

# 아칭효과가 평행이동하는 강성옹벽의 안정성에 미치는 영향

## Arching Effects on Stability of Translating Rigid Retaining Walls

백 규 호<sup>1</sup> Paik, Kyu-Ho

### Abstract

The soil arching in the backfill, which affects the magnitude and distribution of active earth pressure on a retaining wall, has also an effect on the stability and cross-sectional area of the retaining wall. In this study, results obtained from Paik's equation that includes arching effect on active earth pressure are compared with those from Coulomb theory to investigate the influence of the soil arching on active earth pressure, overturning moment, stability and cross-sectional area of translating rigid retaining walls. The comparisons show that the active forces including arching effects are always higher than those from Coulomb theory, irrespective of  $\phi$  and  $\delta$  values. The overturning moments, shear force and moment on the rigid wall are also higher when considering arching effects than when not considering arching effects. The deviation of shear forces and moments by including and excluding arching effects becomes maximum at the height of 0.02-0.08 times wall height from the base of the wall. Therefore, if a translating rigid retaining walls is designed based on Coulomb theory, the wall may reach sliding and overturning failures due to arching effect in the backfill and the cross-sectional area of the wall, especially at lower part of the wall, may not be sufficient to resist to shear force and moment.

### 요 지

강성옹벽에 작용하는 주동토압의 크기와 분포형태에 영향을 미치는 아칭효과는 옹벽의 안정성과 옹벽 단면의 결정에도 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 평행이동하는 강성옹벽의 경우에 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과가 옹벽에 작용하는 토압과 전도모멘트, 옹벽의 안정성, 그리고 옹벽의 단면에 미치는 영향을 규명하기 위하여 아칭효과를 고려해서 토압을 산정하는 백(2003a)의 제안식과 Coulomb의 토압이론으로부터 얻어진 결과들을 서로 비교하였다. 연구결과  $\phi$ 와  $\delta$ 의 크기에 관계없이 아칭효과를 고려했을 때의 주동토압이 Coulomb 토압보다 컸으며, 옹벽에 작용하는 전도모멘트도 아칭효과를 고려했을 때가 고려하지 않았을 때보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 토압에 의해 옹벽의 각 위치에 유발되는 전단력과 모멘트를 비교한 결과 아칭효과를 고려했을 때의 전단력과 모멘트가 아칭효과를 고려하지 않았을 때보다 컸으며, 아칭효과의 고려 유무에 따라 옹벽에 유발되는 전단력의 차이와 모멘트의 차이는 옹벽의 저면으로부터 옹벽 높이의 0.02-0.08배되는 위치에서 최대가 되었다. 따라서 Coulomb의 토압이론에 근거해서 평행이동하는 강성옹벽을 설계하면 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과로 인해 옹벽이 활동과 전도파괴에 대하여 불안정할 수 있다. 그리고 옹벽의 단면은 옹벽에 작용하는 전단력과 모멘트를 지지하기에 충분하지 않을 수 있으며, 이러한 옹벽 단면의 부족은 옹벽의 상부보다는 하부에서 심각하게 된다.

**Keywords :** Arching effect, Stability, Theoretical analysis, Translating wall

<sup>1</sup> 정회원, 관동대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ., pkh@kwandong.ac.kr)

## 1. 서론

강성옹벽에 작용하는 주동토압의 크기와 분포형태를 정확히 산정하는 것은 옹벽구조물을 구조적으로 안정하게 설계하는데 있어서 매우 중요한 요소 중 하나이다. 이제까지 대부분의 지반공학자들은 강성옹벽을 설계할 때 토압의 분포형태를 삼각형으로 가정하는 Rankine이나 Coulomb의 토압이론을 이용하여 주동토압을 산정하여 왔으며, 이렇게 산정된 주동토압의 크기와 분포형태에 근거하여 강성옹벽의 단면을 결정하고 활동(sliding) 및 전도(overtuning)파괴에 대한 안정성을 검토하여 왔다. 그러나 많은 연구결과에 따르면 옹벽의 벽면이 매끄러운 ( $\delta=0$ ) 경우에는 옹벽에 작용하는 주동토압이 Rankine이나 Coulomb의 토압이론에서 가정하는 것과 같이 삼각형의 형태로 분포하지만, 옹벽의 벽면이 거친( $\delta>0$ ) 경우에는 주동토압이 삼각형의 형태가 아닌 곡선형태로 분포하는 것으로 밝혀졌다(Terzaghi 1943, Tsagareli 1965, Fang과 Ishibashi 1986). 또한 강성옹벽에 작용하는 주동토압이 이처럼 비선형의 곡선형태로 분포하는 것은 옹벽에 변위가 발생할 때 옹벽과 뒷채움토간에 발생하는 마찰력으로 인해 뒷채움재에서 아칭효과가 발생하기 때문으로 보고되었다(Handy 1985, Wang 2000, 백 2003a).

이러한 아칭효과로 인해 그림 1에 보이는 바와 같이 옹벽의 뒷채움재에 작용하는 최대 및 최소주응력의 작용방향이 회전됨으로써 옹벽에 작용하는 주동토압의

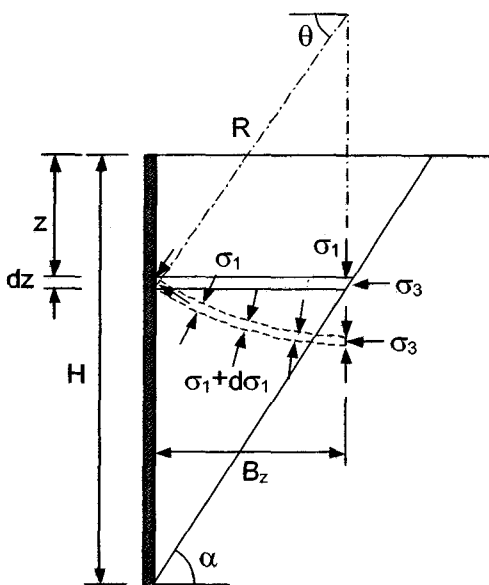


그림 1. 뒷채움재의 미소수평요소에 작용하는 주응력의 작용방향

크기와 분포형태 그리고 토압에 의한 전도모멘트가 기존의 토압이론에 의한 결과와 상당히 다르게 된다. Handy(1985)와 백(2003b)의 연구결과에 따르면 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과는 뒷채움재의 내부마찰각  $\phi$ 와 옹벽의 벽면마찰각  $\delta$ 가 커질수록 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과가 커져서 옹벽에 작용하는 주동토압은 더욱 비선형의 분포형태를 보이는 것으로 나타났다. 그 결과 강성옹벽에 작용하는 주동토압의 크기와 작용점 위치 또한 뒷채움재와 옹벽의  $\phi$ 와  $\delta$ 에 따라 달라지게 된다. 따라서, 강성옹벽의 역학적인 안정성(즉, 활동파괴와 전도파괴에 대한 안정성)이 옹벽에 작용하는 주동토압의 크기와 작용점 위치에 직접적인 영향을 받는다는 것을 고려할 때 강성옹벽의 설계 시 아칭효과를 고려여부에 따라 강성옹벽의 역학적인 안정성이 크게 달라질 수 있게 된다. 또한 주동토압의 크기와 분포형태에 따라 결정되는 강성옹벽의 최적단면 또한 아칭효과를 고려 유무에 따라 그리고 아칭효과를 고려 시 뒷채움재의  $\phi$ 와  $\delta$ 에 따라 달라지게 된다.

