

## 단독캡을 사용한 성토지지말뚝에 대한 모형실험

### Model Tests on Embankment Piles with Isolated Pile Caps

홍 원 표\*<sup>1</sup> Hong, Won-Pyo

이 광 우\*<sup>2</sup> Lee, Kwang-Wu

#### Abstract

The factors affecting the vertical loads acting on embankment piles can be classified into two factors on pile and soil. Factor on pile is the space between pile cap and factors on soil are embankment height and soil parameters( $c$ ,  $\phi$ ). Therefore, a series of model tests were performed both to investigate the extent of influence of these factors and to verify the reliability of the proposed theoretical analysis. In the model tests, the piles were installed in the 6 columns  $\times$  6 rows(or 5 columns  $\times$  5 rows) below the embankment and the isolated pile caps with the area of 2.5cm  $\times$  2.5cm were installed on each pile head. The portion of the embankment load carried by model pile caps decreases with increment of the space between pile caps and increases with increment of the embankment height and the relative density(or internal friction angle) of fill. Also, the experimental results showed good agreement with theoretical predictions.

#### 요 지

성토지지말뚝의 하중분담효과에 영향을 미치는 요소는 크게 말뚝에 관한 요소와 지반에 관한 요소로 구분할 수 있다. 우선 말뚝에 관한 요소로는 말뚝캡간격비를 들 수 있으며, 지반에 관한 요소는 성토고와 지반정수( $c$ ,  $\phi$ )를 들 수 있다. 본 연구에서는 이들 영향요소들이 성토지지말뚝의 하중분담효과에 미치는 영향정도를 평가하고, 기 제안된 이론식의 타당성을 입증하기 위하여 일련의 모형실험을 수행하였다. 본 모형실험에서 말뚝은 성토지반아래에 6행 $\times$ 6열(혹은 5행 $\times$ 5열)의 정방형으로 설치하였으며, 각각의 말뚝 두부에 2.5cm $\times$ 2.5cm 크기의 단독캡을 설치하였다. 실험 결과 성토지지말뚝의 연직하중분담효과는 말뚝캡 간의 간격이 커질수록 감소하였고, 반면에 성토고가 높아질수록 그리고 성토지반의 상대밀도를 크게 조성할수록 증가하였다. 또한 실험치와 이론치의 비교결과, 제안 이론식이 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중을 합리적으로 잘 산정함을 확인하였다.

**Keywords :** Embankment piles, Isolated pile cap, Model test, Theoretical analysis

#### 1. 서 론

연약지반의 측방유동으로 인한 피해가 예상되는 국내 성토 건설 현장에 성토지지말뚝공법을 적용하기 위한 일련의 연구가 수년에 걸쳐 수행되어오고 있다(홍원표 등, 1999; 홍원표 등, 2000a; 홍원표 등, 2000b; 이승현 등, 2001; 홍원표 등, 2002). 성토지지말뚝공법은 연

약지반상에 도로·철도제방 등을 축조하거나 교대·옹벽 등의 뒤채움을 실시할 경우 발생하는 연약지반의 측방유동을 방지하기 위하여 말뚝을 사용하는 공법으로서 성토하중의 대부분을 말뚝이 부담하게 하는 공법이다. 본 공법은 북유럽 및 동남아 등의 여러 시공사례(Gartung & Verspohl, 1996; Holmerg, 1978; Johnes et al., 1990; Reid & Buchanan, 1984)로부터 연약지반의

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

\*2 정회원, 중앙대학교 대학원 박사과정 (Member, Graduate Student, Civil & Environmental Engrg., Chung-Ang Univ., kwangwu@kict.re.kr)

측방유동을 적극 억제할 수 있을 뿐 아니라, 시공성 및 경제성 측면에서도 효과적임이 입증된 바 있다.

성토지지말뚝공법은 말뚝두부에 캡을 설치하는 형태에 따라 크게 말뚝슬래브공법, 캡보말뚝공법 및 단독캡말뚝공법으로 구분할 수 있다. 말뚝슬래브공법은 일정 간격으로 설치된 말뚝두부를 철근콘크리트 슬래브로 연결하여 시공하고, 캡보말뚝공법은 줄말뚝의 형태로 설치된 성토지지말뚝의 각 옆을 지중보로 연결하여 시공하며, 단독캡말뚝공법은 각각의 말뚝두부에 단독캡을 설치하는 형태로 시공하는 공법이다. 이들 공법중 캡보말뚝공법 및 단독캡말뚝공법에서는 말뚝과 성토지반간의 상대적인 강성차이로 인하여 성토지반 속에 지반아치가 발달하게 되고, 대부분의 성토하중은 발달된 지반아치를 통해 말뚝으로 전달된다(홍원표 등, 2002).

본 연구의 선행연구로 수행된 일련의 연구를 통해 캡보를 사용한 성토지지말뚝위 성토지반의 파괴모드를 규명한 바 있고(홍원표 등, 1999), 이를 근거로 성토지지말뚝의 연직 하중에 관한 이론식을 제안(홍원표 등, 2000a)하여 모형실험(홍원표 등, 2000b) 및 현장실험(이승현 등, 2001)을 통해 제안식의 타당성을 입증한 바 있다. 또한 단독캡을 사용한 성토지지말뚝의 연직하중 분담 효과에 대한 이론식을 제안하고 일련의 모형실험 및 캡보말뚝공법과의 비교·분석을 통해 제안식이 합리적임을 확인한 바 있다(홍원표 등 2002).

한편, 본 연구에서는 단독캡을 사용한 성토지지말뚝을 대상으로 성토지지말뚝의 연직하중 분담효과에 영향을 미치는 제반 영향요소들을 변화시키면서 모래를 성토재로 사용한 일련의 모형실험을 수행하고, 이러한 영향요소들이 성토지지말뚝의 연직하중 분담효과에 미치는 영향정도를 조사한다. 또한 모형실험결과를 기 제안한 이론식과 비교·분석하여 이론식의 타당성을 검증한다.

## 2. 기존연구

### 2.1 캡보를 사용한 성토지지말뚝

홍원표 등(1999)은 성토지지말뚝으로 지지된 연약지반상 성토지반의 파괴형태를 조사하기 위하여 수행한 일련의 모형실험 결과에 근거하여 성토지반속의 파괴형태를 지반아칭파괴와 편칭전단파괴로 구분하였다. 한편 홍원표 등(2000a)은 이들 두 파괴형태 중 지반아칭파괴는 다시 아칭파괴시 아치의 정상부 및 말뚝캡보상부 쉘

기부의 응력상태에 각각 초점을 맞추는 관점에서 정상파괴와 캡파괴로 구분하여, 식 (1)~식 (3)과 같이 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중산정식을 정상파괴, 캡파괴, 편칭파괴의 세 가지 형태로 각각 유도·제안하였다.

