

## 성토지지말뚝의 연직하중 분담효과에 관한 연구

### A Study on the Effect of Carrying Vertical Loads Over Embankment Piles

홍 원 표\*<sup>1</sup> Hong, Won-Pyo

이 광 우\*<sup>2</sup> Lee, Kwang-Wu

#### Abstract

Embankment Piles, which is subjected to damage due to lateral movement of soft ground, can be classified into pile slab, cap beam pile, and isolated cap pile according to the installation pattern of pile cap. In the cap beam pile and the isolated cap pile method, the soil arch is developed by the different stiffness between pile and soil, and most embankment loads are transferred into embankment piles through soil arch. In these two methods, the difference of soil arch is that the soil arch of the cap beam pile method develops like the arch form of tunnel between cap beams and the soil arch of the isolated cap pile method develops like dome between isolated caps. Therefore, theoretical analysis methods on soil arching effect of the cap beam pile and the isolated cap pile method were respectively proposed according to their own arch form considering the limiting equilibrium of stresses in a crown of soil arch. And a series of model tests were performed both to investigate the load transfer by soil arching in fills above embankment piles and to verify the reliability of the theoretical analysis.

#### 요 지

연약지반상에 제방 성토시 예상되는 연약지반의 측방유동을 적극 억제할 수 있는 성토지지말뚝공법은 말뚝두부에 캡을 설치하는 형태에 따라 크게 말뚝슬래브공법, 캡보말뚝공법 및 단독캡말뚝공법으로 구분할 수 있다. 이들 공법중 캡보말뚝공법 및 단독캡말뚝공법에서는 성토지지말뚝과 지반간의 상대적인 강성차이로 인해 성토지반 속에 지반아치가 발생하게 되고, 대부분의 성토하중은 발달된 지반아치를 통해 말뚝으로 전달된다. 두 공법에서 발생하는 지반아치의 차이는 그 형태가 캡보말뚝공법의 경우 터널의 형태와 유사하게 2차원적이고, 단독캡말뚝공법에서는 돔의 형태와 유사하게 3차원적이라는 것이다. 따라서 이 두 경우의 지반아치로 인한 성토지지말뚝의 하중분담효과에 관한 이론식을 각각 유도·제안하여 비교하였으며, 두 이론식의 타당성을 입증하기 위한 일련의 모형실험을 수행하였다.

**Keywords :** Embankment piles, Lateral movement, Model test, Soft ground, Soil arching, Theoretical analysis

#### 1. 서 론

성토지지말뚝공법은 연약지반상 도로·철도 제방 시공시 발생하는 연약지반의 침하 및 측방유동으로 인

한 피해를 억제하기 위하여 말뚝을 사용하는 공법이다. 즉, 연약지반 상에 성토를 시공하기 전에 말뚝을 일정 간격으로 연약지반층을 관통하여 지지층에 관입 지지시킨 후 이들 말뚝위에 성토를 실시함으로써 성

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

\*2 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원 (Member, Researcher, Civil Engrg., Division, KICT, kwangwu@kict.re.kr)

토하중 대부분을 말뚝을 통해 직접 지지층에 전달시키는 공법이다. 이와 같이 연약지반 속에 관입된 성토지지말뚝은 크게 두 가지 효과를 가지게 된다. 하나는 연약지반의 측방유동에 말뚝이 저항하여 측방유동을 방지시키는 효과이고 다른 하나는 연약지반에 직접 작용하는 성토하중을 지반아칭현상을 통해 경감시키는 효과이다.

성토지지말뚝공법은 북유럽과 동남아시아 등지의 여러 시공사례로부터 그 우수성이 입증된 바 있다(Jonnes et al, 1990). 그러나 성토지지말뚝과 지반사이의 거동 매커니즘에 대한 합리적인 해석에 대한 연구가 부족하여, 대부분의 경우 경험적인 방법으로 설계·시공되고 있는 실정이다(Bujang & Faisal, 1993). 따라서 성토지지말뚝공법의 시공과 보급을 위해서는 우선 성토지지말뚝의 기능 및 효과에 대한 연구가 선행되어야 한다.

한편, 국내에서도 시공성 및 경제성 측면에서 많은 장점을 가지는 성토지지말뚝공법을 도입하기 위한 이론적 및 실험적 연구가 수행된 바 있다(홍원표 등, 1999; 2000a; 2000b; 이승현 등, 2001). 즉, 홍원표 등(1999, 2000a)은 줄말뚝의 형태로 설치된 말뚝의 두부를 캡보로 연결하여 시공한 성토지지말뚝위 성토지반의 파괴 형태를 실험적으로 관찰하여 이를 근거로 성토지지말뚝의 하중분담효과에 대한 이론식을 제안한 후, 실내실험(홍원표 등 2000b) 및 현장실험(이승현 등, 2001)을 통해 이를 검증한 바 있다.

본 연구에서는 성토지지말뚝의 합리적인 설계법을 마련하기 위한 일련의 연구로서 말뚝캡의 설치 형태에 따라 성토지지말뚝공법을 분류하고, 말뚝과 지반간의 상대적인 강성차이로 유발되는 지반아칭현상에 의하여 성토지지말뚝이 분담하게 되는 성토하중의 합리적인

산정을 위한 이론적인 해석법을 제시한 후, 일련의 모형 실험을 통해 제안 이론식의 타당성을 입증하고자 한다.

## 2. 성토지지말뚝공법

성토지지말뚝공법은 말뚝위 성토지반의 지반아칭현상을 이용하여 성토하중을 말뚝을 통해 직접 지지층에 전달시킴으로서 구조물의 안전성을 도모하고 연약지반의 측방유동을 적극 억지시킬 수 있는 공법이다. 그림 1은 성토지지말뚝의 설치상황도이다. 즉, 성토지지말뚝은 그림에서 보는 바와 같이 교대의 뒤택음부와 연약지반 상에 설치된 도로나 철도제방의 하부기초구조물로서 사용된다.

이러한 성토지지말뚝공법은 그림 2에 나타낸 바와 같이 말뚝두부에 설치하는 캡의 시공방법에 따라 크게 세 가지 형태로 구분할 수 있으며, 그 종류 및 특징은 다음과 같다.

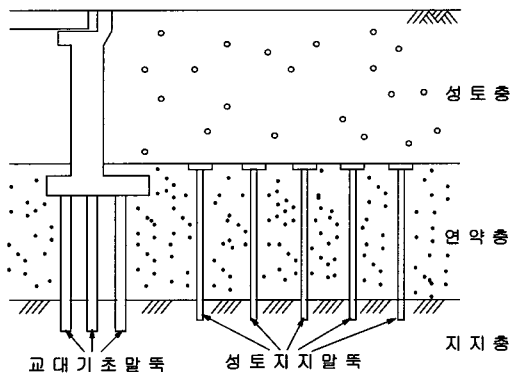
### ① 말뚝슬래브(Pile Slab)공법 : 그림 2(a)

말뚝두부 전면을 철근콘크리트 슬래브로 연결하여 시공하기 때문에 시공이 용이하고 상부의 성토하중을 지지층까지 확실하게 전달시킬 수 있으나 경제적으로는 공사비가 다소 많이 소요되는 단점이 있다.

