


그림 3. 토괴 반력 분력

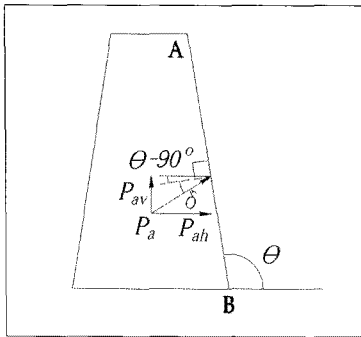


그림 4. 주동토압 분력

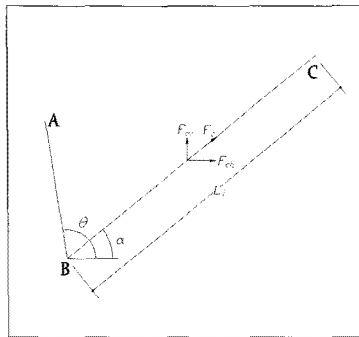


그림 5. 점착력 분력

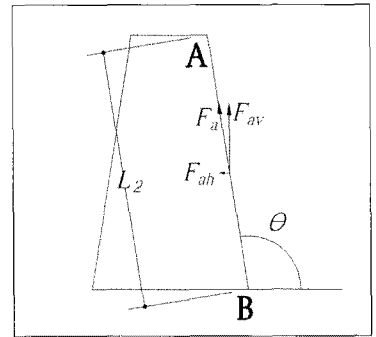


그림 6. 벽면부착력 분력

옹벽의 주동토압에 대한 일반적인 그림은 그림 1과 같다. 편의상, y축 상향 및 x축 좌측방향을 (+)로 한다. 힘평형원리에 기초하여 주동토압계산식을 유도하기 위해 이 힘들을 x, y 방향 요소로 분리한다.

가정한 파괴 흙썰기 ABC의 중량 W, 선하중 P_L, 등분포하중 Q_U는 모두 중력방향으로 작용한다. 옹벽 배면 지표 경사각은 beta이며, 등분포하중의 길이 L_3는 가정 썰기파괴면 alpha의 변화에 따라 연동하여 변화한다. 반력 R은 수직성분 R_v = R cos(alpha - phi)와 수평성분 R_h = R sin(alpha - phi)로 각각 분리할 수 있다.

주동토압 P_a는 수직성분 P_av = P_a sin(theta - 90 degrees + delta)와 수평성분 P_ah = -P_a cos(theta - 90 degrees + delta)로 나타낼 수 있다. 여기서, theta는 내측 옹벽면의 기하학적 기울기, delta는 벽마찰각이다. 흙 점착력 c에 의한 저항력도 수직성분 F_cv = cL_1 sin alpha 및 수평성분 F_ch = -cL_1 cos alpha 로 표현할 수 있다.

표 1. 흙 썰기에 작용하는 힘

	Description	Vertical Forces	Horizontal Forces
1	Weight of Wedge W(F/L)	-W	0
2	Line Load P_L(F/L)	P_Lv = -P_L	P_Lh = 0
3	Uniform Load Q_U(F/L^2)	Q_Uv = -Q_U L_3	Q_Uh = 0
4	Soil Reaction R(F/L)	R_v = R cos(alpha - phi)	R_h = R sin(alpha - phi)
5	Active Earth Pressure P_a(F/L)	P_av = P_a sin(theta - 90 degrees + delta)	P_ah = -P_a cos(theta - 90 degrees + delta)
6	Cohesion c(F/L^2)	F_cv = cL_1 sin alpha	F_ch = -cL_1 cos alpha
7	Adhesion a(F/L^2)	F_av = aL_2 sin(180 degrees - theta)	F_ah = aL_2 cos(180 degrees - theta)

4) 벽면부착력항

$$V = - \frac{H}{\sin(180^\circ - \theta)} \{ \sin(180^\circ - \theta) \cdot \tan(\alpha - \phi) - \cos(180^\circ - \theta) \} \quad (5)$$

식 (1)에 포함된 매개변수는 가정된 흙썰기 파괴각 α 를 제외하고는 벽체의 기하학적 형상이나 흙 물성치로 부터 충분히 알 수 있는 값이다. 그러므로, α 값을 변화시키면서 최대 주동토압 P_a 를 구할 수 있다.

