

2 개층 사질토지반에서 단일 강성말뚝의 수평거동에 대한 두부 구속영향 Effect of Pile Head Constraint on Lateral Behavior of Single Rigid Pile in Two-Layered Sand Soil

김영수 ¹⁾ Young-Su Kim, 서인식 ²⁾ In-Shik Seo, 김병탁 ³⁾ Byung-Tak Kim, 이상웅 ⁴⁾ Sang-Woong Lee

¹⁾ 경북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, KyungPook National University

²⁾ 경동정보대학 토목공학과 조교수, Assist. Professor, Dept. of Civil Engineering, KyungDong Information College

^{3), 4)} 경북대학교 토목공학과 박사과정, Doctor course, Dept. of Civil Engineering, KyungPook National University

SYNOPSIS: This paper shows the results of a series of model tests on the behavior of single rigid pile, which subjected to lateral load, in non-homogeneous Nak-Dong River sands, consisted of two layers, upper and lower layers. The purpose of the present paper is to investigate the effect of ratio of lower layer thickness to embedded pile length, ratio of soil modulus of upper to lower layer (E_{h1}/E_{h2}) and pile head constraint condition on the characteristics of lateral behavior of single pile. These effects can be quantified only by the results of model tests.

As a model test result, in non-homogeneous sand, it shows that the lateral behavior depends upon the ratio of soil modulus of upper to lower layer more than other factors. And, in respect of deflection, it was found that the reduction ratio of deflection by pile head fixity is the value of 0.5 and 0.6 for $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ and $E_{h1}/E_{h2}=5.56$, respectively. The critical thickness of lower layer on the change of deflection is about 25 - 50% of pile embedded length. Also, in respect of maximum bending moment, it was found that the reduction ratio of maximum bending moment by pile head fixity is the value of 0.55 and 0.7 for $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ and $E_{h1}/E_{h2}=5.56$, respectively.

Key words : Nonhomogeneous, Fixity, H/L, Model Test

1. 서 론

말뚝기초에서의 축하중과 수평하중에 의한 말뚝 거동특성은 상호 무관하지 않으나 종래에는 주로 축하중 작용시의 지지력이나 침하량 산정에 중점을 두어 설계와 시공을 수행하여 왔다. 그러나 요즘 국내 지방에서도 고층 건축구조물, 철도 구조물, 도로교 등의 설계에 내진설계가 포함되어 말뚝설계에서도 수평하중이 중요한 요소로 등장하고 있다. 수평하중을 받는 말뚝의 수평거동은 흙-말뚝의 응력-변형거동이 낮은 응력하에서도 비선형적이므로 예측이 상당히 어려우며, 지반조건이나 말뚝의 근입깊이, 형상 및 직경 등의 말뚝조건과 말뚝의 두부 및 선단 구속조건, 말뚝표면의 거칠기 등의 조건에 따라 크게 달라진다. 말뚝의 수평거동에 있어서, 수평하중의 증가로 인하여 말뚝주변의 흙은 지표면에서 항복하기 시작하여 진행성 파괴에 의하여 소성영역이 순차적으로 말뚝 선단방향으로 확대되어 간다. 이러한 수평거동 현상으로 인하여, 현실적으로 비균질 지반에 시공되어 수평하중을 받는 말뚝기초의 거동 특성을 명확히 규명할 필요성이 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 낙동강 유역의 모래를 이용하여 말뚝의 수평거동에 영향을 미치는 변수들 중에 지반조건과 말뚝 두부 구속조건에 대한 모형실험을 수행하여 수평거동 특성을 분석하였다. 비균질 지반에서의 단일 강성말뚝의 수평거동 특성은 하중(Q) - 변위(y)관계, 휨모멘트(M) - 깊이(z)관계, 최대 휨모멘트(MBM) - 수평변위(y)관계, 그리고 균질지반에서의 수평변위와 최대 휨모멘트에 의하여 정규화 한 계수비($y_{HL}/y_{HL=0}$, $y_{HL}/y_{HL=1.0}$, $MBM_{HL}/MBM_{HL=1.0}$, $MBM_{HL}/MBM_{HL=0}$), 그리고 수평변위와 최대 휨모멘트에 대한 말뚝 두부 구속효과($y_{fix-head}/y_{free-head}$, $MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$)에 대하여 분석하였다.

2. 모형실험 방법 및 조건

현장에서의 말뚝기초의 시공방법은 천공 후 항타하여 주변지반과 말뚝의 틈을 주입액으로 보완하는 공법과 직접 항타공법을 주로 사용하고 있으나, 본 연구에서는 전자의 시공방법에 대하여 근접하도록

수행하였으며 후자의 시공방법에 대한 연구는 계속 수행할 계획으로 있다.

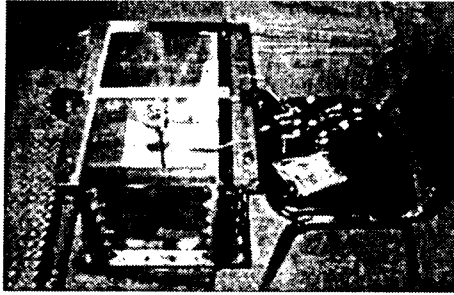


Photo 1. 지반성형전 말뚝기초의 setting 장면

이에 모형실험에서는 전자의 시공방법을 완벽하게 재현하기가 상당히 어려움으로 인하여 주변지반과 말뚝기초의 틈을 보완하는 주입액 대신에, 지반 성형 이전에 말뚝기초를 수직상태로 유지하여 지반을 성형함으로써 주변지반과의 접촉을 100% 허용하는 방법을 사용하였다 (Photo 1).