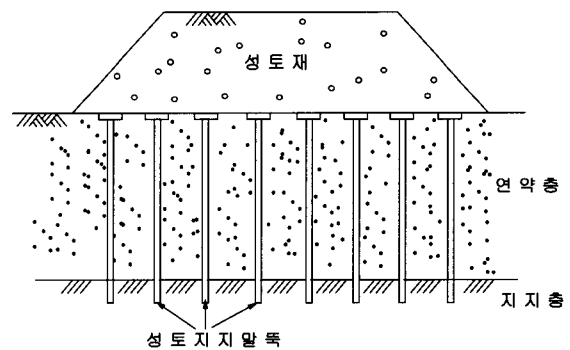
### ② 캡보말뚝(Cap Beam Pile)공법 : 그림 2(b)

각각의 줄말뚝을 캡보로 연결하여 시공함으로써 슬래브공법에 비해 공사비가 저렴하고 단독캡말뚝공법에 비해 더 큰 하중지지효과를 기대할 수 있으나 캡보를 설치하기 위하여 현장에서 거푸집 및 철근작업을 수행해야함으로 시공성이 다소 불량한 결점이 있다.

### ③ 단독캡말뚝(Isolated Cap Pile)공법 : 그림 2(c)



(a) 교대배면에 설치된 성토지지말뚝



(b) 도로나 철도제방에 설치된 성토지지말뚝

그림 1. 성토지지말뚝의 설치상황도

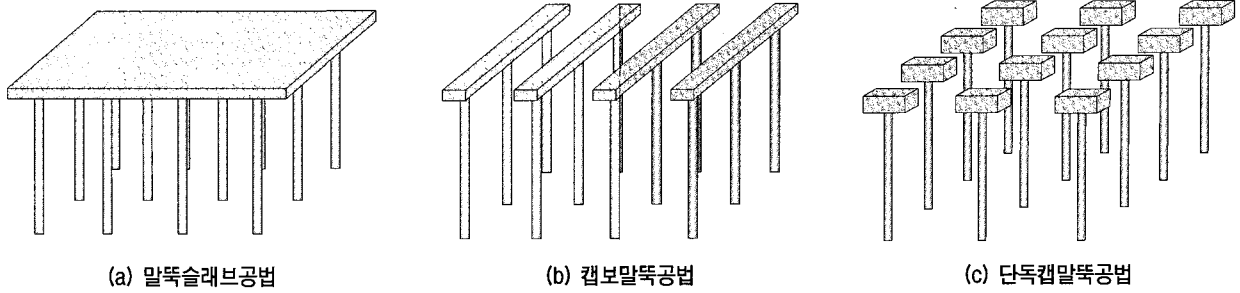


그림 2. 성토지지말뚝공법의 분류

각각의 말뚝두부에 캡을 설치하는 공법으로 단독캡을 기성제품화 할 경우 말뚝설치 후 캡의 시공이 용이하게 되어 시공성이 우수하고 경제적으로도 효과적인 반면에, 연약지반의 면적에 대한 캡의 면적이 작아 지게 되어 성토하중에 대한 성토지지말뚝의 지지 효과 산정에 유의해야 한다.

### 3. 성토지지말뚝의 하중분담 이론

#### 3.1 지반아칭현상

Terzaghi(1943)는 지반아칭현상을 “흙의 파괴영역에서 주변지역으로의 하중전달”이라고 정의하였다. 또한 최근에는 Bonaparte & Berg(1987)가 간격의 크기와 하중감소의 관계를 경험적으로 제시하여 지반아칭효과를 설명하였으며, Hewlett & Randolph(1988)와 Low et al. (1994), 홍원표 등(2000a)은 단독캡 혹은 캡보를 사용한 성토지지말뚝의 지반아칭효과에 대한 연구를 수행하였다. 성토지지말뚝공법에서 지반아칭현상은 그림 2의 세 가지 공법중 캡보말뚝공법과 단독캡말뚝공법에서 발생하게 된다. 이와 같은 지반아치는 성토지지말뚝 위의 성

토고가 일정높이 이상이 될 경우에 발달하게 되며 상부의 연직하중은 발달된 지반아치를 통해 말뚝으로 전달된다. 그림 3(a)와 (b)는 성토지지말뚝 두부에 각각 캡보와 단독캡을 설치한 경우의 지반아치 형상을 나타낸 그림이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 두 공법에서 각각 다른 형태로 발생하는 지반아칭현상의 차이는 그 형태가 캡보말뚝의 경우 터널과 같이 2차원적이고, 단독캡말뚝에서는 돔의 형상과 유사하게 3차원적이라는 것이다. 따라서 이 두 경우의 지반아치로 인한 성토지지말뚝의 하중분담효과에 관한 이론도 각각 다르게 유도되어져야 한다.

#### 3.2 캡보말뚝공법의 2차원 지반아칭이론

홍원표 등(1999, 2000a)은 실내모형실험을 통해 캡보를 설치한 성토지지말뚝으로 지지된 연약지반상 성토지반내의 파괴형태를 관찰하였으며, 이를 근거로 성토지지말뚝 성토지반속의 파괴형태를 아칭파괴와 편칭파괴로 구분하여 각각의 경우에 대한 이론식을 식 (1)~식 (3)에 나타낸 바와 같이 정상파괴, 캡파괴 및 편칭파괴의 세 가지 형태로 제안하였다.