2.2 동적상태 (지진시)

Okabe (1926)와 Mononobe & Matsuo (1929)은 옹벽에 작용하는 주동 및 수동토압 계산을 위한 의사정적 접근법을 제안하였는데, 이것이 일반적으로 잘 알려진 M-O 방법이다. 건조하고 비점착성인 토사에서의 동적 주동토압 방정식은 다음과 같다(그림 1 참조).

$$P_{ad} = \frac{1}{2} \gamma h^2 (1 - k_v) \times \frac{\frac{\cos^2(\phi - \psi - \theta)}{\cos \psi \cos^2 \theta \cos(\delta + \psi + \theta)}}{\left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \psi - \beta)}{\cos(\delta + \psi + \theta) \cos(\beta - \theta)}} \right\}^2} \quad (6)$$

여기서, $\psi = \tan^{-1} \left(\frac{k_H}{1 - k_v} \right)$

등분포하중 Q_U 가 뒷채움부에 작용한다면, 식 (6)의 γ 는 다음과 같이 대체해야 한다.

$$\gamma = \gamma + \frac{Q_U}{h}$$

초기 M-O 공식에는, 임계파괴면의 각도 α 에 대한 방정식이 정의되지는 않았으며, 후에 Zarrabi-Kashani (1979)에 의해 다음과 같이 결정되었다.

$$\alpha = \phi - \psi + \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\phi - \psi - \beta) + C_1}{C_2} \right)$$

여기서, $C_1 = \sqrt{\tan(\phi - \psi - \beta) \{ \tan(\phi - \psi - \beta) + \cot(\phi - \psi - \theta) \} [1 + \tan(\delta + \psi + \theta) \cot(\phi - \psi - \theta)]}$
 $C_2 = 1 + \tan(\delta + \psi + \theta) \{ \tan(\phi - \psi - \beta) + \cot(\phi - \psi - \theta) \}$

M-O 방정식은 완전포화 뒷채움토(Amano et al., 1956)와 부분 침수된 흙썰기(Ebeling & Morrison, 1992; Ministry of Transport, 1999)에 적용할 수 있도록 확장되었다. M-O 방법의 가장 큰 한계는 비점착성 흙에 대해서만 적용 가능하며, 벽면 부착력과 선하중도 고려할 수 없다.

정적상태와 동일한 방법으로 동적상태의 주동토압을 발전·확장시킬 수 있다. 동적상태의 주동토압을 구하기 위해서는 표 1에 지진하중에 의한 항을 추가하여 동일한 방법으로 구한다.

지진에 의한 관성력 계수의 수평 및 수직성분은 각각 $k_v = a_v/g$, $k_H = a_H/g$ 이다. 여기서, g 는 중력가속도, a_v 및 a_H 는 각각 지진하중 하에서의 수직 및 수평 가속도이다. 동적상태에서의 선하중 P_L 의 수직 및 수평성분은 각각 $P_{LVD} = k_v P_L$ 및 $P_{LHD} =$

$k_H P_L$ 이며, 등분포하중 Q_U 의 수직 및 수평성분도 각각 $Q_{UVD} = k_V Q_U L_3$ 와 $Q_{UHD} = k_H Q_U L_3$ 이다. 토사반력 R 은 정적상태와 동일하게 각각 $R_V = R \cos(\alpha - \phi)$ 및 $R_H = R \sin(\alpha - \phi)$ 이다. 동적 주동토압 P_{aD} 의 수직 및 수평성분은 각각 $P_{aVD} = P_{aD} \sin(\theta - 90^\circ + \delta)$, $P_{aHD} = -P_{aD} \cos(\theta - 90^\circ + \delta)$ 이다. 점착력 c 에 의한 저항력은 수직성분 $F_{cV} = cL_1 \sin \alpha$ 와 수평성분 $F_{cH} = -cL_1 \cos \alpha$ 로 구성되며, 벽면부착력 a 도 각각 $F_{aV} = aL_2 \sin(180^\circ - \theta)$ 와 $F_{aH} = aL_2 \cos(180^\circ - \theta)$ 로 분리할 수 있다. 힘평형조건을 만족하기 위해 정적상태시와 동일하게 $\sum F_V = 0$ 과 $\sum F_H = 0$ 을 적용하면, 다음식을 유도할 수 있다.

$$P_{aD} = \frac{1}{\sin(\theta - 90^\circ + \delta) \cdot \tan(\alpha - \phi) + \cos(\theta - 90^\circ + \delta)} \cdot (S + T + U + V) \quad (7)$$

여기서, $S = W \tan(\alpha - \phi) + k_H W - k_V W \tan(\alpha - \phi)$

$T = k_H P_L - k_V P_L \tan(\alpha - \phi) + P_L \tan(\alpha - \phi) + k_H Q_U L_3 - k_V Q_U L_3 \tan(\alpha - \phi) + Q_U L_3 (\alpha - \phi)$

$U = -cL_1 \sin \alpha \cdot \tan(\alpha - \phi) - cL_1 \cos \alpha$

$V = -aL_2 \sin(180^\circ - \theta) \cdot \tan(\alpha - \phi) + aL_2 \cos(180^\circ - \theta)$

W, L_1, L_2, L_3 가 파괴면의 경사 α , 벽체높이 H , 벽체 경사각 θ 의 함수이므로, 방정식 (7)은 불완전한 형태이다. 정적상태시와 동일한 방법으로 정리하면 미지수는 파괴면 경사 α 뿐이다. Coulomb 토압과는 달리 α 에 대해 미분하여 일반해를 구할 수 없기 때문에 주동토압에 대한 일반식을 구할 수는 없다. 그러나, 최근 컴퓨터의 발달로 시행착오법을 용이하게 시행할 수 있으므로, α 를 변화시키면서 P_{aD} 가 최대가 되는 α 를 결정하여 동적 주동토압 P_{aD} 를 구할 수 있다.

