

비균질 사질토 지반에서 단일 휨성말뚝의 수평거동에 대한 말뚝 두부 구속효과 연구

Effect of Pile Head Constraint on Lateral Behavior of Single Flexible Pile in Non-homogeneous Sand

김 병 탁^{*1}
Kim, Byung-Tak

김 영 수^{*2}
Kim, Young-Su

정 성 관^{*3}
Jung, Sung-Kwan

Abstract

This paper shows the results of a series of model tests on the behavior of single flexible pile, which is subjected to lateral load, in non-homogeneous Nak-Dong River sands, consisting of two layers. The purpose of the present paper is to investigate the effects of ratio of lower layer thickness to embedded pile length, ratio of soil modulus of upper layer to lower one, 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.

Based on the results of model tests, in non-homogeneous sand, it was found that the lateral behavior depends upon the ratio of soil modulus of upper layer to lower one. And, in respect of deflection, it was found that the relationship between the deflection ratio of non-homogeneous to homogeneous sand and the ratio of lower layer thickness to embedded pile length can be fitted to exponential function of H/L and lateral load by model tests results. Also, in respect of maximum bending moment, it was found that the relationship H/L and $MBM_{\text{fixed-head}} / MBM_{\text{free-head}}$ can be fitted to linear function of H/L by model test results.

요 지

본 논문은 2개 층으로 이루어진 비균질 낙동강 사질토 지반에서 수평하중을 받은 단일 휨성말뚝의 수평거동에 대한 모형실험 결과들을 고찰하였다. 본 연구의 목적은 말뚝의 수평거동 특성에 대한 말뚝두부 구속조건(Free & Fix), 말뚝 근입길이에 대한 하부지반의 두께비(H/L), 그리고 상하부지반의 지반반력계수비

*1 정회원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*2 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*3 정회원, 경북대학교 농과대학 조경학과 교수

(E_{h1}/E_{h2})의 영향에 관하여 실험적인 연구를 수행하고 이러한 영향들을 정량화 할 수 있는 실험결과를 얻었다.

모형실험 결과들에 의하면, 비균질 지반에서 수평거동은 E_{h1}/E_{h2} 에도 의존하는 것으로 나타났다. 수평변위 측면에서의 균질지반에 대한 비균질 지반의 수평변위비($y_{HL}/y_{HL=0}$, $y_{HL}/y_{HL=1.0}$)와 말뚝 근입길이에 대한 하부지반의 두께비(H/L)의 관계는 지수 함수식으로 표현되는 실험식을 제안하였다. 또한, 본 연구에서는 최대 휨모멘트 측면에서의 H/L과 $MBM_{fixed-head}/MBM_{free-head}$ 관계는 모형실험 결과들로부터 직선함수의 실험식을 제안하였다.

Keywords : Laterally loaded pile, Non-homogeneous, Fix head, Model test, Two layers

1. 서 론

수평하중에 지지하는 말뚝에 있어 중요한 것은 정확한 수평변위의 예측과 말뚝의 항복 휨모멘트에 대한 지반내 말뚝의 최대 휨모멘트의 구조적 안전성 확보라고 할 수 있다. 수평하중을 받는 말뚝의 수평거동은 말뚝의 휨강성(EI), 말뚝 직경(D), 그리고 지반의 지반반력계수($E_h = k_h D$)를 변수로 하는 상대강성계수(K_r)에 의하여 큰 영향을 받는다 (Meyerhof와 Sastry, 1995).

균질 또는 비균질 지반에서 수평하중과 경사하중을 받는 말뚝들의 수평거동에 관한 연구는 Brinch Hansen (1961), Broms (1964), Meyerhof와 Ranjan (1972), Meyerhof와 Sastry (1985), Poulos와 Davis (1980), Sastry 등 (1986), Meyerhof와 Sastry (1995), 김영수 (1996, 1997, 1998) 등에 의하여 지금도 계속 수행되고 있다.