2.1 지반성형 시료

모형실험에서 사용할 낙동강 유역의 모래에 대한 물리적 특성치는 Table 1 과 같다. 조성된 지반은 시료의 유효직경에 대한 말뚝직경의 비가 실제와 다름으로써 내적크기 효과(internal scale effect)가 발생하여 말뚝의 수평거동에 영향을 줄 수 있으나, 본 연구에서는 시료의 유효직경에 대한 말뚝직경의 비가 85.7로서 내적크기 효과가 무시될 수 있는 50 보다 크기 때문에 내적크기 효과는 무시할 수 있다 (Peterson, 1988).

2.2 모형말뚝

모형실험에서의 모형 말뚝기초는 Photo 2, Table 2 와 같이 스테인레스 재질을 사용하였다.

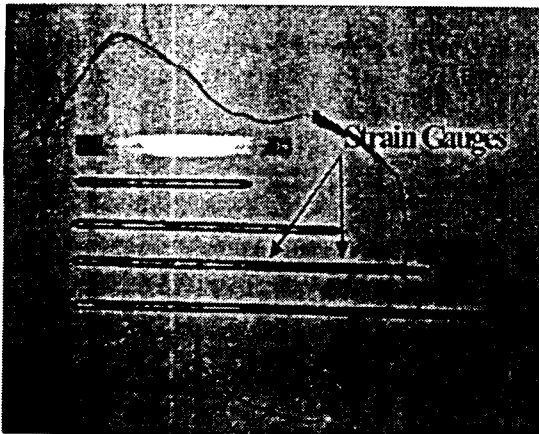


Photo 2. 모형 말뚝기초

모형실험에 앞서, 말뚝 휨 모멘트-변형을 관계에 대한 검증은 모형 말뚝기초의 두부를 고정하여 선단 부분에 하중을 500g 씩 증가시켜 4kg 까지 가해 모형말뚝의 외부 7 개 지점에 5%의 변형까지 측정할 수 있는 변형 게이지(strain gau-ge; KFG-5-120-C1-11 의 일본 KYOWA 사 제품)를 부착하여 수행하였다. 그리고 얻어진 휨 모멘트(M)와 변형율(ϵ)의 관계에서 상관계수를 결정하여, 수평하중을 재하 하였을때 발생하는 지반내 말뚝 변형율 값으로부터 말뚝의 휨 모멘트를 산정한다. 수평하중이 가해질때 게이지의 양면부착에서 얻은 변형값에 의한 축력이 수평거동에 대한 축력의 영향을 무시할 정도로 상당히 적게 발생함에 따라 말뚝의 한 면에 부착하여 모멘트의 변화를 측정하였다.

2.3 지반성형 및 실험 Setting

사실토 지반의 성형방법에는 모래의 낙하방법에 따라 mass spreader 법과 traveling spreader 법이 있으나, 외

Table 1. 낙동강(대구 화원지구) 모래의 물리적 특성치.

G_s	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}
2.675	0.265	0.14	2.0	1.23	1.19	0.88

Table 2. 모형실험에 사용하는 모형기초의 제원

직경 (cm)	두께 (mm)	근입길이 (cm)	탄성계수 (kg/cm^2)	항 복 휨모멘트 ($kg*cm$)	휨강성 ($kg*cm^2$)
1.2	0.25	21	$2.1*10^6$	70.0	34,090

Table 3. 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계

유출 구멍 직경 (mm)	낙하고 (cm)	단위중량 (g/cm^3)	내 부 마찰각($^\circ$)	상대밀도 (%)
8.0	125	1.40	40	90.0
18.0	125	1.34	35	61.8
25.0	125	1.28	27	32.8

부 공기흐름의 영향을 최소화할 수 있다면 모래지반의 높은 균질성을 얻을 수 있는 traveling spreader 법으로 지반을 성형하는 동안 외부공기의 유입을 차단하며 지반을 성형하였다. 성형한 모래지반의 상대밀도는 모래지반을 성형하기 전에 수차례에 걸쳐 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 반복실험하여 구하였다. 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 요약하면 Table 3 과 같다. Broms (1964)는 강성 말뚝기초와 휨성 말뚝기초의 구분기준으로 무차원 길이계수(ηL)로 제안하고 있으며, ηL 가 2.0 이하인 경우 강성 말뚝기초로 그리고 ηL 가 4.0 이상인 경우는 휨성 말뚝기초로 구분하고 있다. Broms의 기준을 근거로 본 연구에 사용한 말뚝의 휨강성을 구분하면 Table 4 와 같다.

본 모형실험에서의 지반조건은 비균질 지반조건이며, 이를 위하여 성형지반을 2개층으로 나누어 성형 하였다. 2개층 지반에서 말뚝의 근입깊이(L)에 대한 하부층의 지반두께(H) 비(H/L)를 5가지로 달리 하였으며 (Fig. 1), 하부층 (E_{h2})에 대한 상부

층(E_{h1})의 지반반력 계수비(E_{h1}/E_{h2})를 2가지($E_{h1}/E_{h2}=0.18, 5.56$)로 달리하여 모형실험을 수행 하였다.

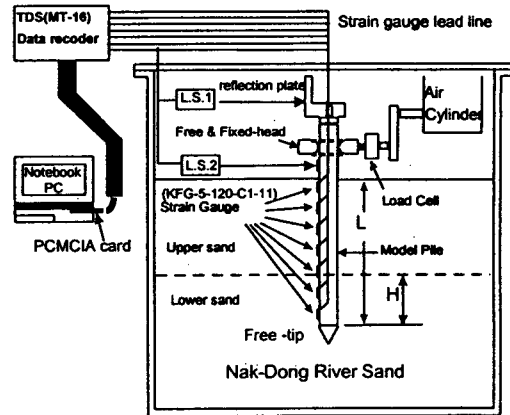


Fig. 1. 실험에 필요한 장치들의 배치 및 setting 장면

Table 4. 본 연구에서 사용한 말뚝의 무차원 길이계수, ηL (Broms, 1964)

