

# 격자배치 성토지지말뚝의 아칭효과에 대한 이론적 연구

이승현  
선문대학교 토목공학과

## A Theoretical Study on Arching Effect of Embankment Pile Grid

Seung-Hyun Lee

Division of Architecture, Architectural Engineering and Civil Engineering, Sunmoon University

**요약** 이론적 연구를 통하여 말뚝지름과 말뚝설치간격, 성토체의 내부마찰각 그리고 성토고가 성토지지말뚝의 아칭효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 성토지지말뚝 상부의 성토체에 발생하는 아치모델에 대하여 아칭효율을 계산함에 있어 아치의 천정부과외 및 말뚝캡에 작용하는 하중계산을 통한 아칭효율이 같게 되는 임계 상대간격비를 구할 수 있는 식을 제시하였으며 설계에 유용하게 쓰일 것으로 판단된다. 본 연구에서 수행된 계산결과에 따르면 상대간격비가 작은 경우는 말뚝캡에 작용하는 하중을 통해 계산되는 아칭효율이 설계를 지배하게 됨을 알 수 있으며 상대간격비가 커질수록 아치의 천정부과외에 의한 아칭효율이 설계를 지배함을 알 수 있다. 말뚝중심간 설치간격에 대한 말뚝지름의 비를 나타내는  $\beta$ 값이 커질수록 말뚝캡에 작용하는 하중에 의해 계산되는 아칭효율이 설계를 지배하게 되는 임계 상대간격비가 작아짐을 알 수 있었는데  $\beta$ 값이 0.5인 경우 임계 상대간격비는 0.35이며  $\beta$ 값이 0.2인 경우 임계 상대간격비는 0.85이었다. 계산결과에 따르면 Rankine 수동토 압계수( $K_p$ )가 클수록 임계 상대간격비는 작아져서  $K_p$ 가 5인 경우 임계 상대간격비는 0.23이었으며  $K_p$ 가 2인 경우 임계 상대간격비는 0.85이었다. 말뚝캡이 성토지반에 대해 차지하는 면적비가 9%인 경우 아칭효율은 54%이었으며 성토체의 수동토 압계수가 3인 경우 아칭효율은 61%이었으며 두 경우 모두 말뚝캡에 작용하는 하중에 의해 계산되는 아칭효율이 지배하는 상대간격비가 0.5보다 큼을 알 수 있어 실제적인 설계에 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

**Abstract** The influence of the pile diameter, center to center pile spacing, internal friction angle of embankment soil, and height of embankment on the arching efficacy of the embankment pile was investigated. The arching efficacy, which was derived by the arch model developed in the embankment soil was calculated using two methods, one that considers crown failure of the arch and the other that considers load on the pile cap and critical relative spacing ratio for which the arching efficacy calculated by the two methods are the same. According to the computed results in this study, the arching efficacy calculated from a consideration of the load on pile cap governs when the relative spacing ratio becomes smaller and that calculated from the theory of crown failure governs when the relative spacing ratio becomes larger. The critical relative spacing ratio below which the arching efficacy calculated from a consideration of the load on pile cap governs the design decreases with increasing value, which is defined by the ratio of the pile diameter to the pile center to center spacing. Critical relative spacing ratios, which correspond to the values of 0.5 and 0.2 were 0.35 and 0.85, respectively. Considering the computed results, the critical relative spacing ratio decreases with increasing Rankine passive earth pressure coefficient and critical relative spacing ratios, which correspond to values of 5 and 2, were 0.23 and 0.85, respectively. The arching efficacy, which corresponds to the area ratio of 9%, was 54% and the one that corresponds to the value of 3 was 61%; the critical relative spacing ratios, which correspond to those arching efficacies, were greater than 0.5.

KeyWords : Arching efficacy, Embankment pile, Crwon failure, Load on the pile cap, Critical relative spacing ratio

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

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

Received September 5, 2016

Revised (1st October 14, 2016, 2nd November 7, 2016)