본 연구에서는 뒷채움재와 강성옹벽의 다양한  $\phi$ 와  $\delta$ 에 대하여 아칭효과를 전혀 고려하지 않은 Coulomb의 토압이론과 아칭효과를 고려한 백(2003a)의 토압산정식을 이용하여 강성옹벽에 작용하는 주동토압과 그로 인한 전도모멘트를 계산하고, 이들을 서로 비교함으로써 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과가 강성옹벽에 작용하는 주동토압에 미치는 영향과 옹벽의 역학적인 안정성에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 Coulomb의 토압이론과 백(2003a)의 토압산정식으로부터 계산된 강성옹벽에 대한 전단력 분포와 모멘트 분포를 비교함으로써 토압 산정시 아칭효과를 고려 유·무가 강성옹벽의 단면 결정에 미치는 영향을 조사하였다. 또한 중력식 옹벽에 대한 가상의 사례를 통해서 아칭효과가 강성옹벽의 역학적인 안정성에 매우 큰 영향을 미칠 수 있음을 보였다.

## 2. 아칭효과를 고려한 새로운 토압산정식

### 2.1 백(2003a)의 토압산정식

강성옹벽에 작용하는 비선형의 주동토압을 산정하기 위하여 많은 연구자들(Handy 1985, Harrop-Williams 1989, Wang 2000)은 강성옹벽의 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과를 고려한 토압산정식을 제안하였다. 그리

고 이들 토압산정식들은 그림 2와 같이 옹벽의 파괴 시 뒷채움재에서 발생하는 흙체기가 미소 두께의 수평요소들로 구성되어 있다는 가정하에 각 미소수평요소들에 대한 힘평형을 통해서 토압을 산정하는 Janssen(1895)의 아칭이론에 근거하고 있다. 그러나 이들은 토압산정식의 유도과정에서 몇가지 불합리한 가정들을 사용하거나 혹은 토압의 산정을 위하여 반드시 필요한 토압계수의 결정법에 관해서 전혀 언급하지 않음으로써 제안식의 정확도를 저하시키거나 실용성을 저하시키는 결과를 초래하였다(백 2003b).

한편, 백(2003a)은 뒷채움재의 지표면이 수평이고 강성옹벽이 평행이동하는 경우에 대해서 아칭효과로 인한 뒷채움재에서의 응력상태 변화를 Janssen(1895)의 아칭이론에 정확히 반영함으로써 강성옹벽에 작용하는 비선형의 토압분포를 산정할 수 있는 새로운 토압산정식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\sigma_{ahw} = \frac{\gamma HK_{awn}}{1 - K_{awn} \tan \delta \tan \alpha} \left[ \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{K_{awn} \tan \delta \tan \alpha} - \left(1 - \frac{z}{H}\right) \right] \quad (1)$$

그리고 이 식을 이용해서 비선형으로 분포하는 주동토압을 산정하기 위해 필요한 수정 주동토압계수  $K_{awn}$ 를 뒷채움재에 존재하는 임의의 미소수평요소들에 작용하는 평균연직응력( $\bar{\sigma}_v$ )에 대한 옹벽과 미소수평요소들의 경계면에 작용하는 수평응력( $\sigma_{ahw}$ )의 비로 정의하고 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$K_{awn} = \frac{\sigma_{ahw}}{\bar{\sigma}_v} = \frac{3(\cos^2 \theta + K \sin^2 \theta)}{3 - \cos^2 \theta (1 - K)} \quad (2)$$

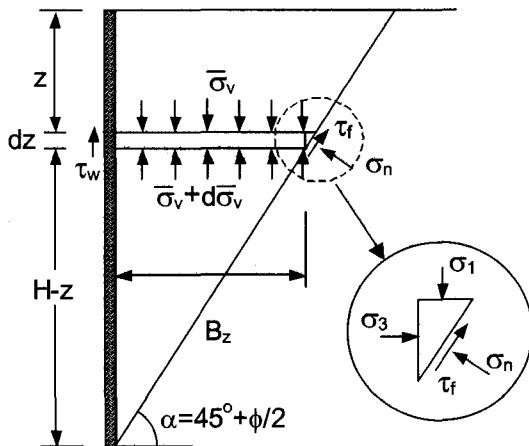


그림 2. 뒷채움재의 미소수평요소들에 작용하는 힘요소

여기서  $\delta$ 는 강성옹벽의 벽면마찰각이고  $\alpha$ 는 뒷채움재의 파괴면이 수평과 이루는 각( $45^\circ + \phi/2$ )이며,  $z$ 는 뒷채움재에서 지표면으로부터의 깊이,  $H$ 는 옹벽의 높이를 의미한다. 그리고  $K$ 는 최대주응력에 대한 최소주응력의 비로 정의되는 값으로  $K = \sigma_3/\sigma_1 = \tan^2(45^\circ - \phi/2)$ 으로 계산될 수 있으며,  $\theta$ 는 옹벽의 벽면에서 최소주응력면과 수평이 이루는 각으로 다음 식으로부터 계산될 수 있다.

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{(1 - K) \pm \sqrt{(1 - K)^2 - 4K \tan^2 \delta}}{2K \tan \delta} \right] \quad (3)$$

이 식에서 얻어지는 두 개의  $\theta$ 값 중에서 큰 것이 주동상태에 대한 것이며, 작은 것은 수동상태에 대한 것이다.