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

캡파괴이론

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

편칭파괴이론

$$P_{v3} = \gamma \cdot \left( H - \frac{H_1}{2} \right) \cdot b + \left\{ \gamma \cdot \left( H - \frac{H_1}{2} \right) \cdot \tan \phi + c \right\} \cdot \frac{b}{\tan \alpha} \quad (3)$$

여기서,  $\gamma$  : 성토재의 단위중량

$\phi$  : 성토재의 내부마찰각

$c$  : 성토재의 점착력

$H$  : 성토고

$D_1$  : 캡보의 중심간격

$D_2$  : 캡보의 순간격

$\sigma_s$  : 연약지반 작용 수직응력

$b$  : 캡보 폭

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

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

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

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

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

### 2.2 단독캡을 사용한 성토지지말뚝

홍원표 등(2002)은 3차원 극좌표를 활용한 구공동축장이론을 이용하여 단독캡을 설치한 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중의 산정식을 식 (4)와 같이 제안하였다. 그림 1은 본 이론식의 유도를 위해 사용된 지반아치의 기하학적 해석모델을 도시한 그림이다.

$$P_v = \gamma H D_1^2 - \sigma_s (D_1^2 - b^2) \quad (4)$$

여기서 연약지반 작용응력  $\sigma_s$ 는 식 (5)와 같다.

$$\sigma_s = \gamma \left( H - R_1 - \frac{R_1}{2N_\phi - 3} \right) \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2(N_\phi - 1)} + \gamma \cdot \frac{R_2}{2N_\phi - 3} - \frac{2cN_\phi^{\frac{1}{2}}}{N_\phi - 1} \left\{ 1 - \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{2(N_\phi - 1)} \right\} + R_2 \gamma \quad (5)$$

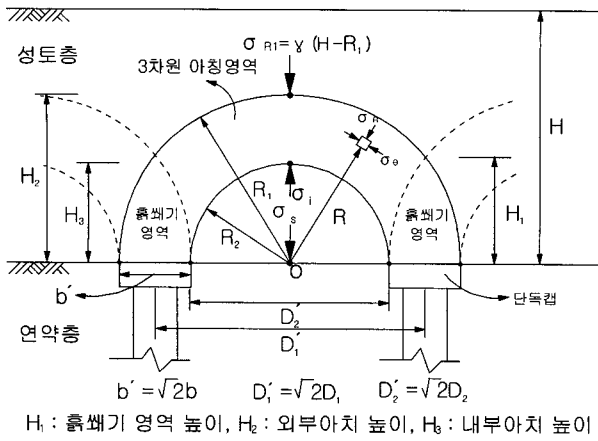


그림 1. 3차원 지반아치의 기하학적 해석모델

### 3. 모형실험

#### 3.1 모형실험장치

##### 3.1.1 토조 및 모래살포장치

모형실험장치는 크게 토조, 성토지지말뚝부, 모래살포기 및 하중측정장치의 네 부분으로 구성된다. 모형실험은 토조 내부에 일정간격의 성토지지말뚝 및 연약지반부를 형성시키고 말뚝 위에 하중계를 설치한 후, 모래살포기를 이용하여 성토모래층을 일정한 상대밀도를 가지도록 단계별로 형성시키면서 하중측정장치로 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중을 측정하는 방법으로 수행된다.

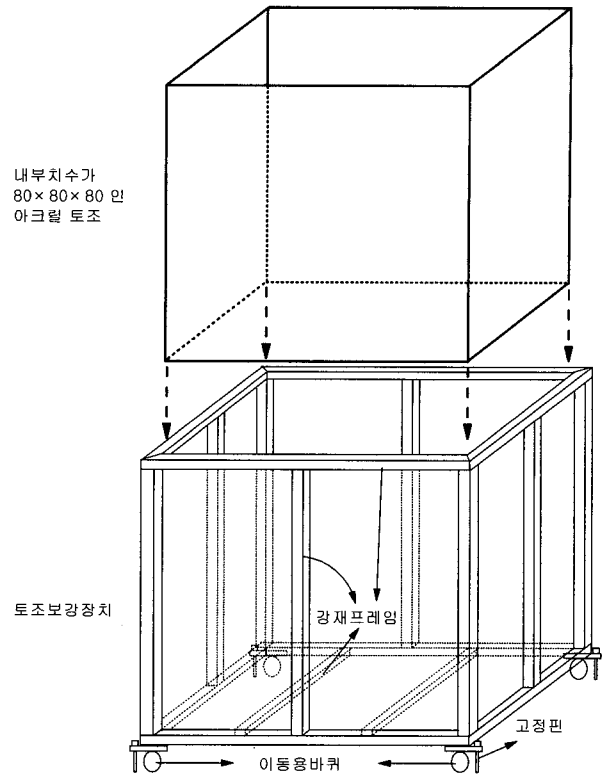


그림 2. 토조 및 토조보강장치

토조는 모형말뚝 간의 간격과 성토고의 변화 범위를 고려하여 내부치수를 80×80×80cm로 하고, 토조안의 지반거동을 관측할 수 있도록 10mm 두께의 투명아크릴을 사용하여 제작한다(그림 2). 또한 성토하중으로 인한