Accepted January 6, 2017

Published January 31, 2017

### 1. 서론

흙에서의 아칭효과에 대하여 Terzaghi[1]는 낙하문(trap door)장치를 통해 그 매커니즘을 설명한 바 있는데 아칭효과란 상대적 변위를 일으키는 두 토체에 대해 전단응력을 통해 압력을 전이시키는 현상이라 정의할 수 있다[2]. 성토지말뚝(embankment pile)이란 연약지반을 관통하여 하부의 단단한 기초지반에 설치되어 말뚝 상부의 성토체에 의한 하중을 지지하도록 하는 목적의 말뚝으로서 교대배면 성토체 하부의 연약지반에 적용되거나[3]저장탱크 하부의 연약지반에 적용된 경우[4]가 대표적인 적용 예라 할 수 있다. 성토지말뚝의 효과는 두 가지로 요약될 수 있는데 연약지반을 보강하고 연약지반에 전달되는 하중을 경감시키는 역할이 그것이다. 많은 경우 성토지말뚝의 적용이 경제적이고 효과적인데 급속시공이 필요한 경우나 성토체의 침하량을 최소화시킬 필요가 있는 경우 유용하다 할 수 있다. 성토지말뚝의 말뚝캡의 면적이 성토면의 10%정도일 때 성토하중의 60%를 부담함을 보여주는 현장 적용예도 있다[5]. 그러나 여전히 많은 설계자들이 성토지말뚝이 부담하는 하중에 대한 확신을 갖지 못하는 점이 성토지말뚝의 적용을 어렵게 하는 걸림돌이라 할 수 있다. 본 연구에서는 성토지말뚝에 발현되는 아칭효과에 대한 이론적 접근법을 통해 성토지말뚝에 의한 아칭효율을 말뚝 폭, 말뚝간격, 성토체의 강도정수 그리고 성토체의 높이를 달리하여 살펴봄으로써 성토지말뚝의 효과를 정량적으로 검증하고자 하였다.

### 2. 아칭이론

#### 2.1 평면 변형을 상태에서의 아칭효과

Fig. 1에서 지면(紙面)에 수직한 방향으로 말뚝캡 길이가 상당히 긴 평면변형률조건에서의 아칭효과를 고려한다. Fig. 1에서 H는 성토고를 나타내고 d는 말뚝캡의 폭을 의미하며 s는 인접해 있는 말뚝캡 중심간 거리를 의미한다. Fig. 1(a)에서 아치내의 미소요소 A를 확대하여 나타내면 Fig. 1(b)와 같다.

Fig. 1(a)에 나타낸 아치를 포함하는 밴드부분에서 아치를 제외한 채움흙(fill)의 중량은 무시하고 등방응력상태(isotropic stress state)에 있다고 보아 강도가 발휘되지 않는 부분으로 고려한다. 아치내에서는 접선방향이

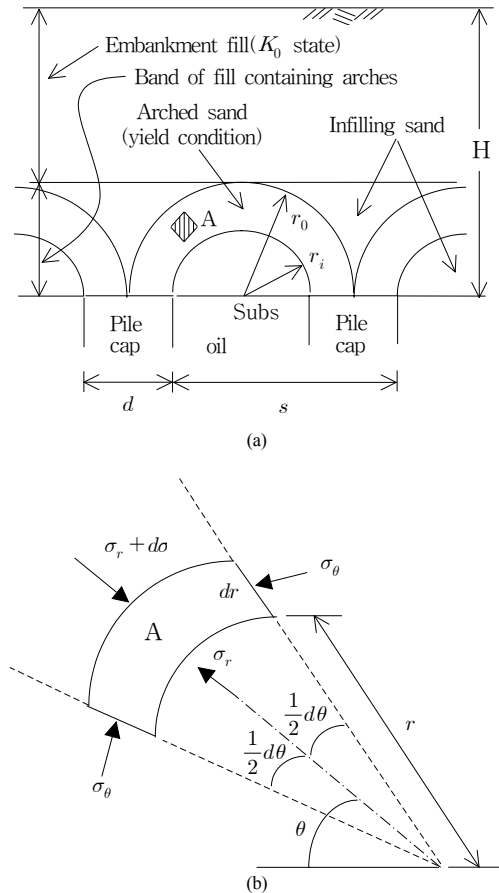


Fig. 1. Plain strain arching problem  
 (a) Arches in embankment fill for plain strain  
 (b) Stresses on the small element(plain strain condition)

최대주응력방향이 되고 반지름방향이 최소주응력방향이 된다. 아치내에 있는 흙의 중량을 무시하고 Fig. 1(b)에서 반지름방향으로의 힘의 평형조건을 고려하면 식 (1)과 같이 정리된다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{1}$$

Fig. 1(a)에 나타나 있는 바와 같이 아치내부의 흙은 항복상태에 있으며 Fig. 1(b)에서  $\sigma_\theta = K_p \sigma_r$ 의 관계가 성립하고  $K_p$ 는 Rankine의 수동토압계수이다. 따라서 식 (1)을 적분하면 식 (2)와 같고 식 (2)에서  $C_1$ 는 적분상수이다.