Yalcin와 Meyerhof (1994)는 사질토 위 점성토가 놓인 지반에 매입된 수직말뚝에 편심하중과 경사하중이 가해질 경우의 하중-변위 관계를 연구하였다. Meyerhof와 Sastry (1995)는 2개층 점성토 지반에 매입된 말뚝의 수평거동 특성에 대하여 연구하였다. 그러나, 기존의 연구들이 임의 깊이에 2개층지반에서 상부와 하부층의 두께와 상부와 하부층의 지반 강성비를 변수로 포함하고 있지

는 못하였다.

이에 본 논문에서는 낙동강 유역의 모래를 이용하여 말뚝의 수평거동에 미치는 2개층의 비균질 지반에서의 말뚝 근입길이에 대한 하부지반 두께의 비(H/L), 말뚝두부의 구속조건 그리고 하부지반 지반반력계수(E_{h2})에 대한 상부지반 지반반력계수(E_{h1})의 비(E_{h1}/E_{h2})의 영향을 모형실험으로서 정량적으로 분석하였으며 비균질 지반에서의 수평거동 특성을 규명하였다. 그리고, 실험결과로부터 말뚝두부 구속에 따른 수평변위의 감소비를 각 비균질지반에 대하여 H/L 변수를 포함하는 실험식으로 얻었다. 비균질 지반의 지반반력계수비(E_{h1}/E_{h2})의 산정은 낙동강 모래의 각 상대밀도에 대하여 결정된 말뚝직경(D) 깊이의 지반반력계수($E_h = n_{hi}z^n$)를 이용하였다 (김영수 등, 1998a).

2. 모형실험

모형실험에서의 말뚝과 주변지반과의 관계는 지반 성형 이전에 말뚝을 수직상태로 유지하여 지반을 성형함으로써 주변지반과의 접촉을 100% 허용하는 방법을 사용하였다 (김영수 등, 1998a).

2.1 지반성형 시료

모형실험에서 사용한 낙동강 유역의 모래에 대

한 물리적 특성치는 표 1과 같다. 본 연구에서 사용한 낙동강 모래와 모형말뚝의 내적크기 효과(internal scale effect)는 무시할 수 있다 (Peterson, 1988 ; 김영수 등, 1998a).

표 1. 낙동강(대구지역 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

2. 2 모형말뚝

모형실험에서의 모형 말뚝은 표 2와 같이 스테인레스 재질을 사용하였다. 모형실험에 앞서 모형말뚝의 표면에 부착한 변형 게이지에 대한 휨 모멘트(M)와 변형률(ϵ)의 상관계수는 모형말뚝에 부착된 변형 게이지가 상부로 놓이도록 두부를 고정 한 후 선단부에 하중을 500g씩 증가하여 4kg까지 가해 측정된 변형률과 변형 게이지 각 위치에서의 휨 모멘트값을 가지고 휨응력($\sigma=My/I=E\epsilon$)을 이용하여 결정하였으며, 변형 게이지가 하부로 놓이도록 두부를 고정한 경우에도 상관계수를 결정하였으나 계수값이 아주 미소한 차이를 보였다.

2. 3 지반성형 및 실험 Setting

본 연구에서의 사질토 지반의 성형방법은 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 이용하는 공중낙하법을 사용하였다. 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 요약하면 표 3과 같다. 공중낙하법에 의하

표 2. 모형실험에 사용한 모형말뚝의 제원

직경(cm)	두께(mm)	근입길이(cm)	탄성계수(kg/cm ²)	항복 휨모멘트(kg×cm)	휨강성(kg×cm ²)
1.2	0.25	36	2.1×10^6	70.0	34,090

여 3층으로 나누어 조성한 지반의 상대밀도의 편차는 평균 $\pm 3\%$ 정도의 오차로 매우 균질하게 나타났다. 비균질 지반은 임의 깊이를 기준으로 2개 층의 상부와 하부의 상대밀도를 서로 달리 성형하기 위하여 먼저 하부층 상대밀도에 대하여 모래를 자유낙하 한 후, 다소 불규칙한 지반면을 진공기로 평탄하게 하고 다시 상부층의 상대밀도로 지반을 성형하였다.