Pile	Dia. (mm)	Pile thickness (mm)	Embedded length (cm)	ηL			Flexural stiffness ($10^{-3} \text{ t}\cdot\text{m}^2$)
				$D_r=32.8\%$	61.8%	90%	
I	12.0	0.25	21	1.84	1.99	2.80	3.41

$\eta = \sqrt[5]{n_h/EI}$; $E = 2.14 \times 10^7 \text{ t/m}^2$; $I =$ 말뚝기초의 단면 2차 모멘트

$n_h =$ 지반반력상수 ($=E_p/D = n_{uz} z^n/D$ at $z=D$), 즉 1,442/ m^3 ($D_r=90\%$), 260/ m^3 ($D_r=61.8\%$); 김영수의 3인(1998b)

3. 모형실험 결과 및 분석

본 연구에서의 모형실험들은 경북대학교 지반연구실에서 수행 하였으며, 모형실험들의 결과는 단일 강성말뚝의 수평거동 특성(수평하중-변위관계, 휨모멘트-깊이관계, 수평변위-최대 휨모멘트관계)과 각 인자들이 말뚝기초의 수평변위와 최대 휨모멘트에 미치는 영향분석으로 나누어서 고찰하였다.

3.1 수평거동 특성 분석

3.1.1 수평하중 - 변위 관계

말뚝기초에 대한 모형실험에서 중요한 부분인 수평하중(Q) - 변위(y)관계는 Fig. 2 와 같으며, 본 그림은 모든 모형실험들의 하중(Q) - 변위(y)관계에 대한 H/L 과 E_{h1}/E_{h2} , 그리고 말뚝 두부의 구속조건의 영향에 대하여 도시한 것이다. Fig. 2-(a), (b)는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반내 하부지반의 두께가 증가함에 따른 말뚝두부 자유조건과 고정조건의 수평하중 - 변위관계를 각각 나타낸 것으로서, 그림에서와 같이 두부 자유조건인 경우, 상부와 하부지반의 상대밀도가 동일한 균질지반($H/L=0.0$, $D_r=61.8\%$)에서 하부지반($D_r=90\%$)의 두께(H)가 증가함에 따른 지반강성의 증가로 인하여 동일 수평하중에 지표면의 수평변위는 감소하나, 하부지반이 말뚝 근입깊이의 75%인 지반($H/L=0.75$)에서는 $H/L=1.0$ 의 지반에 아주 근접하게 나타났다. 그러나, 두부 고정조건인 경우, 하부지반의 두께가 증가함에 따라 하중 - 변위관계는 지반강성이 클수록 직선적이며 동일 수평하중에서의 변위 감소는 두부 자유조건인 경우와는 달리 다소 규칙적인 변화를 보이고 있다. 그리고, 4kg의 수평하중에서 하부층에 해당하는 균질지반($H/L=0.0$)에 대한 비균질 지반($H/L=0.25-0.75$)에 의한 수평변위 감소는 1 - 48%(free-head)와 45 - 64%(fixed-head)로 나타났다.

Fig. 2-(c), (d)는 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반내 상부지반의 두께가 증가함에 따른 말뚝두부 자유조건과 고정조건의 수평하중 - 변위관계를 각각 나타낸 것으로서, 균질지반($H/L=1.0$, $D_r=61.8\%$)에서 상부지반($D_r=90\%$)의 두께가 증가함에 따라 상부층에 해당하는 균질지반($H/L=0.0$, $D_r=90\%$)의 하중 - 변위곡선에 근접하고 있으며 두부 자유조건인 경우 $H/L=0.25$ 와 0.5인 지반의 Q - y 곡선이 지반의 항복으로 인한 1차 굴절 이후에도 $H/L=0.0$ 인 지반의 Q - y 곡선에 더 근접하나 $H/L=0.75$ 의 Q - y 곡선은 1차 굴절 후 $H/L=1.0$ 의 지반에 더 근접하였다. 그리고, 하부층에 해당하는 균질지반($H/L=1.0$)에 대한 비균질 지반($H/L=0.25-0.75$)에 의한 수평변위 감소는 34 - 48%(free-head)와 44 - 68%(fixed-head)로 나타났다. 이는

E_{h1}/E_{h2} 가 1.0 이상이며 두부 고정조건인 비균질 지반에서의 변위 감소효과가 크며, 강성말뚝의 경우, 두부 고정조건에서 변위감소에 대한 E_{h1}/E_{h2} 의 영향은 거의 없는 결과를 보여주는 것이다. 특히, E_{h1}/E_{h2} 가 1.0 이상인 비균질 지반에서 상부층의 두께가 말뚝 근입길이(L)의 25% - 50%일 경우의 변위감소가 아주 크게 발생하여 두부 자유조건에서는 상부층의 두께가 변위감소에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

