

# 실내모형실험을 통한 군말뚝기초의 거동분석

## Model Tests of Pile Groups in Sand

정 상 훈\*<sup>1</sup> Chung, Sang-Hoon

정 상 섬\*<sup>2</sup> Jeong, Sang-Seom

### Abstract

In this study the behavior of pile groups is investigated experimentally. Special attention is given to the load transfer characteristics of pile groups and to the evaluation of the group effects under vertical and horizontal loadings. In the laboratory experiments, vertical and lateral loadings were imposed on model piles in sand. Model piles made of PVC embedded in Joomoonjin sand were used in this study. Pile arrangements(2×2, 3×3) and pile spacings(2.5D, 5.0D, 7.5D) were considered. Load-transfer curves(t-z, q-z and p-y curves), load-deflection curves and group interaction factors were obtained from the experimental results. The group interaction factors under both vertical and horizontal loadings were proposed for the cases of 2×2 and 3×3 pile groups with varying ratios of pile spacings. P-multipliers in this study were found for the individual piles in 2×2 and 3×3 pile groups.

### 요 지

본 연구에서는 수직 및 수평하중을 받는 군말뚝의 배열 및 중심간격을 고려한 실내모형실험을 수행하여 군말뚝기초의 거동특성을 분석하였다. 모형말뚝은 PVC말뚝을 사용하였으며 모형지반은 주문진표준사를 이용해 조밀한 사질토 지반(Dr=73%)으로 조성하였다. 말뚝의 배열은 2×2, 3×3 배열, 말뚝중심간격은 말뚝직경의 2.5, 5.0, 7.5 배인 경우를 고려하였다. 실험결과 수직하중을 받는 말뚝에서는 두부에서의 수직하중-침하량곡선, 하중전이함수인 주면마찰력-변위곡선(t-z 곡선)과 선단지지력-변위곡선(q-z 곡선)을 구하였으며, 수평하중을 받는 말뚝에서는 두부에서의 수평하중-수평변위곡선, 하중전이함수인 지반반력-변위곡선(p-y곡선)을 구하였고 이를 토대로 말뚝의 배열 및 중심간격에 따른 군말뚝계수를 제안하였다. 또한 수평하중을 받는 군말뚝의 각 열에 대해 상호작용계수(P-multiplier)를 산정하였다.

**Keywords :** Group interaction factors, Load transfer curves, Pile groups, Pile arrangements, P-multipliers, Pile spacings, Sand

### 1. 서 론

말뚝기초의 설계에 있어 단독말뚝의 경우를 살펴보면 현재 국내에서 적용하는 말뚝의 설계하중은 지나치게 보수적으로 이루어지고 있어 최적설계가 이루어지고 있는 미국이나 캐나다의 설계기준에 비하여 지반 및 말뚝

재료성능의 40~60%만을 사용하고 있는 실정이다(한국지반공학회, 1997). 그러나 국외 연구결과를 분석해 보면 군말뚝에서는 말뚝간격이 말뚝지름의 2.5~5.0 배 사이에서 그룹효과가 있으며 그룹 내에서 말뚝의 위치에 따라 동일한 지지력을 받는다고 설계하는 것은 군말뚝을 과대설계하는 것이라고 판단된다.

\*1 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사 (Member, Graduate Student, School of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

\*2 정회원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

말뚝기초는 일반적으로 상부구조물의 하중을 비교적 양호한 깊은 지반상에 전달할 때 많이 사용된다. 이때 고층 구조물과 해상구조물등에 사용되는 말뚝기초는 상대적으로 수직하중 외에도 많은 양의 수평하중과 모멘트하중을 받게 되는데 Rao 등(1998)은 육상구조물의 경우 수평하중은 수직하중의 10~15%를 받으나 해상구조물의 경우에는 수직하중의 30%가 넘는 큰 하중을 받을 수 있다고 하였다.

수평하중을 받는 말뚝기초의 거동은 말뚝과 구조물의 강성뿐만 아니라 지반반력의 영향을 받는다. 즉 말뚝-구조물-지반 상호작용에 의해 그 거동이 결정되어진다. 또한 실제 현장에서 말뚝기초는 주로 군말뚝의 형태로 시공이 되어서므로 말뚝과 지반간의 상호작용을 고려한 군말뚝의 거동 파악을 통해 말뚝기초의 최적설계가 이루어 질 수 있다.

본 연구에서는 국내의 지반조건에 맞는 모형실험을 통해서 수직, 수평하중을 받는 말뚝기초의 거동을 파악하고 수직, 수평하중을 받는 단독말뚝과 군말뚝에 적용 가능한 하중전이함수를 구하여 말뚝의 중심간격, 말뚝의 배열 등에 따른 군말뚝계수를 산정하였다. 그 결과 좀 더 효율적인 말뚝기초의 설계가 이루어 질 수 있도록 하고자 한다.

## 2. 말뚝의 거동분석 실험

### 2.1 수직하중을 받는 말뚝기초

수직하중을 받는 말뚝기초에 대한 실험은 지반의 강도, 말뚝의 특성과 시공성 그리고 말뚝-지반의 상호작용을 해석하기 위해 수행하는데 많은 학자들이 실험적 연구를 통해 최대주면마찰력에 대한 기준을 제안하였다. Terzaghi 와 Peck(1967)은 점토지반에서 변위가 말뚝직경의 1%정도 일때 최대 주면마찰력이 발현된다고 제안하였으며 Coyle 과 Reese(1966)는 점토지반에서 말뚝의 변위가 6.3mm정도 일 때 최대 주면마찰력이 발생함을 제안하였다. Coyle 과 Sulaiman(1967)은 사질토 지반에서 말뚝의 변위가 6.3mm 정도일 때 최대 주면마찰력을 제안하였다. Reese 와 O' Neill(1989)은 많은 하중 재하 실험을 통해 점성토 지반인 경우 변위가 말뚝직경의 약 0.5% 일 때의 주면마찰력을 제안하였으며 사질토 지반인 경우 변위가 말뚝직경의 약 1%일 때의 주면마찰력을 제안하였다. 또한 Reese와 O' Neill(1989)은 실험을

통해 t-z곡선을 제안하였으며 이는 미국연방도로국(FHWA 1988)과 AASHTO의 설계지침(1992)에 적용되고 있다. 국내의 경우 조성한 등(1997)은 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 주변하중전이 특성을 연구하였으며 정상삼(1998)은 하향력을 고려한 단독말뚝의 지지력에 대하여 연구하였다.

### 2.2 수평하중을 받는 말뚝기초

말뚝기초의 수평지지력은 지진, 강풍, 파력의 영향 등을 받는 구조물의 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 수평하중을 받는 말뚝에 대한 현장실험은 많은 소요비용과 실험의 어려움으로 인해 연구 사례가 많지 않으며 모형실험연구가 비교적 많이 수행되어졌다.

수평하중을 받는 단독말뚝의 이론적 그리고 실험적인 연구는 Matlock 과 Reese(1960)에 의해 처음으로 시도되었으며 그 뒤 많은 연구가 진행되었다. Prakash(1962)는 중간정도의 조밀한 지반에서 알루미늄 군말뚝에 대하여 모형실험을 수행하였다. Kim 과 Brungraber(1976)는 수평하중을 받는 단독말뚝 그리고 수직말뚝과 경사말뚝으로 이루어진 군말뚝에 대하여 현장실험을 수행하였으며 Pise(1983)는 사질토지반에 근입되어 있는 알루미늄 말뚝에 대하여 많은 실험을 수행하여 배열이 서로 다른 군말뚝에서 말뚝사이의 상호작용은 말뚝의 근입깊이에 영향을 받는 사실을 밝혀내었다. Franke(1988)은 하중방향에 직각방향으로는 말뚝간격이 말뚝직경의 3배, 하중방향에 평행방향으로는 말뚝간격이 말뚝직경의 6배 이내인 경우 군말뚝의 변위는 단독말뚝의 각각의 변위를 합한 것보다 크다고 제안하였다. Ochao와 O' Neill(1989)는 두부조건이 자유단인 경우와 힌지인 경우에 대하여 사질토지반에서의 현장실험을 통해서 상호작용을 분석하였으며 하중이 커질수록 상호작용은 커지고 말뚝의 간격이 커질수록 상호작용은 작아진다고 설명하였다. 국내의 경우 김병탁등(2000)은 역해석 방법으로 지반반력 감소계수를 제안하였으며 장서용(1999)은 측방변형을 받는 수동말뚝의 군말뚝효과를 연구하였다.