따라서 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과를 반영한 주동토압에 의해 옹벽의 각 지점에 작용하는 전단력  $S_{z,arch}$ 은 식 (1)을 뒷채움재의 지표면으로부터의 깊이 ( $z$ )에 대하여 적분함으로써 식 (4)와 같이 구해지며,

$$S_{z,arch} = \int_0^z \sigma_{ahw} dz = \frac{\gamma H^2 K_{awn}}{1 - A} \left\{ \frac{1}{1 + A} \left[ 1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{(1+A)} \right] - \frac{1}{2} \left[ 1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

주동토압에 의해 옹벽의 각 지점에 작용하는 모멘트  $M_{z,arch}$ 는 식 (5)와 같이 계산된다.

$$M_{z,arch} = \int_0^z \sigma_{ahw} (H - z) dz = \frac{\gamma H^3 K_{awn}}{1 - A} \left\{ \frac{1}{A + z} \left[ 1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^{A+z} \right] - \frac{1}{3} \left[ 1 - \left(1 - \frac{z}{H}\right)^3 \right] \right\} \quad (5)$$

여기서  $A = K_{awn} \tan \delta \tan \alpha$ 이다. 그리고 강성옹벽에 작용하는 수평주동토압  $P_{arch(h)}$ 와 옹벽의 저점에 대한 전도 모멘트  $M_{arch}$ 는 각각 식 (4)와 (5)에  $z = H$ 를 대입함으로써 다음과 같이 구해진다.

$$P_{arch(h)} = \int_0^H \sigma_{ahw} dz = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{K_{awn}}{1 + K_{awn} \tan \delta \tan \alpha} \quad (6)$$

$$M_{arch} = \frac{\gamma H^3}{3} \frac{K_{awn}}{2 + K_{awn} \tan \delta \tan \alpha} \quad (7)$$

## 2.2 토압산정식의 정확도

백(2003b)은 새로 제안된 토압산정식의 정확도를 검증하기 위하여 높이가 다른 5개의 강성옹벽( $H=2.0, 2.5,$

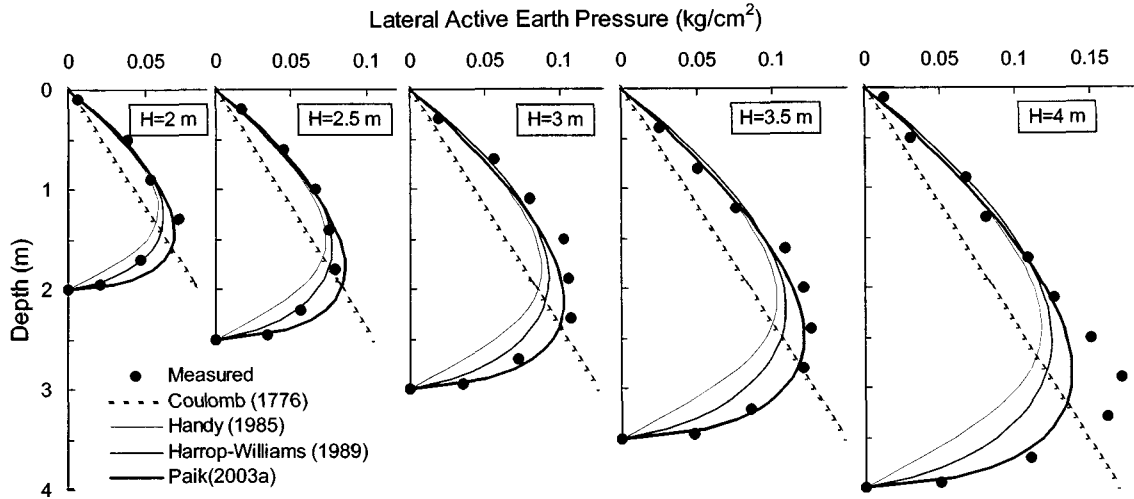


그림 3. Tsagareli(1965)의 주동토압 측정치와 예측치의 비교

3.0, 3.5, 4.0m)이 평행이동할 때 옹벽에 작용하는 주동 토압의 크기와 분포형태를 측정된 Tsagareli(1965)의 현장시험에 자신의 제안식을 포함해서 기존에 제안된 모든 토압산정식을 적용하였다. 제안된 토압산정식으로부터 얻어진 예측치들을 Tsagareli(1965)의 측정치와 비교한 결과 그림 3에 보이는 바와 같이 Coulomb의 토압이론을 제외한 나머지 토압산정식들은 비선형의 토압분포를 제공하였으며, 그 중에서도 백(2003a)의 토압산정식이 5개 옹벽 모두에 대하여 가장 측정치에 근접하는 예측치를 제공하는 것으로 나타났다. 그리고 Handy(1985)나 Harrop-Williams(1989)의 토압산정식은 옹벽의 높이가 커짐에 따라 옹벽에 작용하는 주동토압의 크기를 다소 과소평가하였으며, 옹벽의 저점을 기준으로 하는 주동토압의 작용점 높이는 과대평가하는 경향을 보였다.

### 3. Coulomb의 토압이론

Coulomb의 토압이론은 토압 산정 시 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과를 고려하지 않고 토압분포가 삼각형이라는 가정하에 토압을 산정하는 것으로, 옹벽의 뒷면이 연직이고 뒷채움재의 지표면이 수평인 경우에 옹벽에 작용하는 주동응력의 수평성분인 수평주동응력  $\sigma_{ch}$  는 식 (8)과 같다.

$$\sigma_{ch} = \gamma z K_c \cos \delta = \gamma z \frac{\cos^2 \phi}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \delta}}\right]^2} \quad (8)$$

여기서  $K_c$ 는 Coulomb의 주동토압계수이다. 그리고

Coulomb 토압에 의해 뒷채움재의 지표면으로부터  $z$  만큼 깊은 지점에 작용하는 전단력  $S_{z,coul}$ 와 모멘트  $M_{z,coul}$ 은 각각 식 (9)와 (10)과 같이 계산된다.

$$S_{z,coul} = \int_0^z \sigma_{ch} dz = \frac{\gamma z^2}{2} \frac{\cos^2 \phi}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \delta}}\right]^2} \quad (9)$$

$$M_{z,coul} = \int_0^z \sigma_{ch} (H - z) dz = \frac{\gamma z^2}{6} (3H - 2z) \frac{\cos^2 \phi}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \delta}}\right]^2} \quad (10)$$

또한 강성옹벽에 작용하는 수평주동토압  $P_{coul(h)}$ 와 옹벽의 저점에 대한 전도모멘트  $M_{coul}$ 은 각각 식 (9)와 (10)에  $z = H$ 를 대입함으로써 식 (11)과 (12)처럼 구해진다.

$$P_{coul(h)} = \int_0^H \sigma_{ch} dz = \frac{\gamma H^2}{2} \frac{\cos^2 \phi}{\left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi + \delta) \sin \phi}{\cos \delta}}\right]^2} \quad (11)$$

$$M_{coul} = \int_0^H \sigma_{ch} (H - z) dz = \frac{P_{coul(h)} H}{3} \quad (12)$$

### 4. 아칭효과가 강성옹벽의 토압과 안정성 그리고 단면에 미치는 영향

2절에서 언급하였듯이 평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형의 주동토압을 예측하기 위하여 제안된 기존의 토압산정식 중에서 백(2003a)의 제안식이 가장 실측치에 근접하는 결과를 제공하는 것으로 나타났다. 따라서 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과가 강성옹벽의 역학적인 안정성과 옹벽의 단면 및 옹벽에 배근되는 철

근량의 결정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 높이(H)가 4m이고 뒷채움재의 단위중량( $\gamma$ )이  $1.8t/m^3$ 인 강성옹벽에 대하여 아칭효과를 반영하지 않는 Coulomb의 토압이론과 아칭효과를 반영한 백(2003a)의 토압산정식을 이용하여 주동토압과 전도모멘트, 그리고 옹벽에 유발되는 위치별 전단력과 모멘트를 계산하고 그 결과들을 서로 비교하였다.