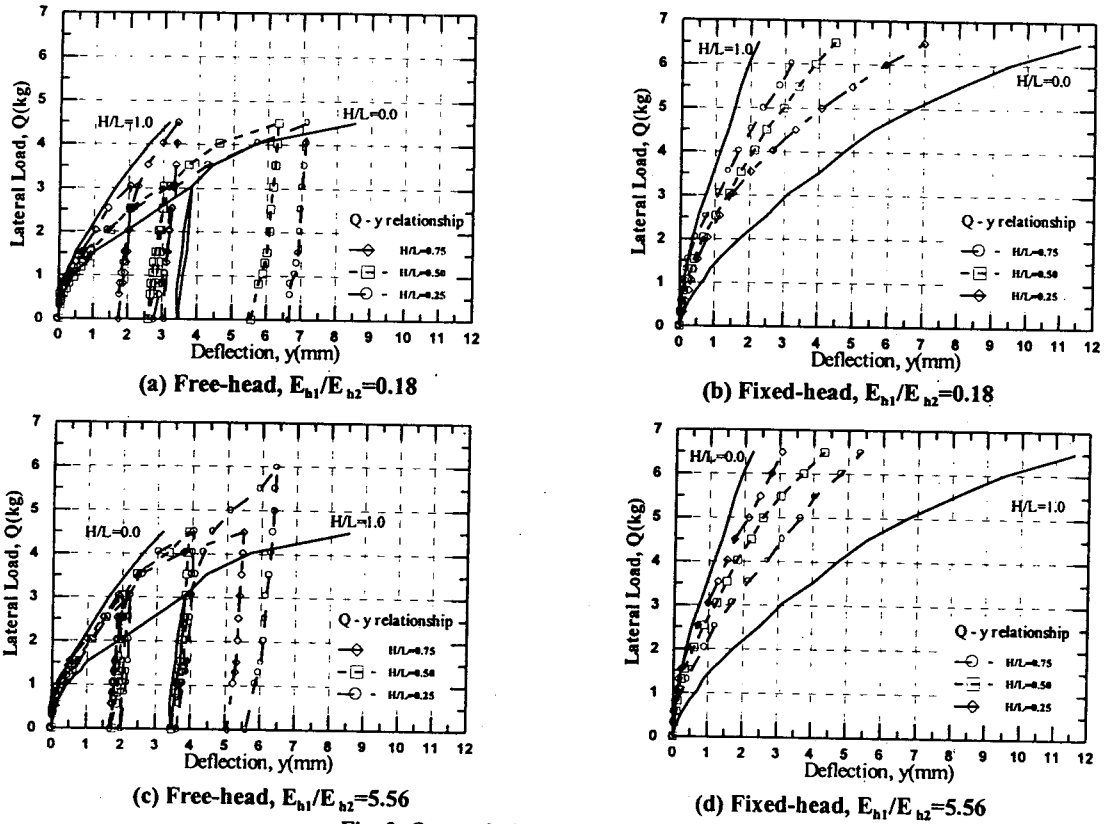


Fig. 2. Q - y relationship for model tests

3.1.2 말뚝내 휨모멘트 - 깊이 관계

지반내 말뚝기초 표면에 부착한 변형 게이지로부터 얻어진 휨모멘트의 분포도는 말뚝두부의 구속조건과 E_{h1}/E_{h2} 에 따라 상당히 다른 양상을 보여주고 있다. Fig. 3은 휨모멘트(M) - 깊이(z) 관계에 대한 H/L과 E_{h1}/E_{h2} , 그리고 말뚝 두부의 구속조건의 영향을 4kg의 수평하중에 대하여 도시한 것이다. Fig. 3-(a), (b)와 (c), (d)에는 각각 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56인 지반의 H/L과 말뚝두부 구속영향을 나타내었다. 강성말뚝에 가해지는 수평하중에 의한 지반내 최대 휨모멘트의 발생깊이는 말뚝 두부 구속성, H/L 그리고 E_{h1}/E_{h2} 에 무관하게 지표면에서 말뚝 근입길이의 43% 되는 깊이로 나타났다. 이는 휨성말뚝의 경우 수평하중의 증가에 의하여 지반 파괴활동의 진행성으로 인하여 발생깊이가 하향으로 이동하나, 강성말뚝에서는 말뚝 전길이에 걸친 지반반력이 작용하여 진행성 파괴가 발생하지 않고 있음을 보여주는 결과이다.

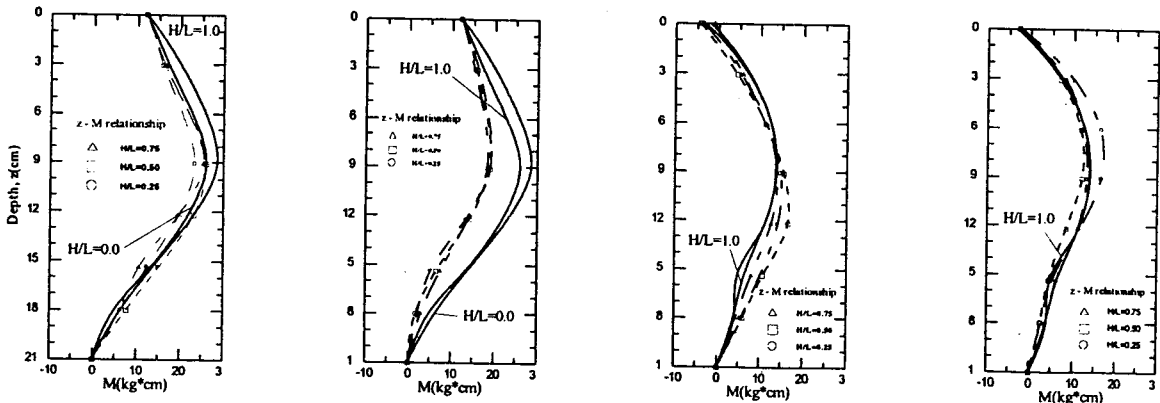


Fig. 3. M - z relationship for model tests

말뚝두부가 자유조건인 경우, 비균질 지반의 M - z 곡선이 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반에서는 하부층 상대밀도에 해당하는 균질지반 그리고 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반에서는 상부층 상대밀도에 해당하는 균질지반에 더 근접하였다. 특히, 말뚝두부가 자유조건이고 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반에서 비균질성의 효과가 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 균질지반에서 상대밀도가 증가하더라도 두부가 고정조건인 경우 최대 휨모멘트의 차가 거의 없게 나타났다. 4kg의 수평하중에서 말뚝두부 구속에 의한 최대 휨모멘트의 감소정도는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56 인 지반에 대하여 각각 35 - 39% 그리고 12 - 33%의 범위로 나타났다. 또한 비균질 지반의 지반반력 계수비(E_{h1}/E_{h2})의 증가에 의한 휨모멘트의 감소정도는 두부 자유 및 고정조건 각각에 대하여 22 - 31% 그리고 25% 감소 - 6% 증가의 범위로 나타났다.