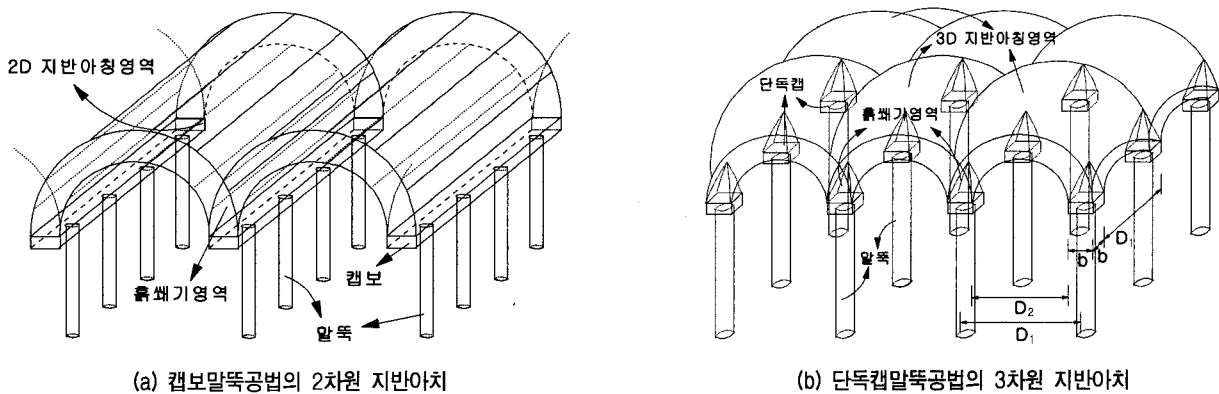


그림 3. 성토지지말뚝위 지반아치의 형상

정상파괴이론  $P_{v1}(t/m) = \gamma \cdot D_1 \cdot H - \sigma_s \cdot D_2$  (1)

캡파괴이론

$$P_{v2} = D_1 \left[ \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{G_1(\phi)} \left( \sigma_s + \frac{c G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right) - \frac{c G_2(\phi)}{G_1(\phi)} \right] - D_2 \sigma_s$$
 (2)

편칭파괴이론  $P_{v3} = \gamma \cdot \left( H - \frac{H_1}{2} \right) \cdot b$

$$+ \left\{ \gamma \cdot \left( H - \frac{H_1}{2} \right) \cdot \tan \phi + c \right\} \cdot \frac{b}{\tan \alpha}$$
 (3)

여기서,  $\gamma$ : 성토재의 단위중량,  $\phi$ : 성토재의 내부마찰각  
 $c$ : 성토재의 점착력,  $H$ : 성토고

$D_1$ : 캡보의 중심간격,  $D_2$ : 캡보의 순간적

$\sigma_s$ : 연약지반 작용응력,  $b$ : 캡보 폭

$$\alpha = (\pi/2 - \omega)$$

$$H_1 = \frac{b}{2 \tan \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)}$$

$$\omega = \tan^{-1} \left( \sqrt{1 + 2D_1 / (D_1 - D_2)} \right)$$

$$G_1(\phi) = N_\phi \left( \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} + 1 \right) - 1$$

$$G_2(\phi) = 2 N_\phi^{\frac{1}{2}} \left( 1 + \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \right) + \frac{1}{\tan \alpha}$$

### 3.3 단독캡말뚝공법의 3차원 지반아칭 이론

Hewlett & Randolph(1988)는 단독캡말뚝공법의 지반 아칭 파괴이론을 아치천정부에서의 연직방향평형과 말뚝캡 바로 상단부 아치의 평형방정식으로 구분하여 제시하였다. 그러나, 캡파괴의 경우는 성토고가 말뚝간격에 비해 대단히 큰 경우에 발생되고 편칭전단파괴의 경우는 말뚝간격에 비해 성토고가 상대적으로 작은 경우에 발생된다(홍원표 등, 2000a). 즉, 말뚝으로 지지된 성토지반 속의 파괴에 대한 실용적인 해석은 아치정상부에서의 응력해석만으로도 충분하다. 따라서 본 논문에서는 단독캡을 사용한 성토지지말뚝에 작용하는 연직 하중 산정식을 지반아칭파괴의 정상파괴에 대해서만 유도·제안한다.

지반이 이상적인 탄소성체이고 Mohr-Coulomb의 항복 기준을 따른다고 가정한 원주형 및 구형공동확장이론은 터널공사, 수직굴착공사 등의 응력해석 및 pressuremeter 시험 등의 해석에 널리 이용되고 있으며, Low et al. (1994), 홍원표 등(2000a), Hewlett & Randolph(1988)는 공동확장이론을 성토지지말뚝의 하중지지효과 해석에

이용한 바 있다.

본 연구에서는 단독캡을 사용한 성토지지말뚝의 하중분담효과를 해석하기 위하여 3차원 극좌표를 활용한 구공동확장이론을 이용한다. 이때 그림 3(b)에 나타낸 바 있는 돔형 지반아치의 정상부에서는 연직방향의 힘만을 고려하며 지반아칭영역 내에서 응력은 모두 동일하다고 하면 전단응력성분은 0으로 간주할 수 있으므로 지반아치 정상부에서의 미소요소는 그림 4와 같이 된다. 따라서 이와 같은 미소요소의 반경방향힘을 합하여 정리하면 식 (4)와 같이 된다.

$$\frac{d\sigma_R}{dR} + \frac{2(\sigma_R - \sigma_\theta)}{R} = -\gamma$$
 (4)

여기서,  $\sigma_R$ : 반경방향 수직응력 ( $t/m^2$ )

$\sigma_\theta$ : 법선방향 수직응력 ( $t/m^2$ )

$R$ : 반경 (m)

$\gamma$ : 단위중량 ( $t/m^3$ )

한편, 단독캡을 사용한 성토지지말뚝에서 인접한 4개의 단독캡부 단면도를 도시하면 그림 5(a)와 같으며, 그림 5(b)는 단독성토지지말뚝의 연직하중산정식을 유도하기 위한 기하학적해석모델이다. 그림 5(b)에서 지반아치정상부에서의 응력상태는 그림 4에 나타낸 미소요소의 응력상태와 동일하고, Mohr의 소성이론에 근거하면  $\sigma_\theta = N_\phi \cdot \sigma_r + 2cN_\phi^{1/2}$ 임으로 식 (4)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\sigma_R}{dR} + \frac{2\sigma_R(1 - N_\phi) - 4cN_\phi^{1/2}}{R} = -\gamma$$
 (5)

