

# 모형실험에 의한 조립토 다짐말뚝의 하중-침하 관련 거동특성 분석

## Analysis of Load-Settlement Behaviour Characteristics of Granular Compaction Piles from the Model Tests

김홍택\* · 강 윤\*\*

Kim, Hong-Taek · Kang, Yun

---

### Abstract

In the present study, more systematic laboratory model tests under various conditions are carried out to investigate load-sharing characteristics among the granular pile and adjacent soils and bearing capacity characteristics with different pile lengths. Further to evaluate effects of both a loading area and a spacing of pile installation on the bearing capacity and bearing capacity characteristics of each pile in group, model test results are also analyzed for the purpose of an efficient design of granular compaction piles. From the analysis of the model test results, it is found that the ultimate capacity of granular compaction group piles increases with a decrease in the installation distance among granular piles. It is also found that the dominant failure mode of the granular compaction piles is bulging failure. It is further realized that the length of a granular pile could not significantly affect on the ultimate granular pile capacity.

**Keywords** : Granular compaction pile, Ultimate pile capacity, Laboratory model tests, Loading area

---

### 요 지

본 연구에서는 조립토 다짐말뚝에 대해 보다 체계적인 실내모형실험을 수행하여, 조립토 다짐말뚝과 인접지반의 하중분담 특성, 말뚝의 길이변화에 따른 지지력 특성, 재하면적의 크기 및 말뚝의 설치간격(인접지반의 치환율) 등이 지지력에 미치는 영향, 또한 군말뚝의 경우 위치별 말뚝의 지지력 특성 등, 궁극적으로 조립토 다짐말뚝의 합리적 설계를 위한 극한지지력 평가시 고려되어야 할 여러 조건하에서의 실험결과에 대한 분석이 수행되었다. 분석결과, 지배적인 파괴형태는 원추형에 가까운 팽창파괴임을 재차 확인하였으며, 재하면적이 커짐에 따라 극한지지력이 증가하는 현상도 확인하였다. 또한 말뚝의 설치간격이 줄어들수록 극한지지력은 증가하며, 설치위치에 따라 극한지지력이 변화하고, 말뚝의 길이가 극한지지력에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다.

**주요어** : 조립토 다짐말뚝, 극한지지력, 실내모형실험, 재하면적

---

\* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수(Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

\*\* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정(Member, Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

## 1. 서론

조립토 다짐말뚝공법은 이미 1830년대에 프랑스의 기술자에 의해서 무기고 기초를 건설하는데 사용된 바 있으나 그 이후로는 사용되지 않다가, 1930년대에 조립토를 다지기 위하여 진동다짐공법을 개발하는 과정에서 재조명되었다. 진동다짐공법으로 점토지반에 조립토 다짐말뚝을 형성하는 기술은 1960년대에 개발되었다.

조립토 다짐말뚝에 대한 경험적 설계법은 Thornburn 등(1968)에 의해서 제안되었고, Greenwood(1970)는 Rankine의 수동토압계수를 사용한 설계법을 제시하였다. Hughes 등(1974, 1975)은 조립토 다짐말뚝에서 팽창과 파괴가 지배적인 파괴형태라고 제안하였으며, 또한 조립토 다짐말뚝의 지지력 산정법을 제시하였다. Poulos 등(1976)은 유한요소법을 이용하여 조립토 다짐말뚝의 침하해석식을 제안하였으며, Rao 등(1977)은 조립토 다짐말뚝의 지지력을 향상시키기 위하여 스킵트를 활용하는 방법을 제안하였다. 또한 Madhav 등(1978)은 연약지반과 조립토 다짐말뚝이 함께 파괴되는 메카니즘으로 일반전단파괴를 고려하였으며, Balaam 등(1981)은 군말뚝으로 지지되는 강성기초의 해석방법을 제시하였다. Barksdale 등(1983)은 비배수전단강도  $30\sim 40\text{kN/m}^2$  이상의 굳은 점토지반에 근입된 군말뚝 형태 조립토 다짐말뚝의 지지력 계산시 직선 파괴선의 단면적을 적용할 것을 제안하였고, Balaam 등(1983)은 단말뚝에 대한 해석방법을 연구하였다. Balaam 등(1985)은 쇄석 군말뚝의 영향반경을 말뚝간 거리의 합수로 평가하는 방법을 제안하였다. Bartolomey 등(1985)은 시간의 경과에 따른 점토내 말뚝기초의 지지력 증가현상을 연구하였으며, Juran 등(1991)은 조립토 다짐말뚝에 의해 보강된 연약지반에 대한 다양한 매개변수연구를 실시하였다. Van Impe 등(1997)은 쇄석말뚝의 거동에 대한 유동학적 모델을 제시하고 복합지반의 침하감소계수와 응력 집중계수를 제안하였으며, Shauhu 등(2000)은 조립토 다짐말뚝-매트 사이의 거동에 대한 이론적 접근을 통하여, 매트의 지지력에 미치는 영향을 확인하고 매트의 적정두께 산정에 대한 접근을 시도하였다.

일반적으로 조립토 다짐말뚝은 구성재료의 입자들 간 움직임이 상대적으로 자유로우므로 일반말뚝과는 다른 파괴형태를 보인다. 따라서 조립토 다짐말뚝의 지지력 산정은 주면마찰력과 선단지지력의 합으로서 산정되는 일반적인

말뚝의 지지력산정 방식과는 다른 접근이 요구되며, 많은 수의 지지력 산정방법이 기 제안된 바 있다. 그러나 기 제안된 단말뚝의 지지력 산정식의 경우에는 파괴형태의 구분, 재하면적의 영향 등에 대한 고려가 체계적이지 못한 것 또한 사실이다. 군말뚝의 경우, 현재까지의 연구 결과에 의하면 Unit Cell(Balaam 등, 1981, Van Impe 등, 1983) 개념을 토대로 한 조립토 단말뚝의 극한지지력 평가기법을, 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가기법에 적용하여 군말뚝의 지지력 산정시 고려하여야 할 대상인, 인접한 말뚝의 영향, 재하면적의 변화, raft의 크기 및 하중분담효과 등과 같은 영향인자들에 관한 부분은 고려하지 못하는 실정이었다. 조립토 군말뚝의 경우 일반말뚝과는 달리 말뚝의 설치간격이 줄어들수록 인접말뚝에 의한 구속 및 변형억제 등 상호작용에 따른 복합거동특성에 의해 극한지지력이 증가하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(김 등 1998, 신 등 2001, 강 등 2004). 그러나 조립토 다짐말뚝이 적용되는 대부분의 경우에 있어서 단순히 치환율 개념으로의 설계가 수행되며, 진술한 복합거동특성 등에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 이외에도 말뚝의 길이가 극한지지력 평가의 주요 변수인 일반말뚝과는 상반되는 거동을 보이는 조립토 다짐말뚝의 경우, 이와 같은 길이변화에 따른 지지력 특성 등에 대해서도 연구성과가 또한 미흡한 실정이다. 따라서 보다 효율적이며 합리적인 설계기법의 제시를 위해서는, 조립토 다짐말뚝의 복합거동특성 등에 영향을 미치는 다양한 변수들에 대한 추가적인 연구가 계속 요구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이를 위해 보다 체계적인 실내모형실험을 수행하여(다음의 2장 참조), 조립토 다짐말뚝과 인접지반의 하중분담 특성, 조립토 말뚝의 길이변화에 따른 지지력 특성, 재하면적의 크기 및 말뚝의 설치간격(인접지반의 치환율) 등이 지지력에 미치는 영향, 또한 군말뚝의 경우 위치별 말뚝의 지지력 특성 등, 궁극적으로 조립토 다짐말뚝의 합리적 설계를 위한 극한지지력 평가시 고려되어야 할 여러 조건하에서의 실험결과에 대한 분석이 수행되었다.

