

## 측방변형지반속 줄말뚝에 작용하는 토압의 산정법

### Estimation Method of Earth Pressures Acting on a Row of Piles due to Lateral Soil Movements

홍 원 표<sup>1</sup> Hong, Won-Pyo

송 영 석<sup>2</sup> Song, Young-Suk

#### Abstract

In case of the lateral movement occurring at soft ground where a row of piles are installed, the crown failure at external arch zone of soil arching is firstly developed, and the cap failure at wedge zone in front of piles is lastly developed. Therefore, the lateral earth pressure acting on a row of piles due to soil movement should be calculated in each condition of crown and cap failures around piles. A theoretical equation of crown failure can be proposed using a cylindrical cavity expansion theory. The theoretical equation of crown failure is mainly affected by two factors. One is related to soil properties such as internal friction angle, cohesion and horizontal pressure, and the other is related to pile factors such as diameter, installation interval. Meanwhile, the yield range of lateral earth pressure is established in the estimation of theoretical equation based on crown and cap failures around piles. The theoretical values based on crown and cap failures are compared with the experimental values. The experimental values are located in the range proposed by theoretical values. Thus, it is confirmed that the theoretical values proposed in the study are very reasonable.

#### 요 지

줄말뚝이 설치된 지반에서 지반의 측방변형에 의한 지반아칭발생시 말뚝주변지반의 파괴는 지반아칭영역중 외부아치의 정상부에서 정상파괴가 발생될 때부터 시작하여 말뚝전면의 썩기부에서 캡파괴가 발생될 때까지 진행된다. 따라서, 측방변형지반속 줄말뚝에 작용하는 측방토압은 정상파괴와 캡파괴 모두의 경우를 검토할 필요가 있다. 정상파괴시의 측방토압 산정식은 원주공동확장이론을 적용하여 제안할 수 있다. 이 제안식을 검토한 결과 말뚝에 작용하는 측방토압은 주변지반의 내부마찰각, 점착력 및 수평토압과 말뚝직경 및 말뚝설치간격에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 그리고, 캡파괴에 의한 측방토압과 정상파괴에 의한 측방토압의 이론식을 이용하여 줄말뚝에 작용하는 측방토압 범위를 정의할 수 있다. 또한, 본 논문에서는 캡파괴와 정상파괴시 측방토압의 이론치과 모형실험으로부터 구한 실험치를 비교 검토하였다. 모형실험에서 얻은 캡파괴와 정상파괴의 실험치는 제안된 각 이론의 이론치와 잘 일치하고 있으므로, 제안된 이론식의 합리성을 확인할 수 있다.

**Keywords :** Cap failure, Crown failure, Cylindrical cavity expansion theory, Lateral earth pressure, Model test, Piles in a row, Soil arching

1 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., Chung-Ang Univ.)

2 정회원, 중앙대학교 기술과학연구소 전임연구원 (Member, Senior Researcher, Inst. of Tech. & Science, Chung-Ang Univ., yssong@ms.cau.ac.kr)

## 1. 서론

지반속에 설치된 말뚝은 지반의 측방변형이 원인이 되어 2차적으로 발생하는 측방토압을 받게 되는 경우가 많다(Marche & Lacroix, 1972). 이와 같은 말뚝을 소위 수동말뚝(passive pile)이라고 하며, 현재 기초공학분야에 있어서 중요한 문제중의 하나로 취급되고 있다. 수동말뚝을 안전하게 설계하기 위한 가장 중요한 기본사항은 말뚝에 작용하는 측방토압을 정확하게 산정하는 것이다. 그러나, 이 측방토압은 여러 가지의 원인에 의하여 영향을 받고 있음이 이미 알려져 있다(De Beer, 1977). 이러한 말뚝에 있어서는 지반과 말뚝의 상호작용의 결과로서 측방토압이 결정되므로 이 측방토압을 정확하게 예측하는 것은 용이한 일이 아니다.

Tschebotarioff(1971)는 뒤채움에 의하여 발생하는 점토지반의 측방변형시 교대기초말뚝에 작용하는 토압을 삼각형분포로 가정하여 경험식을 제안하였고, De Beer & Wallays(1972)는 Hansen이 제안한 말뚝의 수평극한저항식 등을 이용한 방법을 제안하였다. 그러나, 이들 방법에는 말뚝과 지반사이의 상호작용이 고려되지 않아 정확한 토압의 값을 산정하지 못하였다. 한편, Ito & Matsui(1975) 및 Matsui, Hong & Ito(1982)는 말뚝과 지반사이의 상호작용을 고려한 측방변형지반속 줄말뚝에 작용하는 측방토압을 제안한 바 있다. 이 측방토압식은 지반아칭중 말뚝전면부의 썩기영역에서 주로 발생하는 캡파괴를 가정하여 유도제안된 식이다. 그러나, 실제로 말뚝주변에서 지반의 파괴는 지중에 형성된 지반아칭영역중 외부아치의 천장부에서 파괴가 먼저 진행되어 말뚝주변부의 캡썩기부로 발전하게 된다. 이 경우 천장부에서 시작되는 파괴형태를 정상파괴(crown failure)라고 하고, 캡썩기부에서의 파괴형태를 캡파괴(cap failure)라고 한다. 이중 캡파괴형태에서의 말뚝의 측방토압은 이미 선행연구에서 설명한바 있다(홍원표, 1984).

따라서, 본 연구에서는 말뚝주변지반에서 발생하는 정상파괴가 발생하기 시작할 때의 측방토압에 대하여 연구하고자 한다. 이는 곧 지반아치가 형성된 후 파괴가 진행되는 제일 초기단계를 이르는 것이라 생각할 수 있다. 이를 위하여 먼저 Matsui, Hong & Ito(1982)에 의하여 수행된 기존의 줄말뚝에 작용하는 측방토압에 대한 모형실험결과를 토대로 말뚝주변의 지반파괴형상을 조사한다. 조사된 지반파괴형상을 토대로 원주공동축장이론을 적용하므로써 줄말뚝에 작용하는 측방토압 산정

식을 새롭게 정립한다. 그리고, 새롭게 제안된 측방토압식의 고찰을 통하여 측방토압에 영향을 미치는 지반 및 말뚝에 관한 요소를 분석한다. 마지막으로, 모형실험에 의한 실험치와 캡파괴에 의한 이론치 및 정상파괴에 의한 이론치를 서로 비교검토함으로써 말뚝에 작용하는 측방토압의 거동을 분석하고, 제안식의 타당성을 확인하고자 한다.