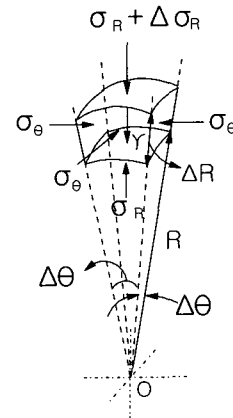


그림 4. 3차원 극좌표에서의 미소요소

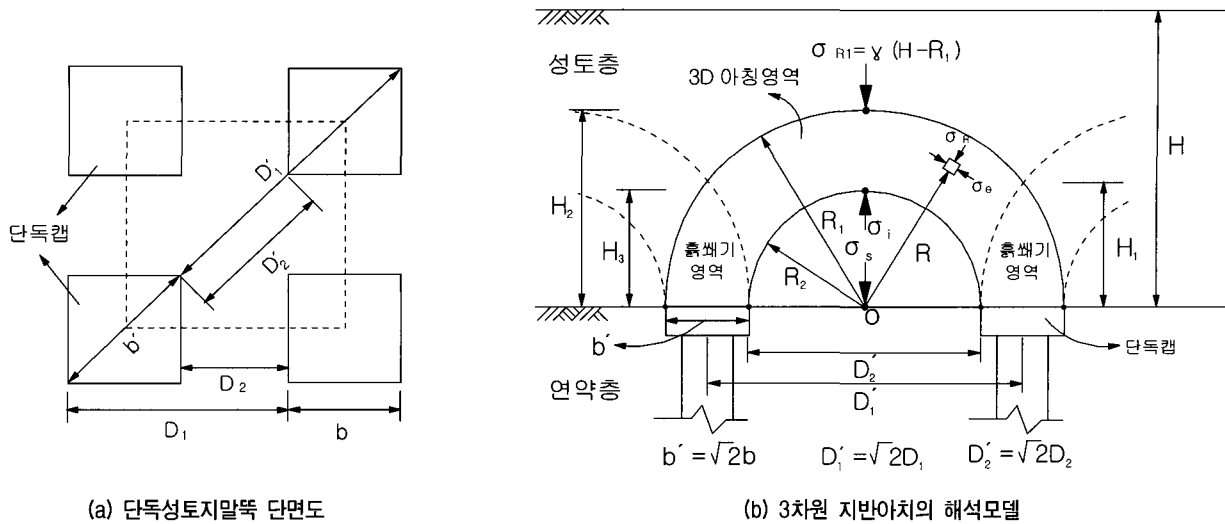


그림 5. 단독성토지말뚝 단면도 및 3차원 지반아치의 해석모델

여기서,  $c$  : 성토재의 점착력 ( $t/m^2$ )  
 $\phi$  : 성토재의 내부마찰각 ( $^\circ$ )  
 $N_\phi = \tan^2(\pi/4 + \phi/2)$

식 (5)를 1계선형미분방정식으로 풀면 일반해는 다음과 같다.

$$\sigma_R = A \cdot R^{2(N_\phi-1)} + \gamma \frac{R}{2N_\phi-3} - \frac{2cN_\phi^{\frac{1}{2}}}{N_\phi-1} \quad (6)$$

그림 5(b)에서 아치 정상부에서의 경계조건  $R=R_1 = \frac{D_1'+b'}{2}$  일 때  $\sigma_{R1} = \gamma(H-R_1)$  이 되는 경계조건을 식 (6)에 대입하여 적분상수 A를 구하고, 이를 다시 식 (6)에 대입하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\sigma_R = \gamma \left( H - R_1 - \frac{R_1}{2N_\phi-3} \right) \cdot \left( \frac{R}{R_1} \right)^{2(N_\phi-1)} + \gamma \frac{R}{2N_\phi-3} - \frac{2cN_\phi^{\frac{1}{2}}}{N_\phi-1} \left\{ 1 - \left( \frac{R}{R_1} \right)^{2(N_\phi-1)} \right\} \quad (7)$$

한편, 아칭영역 내부 경계의 응력  $\sigma_i$ 는  $R=R_2$  일 때의 응력이므로 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{R2} = \sigma_i = \gamma \left( H - R_1 - \frac{R_1}{2N_\phi-3} \right) \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2(N_\phi-1)} + \gamma \cdot \frac{R_2}{2N_\phi-3} - \frac{2cN_\phi^{\frac{1}{2}}}{N_\phi-1} \left\{ 1 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2(N_\phi-1)} \right\} \quad (8)$$

또한 연약지반과 성토의 경계면 상의 O점에 작용하는 응력  $\sigma_s$ 는 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_s = \sigma_i + R_2 \gamma \quad (9)$$

각각의 말뚝캡 상에 작용하는 연직하중  $P_v$ 는 말뚝캡 중심간격 사이의 성토중량에서 연약지반면에 작용하는 전하중을 뺀 것으로 생각할 수 있다. 여기서 연약지반고 성토의 경계면 상에는 균일한 수직응력  $\sigma_s$ 가 작용한다고 가정하면,  $P_v$ 는 식 (10)과 같이 된다.

$$P_v = \text{캡 사이의 성토중량} - \text{연약지반에 작용하는 중량} = \gamma H D_1^2 - \sigma_s (D_1^2 - b^2) \quad (10)$$

홍원표 등(2000a), Low et al.(1994), Hewlett & Randolph (1988)는 성토지말뚝의 하중지반효과를 나타내는 지표로서 성토전체하중에 대한 말뚝에 작용하는 하중의 백분율로 표시되는 효율을 사용하였다. 본 논문에서 제안한 단독캡을 사용한 성토지말뚝의 연직하중분담효과 산정이론을 효율로 나타내면 식 (11)과 같이 된다.

$$E = \frac{P_v}{\gamma H D_1^2} \times 100 = \left[ \frac{\gamma H D_1^2 - \sigma_s (D_1^2 - b^2)}{\gamma H D_1^2} \right] \times 100 = \left[ 1 - \frac{\sigma_s (D_1^2 - b^2)}{\gamma H D_1^2} \right] \times 100 \quad (11)$$

## 4. 모형실험

### 4.1 실험 계획 및 방법

본 연구에서는 캡보말뚝공법과 단독캡말뚝공법에서 각각 다르게 발달하게 되는 지반아치의 기하학적형상으

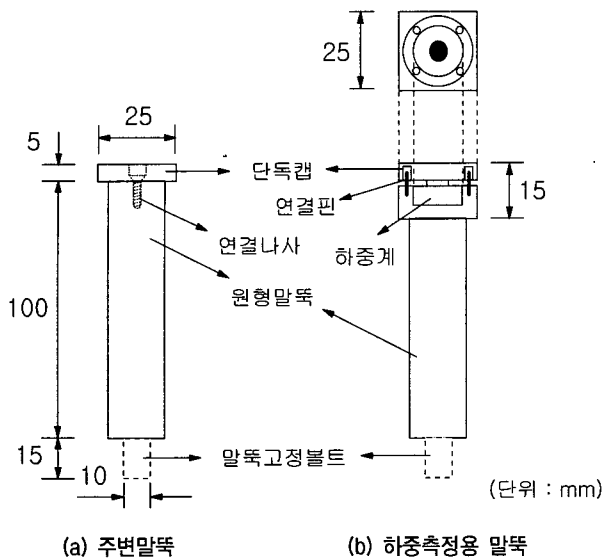


그림 6. 단독캡을 사용한 성토지지말뚝

로부터 유도된 두 이론식의 타당성을 입증하고, 이 두 공법으로 시공된 성토지지말뚝의 성토하중 분담효과를 확인하기 위한 모형실험을 말뚝간의 간격비( $D_2/D_1$ )가 0.5 및 0.7인 경우에 대하여 수행하는 것으로 계획하였다.