수평하중을 받는 말뚝의 하중전이 함수인 p-y 곡선을 이용한 방법은 수평하중을 받는 말뚝의 설계에 폭넓게 이용되어진다. 이 방법은 탄성지반상의 Beam-column 이론과 말뚝에서 지반으로 하중을 전달하는 비선형 스프링모델을 이용하는 방법으로 간편성과 지반의 소성 변형을 고려하는 점에서 널리 이용되고 있다. 단독말뚝

표 1. P-multiplier 값의 제안치

참고문헌	말뚝배열	지반조건	중심간격 (D:말뚝직경)	P-multiplier			비 고
				앞 열	중간열	뒷 열	
Brown등(1988)	3×3	사질토	3D	0.8	0.4	0.3	실물시험
Reese(1996)	3×3	사질토& 점성토	3D	0.9	0.68	0.72	실물시험
Weaver(1997)	3×3	사질토& 점성토	3D	0.63	0.38	0.43	실물시험
Sparks and Rollins(1997)	3×3	사질토& 점성토	3D	0.82	0.56	0.64	실물시험
McVay(1998)	3×3	사질토(조밀)	3D	0.8	0.4	0.3	모형실험
	3×3	사질토(느슨)	3D	0.65	0.45	0.35	모형실험
	3×3	사질토(중간)	5D	1.0	0.85	0.7	모형실험

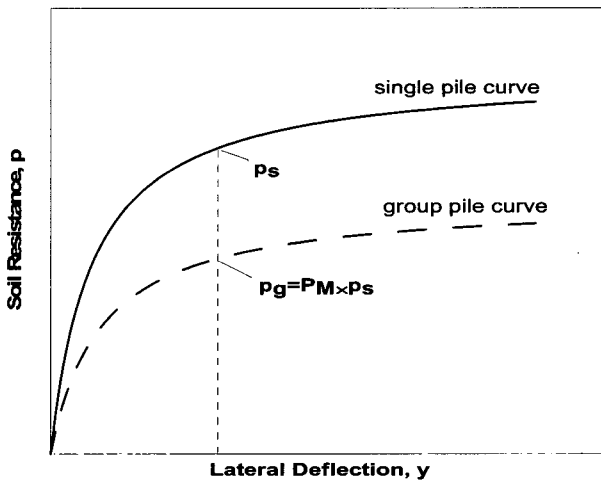


그림 1. 군말뚝에서 P-multiplier의 개념

의 p-y곡선과 군말뚝에서 위치에 따른 p-y곡선들을 비교하여 P-multiplier를 산정함으로써 군말뚝효과를 고려할 수 있는데 이를 P-multiplier기법이라고 한다. P-multiplier는 군말뚝에서 말뚝이 위치한 열에 영향을 받으며 말뚝의 두부조건에는 영향을 받지 않는다(Sparks 와 Rollins, 1997). 그림 1은 P-multiplier(P<sub>M</sub>) 기법의 개념을 나타낸 것이다.

표 1은 기존에 제안된 P-multiplier 값을 정리한 것이다.

### 3. 실내모형실험

수평하중을 받는 말뚝기초의 거동을 분석하기 위해서 지반반력과 수평변위의 관계를 나타내는 p-y곡선을 구하여 하중전이특성을 파악할 수 있으며 수직하중을 받는 경우에는 주면마찰력과 수직변위의 관계를 나타내는 t-z곡선과 선단지지력과 선단변위의 관계를 나타내는 q-z곡선을 구하여 하중전이특성을 파악할 수 있다. 이 때 말뚝의 거동특성을 나타내는 p-y, t-z, q-z 곡선들을 하중전이함수라고 한다.

이런 하중전이함수들은 지반의 물성에 따라 또 깊이 에 따라 각기 다른 양상으로 나타나며 비선형적인 특성을 보여준다. 특히 군말뚝의 경우에는 주변 말뚝간의 중심간격 및 말뚝의 배열에 따라 단독말뚝과는 다른 하중전이특성을 나타낸다.

본 연구에서는 모형실험을 통하여 하중전이함수를 직접 구하여 그 거동특성을 파악하고자 한다. 주문진표 준사를 모형지반으로 하였으며 PVC모형말뚝에 스트레인 게이지를 부착하여 각 하중단계별로 변형량을 측정하여 각 하중전이함수들을 구하고자 하였다. 지반은 상대밀도 약 73%정도의 조밀한 지반을 조성하였으며 말뚝의 두부는 말뚝캡에 고정시켰다. 군말뚝의 경우 말뚝의 중심간격이 말뚝직경의 2.5배, 5배, 7.5배 세 종류에 대해서 실험을 수행하였으며 배열은 단독말뚝, 2×2, 3×3 세 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 단독말뚝의 하중전이함수와 군말뚝의 중심간격 및 배열에 따른 하중전이함수를 각각 비교하여 군말뚝에 적용 가능한 상호작용 계수를 산정하였다.

#### 3.1 모형토조의 제작

수평 및 수직방향의 정적하중을 받는 주동 군말뚝 실험을 위해 본 연구에서는 모형토조를 가로 1.0m×세로 1.5m×높이 1.0m의 크기로 제작하였다. 하중재하와 변위측정을 위해서 토조 양쪽으로 격벽을 설치하였다.

본 모형토조실험에서는 모형 군말뚝 두부에 수평하중을 재하하기 위해 토조격벽에 도르레를 설치하고 와이어를 이용하여 말뚝캡에 연결한 후 추를 단계별로 올려 수평하중을 재하할 수 있도록 하였다. 수직하중은 단독말뚝 및 군말뚝의 두부를 말뚝캡과 너트를 이용하여 고정시킨 후 추를 단계별로 올려 하중을 재하하였다. 본 실험에서는 모형지반의 제원을 벽면효과(side effect)를

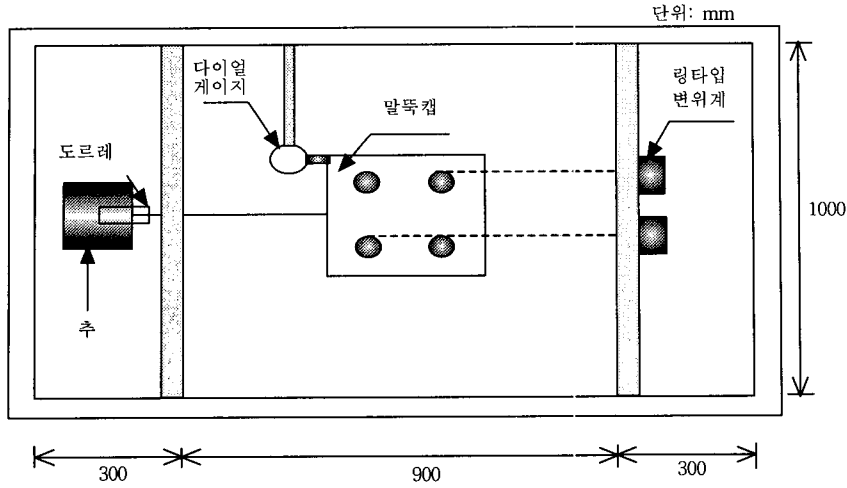


그림 2. 모형토조의 평면도

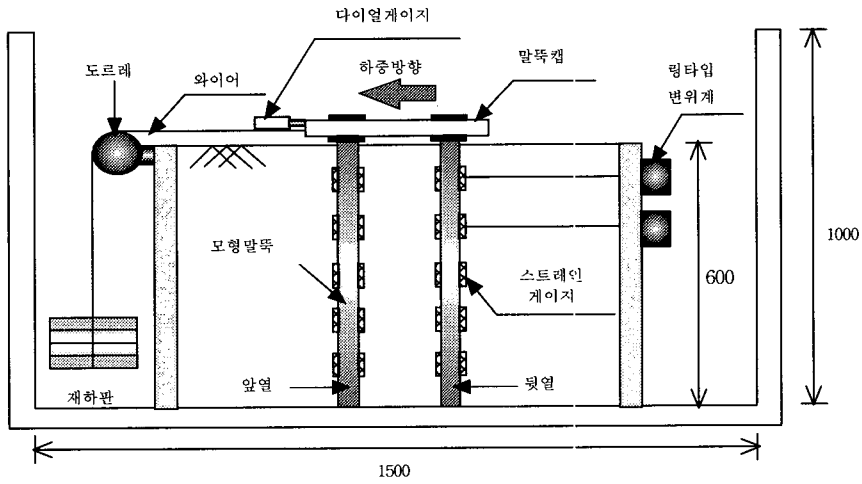


그림 3. 모형토조의 횡단면도(수평하중 재하)