3.1.3 수평하중 - 최대 휨모멘트 관계

말뚝기초에 수평하중이 가해지는 경우 말뚝의 안정성을 평가하기 위하여는 말뚝기초의 구조적 위험요소인 휨모멘트가 필수적이라 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 모형실험에서 측정한 최대 휨모멘트와 수평변위 관계를 분석하였다. 모든 모형실험들의 최대 휨모멘트(MBM) - 변위(y)관계에 대한 H/L 과 E_{h1}/E_{h2} , 그리고 말뚝 두부의 구속조건에 대하여 Fig. 4 에 도시하였다.

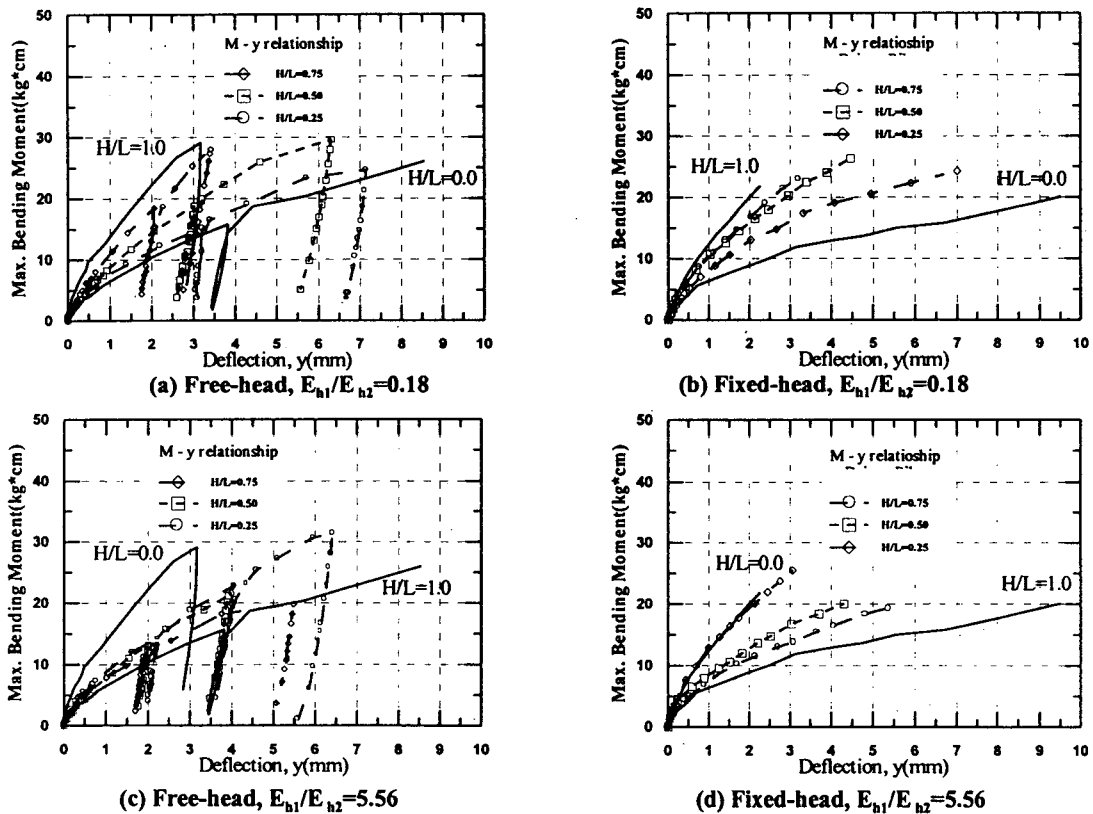


Fig. 4. MBM - y relationship for model tests

Fig. 4-(a), (b)는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반내 하부지반의 두께가 증가함에 따른 말뚝두부 자유조건과 고정조건에 대한 MBM - y 관계를 각각 나타낸 것으로서, 그림에서와 같이 균질지반($H/L=0.0$, $Dr=61.8\%$)에서 하부지반($Dr=90\%$)의 두께(H)가 증가함에 따른 지반강성의 증가로 인하여 동일 수평변위에서의 지반내 최대 휨모멘트는 규칙적으로 증가하고 있으며 말뚝 두부 구속이 고정조건 일수록 MBM - y 곡선이 수평변위 증가에 대하여 완만하게 나타났다.

Fig. 4-(c), (d)는 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반내 상부지반의 두께가 증가함에 따른 말뚝두부 자유조건과 고정조건에 대한 MBM - y 관계를 각각 나타낸 것으로서, 그림에서와 같이 균질지반($H/L=0.0$, $Dr=90\%$)에서 상부지반($Dr=90\%$)의 두께가 감소함에 따른 지반강성의 감소로 인하여 동일 수평변위에서의 지반내 최대 휨모멘트는 감소하고 있으나, 두부 자유조건인 경우에는 상부층의 두께가 말뚝 근입길이의 75%인 $H/L=0.75$ 지반에서도 $H/L=1.0$ 지반의 MBM - y 곡선에 근접하며 수평변위의 증가에 대한 최대 휨모멘트의 증가양상이 $H/L=1.0$ 지반의 MBM - y 곡선보다 크게 나타났다.

3.2 각 인자들이 수평거동에 미치는 영향

2 개층으로 이루어진 비균질 지반에서 수평하중을 받는 말뚝기초에 있어 중요한 요소인 수평변위와

지반내 말뚝기초에서 발생하는 최대 휨모멘트에 대한 말뚝두부의 구속조건, E_{h1}/E_{h2} , 그리고 H/L 의 영향들을 고찰하기 위하여 수평변위와 최대 휨모멘트를 정규화($y_{HL}/y_{HL=1.0}$, $y_{HL}/y_{HL=0}$, $y_{fix-head}/y_{free-head}$, $MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$, $MBM_{H/L}/MBM_{H/L=0}$, $MBM_{H/L}/MBM_{H/L=1.0}$) 하여 도시하였다.