본 모형실험에서 실험장치는 크게 토조, 말뚝장치, 모래살포기 및 하중측정장치의 네 부분으로 구성된다. 모형실험 방법은 먼저 토조 내부에 일정간격의 성토지지말뚝 및 연약지반부를 형성시키고 말뚝 위에 하중계를

설치한 후, 모래살포기를 이용하여 성토모래층을 일정한 상대밀도(80%)를 가지도록 단계별로 형성시키면서 하중측정장치로 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중을 측정하게 된다.

여기서, 캡보말뚝공법에 대한 모형실험의 경우는 줄말뚝의 형태로 제작된 성토지지말뚝을 30mm폭의 캡보로 연결하여 실험을 수행한 홍원표 등(2000b)의 실험법과 동일한 방법으로 수행하는 것으로 한다.

단독캡말뚝공법에 대한 모형실험은 그림 6~7에 나타난 바와 같이 성토지지말뚝 및 모래살포장치를 제작하여 실험을 수행한다. 본 모형실험에서는 가로×세로가 25mm×25mm인 단독캡을 설치한 6열×6열의 모형말뚝 36개를 정방형으로 설치하고, 중앙의 4개 말뚝에 작용하는 하중을 측정하는 방식으로 수행한다.

단독캡말뚝공법에 대한 모형실험시 토조는 모형말뚝간의 간격과 성토고의 변화 범위를 고려하여 내부치수를 80×80×80cm로 하고, 토조안의 지반거동을 관측할 수 있도록 10mm 두께의 투명아크릴을 사용하여 제작한다. 또한 성토지지말뚝은 그림 6에 나타난 바와 같이 나사장치를 이용해 쉽게 조립·설치할 수 있도록 주변말뚝과 하중측정용말뚝으로 구분하여 제작하고, 단독캡은 토조의 크기를 고려하여 폭이 25mm인 정방형으로 제작한다. 다음으로 일정한 상대밀도로 성토지반을 조성하

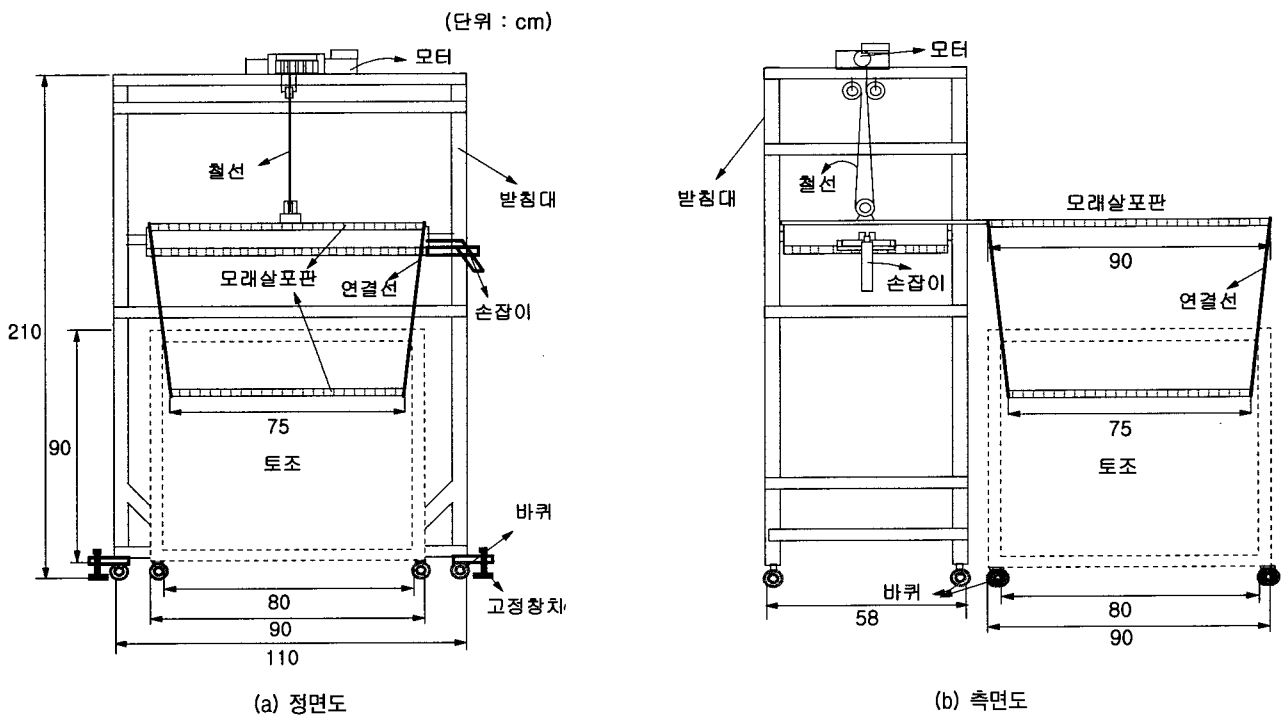


그림 7. 모래살포장치

기 위하여 그림 7과 같이 모래살포장치를 제작한다. 본 모래살포장치는 모래살포판과 낙하높이를 조정하기 위한 낙하고제어장치로 크게 구분된다. 모래살포판은 눈금크기가 2mm인 다수의 구멍이 뚫려있는 다공판을 사용하여 두 가지 크기로 제작한다. 하나는 상대밀도가 작은 경우에 살포판이 토조내부로 들어갈 수 있도록 75×75cm크기로 제작하고, 다른 하나는 토조 상부에서 모래를 살포할 경우에 사용할 수 있도록 90×90cm로 제작한다. 낙하고제어장치에는 모래살포장치의 자체중량과 모래살포시에 작용하는 하중을 충분히 견딜 수 있도록 200kg의 하중까지 지탱할 수 있는 모터를 설치한다. 그리고 이 모터와 모래살포판 사이를 철선으로 연결하여 승강기의 원리로 낙하고를 상하로 자유로이 조절할 수 있도록 한다. 즉, 전기로 작동하는 모터에 상·하 방향으로의 이동을 제어할 수 있는 이동버튼장치를 설치하여 모래살포판의 높이를 조정하게 된다. 이와 같이 제작되는 모래살포장치는 최대 낙하높이를 모형토조의 최상부로부터 130cm까지 조정할 수 있다.

한편, 하중측정장치는 하중계(load cell), 연결판(connection board) 및 컴퓨터로 구성되며, 이 장치는 성토지지말뚝위에 설치되어 있는 하중계를 통해 측정된 하중값을 컴퓨터에 입력·저장하는 시스템을 총칭한다. 성토지지말뚝에 작용하는 하중을 계측하기 위해 사용되는 하중계는 최대용량이 500lb인 전기저항방식이며, 그 치수는 지름이 19.05mm, 높이는 6.35mm이다. 이러한 하중계를 통하여 계측된 연직하중값은 연결판을 통해 컴퓨터에 입력·저장된다.