#### 4.1 주동토압과 전도모멘트에 미치는 영향

그림 4는 아칭효과를 고려한 백(2003a)의 토압산정식과 아칭효과를 고려하지 않은 Coulomb의 토압이론으로부터 계산된 주동토압의 비를 뒷채움재의 내부마찰각( $\phi$ )과 강성옹벽의 벽면마찰각( $\delta$ )에 따라 나타낸 것이다. 그림에 보이는 바와 같이 뒷채움재의  $\phi$ 와 옹벽의  $\delta$ 와 무관하게 아칭효과를 반영한 주동토압( $P_{arch(h)}$ )이 아칭효과를 반영하지 않은 주동토압, 즉 Coulomb 토압( $P_{coul(h)}$ )보다 항상 큰 것으로 나타났다. 그리고 벽면이 매끄러운( $\delta=0$ ) 경우에는 아칭효과가 발생하지 않기 때문에 아칭효과를 고려할 때와 고려하지 않을 때의 주동토압이 동일한데, 이러한 사실을 그림으로부터 확인할 수 있다. 또한  $\delta/\phi < 0.9$  인 경우에는 아칭효과를 고려할 때와 고려하지 않을 때의 주동토압 비( $P_{arch(h)}/P_{coul(h)}$ )가  $\phi$ 와 무관하게 거의 일정하지만,  $\delta/\phi \geq 0.9$  인 경우에는 옹벽의  $\delta$ 가 일정하더라도 뒷채움재의  $\phi$ 가 커짐에 따라  $P_{arch(h)}/P_{coul(h)}$ 가 증가하는 경향을 보였다. 따라서 뒷채움재의  $\phi$ 와 옹벽의  $\delta$ 가 커짐에 따라 아칭효과를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 주동토압 차이는 더욱 커지게 된다.

그림 5는 다양한 뒷채움재의  $\phi$ 와  $\delta$ 에 대하여 아칭

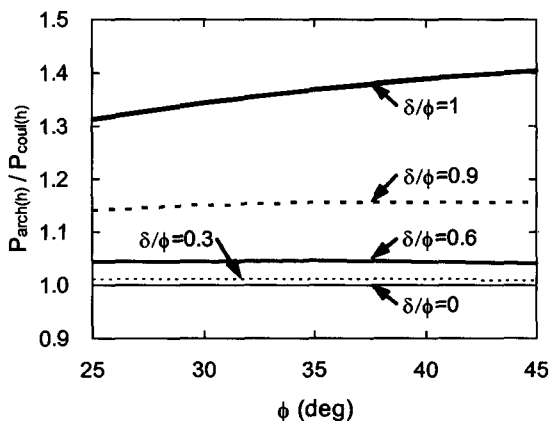


그림 4. 아칭효과의 고려 유무에 따른 수평주동토압의 비교

효과를 고려했을 때 강성옹벽에 작용하는 전도모멘트( $M_{arch}$ )와 아칭효과를 고려하지 않았을 때 옹벽에 작용하는 전도모멘트( $M_{coul}$ )의 비를 나타낸 것이다. 전도모멘트의 경우에도 주동토압의 경우와 마찬가지로 뒷채움재의  $\phi$ 와 옹벽의  $\delta$ 에 관계없이 아칭효과를 고려했을 때의 전도모멘트가 아칭효과를 고려하지 않았을 때의 전도모멘트보다 항상 크게 나타났다. 이것은 아칭효과를 반영한 주동토압의 크기와 작용점 높이가 모두가 Coulomb 토압의 크기와 작용점 높이보다 크기 때문이다. 그리고 아칭효과를 고려했을 때와 하지 않았을 때 전도모멘트의 비인  $M_{arch}/M_{coul}$ 은  $\phi$ 와  $\delta$ 가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 특히  $\delta/\phi > 0.6$  인 경우에는  $\phi$ 가 일정하더라도  $\delta$ 가 커짐에 따라  $M_{arch}/M_{coul}$ 이 급격히 증가하는 경향을 보였다. 또한  $\delta/\phi < 0.8$ 의 경우에는  $\delta$ 가 일정할 때  $\phi$ 에 따른  $M_{arch}/M_{coul}$ 의 변화가 크지 않지만  $\delta/\phi \geq 0.8$ 의 경우에는  $\delta$ 가 일정하더라도  $\phi$ 가 커지면  $M_{arch}/M_{coul}$ 이 어느정도 증가하는 경향을 보였다. 따라서 평행이동하는 강성옹벽을 아칭효과가 반영되지 않은 Coulomb 토압에 근거해서 설계하면 옹벽에 작용하는 주동토압과 전도모멘트를 과소평가함으로써 옹벽이 활동 및 전도파괴에 도달할 가능성이 높아지며, 이러한 파괴에 대한 불안정은 뒷채움재의  $\phi$ 와 옹벽의  $\delta$ 가 커질수록 증가하게 된다.