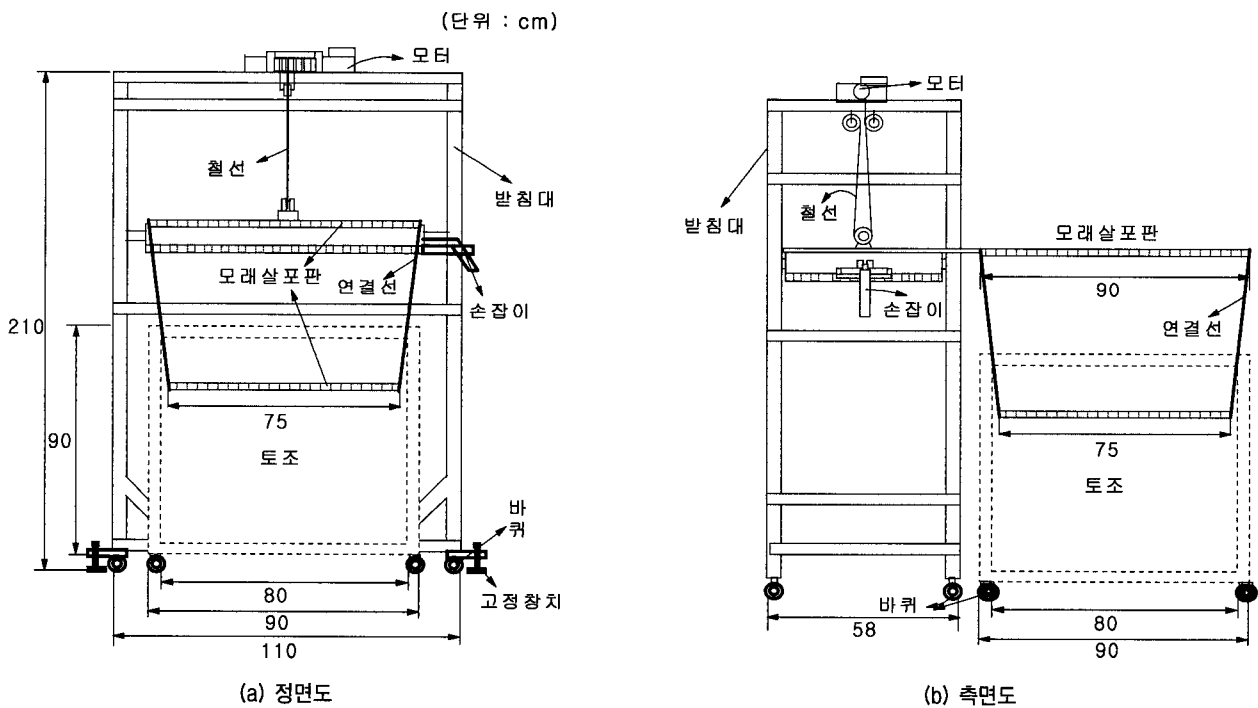


그림 3. 모래살포장치

토조의 변형을 방지하고 토조의 이동을 용이하게 하기 위하여 그림 2에 도시한 바와 같이 바퀴가 달린 강재 프레임으로 토조보강장치를 설치한다. 이와 같이 제작된 토조내부에 일정한 상대밀도로 성토지반을 조성하기 위하여 모래살포장치를 제작한다. 그림 3에 나타난 모래살포장치는 모래살포판과 낙하높이를 조정하기 위한 낙하고제어장치로 크게 구분할 수 있다.

먼저, 모래살포판은 눈금크기가 2mm인 체를 사용하여 두 가지 크기로 제작한다. 하나는 상대밀도가 작은 경우에 살포판이 토조내부로 들어갈 수 있도록 75cm×75cm크기로 제작하고, 다른 하나는 토조 상부에서 모래를 살포할 경우에 사용할 수 있도록 90cm×90cm크기로 제작한다.

다음으로, 낙하고제어장치에는 모래살포장치의 자체 중량과 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 모래살포기는 최대 낙하높이를 모형토조의 최상부로부터 130cm까지 조정할 수 있다.

### 3.1.2 성토지지말뚝부

토조 안에 설치되는 성토지지말뚝부는 모형말뚝, 단독캡 및 말뚝고정장치의 세 부분으로 나누어 각각 제작

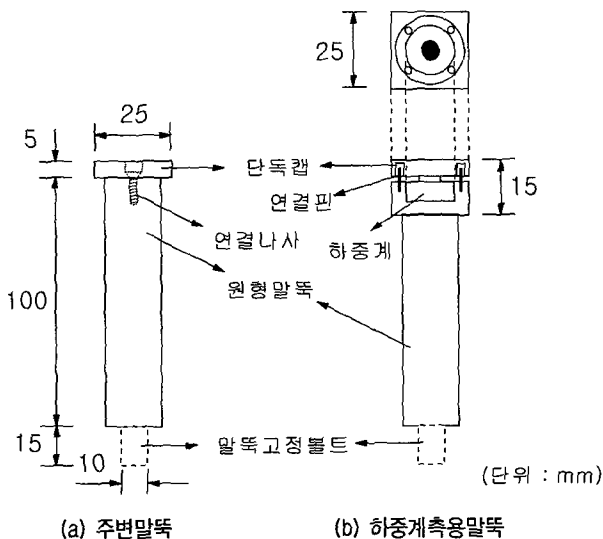


그림 4. 모형말뚝

하여 말뚝간격비에 따라 조립식으로 쉽게 설치할 수 있도록 한다. 먼저, 모형말뚝은 직경이 20mm인 알루미늄 봉을 사용하여 말뚝작용하중 계측을 위한 하중계측용 말뚝과 주변말뚝으로 나누어 제작하고, 말뚝 위에 설치되는 단독캡은 아크릴을 사용하여 가로·세로가 25mm이고 두께가 5mm인 형태로 제작한다. 이와 같이 설계된 모형말뚝 및 단독캡의 크기와 형태는 그림 4에 도시되어 있다. 또한 말뚝을 여러 간격비로 쉽게 변화시킬 수 있고 모형말뚝의 설치를 용이하게 하기 위하여 말뚝 고정장치를 제작한다. 즉, 말뚝하부의 나사장치와 결합할 수 있는 암나사의 위치를 여러 간격비에 대해 미리 결정하여 말뚝고정장치를 제작한다.

### 3.1.3 하중측정장치

본 연구에서 수행하는 모형실험에서 하중측정장치는 하중계(Load Cell), 연결판(Connection Board) 및 컴퓨터로 구성되며, 이 장치는 성토지지말뚝위에 설치되어 있는 하중계를 통해 측정된 하중값을 컴퓨터에 입력·저장하는 시스템을 총칭한다. 먼저, 성토지지말뚝에 작용하는 하중을 계측하기 위해 사용되는 하중계는 최대용량이 200kg인 전기저항방식이며, 그 치수는 그림 5에 나타난 바와 같이 지름이 19.05mm, 높이는 6.35mm이다. 이러한 하중계를 통하여 계측된 연직하중값은 연결판을 통해 컴퓨터에 입력·저장된다.

### 3.2 사용시료

본 모형실험에서 성토재료는 난지도 부근에서 채취한 한강모래를 물로 씻어 세립분을 제거한 후 건조시켜 사용하였다. 본 성토재료의 토질특성은 표 1에 나타난 바와 같이, 균등계수( $C_u$ )는 2.1, 곡률계수( $C_c$ )는 1.0이고 비중( $G_s$ )은 2.67이다(통일분류법 상 SP). 또한 최대건조단위중량과 최소건조단위중량은 각각  $1.62g/cm^3$ 과  $1.36g/cm^3$ 이다.

본 연구에서는 전술한 바와 같이 성토재의 상대밀도

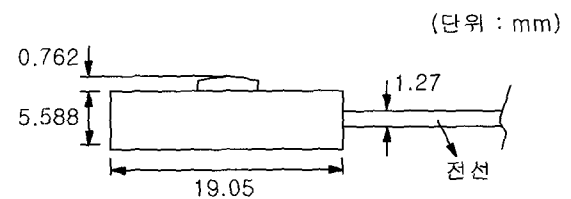


그림 5. 하중계의 치수

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

에 따른 성토지지말뚝상 작용하중의 변화를 알아보기 위한 실험도 계획한다. 즉, 말뚝캡간격비가 0.65 및 0.75 인 경우에 대해서는 성토지반의 상대밀도를 40%, 60%, 80%로 조절하여 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중을 계측하는 모형실험을 수행하는 것으로 계획한다. 3.1.1 절에서 설명한 토조 및 모래살포장치를 이용하여 낙하고에 따른 상대밀도실험을 반복 수행한 결과, 낙하고(x)와 상대밀도(y)는  $y=18.2\log x+1.5$ 의 관계를 가지는 것으로 나타났다. 또한 상대밀도가 40%, 60%, 80%인 경우에 대한 배수삼축압축시험 결과, 성토모래의 유효내부마찰각( $\phi'$ )은 상대밀도가 40%, 60%, 80% 일 때, 각각 36.9°, 40.8°, 43.0°인 것으로 나타났다.