## 2. 지반아칭(Soil Arching)효과

### 2.1 지반아칭

토질역학에서 아칭효과는 일반적으로 파괴면상 토괴의 무게가 인접한 흙으로 전달되는 것을 의미한다. Terzaghi(1936; 1943)는 지반아칭현상을 “흙의 파괴영역에서 주변지역으로의 하중전달”이라고 정의하였다. 오래전부터 지반공학분야에서는 아칭효과를 이용하여 많은 이론들이 제안되어졌다. 대표적인 예로는 억지말뚝(Ito & Matsui, 1975) 및 성토지지말뚝(Hewlett & Randolph, 1988; Low et al., 1994; 홍원표외 2인, 1999)을 들 수 있다. 즉, Ito & Matsui(1975)는 소성변형지반속 억지말뚝에 작용하는 측방토압을 산정하는데 지반아칭효과를 적용하여 설명하였다. Hewlett & Randolph(1988)와 Low et al.(1994)는 단독말뚝과 1열의 줄말뚝으로 시공된 성토지지말뚝에 대하여 성토지반속에서 발생하는 지반아칭효과를 설명하였다. 그리고, 홍원표외 2인(1999; 2000)은 캡보말뚝공법 및 단독캡말뚝공법으로 시공된 성토지지말뚝에 대하여 성토지반속에서 발생하는 2차원 및 3차원의 지반아칭효과를 이론적 및 실험적으로 확인한 바 있다.

### 2.2 성토지지말뚝에 적용된 지반아칭파괴이론

홍원표외 2인(1999; 2000)은 성토지반속에 발생하는 지반파괴형태를 모형실험을 통하여 실험적으로 관찰하였으며, 이 실험결과에 의거하여 지반아칭파괴영역을 기하학적으로 정리하였다. 실험결과 성토지지말뚝위 성토지반이 어떤 파괴형태로 발생할 것인가는 말뚝사이의 간격과 성토고의 상대적인 크기에 의존함을 알 수 있었다. 즉, 성토고가 말뚝캡보 간격에 비하여 충분히 높으면 말뚝캡보사이에 지반아칭이 발생되나, 성토고가 충분히 높지않은 경우는 편칭파괴현상이 발생되었다. 따라서,

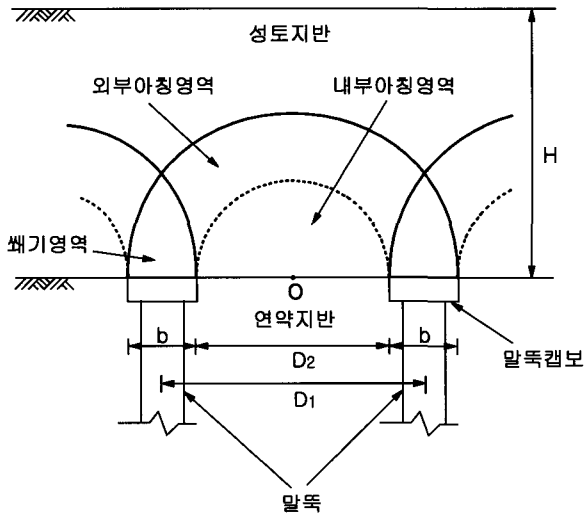


그림 1. 성토지시말뚝에서의 지반아칭파괴형상(홍원표외 2인, 2000)

성토지시말뚝위의 지반파괴형태를 지반아칭이 발생되는 경우의 지반아칭파괴(soil arching failure)와 편칭파괴 현상이 발생하는 경우의 편칭전단파괴(punching shear failure)로 구분된다.

그림 1은 성토지반내 지반아칭파괴의 형상을 도시한 것이다. 지반아칭파괴시 아칭영역내 응력상태를 살펴보면 우선 아치천정부에서는 전단응력이 작용하지 않는 상태 즉, 수직응력만 작용한다고 생각할 수 있다. 그러나, 아치천정에서 양쪽 말뚝캡보 부근으로 접근하면서 전단응력이 점차 크게 작용하게 된다. 이러한 전단응력의 점진적인 증가는 말뚝캡보 사이의 연약지반의 변위가 클때에 더욱 커진다. 지반아칭파괴의 경우는 아칭영역천정부에서의 응력검토와 말뚝캡보상에서의 응력상태가 모두 검토되어야 한다. 즉, 지반아칭파괴를 이용한 성토지시말뚝의 연직하중 산정할 경우 지반아칭영역의 가장 취약한 부분인 아치천정부의 응력상태를 고려한 정상파괴(crown failure)와 줄말뚝사이의 간격이 어느정도 넓은 경우에 해당되는 말뚝캡보상의 전단응력을 고려한 캡파괴(cap failure)를 고려하여야 한다.

### 2.3 측방변형지반속 줄말뚝의 지반아칭파괴이론

말뚝이 소성변형지반속에 일렬로 설치되어 있는 경우, 그 지반이 부근의 상재하중 등으로 인하여 말뚝열과 직각방향으로 측방변형을 하게 되면 말뚝주변지반에는 소성역이 형성되며 말뚝은 측방토압을 받게 될 것이다.

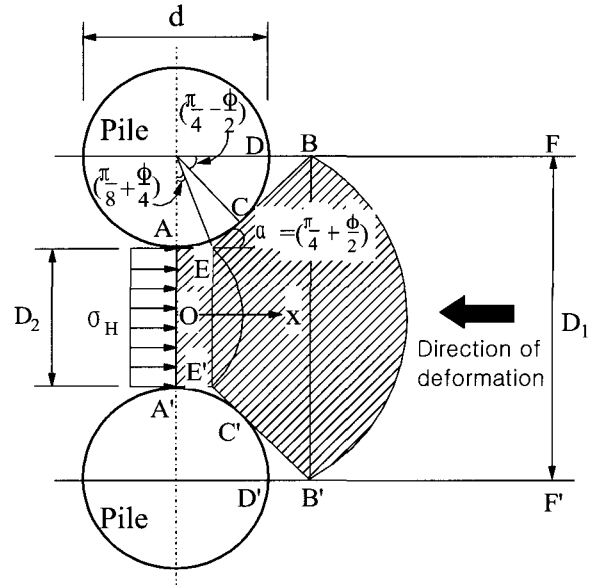


그림 2. 말뚝주변지반의 소성상태(Matsui, Hong & Ito, 1982)

원래 이 줄말뚝의 전면(지반변형을 받는 면)과 후면에는 서로 평형을 이룰수 있는 토압이 작용하고 있으나 지반이 이동하게 되어 토압의 균형상태는 무너지게 되고, 말뚝은 편토압을 받게된다. 상기의 측방토압이라 함은 이러한 토압의 불균형상태하에서 말뚝의 전면과 후면에 각각 작용하는 토압의 차에 상당하는 것이다.