#### 4.2 강성옹벽의 단면 결정에 미치는 영향

강성옹벽이 안정하기 위해서는 옹벽이 활동파괴나 전도파괴에 대해서 안정해야 함은 물론 옹벽의 각 부분이 토압에 의해 옹벽에 유발되는 전단력과 모멘트에 대해서도 구조적으로 안정해야 한다. 즉, 옹벽의 단면과

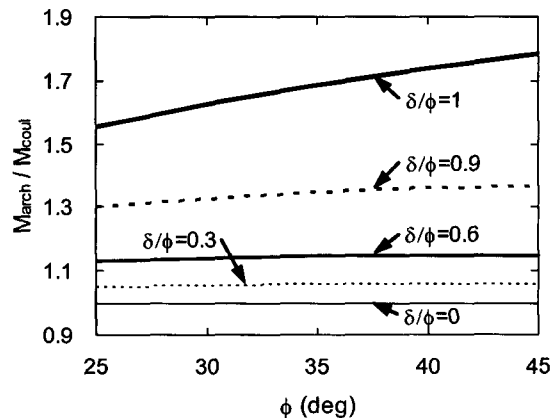


그림 5. 아칭효과의 고려 유무에 따른 전도모멘트의 비교

옹벽에 배근되는 철근량 등은 토압으로 인해 옹벽에 유발되는 전단력과 모멘트에 근거해서 결정되므로 옹벽의 각 부분이 전단력과 모멘트에 대하여 안정하고 옹벽의 단면과 철근량을 최적화해서 경제적인 시공이 이루어지도록 하기 위해서는 토압에 의해 옹벽에 유발되는 전단력과 모멘트가 정확히 산정되어야 한다. 그리고 옹벽의 각 위치에 유발되는 전단력과 모멘트를 정확히 산정하기 위해서는 무엇보다도 옹벽에 작용하는 주동토압의 크기와 분포형태가 정확히 예측되어야 한다.

그림 6은 다양한  $\phi$ 와  $\delta$ 에 대하여 아칭효과를 고려했을 때 주동토압에 의해 옹벽에 유발되는 전단력( $S_{z,arch}$ )과 아칭효과를 고려하지 않았을 때, 즉 Coulomb 토압에 의해 옹벽에 유발되는 전단력( $S_{z,coul}$ )의 차이를 옹벽의 위치별로 나타낸 것이다. 그림에 보이듯이 아칭효과를 고려했을 때가 그렇지 않았을 때보다 옹벽에 더 큰 전단력이 유발되며, 옹벽의 상부보다는 하부에서 아칭효과를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 옹벽에 유발되는 전단력의 차이( $S_{z,arch}-S_{z,coul}$ )가 큰 것으로 나타났다. 특히, 옹벽에 유발되는 전단력의 차이( $S_{z,arch}-S_{z,coul}$ )는  $\phi$ 와  $\delta$ 에

관계없이 옹벽의 저면으로부터 옹벽높이의 0.02-0.08배 되는 위치에서 최대가 되었다. 그리고 뒷채움재의  $\phi$ 가 작고 옹벽의  $\delta$ 가 클수록 아칭효과의 고려 유무에 따라 옹벽에 유발되는 전단력의 차이( $S_{z,arch}-S_{z,coul}$ )가 커지는 것으로 밝혀졌다. 따라서 아칭효과를 고려해서 토압을 산정하고, 그 결과에 근거해서 옹벽의 단면을 결정하면 Coulomb의 토압이론을 이용해서 설계할 때보다 전체적으로(특히 옹벽의 상부보다는 하부에서) 옹벽의 단면이 커지게 되며, 아칭효과의 고려에 따른 옹벽 단면의 증가는 뒷채움재의  $\phi$ 가 작고 옹벽의  $\delta$ 가 커질수록 더욱 커지게 된다.

그림 7은 다양한  $\phi$ 와  $\delta$ 에 대하여 아칭효과를 고려했을 때와 고려하지 않았을 때 토압에 의해 옹벽에 유발되는 모멘트의 차이를 옹벽의 위치별로 나타낸 것이다. 전단력의 경우와 마찬가지로 옹벽의 전체 높이에 걸쳐 아칭효과를 고려했을 때 옹벽에 유발되는 모멘트( $M_{z,arch}$ )가 아칭효과를 고려하지 않았을 때의 모멘트( $M_{z,coul}$ )보다 항상 컸으며, 이들 모멘트의 차이( $M_{z,arch}-M_{z,coul}$ )는 뒷채움재의  $\phi$ 가 작아지고 옹벽의  $\delta$ 가 커질수록 더욱 증가하