## 2. 실내모형실험

필자 등은 본 연구를 통해 조립토 다짐말뚝의 보다 정밀한 하중-침하 관련 거동특성 등을 규명하고자 하는 노력의 일환으로, 기존의 연구성과(강 등, 2004)중 미흡한 점을

보완하여 보다 체계적인 실내모형실험을 수행하였으며, 여기서 보완이 이루어진 주요 내용을 설명하면 다음과 같다.

- 재하판의 크기 변화에 따른 실내모형실험 토조의 구속 효과를 최대한 경감시키기 위한 목적으로, FLAC 3D 해석프로그램을 이용하여 scale effect에 대한 분석을 시행하여, 이 결과를 토대로 재하판의 크기와 말뚝의 직경을 조정하였다.
- 또한 기존 실험장치의 경우, 작용하중의 크기를 하중다이얼의 수동조작에 의해 제어함으로써 침하속도의 조절이 어려워, 결과적으로 급속재하가 이루어지는 문제점을 해결하기 위해, 변위제어 하중장치를 제작하여 CU-삼축시험에 일반적으로 적용되는 0.1mm/min의 재하속도로 완속재하 실험(재하시간은 대략 10시간 정도)을 수행하여 편심발생의 가능성을 최소화하였다.
- 아울러 본 모형실험에서는, 9개의 조립토 다짐말뚝을 3×3 형태로 배열하고(그림 1 및 그림 2), 말뚝의 설치 간격도 2가지 경우(3D 및 4D, D=말뚝직경)로 서로 달리하여, 기존 연구성과(강 등, 2004)의 3×1 배열 띠기초 형태의 접근보다는 실제적인 군말뚝의 거동을 모델링 하고자 하였다.

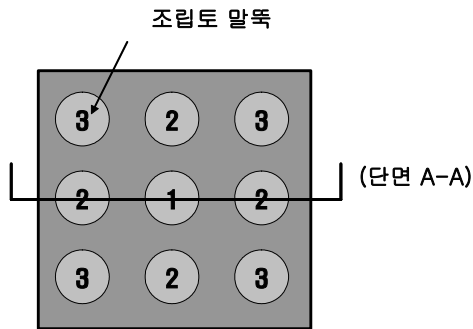


그림 1. 조립토 군말뚝의 배치형태



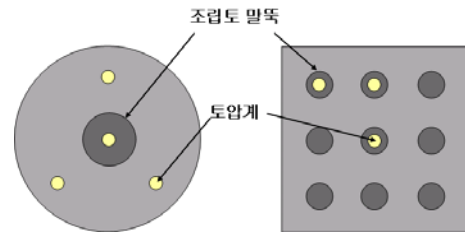
그림 2. 조립토 군말뚝의 형성

이외에 본 실험에서, 재하판은 균등침하를 일으키는 강성기초로 가정하여 작용하중에 충분히 견딜 수 있도록 두께 2mm의 강철판을 사용하였으며, 조립토 다짐말뚝 및 인접지반의 하중분담 정도를 규명하기 위하여 토압계를 사용하였다.

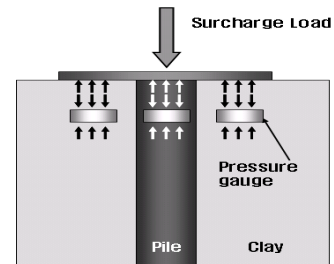
점성토 지반 및 조립토 다짐말뚝에 관련된 실험방법, 실험장비 및 시료특성 등 기본적인 사항은 기존의 연구성과(강 등, 2004)에 제시되어 있어, 여기서는 본 연구와 관련된 주요 실험내용만을 요약·정리하였다.

## 2.1 하중재하

모형토조내에 점성토 지반의 조성 및 조립토 다짐말뚝의 형성이 이루어진 다음, 말뚝 및 인접지반에 토압계를 그림 3과 같이 설치하였다.



(a) 단말뚝



(b) 군말뚝

그림 3. 토압계 설치 방법 및 위치

단말뚝의 경우 토압계는, 말뚝에 1개, 주변지반에는 120° 간격으로  $b/4$ ( $b$ =원형재하판의 직경 폭)의 거리에 3개를 설치하여, 말뚝 및 지반에 작용하는 응력을 측정하였다. 군말뚝의 경우에는 3×3 배치형태의 9개 말뚝 중, 중심부 말뚝에 1개, 주변부 말뚝에 1개, 또한 외곽부 말뚝에 1개 등 총 3개를 앞의 그림 3에 도시한 바와 같이 설치하여 응력을 측정하였다. 하중재하는 비배수조건 하에서, 침하가 말

뚝직경(D=3cm)의 2배인 600mm까지 발생하도록 진행하였다. 본 연구 실험과정에서의, 토압계 설치 및 재하장치 등에 대한 구체적인 모습은 아래 그림 4에 담겨 있다.



(a) 토압계의 설치



(b) 재하판 및 재하장치

그림 4. 토압계의 설치 및 하중재하 과정

## 2.2 실험조건

본 연구를 통해 수행된 실내모형실험의 조건을 요약하면 표 1과 같다. 단말뚝의 경우, 말뚝길이는 30cm 및 45cm의 2종류로 하였으며, 또한 재하판의 크기에 따른 관련 거동특성 등을 파악하기 위하여 원형 재하판의 직경을 9cm, 12cm 및 15cm 등 3종류로 변화시켜 실험을 수행하였다(표 1에서, Case 1~Case 6). 균말뚝의 경우는, 정사각형 재하판(27×27cm)에 대해 말뚝의 설치간격을 9cm 및 12cm의 2종류로 변화시켜 각 경우에 대한 거동특성 등을 분석하였다(표 1에서, Case 7 및 Case 8).

표 1. 실험 수행조건

Case	말뚝 형태	말뚝 직경(D)	말뚝 길이	재하판의 크기	말뚝 설치간격	
Case 1	단말뚝	3cm	30cm (10D)	9cm(3D)	-	
Case 2				12cm(4D)		
Case 3				15cm(5D)		
Case 4			45cm (15D)	9cm(3D)		-
Case 5				12cm(4D)		
Case 6				15cm(5D)		
Case 7	균말뚝	3cm	30cm (10D)	27×27cm	9cm(3D)	
Case 8					12cm(4D)	

조립토 균말뚝의 경우 실험과정에서, 말뚝을 형성한 다음 케이싱을 인발할 때 이미 설치된 말뚝의 품질에 영향을 미치지 않도록 주의하였다.

## 3. 토조의 scale effect 분석

본 실내모형실험에 사용된 토조(폭×길이×높이=600×5600×600mm)에 대한 scale effect를 정량적으로 평가하기 위해, FLAC 3D 프로그램을 이용하여 분석을 시행하였다.