Matsui, Hong & Ito(1982)는 측방변형지반속 줄말뚝에 대한 모형실험을 통하여 말뚝의 간격과 말뚝주변지반의 소성상태를 고려한 이론식을 제안한 바 있다. 그림 2는 모형실험결과로부터 얻은 말뚝주변지반의 소성상태를 나타낸 것으로, 이를 가정하여 이론식을 유도하였다.

줄말뚝에 작용하는 측방토압을 산정하기 위하여 아칭파괴이론을 적용할 경우 지반아칭영역의 가장 취약한 부분인 아치천정부의 응력상태를 고려한 정상파괴와 말뚝전면의 빼기부에서 전단응력을 고려한 캡파괴를 모두 검토되어야 할 것이다. 이미 Matsui, Hong & Ito(1982)은 말뚝전면 빼기부에서의 캡파괴를 고려하여 줄말뚝에 작용하는 측방토압을 산정한 바 있다. 나아가 본 연구에서는 기존의 모형실험결과를 이용하여 지반 변형거동을 재분석하고, 정상파괴시 줄말뚝에 작용하는 측방토압에 대하여도 고찰하고자 한다.

모형실험에서 줄말뚝 주변지반의 변형거동을 살펴보기 위하여 지반에 표시한 표점들의 이동한 상태를 유리판을 통하여 연속적으로 사진촬영을 실시하였다(Matsui, Hong & Ito, 1982). 이들 사진으로부터 표점들이 이동한

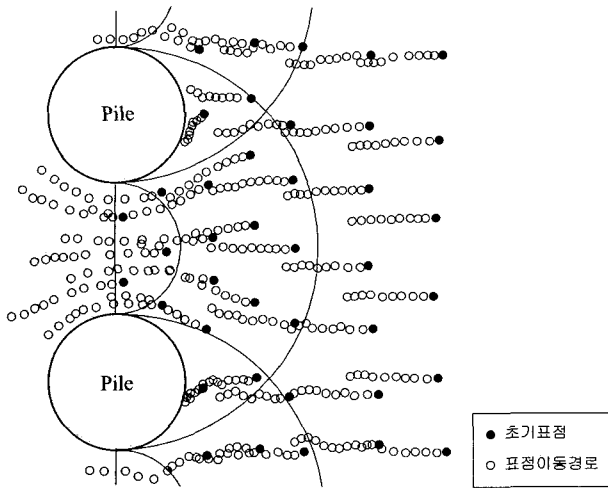


그림 3. 말뚝주변지반의 지반아칭형상

경로를 정리하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이 그림은 말뚝의 직경이 3cm이고, 말뚝의 간격비  $D_2/D_1$ 은 0.5인 경우이다. 표점의 초기위치는 지반의 변형방향에 평행한 선상에 거의 일렬로 배치되어 있었다. 그림에서는 초기위치의 표점은 검은점으로 표시하였으며, 지반 변형에 의해 이동된 표점은 흰원으로 표시하였다. 지반 변형에 의한 표점의 이동경로를 살펴보면 말뚝옆에서 좀 떨어진 위치의 표점은 지반변형방향에 거의 평행하게 이동하지만, 말뚝주변부에서는 말뚝에 의하여 크게 영향을 받아 말뚝간 사이를 빠져나가고 있음을 알 수 있다.

말뚝에 의해 이동경로가 변경되는 부분은 그림 3에 표시된 지반아칭영역의 천정부에서부터 시작됨을 알 수 있다. 즉, 말뚝주변지반의 소성변형은 주로 아칭영역 안에서 발생됨을 알 수 있다. 그리고, 말뚝전면의 썩기 부에서는 지반이 심하게 압축변형됨을 알 수 있다. 따라서, 그림에 표시된 지반아칭영역은 말뚝주변지반의 소성영역으로 간주할 수 있다. 이는 그림 2에 도시한 기존의 말뚝주변지반에서 가정된 소성영역(Matsui, Hong & Ito, 1982)과는 약간의 차이가 있으며, 이를 토대로 원주 공동이론을 적용하여 새로운 측방토압 산정식을 유도 하여보고자 한다.

### 3. 정상파괴에 의한 측방토압 산정식

소성변형지반속 줄말뚝에 작용하는 측방토압에 대한 기존의 연구에서는 말뚝주변부에 생성된 썩기영역에서 발생하는 캡파괴(cap failure)시의 측방토압을 대

상으로 연구하였다(Matsui, Hong & Ito, 1982). 그러나, 실질적으로 지반파괴는 아칭영역중 외부아치의 천정부에서 발생하는 정상파괴(crown failure)에서부터 시작된다. 이때의 측방토압을 산정하기 위하여 원주공동확장이론(Timoshenko & Goodier, 1970)을 적용하였다.

#### 3.1 기본가정

원주공동확장이론을 적용한 해석시 다음과 같은 사항을 가정한다.

- (1) 지반아칭영역의 외부아치 전체에 작용하는 토압( $\sigma_r$ )은 균일하게 분포한다.
- (2) 말뚝주변지반은 그림 4의 지반아칭영역 ACBB' C' A' 부분만이 소성상태가 되어 Mohr-Coulomb의 항복조건을 만족한다. 따라서, 지반은 내부마찰각  $\phi$  및 점착력  $c$ 로 나타낸다.
- (3) 지반은 깊이방향으로 평면변형률상태에 있다.
- (4) 말뚝은 강체로 간주한다.