$$\sigma_r = C_1 r^{K_p - 1} \tag{2}$$

Fig. 1(a)에서 아치의 천정부(crown)에 작용하는 연직 응력은  $\sigma_0 = \gamma(H-s/2)$ 이고 이는 경계조건이 되는데 이를 식 (2)에 대입하여 적분상수  $C_1$ 을 결정할 수 있고 식 (2)는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\sigma_r = \gamma(H-s/2) \left( \frac{2r}{s} \right)^{K_p-1} \quad (3)$$

아치의 내측면(inner surface of the arch)에 작용하는 반지름방향응력은 식 (4)와 같다.

$$\sigma_i = \sigma_{r=(s-b)/2} = \gamma(H-s/2) \left( \frac{s-d}{s} \right)^{K_p-1} \quad (4)$$

말뚝에 의해 지지되는 아칭효율(arching efficacy),  $E$ 는 성토하중에 대하여 말뚝에 의해 부담되는 하중의 비로 정의되며 식 (5)와 같게 된다.

$$E = \frac{\gamma H s - \sigma_i (s-d)}{\gamma H s} \quad (5)$$

$$= 1 - \left( 1 - \frac{s}{2H} \right) \left( 1 - \frac{d}{s} \right)^{K_p}$$

아치를 구성하는 모래의 자중을 고려하는 경우 위험영역(critical zone)은 아치의 천정부(crown)가 되고 아치의 다른 부분에서의 응력비는  $K_p$ 보다 작게 된다. 이 경우에 대한 해석은 Hewlett의 연구[6]를 참조할 수 있다.

### 2.2 말뚝의 격자배치에 의한 아칭효과

성토지지말뚝으로 많이 쓰이는 말뚝배치형태는 Fig. 2에 나타나 있는 바와 같이 말뚝을 격자형태로 배열하는 것이다. Fig. 2에서 아치의 모양은 일련의 돔형태를 띄게 되는데 돔의 천정부(crown)는 근사적으로 반구형태가 되고 그 반지름은 말뚝격자의 대각선길이의 반이 된다.

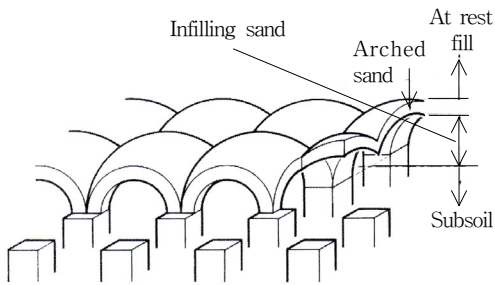
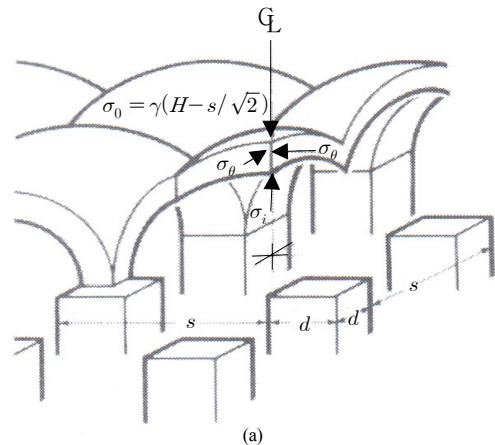


Fig. 2. Isometric view of pile caps and arches[5]

Fig. 2에 나타나 있는 아치의 경우 돔의 천정부가 가장 약한 부분이 될 필요는 없는데 아치의 파괴는 돔의 천정부 또는 말뚝캡 윗부분 둘 중 하나에서 먼저 시작된다고 볼 수 있다. 말뚝캡 위에서의 지지력파괴는 얇은 기초의 지지력문제와 유사한데 아래위가 뒤바뀐 형태가 된다. 따라서 표준적인 지지력계수를 써서 말뚝캡에 작용하는 최대압력을 계산할 수 있지만 여기에는 두 가지 어려움이 있다[5]. 첫 번째로 아래위가 뒤바뀐 지지력파괴의 특성은  $N_c$ 의 기여를 음수로 해야 하며 이러한 접근법이 명확한가 하는 점이 있어서는 의문이 있다. 두 번째로는 인접해 있는 두 개의 말뚝캡이 가까이 있으므로 지지력파괴에 있어 상호작용효과를 고려해야 하며 표준적인 방법을 통해서 이러한 효과를 정량적으로 나타내기가 어렵다. 이러한 난점들을 감안하여 지지력을 평가하기 보다는 말뚝캡에 접촉해 있는 아치에서의 접선방향응력을 적분함으로써 말뚝캡에 작용하는 하중을 계산하여 아칭효과를 정량적으로 평가하는 방법을 고려할 수 있다. 아치의 천정부(crown)와 말뚝캡부분(base)에서의 해석을 통해 두 개의 독립적인 아칭효율을 얻을 수 있고 설계시에는 이들 중 작은 값을 적용한다.