한편, 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.

### 3.3 실험 계획 및 순서

성토지지말뚝의 하중분담효과에 영향을 미치는 요소는 크게 말뚝에 관한 요소와 지반에 관한 요소로 구분할 수 있다. 우선 말뚝에 관한 요소로는 말뚝캡간격비를 들 수 있으며, 지반에 관한 요소는 성토고와 지반정수(c,  $\phi$ )를 들 수 있다(홍원표 등, 2000a). 따라서 본 모형실험은 이와 같은 세 가지의 영향요소를 표 2에 나타낸 바와 같이 변화시키면서 성토지지말뚝에 작용하는 하중을 계측한다.

본 모형실험에서 이들 각각의 영향요소에 대한 평가 방법은 다음과 같다.

- 성토고(H) : 지반아치가 발달하기 위해서는 적어도 그림 1에 나타낸 외부아치(H<sub>2</sub>) 이상의 높이로 성토를 하여야 한다. 성토고가 이 이상 증가할수록 지반아치

표 2. 모형실험 계획

D <sub>2</sub> /D <sub>1</sub>	H	D <sub>r</sub> (%)
0.5	층당 3cm~5cm씩 총 45cm까지 단계 성토	80
0.58		80
0.65		80, 60, 40
0.71		80, 60, 40
0.75		80, 60, 40
0.79		80
0.83		80

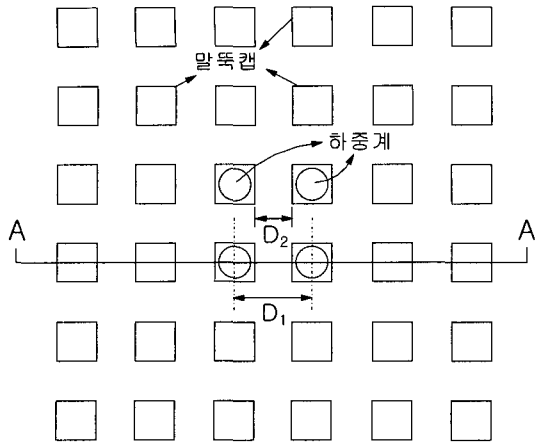
는 더 확실한 하중전달효과를 발휘하게 될 것이다. 따라서 본 모형실험에서는 성토고가 성토지지말뚝의 하중분담효과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 성토지지말뚝 위에 일정한 상대밀도로 3~5cm씩 총 45cm를 단계별로 성토하고 각 성토단계별 말뚝작용하중을 계측한다.

말뚝캡간격비(D<sub>2</sub>/D<sub>1</sub>) : 말뚝캡간격비가 커지면 전체 연약지반면에 대한 말뚝캡의 단면적비가 작아지게 되므로 성토지지말뚝의 하중분담효과도 감소하게 된다. 따라서 본 모형실험에서는 말뚝캡간격비가 성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 미치는 영향을 검토하기 위하여 말뚝캡간격비를 0.5에서 0.83까지 7가지로 조절하여 각각의 말뚝캡간격비에서 성토지지말뚝 작용하중을 계측한다.

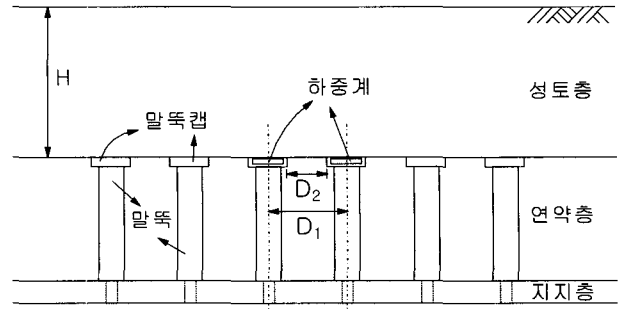
성토재의 상대밀도(D<sub>r</sub>) : 성토재의 상대밀도가 커지게 되면 내부마찰각 또한 증가하게 되어 지반아칭현상에 의한 하중전달효과도 증대된다. 따라서 이와 같은 상대밀도의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 성토지지말뚝 위 성토지반의 상대밀도를 각각 40%, 60% 및 80%로 일정하게 하였을 경우 성토지지말뚝에 작용하게 되는 하중을 계측한다.

한편, 성토지지말뚝은 하중계측용 말뚝 위에 지반아치가 완전히 발달할 수 있도록 그림 6에 도시한 바와 같이 가로×세로가 2.5cm×2.5cm인 말뚝캡을 설치한 6행×6열의 모형말뚝 36개를 정방형으로 설치하고, 말뚝 작용하중은 중앙의 4개 말뚝에 하중계(Load cell)를 부착하여 계측하기로 한다. 그러나 말뚝캡간격비가 0.83인 경우는 토조의 크기를 고려하여 모형말뚝을 5행×5열로 총 25개를 설치하는 것으로 한다.

단독캡을 사용한 성토지지말뚝에 작용하는 연직하중을 계측하기 위한 모형실험의 순서는 그림 7에 흐름도로 나타낸 바와 같다.



(a) 6행×6열 성토지지말뚝의 설치도



(b) AA 단면도

그림 6. 성토지지말뚝 설치도

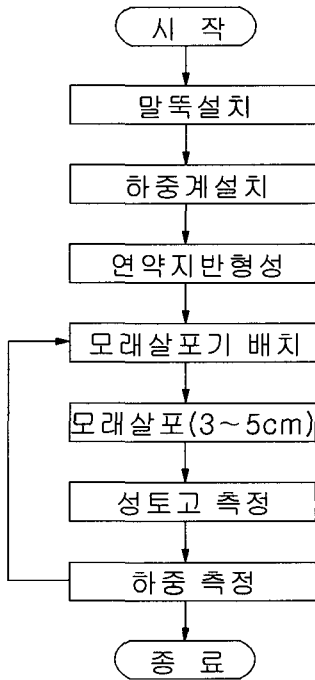
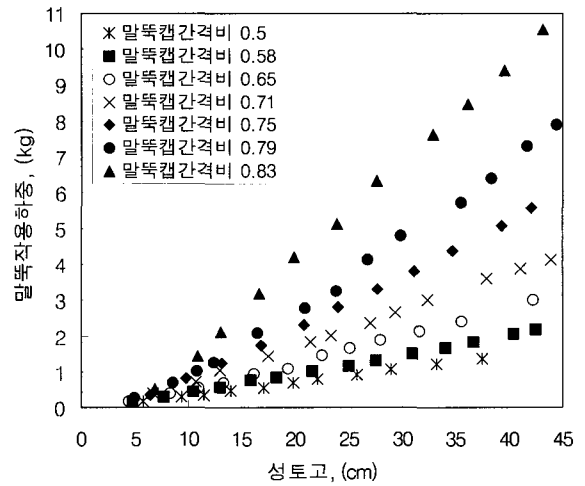