3. 기존 토압공식 및 도해적 방법과의 비교

3.1 정적상태 주동토압

1) Coulomb, Rankine, Bell 토압공식과의 비교

초기 Coulomb 및 Rankine 주동토압은 각각 다음 방정식으로 표현된다(Taylor, 1956).

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left[\frac{cs \phi \cdot \sin(\theta - \phi)}{\sqrt{\sin(\theta + \delta)} + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin(\phi - \beta)}{\sin(\theta - \beta)}}} \right] \quad (8)$$

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cos \beta \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi}} \quad (9)$$

배면측 지표면이 수평인 점착성 흙의 Bell 주동토압은 다음과 같다(Bowles, 1997).

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) - 2cH \tan \left(45^\circ - \frac{\phi}{2} \right) \quad (10)$$

식 (1)과 (8), (9), (10)을 직접적으로 비교하는 것은 불가능하다. 왜냐하면, 각 식들은 자체의 고유한 형태를 지니고 있고, 기존

점착력, 벽면부착력, 외력, 지진력 등을 고려할 수 있는 새로운 주동토압 일반식 소개

식에서 고려할 수 없는 인자들이 많기 때문이다. 각각을 비교하기 위해, 모든 주동토압공식에 적용 가능한 특수조건을 동일하게 적용하였다. 점착력, 벽면부착력, 외력을 0으로 하여 Coulomb 주동토압공식에 적용하였기 때문에 김원철 주동토압 제안식을 식(11)로 축소시킬 수 있다.

$$P_a = \frac{W \tan(\alpha - \phi)}{\sin(\theta - 90^\circ + \delta) \cdot \tan(\alpha - \phi) + \cos(\theta - 90^\circ + \delta)} \quad (11)$$

Rankine 주동토압공식에서의 고유 한계로 인해, $\theta = 90^\circ$, $\beta = 0$ 조건을 토괴중량 W와 관련된 식에 적용하여 식(12)에 나타내었다.

$$W = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan(90^\circ - \alpha) = \frac{1}{2} \gamma H^2 \cot \alpha \quad (12)$$

식(12)를 식(11)에 대입하면, 김원철 주동토압 제안식은 다음과 같이 표현된다.

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \left\{ \frac{\tan(90^\circ - \alpha) \cdot \tan(\alpha - \phi)}{\sin(\theta - 90^\circ + \delta) \cdot \tan(\alpha - \phi) + \cos(\theta - 90^\circ + \delta)} \right\} \quad (13)$$

만약식(1), (8), (9), (10), (13)에 동일 조건을 적용한다면, 주동토압 값은 일치해야 한다. 기존 공식의 한계로 인해, $\theta, c, a, \beta, \delta$ 는 특정값을 적용하였다. 주동토압을 구하기 위한 기하학적 적용값 및 제반 물성값은 다음 표와 같다. 김원철 제안식에 의한 주동토압과 기존 토압공식에 의한 주동토압 결과는 일치한다. 파괴각 $\alpha = 58^\circ$ 에서 주동토압 122.293 kN/m을 구할 수 있는데, 이 파괴각은 김원철 주동토압 제안식에서만 구할 수 있다.

표 2. 본 제안식 및 기존 주동토압공식 비교를 위한 기하학적 적용값 및 제반 물성값

항목	H(m)	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c(kN/m ²)	a(kN/m ²)	θ (°)	β (°)	δ (°)
값	6.0	17.4	26	0	0	0	0	0

표 3. 김원철 주동토압 제안식(P_{af})과 도해적인 방법(P_{ag})과의 비교

No	H(m)	θ (°)	θ' (°)	δ (°)	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c(kN/m ²)	P_L (kN/m)	Q_U (kPa)	α (°)	P_{ag} (kN/m)	P_{af} (kN/m)
1	3.5	0	90	20	15.6	32	0	0	0	57	26.2	26.324
2	3.5	0	90	20	15.6	32	0	10	0	61	31	30.906
3	3.6	10	99	12	18.54	30	0	0	0	57	50.0	51.427
4	4.5	0	90	20	18.6	32	0	0	0	57	51.5	51.883
5	4.6	0	90	15	18.85	30	0	29.2	0	62	74.3	74.941
6	4.6	0	90	15	18.85	30	0	0	0	57.5	60.0	60.111
7	5	10	90	20	19.0	30	0	0	0	53	80.34	80.754
8	6	20	90	20	18.0	38	0	0	0	57	88	89.719
9	6.1	12	110	0	17.3	30	0	0	24.54	64	278.2	273.70
10	9	20	100	25	15.9	30	10	0	0	57	210	208.93
11	10	10	105	18	15.0	36	0	90	0	66	360	349.417