#### (가) 아치의 천정부 파괴

아치의 천정부 파괴를 고려하는 경우의 해석은 구형모양(spherical geometry)과 자중을 고려하는 점을 제외하고 평면변형률의 경우와 유사하다. Fig. 3(a),(b),(c)는 각각 말뚝의 격자배치에 따른 천정부의 등각투영도와 말뚝캡과 돔의 천정부를 지나는 대각선 아치 그리고 천정부에 있는 미소 흠요소에 작용하는 응력상태를 나타내고 있다. Fig. 3(c)를 참조하여 아치의 천정부에 있는 흠요소에 대한 연직방향 힘의 평형조건에 의해 식 (6)을 얻는다.



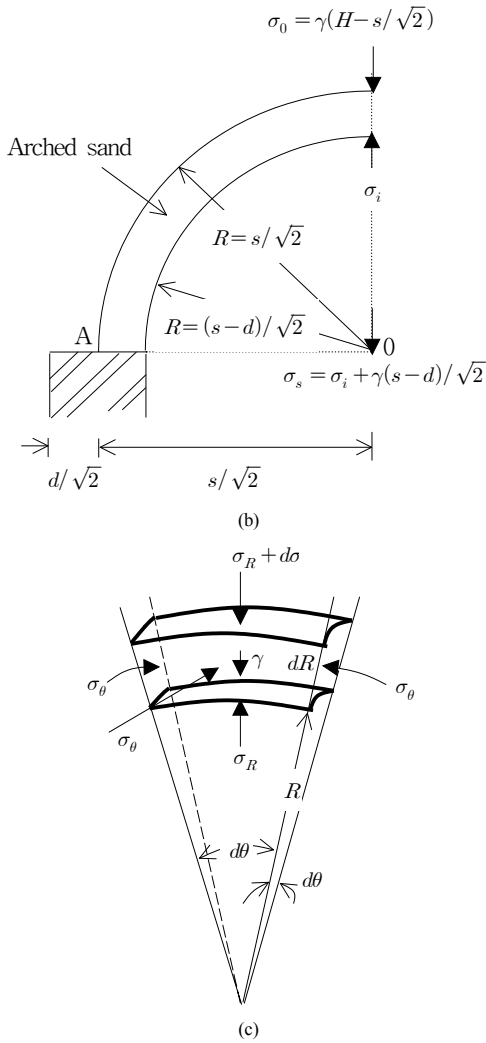


Fig. 3. Analysis of arching at the crown of a dome[5]  
 (a) Isometric view of general arrangement focusing on the crown  
 (b) Diagonal section of arch through a pile cap and dome crown  
 (c) Element of arched sand at the crown of a dome

$$\frac{d\sigma_R}{dR} + \frac{2(\sigma_R - \sigma_\theta)}{R} = -\gamma \quad (6)$$

식 (6)에 나타나 있는 응력에 대해서도 식 (1)에서와 같은 주응력비가 성립하므로  $\sigma_\theta$ 를  $\sigma_R$ 로 나타낼 수 있고 이를 적분한 다음 Fig. 3(b)에서  $R = s/\sqrt{2}$ 인 경우  $\sigma_R = \gamma(H - s/\sqrt{2})$ 인 경계조건을 적용하여 적분상수를 결정하면 식 (6)의 해는 식 (7)과 같게 된다.

$$\sigma_R = \frac{\gamma\{H(2K_p - 3) + \sqrt{2}s(1 - K_p)\}}{(2K_p - 3)(s/\sqrt{2})^{2(K_p - 1)}} R^{2(K_p - 1)} + \frac{\gamma}{2K_p - 3} R \quad (7)$$

식 (7)로부터  $R = (s - d)/\sqrt{2}$ 를 대입하여  $\sigma_i$ 를 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_i = \gamma(1 - d/s)^{2(K_p - 1)} \left\{ H - (\sqrt{2}s) \frac{K_p - 1}{2K_p - 3} \right\} + \frac{\gamma}{2K_p - 3} \left( \frac{s - d}{\sqrt{2}} \right) \quad (8)$$

따라서 Fig. 3(b)에서 원지반면(subsoil)에 작용하는 전연직응력( $\sigma_s$ )은 그림에 나타나 있는 바와 같이 식 (9)와 같게 된다.

$$\sigma_s = \gamma(1 - d/s)^{2(K_p - 1)} \left\{ H - (\sqrt{2}s) \frac{K_p - 1}{2K_p - 3} \right\} + \sqrt{2}\gamma(s - d) \left( \frac{K_p - 1}{2K_p - 3} \right) \quad (9)$$

식 (9)에 의한 응력이 원지반면에 균등하게 작용한다고 가정하면 아칭효율은 Fig. 4를 고려하여 식 (10)과 같게 된다. Fig. 4에서 빗금친 부분의 면적은  $(s^2 - d^2)$ 이며  $\sigma_s$ 가 작용하는 부분이다.