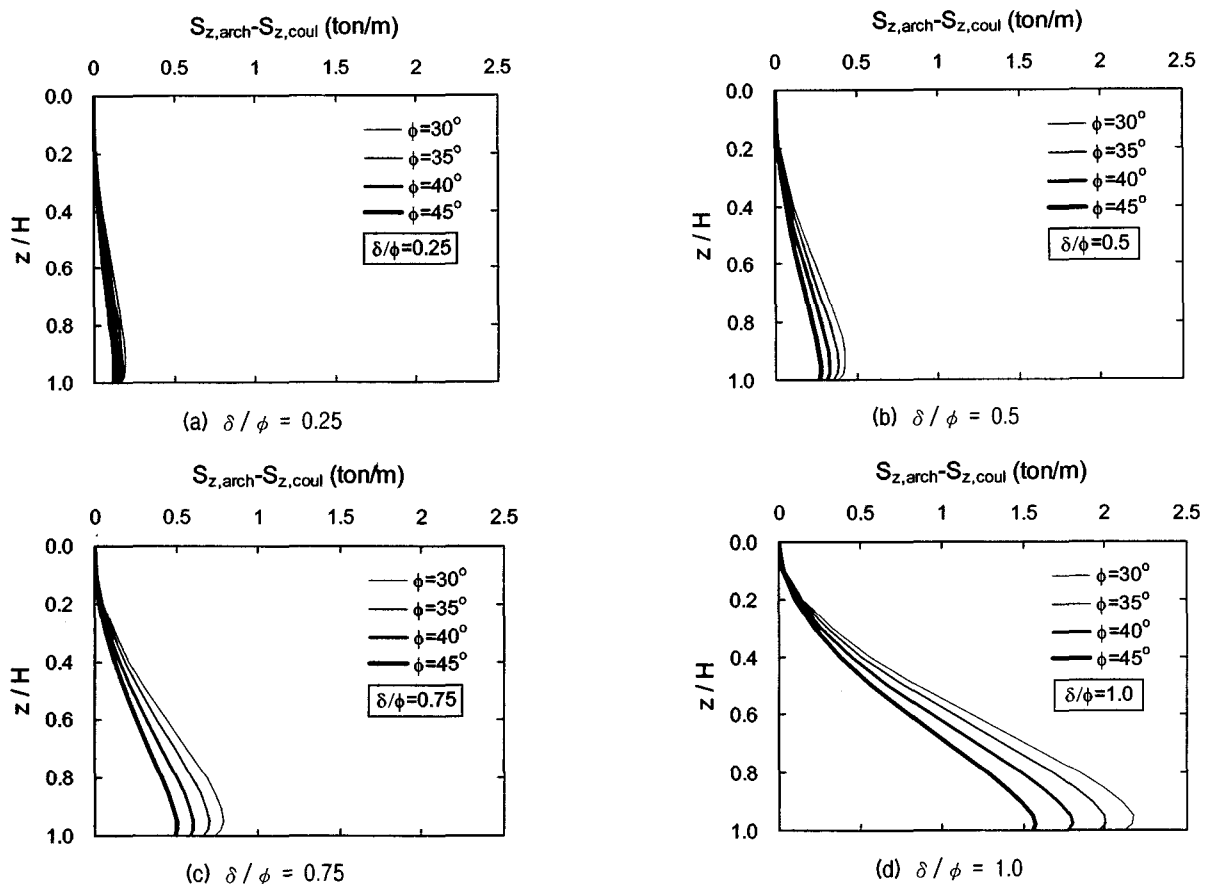


그림 6. 아칭효과의 고려 유무에 따라 옹벽에 유발되는 전단력의 차이

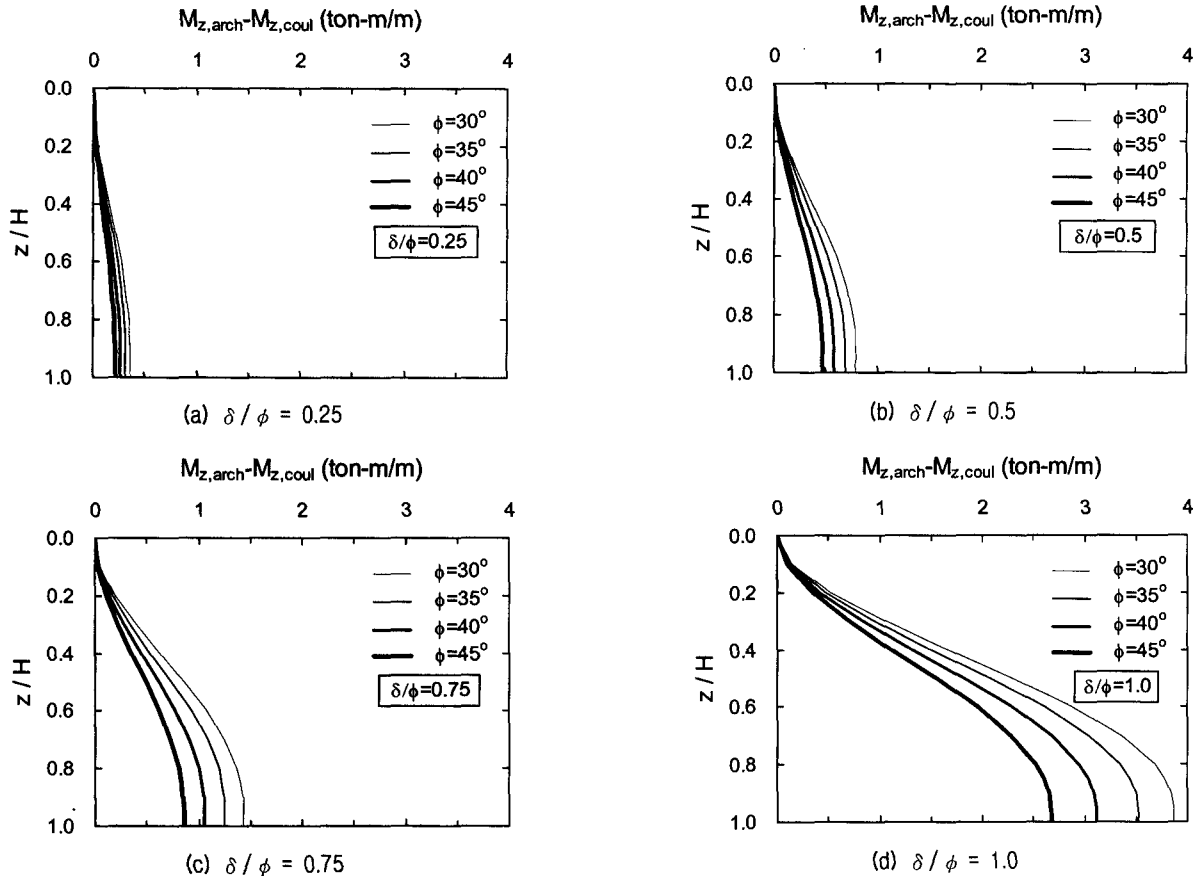


그림 7. 아칭효과와 고려 유무에 따라 옹벽에 유발되는 모멘트의 차이

는 경향을 보였다. 그리고 아칭효과와 고려 유무에 따라 옹벽에 유발되는 모멘트의 차이는 뒷채움재의  $\phi$ 와 강성 옹벽의  $\delta$ 에 무관하게 옹벽의 저면으로부터 옹벽높이의 0.02-0.08배 되는 위치에서 최대가 되었다. 이런 점을 고려하면 아칭효과를 고려하지 않는 Coulomb 토압에 근거해서 평행이동하는 강성옹벽의 단면과 철근량을 결정하면 옹벽에 작용하는 모멘트에 대하여 옹벽이 구조적으로 취약할 수 있으며, 옹벽의 하부(특히 옹벽높이의 0.02-0.08배되는 지점)에서 그 취약한 정도가 더 커짐을 알 수 있다. 따라서 토압으로 인해 옹벽에 유발되는 모멘트에 대해서 평행이동하는 강성옹벽의 단면이 구조적으로 안정하기 위해서는 아칭효과를 고려해서 주동 토압을 산정하고, 그 결과에 근거해서 옹벽의 단면과 옹벽의 배면부에 배근되는 철근량을 결정하는 것이 바람직하다.

### 5. 아칭효과가 강성옹벽의 안정성에 미치는 영향에 대한 사례

아칭효과가 강성옹벽의 역학적인 안정성, 즉 활동 및

전도파괴에 미치는 영향에 대하여 조사하기 위하여 그림 8과 같이 높이(H)가 5.7m이고 저판의 길이가 2.5m ( $x_1=0.3m, x_2=1.2m, x_3=0.6m, x_4=0.4m$ )인 중력식 강성옹벽을 가정하였다. 그리고 뒷채움재의 단위중량은  $\gamma_1=1.8t/m^3$ 이고 내부마찰각은  $\phi_1=33^\circ$ , 옹벽의 저판 아래에 존재하는 흙의 내부마찰각은  $\phi_2=30^\circ$ 이며, 옹벽의 벽면마찰각은  $\delta=2\phi/3$ 이고 옹벽의 축조에 사용된 콘크리트의 단위중량은  $\gamma_c=2.3t/m^3$ 으로 하였다.

한편, Rankine 토압을 이용해서 옹벽의 안정성을 검토하는 경우에는 Rankine 토압과 옹벽의 자중 뿐만 아니라 옹벽의 뒷꿈치 위에 존재하는 흙의 자중도 안정성 해석에 고려하는 것이 일반적이다. 그러나 Coulomb 토압을 이용해서 중력식 옹벽의 안정성을 검토하는 경우에는 Coulomb 토압과 옹벽의 자중만을 고려해야 한다 (Das, 1999). 따라서 그림 8에 보이는 중력식 옹벽의 활동과 전도파괴에 대한 안정성 검토에서 옹벽의 뒷꿈치 위에 존재하는 흙의 자중은 고려하지 아니하였다.