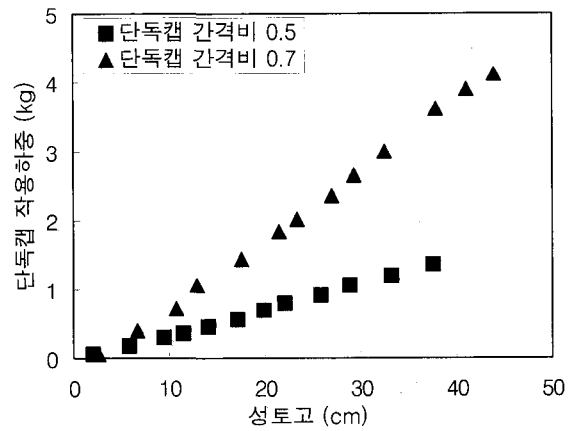
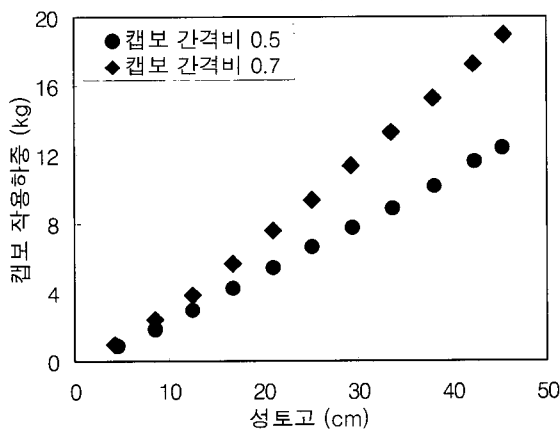
표 1. 한강모래의 물리적 특성

|                            |                 |      |
|----------------------------|-----------------|------|
| 체분석                        | D <sub>10</sub> | 0.2  |
|                            | D <sub>30</sub> | 0.29 |
|                            | D <sub>60</sub> | 0.42 |
|                            | C <sub>u</sub>  | 2.1  |
|                            | C <sub>c</sub>  | 1.00 |
| 비중(G <sub>s</sub> )        |                 | 2.67 |
| 최대건조밀도(g/cm <sup>3</sup> ) |                 | 1.62 |
| 최소건조밀도(g/cm <sup>3</sup> ) |                 | 1.36 |
| 내부마찰각(상대밀도 80%)            |                 | 43°  |

#### 4.2 사용시료

본 모형실험에서 성토재료는 난지도 부근에서 채취한 한강모래를 물로 씻어 세립분을 제거한 후 건조사켜 사용하였다. 본 연구에서 성토재료로 사용한 한강모래의 토질특성은 표 1에 나타낸 바와 같다. 즉, 균등계수(C<sub>u</sub>)는 2.1, 곡률계수(C<sub>c</sub>)는 1.0이고 비중(G<sub>s</sub>)은 2.67이다. 또한 최대건조단위중량과 최소단위중량은 각각 1.62g/cm<sup>3</sup>과 1.36g/cm<sup>3</sup>이다. 상대밀도가 80%일 때 단위체적중량은 1.54g/cm<sup>3</sup>이고 배수삼축압축시험을 실시한 결과 내부마찰각은 43.0°로 나타났다.

모형실험시에 사용되는 연약지반재료는 실제 점토를 연약지반재료로 사용하여 하중실험을 수행한 결과와 점토 대체재료인 스폰지고무로 연약지반을 형성시켜 실험을 실시한 결과를 비교·검토한 홍원표 등(2000b)의 연구 결과에 근거하여 스폰지고무를 연약지반 대체재료로 사용한다.



(a) 캡보 작용하중

(b) 단독캡 작용하중

그림 8. 성토고에 따른 성토지지말뚝 작용하중 측정 결과

### 4.3 실험결과

성토지지말뚝 두부에 캡보를 설치한 경우와 단독캡을 설치한 경우의 하중분담효과를 측정하기 위하여 수행한 모형실험결과를 그림 8에 나타내었다.

그림 8(a)는 캡보로 연결된 성토지지말뚝의 간격비를 0.5 및 0.7로 조절하여 수행한 모형실험결과를 성토고에 따른 캡보작용하중으로 나타낸 것이다. 여기서, 캡보작용하중은 폭이 3cm이고 길이가 30cm인 한 개의 캡보상에 작용하는 하중(kg)이다. 그림 8(b)는 각각의 말뚝 두부에 단독캡을 설치한 성토지지말뚝의 간격비를 0.5 및 0.7로 조절하여 수행한 모형실험 결과를 성토고에 따른 단독캡작용하중으로 나타낸 그림이다. 여기서, 단독캡작용하중은 폭×길이가 2.5cm×2.5cm인 단독캡 하나에 작용하는 하중으로서, 6열×6열로 설치된 총 36개의 성토지지말뚝 중 중앙 부 4개의 말뚝에서 각각 측정하중값을 평균한 값이다.

그림 8에서 캡보 및 캡보 작용하중은 성토고가 증가할수록 선형적으로 증가하고, 그 기울기는 캡보간의 간격이 넓을수록 더 커지게 됨을 알 수 있다.

## 5. 고찰

### 5.1 2차원 3차원 지반아칭이론식의 비교

홍원표 등(2000a)은 캡보를 사용한 성토지지말뚝상의 2차원 지반아칭효과를 고려한 연직하중산정식을 식 (1)과 같이 제안하였다. 또한 본 연구에서는 단독캡을

사용한 성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 관한 이론적인 해석법을 3.2절에 설명한 바와 같이 유도·제안하였다. 이 두 이론식의 유도에 있어서 가장 큰 차이는 그림 3에 나타낸 바와 같이 성토지지말뚝위 성토지반속에 발달하는 지반아치의 형상이다. 따라서 여기서는 서로 다른 형태로 발달하는 지반아치의 기하학적형상으로부터 각각 유도된 두 이론식에 의한 성토지지말뚝의 하중분담효과 산정치를 비교·분석하여 지반아치의 형상이 성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다.

두 이론식의 비교를 위하여 우선 그림 9와 같은 상태의 현장을 대상현장으로 가정하였다. 즉, 성토지지말뚝으로는 400mm 직경의 PC말뚝을 중심간격이 2m가 되도록 연약층을 관통하여 설치한다. 이 때 캡보를 사용한 성토지지말뚝의 경우는 말뚝들을 줄말뚝의 형태로 설치하고 각각의 줄말뚝을 0.8m폭을 가지는 캡보로 연결한다. 또한, 단독캡을 사용하는 경우는 연직 및 수평방향 말뚝의 중심간격이 모두 2m로 동일하도록 정방형으로 성토지지말뚝을 설치하고 각각의 말뚝위에 가로×세로가 0.8m×0.8m인 단독캡을 시공하는 것으로 한다. 한편, 성토재료는 내부마찰각이 30°이고 단위체적중량이 1.8t/m<sup>3</sup>인 사질토를 사용하여 10m높이의 성토를 실시한다.