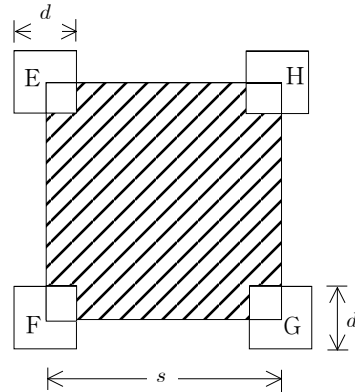


Fig. 4. Consideration of area for calculating efficacy

$$E = \frac{\gamma H s^2 - (s^2 - d^2) \sigma_s}{\gamma H s^2} = 1 - (1 - \beta^2)(A - AB + C) \quad (10)$$

식 (10)에서  $\beta = d/s$ 이고  $A, B, C$ 는 다음과 같다.

$$A = (1 - \beta)^{2(K_p - 1)}$$

$$B = \frac{\sqrt{2}s}{H} \left( \frac{K_p - 1}{2K_p - 3} \right)$$

$$C = \frac{\sqrt{2}s(1 - \beta)}{H} \left( \frac{K_p - 1}{2K_p - 3} \right)$$

식 (10)에서  $s/H$ 는 상대간격비(relative spacing ratio)로 정의한다.

**(나) 말뚝캡에 작용하는 하중**

말뚝캡에 대해서는 네 개의 평면변형을 상태에 있는 아치를 생각해 볼 수 있으며 각각의 아치는 Fig. 5(a),(b)에 나타나 있는 바와 같이 말뚝캡의 각 사분면(quadrant)을 차지하게 된다. Fig. 5(c)는 Fig. 5(b)에 나타나 있는 말뚝캡 근처의 미소요소 A부분에 작용하는 응력상태를 나타내고 있다.

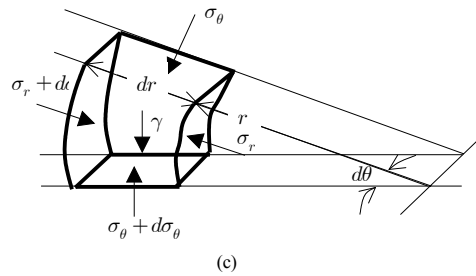
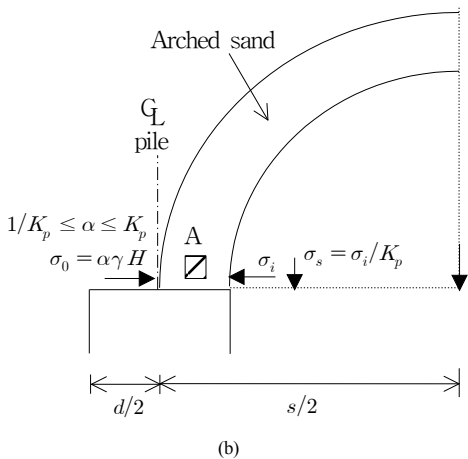
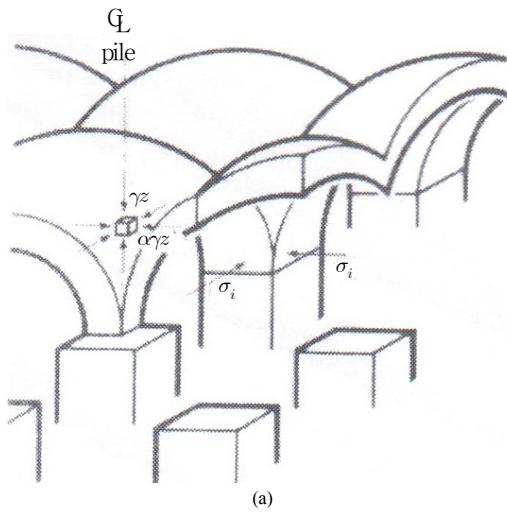