#### 3.2 제안식 유도

그림 4의 지반아칭에서 아칭천정부의 한 요소를 해석하기 위해 극좌표 평형방정식을 이용하였다. 아칭천정부에서는 수평방향만을 고려하며 아칭밴드내의 응력을 모두 동일하다고 하면  $\tau_\theta = 0$ 으로 간주할 수 있다. 또한,

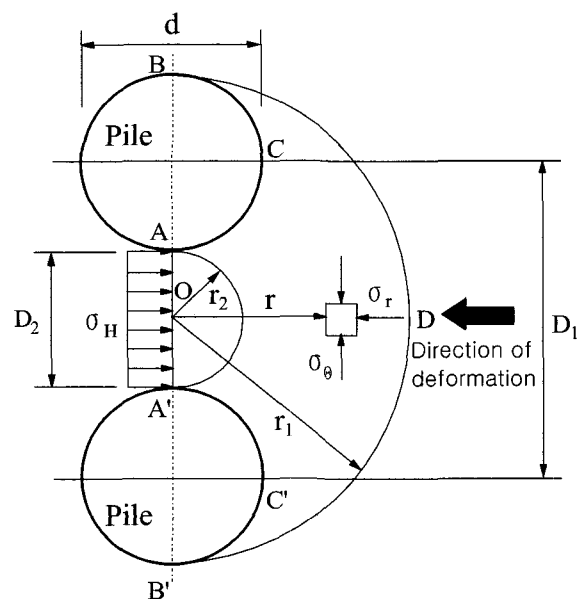


그림 4. 원주공동확장이론을 적용한 해석

$\sigma_r$  방향의 물체력을 0으로 볼 수 있다. 이러한 가정으로 다시 정리하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,  $\sigma_r$ : 반지름방향 수직응력( $t/m^2$ )  
 $\sigma_\theta$ : 법선방향 수직응력( $t/m^2$ )  
 $r$ : 반지름(m)

위의 식에서 Mohr의 응력원에 근거하면  $\sigma_\theta = N_\phi \cdot \sigma_r + 2cN_\phi^{1/2}$ 로 가정할 수 있다.

$$N_\phi = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (2)$$

따라서, 식 (1)은 식 (3)과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(1 - N_\phi) \cdot \sigma_r - 2cN_\phi^{1/2}}{r} = 0 \quad (3)$$

식 (3)에 대한 일반적인 해는 다음과 같다.

$$\sigma_r = A \cdot r^{N_\phi - 1} - \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1} \quad (4)$$

$r = r_2$ 일 때  $\sigma_r = \sigma_H$ 인 경계조건을 식 (4)에 대입하여 계수 A를 구하면 식 (5)와 같이 된다.

$$A = \left(\sigma_H + \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1}\right) r_2^{1 - N_\phi} \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입하면  $\sigma_r$ 은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\sigma_r = \left(\sigma_H + \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1}\right) \left(\frac{r}{r_2}\right)^{N_\phi - 1} - \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1} \quad (6)$$

두 번째 경계조건으로 외부아치 천정부에서의 응력  $\sigma_r$ 을  $r = r_1$ 일 때의 응력이라고 하면, 식 (6)은 식 (7)로 다시 정리될 수 있다.

$$\sigma_r = \left(\sigma_H + \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1}\right) \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^{N_\phi - 1} - \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1} \quad (7)$$

여기서,  $\sigma_H$ : Rankine의 주동토압,  $N_\phi = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$

$r_1$ : 외부아치반지름 ( $= \frac{d + D_1}{2}$ ),

$r_2$ : 내부아치반지름 ( $= \frac{D_2}{2}$ )

말뚝에 작용하는 측방토압은 BB' 면에 작용하는 토압  $p_{BB'}$ 과 AA' 면에 작용하는 토압  $p_{AA'}$ 의 차이에 의한 것이다. 여기서,  $p_{BB'}$ 는  $r = r_1$ 인 경우의 식 (7)에 말뚝중심간격  $D_1$ 을 곱한 토압이며,  $p_{AA'}$ 는  $\sigma_H$ 에  $D_2$ 를 곱한 토압이다. 따라서, 단위깊이당 한 개의 말뚝에 작용하는 측방토압  $p$ 는  $p_{BB'}$ 와  $p_{AA'}$ 의 토압차로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} p &= p_{BB'} - p_{AA'} = \sigma_{r_1} \cdot D_1 - \sigma_H \cdot D_2 \\ &= \left\{ \left( \sigma_H + \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1} \right) \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{N_\phi - 1} - \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1} \right\} \cdot D_1 - \sigma_H \cdot D_2 \\ &= \sigma_H \left[ \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{N_\phi - 1} \cdot D_1 - D_2 \right] + \left[ \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1} \left\{ \left( \frac{r_1}{r_2} \right)^{N_\phi - 1} - 1 \right\} \right] \cdot D_1 \\ &= \sigma_H \left[ \left( \frac{D_1 + d}{D_2} \right)^{N_\phi - 1} \cdot D_1 - D_2 \right] + \left[ \frac{2cN_\phi^{1/2}}{N_\phi - 1} \left\{ \left( \frac{D_1 + d}{D_2} \right)^{N_\phi - 1} - 1 \right\} \right] \cdot D_1 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,  $\sigma_H$ : Rankine의 주동토압,  $N_\phi = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)$ ,  
 $c$ : 점착력,  $D_1$ : 말뚝의 중심간격(m),  
 $D_2$ : 말뚝의 순간격(m),  $d$ : 말뚝의 직경

반면에, 점착력이 있는 점성토인 경우에는 내부마찰각  $\phi$ 는 무시된다. 내부마찰각  $\phi$ 를 0으로 놓고 다시 유도하면  $N_\phi = 1$ 이 된다. 이것을 Mohr의 응력원에 근거하여  $\sigma_\theta = N_\phi \cdot \sigma_r + 2cN_\phi^{1/2}$ 에 대입하면 식 (9)와 같이 된다.

$$\sigma_\theta = \sigma_r + 2c \quad (9)$$

식 (9)를 식 (1)에 대입하면 식 (10)과 같이 된다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_r - 2c}{r} = 0 \quad (10)$$

이것을 다시 정리하면 식 (11)이 된다.

$$\sigma_r = 2c \ln r + C' \quad (11)$$

여기서,  $C'$ 은 적분상수이다.