2) 도해적 접근법과의 비교

김원철 주동토압 제안식의 정확성을 증명하기 위해 도해적 접근법과 비교하였다. Bowles (1997), Das (1984), Dunn 등 (1980), Sutton (1975), Prakash (1981), Peck 등 (1974), Taylor (1956), Terzaghi (1943), Terzaghi & Peck (1948), Lambe & Whitman (1979), Venkatramaiah (1993) 방법들이다. 이 11가지 비교결과를 표 3에 요약하였으며, 이들을 배면 측 지표가 기울어진 조건하에서 선하중을 받는 경우, 외력이 0인 경우, 등분포하중을 받는 경우 등에 대해 각각 CASE 2, 7, 9에 나타내었으며, CASE 10에서는 점착성 흙 조건에 대해 Culmann 도해법과 비교하였다. Chen 주동토압공식(1975)과는 3)절에서 비교하기로 한다.

도해법에 의한 주동토압과 김원철 주동토압 제안식 비교 결과를 표 3에 요약하였으며, P_{aG} 와 P_{aR} 는 각각 도해법과 본 제안식에 의해 구한 주동토압 결과이다. 대부분의 비교결과는 거의 일치하는 것으로 나타났다. 다만, CASE 11 (Venkatramaiah, 1993)에서는 매우 큰 차이를 보이는데 이는 도해법의 부정확성 때문인 것으로 추측되며, 동일조건으로 Coulomb, Rankine 주동토압을 산출하면 본 제안식 결과와 동일하다. 상기 값들을 비교하면, 벽체의 기하학적 형상과 벽마찰각을 고려함으로써 얻을 수 있는 잇점들을 오랫동안 무시해왔으며, 이러한 값들은 주동토압 결정시 무시할 만큼 사소한 값이 아니라는 결론을 얻을 수 있다.

① CASE 2 (선하중)

배면측 지표면은 수평이고, 벽체 상단에서 뒤로 2m 이격하여 10 kN/m 선하중 P_L 이 작용하는 높이 3.5m 옹벽이 있다. 흙의 단위중량 $\gamma = 15.6 \text{ kN/m}^3$, 내부마찰각 $\phi = 32^\circ$, 내측 벽면 경사 $\theta = 90^\circ$, 벽마찰각 $\delta = 20^\circ$, 점착력 $c = 0$ 을 적용한다(Dunn 등, 1980). Culmann 도해법으로 발표된 P_a 값은 31 kN/m 이고, 본 제안식 (7)에 의해 구해진 결과는 $P_a = 30.906 \text{ kN/m}$ 이며 파괴각 $\alpha = 61^\circ$ 이다.

② CASE 7 (Rebhann 의 도해법)

내측 지표 경사각 $\beta = 10^\circ$ 이고 외력이 작용하지 않는 높이 5.0m 옹벽이 있다. 흙의 단위중량 $\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$, 내부마찰각 $\phi = 30^\circ$, 내측 벽면 경사 $\theta = 90^\circ$, 벽마찰각 $\delta = 20^\circ$ 를 적용한다(Venkatramaiah, 1993). Rebhann의 도해법에 의해 발표된 P_a 값은 80.34 kN/m 이고, 본 제안식으로 구한 결과는 80.754 kN/m이며 파괴각 $\alpha = 53^\circ$ 이다.

③ CASE 9 (등분포하중)

배면 지표 경사각 $\beta = 12^\circ$ 이고 등분포하중 $Q_{U1} = 24.54 \text{ kN/m}^2$ 이 작용하는 높이 6.1m 옹벽이 있다. 흙의 단위중량 $\gamma = 17.3 \text{ kN/m}^3$, 내부마찰각 $\phi = 30^\circ$, 내측 벽면 경사 $\theta = 110^\circ$, 벽마찰각 $\delta = 0^\circ$ 를 사용한다(Lambe & Whitman, 1979). 발표된 P_a 값은 278.22 kN/m이고, 본 제안식으로 구한 결과는 $P_a = 273.70 \text{ kN/m}$ 이며 파괴각 $\alpha = 57^\circ$ 이다. Lambe & Whitman (1979)이 언급했듯이, 기존 발표된 값은 근사값이므로, 기존 발표값과 본 제안식에 의해 결정된 값 사이에는 약간의 차이가 있을 수 있다.