이상과 같은 방법으로 성형한 지반에서 말뚝의 선단조건은 모두 자유조건이며, 두부조건은 자유

표 3. 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계

유출구멍 직경 (mm)	낙하고 (cm)	단위중량 (g/cm ³)	내부 마찰각(°)	상대 밀도 (%)
8.0	125	1.40	40	90.0
18.0	125	1.34	35	61.8
25.0	125	1.28	27	32.8

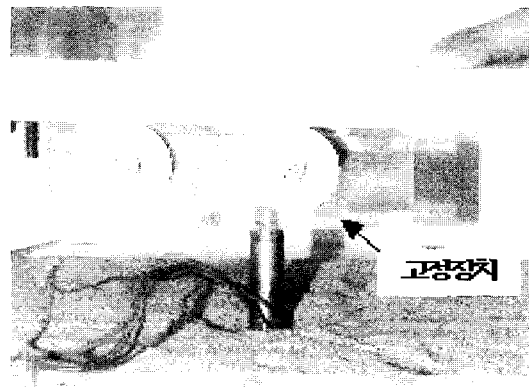


사진 1. 두부 고정장치

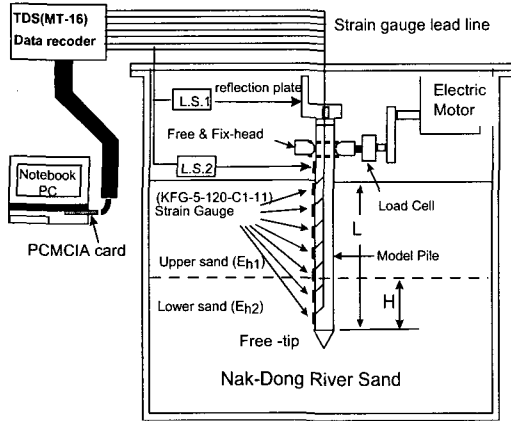


그림 1. 모형실험전 실험에 필요한 장치들의 배치 및 setting 장면

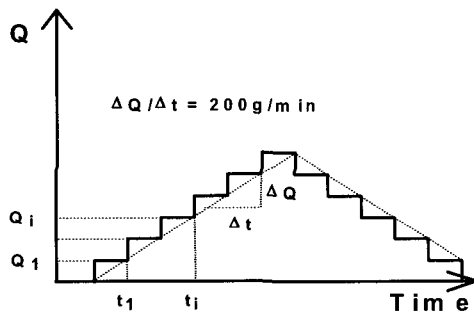


그림 2. 하중재하 방법

및 고정조건으로 모형실험을 수행하였으며, 두부 고정은 모형말뚝 두부가 회전하지 않은 조건이며 실험장치는 사진 1과 같다. 본 모형실험에서의 지반조건 및 모형말뚝조건은 표 4와 같다.

수평거동 실험을 하기 위하여 필요한 각종 장치 (하중 재하장치, load cell, 수평변위계 등)들에 대한 제원과 연결계통(그림 1)은 김영수의 1인(1998a)에서 상세히 설명하였다. 사질토 지반에서 하중 재하속도에 따른 전단강도의 변화는 거의 없는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 그림 2와 같이 각 하중단계의 하중 재하시간을 동일하게 유지하는 하중제어 방법으로 실험을 수행하였다.