그림 7. 모형실험 흐름도

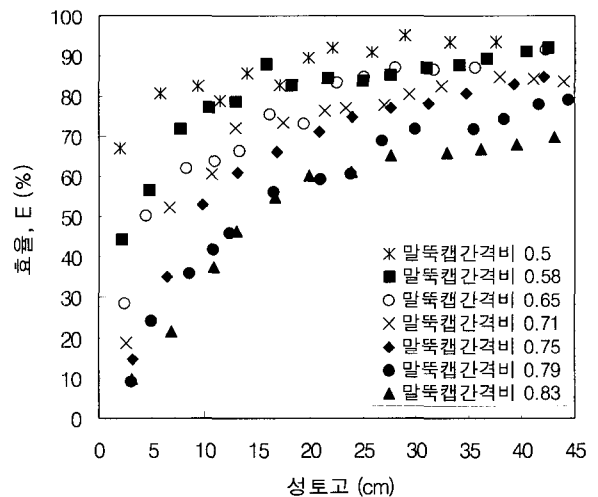
### 3.4 실험결과

그림 8은 단독말뚝캡의 간격비( $D_2/D_1$ )를 0.5, 0.58, 0.65, 0.71, 0.75, 0.79 및 0.83으로 조절하여 수행한 모형 실험 결과를 성토고의 변화에 따른 말뚝작용하중과 효율로 나타낸 결과이다.

먼저, 성토지지말뚝작용하중을 도시한 그림 8(a)에서는 성토고가 증가할수록 말뚝작용하중값이 선형적으로 증가하고, 말뚝캡의 간격비가 클수록 한 개의 말뚝에 전달되는 연직하중 또한 더 커짐을 알 수 있다. 이는 말뚝 캡 간의 간격이 커지면 성토지지말뚝 하나가 부담하는 성토영역이 커져서 부담하는 성토하중도 증가하기 때



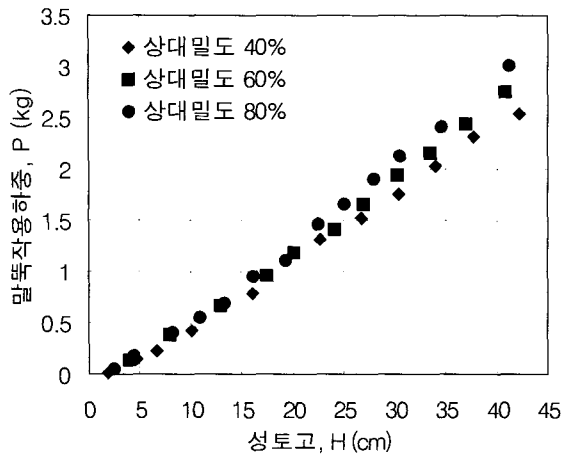
(a) 말뚝작용하중



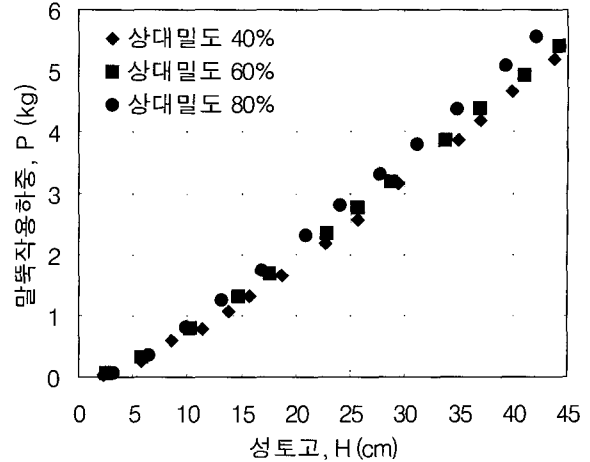
(b) 말뚝의 하중분담효율

그림 8. 실험결과

문이다. 반면에 성토지지말뚝작용하중을 성토하중으로 나눈 값인 하중분담효율은 8(b)에서 알 수 있듯이 말뚝



(a) 말뚝캡간격비가 0.65인 경우



(b) 말뚝캡간격비가 0.75인 경우

그림 9. 성토재 상대밀도에 따른 성토지지말뚝 작용하중 측정 실험결과

캡간격비가 동일한 경우 성토고가 증가할수록 비선형적으로 증가하여 일정한 값에 수렴하는 경향을 보이고 있다. 그리고 말뚝간격비가 증가할수록 효율값의 크기는 감소하게 된다. 즉, 이는 말뚝캡간의 간격이 넓어질수록 말뚝 한 개당의 성토지지말뚝효율은 감소함을 의미한다.

그림 9는 말뚝캡간격비가 0.65 및 0.75인 경우, 성토모래의 상대밀도를 40%, 60% 및 80%로 조성하면서 수행한 모형실험결과를 나타낸다. 그림 9에서 알 수 있듯이 말뚝캡간격비가 동일한 경우 성토지지말뚝 작용하중은 성토지반의 상대밀도가 클수록 더 커지게 된다.

#### 4. 실험치와 이론치의 비교

##### 4.1 성토고의 영향

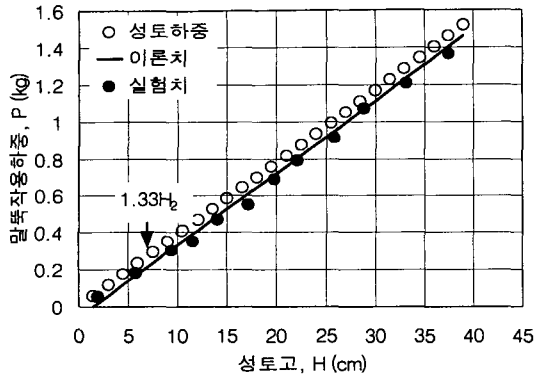
성토고의 변화가 성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 각각의 말뚝캡간격비에 대하여 수행한 모형실험결과를 말뚝작용하중 및 하중분담효율로 정리하여 이론치와 비교하였다(그림 10 및 그림 11).