④ CASE 10 (점착력)

상기에서 언급했듯이, 김원철 주동토압 제안식은 힘평형원리에 근거하여 점착력 c , 벽면부착력 a 를 고려할 수 있다. 그러므로, 점착력이 있는 토사로 뒷채움하였을 경우의 주동토압을 본 제안식으로 산출하여 도해법과 비교하였다. 옹벽체 높이 $H = 9.0\text{m}$, 배면 지표 경사 $\beta = 20^\circ$, 흙의 단위중량 $\gamma = 15.9 \text{ kN/m}^3$, 내부마찰각 $\phi = 30^\circ$, 내측 벽면 경사 $\theta = 100^\circ$, 벽마찰각 $\delta = 25^\circ$, 점착력 $c = 10 \text{ kN/m}^2$, 벽체와 흙 사이의 벽면부착력 $a = 0$ 을 적용한다(Sutton, 1975). Culmann 도해법에 의해 발표된 P_a 값은 210 kN/m 이고, 본 제안식으로 구한 결과는 $P_a = 208.930 \text{ kN/m}$ 이며 파괴각 $\alpha = 57^\circ$ 이다.

3) Chen 주동토압공식과의 비교

Chen(1975)은 소성이론을 사용하여 측방토압 결정방법을 개선하였다. 반복 루틴에 의한 컴퓨터 프로그램으로 결과를 얻을 수 있는데, 이는 특별히 어렵지는 않다(Bowles, 1997). 측방토압의 최대값을 구하기 위해, 유도식을 특수조건하에서 파괴각 α 항으로 미분하여 다음과 같이 나타낸다.

$$P_a = \frac{1}{2} \gamma H^2 \max(K_{ay}) + Q_U H \max(K_{aq}) + c H \max(K_{ac}) \quad (14)$$

매끄러운 벽체의 경우 ($\delta < \phi$):

$$K_{ay} = \left\{ \frac{-\sec \delta}{-\sin(180^\circ - \theta) + \tan \delta \cos(180^\circ - \theta) - \frac{\tan \delta \sin(\alpha - \phi)}{\sin(180^\circ - \theta + \alpha - \phi)}} \right\} \times \left\{ \frac{\sin(180^\circ - \theta + \alpha) \sin(180^\circ - \theta + \beta) \sin(\alpha - \phi)}{\sin(180^\circ - \theta) \sin(\alpha - \beta) \sin(180^\circ - \theta + \alpha - \phi)} \right\} \quad (15)$$

$$K_{ac} = \left\{ \frac{\sec \delta}{-\sin(180^\circ - \theta) + \tan \delta \cos(180^\circ - \theta) - \frac{\tan \delta \sin(\alpha - \phi)}{\sin(180^\circ - \theta + \alpha - \phi)}} \right\} \times \left\{ \frac{\cos \phi \sin(180^\circ - \theta + \beta)}{\sin(\alpha - \beta) \sin(180^\circ - \theta + \alpha - \phi)} \right\} \quad (16)$$

$$K_{aq} = \left\{ \frac{-\sec \delta}{-\sin(180^\circ - \theta) + \tan \delta \cos(180^\circ - \theta) - \frac{\tan \delta \sin(\alpha - \phi)}{\sin(180^\circ - \theta + \alpha - \phi)}} \right\} \times \left\{ \frac{\sin(180^\circ - \theta + \alpha) \sin(\alpha - \phi)}{\sin(\alpha - \beta) \sin(180^\circ - \theta + \alpha - \phi)} \right\} \quad (17)$$

Chen 공식과 김원철 주동토압 제안식에 대한 비교를 위해, 벽체 높이 $H = 6.5\text{m}$, 배면 지표 경사 $\beta = 5^\circ$, 흙의 단위중량 $\gamma = 17.52 \text{ kN/m}^3$, 내부마찰각 $\phi = 10^\circ$, 점착력 $c = 10.5 \text{ kN/m}^2$, 등분포하중 $Q_U = 50 \text{ kN/m}^2$, 벽면부착력 $a = 0$ 이라 가정하자. Chen 공식과 본 제안식에 의한 주동토압은 정확히 일치하고, 파괴각 $\alpha = 58^\circ$ 에서 $P_a = 149.693 \text{ kN/m}$ 이다.

이미 언급했듯이, 선하중이 작용하고 벽면부착력을 고려해야 할 경우에는 Chen 공식을 적용할 수 없다. 실무적인 측면에서 옹벽 배면에 매설판이나 콘크리트 블록 등의 구조체가 설치될 수도 있다. 이 경우, 일반적으로 외력을 선하중으로 간주한다. 더욱이, 뒷채움토가 점토라면, 비배수전단강도의 1/2을 벽면부착력으로 채택하는 것이 일반적이다(Whitlow, 2001). NAVFAC (1986)에서도 점착력의 30~100%를 벽면부착력으로 적용토록 하였다. 점착성 흙 조건하에서, Chen 토압공식과 김원철 주동토압 제안식을 비교하기 위해, $\delta = 0^\circ$, 벽면부착력 $a = 5 \text{ kN/m}^2$ 조건을 제외한 기 제시된 모든 조건과 동일한 조건을 적용하였다. 최대주동토압은 각각 파괴각 $\alpha = 59^\circ$ 에서 161.582 kN/m , $\alpha = 58^\circ$ 에서 143.960 kN/m 이다.