위에 설명한 바와 같은 조건의 현장을 기본으로 하여 두 가지 형태의 성토지지말뚝의 하중분담효과를 검토한다.

먼저, 그림 10(a)는 그림 9에 나타낸 기본현장의 제반요소 중에서 성토고만을 변화시키면서 두 이론식으로 구한 성토지지말뚝의 효율을 비교·도시한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 단독캡말뚝공법에 비해 전체 연약지반 단면적 대비 말뚝캡의 단면적이 작음에도 불구하고 2차원이론값과 3차원이론값이 대체로 유사한 것으로 나타났다. 또한 초기에 성토고가 낮은 경우에는 2차원이론으로 구한 효율값이 다소 더 큰 반면에 성토고 5.7m에서 두 이론값이 교차하여 그 이상의 성토고에서는 오히려 3차원 이론값이 더 큰 결과를 보여주고 있다. 그림 10(b)는 말뚝캡간격비(D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>)만을 0.40~0.95까지 변화시킨 경우의 성토지지말뚝 효율을 나타낸 것이다. 여기서, D<sub>2</sub>는 말뚝캡간의 순간격이고, D<sub>1</sub>은 말뚝캡의 중심간격이다. 말뚝캡간격비의 변화에 따라 두 이론효율값은 간격비가 커질수록 감소하는 비교적 유사한 거동을 보이고 있으나, 간격비가 작은 경

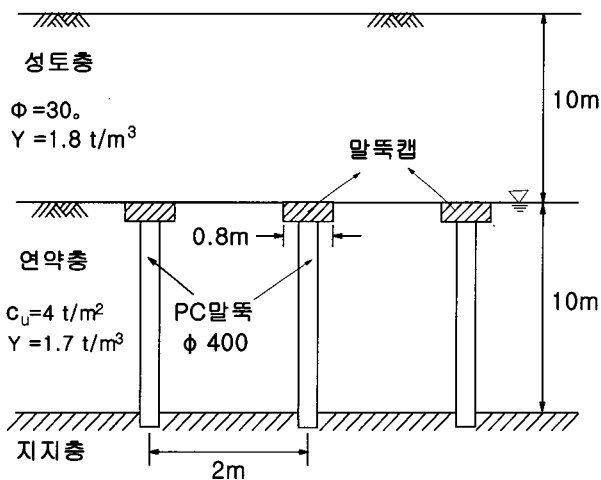
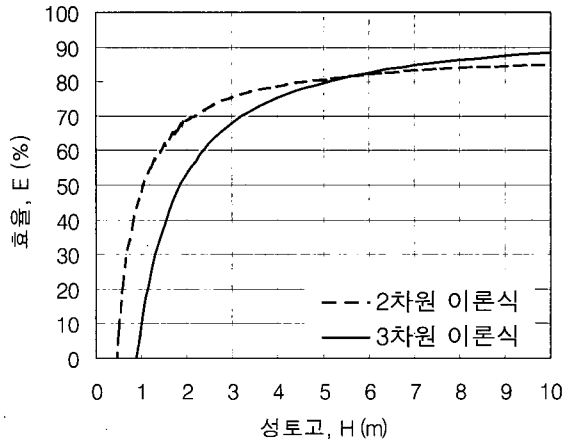
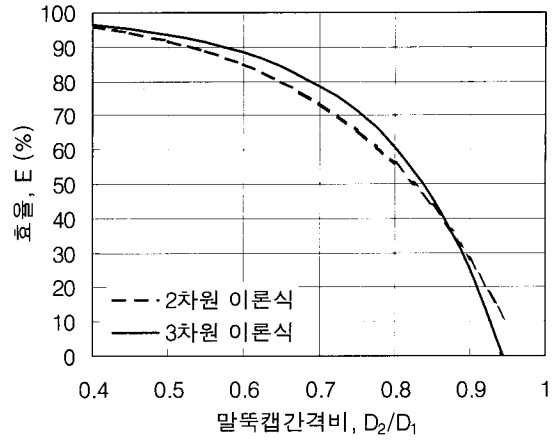


그림 9. 성토지지말뚝의 설치단면도





(a) 성토고의 영향



(b) 말뚝캡간격비의 영향

그림 10. 2차원 및 3차원 지반아치이론식의 비교

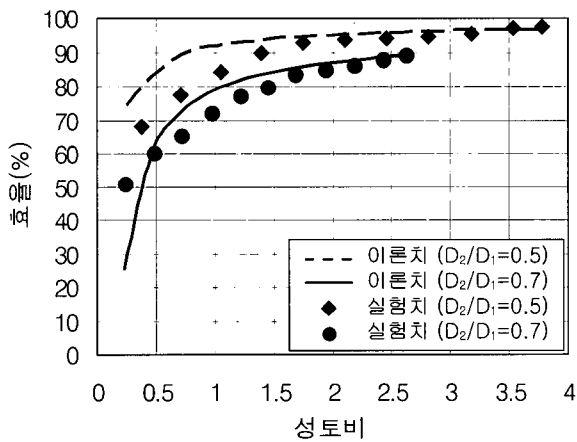
우에는 3차원 이론효율이 더 크고 간격비 0.85와 0.9사이에서 두 효율값이 교차하여 그 이후의 간격비에서는 2차원 이론값이 더 큼을 알 수 있다.

단독캡공법이 캡보말뚝공법에 비해 전체 연약지반 단면적 대비 말뚝캡의 단면적이 작음에도 불구하고 2차원 이론값과 3차원 이론값이 대체로 유사하게 나타나는 원인은 그림 3에 보인 바와 같이 말뚝캡위에 발현되는 지반아치의 형상에 기인한 것으로 판단된다. 즉, 터널과 유사한 형태로 발현되는 캡보상의 지반아치에 비해 돔의 형태로 발현되는 단독캡상의 지반아치에 의한 하중 전달효과가 더 크기 때문에, 말뚝캡간격비가 동일한 경우 말뚝캡 단면적의 크기에는 상당한 차이가 있음에도 불구하고 하중분담효율값에는 큰 차이가 없는 결과를 보이는 것으로 판단된다. 이러한 비교 결과 말뚝캡간격

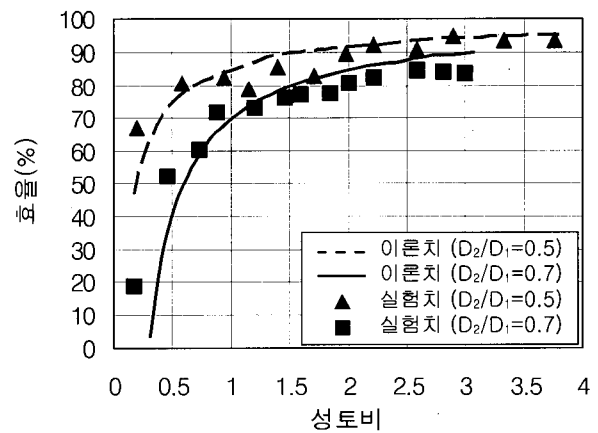
비에 대한 상대적인 성토높이가 클 경우에는 단독캡을 사용한 성토지지말뚝이 보다 더 효과적임을 알 수 있다.