실내모형실험시 예상되는 scale effect 문제로는, 토조의 크기가 실제의 지반과 같이 반무한체적인 조건이 아니므로, 조립토 다짐말뚝의 경우 토조의 구속효과로 인해 침하량이 전반적으로 억제될 가능성을 들 수 있다. 이와 같은 문제점을 검토하기 위해 본 분석에서는, 해석영역을 달리하여 조립토 말뚝의 침하량을 비교함으로써 scale effect를 분석하였다. 여기서 scale effect 분석에 적용된, FLAC 3D 프로그램 해석 격자요소망을 도시하면 그림 5과 같다.

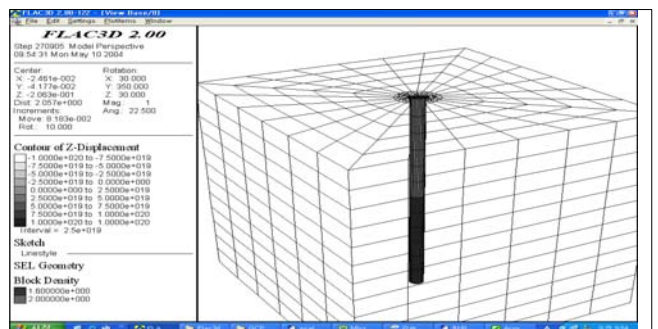


그림 5. FLAC 3D 프로그램 해석 격자요소망

본 FLAC 3D 프로그램 해석에서는 불평형력으로 인한 수렴과정상의 어려움을 감안하여, 모형지반은 탄성체로 설정하였으며, 재하판과 조립토 말뚝은 각각 쉘요소(shell element)와 탄성모델로 설정하였다. FLAC 3D 프로그램 해석에 사용한 모형지반 및 조립토 말뚝 등의 특성치는 표 2에 각각 정리되어 있다.

표 2. FLAC 3D 프로그램 해석에 사용한 모형지반 및 조립토 말뚝 등의 특성치

구 분	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아송비	두께(mm)
모형지반	1.89	300	0.4	-
조립토 말뚝	1.79	3800	0.3	-
재하판	2.5	2.05e7	0.2	2

토조의 형태는 정방형으로 모델링한 다음 토조의 크기를 점점 크게 하여 해석하였으며, 조립토 단말뚝의 경우에 대한 scale effect를 평가하였다. 분석결과, 토조의 폭(B)와 재하판의 폭(b) 사이의 비(B/b)가 7.0 이상일 때, 침하에 대한 scale effect가 거의 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 따라서 B/b=7.0일 경우의 침하량을 기준으로, B/b 값의 크기에 따라 각각 평가된 재하판 침하량을 정규화하여 도시하면 그림 6과 같다.

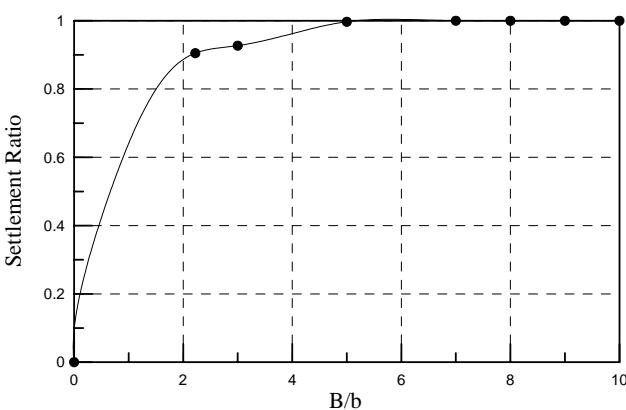


그림 6. scale effect 분석결과

그림 6의 결과를 토대로, 본 실내모형실험 토조에 대한 scale effect를 분석하면, 재하판의 폭을 90mm로 할 경우 재하실험시의 scale effect는 0.998 정도이다. 즉, 재

하판의 폭 90mm에 대해서 재하실험시 측정된 침하량은 토조의 크기가 무한하여 구속으로 인한 영향이 없는 상태에서 측정된 침하량의 99.8% 정도가 발생된다고 추정할 수 있다.

여기서 해석영역을 본 실내모형실험에 사용한 토조의 제원(폭×높이×길이= 600mm×600mm×600mm)과 동일하게 했을 경우, scale effect의 영향이 거의 없는 것으로 분석된 B/b=7.0인 경우에 대하여 FLAC 3D 프로그램을 이용하여 해석한 연직방향 침하분포도를 참고적으로 도시하면 그림 7과 같다.

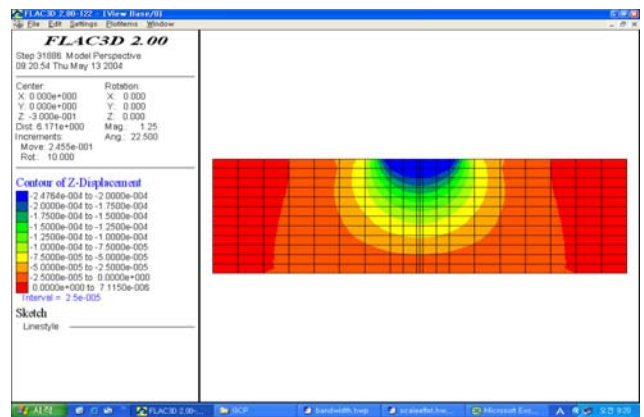


그림 7. FLAC 3D 프로그램 해석 연직방향 침하분포도

## 4. 실내모형실험 결과

### 4.1 조립토 단말뚝 경우의 하중-침하 특성

#### 4.1.1 Case 1

그림 8은 길이 30cm의 조립토 다짐말뚝을, 지름 9cm (3D, D=말뚝직경)의 원형재하판을 이용하여 하중을 재하하였을 경우의 하중-침하 곡선을 나타낸다. S-logp법을 이용하여 총 극한하중을 산정한 바 26kgf이었으며, 총 극한하중 중 조립토 말뚝이 분담하는 하중은 4.9kgf, 또한 인접지반이 분담하는 하중은 19kgf인 것으로 나타났다. 여기서 말뚝의 분담하중과 인접지반 분담하중의 합은 23.9kgf로, 복합지반 총 극한하중 26kgf에 대하여 8% 정도 손실이 발생한 것으로 나타났다.

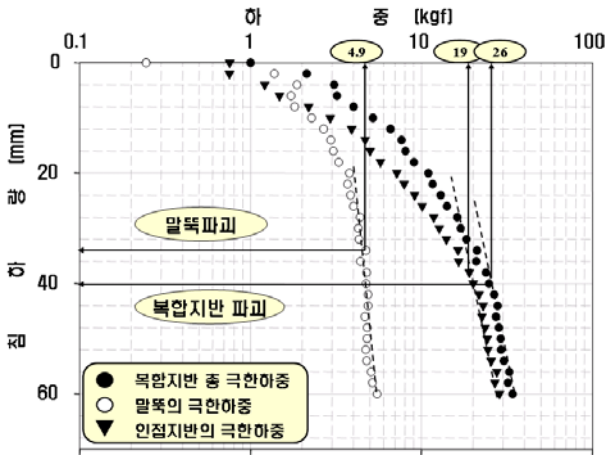


그림 8. 조립토 단말뚝 경우의 하중-침하 곡선(Case 1)

#### 4.1.2 Case 2

그림 9는 길이 30cm의 조립토 다짐말뚝을 직경 12cm (4D)의 재하판을 이용하여 하중을 재하하였을 경우의 하중-침하 곡선이다. S-logP법을 이용하여 총 극한하중을 산정한 바 41kgf이었으며, 복합지반 총 극한하중 중 조립토 말뚝에 의한 분담하중은 9kgf, 또한 인접지반에 의한 분담하중은 31kgf인 것으로 나타났다.