만약, 이미 논의된 모든 매개변수를 포함하여 옹벽을 설계한다면, 도해적 접근법 외에 주동토압을 평가할 수 있는 일반식은 없다. 그러나, 거론된 모든 매개변수를 옹벽설계시 고려해야 한다면, 도해적 접근법도 매우 복잡해질 것이다. 이 경우, 김원철 주동토압 제안식은 매우 편리하게 정확한 값을 제공할 수 있다. 옹벽에 적용할 수 있는 모든 외력 및 기하학적 형태에 대해 고려할 수 있는데 예를 들어, 다음 조건하에서도 주동토압을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} H &= 6.5\text{m}, \gamma = 17.52 \text{ kN/m}^3, \phi = 15^\circ, \delta = 10^\circ, \beta = 10^\circ, \\ \theta &= 100^\circ, c = 10.5 \text{ kN/m}^2, a = 5 \text{ kN/m}^2, P_L = 10 \text{ kN/m}, \\ Q_U &= 24 \text{ kN/m}^2. \end{aligned}$$

본 제안식으로 주동토압을 구하면, 파괴각 $\alpha = 47^\circ$ 에서 267.304 kN/m 이다.

본 제안식의 정확성을 확인하기 위해, AutoCAD 프로그램을 사용하여 도해적 접근법을 시도하였으며, 3개의 시행착기법을 그림 8에 나타내었다. 도해법에 의한 결과는 파괴각 $\alpha = 47^\circ$ 에서 최대주동토압 267.3 kN/m 이다.

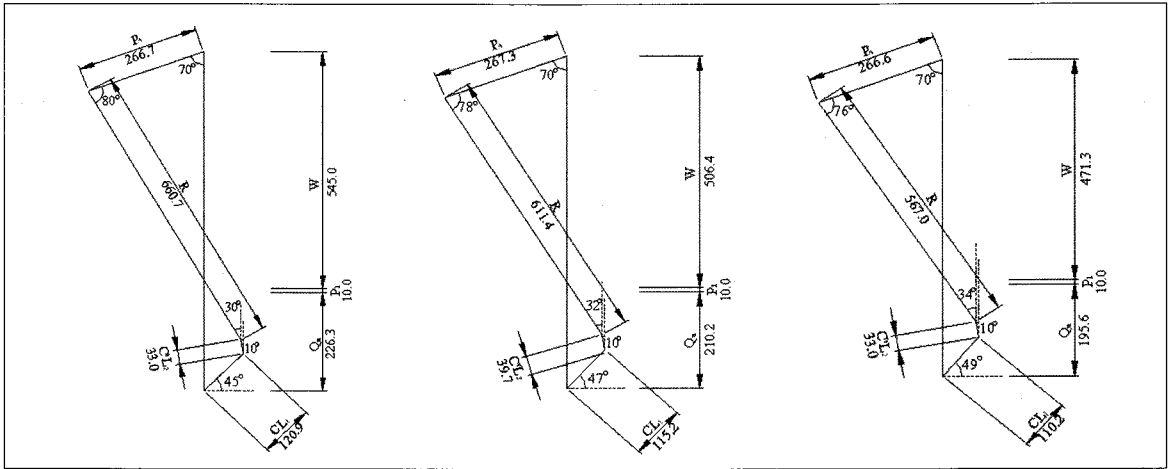


그림 8. 도해적 접근법에 의한 결과

3.2 동적상태 주동토압

1) M-O 공식 및 도해적 접근법과의 비교

6가지 CASE에 대한 검증을 통해 본 제안식의 타당성을 평가하였으며 표 5에 요약하였다. 모든 경우에 대해 H, γ , δ , ϕ 는 각각 8m, 17.7 kN/m³, 20°, 30° 로 적용하였다. 김원철 주동토압 제안식에 의해 계산된 동적 주동토압을 CASE 1에서 M-O

표 4. 각 방법들에서 적용 가능한 매개변수

	$\beta(^{\circ})$	$\alpha(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	c(kPa)	a(kPa)	P_L (kN/m)	Q_u (kPa)
Coulomb	A	A	A	NA	NA	NA	NA
Rankine	A	90	0 or b	NA	NA	NA	NA
Mazindrani	A	90	0 or b	A	NA	NA	NA
Bell	NA	90	0	A	NA	NA	NA
Chen	A	A	A	A	NA	NA	A
김원철	A	A	A	A	A	A	A

Note : A (Applicable), NA (Not Applicable)

표 5. 김원철 주동토압 제안식과 M-O 공식, 도해적 접근법 결과 비교

#	H (m)	γ (kN/m ³)	δ (°)	ϕ (°)	θ (°)	c (kPa)	a (kPa)	P_L (kN/m)	Q_u (kPa)	k_v	k_H	α (°)	P_{ad} (kN/m)	
													M-O/도해법	본제안식
1	8	17.7	20	30	10	0	0	0	0	-0.05	0.1	53.6	266.0 *	266.0
2	8	17.7	0	30	0	0	0	20	0	-0.1	0.2	52.3	297.4	297.4
3	8	17.7	0	30	0	0	0	0	50	-0.1	0.2	50.7	487.0	486.3
4	8	17.7	0	30	0	0	0	20	50	-0.1	0.2	51.6	500.4	498.8
5	8	17.7	0	30	0	10	0	0	0	-0.1	0.2	52.7	189.9	189.7
6	8	17.7	0	30	0	10	5	10	50	-0.1	0.2	51.0	381.6	381.6