먼저, 아칭효과가 고려되지 않은 Coulomb 토압을 구하기 위하여 Coulomb의 주동토압계수  $K_c$ 을 산정하면 식 (13)과 같으며, 옹벽에 작용하는 주동토압의 수평력

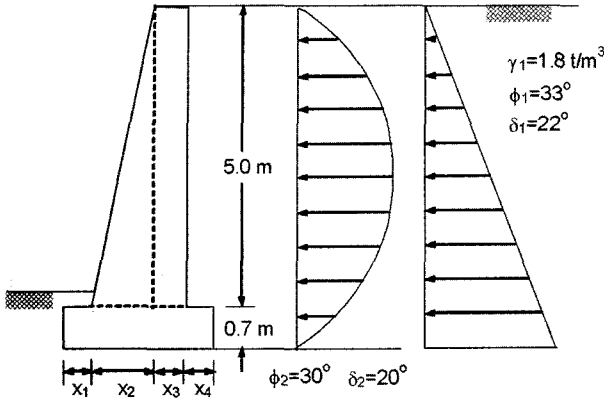


그림 8. 중력식 강성옹벽의 안정성 검토

$$K_c = \frac{\cos^2 \phi_1}{\cos \delta_1 \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\phi_1 + \delta_1) \sin \phi_1}{\cos \delta_1}} \right]^2}$$

$$= \frac{\cos^2 33}{\cos 22 \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(33+22) \sin 33}{\cos 22}} \right]^2} = 0.26 \quad (13)$$

$P_{coul(h)}$  과 연직력  $P_{coul(v)}$ , 그리고 Coulomb 토압에 의한 전도모멘트  $M_{coul}$  은 식 (11)과 (12)를 이용해서 다음과 같이 계산된다.

$$P_{coul(h)} = \frac{\gamma_1 H^2}{2} K_c \cos \delta_1$$

$$= \frac{1.8 \times 5.7^2}{2} \times 0.26 \times \cos 22 = 7.17 \text{ t/m} \quad (14)$$

$$P_{coul(v)} = \frac{\gamma_1 H^2}{2} K_c \sin \delta_1$$

$$= \frac{1.8 \times 5.7^2}{2} \times 0.26 \times \sin 22 = 2.90 \text{ t/m} \quad (15)$$

$$M_{coul} = P_{coul(h)} \times \frac{H}{3} = 7.17 \times \frac{5.7}{3} = 13.62 \text{ t} \cdot \text{m/m} \quad (16)$$

그리고 옹벽의 설계 시 아칭효과를 고려하지 않는 경우에 강성옹벽의 활동파괴와 전도파괴를 저지하는 수평저항력  $P_{R,coul}$  과 저항모멘트  $M_{R,coul}$  은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{R,coul} = (W_c + P_{coul(v)}) \tan \delta_2$$

$$= (15.99 + 2.90) \tan 20 = 10.90 \text{ t/m} \quad (17)$$

$$M_{R,coul} = M_c + P_{coul(v)} \times 2.1$$

$$= 22.75 + 2.90 \times 2.1 = 28.83 \text{ t} \cdot \text{m/m} \quad (18)$$

여기서  $W_c$  와  $M_c$  는 옹벽의 자중과 그로 인한 저항모멘트를 의미한다. 따라서 활동파괴에 대한 안전율은  $FS = P_{R,coul} / P_{coul(h)} = 10.9 / 7.17 = 1.52$  로, 전도파괴에 대

한 안전율은  $FS = M_{R,coul} / M_{coul} = 28.83 / 13.62 = 2.12$  로 계산된다. 결국 옹벽의 활동파괴와 전도파괴에 대한 최소 안전율이 각각 1.5와 2.0이라는 것을 고려할 때 아칭효과를 고려하지 않은 Coulomb 토압에 근거하면 그림 8에 보이는 중력식 강성옹벽은 활동과 전도파괴에 대하여 모두 안정하게 된다.

한편, 아칭효과가 반영된 주동토압을 산정하기 위하여 중력식 옹벽의 뒷채움재에서 최소주동력면과 수평이 이루는 각  $\theta$  를 식 (3)으로부터 계산하면

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{(1-K) + \sqrt{(1-K)^2 - 4K \tan^2 \delta_1}}{2K \tan \delta_1} \right]$$

$$= \tan^{-1} \left[ \frac{(1-0.29) + \sqrt{(1-0.29)^2 - 4 \times 0.29 \times \tan^2 22}}{2 \times 0.29 \times \tan 22} \right] = 79^\circ \quad (19)$$

이 되며, 여기서  $K = \tan^2(45 - \phi_1/2)$  로 계산된다. 그리고 뒷채움재에 존재하는 미소수평요소  $\sigma_v$  에 작용하는 평균연직응력  $(\bar{\sigma}_v)$  에 대한 토압 작용면에 작용하는 수평응력  $(\sigma_{ahw})$  의 비로 정의되는 수정 주동토압계수  $K_{awn}$  는 식 (2)로부터 식 (20)과 같이 계산된다.

$$K_{awn} = \frac{3(\cos^2 \theta + K \sin^2 \theta)}{3 - \cos^2 \theta (1-K)}$$

$$= \frac{3(\cos^2 79 + 0.29 \times \sin^2 79)}{3 - \cos^2 79 (1-0.29)} = 0.32 \quad (20)$$

따라서 아칭효과가 고려된 주동토압의 수평력  $P_{arch(h)}$  과 연직력  $P_{arch(v)}$ , 그리고 주동토압에 의한 전도모멘트  $M_{arch}$  은 식 (6)와 식 (7)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$P_{arch(h)} = \frac{\gamma_1 H^2}{2} \frac{K_{awn}}{1 + K_{awn} \tan \delta_1 \tan \alpha}$$

$$= \frac{1.8 \times 5.7^2}{2} \frac{0.32}{1 + 0.32 \times \tan 22 \times \tan 61.5} = 7.59 \text{ t/m} \quad (21)$$

$$P_{arch(v)} = P_{arch(h)} \times \tan \delta_1 = 7.59 \times \tan 22 = 3.07 \text{ t/m} \quad (22)$$

$$M_{arch} = \frac{\gamma_1 H^3}{3} \frac{K_{awn}}{2 + K_{awn} \tan \delta_1 \tan \alpha}$$

$$= \frac{1.8 \times 5.7^3}{3} \frac{0.32}{2 + 0.32 \times \tan 22 \times \tan 61.5} = 15.97 \text{ t} \cdot \text{m/m} \quad (23)$$

여기서  $\alpha$  는 뒷채움재의 파괴면과 수평이 이루는 각으로  $\alpha = 45 + \phi_1/2 = 61.5^\circ$  로 계산된다.