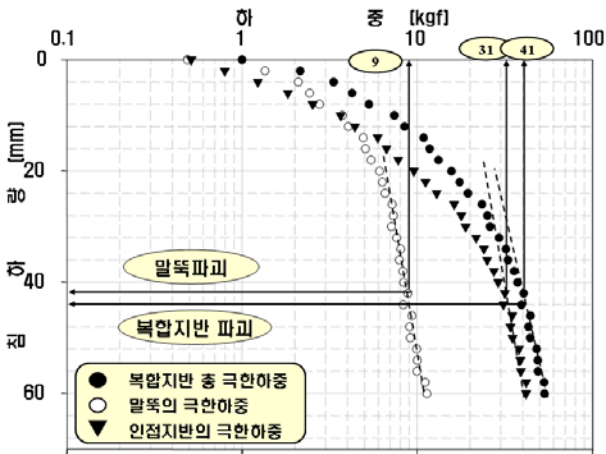


그림 9. 조립토 단말뚝 경우의 하중-침하 곡선(Case 2)

#### 4.1.3 Case 3

그림 10은 길이 30cm의 조립토 다짐말뚝을 직경 15cm(5D)의 재하판을 이용하여 하중을 재하하였을 경우의 하중-침하 곡선이다. S-logP법을 이용하여 총 극한하중을 산정한 바 60kgf이었으며, 복합지반 총 극한하중 중

조립토 말뚝에 의한 분담하중은 19kgf, 또한 인접지반에 의한 분담하중은 41kgf인 것으로 나타났다.

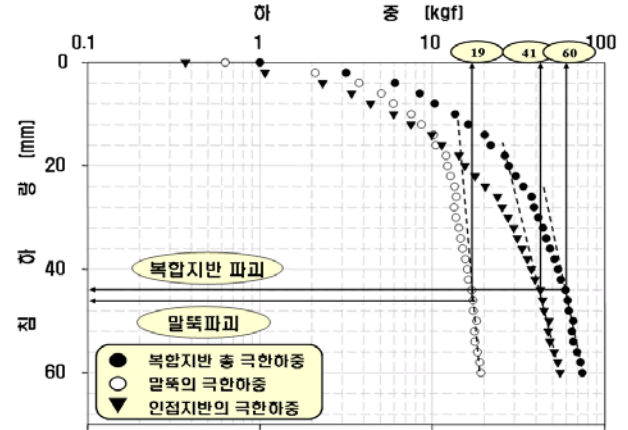


그림 10. 조립토 단말뚝 경우의 하중-침하 곡선(Case 3)

이외에 말뚝길이 45cm(15D)인 경우(Case 4~Case 6, 표 1 참조)에 해당되는 하중-침하 곡선과 산정된 복합지반 총 극한하중 및 각 분담하중 등에 관련된 그림은 지면 관계상 생략하였다.

### 4.2 조립토 균말뚝 경우의 하중-침하 특성

#### 4.2.1 Case 7

그림 11는 말뚝간격이 9cm(3D)로 배치된 경우의 하중-침하 곡선을 나타낸다. S-logP법을 이용하여 복합지반 총 극한하중을 산정한 바 259kgf이었으며, 총 복합지반 극한하중 중 No. 1 말뚝에 의한 분담하중은 29kgf, No. 2 말뚝에 의한 분담하중은 18kgf, 또한 No. 3 말뚝에 의한 분담하중은 9.1kgf인 것으로 나타났다.

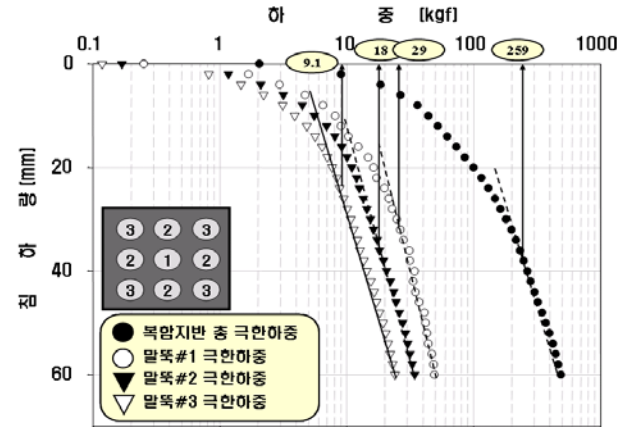


그림 11. 조립토 균말뚝 경우의 하중-침하 곡선(Case 7)

### 4.2.2 Case 8

그림 12는 말뚝간격이 12cm(4D)로 배치된 경우의 하중-침하 곡선을 나타낸다. S-logP법을 이용하여 총 극한하중을 산정한 바 220kgf이었으며, 복합지반 총 극한하중 중 No. 1 말뚝에 의한 분담하중은 21kgf, No. 2 말뚝에 의한 분담하중은 15kgf, 또한 No. 3 말뚝에 의한 분담하중은 8kgf인 것으로 나타났다.

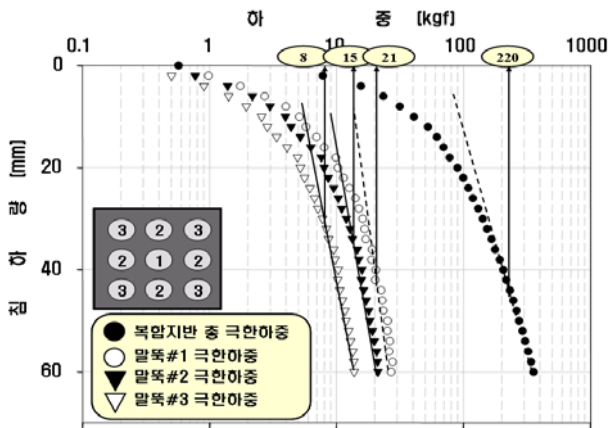


그림 12. 조립토 군말뚝 경우의 하중-침하 곡선(Case 8)

## 5. 실험결과 분석

본 분석에서는 앞의 3장에 기술된, 토조의 scale effect 분석을 통해 평가된 결과(그림 6 참조)에 의거 관련 침하량을 보정하였다.