* M-O 공식에 의한 P_{ad}

점착력, 벽면부착력, 외력, 지진력 등을 고려할 수 있는 새로운 주동토압 일반식 소개

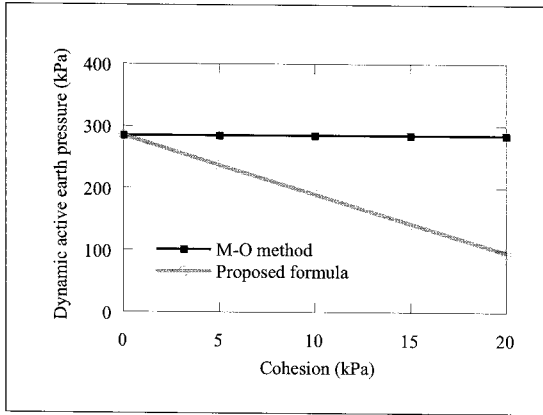


그림 9. 점착력의 영향

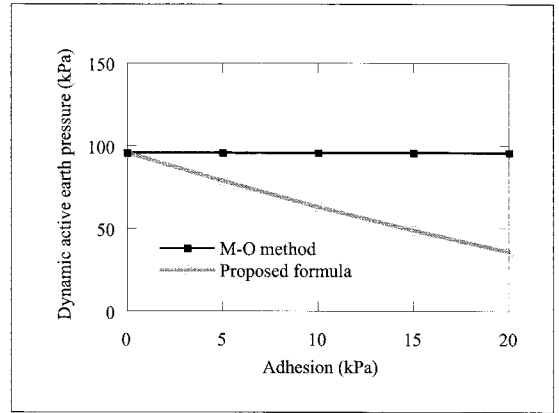


그림 10. 벽면점착력의 영향

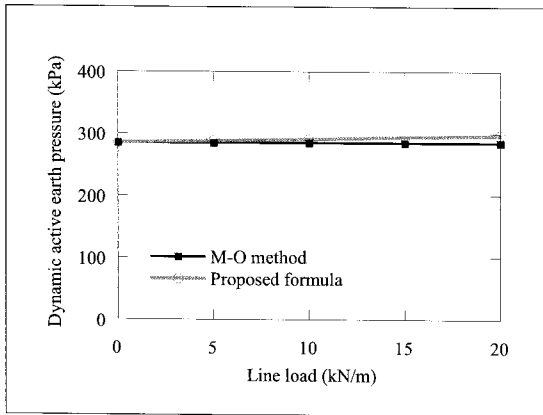


그림 11. 선하중의 영향

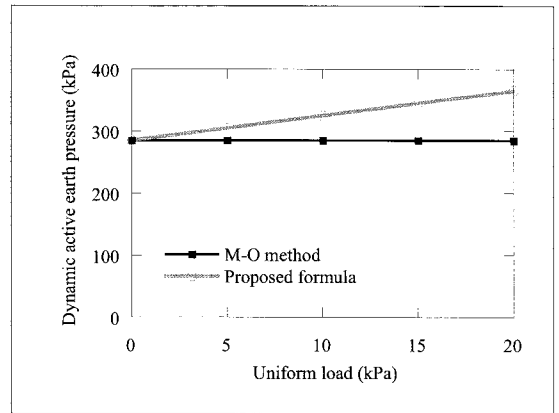


그림 12. 등분포하중의 영향

공식과 비교하였다. 본 제안식에 의한 결과값과 M-O 공식 결과값은 266.0 kN/m로 일치하였으며, Zarribi-Kashani (1979)에 의해 계산된 파괴면 경사각 α 도 53.6°로 일치하였다. 이 예로부터 본 제안식에 의해 계산된 임계 파괴면 경사각 및 동적 주동토압은 정확하며, M-O 공식과의 일치성을 확인할 수 있다.

이미 언급했듯이, 도해적 접근법만이 동적 주동토압에 대한 점착력, 벽면부착력, 선하중 등의 영향을 고려할 수 있다. 본 제안식의 정확도를 확인하기 위해 도해적 접근법에 의한 결과값을 총 5가지 다른 경우(CASE 2~6)에 대해 비교했다. 표 5에서 본 제안식의 동적 주동토압과 도해적 방법의 결과는 거의 일치하여 정확성을 확인할 수 있다.