첫번째 경계조건인  $r = r_2$ 일 때,  $\sigma_r = \sigma_H$ 를 대입하여 적분상수  $C'$ 을 구하면 식 (12)와 같다.

$$C' = \sigma_H - 2c \ln r_2 \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)에 대입하면, 식 (13)을 구할 수 있다.

$$\sigma_r = 2c \ln r + \sigma_H - 2c \ln r_2 \quad (13)$$

두번째 경계조건을 외부아치 천정부에서의 응력  $\sigma_r$  을  $r=r_1$  일 때의 응력이라고 하면, 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\sigma_{r_1} = \sigma_H + 2c \ln \frac{r_1}{r_2} \quad (14)$$

앞에서 설명한 것과 마찬가지로 방법으로 단위깊이당 한 개의 말뚝에 작용하는 측방토압  $p$  는 다음과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} p &= p_{BB'} - p_{AA'} = \sigma_{r_1} \cdot D_1 - \sigma_H \cdot D_2 \\ &= \left( \sigma_H + 2c \ln \frac{r_1}{r_2} \right) D_1 - \sigma_H \cdot D_2 \\ &= \sigma_H (D_1 - D_2) + 2c \ln \frac{r_1}{r_2} \cdot D_1 \\ &= \sigma_H (D_1 - D_2) + 2c \ln \frac{D_1 + d}{D_2} \cdot D_1 \end{aligned} \quad (15)$$

이와 같이 구한 식 (8)과 식 (15)를 소성변형이 발생한 지반의 두께  $H$ 에 대하여 적분하면 전측방토압  $P$ 는 다음과 같이 구하여 진다.

$$P = \int_0^H p \, dz \quad (16)$$

여기서,  $z$ 는 지표면에서부터의 깊이를 나타낸다.

#### 4. 정상파괴에 의한 측방토압산정식의 특성

본 연구에서 제안된 측방토압식에는 여러 가지 요소가 포함되어 있음을 알 수 있다. 즉, 지반의 강도특성을 나타

내는 내부마찰각  $\phi$  및 점착력  $c$ 와 말뚝의 설치상태를 나타내는 말뚝중심간격  $D_1$ 과 말뚝직경  $d (= D_1 - D_2)$ , 그밖에 지반변형에 저항하는 수평토압  $\sigma_H$ 가 포함되어 있다. 여기서 이들 각각의 요소에 의한 영향을 조사하여 제안된 식의 특성을 검토하여 보고자 한다. 우선, 이들 요소중 수평토압  $\sigma_H$ 의 영향에 대하여는 제안식인 식 (8) 및 (15)로부터 알 수 있는 바와 같이  $p$ 가  $\sigma_H$ 의 일차식 형태로 되어 있으므로, 측방토압  $p$ 는 수평토압  $\sigma_H$ 의 증가에 대하여 선형적으로 증가한다.

한편, 말뚝중심간격  $D_1$  및 말뚝직경  $d$ 에 대한 영향은 그림 5에 나타내었다. 즉, 횡축에는  $D_1$  및  $D_2 (= D_1 - d)$ 에 의한 영향을 검토하기 위하여 간격비  $D_2/D_1$ 을 표시하고, 종축에는 단위깊이당 측방토압  $p$ 를 표시함으로써, 말뚝직경  $d$ 와 말뚝간격비  $D_2/D_1$ 의 변화에 따른 측방토압의 변화상태를 파악할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 말뚝직경이 일정하면 측방토압은 간격비가 감소됨에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 여기서, 간격비가 감소함은 말뚝간격이 상대적으로 좁아짐을 의미하므로 제안식은 말뚝간격의 증감에 따른 측방토압의 변화상태를 잘 고찰하고 있음을 알 수 있다. 또한 간격비가 일정한 경우, 말뚝직경이 증가하면 측방토압도 증가하는 경향이 나타남을 알 수 있다.

그림 6은 측방토압  $p$ 를 말뚝중심간격  $D_1$ 으로 나누어서 그림 5의 결과를  $p/D_1$ 과  $D_2/D_1$ 의 관계로 재정리한 것이다. 이 그림으로부터, 상대적 말뚝간격비  $D_2/D_1$ 이 일정하면 단위폭당 측방토압  $p/D_1$ 은 말뚝직경에 상관없이 항상 일정함을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 그림 6과 동일한 좌표축을 사용하