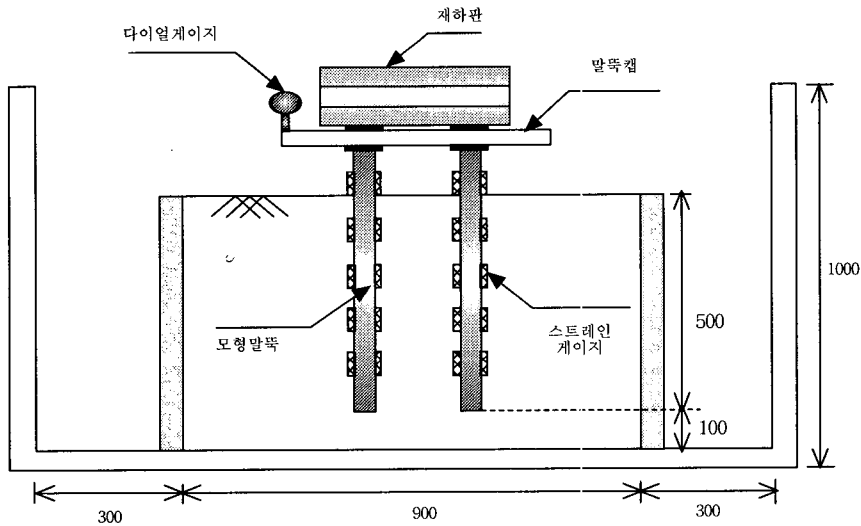


그림 4. 모형토조의 횡단면도(수직하중재하)

고려하여 가로 0.9m×세로 1.0m×높이 0.6m 크기로 조성하였다. 본 실험에서 고려하고자 하는 최대 크기인 3×3배열의 균말뚝에 대해 말뚝중심간격을 말뚝직경의

5.0배로 설정할 경우 수평하중 재하로 인해 발생하는 응력영역이 하중방향과 하중에 수직한 방향 모두 Prakash (1962)가 제안한 기준을 만족하고 있다. Prakash는 수평

하중 재하실험시 발생하는 응력영역이 하중방향으로는 말뚝직경의 8~12배 정도, 하중방향에 수직인 방향으로는 3~4배 정도라고 제시하였다. 그림 2, 그림 3 및 그림 4은 본 실험에서 제작한 모형토조와 실험장치의 단면을 나타낸 것이다.

### 3.2 시료 및 모형말뚝

모형실험용 시료는 공학적 특성이 널리 알려진 주문진 표준사를 사용하였다. 모형실험에 사용된 시료에 의해 성형된 지반의 전단강도 특성치를 얻기 위하여 깊이 별로 채취된 시료를 대상으로 삼축압축실험을 실시하였으며 그 결과 표 2와 같은 시료의 전단강도 특성치를 얻을 수 있었다.

본 실험에서는 모형말뚝으로 PVC 파이프 관을 사용하였다. 본 실험에 사용한 모형말뚝의 강성을 측정하기 위해 5개의 시편을 제작하여 인장실험을 수행하였다. 그 결과 표 3과 같이 본 실험에서 사용한 모형말뚝의 기본물성인 탄성계수와 휨강성을 구하였다.

모형말뚝의 강성과 휨성 판정을 위해 Broms(1964)와 Briaud(1992)가 제안한 방법을 사용하여 판정하였으며 판정결과 휨성말뚝으로 나타났다.

본 실험에서는 수직하중을 받는 말뚝의 변위를 측정하기 위해 그림 5(a)와 같이 일정한 간격으로 변형률 게이지(strain gauge)를 부착하였다.

수평하중을 받는 말뚝의 p-y 곡선을 구하기 위해서 그림 5(b)와 같이 구하고자 하는 위치에 변형률 게이지 3개를 1.2cm 간격으로 연속해서 부착하였다.

본 실험에서는 말뚝중심간격과 말뚝배열에 따른 주동군말뚝 실험을 수행하기 위해 두께 약 12mm의 아크릴 판으로 모형 말뚝캡을 제작하였으며 모형말뚝은 볼트와 너트를 이용하여 말뚝캡에 단단히 고정시킬 수 있도록 하였다.

표 2. 주문진 표준사의 삼축압축실험결과

지반종류	평균 상대밀도(%)	점착력(t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각(°)
조밀한 모래지반	73	0	37

표 3. 모형말뚝의 종류와 제원

말뚝 재질	길이 (mm)	외경 (mm)	두께 (mm)	탄성계수(E <sub>p</sub> ) (kgf/cm <sup>2</sup> )	휨강성(E <sub>p</sub> I <sub>p</sub> ) (kgf·cm <sup>2</sup> )
PVC	630	22	2.5	3.82×10 <sup>4</sup>	28264.89

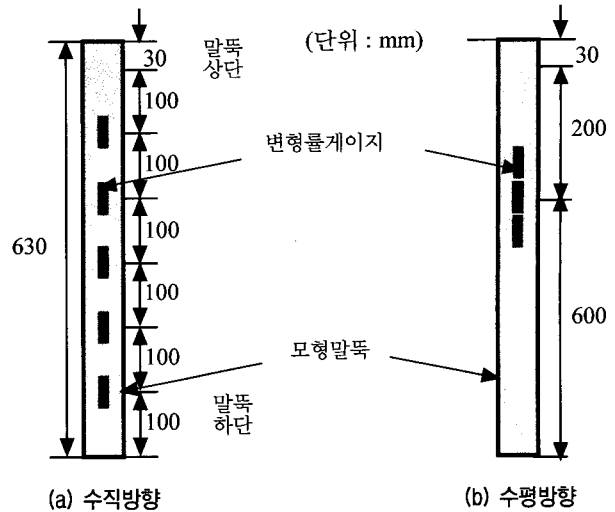


그림 5. 모형말뚝에 부착한 변형률 게이지

### 3.3 모형실험용 계측장비

본 연구에서는 하중 재하 단계별 말뚝에 작용하는 휨 모멘트를 측정하기 위하여 말뚝의 전면과 후면에 일정한 간격으로 PVC용 변형률 게이지(strain gauge)를 대칭으로 부착하였다. 본 실험에서는 일본의 동경측기연구소(Tokyo Sokki Kenkyujo Co.)의 제품인 GFLA-3-70-3L 형식의 PVC용 변형률 게이지를 사용하였으며 인디케이터(indicator)는 일본의 동경측기연구소(Tokyo Sokki Kenkyujo Co.)의 제품인 computing data logger TDS-601을 사용하였다. 채널이 10개 이상일 경우에는 일본의 동경측기연구소(Tokyo Sokki Kenkyujo Co.)의 제품인 ASW-30B를 사용하였다. 수평하중의 재하에 따른 말뚝의 수평변위를 측정하기 위한 변위계(displacement transducer)는 일본의 동경측기연구소(Tokyo Sokki Kenkyujo Co.)의 KD-5F를 사용하였는데, 링(ring) 형태로 되어있어 말뚝에 직접 연결하여 사용할 수 있다. 수직하중의 재하에 따른 말뚝두부의 수직변위를 측정하기 위하여 다이얼 인디케이터 게이지(dial-indicator gauge)를 토조 옆면에 설치하였다.