2) 동적 주동토압에 대한 점착력, 벽면부착력, 외력의 영향

연직 옹벽에 대한 동적 주동토압을 계산하여, 점착력, 벽면부착력, 외력의 영향을 정량화하는 매개변수에 대한 연구를 수행하였다. 옹벽 높이, 단위중량, 내부마찰각의 값은 1)절에서 사용한 예제와 동일하며, k_v 와 k_H 는 각각 -0.1과 0.2를 적용한다.

첫 번째, 동적 주동토압에 대한 점착력의 영향을 검토하기 위해, 점착력을 0~20 kPa 변화시켰으며 벽면부착력은 0으로 한다. 그림 9에 보인 바와 같이, 점착력은 동적 주동토압에 영향을 미치는 중요한 요소이다. M-O 공식은 점착성 흙에 대한 토압을 매우 과대평가하게 한다. 두 번째, 점착력을 20 kPa로 놓고, 벽면부착력은 0~20 kPa로 변화시킨다. 그림 10과 같이, 벽면부착력 또한 계산된 동적 토압에 대해 뚜렷한 영향을 미치며, 설계시 고려되어야만 한다. 세 번째, 점착력과 벽면부착력을 0으

로 놓고, 선하중을 0~20 kN/m로 변화시켰으며, 그 결과는 그림 11과 같다. M-O 공식은 토압을 약간 과소평가하는 경향을 보이는데, 이는 선하중의 영향을 고려할 수 없기 때문이다. 동적 주동토압에 대한 등분포하중의 영향을 그림 12에 나타내었으며, 등분포하중의 영향은 선하중의 영향보다 더 뚜렷하다.

본 예제로부터, 동적 주동토압을 산정하는데에 점착력, 벽면부착력, 외력을 고려하는 것이 매우 중요하다는 것을 알 수 있었다. 배면이 점착성 흙으로 뒷채움된 옹벽에 대해 지진 안정성을 평가할 경우 본 제안식을 활용하는 것이 유용하다.

4. 결론

Rankine 주동토압공식은 벽마찰각, 배면 지표면 경사, 내측 벽면 경사, 외력 등을 고려할 수 없는 한계가 있다. Bell 공식도 지표면 경사, 내측 벽면 경사, 외력 등을 고려할 수 없다. Mazindrani (1997) 이후부터, 뒷채움토의 점착력과 배면측 지표 경사를 고려하여 주동토압을 산출할 수 있으나, 이 제안식도 여전히 벽마찰각, 내측 벽면 경사를 고려할 수 없다. Coulomb 제안식도 점착력, 벽면부착력, 외력 등을 고려할 수 없고, Chen 제안식 또한 선하중과 벽면부착력을 고려할 수 없다. 따라서, 지금까지는 옹벽에 작용하는 모든 인자들의 영향을 종합적으로 고려할 수 있는 주동토압 일반식이 존재하지 않았다. 기 언급했듯이, 벽마찰각, 점착력, 배면 지표 경사 등은 매우 영향력 있는 매개변수이고, 무시하거나 간략화 시켜서는 안된다.

위 논의된 모든 문제의 해답을 구하기 위해, 힘평형원리에 근거하여 최대주동토압을 추정할 수 있는 주동토압공식을 제안하였다. 그 결과는 도해적 접근법, 특정조건하에서의 Coulomb, Rankine, Bell, Chen 주동토압공식 등과 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 본 김원철 주동토압 제안식은 상기 언급된 한계들을 충분히 극복할 수 있다.

동적해석측면에서도 점착력, 벽면부착력, 외력을 고려하면서도 단순한 형태를 유지함으로써, 폭넓게 사용되고 있는 M-O 공식을 더욱 발전시켰다. M-O 공식과 도해적 방법에 의한 다방면의 비교를 통해 본 제안식의 타당성을 증명하였으며, 매개변수에 대한 연구를 수행하여 점착력, 벽면부착력, 외력의 영향을 평가하였다. 본 제안식에 추가된 항들은 잠재적으로 동적 주동토압에 대해 중요한 영향을 미치며, 설계시 반드시 고려되어야 한다는 것이 증명되었다. 배면이 점착성 흙으로 뒷채움된 옹벽에 대해 지진 안정성을 평가할 경우 본 제안식을 활용하는 것이 매우 유용하다.

결론적으로, 옹벽체의 기하학적 형태와 흙의 특성을 무시하거나 가볍게 여겨서는 안된다. 본 제안식은 배면 지표면 경사, 내측 벽면 경사, 벽마찰각, 흙의 점착력, 벽면부착력, 선하중 및 등분포하중 등 외력, 지진력 등을 종합적으로 고려할 수 있으며, Coulomb, Rankine, Bell, Chen 및 Mazindrani 제안식의 한계를 극복할 수 있으므로 주동토압을 추정할 수 있는 최적의 방법이다.

참고 문헌

1. Won-Cheul Kim, Duhee Park, Bumjoo Kim (2009). "Development of Generalized Formula for Dynamic Active Earth Pressure." Geotechnique, accepted for publication.