Broms (1964), Chang(1937) 그리고 Poulos

표 4. 모형실험의 지반조건과 모형말뚝조건

Test	Pile head condition	H/L	Dr(%)		Remark
			Upper	Lower	
1	Free-head	0.0	61.8	61.8	Effect of H/L, pile head condition, E_{h1}/E_{h2}
2		0.25	61.8	90.0	
3		0.5			
4		0.75			
5		1.0	90.0	90.0	
6	Fixed-head	0.0	61.8	61.8	
7		0.25	61.8	90.0	
8		0.5			
9		0.75			
10		1.0	90.0	90.0	
11	Free-head	0.25	90	61.8	
12		0.5			
13		0.75			
14	Fixed-head	0.25			
15		0.5			
16		0.75			

(1971)는 강성 말뚝과 휨성 말뚝의 구분기준으로 각각 무차원 길이계수(ηL & βL)와 상대강성계수(K)로 제안하고 있으며, 이 기준들을 근거로 본 연구에 사용한 말뚝의 휨강성을 구분하면 표5와 같다. 구분기준에 의하면, $D_r=90\%$ 지반에서의 K & βL 값은 휨성말뚝의 기준을 완전히 만족하지는 못하고 있으나 각 기준들에 있어서 강성과 휨성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 휨성말뚝의 기준값에 더 근접하여 있다.

3. 모형실험결과 및 비교분석

말뚝에서 수평하중에 의한 거동의 메커니즘은 김영수의 1인(1998a)에서 상세히 설명하였다. 그리고 본 연구에서는 말뚝의 계속적인 사용을 위하여 말뚝의 휨모멘트가 항복 모멘트를 넘지 않은 상태까지 관찰하였으며, 모형실험들의 결과들을 임의 수평하중에 대하여 요약하면 표 6과 같다.

표 5. 본 연구에서 사용한 말뚝 구분 기준 (말뚝의 무차원 길이계수, ηL & βL , 상대 강성계수, K_r)

Diameter (mm)	Pile thickness (mm)	Embedded length(cm)	$D_r=32.8\%$	$\beta^{11}L, K_r^{21}, \eta^{31}L$ 61.8%	90%	Flexural stiffness ($10^3 t \times m^2$)
12.0	0.25	36	1.27 ¹¹ (R)	1.40 ¹¹ (R)	2.148 ¹¹ (? ⁴¹)	3.41
			0.015 ²¹ (R)	0.01 ²¹ (?)	0.002 ²¹ (?)	
			3.16 ³¹ (?)	3.41 ³¹ (?)	4.80 ³¹ (F ⁴)	

- 1) $\beta = \sqrt[4]{E_h/4EI}$ (Chang, 1937); E_h =말뚝 직경 깊이에서의 지반반력
- 2) $K_r = EI/E_h L^4$ (Poulos, 1971); L =말뚝 근입길이; E_h =말뚝선단부의 지반반력, 즉 82.60t/m²($D_r=90\%$), 20.31t/m²($D_r=61.8\%$)
- 3) $\eta = \sqrt[5]{n_h/EI}$; $E=2.14 \times 10^7 t/m^2$; I =말뚝의 단면 2차 모멘트
 n_h =지반반력상수(= $E_h/D=n_h z^5/D$ at $z=D$), 즉 1,442t/m³($D_r=90\%$), 260t/m³($D_r=61.8\%$)
- 4) F=휨성말뚝(flexible pile); ?=강성과 휨성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 엄밀하게는 휨성말뚝으로 보기 어려움