### 3.4 모형실험

본 실험에서는 사질토 지반에 대해서 말뚝의 중심간격, 말뚝의 배열에 따라 수평하중을 받는 경우와 수직하중을 받는 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 주문진표준사를 이용하여 모형지반을 깊이에 대한 평균상대밀도가 약 73% 되도록 조성하였으며 말뚝의 두부구속 조건은 말뚝캡에 고정되어 있는 형식으로 고정단과 흡

표 4. 정적하중에 대한 군말뚝 실험종류

말뚝재질	하중조건	말뚝형태	말뚝배열	말뚝중심간격
PVC 말뚝	수직하중	단독말뚝	-	-
		군말뚝 (정사각형 배열)	2 × 2	2.5D
				5.0D
	7.5D			
	수평하중	단독말뚝	-	-
		군말뚝 (정사각형 배열)	2 × 2	2.5D
				5.0D
				7.5D
3 × 3		2.5D		
	5.0D			

사한 것으로 판단된다. 단독말뚝과 2×2배열, 3×3배열의 경우에 대해 각각 실험을 실시하였으며 2×2배열의 경우에는 말뚝의 중심간격이 말뚝직경의 2.5배, 5배, 7.5배인 경우에 대하여 수평 및 수직하중 재하 실험을 실시하였으며 3×3배열의 경우에는 말뚝의 중심간격이 말뚝직경의 2.5배, 5배인 경우에 대하여 각각 실험을 수행하였다. 구체적인 실험의 종류는 표 4에 나타내었다.

본 실험에서는 모형지반을 성형하기 전에 변형률 게이지를 부착한 모형말뚝을 모형토조내에 수직으로 미리 설치하고 모형지반을 조성하였다. 지반조성을 위해 유출구의 크기와 낙하높이를 일정하게 조절할 수 있는 강사장치(raining-sand device)를 제작하여 사용하였다. 지반조성시 깊이에 따라 10cm 크기의 원통형 용기를 설치하고 실험이 끝난 후 이를 회수하여 깊이별 상대밀도를 측정함으로써 모형지반의 균질성을 확인하였다.

수직하중을 받는 말뚝의 하중전이곡선을 산정하기 위해서 등간격으로 변형률게이지를 부착하였다. 변형률게이지가 부착된 지점에서 다음과 같은 관계가 만족한다.

$$EA = \frac{P}{\epsilon} \quad (1)$$

여기서, E : 말뚝의 탄성계수

A : 말뚝의 단면적

P : 말뚝의 임의의 지점에 작용하는 하중

$\epsilon$  : 말뚝의 임의의 지점에서 측정된 변형률

따라서 측정된 변형률로부터 그 지점에 작용하는 하중을 측정할 수 있으며 각 지점에서의 하중값의 차이

를 이용하여 깊이별로 전달되는 하중을 측정할 수 있다. 단위 주면마찰력은 지점간의 전달되는 하중의 차이를 주면의 면적으로 나누어서 산정하였으며 단위 선단지 지력은 말뚝의 밑부분에 전달되는 하중을 말뚝의 단면적으로 나누어서 구할 수 있다.

수평하중을 받는 말뚝의 하중전이함수인 p-y 곡선을 직접 산정하기위해 측정지점의 위, 아래로 변형률게이지를 1.2cm간격으로 부착하였다.

임의의 한 지점에서의 변형량은 전면과 후면에서 측정한 변형량의 평균값을 사용하였으며 보에서의 휨용력식인 식 (2), 식 (3) 및 식 (4)를 적용하여 각 지점에서의 휨모멘트 값을 산정하였다.

$$\sigma = \frac{M}{I} y \quad (2)$$

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

$$M = \frac{EI\epsilon}{y} \quad (4)$$

보 이론에 의하면 지반반력은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$EI\left(\frac{d^4y}{dx^4}\right) = -p \quad (5)$$

여기서 y는 말뚝의 변위, EI는 휨강성, x는 깊이이다. 보의 방정식에서 다음과 같은 관계가 만족한다.

$$EI\left(\frac{d^4y}{dx^4}\right) = -\frac{d^2M}{dx^2} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에서 다음과 같은 관계가 만족한다.

$$\frac{d^2M}{dx^2} = p \quad (7)$$

이때 변형률 게이지간의 간격이 동일하다고 하면 식 (7)은 유한 차분화하여 근사적으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

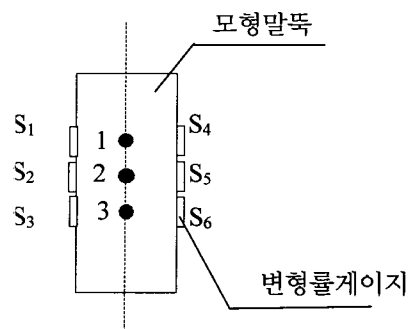


그림 6. 수평하중을 받는 모형말뚝의 측정위치에서의 변형률게이지

$$\frac{M_1 - 2M_2 + M_3}{d^2} \approx p_2 \quad (8)$$

여기서,  $M_1$  : 1번 지점에서의 휨모멘트값,  
 $M_2$  : 2번 지점에서의 휨모멘트값,  
 $M_3$  : 3번 지점에서의 휨모멘트값,  
 $d$  : 변형을 게이지간의 간격,  
 $p_2$  : 2번 지점에서의 지반반력값 이다.

위와 같은 방법에 의하여 말뚝의 임의의 깊이에서의 지반반력  $p$ 값을 구할 수 있으며 변위는 링 타입 변위계를 이용하여 직접 측정하여  $p$ - $y$ 곡선을 구하였다.

#### 4. 실험 결과 분석

두부를 캡에 고정시킨 PVC말뚝에 대해 표 4에 나타난 바와 같이 총 10회의 실험을 실시하였다. 하중추를 이용하여 단계별로 정적인 하중을 재하하였으며 각 위

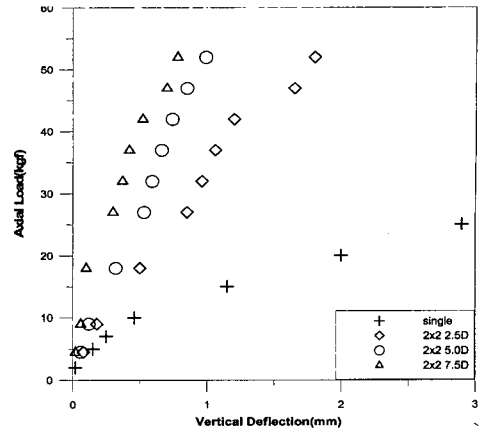
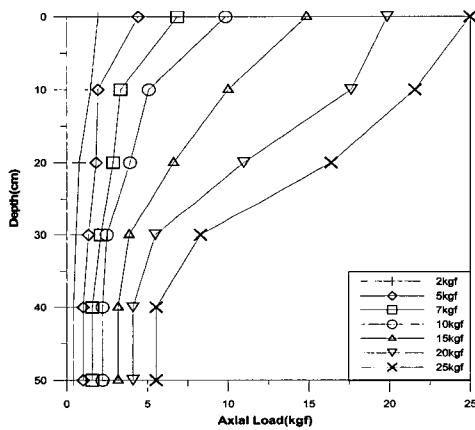
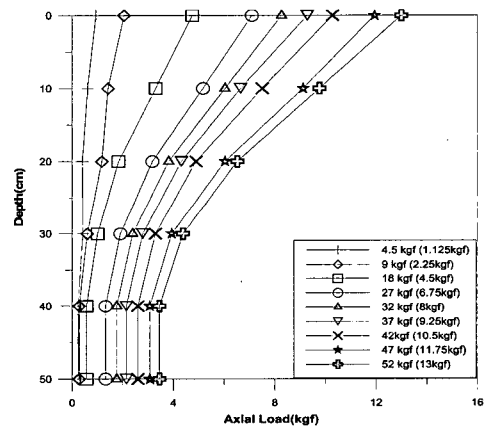


그림 7. 단독말뚝과 군말뚝의 하중-침하량 곡선

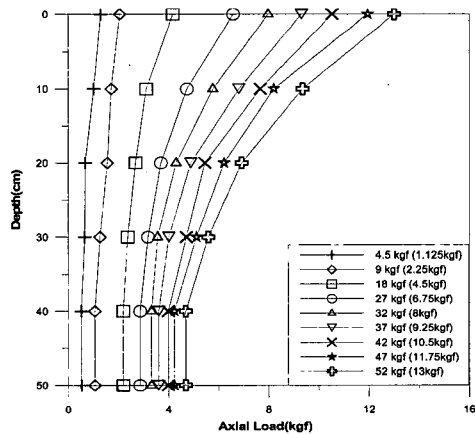
지별 변형량과 두부에서의 침하량을 측정하여 말뚝의 하중전이가 양상과 거동을 분석하였다. 또한 측정된 최대 변형률은 수직하중 재하시 약 0.0015%, 수평하중 재하시 약 0.0088%로 시험하중 범위에서 재료가 탄성거동을 하는 것으로 보았다.