### 5.1 조립토 단말뚝의 거동특성

#### 5.1.1 재하판의 크기에 따른 극한하중 평가

그림 8~10의 하중-침하 곡선에서 얻어진(표 1에서 Case 1, 2 및 3) 재하판의 크기에 따른 극한하중을 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 재하판의 크기 변화에 따른 극한하중

재하판의 크기	극한하중 (kgf)			해석적 방법 (kgf)
	조립토 말뚝	인접지반	복합지반 총 하중	조립토 말뚝
9cm	4.9	19.0	26.0	19.0
12cm	9.0	31.0	41.0	19.0
15cm	19.0	41.0	60.0	19.0

표 3의 결과를 살펴보면, 총 극한하중은 재하판의 지름이 9cm, 12cm 및 15cm인 경우, 각각 26kgf, 41kgf 및 60kgf 등으로 나타났으며, 조립토 말뚝의 분담하중은 재하판이 9cm인 경우 4.9kgf, 12cm인 경우 9kgf, 또한 15cm인 경우 19kgf로 나타났다. 이를 김 등(1998), 신 등(2001) 및 강 등(2004)이 제안한 해석적 방법을 토대로 평가된 조립토 다짐말뚝의 극한하중 19kgf(본 해석적 방법의 경우 재하판의 크기가 고려되긴 하나, 그 영향이 미소하여 거의 동일한 값의 극한하중으로 평가되었음)와 비교하여 보면, 재하판의 크기가 15cm인 경우와 일치하는 것을 알 수 있다. 해석적 방법에 의한 평가와는 달리, 모형 실험의 경우, 재하판의 크기에 따라 말뚝의 구속능력이 보다 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 따라서, 실제 현장에서 말뚝과 기초가 동시에 시공되는 복합구조의 경우 조립토 다짐말뚝이 충분한 효과를 발휘하기 위해서는, 재하판의 면적이 말뚝의 직경에 비해 충분히 커야하며, 특히 군말뚝의 경우 외곽부에 위치하는 말뚝의 하중분담에 의한 구속효과를 기대하기 위해서는 재하판의 크기가 중요한 변수임을 알 수 있다. 여기서 재하판의 크기에 따른 극한하중의 증가율을 도시하면 그림 13과 같다.

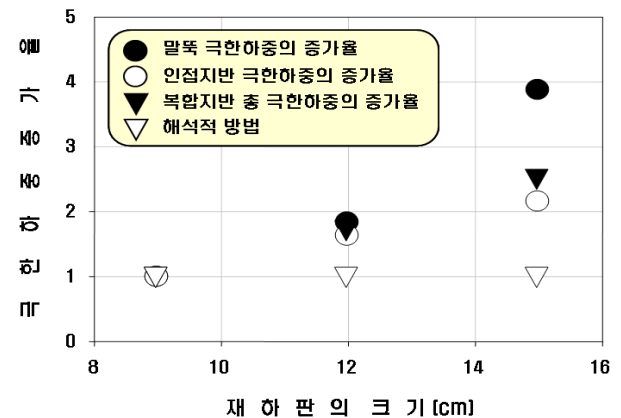


그림 13. 재하판의 크기에 따른 극한하중의 증가율

그림 13의 결과를 살펴보면, 재하판의 크기가 증가함에 따라서 말뚝이 받게 되는 하중의 증가율이 인접지반의 분담하중이나 총 극한하중의 증가율에 비해 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 재하영역이 증가함에 따라 동일깊이에서의 지반구속압이 더욱 커지는 현상에 주된 원인이 있는 것으로 판단된다.

## 5.1.2 응력분담비 및 하중-침하 관계 특성

조립토 다짐말뚝이 받는 응력을  $\sigma_p$ , 인접한 원지반이 받는 응력을  $\sigma_s$ 라 할 때, 응력분담비(m)는  $m = \sigma_p / \sigma_s$ 로 정의되며, 3종류 크기의 재하판에 대해 말뚝과 인접지반 사이의 응력분담비를 도시하면 그림 14와 같다.

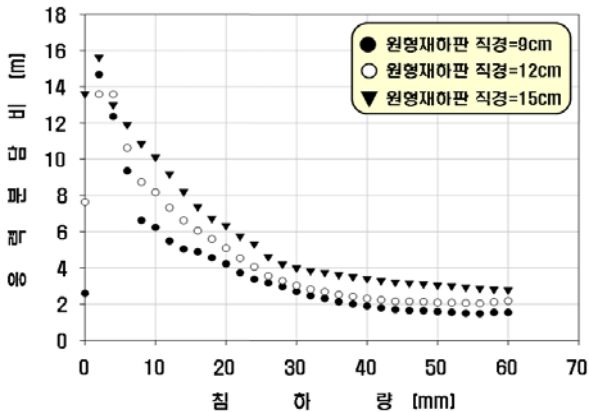


그림 14. 침하량-응력분담비 관계(단말뚝)

그림 14의 결과를 분석하면, 재하초기의 응력분담비는 13.8~15.8 정도로 대부분 말뚝에 의해 하중이 지지되지만, 침하가 진행될수록 말뚝의 하중 분담정도는 점차 작아져 최종 하중단계에서는 1.8~3.0 정도의 응력분담비를 갖는 것으로 나타났다. 이는 Barksdale 등(1983)이 제안한 값 2.0~5.0 정도와 대체적으로 잘 일치하고 있다. 여기서 침하가 진행됨에 따라 응력분담비가 점차 감소하는 경향은, 조립토 말뚝의 변형이 연직방향 뿐만 아니라, 수평방향으로도 체적이 팽창하는 3차원적 거동특성에 주로 기인하는 결과로 판단된다.

계속해서 앞의 그림 8에 도시된, 원형재하판의 직경이 9cm인 경우의 하중-침하 관계 특성을 살펴보면, 조립토 말뚝의 파괴가 먼저 발생하고, 그 이후 인접지반이 응력을 분담하다가, 일정량의 침하가 발생한 이후에는, 조립토 다짐말뚝 및 점성토 지반으로 구성된 복합지반이 파괴되는 것으로 나타났다.

또한 그림 8~10에 도시된 결과를 종합적으로 살펴보면, 재하판의 크기가 지중응력에 미치는 영향에 따라, 대체적으로 재하판이 작으면 말뚝이 먼저 파괴되고, 재하판의 크기가 커지면 점차 복합지반이 먼저 파괴되는 경향을 보이고는 있으나, 이에 대해서는 추가적인 실험 등을 통해 재

차 검증이 요구된다.

## 5.1.3 말뚝길이의 변화에 따른 지지력 특성

그림 15에 도시된 바와 같이, 길이가 30cm(세장비=10)인 조립토 말뚝과, 길이가 45cm(세장비=15)인 조립토 말뚝의 지지력을 각각의 침하단계에 대해 서로 비교하고자, 재하판의 크기별로, 말뚝길이가 45cm인 경우의 지지력을 말뚝길이가 30cm인 경우의 지지력으로 나눈 값에 해당되는 지지력 비(ratio)를 분석하였다. 분석결과, 원형재하판의 직경이 15cm인 경우 지지력비는 0.9~1.3 정도의 범위이고, 재하판의 직경이 9cm인 경우에는 지지력비가 0.9~1.1 정도의 범위로 나타났다. 이와 같이 지지력비는 대체적으로 1.0 내외의 값으로서, 말뚝길이의 변화가 지지력에 미치는 영향은 상당히 미소하며, 결과적으로 조립토 다짐말뚝의 길이가 일정값 이상이 되면 말뚝길이가 커짐에 따른 추가적인 지지력의 증가는 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다.