먼저, 그림 10은 성토재의 상대밀도가 80%이고 말뚝캡간격비가 각각 0.5, 0.58, 0.71, 0.79인 경우 성토고에 따른 성토하중과 말뚝작용하중을 도시한 결과이다. 그림에서 흰 원으로 표시된 성토하중은  $\gamma \cdot D_1^2 \cdot H$ 이고 여기서,  $\gamma$ 는 성토재의 단위중량,  $D_1$ 은 인접말뚝간의 중심간격,  $H$ 는 성토고이다. 또한 이론식에 의한 말뚝작용하중의 계산값은 그림에서 검은 실선으로 나타내었으

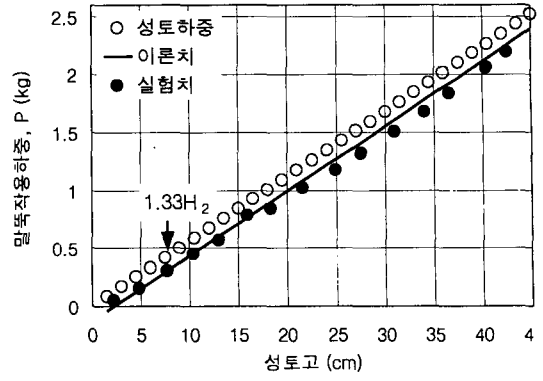
며, 모형실험으로부터 계측한 실험치들은 검은 원으로 나타내었다. 이 들 그림에서도 알 수 있듯이 모형실험이 수행된 모든 간격비에서 성토고 증가에 따라 말뚝작용하중은 선형적으로 증가하고 있으며, 이론치는 실험치와 잘 일치하고 있다. 또한 모든 말뚝캡간격비의 실험에서 성토 초기에는 말뚝작용하중의 실험치가 이론치보다 약간 크나 일정성토고에서 두 값이 교차하여 그 이후의 성토고에서는 동일한 형태로 변화하게 됨을 알 수 있다.

한편, 그림 10에서 말뚝캡간격비가 작을수록 성토하중과 말뚝작용하중의 크기가 서로 유사함을 알 수 있는데, 이는 말뚝간격이 좁으면 성토하중의 대부분이 말뚝에 전달됨을 의미한다.

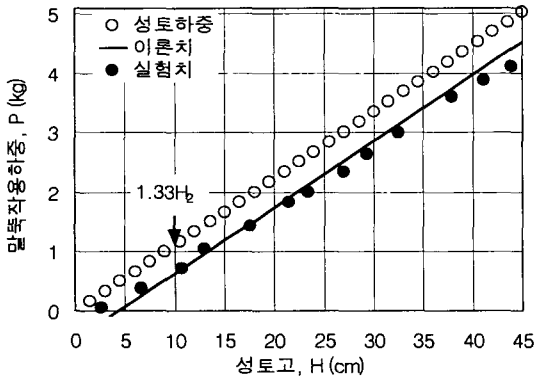
다음으로, 그림 11은 모형실험결과와 이론치를 성토지지말뚝의 하중분담효율로 나타낸 결과이다. 이 그림에서 이론효율값은 성토고가 증가할수록 초기에는 급격히 증가하다 점차 증가율이 감소하여 수렴해 가는 경향을 보이고 있으며, 말뚝작용하중과 마찬가지로 이론치와 실험치가 교차하여 교차성토고 이후에는 이론치와 실험치가 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 또한 이론적인 효율값은 초기성토고에서 매우 작아 심지어는 0이하가 되는 경우도 나타나는데, 그 원인은 지반아치가 완전히 발달된 상태에서 이론식이 유도되었기 때문이다. 즉, 외부아치높이인  $H_2$  이하의 성토고에서는 지반아치가 완전히 발달되지 않아 이론적인 말뚝작용하중 및 효율값이 극히 작아지게 된다. 그러나 모형실험 결과에서는 이론적인 지반아치가 완전히 발달되지 않은 낮은 성토고에서도 효율값이 어느 정도 큰 값을 보인



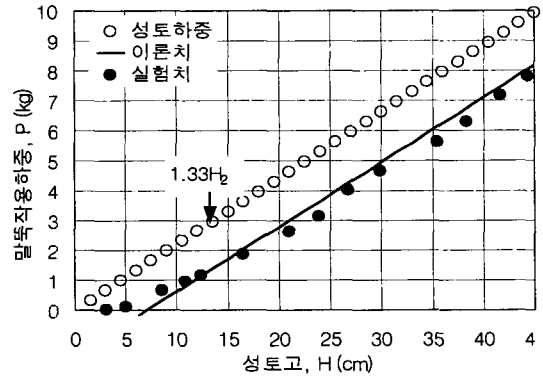
(a) 말뚝캡간격비가 0.5인 경우



(b) 말뚝캡간격비가 0.58인 경우

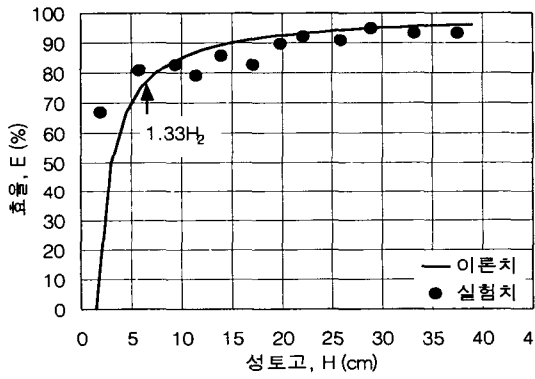


(c) 말뚝캡간격비가 0.71인 경우

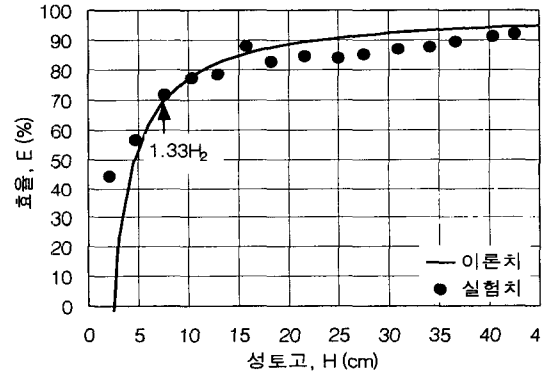


(d) 말뚝캡간격비가 0.79인 경우

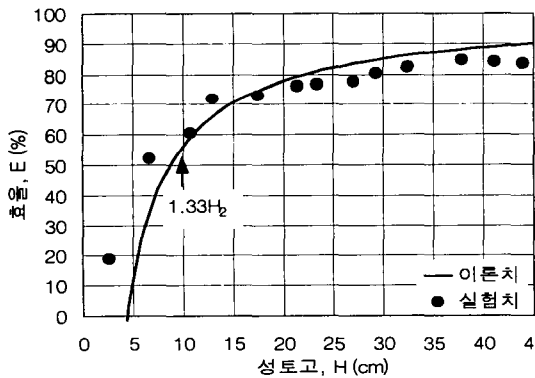
그림 10. 성토고에 따른 말뚝작용하중



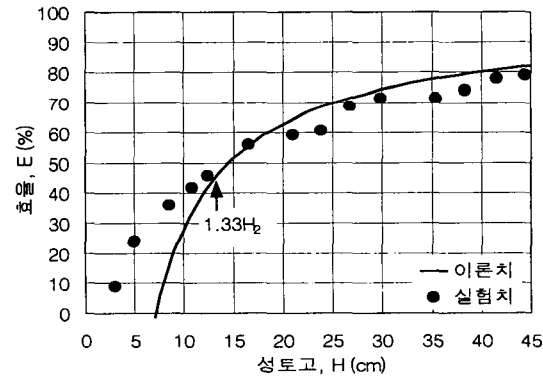
(a) 말뚝캡간격비가 0.5인 경우



(b) 말뚝캡간격비가 0.58인 경우



(c) 말뚝캡간격비가 0.71인 경우



(d) 말뚝캡간격비가 0.79인 경우

그림 11. 성토고에 따른 효율



다. 이는 성토고가 외부아치높이보다 작은 경우에도 지반아칭현상으로 인한 성토지지말뚝으로의 하중전이 효과가 완전치는 않지만 어느 정도 발휘되고 있기 때문인 것으로 판단된다.