그리고 옹벽의 설계 시 아칭효과를 고려하는 경우에 옹벽의 활동 및 전도파괴를 저지하는 수평저항력  $P_{R,arch}$  과 저항모멘트  $M_{R,arch}$  은 다음과 같이 계산된다.



$$P_{R, arch} = (W_c + P_{arch(v)}) \tan \delta_2$$

$$= (15.99 + 3.07) \tan 20 = 11.00 \text{ t/m} \quad (24)$$

$$M_{R, arch} = (M_c + P_{arch(v)} \times 2.1)$$

$$= 22.75 + 3.07 \times 2.1 = 29.19 \text{ t} \cdot \text{m/m} \quad (25)$$

따라서 아칭효과를 고려하면 강성옹벽의 활동파괴에 대한 안전율은  $FS = P_{R, arch} / P_{arch(h)} = 11.00 / 7.59 = 1.45$  이고, 전도파괴에 대한 안전율은  $FS = M_{R, arch} / M_{arch} = 29.19 / 15.97 = 1.83$  으로 계산되므로 그림 8에 보이는 옹벽은 활동파괴와 전도파괴에 대하여 모두 불안정하게 된다.

이상의 사례를 통해서 보았듯이 아칭효과를 고려하지 않는 Coulomb의 토압이론에 근거해서 평행이동하는 강성옹벽을 설계할 경우 옹벽이 활동 및 전도파괴에 대하여 안정한 것으로 판명된 경우라 할지라도 아칭효과를 고려해서 옹벽의 안정성을 검토하면 옹벽이 활동파괴나 전도파괴에 대하여 불안정한 것으로 나타난다. 따라서 아칭효과를 고려해서 옹벽에 작용하는 주동토압을 산정하고, 그 결과에 근거해서 옹벽을 설계하는 것이 옹벽의 활동 및 전도파괴에 대한 안정성 확보 측면에서 바람직한 것으로 생각된다.

## 6. 결론

강성옹벽이 변위를 일으키게 되면 뒷채움재에서는 아칭효과가 발생하게 되며, 그로 인해 옹벽에 작용하는 주동토압은 삼각형이 아닌 곡선의 형태로 분포하게 된다. 결국 주동토압의 크기와 분포형태에 직접적인 영향을 미치는 아칭효과는 강성옹벽의 활동파괴와 전도파괴에 대한 안정성은 물론 옹벽 단면의 결정에도 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 강성옹벽이 평행이동하는 경우에 뒷채움재에서 발생하는 아칭효과가 옹벽에 작용하는 주동토압과 옹벽의 안정성, 그리고 옹벽의 단면 결정에 미치는 영향을 규명하기 위하여 토압산정 시 아칭효과를 고려하지 않는 백(2003a)의 토압산정식과 아칭효과를 고려하지 않는 Coulomb의 토압이론을 이용하여 주동토압을 산정하고 그 결과를 서로 비교하였다.

연구결과에 따르면 뒷채움재의 내부마찰각과 옹벽의 벽면마찰각에 관계없이 아칭효과를 고려했을 때의 주동토압이 Coulomb 토압보다 항상 컸으며, 토압에 의해 옹벽에 작용하는 전도모멘트도 아칭효과를 고려할 때

가 고려하지 않을 때보다 큰 것으로 나타났다. 그리고 아칭효과의 고려 유무에 따라 옹벽에 작용하는 주동토압의 차이와 전도모멘트의 차이는 뒷채움재의  $\phi$ 가 작아지고 옹벽의  $\delta$ 가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 따라서 Coulomb의 토압이론에 근거해서 안정하게 설계된 강성옹벽의 경우라도 아칭효과로 인해 옹벽이 활동 및 전도파괴에 대하여 불안정할 수 있으며, 이러한 옹벽의 불안정은 뒷채움재의  $\phi$ 가 작아지고 옹벽의  $\delta$ 가 커질수록 증가하게 된다.

한편, 토압에 의해 옹벽의 각 지점에 유발되는 전단력과 모멘트를 비교한 결과 옹벽의 전 높이에 걸쳐 아칭효과를 고려했을 때가 고려하지 않았을 때보다 항상 큰 것으로 나타났다. 그리고 아칭효과의 고려 유무에 따라 옹벽에 유발되는 전단력의 차이와 모멘트의 차이는 옹벽의 상부보다는 하부에서 컸으며(특히 옹벽 저면으로부터 옹벽 높이의 0.02-0.08배되는 지점에서 최대), 이들 전단력과 모멘트의 차이는 뒷채움재의  $\phi$ 가 작아지고 옹벽의  $\delta$ 가 커질수록 증가하는 경향을 보였다. 따라서 아칭효과를 고려하지 않고 Coulomb의 토압이론에 근거해서 단면이 결정된 강성옹벽은 옹벽에 유발되는 전단력과 모멘트에 의해 옹벽의 단면이 파괴될 수도 있다.

## 감사의 글

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다(KRF-2003-002-D00325).

## 참고 문헌

1. 백규호 (2003a), "평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형 주동토압: I. 정식화", *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제1호, pp. 181-190.
2. 백규호 (2003b), "평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형 주동토압: II. 적용성", *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제1호, pp.191-199.
3. Das, B. M. (1999), *Principles of foundation engineering*, 4th Ed., PWS Publishing, pp.390-392.
4. Fang, Y., and Ishibashi, I. (1986), "Static earth pressures with various wall movements", *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.112, No.3, pp.317-333.
5. Handy, R.L. (1985), "The arch in soil arching", *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.111, No.3, pp.302-318.
6. Harrop-Williams, K. O. (1989), "Geostatic wall pressures", *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.115, No.9, pp.1321-1325.
7. Janssen, H. A. (1895), "Versuche uber getreidedruck in silozellen",

*Zeitschrift, Verein Deutscher Ingenieure*, 39, p.1045 (partial English translation on Proceeding of Institute of Civil Engineers, London, England, 1986, p.553.)

8. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Willey and Sons, New York, N.K.

9. Tsagareli, Z. V. (1965), "Experimental investigation of the

pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and horizontal backfill surface", *J. Soil Mech. and Found. Eng.*, ASCE, Vol.91, No.4, pp.197-200.

10. Wang, Y. Z. (2000), "Distribution of earth pressure on a retaining wall", *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.83-88.

(접수일자 2004. 5. 12, 심사완료일 2004. 8. 17)