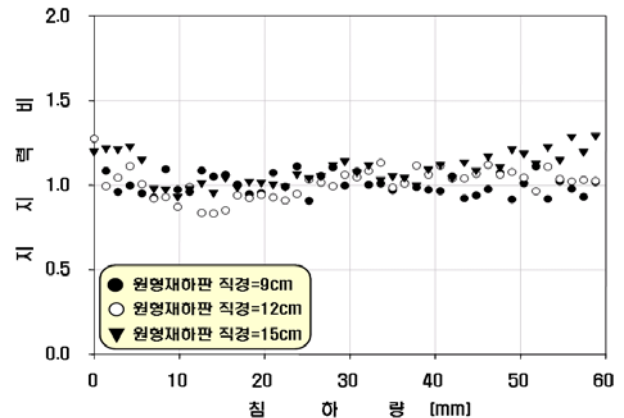


그림 15. 재하판의 크기 및 조립토 말뚝 길이에 따른 지지력의 변화

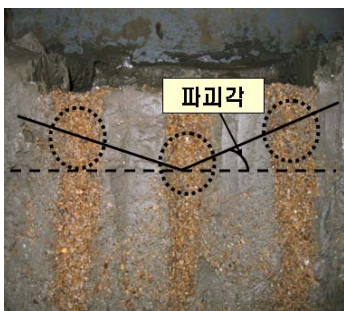
## 5.2 조립토 균말뚝의 거동특성

### 5.2.1 파괴형상

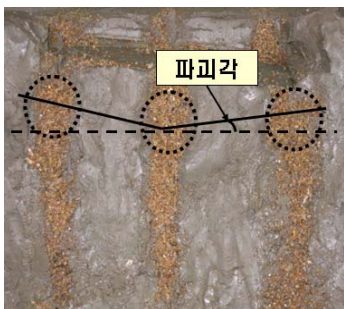
그림 16에 도시된 조립토 다짐 균말뚝의 파괴형상을 살펴보면(그림 1의 단면 A-A 참조), 주변부 말뚝은 단말뚝의 경우와 유사하게 말뚝 두부로부터 6.0~8.0cm 정도의 깊이에서 팽창파괴가 발생하였으며, 중심부 말뚝은 이 보다 좀 더 깊은 위치에서 팽창파괴가 발생하는 등, 전반적으



로는 원추형 파괴형상을 보이고 있다. 이는 그간의 연구결과(김 등, 1998, 신 등, 2001, 강 등, 2004)와도 거의 일치하고 있으며, 하중재하에 의해 유발되는 주변부 말뚝의 횡방향 팽창압이 중심부 말뚝에 대한 구속력으로 작용함에 따른 영향 등으로 인해 나탄 결과로 판단된다. 이외에도 말뚝의 설치간격이 9cm인 경우의 파괴각이, 말뚝의 설치간격이 12cm인 경우의 파괴각보다는 다소 큰 경향을 보이고 있으며, 이는 말뚝의 설치간격이 좁을수록 주변부 말뚝에 의한 영향이 더욱 커지기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 말뚝의 설치간격=9cm



(b) 말뚝의 설치간격=12cm

그림 16. 조립토 다짐 군말뚝의 파괴형상

### 5.2.2 말뚝의 설치간격 및 위치에 따른 극한하중 평가

본 연구에서 군말뚝에 대한 실험을 통해 얻어진 그림 11 및 12의 하중-침하 곡선을 토대로, S-logP법을 이용하여 산정한 위치별 말뚝의 극한하중 및 복합지반의 총 극한하중을, 말뚝의 설치간격에 따라 정리하면 표 4와 같다. 김 등(1998), 신 등(2001) 및 강 등(2004)의 해석적 방법에 의거한 각 말뚝 극한하중의 평균값도 비교상의 목적으로 표 4에 포함하였다.

표 4. 말뚝의 설치간격 변화에 따른 위치별 말뚝의 극한하중

말뚝의 설치간격	위치별 말뚝의 극한하중(kgf)			복합지반의 총 극한하중(kgf)	비고
	#1	#2	#3		
9cm	29	18	9.1	259	군말뚝 배치도 그림 2.1 참조
12cm	21	15	8	220	
김 등(1998), 신 등(2001) 및 강 등(2004) 해석적 방법(평균값)	25			-	

표 4의 결과를 분석하면, 말뚝의 설치간격이 9cm(3D, D=말뚝직경)인 경우, 말뚝#3의 극한하중에 비해, 말뚝 #2는 98% 정도, 말뚝#1은 219% 정도 극한하중이 더 큰 것으로 나타났으며, 또한 말뚝의 설치간격이 12cm(4D)인 경우에는, 말뚝#3의 극한하중에 비해, 말뚝#2는 88% 정도, 말뚝#1은 163% 정도 극한하중이 더 큰 것으로 나타났다. 표 4에서, 위치별 각 말뚝(#1, #2 및 #3)의 극한하중의 평균값은 말뚝의 설치간격에 따라 각각 18.7kgf 및 14.7kgf이며, 이는 해석적 방법을 토대로 평가된 각 말뚝 극한하중의 평균값 25kgf보다는 작은 값이다. 여기서 말뚝의 설치간격이 넓어짐에 따라 말뚝의 극한하중은 전반적으로 작아지는 경향을 보이고 있으며, 이는 주변부의 말뚝이 팽창하며 발생된 방사방향 응력이 중심부 말뚝으로 전이되어 유발되는 구속효과 및 인접지반의 치환효과 등이 말뚝의 설치간격이 9cm인 경우에서 더 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

### 5.2.3 응력분담비

말뚝의 설치간격이 9cm(3D)인 경우, 그림 17에 도시된 각 위치별 말뚝의 응력분담비(m, 5.1절 참조)를 분석하면, 재하판의 침하량이 60mm인 최종 재하단계에서, 중심부 말뚝(#1)은 10.0 정도이고, 주변부(#2) 및 외곽부(#3) 말뚝은 각각 7.0 및 5.0 정도이다.

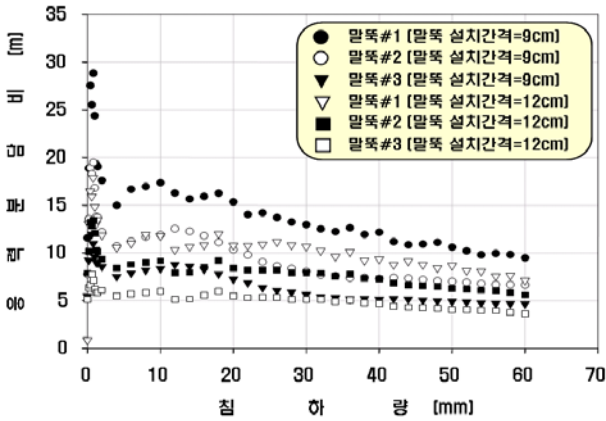


그림 17. 침하량-응력분담비 관계(군말뚝)

말뚝의 설치간격이 12cm(4D)인 경우에는, 중심부 말뚝은 9.0~11.0 정도, 주변부 및 외곽부 말뚝은 각각 6.0~9.0 및 4.5~5.0 정도이며, 또한 말뚝의 설치간격이 9cm인 경우가 12cm인 경우에 비해, 중심부 말뚝은 1.5배 정도, 주변부 말뚝은 1.1~1.3배 정도, 또한 외곽부 말뚝은 1.5배 정도 응력분담비가 더 크게 나타났다.