3.2.1 수평변위에 대하여

Fig. 5와 6는 각각 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 과 0.18 이며 말뚝두부가 고정 및 자유조건인 경우의 H/L 과 말뚝두부의 구속성이 수평변위에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 수평하중의 증가에 따라 말뚝두부의 고정으로 인한 수평변위의 감소비($y_{fix-head}/y_{free-head}$)는 E_{h1}/E_{h2} 에 따라 각각 $0.5(0.18$ 일때)와 $0.6(5.56$ 일때)으로 나타나 휨성말뚝에서의 결과와 거의 비슷하게 나타났다 (Fig.5-a, 6-a). 2개층 비균질($H/L=0.25 - 0.75$) 지반에서 지반 강성이 큰 하부층 또는 상부층 두께의 증가에 따른 수평변위 감소는 2개층중 지반 강성이 약한 층에 해당하는 균질지반의 수평변위에 대하여, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우 ($y_{HL}/y_{HL=0}$), $30 - 54\%$ (free-head) 그리고 $48 - 70\%$ (fixed-head) 나타났으며, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반의 경우 ($y_{HL}/y_{HL=1.0}$), $50 - 59\%$ (free-head) 그리고 $50 - 73\%$ (fixed-head)로 나타났다(Fig.5-b, 6-b). 그리고 H/L 의 증가에 따른 수평변위의 감소성($y_{fix-head}/y_{free-head}$)은 $1-4kg$ 의 수평하중 범위내에서 도시 (Fig.5-c, 6-c) 하였으며, 평균 수평변위 감소는, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우, $50 - 54\%$ 그리고, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반의 경우, $20 - 56\%$ 로 각각 나타났다.

김영수의 1인(1999)에 의하면, 휨성말뚝의 경우 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반에서 하부층 두께가 말뚝 근입길이의 $75\%(0.75L)$ 까지는 수평변위 감소비($y_{fix-head}/y_{free-head}$)가 거의 일정하나 하부층 두께가 $0.75L$ 이상에서는 변위감소가 크게 나타나는 것으로 밝혔다. 그러나, 강성말뚝에는 휨성말뚝의 결과와는 달리 변위감소가 하부층 두께가 zero에서 $0.25L$ 사이에서 12% 증가하였으나 $0.25L$ 이상에서는 변위 감소비가 서서히 감소하여 나타났다. 이는 강성말뚝의 경우 휨성말뚝과는 달리 말뚝선단부의 구속효과가 상대적으로 적어서 지반의 상대밀도가 낮을 경우에는 말뚝두부 고정으로 인한 수평변위 감소가 적게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구에서는 하부지반이 구속효과가 큰 상대밀도로 이루어질 경우 변위감소가 크게 일어나며, 수평변위 감소변화에 대한 하부층 두께의 한계가 약 $0.25 - 0.5L$ 정도임을 알 수 있다.

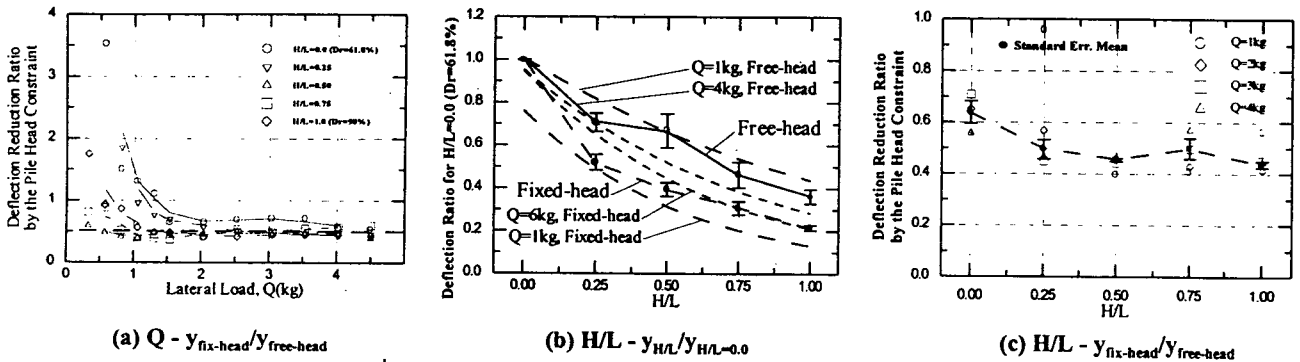


Fig. 5. Effect of pile head constraint and H/L on deflection for the case of $E_{h1}/E_{h2}=0.18$

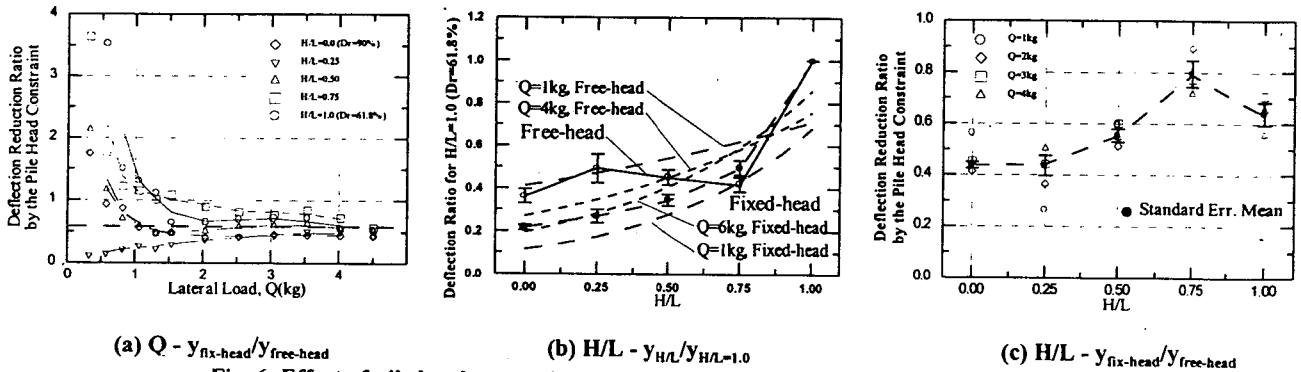


Fig. 6. Effect of pile head constraint and H/L on deflection for the case of $E_{h1}/E_{h2}=5.56$