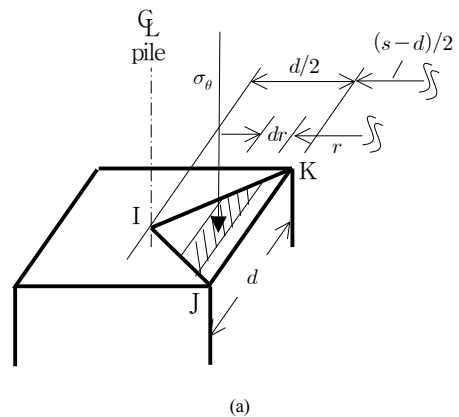
Fig. 5. Arching in the sand immediately over a pile cap[5]

- (a) Isometric view of general arrangement focusing on the pile cap
- (b) Section through a pile cap
- (c) Small element of arched sand above the pile cap

Fig. 5(c)의 미소요소에 대하여 반지름방향의 힘의 평형조건을 고려하면 식 (1)과 같은 미분방정식이 얻어지고 그 해는 식 (2)와 같게 된다. Fig. 5(b)에서  $\sigma_i$ 는 원지반면에 작용하는 연직응력  $\sigma_s$ 와  $\sigma_i = \sigma_s K_p$ 의 관계가 있으며 이를 경계조건으로 고려하여 적분하면 식 (11)을 얻는다.

$$\sigma_r = K_p \sigma_s \left( \frac{2r}{s-d} \right)^{K_p - 1} \tag{11}$$

말뚝캡에 작용하는 하중을 알아보기 위해 Fig. 6을 고려한다. Fig. 6(b)는 Fig. 6(a)에 나타나 있는 등각투영 말뚝캡의 평면도이다.



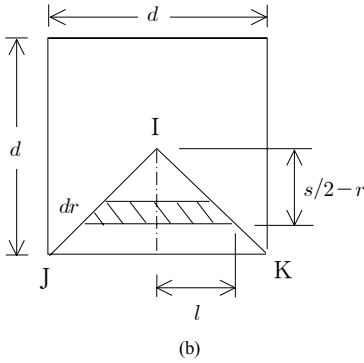


Fig. 6. Calculation of load on a pile cap  
(a) Detail on a pile cap[5]  
(b) Plan of the pile cap

Fig. 6을 통해 알 수 있듯이 삼각형 IJK의 면적은 말뚝의 사분면 하나의 면적과 같음을 알 수 있고 응력작용면의 대칭성을 고려하면 말뚝 사분면 하나에 작용하는 하중은 삼각형 IJK에 작용하는 하중과 동일함을 알 수 있다. Fig. 6(b)에서  $l$ 의 길이는  $(s/2-r)$ 과 같음을 알 수 있으므로 빗금친 부분의 미소면적( $dA$ )은 식 (12)와 같이 표현된다.

$$dA = 2(s/2-r)dr \quad (12)$$

따라서 말뚝캡에 작용하는 연직하중( $P$ )은 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$P = 4 \int \sigma_\theta dA \quad (13)$$

$$= \frac{2K_p}{K_p+1} (s^2) (\sigma_s)$$

$$\times \left\{ \left( \frac{s}{s-d} \right)^{K_p-1} - \left( \frac{s-d}{s} \right) \left( \frac{dK_p+s}{s} \right) \right\}$$

여기서 아칭효율을 구하기 위해 식 (14)와 같은 연직방향 평형조건이 성립함을 이용한다.

$$\gamma H s^2 = P + (s^2 - d^2) \sigma_s \quad (14)$$

따라서 아칭효율은 식 (15)와 같다.

$$E = \frac{P}{\gamma H s^2} \quad (15)$$

$$= \frac{P}{P + (s^2 - d^2) \sigma_s}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{(s^2 - d^2) \sigma_s}{P}}$$

식 (15)에서  $\alpha = P / \{ \sigma_s (s^2 - d^2) \}$ 로 놓으면  $\alpha$ 는 식 (16)과 같다.

$$\alpha = \frac{2K_p}{K_p+1} \left( \frac{s}{s+d} \right) \left\{ \left( \frac{s}{s-d} \right)^{K_p} - \left( \frac{K_p d + s}{s} \right) \right\} \quad (16)$$

$$= \frac{2K_p}{K_p+1} \left( \frac{1}{1+\beta} \right) \left\{ \left( \frac{1}{1-\beta} \right)^{K_p} - (K_p \beta + 1) \right\}$$

따라서 아칭효율은 식 (17)과 같게 된다.

$$E = \frac{\alpha}{1+\alpha} \quad (17)$$

식 (10)과 식 (15)를 비교해 볼 때 아치의 천정부과곡에 의한 아칭효율은 성토고( $H$ )의 함수임에 비해 말뚝캡에 작용하는 하중에 의한 아칭효율은 성토고와 무관함을 알 수 있다.