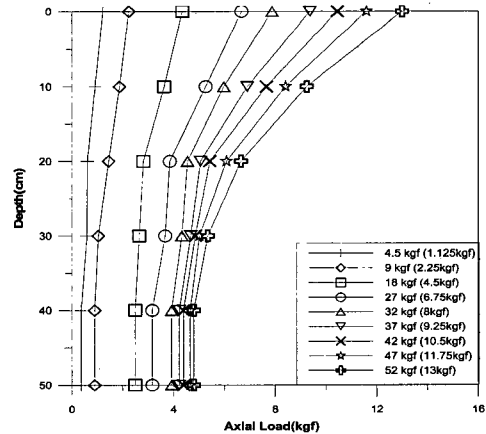
(a) 단독말뚝의 하중전이 곡선



(b) 군말뚝(2×2, 2.5D)의 하중전이 곡선



(c) 군말뚝(2×2, 5.0D)의 하중전이 곡선



(d) 군말뚝(2×2, 7.5D)의 하중전이 곡선

그림 8. 수직하중을 받는 단독말뚝과 군말뚝의 하중전이 곡선

#### 4.1 수직하중을 받는 단독말뚝과 군말뚝의 거동분석

##### 4.1.1 단독말뚝과 군말뚝의 거동분석

그림 7은 단독말뚝과 일련의 군말뚝에 대한 두부에서의 하중-침하량 관계를 나타낸 것이다. 그림 8은 단독말뚝과 군말뚝(2×2)의 하중전이곡선을 통해서 하중이 증가함에 따라 주면마찰력과 선단 지지력의 양상을 파악할 수 있었으며 하중이 커질수록 상부에서의 하중전이 변화가 크게 나타났고 깊이 약 30cm 이후에는 하중전이의 변화가 거의 나타나지 않았다. 즉, 본 실험에서의 주면마찰력의 한계깊이(critical depth)는 약 15D(D:말뚝직경) 정도로 나타났으며 이는 Meyerhof (1976)가 제안한 10D~30D의 범위를 벗어나지 않는다. 그림 9는 단독말뚝과 군말뚝의 주면마찰력과 침하량과의 관계를 나타낸 것이며 그림 10은 단독말뚝과 군말뚝의 선단지지력과 침하량과의 관계를 나타낸 것이다. t-z 및 q-z 곡선에서 말뚝중심간의 간격이 증가할수록 군말뚝을 이루는 개개말뚝의 거동이 단독말뚝의 거동과 유사한 것으로 나타났다.

##### 4.1.2 군말뚝효과

수직하중을 받는 등간격의 2×2배열 말뚝에서는 하중이 말뚝캡의 중앙에 작용한다고 할 때 4개의 말뚝은 서로 같은 거동을 보인다. 본 연구에서는 단독말뚝과 중심간격이 각각 2.5D, 5.0D, 7.5D인 2×2배열의 군말뚝 두부에서의 하중-침하량 곡선을 이용하여 군말뚝계수를 제안하였으며 임의의 침하량에서 단독말뚝과 일련의 군말뚝이 받는 하중을 비교하여 산정하였다.

그림 11은 말뚝의 중심간격 별 군말뚝계수를 나타낸

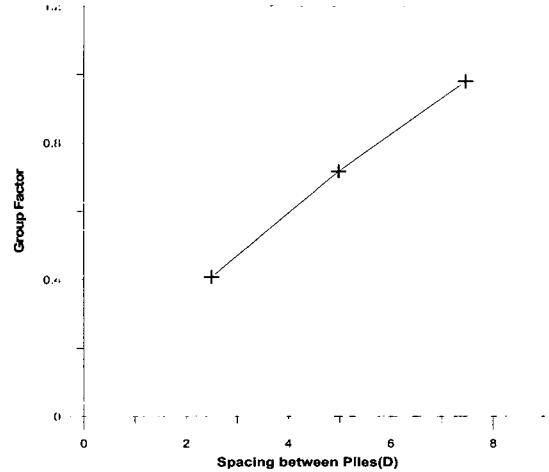


그림 11. 군말뚝(2×2)의 간격별 군말뚝계수(D : 말뚝직경)

것으로 말뚝의 중심간격이 각각 2.5D, 5.0D, 7.5D일 때 군말뚝계수는 0.4, 0.7, 1.0의 값을 산정하였다.

#### 4.2 수평하중을 받는 단독말뚝과 군말뚝의 거동분석

##### 4.2.1 단독말뚝과 군말뚝의 거동 분석

그림 12는 수평하중을 받는 단독말뚝의 깊이별 모멘트를 나타낸 것이다. 깊이 10~20cm에서 최대모멘트가 발생하였으며 말뚝직경의 약 20배에 해당하는 깊이인 40cm 이후에는 모멘트가 거의 발생하지 않았다.

그림 13은 단독말뚝에 수평하중이 작용할 때의 말뚝의 깊이별 변위를 나타낸다. 모멘트의 경우와 마찬가지로 깊이 약 40cm 이후에는 변위가 거의 발생하지 않음을 알 수 있었다. 또한 그림 12과 그림 13의 결과로부터 본 실험에서 사용된 말뚝이 휨성말뚝임을 알 수 있었다.