표 6. 모형실험 결과들의 요약

No	L/D	Pile head cond.	H/L	E_{h1}/E_{h2}	Q = 1kg 일때		Q = 4kg 일때		최대휨 모멘트 발생깊이, z/L
					수평변위비 y/D	모멘트비 M_{max}/M_y 주)	수평변위비 y/D	모멘트비 M_{max}/M_y 주)	
1	30	Free	0.0	1.0	0.041	0.114	0.278	0.512	0.29→0.43
2			0.25	0.18	0.035	0.087	0.258	0.475	0.29→0.43
3			0.50		0.021	0.075	0.229	0.450	0.29
4			0.75		0.017	0.09	0.153	0.499	0.29
5			1.0	1.0	0.018	0.08	0.138	0.383	0.14→0.29
6	30	Fix	0.0	1.0	0.017	0.039	0.165	0.307	0.43
7			0.25	0.18	0.011	0.035	0.144	0.264	0.43
8			0.50		0.011	0.047	0.117	0.305	0.29→0.43
9			0.75		0.005	0.033	0.096	0.299	0.29
10			1.0	1.0	0.002	0.022	0.078	0.223	0.29
11	30	Free	0.25	5.56	0.02	0.069	0.142	0.388	0.14→0.29
12			0.50		0.017	0.062	0.151	0.386	
13			0.75		0.026	0.093	0.164	0.421	
14	30	Fix	0.25	5.56	0.007	0.041	0.095	0.297	0.14→0.29
15			0.50		0.014	0.056	0.106	0.251	
16			0.75		0.017	0.054	0.108	0.236	

주) M_y = 말뚝의 항복 휨모멘트(70kg×cm)

본 연구에서 수행한 모형실험들의 결과는 단일 휨성말뚝의 수평거동 특성(수평하중-변위관계, 휨모멘트-깊이관계, 수평하중-최대 휨모멘트관계)과 각 영향인자들이 말뚝의 수평변위와 최대 휨모멘트에 미치는 영향분석으로 나누어서 고찰하였다.

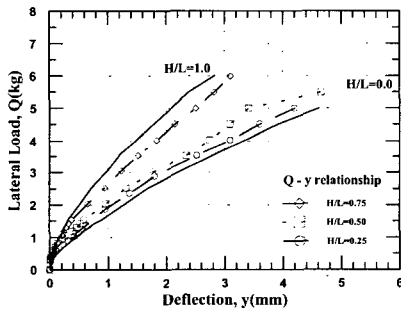
3.1 수평거동 특성 분석

3.1.1 수평하중-변위관계

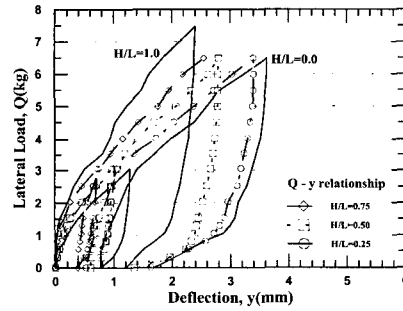
모형실험에서 하중계와 변위계에서 측정된 수평하중과 수평변위들을 정리하면 그림 3과 같다. 모든 모형실험에서는 Loading-Unloading의 하중 단계를 기본적으로 수행하였다. 그러나, 그림 3에

서는 복잡함을 피하기 위하여 Unloading부분을 도시하지 않은 경우도 있다.

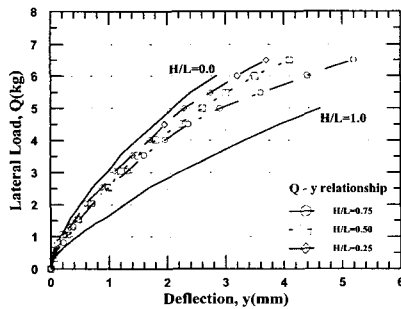
그림 3은 표 4에서 요약한 모든 실험들의 하중(Q) - 변위(y)관계에 대한 H/L과 E_{h1}/E_{h2} , 그리고 말뚝 두부의 구속조건의 영향에 관하여 도시한 것이다. 그림 3(a), (b)는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반내 하부지반의 높이가 증가함에 따른 말뚝 두부 자유조건과 고정조건에 대한 수평하중 - 변위관계를 각각 나타낸 것으로서, 그림에서와 같이 상부와 하부지반의 상대밀도가 동일한 균질지반(H/L=0.0, $D_r=61.8\%$)에서 하부지반의 두께(H)가 증가함에 따른 지반강성의 증가로 인하여 동일 수평하중에 대한 지표면에서의 수평변위는 감소하며 H/L=0.75에서의 수평변위는 상대밀도 90%