김영수의 1인(1999)에 의하면, 휨성말뚝의 경우 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반에서 상부 또는 하부층의 두께가 근입말뚝 길이의 50% 이상을 차지하는 비균질 지반에서의 수평변위는 하부층($H/L=0.75$) 증가에 의한 감소보다 상부층($H/L=0.25$) 증가에 의한 감소가 크며 상부층 두께에 의한 영향이 크다는 사실을 보여주는 결과로부터 밝혔다. 강성말뚝에서도 휨성말뚝의 결과와 같이 2개층 중 지반강성이 큰 층의 두께가 말뚝 근입길이의 75% 이상을 차지할 경우의 변위 감소가 커서 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반에서는 상부층 두께에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 최대 휨모멘트에 대하여

Fig. 7 과 8 는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56 이고 말뚝두부가 고정 및 자유조건인 경우의 H/L 과 말뚝두부의 구속성이 최대 휨모멘트에 미치는 영향들을 나타낸 것이다. 수평하중의 증가에 따라 말뚝두부의 고정으로 인한 최대 휨모멘트의 감소비($MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$)는 E_{h1}/E_{h2} 에 따라 각각 0.55(0.18 일때)와 0.7(5.56 일때)로 수렴하여 나타나 휨성말뚝에서의 결과보다 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우에서 15% 더 작게 나타났으며 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반의 경우에는 거의 비슷하게 나타났다 (Fig.7-a, 8-a). 2 개층 비균질($H/L=0.25 - 0.75$) 지반에서 지반 강성이 큰 하부층 또는 상부층 두께의 증가에 따른 최대 휨모멘트비는 2 개층중 지반 강성이 약한 층에 해당하는 균질지반의 최대 휨모멘트에 대하여, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우 ($y_{HL}/y_{HL=0}$), 0.61 - 0.99(free-head) 그리고 0.92 - 1.07(fixed-head)로 나타났다(Fig.7-b, 8-b). 그리고 H/L 의 증가에 따른 최대 휨모멘트의 감소성($MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$)은 1-4kg 의 수평하중 범위내에서 도시 (Fig.7-c, 8-c) 하였으며, 평균 최대 휨모멘트 감소는, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우, 30 - 44% 그리고, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반의 경우, 12 - 29%로 각각 나타났다. 이와 같이, 지반내 말뚝에서 발생하는 최대 휨모멘트 측면에서는 E_{h1}/E_{h2} 이 말뚝두부 고정에 의한 최대 휨모멘트 감소에 대하여 영향을 많이 미치는 것으로 나타났으며 하부 또는 상부층 두께의 증가에 따른 최대 휨모멘트의 변화는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 의 지반보다 5.56 인 지반에서 크게 나타났다. 또한 하부층 두께의 증가에 따른 말뚝 심부의 지반강성이 증가하여 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 의 지반에서 $MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$ 값이 감소하며 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 의 지반에서는 반대의 현상으로서 상부층 두께의 증가에 따라 $MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$ 값이 증가하였다.

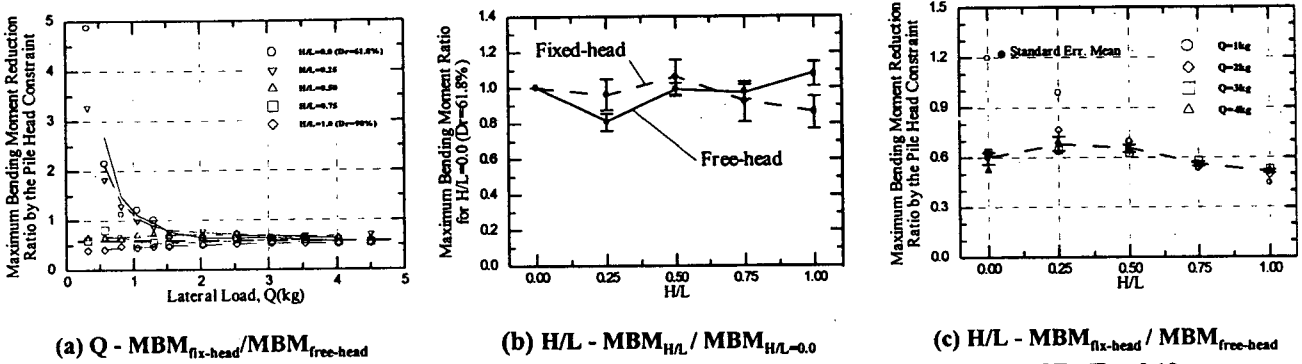


Fig. 7. Effect of pile head constraint and H/L on maximum bending moment for the case of $E_{h1}/E_{h2}=0.18$