### 3. 아칭효과와 비교분석

식 (10)과 식 (17)로부터 아치 천정부과곡 및 말뚝캡에 작용하는 연직하중의 계산을 통해 구한 아칭효율을 계산할 수 있는데 두 개의 아칭효율을 같게 놓아 식 (18)과 같이 두 가지 방법에 의한 아칭효율이 같게 될 때의 상대간격비인 임계 상대간격비(critical relative spacing ratio,  $(s/H)_{cr}$ )을 얻을 수 있다.

$$1 - (1 - \beta^2)(A - AB + C) = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (18)$$

식 (18)을 정리하여 임계 상대간격비를 구하면 식 (19)와 같다.

$$\left( \frac{s}{H} \right)_{cr} = \lambda / \xi \quad (19)$$

식 (19)에서

$$\lambda = \frac{2K_p - 3}{\sqrt{2}(K_p - 1)} \left\{ \frac{1}{(1 + \alpha)(1 - \beta^2)} - A \right\}$$

$$\xi = (1 - \beta) - (1 - \beta)^2 (K_p - 1)$$

성토지말뚝의 격자배치에 대해 말뚝의 지름과 중심간격 그리고 성토계의 성질 및 성토고에 따른 아칭효율  $E$ 의 변화양상을 살펴보았는데 그 결과는 Fig. 7에서와

같다. Fig. 7(a)는  $\beta(=d/s)$ 값을 달리하여 상대간격비 ( $s/H$ )에 따라 아칭효율을 나타낸 것이고 Fig. 7(b)는 Rankine 주동토압계수( $K_p$ )를 달리하여 상대간격비에 따라 아칭효율을 나타낸 것이다.

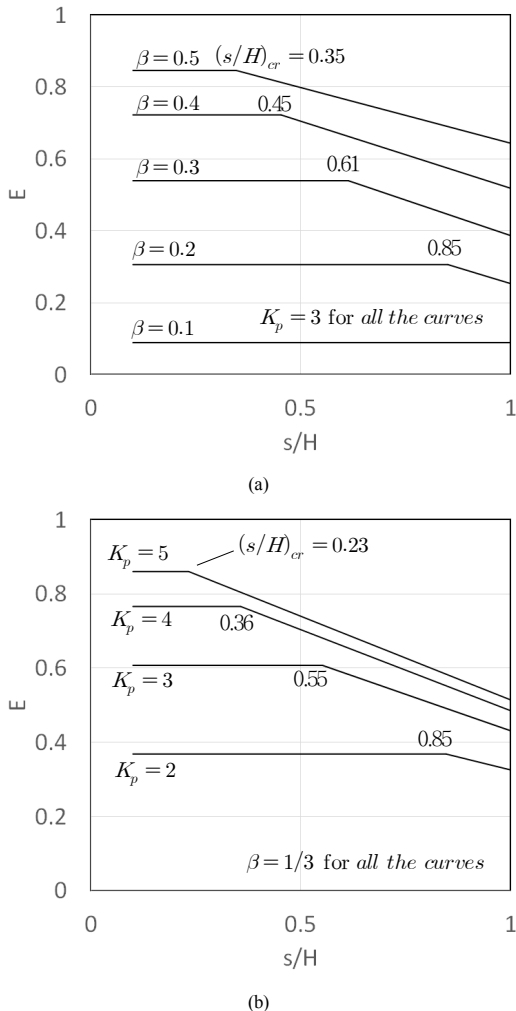


Fig. 7. Variation of the efficacy  $E$  with pile geometry and embankment properties  
 (a) The effect of  $\beta$  on efficacy ( $K_p = 3$ )  
 (b) The effect of  $K_p$  on efficacy ( $\beta = 1/3$ )

Fig. 7의 계산결과를 통해 볼 때 상대간격비가 작은 경우는 말뚝캡에 작용하는 하중을 통해 계산된 아칭효율이 설계를 지배하게 됨을 알 수 있으며 상대간격비가 커질수록 아치의 천정부파괴에 의한 아칭효율이 설계를 지배함을 알 수 있다. 이는 말뚝캡에 작용하는 하중을 통해