군말뚝의 경우 하중방향을 기준으로 앞열과 뒷열을

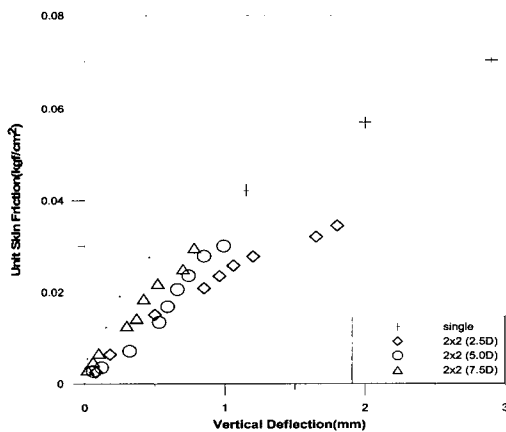


그림 9. 단독말뚝과 군말뚝의 t-z 곡선

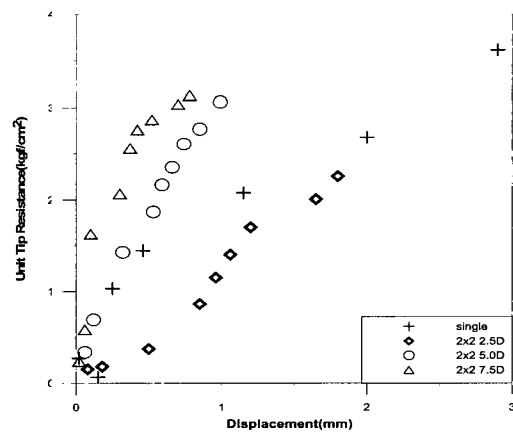


그림 10. 단독말뚝과 군말뚝의 q-z 곡선



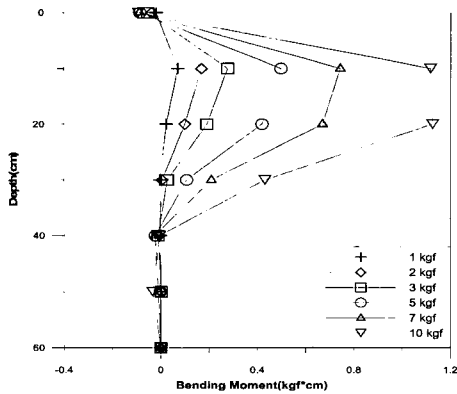


그림 12. 단독말뚝의 휨모멘트도

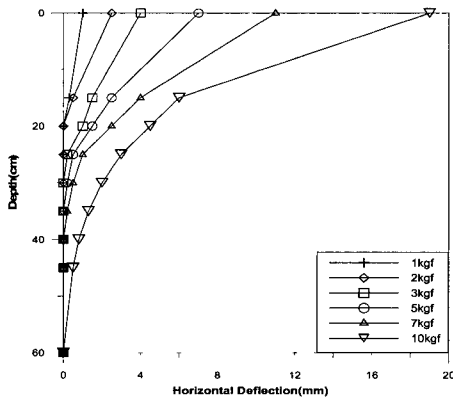
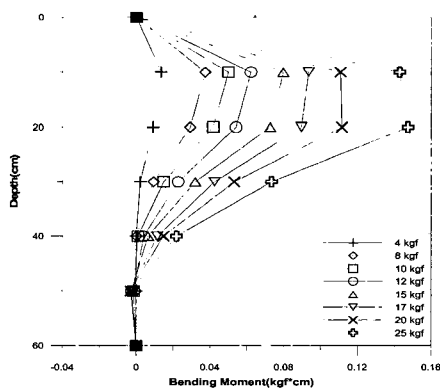


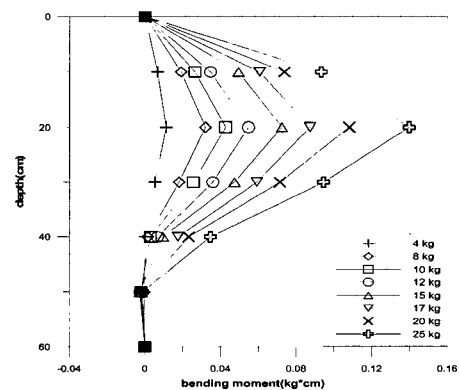
그림 13. 단독말뚝의 변위도

구분하였다(그림 3 참조). 수평하중을 받는 군말뚝의 거동은 각 열에 따라 틀려지며 Townsend 등(1997)은 3×3 배열의 군말뚝에 있어서 같은 열에 있을 경우 가운데 위치한 말뚝과 양 옆에 위치한 말뚝의 거동은 거의 같다고 제안하였다. 본 실험에서는 같은 열에 위치한 말뚝은 같은 거동을 하는 것으로 보고 각 열에 대한 거동을 분석하였다.

그림 14는 수평하중을 받는 중심간격 2.5D인 2×2배



(a) 앞열의 휨모멘트도



(b) 뒷열의 휨모멘트도

그림 14. 군말뚝(2×2, 2.5D)의 각 열에 대한 휨모멘트

열의 앞열과 뒷열의 모멘트를 나타낸 것이다. 앞열의 말뚝은 단독말뚝의 휨모멘트분포와 유사한 형태의 휨모멘트분포를 나타내었으며 뒷열의 말뚝은 앞열의 말뚝의 영향을 받아 다른 경향의 휨모멘트분포를 나타내었다.

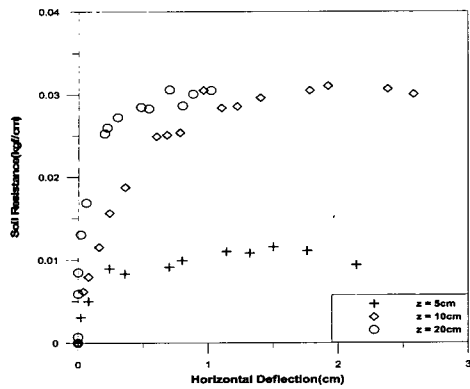
그림 15는 단독말뚝과 군말뚝의 배열에 따른 각 열에서의 p-y 곡선을 나타낸 것이다. 깊이 10cm에서의 지반 반력과 변위의 관계를 나타내었으며, 2×2 및 3×3 배열의 군말뚝의 경우 열의 간격이 증가함에 따라 단독말뚝의 p-y 곡선에 근접해 가는 경향을 보였으며 간격이 증가할수록 앞열 말뚝의 영향을 덜 받는 것으로 나타났다. 3×3 배열의 군말뚝의 경우 앞열, 중간열, 뒷열의 p-y 곡선을 나타내었다.

#### 4.2.2 하중-변위 관계에 의한 군말뚝효과

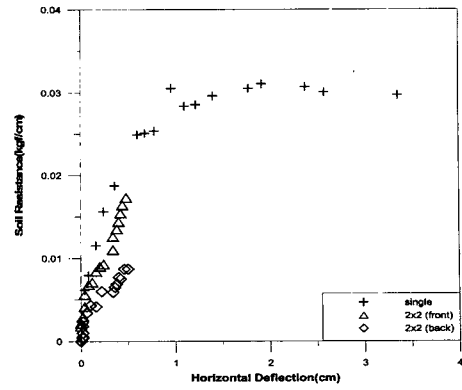
본 연구에서는 단독말뚝과 군말뚝의 하중-변위 관계를 비교하여 군말뚝의 거동을 분석하였다.

그림 16과 그림 17은 각각 수평하중을 받는 단독말뚝과 2×2 배열의 군말뚝, 단독말뚝과 3×3 배열의 군말뚝에 대한 하중과 두부에서의 수평변위를 나타낸 것이다.

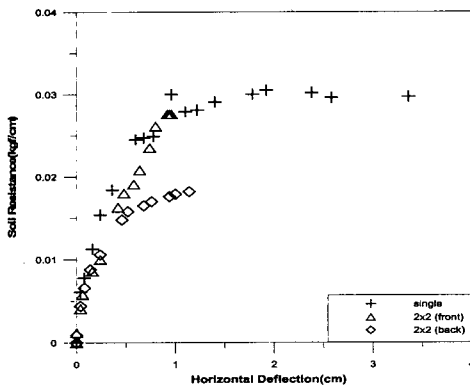
그림 16과 그림 17의 실험결과를 이용하여 수직하중을 받는 경우와 마찬가지로 군말뚝의 배열에 따른 각 열의 군말뚝계수를 산정하였으며 그 결과는 그림 18과 같다. 2×2 배열의 군말뚝에 있어서 중심간격이 2.5D인 경우 군말뚝계수는 0.83이며 5.0D와 7.5D인 경우는 1.0으로 산정되었다. 3×3 배열의 군말뚝에 있어서는 2.5D인 경우 군말뚝계수를 0.7, 5.0D인 경우는 1.0으로 산정되었다. 같은 중심간격 2.5D를 가지는 군말뚝이라도 말뚝의 배열에 따라 다른 값을 나타내었으며 3×3 배열일 때의 군말뚝계수가 2×2 배열일 때의 계수보다 작은 것으로 산정되었다.