### 5.2 실험치와 이론치의 비교

홍원표 등(2000a, b)은 이론식에 대한 분석과 모형실험 결과로부터 지반아치가 완전히 발달하는 최소 성토고는  $1.33H_2$ (여기서,  $H_2$ 는 외부아치의 반경)이고, 이 보다 더 큰 성토고에서는 정상파괴이론식의 적용성이 우수하다고 하였다. 따라서 본 연구에서 캡보 및 단독캡을 각각 설치하여 수행한 실험결과를 이론치와 비교하기 위해 성토고를  $1.33H_2$ 로 나눈 값인 성토비  $R_H$ 를 사용하였다. 결국 성토비  $R_H$ 는 식 (12)와 같이 된다.



(a) 캡보를 설치한 경우



(b) 단독캡을 설치한 경우

그림 11. 실험치와 이론치의 비교

$$R_H = \frac{H}{1.33H_2} = 0.75 \frac{H}{H_2} \quad (12)$$

그림 11은 성토지지말뚝 두부에 캡보 및 단독캡을 설치하여 수행한 모형실험 결과를 이론치와 비교하여 나타낸 그림이다. 그림 11 (a)와 (b)는 각각 캡보 및 단독캡을 설치한 경우에 대한 성토지지말뚝의 하중분담 효율을 성토비에 따라 비교한 그래프이다.

그림 11에서 알 수 있듯이 캡보 및 단독캡을 설치한 두 가지 경우 모두에서 성토비가 증가할수록 초기에는 효율값이 급격히 증가하다 성토비가 1이상이 되면 점차 증가율이 급격히 작아지면서 수렴해가는 경향을 보인다. 또한 실험치와 이론치를 비교해 보면 비교적 서로 잘 일치하고 있다. 따라서 성토지지말뚝의 성토하중 분담효과 산정을 위해 제안된 두 이론식은 합리적임을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 관한 연구를 수행하여, 성토지지말뚝공법을 말뚝캡의 설치 형태에 따라 말뚝슬래브공법, 캡보말뚝공법 및 단독캡말뚝공법으로 분류하고, 캡보말뚝 및 단독캡을 사용한 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중 산정식을 각각 제안하였으며, 일련의 모형실험을 실시하여 제안식의 타당성을 검증하였다. 연구결과 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 캡보말뚝공법과 단독캡말뚝공법에서는 말뚝과 지반 간의 상대적인 강성차이로 인하여 성토지반 속에 지반아칭현상이 발생하게 되고, 대부분의 성토하중은 발달된 지반차이를 통해 말뚝으로 전달된다. 이들 두 공법에서 발달하게 되는 지반아치의 차이는 그 형태가 캡보공법의 경우 터널의 형태와 유사하게 2차원적이고, 단독캡공법에서는 둠의 형상과 유사하게 3차원적이라는 것이다. 따라서 이 두 경우의 지반아치로 인한 성토지지말뚝의 하중분담효과에 관한 이론식을 2차원 및 3차원 극좌표를 이용한 공동확장이론에 근거하여 각각 제안하였다.
- (2) 캡보 및 단독캡을 설치한 성토지지말뚝에 작용하는

연직하중을 측정하기 위하여 수행된 모형실험 결과, 성토지지말뚝 작용하중은 성토고가 증가할수록 선형적으로 증가하고, 그 기울기는 말뚝간의 간격이 넓을수록 더 커지게 됨을 확인하였다.

- (3) 캡보말뚝공법과 단독캡말뚝공법에 대해 각각 제안된 두 이론식을 비교·고찰한 결과, 단독캡말뚝공법이 캡보말뚝공법에 비해 전체 연약지반 단면적 대비 말뚝캡의 단면적이 작음에도 불구하고 성토지지말뚝의 하중분담 효율은 두 공법에서 비교적 서로 유사한 경향을 보인다.
- (4) 성토지지말뚝 두부에 캡보 및 단독캡을 설치하여 수행한 모형실험 결과를 이론치와 비교·분석한 결과, 실험치와 이론치가 비교적 서로 잘 일치함을 확인하였다.

## 참고 문헌

1. 홍원표, 윤중만, 서문성(1999), "말뚝으로 지지된 성토지반의 파괴형태", *한국지반공학회논문집*, 제15권, 제4호, pp.207-220.
2. 홍원표, 이재호, 전성권(2000a), "성토지지말뚝에 작용하는 연직하중의 이론해석", *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제1호, pp.131-143.
3. 홍원표, 강승인(2000b), "성토지지말뚝에 작용하는 연직하중에 대한 모형실험", *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제4호, pp.171-181.
4. 이승현, 이영남, 홍원표, 이광우(2001), "성토지지말뚝에 작용하는 연직하중에 대한 현장시험", *한국지반공학회논문집*, 제17권, 제4호, pp.221-229.
5. Bonaparte R. & Berg R.R.(1987), "The use of geosynthetics to support roadways over sink-hole prone areas". *Pro., 2nd Multi-disciplinary Conf., on Sink-hole and Enviromental Impact of Karst*, Orland, 437-445.
6. Bujang, B.K.H. & Faisal, H.A.(1993), "Pile Embankment on Soft Clay : Comparison Between Model and Field Performance", *Proc. 3rd International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, St. Louis, Missouri, Vol.I, pp.433-436.
7. Hewlett, W.J. & Randolph, M.F.(1988), "Analysis of piled embankments" *Ground Engineering*, London, England, 21(3), pp.12-18.
8. Jonnes, C.J.F.P., Lawson, C.R. & Ayres, D.J.(1990), "Geotextile reinforced piled embankment", *Geotextile, Geomembranes and Related Products*, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 8339, pp.155-160.
9. Low, B.K., Tang, S.K. & Choa, V.(1994), "Arching in piled embankments", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE., Vol. 120, No.11, pp.1917-1937.
10. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.

(접수일자 2002. 4. 29, 심사완료일 2002. 8. 21)