아울러 그림 17의 결과를 살펴보면, 재하초기의 응력분담비는 5.0~29.0 정도로 대부분 말뚝에 의해 하중이 지지되지만, 침하가 진행될수록 말뚝의 하중분담정도는 점차 작아져 최종 하중단계에서는 4.5~10.0 정도의 응력분담비를 갖는 등, 침하가 진행될수록 말뚝의 하중분담정도가 감소하는 경향은 단말뚝의 경우와 동일하다. 또한 단말뚝의 경우와 비교하여 볼 때, 전반적으로 응력분담비가 크게 평가되는 현상을 나타내고 있으며, 재하판의 침하가 진행됨에 따른 응력분담비의 변화 양상은 단말뚝의 경우에 비해 비교적 완만한 경향을 보이고 있다.

여기서 단말뚝의 경우에 비해 군말뚝에서의 응력분담비가 다소 크게 평가되는 주된 원인은, 군말뚝의 경우에는 외곽부 및 주변부 말뚝의 횡방향 팽창으로 인한 구속효과 증가와 함께 인접지반 치환효과 등이 복합적으로 작용하여, 결과적으로 말뚝의 횡방향 변형이 단말뚝에 비해 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 5.2.4 말뚝의 설치간격 변화에 따른 지지력 특성

그림 18은, 재하판 크기가 15cm로 동일한 경우, 말뚝의 설치간격이 9cm(3D)인 경우에 대해 산정된 각 위치별 말뚝의 극한지지력을, 설치간격이 12cm(4D)인 경우의 각

극한지지력으로 나누어 그 값을 하중증가비로 정의하여 재하판 침하량에 따라 도시한 실험결과이다.

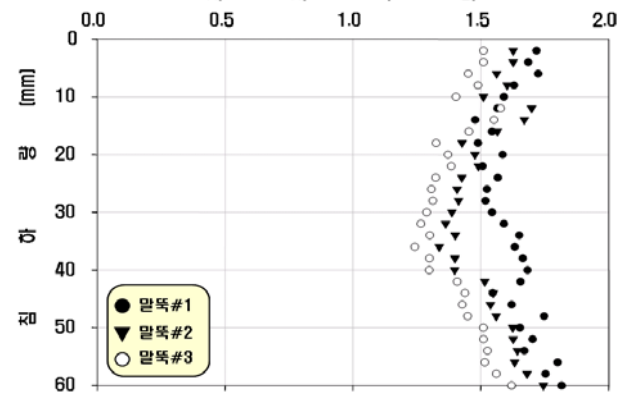


그림 18. 말뚝의 설치간격 변화에 따른 침하량-지지력비 관계

그림 18의 결과를 분석하면, 중심부 말뚝인 말뚝#1에서는 하중증가비가 1.5~1.8 정도이며, 주변부 말뚝인 말뚝#2는 1.35~1.75 정도이고, 또한 외곽부 말뚝인 말뚝#3는 하중증가비가 1.25~1.65 정도로 나타났다. 이는 말뚝의 설치간격이 12cm에서 9cm로 좁아짐에 따라, 전체적으로 극한지지력은 1.25~1.80배 정도 커짐을 의미한다. 또한 주변부 및 외곽부 말뚝에 비해 중심부 말뚝의 극한지지력의 증가 정도가 다소 큼을 알 수 있으나, 침하가 진행됨에 따른 극한지지력 증가의 변화 범위는 주변부 및 외곽부 말뚝이 중심부 말뚝에 비해 다소 큰 경향을 보이고 있다. 또한 말뚝의 설치간격이 9cm인 경우가, 복합지반의 총 극한하중도 1.18배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 이상의 분석결과를 종합할 때, 조립토 다짐 군말뚝의 경우, 적절한 간격으로 말뚝을 배치하여, 말뚝의 극한하중뿐만 아니라 인접지반의 하중분담효과 및 결과적으로 복합지반의 총 극한하중 또한 최대 유도할 수 있을 것으로 판단되며, 이는 이후에 추가적인 연구를 통해 계속 규명이 필요한 내용으로 사료된다.

## 6. 모형실험 분석결과 요약

본 연구 모형실험결과 분석을 통해 도출된 주요 내용을 요약 정리하면 다음과 같으며, 본 실험결과 분석에서는 앞의 3장에 기술된 토조의 scale effect 분석을 통해 평가된

결과(그림 6 참조)에 의거 관련 침하량을 보정하였다.

(1) 조립토 단말뚝의 경우, 재하면적(재하판의 크기)이 커짐에 따라, 조립토 다짐말뚝의 지지력 또한 증가하는 것을 확인하였다.

(2) 조립토 단말뚝의 경우, 재하초기의 응력분담비(m, 5.1 절 참조)는 13.8~15.8 정도로 대부분 말뚝에 의해 하중이 지지되지만, 침하가 진행될수록 말뚝의 하중분담정도는 점차 감소하여 최종 하중단계에서는 1.8~3.0 정도의 응력분담비를 갖는 것으로 나타났다. 이는 Barksdale 등(1983)이 제안한 값 2.0~5.0 정도와 대체적으로 잘 일치하고 있다. 여기서 침하가 진행됨에 따라 응력분담비가 점차 감소하는 경향은, 조립토 말뚝의 변형이 연직방향뿐만 아니라, 수평방향으로도 체적이 팽창하는 3차원적 거동특성에 주로 기인하는 결과로 판단된다.

또한 재하판의 크기가 지중응력에 미치는 영향에 따라, 대체적으로 재하판이 작으면 말뚝이 먼저 파괴되고, 재하판의 크기가 커지면 점차 복합지반이 먼저 파괴되는 경향을 보이고는 있으나, 이에 대해서는 추가적인 실험 등을 통해 재차 검증이 요구된다.

(3) 조립토 단말뚝의 경우, 원형재하판의 직경이 15cm인 경우 지지력비(5.1절 참조)는 0.9~1.3 정도의 범위이고, 재하판의 직경이 9cm인 경우에는 지지력비가 0.9~1.1 정도의 범위로 나타났다. 이와 같이 지지력비는 대체적으로 1.0 내외의 값으로서, 말뚝길이의 변화가 지지력에 미치는 영향은 상당히 미소하며, 결과적으로 조립토 다짐말뚝의 길이가 일정값 이상이 되면 말뚝길이가 커짐에 따른 추가적인 지지력의 증가는 거의 나타나지 않는 것으로 판단된다.

(4) 3×3 배치형태의 조립토 균말뚝에 대해 수행된 본 연구 실내모형실험 결과를 분석하면, 주변부 말뚝은 단말뚝의 경우와 유사하게 말뚝 두부로부터 6.0~8.0 cm 정도의 깊이에서 팽창파괴가 발생하였으며, 중심부 말뚝은 이 보다 좀 더 깊은 위치에서 팽창파괴가 발생하는 등, 전반적으로는 원추형 파괴형상을 보이고 있다. 이는 그간의 연구결과(김 등, 1998, 신 등, 2001, 강 등, 2004)와도 거의 일치하고 있다. 또한 말뚝의 설치간격이 넓어짐에 따라, 말뚝의 극한하중은 전반적으로 작아지는 경향을 보이고 있으며, 이는 주변부의 말뚝이 팽창하며 발생된 방사방향 응력이 중심

부 말뚝으로 전이되어 유발되는 구속효과 및 인접지반의 치환효과 등이 말뚝의 설치간격이 9cm인 경우에서 더 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다.