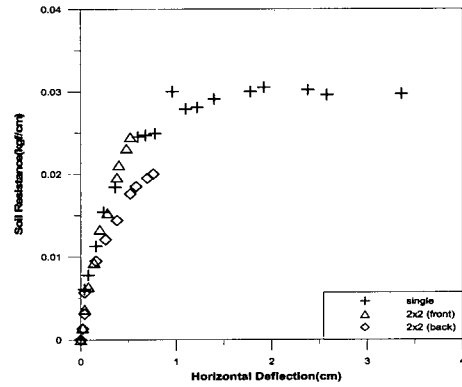
(a) 단독말뚝



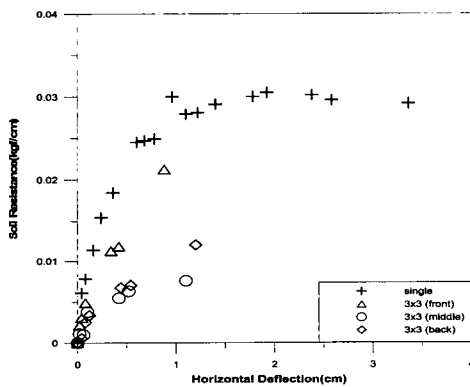
(b) 군말뚝(2×2, 2.5D)



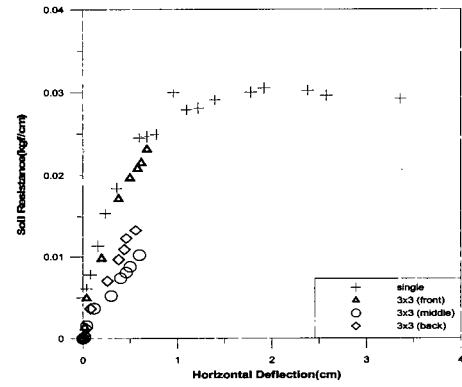
(c) 군말뚝(2×2, 5.0D)



(d) 군말뚝(2×2, 7.5D)



(e) 군말뚝(3×3, 2.5D)



(f) 군말뚝(3×3, 5.0D)

그림 15. 단독말뚝과 군말뚝의 p-y 곡선

2×2 및 3×3의 배열을 가지는 군말뚝의 경우 하중변위 관계에 있어서 말뚝간의 중심간격이 말뚝직경의 5.0배 이상인 경우에는 군말뚝계수가 1.0으로 군말뚝의 효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

#### 4.2.3 P-multiplier 에 의한 군말뚝 효과

본 연구에서는 수평하중을 받는 말뚝의 하중전이를 나타내는 지반반력과 수평변위의 관계를 나타내는 p-y 곡선을 이용하여 단독말뚝과 군말뚝의 거동을 분석하

였으며 깊이 10cm에서의 p-y 곡선을 구하여 분석하였다. 실험에서 구한 p-y곡선들을 식(9)와 같은 Kondner의 쌍곡선함수로 선형회귀 하였다.

$$p = \frac{y}{\left(\frac{1}{k} + \frac{y}{p_u}\right)} \quad (9)$$

여기서, k : p-y 곡선의 초기 접선계수

$p_u$  : 말뚝 단위길이당 지반의 극한 수평지지력

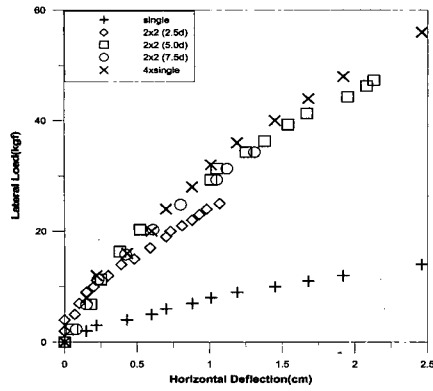


그림 16. 단독말뚝과 군말뚝(2×2)의 하중-변위 곡선

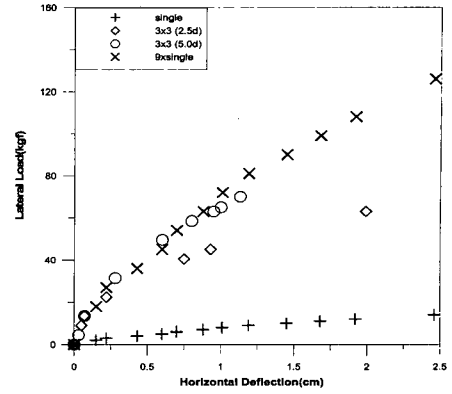
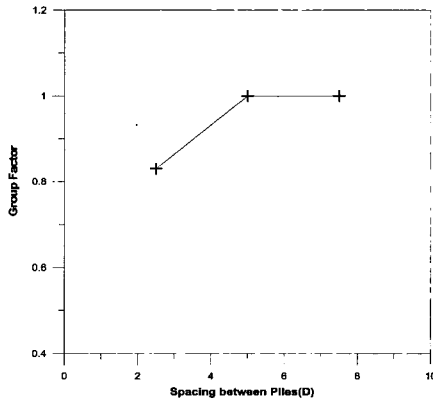
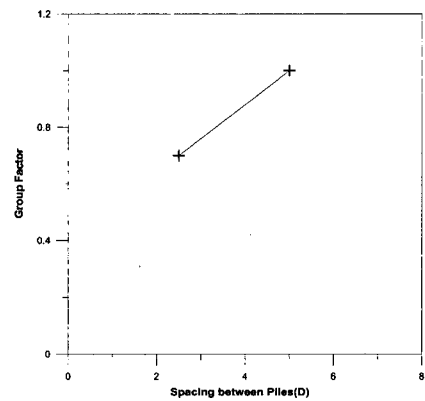


그림 17. 단독말뚝과 군말뚝(3×3)의 하중-변위 곡선



(a) 군말뚝(2×2)



(b) 군말뚝(3×3)

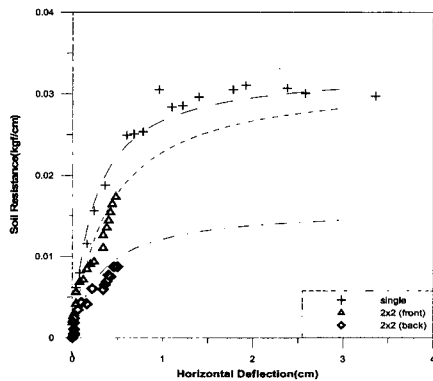
그림 18. 중심간격에 따른 군말뚝계수

그림 19는 일련의 단독말뚝과 군말뚝에 대한 깊이 10cm에서의 p-y 곡선을 Kondner의 쌍곡선 함수로 선형 회귀한 결과이며 이를 이용하여 P-multiplier를 산정하였다.

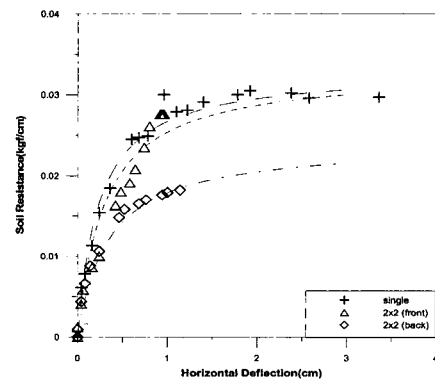
그림 20은 2×2배열과 3×3배열의 군말뚝에 대해서 말뚝의 중심간격별 및 위치별 P-multiplier를 나타낸 것이다. 2×2인 경우 중심간격 2.5D인 군말뚝에 대해서 앞열과 뒷열의 경우 P-multiplier는 각각 0.86, 0.45의 값

을 산정하였으며 5.0D의 경우에 대해서는 0.95, 0.67의 값을 산정하였고 7.5D의 경우에는 앞열과 뒷열에 대해 1.0, 0.83의 값을 산정하였다. 3×3배열의 2.5D인 경우 앞열, 중간열, 뒷열의 P-multiplier는 0.8, 0.3, 0.4로 산정하였으며 5.0D인 경우 앞열, 중간열, 뒷열에 대해서 0.93, 0.48, 0.6의 값을 산정하였다.