홍원표 등(2000a)은 말뚝캡보를 사용한 성토지지말뚝위 성토지반 속에 발달하는 2차원 지반아칭현상에 관한 연구에서 성토지지말뚝 위에 지반아치가 발달하기 위한 소요성토고의 한계치(최소치)는 외부아치높이  $H_2$ 의 1.33배라고 하였다. 따라서 본 연구에서는 단독캡의 경우에서도 이러한 결론이 적용될 수 있는지를 검토해 보기 위하여 그림 10 및 그림 11에 성토고가  $1.33H_2$ 인 위치를 함께 도시하였다. 그림 10 및 그림 11에서도 알 수 있는 바와 같이 성토고가  $1.33H_2$ 보다 큰 경우에 이론치와 실험치가 비교적 동일하게 거동하기 시작한다. 따라서 단독캡을 사용한 성토지지말뚝의 경우에도 성토고가 이론적인 외부아치높이의 1.33배인 경우에 지반아치가 완전히 발달하게 되고 그 이상의 성토고에서는 이론식의 적용성이 매우 우수함을 확인할 수 있었다.

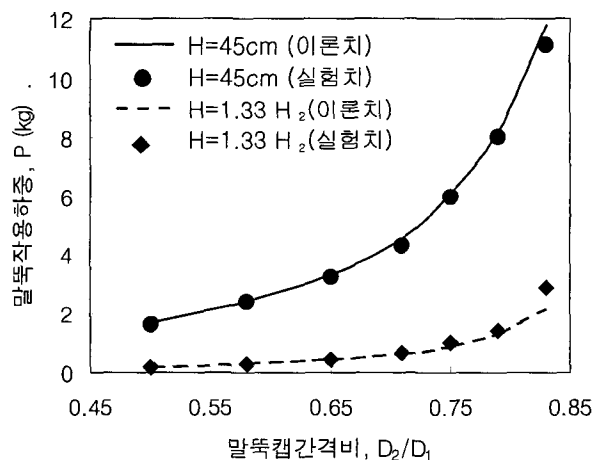
#### 4.2 말뚝간격비의 영향

말뚝캡간격비가 성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 두 가지 경우의 성토고에 대해 간격비에 따른 말뚝작용하중 및 하중분담효율을 비교하였고, 그 결과를 그림 12에 도시하였다. 즉, 본 연구에서 성토모래의 상대밀도를 80%로 일정하게 조성하여 수행한 모형실험결과에서 성토고가 45cm 및  $1.33H_2$ 인 경우에 대한 실험치를 이론치와 비교하여 그

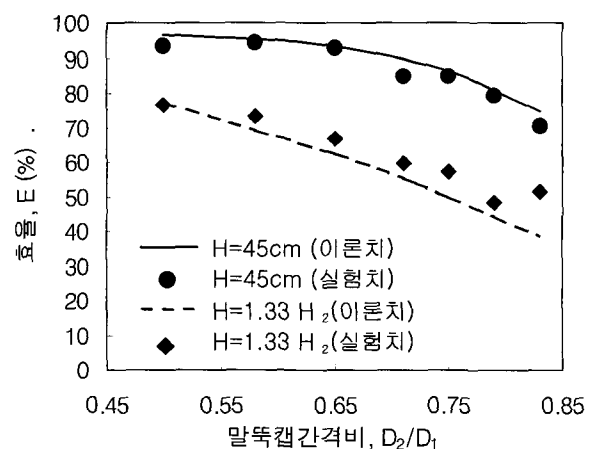
림 12에 나타내었다. 여기서,  $1.33H_2$ 는 4.1절에서 설명했던 바와 같이 성토지지말뚝 위 성토지반 속에 지반아치가 발달하기 위하여 필요한 최소한의 성토높이를 의미한다.

그림 12에 나타낸 두 가지 성토고에 대한 이론치와 실험치 모두는 말뚝캡간격비가 증가할수록 말뚝작용하중도 증가하게 되나 효율값은 오히려 감소하고 있다. 이는 말뚝캡간격비 커질수록(즉, 말뚝캡 사이의 간격이 클수록) 성토지지말뚝하나가 분담하게 되는 성토영역이 증가하게 되어 성토하중은 말뚝작용하중 보다 더 큰 비율로 증가하기 때문이다. 따라서 성토지지말뚝의 하중분담효과를 증대시키기 위해서는 말뚝의 설치간격을 작게 하거나 말뚝캡의 크기를 크게 하여 가능한 한 말뚝캡간격비를 작게 해야 함을 알 수 있다.

또한 그림 12에서 성토고가 45cm로 일정한 경우 말뚝작용하중과 효율은 실선으로 나타낸 이론치와 검은 원으로 표시한 실험치가 잘 일치하고 있으며, 성토고가  $1.33H_2$ 인 경우에는 실측치가 이론치 보다 다소 큰 경향을 보이거나 비교적 잘 일치하고 있다. 한편, 그림 12(b)에서 효율값은 성토고가 45cm로 일정한 경우보다 말뚝캡간격비 변화에 더 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터  $1.33H_2$ 높이의 성토고에서 이론적인 지반아치가 실제 완전히 발달하였음을 알 수 있다. 그러나 이 이상의 성토고로 성토를 할 경우에 더 큰 효율값을 기대할 수 있으므로 성토지지말뚝의 설계·시공 시에는 말뚝캡간격비(혹은, 외부아치높이  $H_2$ )에 대한 상대적인 성토높이를 가능한 크게 하는 것이 지반아칭효과를 증대시키는 방법이 될 수 있다.