계산되는 아칭효율이 성토고와 무관하고 성토재의 강도 정수와  $\beta$ 값에 의존하기 때문이다. Fig. 7(a)를 통해 알 수 있듯이  $\beta$ 값이 커질수록 임계 상대간격비가 작아짐을 알 수 있는데  $\beta$ 값이 0.5인 경우 임계 상대간격비는 0.35이며  $\beta$ 값이 0.2인 경우 임계 상대간격비는 0.85이다. Fig. 7(b)에 나타낸 계산결과에 따르면 수동토압계수가 클수록 임계 상대간격비는 작아져서  $K_p$ 가 5인 경우 임계 상대간격비는 0.23이며  $K_p$ 가 2인 경우 임계 상대간격비는 0.85이다. Fig. 7을 통해 알 수 있듯이 각각의 곡선에 있어 최대 아칭효율은 말뚝캡에 작용하는 하중에 의한 아칭효율임을 알 수 있으며 이는 실제적인 상대간격비 범위에 대응하는 아칭효율이 된다고 볼 수 있다. 이로부터 설계시에는 말뚝캡에 작용하는 하중에 의해 아칭효율이 지배적이도록 상대간격비를 결정하는 것이 합리적인임을 알 수 있다. Fig. 7(a)에서  $\beta$ 가 0.3인 경우 즉 말뚝캡이 성토지반에 대해 차지하는 면적비가 9%인 경우 아칭효율은 54%임을 알 수 있으며 Fig. 7(b)에서  $K_p$ 가 3인 경우 아칭효율은 61%인데 두 경우 모두 말뚝캡에 작용하는 하중에 의한 아칭효율이 지배하는 임계 상대간격비가 0.5보다 크음을 알 수 있다. 이로부터 일반적으로 설계에 적용되는  $\beta$ 값과 성토재의 내부마찰각에 대하여 성토고가 말뚝 중심간격의 2배 이상인 경우에 최대의 아칭효율을 기대할 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 7은 실제적으로 성토지말뚝의 설계에 쓰이는 말뚝지름과 설치간격 그리고 성토재의 특성과 성토고에 대하여 특정 성토고에 적합한 말뚝간격을 결정하는데 있어 유용할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

이론적 연구를 통하여 말뚝과 성토재 특성을 나타내는 다양한 요소들이 성토지말뚝의 아칭효율에 미치는 영향을 살펴보았다. 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 성토지말뚝 상부의 성토체에 발생하는 아치모델에 대하여 아칭효율을 계산함에 있어 아치의 천정부파괴 및 말뚝캡에 작용하는 하중계산을 통한 아칭효율이 같게 되는 상대간격비인 임계 상대간격비를 식으로 제시하였으며 설계에 유용하게 쓰일 것으로 판단된다.

- (2) 본 연구에서 수행된 계산결과에 따르면 상대간격비가 작은 경우는 말뚝캡에 작용하는 하중을 통해 계산되는 아칭효율이 설계를 지배하게 됨을 알 수 있으며 상대간격비가 커질수록 아치의 천정부과 꺾에 의한 아칭효율이 설계를 지배하였다.
- (3) 계산결과에 따르면 말뚝중심간 설치간격에 대한 말뚝지름의 비를 나타내는  $\beta$ 값이 커질수록 임계 상대간격비가 작아짐을 알 수 있었는데  $\beta$ 값이 0.5인 경우 임계 상대간격비는 0.35이며  $\beta$ 값이 0.2인 경우 임계 상대간격비는 0.85이었다.
- (4) 계산결과에 따르면 수동토압계수가 클수록 임계 상대간격비는 작아져서  $K_p$ 가 5인 경우 임계 상대간격비는 0.23이며  $K_p$ 가 2인 경우 임계 상대간격비는 0.85이었다.
- (5) 계산결과에 따르면 말뚝캡이 성토지반에 대해 차지하는 면적비가 9%인 경우 아칭효율은 54%임을 알 수 있으며 성토재의 수동토압계수가 3인 경우 아칭효율은 61%이었는데 두 경우 모두 임계 상대간격비가 0.5보다 큼을 알 수 있어 실제적인 설계에 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

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 건축사회환경학부 교수

<관심분야>  
토질역학, 기초공학

## References

- [1] Terzaghi, K. T. and Peck, R. B., Soil mechanics in engineering practice, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sy dney, pp.267-268, 1967.
- [2] Krynine, D. P., Soil mechanics, McGraw-Hill Book Company, Inc., pp. 310-312, 1947.
- [3] Reid, W. M. and Buchanan, "Bridge approach support piling", Proc. Conf. on Advances in Piling and Ground Treatment, ICE, London, pp. 267-274, 1983.
- [4] Thorburn, S., Laird, C. L. and Randolph, M. F., "Storage tanks founded on soft soils reinforced with driven piles", Proc. Conf. on Advances in Piling and Ground Treatment, ICE, London, pp. 157-164, 1983.
- [5] Hewlett, W. J. and Randolph, M. F., "Analysis of piled embankments", Ground Engineering, vol. 21 no. 3, pp. 12-18, 1988.
- [6] Hewlett, W. J., The analysis and design of bridge approach support piling, Part I project report, Cambridge University Engineering Department, 1984.