(5) 조립토 균말뚝의 경우, 재하초기의 응력분담비는 5.0~29.0 정도로 대부분 말뚝에 의해 하중이 지지되지만, 침하가 진행될수록 말뚝의 하중분담정도는 점차 작아져 최종 하중단계에서는 4.5~10.0 정도의 응력분담비를 갖는 등, 침하가 진행될수록 말뚝의 하중분담정도가 감소하는 경향은 단말뚝의 경우와 동일하다. 또한 단말뚝의 경우와 비교하여 볼 때, 전반적으로 응력분담비가 크게 평가되는 현상을 나타내고 있으며, 재하판의 침하가 진행됨에 따른 응력분담비의 변화 양상은 단말뚝의 경우에 비해 비교적 완만한 경향을 보이고 있다. 단말뚝의 경우에 비해 균말뚝에서의 응력분담비가 다소 크게 평가되는 주된 원인은, 균말뚝의 경우에는 외곽부 및 주변부 말뚝의 횡방향 팽창으로 인한 구속효과 증가와 함께 인접지반 치환효과 등이 복합적으로 작용하여, 결과적으로 말뚝의 횡방향 변형이 단말뚝에 비해 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

(6) 조립토 균말뚝의 경우, 중심부 말뚝인 말뚝#1에서는 하중증가비가 1.5~1.8 정도이며, 주변부 말뚝인 말뚝#2는 1.35~1.75 정도이고, 또한 외곽부 말뚝인 말뚝#3는 하중증가비가 1.25~1.65 정도로 나타났다. 이는 말뚝의 설치간격이 12cm에서 9cm로 좁아짐에 따라, 전체적으로 극한지지력은 1.25~1.80배 정도 커짐을 의미한다. 또한 주변부 및 외곽부 말뚝에 비해 중심부 말뚝의 극한지지력의 증가 정도가 다소 큼을 알 수 있으나, 침하가 진행됨에 따른 극한지지력 증가의 변화 범위는 주변부 및 외곽부 말뚝이 중심부 말뚝에 비해 다소 큰 경향을 보이고 있다. 또한 말뚝의 설치간격이 9cm인 경우가, 복합지반의 총 극한하중도 1.18배 정도 증가하는 것으로 나타났다.

## 7. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 보다 체계적인 실내모형실험을 수행하여, 조립토 다짐말뚝과 인접지반의 하중분담 특성, 조립토 말뚝의 길이변화에 따른 지지력 특성, 재하면적의 크기 및 말뚝의 설치간격(인접지반의 치환율) 등이 지지력에 미치는 영향, 또한 균말뚝의 경우 위치별 말뚝의 지지력 특성 등,

궁극적으로 조립토 다짐말뚝의 합리적 설계를 위한 극한지 지력 평가시 고려되어야 할 여러 조건하에서의 실험결과에 대한 다양한 분석이 수행되었다. 본 분석을 통해 얻어진 결과를 종합할 때, 특히 조립토 군말뚝의 경우 적절한 간격으로 말뚝을 배치하여, 말뚝의 극한하중뿐만 아니라 인접지반의 하중분담효과 및 결과적으로 복합지반의 총 극한하중 또한 최대로 유도할 수 있을 것으로 판단되며, 이에 관련된 추가적인 연구가 계속 요구된다.

## 감사의 글

본 논문은 2003년도 홍익대학교 학술연구조성비에 의하여 연구된 성과임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

(접수일자 : 2004년 10월 11일)

## 참 고 문 헌

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙(1998), 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제 14권, 제 5호, pp. 143~161.
2. 신방웅, 채현식, 김홍택(2001), 임의의 배치형태로 설치된 무리형태의 조립토 다짐말뚝에 대한 극한지지력의 평가, 한국지반공학회 논문집, 제 17권, 제 6호, pp. 181~191.
3. 강운, 윤지연, 장원호, 김홍택(2004), 지중응력의 변화를 고려한 조립토 다짐말뚝의 극한지지력 평가, 한국지반공학회 논문집, 제 20권, 제 2호, pp. 115~124.
4. 강운, 김홍택(2004), 조립토 다짐말뚝의 지지력 특성 분석 - 모형토조실험 결과를 중심으로, 한국지반환경공학회 논문집, 제 5권, 제 2호, pp. 51~62.
5. Balaam. N. P. and Booker. J. R.(1981), Analysis of rigid raft supported by granular piles, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 5, pp. 379~403.
6. Balaam. N. P. and Poulos, H. G.(1983), The Behavior of foundations supported by clays stabilized by stone columns, The University of Sydney Research Report, No. R424. Sydney, Australia.
7. Barksdale, R. D. and Poulos, H. G.(1983), Design and construction of Stone columns, Report No. FHWA/RD-83/026. National Technical Information Service.
8. Bartolomey, A.A. and Yushkov, B.S.(1985), Variation in Time of Capacity of Pile Foundation in Clays, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, pp. 1517~1520.
9. Greenwood, D.A.(1970), Mechanical Improvement of Soils below Ground Surface, Proceedings of Ground Engineering, pp. 9~20.
10. Hughes, J.M.O. and Withers, N.J.(1974), Reinforcing Soft Cohesive Soil with Stone Columns, Ground Engineering, Vol. 7, No. 3, pp. 42~29.
11. Hughes. J. M. O., Withers. N. J., and Greenwood. D. A.(1975), A Field Trial of the Reinforcing Effect of a Stone Column in Soil, Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 31~44.
12. Juran, I. and Riccobono, O.(1991), Reinforcing Soft Soils with Artificially Cemented Compacted Sand Columns, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 7, pp. 1042~1060.
13. Madhav, M.R. and Vitkar, R.P.(1978), Strip Footing on Weak Clay Stabilized with Granular Trench of Pile, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 4, pp. 605~609.
14. Rao, B.G. and Bhandari, R.K.(1977), Reinforcing of Non-Cohesive Soil by Granular Piles, Proceedings 6th ARC Soil Mechanics and Foundation Engineering, Singapore, Vol. 1, pp. 175~178.

15. Shauhu, J. T., Madhav, M. R., and Hayashi, S.(2000), Analysis of soft ground-granular pile-granular mat system, Computers and Geotechnics, Vol. 27, pp. 45~62.
16. Thorburn, S.(1975), Building structures supported by stabilized ground, Geotechnique, Vol. 25, No. 1, pp. 83~94.
17. Thorburn, S. and MacVicar, R. S. L.(1968), Soil stabilization employing surface and depth vibrators, Structural Engineer, Vol. 46, No. 10, pp. 309~316.
18. Van Impe, W. F. and De Beer, E.(1983), Improvement of Settlement Behavior of Soft Layers by Means of Stone Columns, Proceedings of 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 309~312.
19. Vesic, A. S.(1972), Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass, Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 98, No. SM3, pp. 265~290.