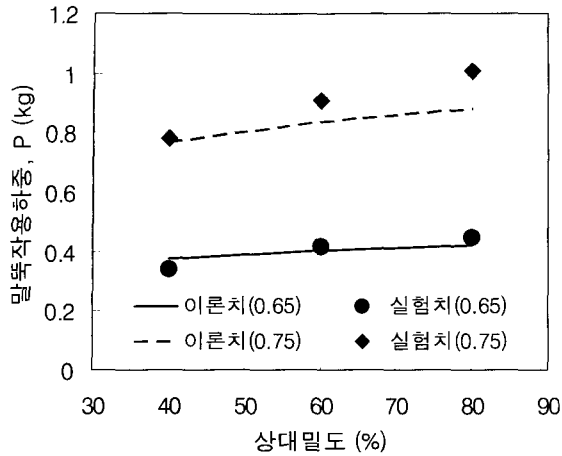


(a) 말뚝캡간격비에 따른 말뚝작용하중

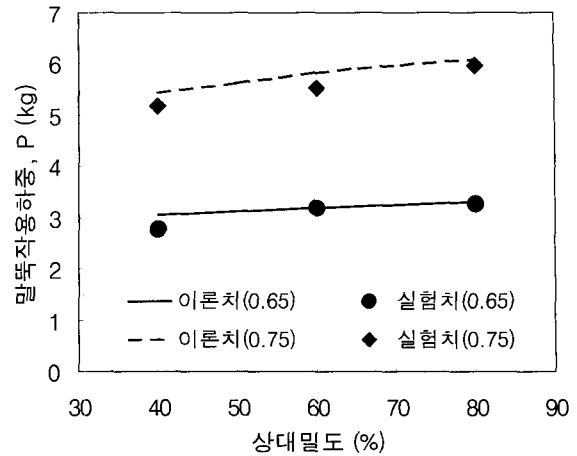


(b) 말뚝캡간격비에 따른 효율

그림 12. 말뚝캡간격비가 성토지지말뚝의 하중분담효과에 미치는 영향



(a) 성토고가 1.33H<sub>2</sub>인 경우



(b) 성토고가 45cm인 경우

그림 13. 성토모래의 상대밀도가 성토지지말뚝의 하중분담효과에 미치는 영향

### 4.3 상대밀도의 영향

성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 미치는 영향요소 중 지반에 관한 요소인 성토재 지반정수의 영향을 알아보기 위하여 말뚝캡간격비가 0.65 및 0.75인 경우에 대하여 성토모래의 상대밀도를 40%, 60% 및 80%로 변화시키면서 성토지지말뚝에 전달되는 성토하중 계측을 위한 모형실험을 수행하였다. 3.2절에서 설명했던 바와 같이 성토재로 사용된 한강모래의 내부마찰각은 배수삼축압축시험결과 상대밀도가 40%, 60%와 80%일 때, 각각  $\phi = 36.9^\circ, 40.8^\circ, 43.0^\circ$ 이다.

그림 13은 성토모래의 상대밀도를 변화시키면서 수행한 모형실험결과를 4.2절에서 설명한 말뚝캡간격비의 영향과 동일하게 두 가지 성토고에 대해 이론치와 비교하여 도시한 그래프이다. 그림 13(a)는 성토고가 외부아치높이 H<sub>2</sub>의 1.33배인 경우에 대한 결과이고, 그림 13(b)는 성토고가 45cm인 경우에 대한 결과이다.

그림 13에서 성토모래의 상대밀도가 증가함에 따라 발달된 지반아치를 통해 성토지지말뚝에 전달되는 성토하중도 증가하여 결국 성토지지말뚝의 하중분담효과가 커지게 되고, 말뚝캡간격비가 클수록 내부마찰각이 성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 미치는 영향 또한 커지게 됨을 알 수 있다. 한편, 실험치와 이론치를 비교해 보면 말뚝캡간격비의 영향에 대한 4.2절에서와 마찬가지로 성토고가 1.33H<sub>2</sub>인 경우에는 말뚝작용하중 및 효율값에 대한 실험치가 이론치 보다 약간 큰 경향을 보이고 있으나 비교적 서로 잘 일치하고 있다.

### 5. 결론

성토지지말뚝의 연직하중분담효과에 영향을 미치는 요소는 크게 말뚝에 관한 요소와 지반에 관한 요소로 구분할 수 있다. 우선 말뚝에 관한 요소로는 말뚝캡간격비를 들 수 있으며, 지반에 관한 요소는 성토고와 지반정수를 들 수 있다. 따라서 본 연구에서는 성토지지말뚝의 하중분담효과에 미치는 제반 영향요소들의 영향 정도를 조사하고, 이전연구에서 제시한 이론식의 타당성을 검증하기 위하여 단독캡을 설치한 성토지지말뚝을 대상으로 모래 성토재를 사용한 일련의 모형실험을 수행하였다. 이러한 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 성토지지말뚝위 성토지반 속에 발달하는 지반아치에 의해 성토지지말뚝으로 전달되는 성토하중은 성토고의 증가에 따라 선형적으로 증가하고, 이 증가속도는 말뚝간의 간격이 넓을수록 더 커지게 된다.
- (2) 성토지지말뚝의 연직하중분담효과는 말뚝캡간격비가 작을수록 더 크다. 따라서 연직하중분담효과를 증대시킬 필요가 있을 시에는 말뚝의 설치간격을 줄이거나 말뚝캡의 폭을 크게 하여 말뚝캡간격비를 감소시켜야 한다.
- (3) 성토재의 상대밀도가 클수록 성토지지말뚝의 연직하중분담효과 또한 증가한다. 즉, 성토지반의 내부마찰각이 클수록 지반아치로 인한 성토지지말뚝으로의 하중전이효과가 증대된다. 따라서 성토재를 잘 다지면 성토지지말뚝의 설치간격을 넓힐 수 있다.
- (4) 단독캡을 설치한 성토지지말뚝의 하중분담효과 산

정을 위하여 홍원표 등(2002)이 제안한 이론식은 성토고가 이론적인 외부아치높이의 1.33배 이상인 경우에 그 적용성이 우수함을 확인할 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. 이승현, 이영남, 홍원표, 이광우(2001), "성토지지말뚝에 작용하는 연직하중에 대한 현장시험", 한국지반공학회논문집, 제17권, 제4호, pp.221-229.
2. 홍원표, 윤중만, 서문성(1999), "말뚝으로 지지된 성토지반의 파괴형태", 한국지반공학회논문집, 제15권, 제4호, pp.207-220.
3. 홍원표, 이재호, 전성권(2000a), "성토지지말뚝에 작용하는 연직하중의 이론해석", 한국지반공학회논문집, 제16권, 제1호, pp.131-143.
4. 홍원표, 강승인(2000b), "성토지지말뚝에 작용하는 연직하중에 대한 모형실험", 한국지반공학회논문집, 제16권, 제4호, pp.171-181.
5. 홍원표, 이광우(2002), "성토지지말뚝의 연직하중 분담효과에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집 제18권, 제4호, pp.285-294.
6. Gartung, E. & Verspohl, J.(1996), "Geogrid reinforced embankment on piles-Monitoring", *Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement*, Fukuoka, Japan, pp.209-214.
7. Holmberg, S.(1978), "Bridge approaches on soft clay supported by Embankment piles", *Geotechnical Engineering*, Vol.10, pp.77-89.
8. Johnes, 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. Reid, W.M. & Buchanan(1984), "Bridge approach support piling", *Piling and Ground Treatment*, Thomas Telford Limited, London, pp.267-274.

(접수일자 2003. 3. 12, 심사완료일 2003. 12. 2)