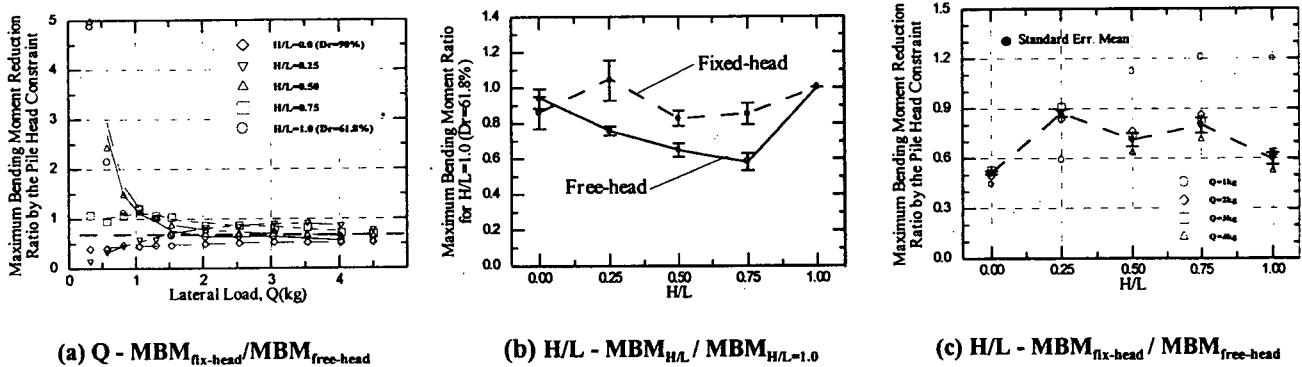


Fig. 8. Effect of pile head constraint and H/L on maximum bending moment for the case of $E_{h1}/E_{h2}=5.56$

4. 결론

본 연구에서는 말뚝의 수평거동에 대한 H/L 과 상부 및 하부층 지반반력비 그리고 말뚝두부 구속성의 영향을 알기 위하여 다양한 조건하에 모형실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 2 개층의 비균질 지반에서 말뚝의 수평거동 특성은 하부층에 대한 상부층의 지반반력 계수비(E_{h1}/E_{h2})에 따라 다른 양상을 보여주고 있다. 특히, E_{h1}/E_{h2} 가 1.0 이상이고 말뚝두부 고정조건에서 수평변위 감소에 대하여 지반강성이 큰 층의 두께가 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서 적용한 인자들에 무관하게 강성말뚝에서의 최대 휨모멘트 발생깊이는 지표면에서 말뚝 근입길이의 약 43%로 나타났다. 그리고, E_{h1}/E_{h2} 가 1.0 이상에서는 말뚝두부 구속에 의한 최대 휨모멘트의 감소정도가 작게 나타났다.

2. 수평변위 측면에서, 말뚝두부의 고정으로 인한 수평변위의 감소비($y_{\text{fix-head}}/y_{\text{free-head}}$)는 E_{h1}/E_{h2} 에 따라 각각 0.5(0.18 일때)와 0.6(5.56 일때)으로 나타났으며, 본 연구에서 하부지반이 구속효과가 큰 상대밀도로 이루어질 경우 변위감소가 크게 일어나며, 수평변위 감소변화에 대한 하부층 두께의 한계가 약 0.25 - 0.5L 정도임을 알 수 있다.
3. 최대 휨모멘트 측면에서, 말뚝두부의 고정으로 인한 최대 휨모멘트의 감소비($y_{\text{fix-head}}/y_{\text{free-head}}$)는 E_{h1}/E_{h2} 에 따라 각각 0.55(0.18 일때)와 0.7(5.56 일때)로 수렴하였다. E_{h1}/E_{h2} 이 말뚝두부 고정에 의한 최대 휨모멘트 감소에 대하여 영향을 많이 미치는 것으로 나타났으며 하부 또는 상부층 두께의 증가에 따른 최대 휨모멘트의 변화는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 의 지반보다 5.56인 지반에서 크게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 김영수·김병탁·방인호·이상용 (1996), 수평하중에 의한 강관말뚝에 관한 연구, 95035, *포항종합제철 연구보고서*.
2. 김영수·서인식·김병탁 (1996), “원심모형실험에 의한 강관말뚝의 수평거동 연구”, *한국지반공학회*, 제 12 권, 제 6 호, pp.5~20.
3. 김영수·김병탁·허노영·정성관 (1997), “강관말뚝의 수평거동에 대한 모형실험 연구; 대구지역 낙동강 모래에 대하여”, *한국지반공학회*, 제 13 권, 제 5 호, pp.59~74.
4. 김영수·김병탁 (1998a), “균질지반과 비균질 지반에서 강관 모형말뚝의 수평거동 특성에 관한 모형실험”, *한국지반공학회*, 제 14 권, 제 6 호, pp.153~166.
5. 김영수·김병탁 (1999), “원심모형실험에 의한 사질토 지반의 p-y 곡선에 관한 연구”, *대한토목공학회*, 제 19 권, 제 III-1 호, pp.105-115.
6. 김영수·김병탁 (1999), “비균질 사질토 지반에서 단일 휨성말뚝의 수평거동에 대한 말뚝 두부 구속효과 연구”, *한국지반공학회*, 게재예정.
7. Briaud, J.L. (1997), “Simple Approach for Lateral Loads on Piles; SALLOP”, *J. of Geotech. and Geoenvironmental Engrg., ASCE*, Vol. 123, No. 10, pp.958~964.
8. Broms, B.B. (1964), “Lateral resistance of pile in cohesionless soils”, *J. of Soil Mech. and Foun. Engrg., ASCE*, Vol.90, SM.3, pp.123~156.
9. Kim, Y.S., Seo, I.S., Kim, B.T., and Heo, N.Y. (1998b), “Behavior and Analysis of Laterally Loaded Model Pile in Nak-dong River Fine Sand”, *J. of KGS*, Vol.14, No.3, pp.25~46.
10. Kim, Y.S., Seo, I.S., Kim, B.T., and Lee, S.W. (1998c), “Model tests and Analysis of Laterally loaded piles in Sand”, *7th Int. Conf. of Offshore Mechanics and Artic Engrg. (OMAE '98)*, Lysbon, Portugal.
11. Kim, B.T., Kim, Y.S., Seo, I.S., and Lee, S.W. (1998d), “Effect of Pile Head Condition on Lateral Behavior in Layered Sand”, *2nd Int. Conf. on Ground Improvement Techniques*, Singapore.