그림 21은 3×3 배열의 군말뚝에서 각 열의 P-multiplier에 대한 기존 문헌의 연구결과와 본 연구에서 산정한



(a) 군말뚝(2×2, 2.5D)



(b) 군말뚝(2×2, 5.0D)

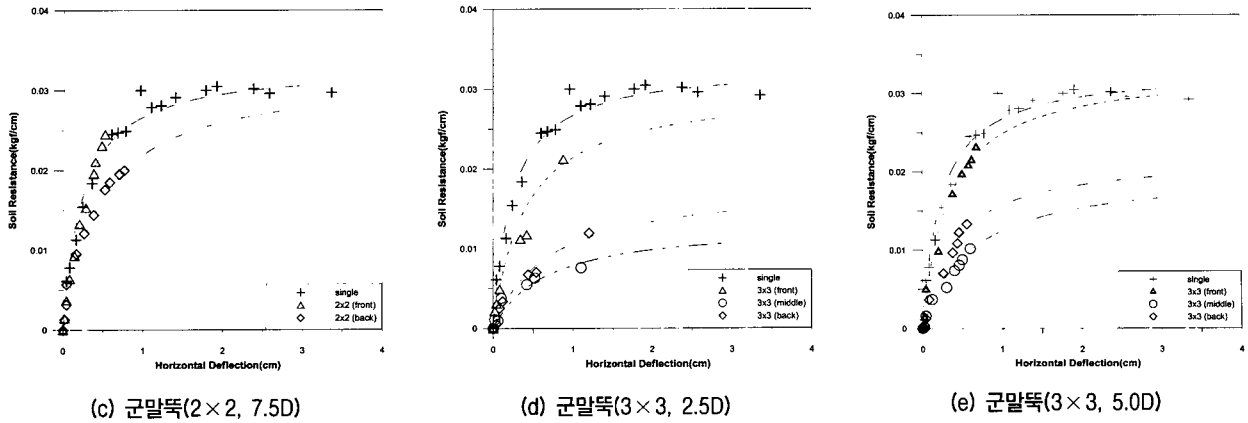


그림 19. 단독말뚝과 군말뚝(2×2, 3×3)의 p-y 곡선

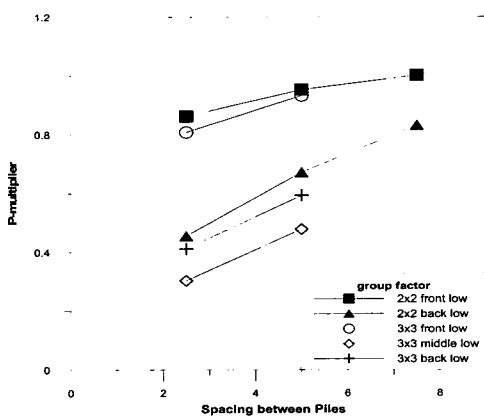


그림 20. 군말뚝의 배열 및 중심간격에 따른 P-multiplier 값

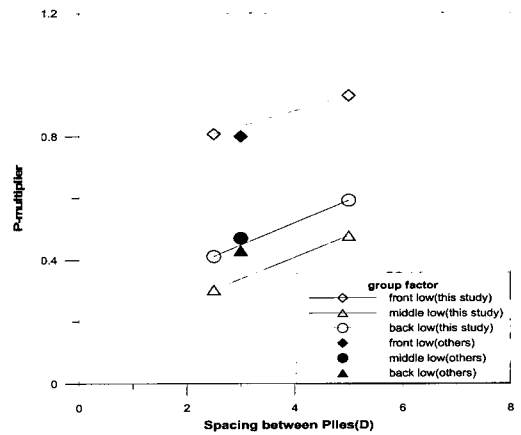


그림 21. 말뚝중심간격에 따른 P-multiplier의 비교

값을 나타낸 것이다. 기존 문헌의 연구결과는 표 1의 값 중 느슨한 사질토의 경우를 제외한 값들을 평균하여 나타내었다. 그림 21에서 앞열과 뒷열의 경우는 본 연구에서 산정한 P-multiplier 값이 기존의 연구결과와 유사하였으며 중간열의 경우는 본 연구결과가 좀 더 작게 산정되었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 수평 및 수직하중을 받는 말뚝기초에 대하여 주문진표준사를 시료로 사용한 실내모형실험을 수행하여 거동특성을 파악하고자 하였다. 상대밀도 약 73%의 조밀한 사질토 지반에 매입된 중심간격 2.5D, 5.0D, 7.5D인 2×2, 3×3 배열 군말뚝에 수직 및 수평하중을 재하하여 거동분석을 하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 수직하중을 받는 군말뚝기초의 경우 말뚝의 중심간격이 커짐에 따라 군말뚝 효과는 작아졌으며 2×2

배열의 군말뚝에서 중심간격이 2.5D와 5.0D인 경우 군말뚝효과가 발생하였으나 7.5D인 경우는 단독말뚝의 거동과 유사하게 나타났다.

(2) 수평하중을 받는 군말뚝기초의 경우에서도 말뚝의 중심간격이 커짐에 따라 군말뚝효과가 작아졌으며 중심간격이 5.0D이하에서 군말뚝효과가 확실하게 나타났다.

(3) 수평하중을 받는 군말뚝기초의 각 열에 대한 군말뚝 효과를 나타내는 P-multiplier를 산정하였다. 말뚝중심간격이 증가함에 따라 P-multiplier도 증가함을 알 수 있었으며 같은 중심간격인 경우라도 말뚝의 배열 및 위치에 따라 다른 값을 가지는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 1999-1-311-002-3)에 의해 이루어진 것으로서 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 김병탁, 김영수(2000), P-multiplier 방법을 적용한 군말뚝의 수평 거동 예측, 한국지반공학회 2000 가을학술발표회 논문집, pp. 253~260.
2. 장서용(1999), 측방변형을 받는 수동군말뚝의 거동분석, 석사학위논문, 연세대학교.
3. 정상섭, 원진오, 허정원(2001), 말뚝-캡 강성을 고려한 군말뚝 기초의 해석, 한국지반공학회 2001 봄학술발표회 논문집, pp.363~370.
4. 한국지반공학회 (1997), 개선된 강관말뚝의 설계와 시공, 301p.
5. Briaud, J. S. (1992), The pressuremeter, A. A. Balkema, Rotterdam, pp.132~164.
6. Broms, B. B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesive soils" *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.90, No.SM2, pp.27~63.
7. Brown, D. A., Reese, L. C., and Morrison, Clark (1988), "Lateral load behavior of pile group in sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.114, No.11, pp.1261~1276.
8. Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966), "Load transfer for axially loaded piles in clay", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.92 No.2, pp.1~26.
9. Coyle, H. M. and Sulaiman, I. H. (1967), "Skin friction for steel piles in sand", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.93 No.6, pp.261~279.
10. Franke, E. (1988), "Group action between vertical piles under horizontal loads", *Deep Foundations on Bored and Augar Piles*, W. F. Van Impe, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.83~93.
11. Kim, J. B. and Brungraber, R. J. (1976), "full-scale lateral load tests of pile groups", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.2, No.2, pp.87~105.
12. Matlock, H. and Reese, L. C.(1960), "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.86, No.SM5.
13. McVay et al. (1998), "Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.10, pp.1016~1026.
14. Meyerhof, G. G.(1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.102, No.GT3, pp.197~228.
15. Ochoa, M. and O'Neill, M. W. (1989), "Lateral pile interaction factors in submerged sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol 115, No.3, pp.359~378.
16. Pise, P. J. (1983), "Lateral load-deflection behavior of pile groups", *Indian Geotechnical Journal*, Bombay, India, Vol.13, pp.37~51.
17. Prakash, S. (1962), "Behavior of pile groups subjected to lateral loads", *Ph.D thesis*, UNIV. of Illinois, Urbana, Ill.
18. Rao, S. N., Ramakrishna, V. G. S. T., and Rao, M. B. (1998), "Influence of Rigidity on Laterally Loaded Pile Groups in Marine Clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.6, pp.542.
19. Reese, L. C. and O'Neill, M. W. (1988), "Field load tests of drilled shafts", *Deep foundations on bored and augar piles: Proc. 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Augar Piles*, W. F. Van Impe, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.145~191.
20. Reese, L.C., Wang S. T., Arrellaga, J. A., and Hendrix, J. (1996), Computer program GROUP for Windows user's manual, version 4.0. Ensoft, Inc., Austin, Texas.
21. Ruesta, P. F. and Townsend, F. C. (1997), "Evaluation of laterally loaded pile group at Roosevelt Bridge", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No.12, pp.1153~1161.
22. Sparks, A. and Rollins, K. M. (1997), "Passive resistance and lateral load capacity of a full-scale fixed-head pile group in clay." *Civ. and Envir. Engrg. CEG.97-04*, Brghan Young Univ., Provo, Utah.
23. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), *Soil mechanics in engineering practice*, Gohn Wiley & Son's, Inc. New York, N.Y.

(접수일자 2001. 10. 8, 심사완료일 2001. 12. 13)