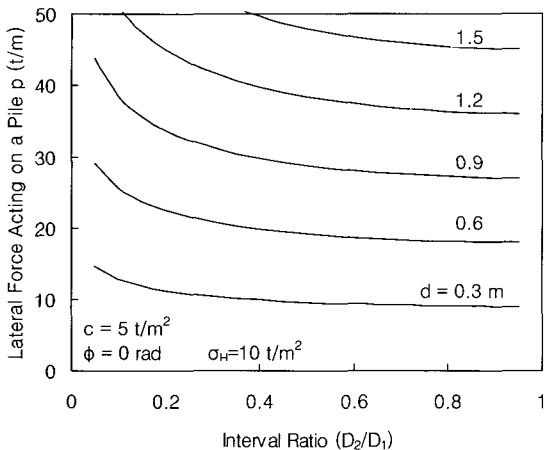


그림 5. 말뚝직경의 영향

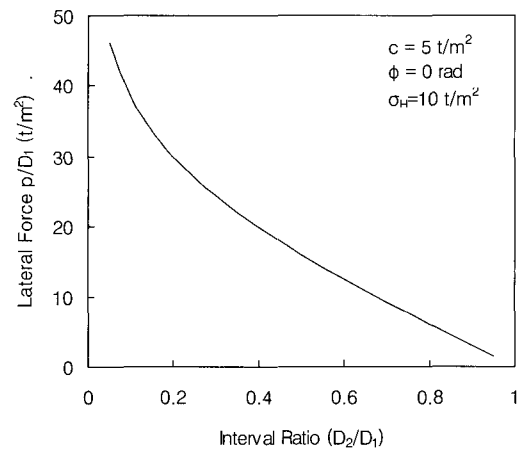


그림 6.  $p/D_1$ 과  $D_2/D_1$ 의 관계

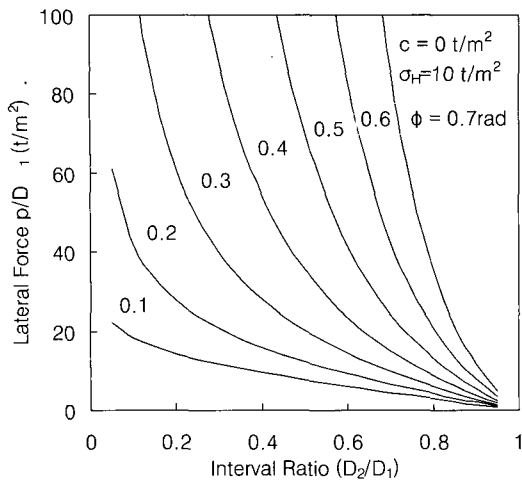


그림 7. 내부마찰각의 영향

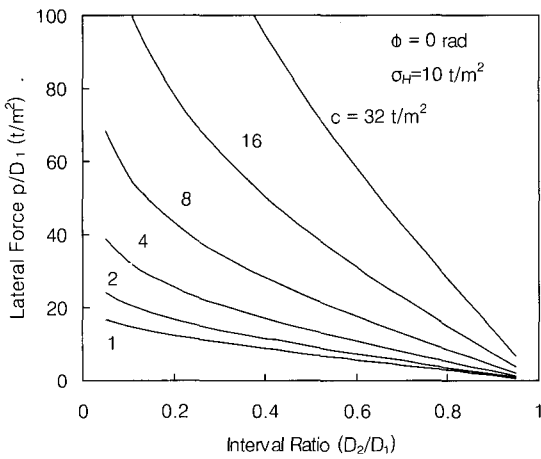


그림 8. 점착력의 영향

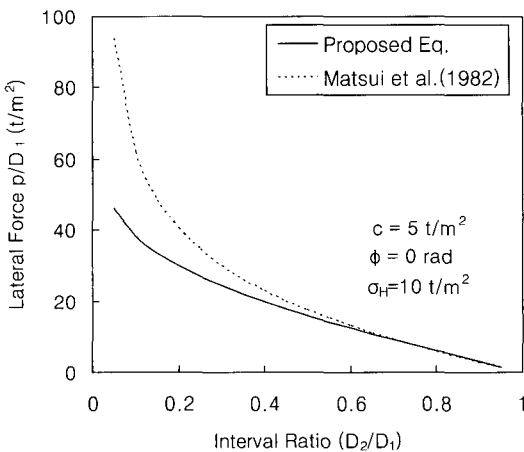


그림 9. 기존 이론식과의 비교

여 사질토의 내부마찰각  $\phi$ 의 영향과 점성토의 점착력  $c$ 의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이

측방토압은 내부마찰각과 점착력이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 말뚝의 직경과 간격이 일정하면, 측방토압은 사질토의 경우 내부마찰각이 증가함에 따라 비선형적으로 증가하지만, 점성토의 경우 점착력이 증가함에 따라 선형적으로 증가한다. 이들 경향은 내부마찰각과 점착력이 크면 클수록 말뚝주변지반이 말뚝사이를 빠져나가기 위해서는 점점 더 큰 측방토압이 말뚝에 작용하게 됨을 의미한다. 즉, 지반의 강도가 증가하면 말뚝주변지반에 Mohr-Coulomb의 항복기준을 만족시키는 소성상태가 발생하기 위하여 필요한 응력은 점점 증대되어야 함을 생각하면 이 경향은 매우 합리적이라고 할 수 있다.

이상과 같은 검토결과, 말뚝에 작용하는 측방토압의 발생기구는 여러 가지 요소에 의하여 복잡하게 영향을 받고 있음을 확인할 수 있으며, 본 제안식은 말뚝간의 간격과 말뚝주변지반의 소성상태를 합리적으로 고찰할 수 있다고 판단된다.

한편, 그림 9는 동일한 조건하에서 캡파괴시 측방토압 이론식(Matsui, Hong & Ito, 1982)과 제안된 정상파괴시 측방토압 이론식을 간격비에 따라 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 간격비가 0.7이하인 경우에는 캡파괴시 측방토압이 정상파괴시 측방토압보다 큰 것으로 나타났으며, 간격비가 작을수록 측방토압의 차이는 더 커지는 것으로 나타났다. 즉, 동일한 간격비에서는 기존의 캡파괴시 측방토압이 정상파괴시 측방토압보다 크게 산정되고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 말뚝에 작용하는 측방토압이 지반의 초기변형에 의한 정상파괴부터 항복변형에 의한 캡파괴까지 진행되는 동안 계속해서 증가하기 때문이다. 따라서, 캡파괴에 의한 측방토압과 정상파괴에 의한 측방토압은 서로 구분하여 적용하여야 하며, 이를 이용하여 줄말뚝에 작용하는 측방토압의 항복범위를 산정할 수 있다.

## 5. 이론치와 실험치의 비교

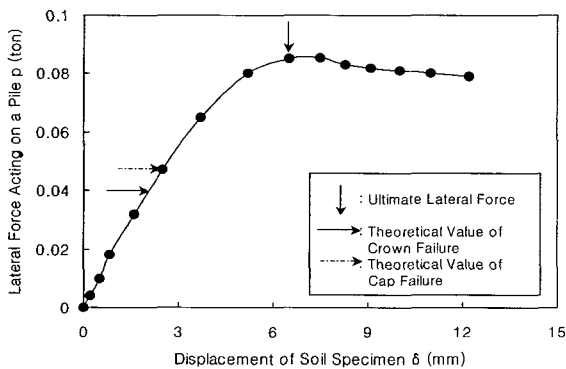
캡파괴 및 정상파괴에 의한 이론치와 모형실험에 의한 실험치를 서로 비교검토함으로써 말뚝에 작용하는 측방토압의 범위를 산정하고, 제안식의 타당성을 확인하고자 한다. 실험치로는 모래와 점토에 대하여 기존에 수행된 모형실험결과(Matsui, Hong & Ito, 1982)를 이용한다.

### 5.1 모형실험결과의 분석

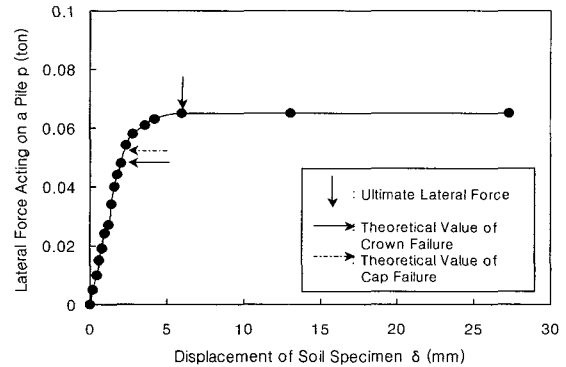
그림 10은 모래 및 점토지반속의 말뚝에 작용하는 측방토압의 발생기구를 규명하기 위하여 실시한 모형실험 결과로서, 측방토압과 지반변위량사이의 관계를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면, 말뚝에 작용하는 측방토압은 지반변위량이 증가함에 따라 점차적으로 증가하다가 극한측방토압에 도달하는 것으로 나타났다. 그리고, 이 그림에 캡파괴 및 정상파괴에 의한 이론치를 함께 도시하였다. 캡파괴에 대한 이론치가 정상파괴에 대한 이론치보다 크게 나타남을 확인할 수 있다. 즉, 측방토압은 초기의 선형탄성구간을 지나 정상파괴로 추정되는 시점부터 캡파괴로 추정되는 시점까지 진행되는 동안 측방토압이 증가되는 항복영역을 그림에서 알 수 있다.

한편, 그림 11은 그림 10에 제시된 모래 및 점토에

대한 모형실험으로 측정된 측방토압과 지반변위량을 양면대수지상에 다시 도시한 것으로, 그림 9에서 산정된 극한측방토압 이하의 점만을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 측방토압과 지반변위량의 관계는 두 개의 변곡점으로 표시된 두 개의 항복점을 가지는 것으로 판단된다. 따라서, 여기서 첫번째 변곡점으로 표시된 측방토압은 말뚝주변지반에서 지반아치의 정상파괴시에 작용하는 측방토압의 항복점으로 생각할 수 있으며, 두번째 변곡점으로 표시된 측방토압은 캡파괴시에 작용하는 측방토압의 항복점으로 생각할 수 있을 것이다. 따라서, 모형실험에 의한 측방토압과 지반변위량 사이의 곡선으로부터 캡파괴 및 정상파괴시 말뚝에 작용하는 측방토압 실험치를 구할 수 있다. 그리고, 캡파괴에 의한 측방토압과 정상파괴에 의한 측방토압사이를 줄 말뚝에 작용하는 측방토압의 항복범위로 설정할 수 있을 것이다.

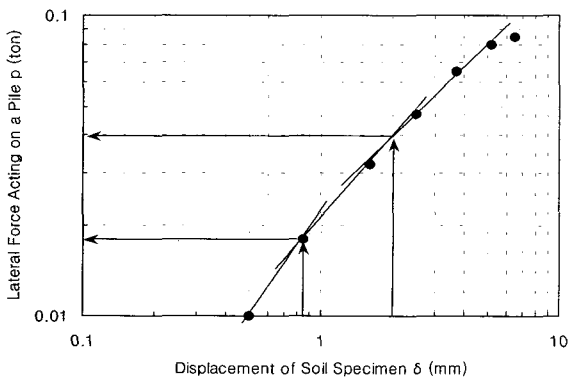


(a) 모래지반 (S-3)

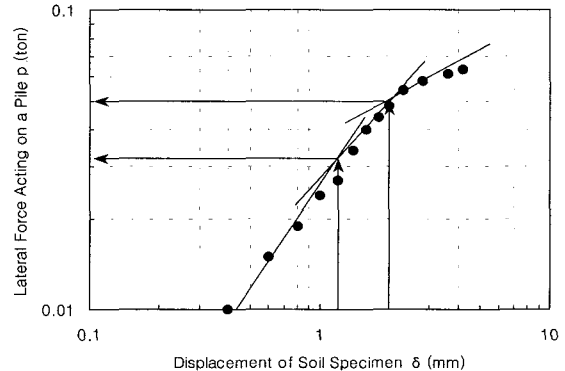


(b) 점토지반 (C-3)

그림 10. 측방토압과 지반변위량의 관계(Matsui, Hong & Ito, 1982)



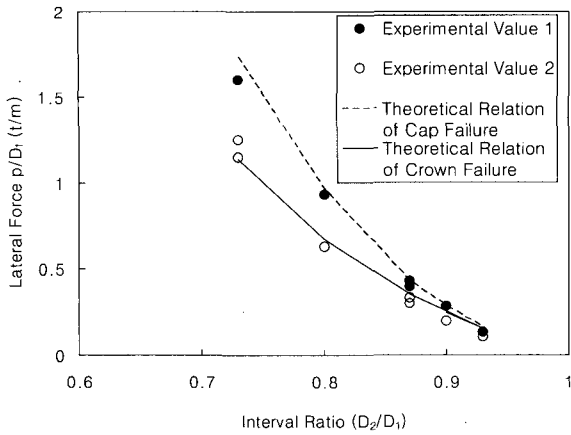
(a) 모래지반 (S-3)



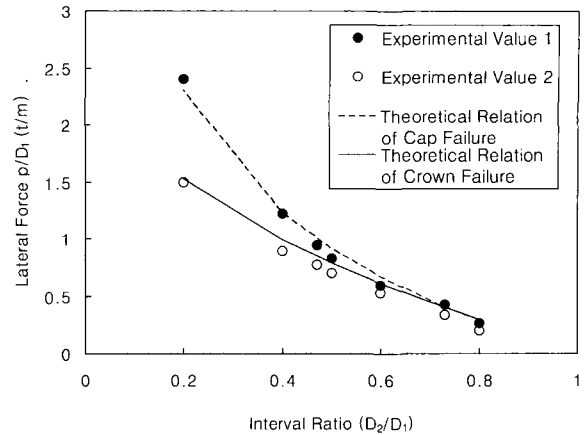
(b) 점토지반 (C-3)

그림 11. 캡파괴 및 정상파괴시 측방토압 산정





(a) 모래지반



(b) 점토지반

그림 12. 측방토압과 말뚝간격비와의 관계

## 5.2 이론치와의 비교

그림 12는 모형실험결과에 대하여 캡파괴 및 정상파괴시 측방토압  $p$ 를 말뚝중심간격  $D_1$ 으로 나눈  $p/D_1$ 과 말뚝간격비  $D_2/D_1$ 의 관계로 정리한 것이다. 그림에서 실선은 정상파괴에 대한 측방토압의 이론곡선이며, 점선은 캡파괴에 대한 측방토압의 이론곡선이다. 그리고, 흰원과 검은원으로 도시된 실험치는 그림 10에서 설명한 모형실험결과로부터 얻은 값이다. 이들 이론곡선사이의 소성변형지반속 줄말뚝에 작용하는 측방토압의 항복범위라고 정의할 수 있다. 그리고, 그림중 검은원은 캡파괴시 측방토압 실험치(Experimental Value 1)를 나타낸 것이고, 흰원은 정상파괴시 측방토압 실험치(Experimental Value 2)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 캡파괴 및 정상파괴시 측방토압 실험치는 모두 이론곡선에 매우 근접하여 위치하고 있으므로, 제안된 이론식의 합리성을 확인할 수 있다. 따라서, 소성변형지반속의 말뚝에 작용하는 측방토압은 초기탄성영역에서는 선형적인 거동을 보이다가 지반아치의 정상파괴 발생시의 제1항복상태를 시작으로 지반아치의 캡파괴 발생시의 제2항복상태까지 항복영역을 지나 극한상태에 도달하는 것으로 판단된다. 한편, 말뚝의 간격비가 증가할수록 정상파괴의 이론곡선과 캡파괴의 이론곡선의 범위가 점점 좁아지다가 말뚝간격비 0.9이상이면 거의 동일해지는 것으로 나타났다. 이것은 말뚝간격비 0.9이상이면 캡파괴에 의하여 발생하는 전단력이 거의 소멸되어 지반아칭현상이 발생되지 않는 경우라고 생각할 수 있다. 즉, 말뚝간격비가 0.9이상이면 단일

말뚝의 경우로 간주하여도 무방한 말뚝간격임을 나타내는 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 말뚝주변지반에서 발생하는 지반아치의 정상부에 항복을 정상파괴로 가정하여 새로운 측방토압 이론식을 제안하였다. 이는 말뚝전면 캡부분에서의 항복을 다룬 캡파괴시의 측방토압이론식을 다룬 이전 연구와 일련의 연구선상에서의 연구에 해당한다. 그리고, 캡파괴 및 정상파괴에 대한 측방토압의 이론치 및 실험치를 서로 비교검토함으로써 말뚝에 작용하는 측방토압의 범위를 산정하고, 제안식의 타당성을 검토하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 줄말뚝이 설치된 측방변형지반에서 지반아칭발생시 말뚝주변지반의 지반파괴는 아칭영역중 외부아치의 정상부에서 정상파괴가 먼저 발생되면서 시작되어 말뚝전면의 뼈기부에서 캡파괴가 발생때까지 항복영역이 진행된다.
- (2) 정상파괴시 측방토압은 원주공동확장이론에 의한 극좌표의 평행방정식을 적용하여 제안할 수 있다.
- (3) 제안된 이론식에 의한 측방토압은 주변지반의 내부마찰각, 점착력, 수평토압 및 말뚝직경이 증가함에 따라 증가하며, 말뚝설치간격이 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.
- (4) 말뚝에 작용하는 측방토압과 지반변형량의 관계를 양면대수지상에 도시하면 극한측방토압이전에 두

개의 변곡점이 나타나게 된다. 첫번째 변곡점은 캡 파괴시 측방토압의 항복점이며, 두번째 변곡점은 정상파괴시 측방토압의 항복점에 해당한다.

- (5) 캡파괴에 의한 측방토압과 정상파괴에 의한 측방토압의 이론식을 이용하여 줄말뚝에 작용하는 측방토압의 항복범위를 정의할 수 있다. 모형실험에서 얻은 캡파괴 및 정상파괴시 실험치는 이 범위와 모두 일치하고 있으므로, 제안된 이론식의 합리성을 확인할 수 있다.
- (6) 말뚝의 간격비가 0.9 이상이 되면 캡파괴 및 정상파괴에 의한 이론치가 거의 동일하게 되며, 이러한 경우에는 단일 줄말뚝으로 간주하여도 무방하다.

### 감사의 글

이 논문은 2003년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 연구(원주공동확장이론을 이용한 말뚝에 작용하는 측방토압 산정)결과임을 밝히며, 동 학교에 감사의 뜻을 전하는 바이다.

### 참고 문헌

1. 홍원표 (1984), “측방변형지반속의 줄말뚝에 작용하는 토압”, *대한토목학회논문집*, 제4권, 제1호, pp.59-68.
2. 홍원표, 윤중만, 서문성 (1999), “말뚝으로 지지된 성토지반의 파괴형태”, *한국지반공학학회 논문집*, 제15권, 제4호, pp.207-220.
3. 홍원표, 이재호, 전성권 (2000), “성토지지말뚝에 작용하는 연직하중의 이론해석”, *한국지반공학학회논문집*, 제16권, 제1호, pp.131-143.
4. De Beer, E. (1977), “Piles subjected to static lateral loads”, State-of-the-Art Report, *Proc., 9th ICSMFE, Specialty Session 10*, Tokyo, pp.1-14.
5. De Beer, E. E. and Wallays, M. (1972), “Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the pile”, *Proc., 5th ICSMFE, Moscow*, Vol.4.3, pp.325-332.
6. Hewlett, W.J. and Randolph, M.F. (1988), “Analysis of piled embankments”, *Ground Engineering*, 21(3), pp.12-18.
7. Ito, T. and Matsui, T. (1975), “Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles”, *Soils and Foundations*, Vol.15, No.4, pp.43-59.
8. Low, B.K., Tang, S.K. and Choa, V. (1994), “Arching in piled embankments”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.*, Vol.120, No.11, pp.1917-1937.
9. Marche, R. and Lacroix, Y. (1972), “Stabilite des culees de ponts etablies sur des pieux traversant une couche molle”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.9, No.1, pp.1-24.
10. Matsui, T., Hong, W. P. and Ito, T. (1982), “Earth pressure on piles in a row due to lateral soil movements”, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.2, pp.71-81.
11. Terzaghi, K. (1936), “Stress distribution in dry and saturated sand above yielding trap-door”, *Proc. Int. Conf. Soil Mech.*, Cambridge, Mass., Vol.1, pp.307-311
12. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York. pp.66-76.
13. Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N. (1970), *Theory of elasticity*, McGraw-Hill Book Comany, pp.65-68.
14. Tschebotarioff, G. P. (1971), *Discussion*, Highway Research Record, No.354, pp.99-101.

(접수일자 2003. 5. 28, 심사완료일 2004. 1. 30)