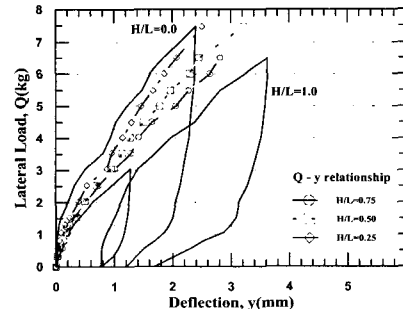
(a) 두부자유, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 조건



(b) 두부고정, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 조건



(c) 두부자유, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 조건



(d) 두부고정, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 조건

그림 3. Q - y 관계

균질지반의 깊에 접근함을 알 수 있다. 말뚝두부의 고정으로 인한 수평변위의 감소는 그림 3(a)와 (b)의 비교에서 명확히 관찰할 수가 있으며, 수평변위의 감소정도는 5kg의 수평하중에서 28% - 45%의 범위로 나타났다.

그림 3(c), (d)는 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반내 하부지반의 높이가 증가함에 따른 말뚝두부 자유조건과 고정조건 수평하중 - 변위관계를 각각 나타낸 것으로서, 그림에서와 같이 H의 증가에 따른 Q-y곡선의 이동은 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 경우와 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 경우가 상당히 달리 나타났다. $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 경우는 $H/L=0.75$ 의 Q-y곡선이 $H/L=0.0$ ($D_r=90\%$)의 곡선에 더 근접하여 나타났다. 이러한 현상은 말뚝두부가 자유조건인 경우가 더 뚜렷히 나타났다. 두부 고정으로 인한 수평변위의 감소정도는 5kg의 수평하중에서 29% - 34%의 범위로 나타났다.

비균질 지반($H/L=0.25 - 0.75$)에서 지반반력 계수비의 증가에 따른 수평변위의 감소는 $H/L=0.25$ 와 $H/L=0.5$ 지반에서, 말뚝두부 자유조건인 경우, 각각 24%과 48% 그리고, 고정조건인 경우, 각각 28%와 37%로 나타났다. 그러나, $H/L=0.75$ 지반의 경우 E_{h1}/E_{h2} 의 증가에도 불구하고 수평변위는 1.16(free-head) 그리고 1.206(fix-head)로 증가하

였다. 이는 휨성말뚝이 매입된 비균질 지반에서 수평변위는 상부층의 두께 및 지반반력 계수비에 의존하고 있음을 보여주는 결과이다.

이와 같이, 그림 3을 통하여 고찰한 휨성말뚝의 Q-y관계는 말뚝두부 구속조건보다 E_{h1}/E_{h2} 에 상당히 의존하고 있는 결과를 보여주고 있다. 또한, 말뚝두부가 고정인 경우가 자유인 경우보다 Q-y 관계가 더욱 직선적인 거동을 나타내며, 수평변위 측면에서는 E_{h1}/E_{h2} 가 1이상이고 $H/L=0.75$ 이하인 비균질 지반에서 수평변위 감소의 효과가 극대화 될 수 있을 것으로 판단된다.

3.12 휨모멘트-깊이 관계

지반내 말뚝에서 발생하는 휨모멘트의 측정을 위하여 말뚝 표면에 부착한 변형게이지의 변형률을 이용하여 앞서 2.2절에서 설명한 휨응력 관계식으로부터 얻어진 휨모멘트의 분포도는 말뚝두부의 구속조건에 따라 상당한 차이를 보여주고 있다.

그림 4는 휨모멘트(M) - 깊이(z) 관계에 대한 H/L 과 E_{h1}/E_{h2} , 그리고 말뚝 두부의 구속조건에 대한 영향을 4kg의 수평하중에 대하여 도시한 것이다. 그림 4(a), (b)와 (c), (d)에는 각각 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56인 비균질 지반의 H/L 과 말뚝두부 구속영향을 나타내었다. 말뚝의 두부 구속조건이 자유조

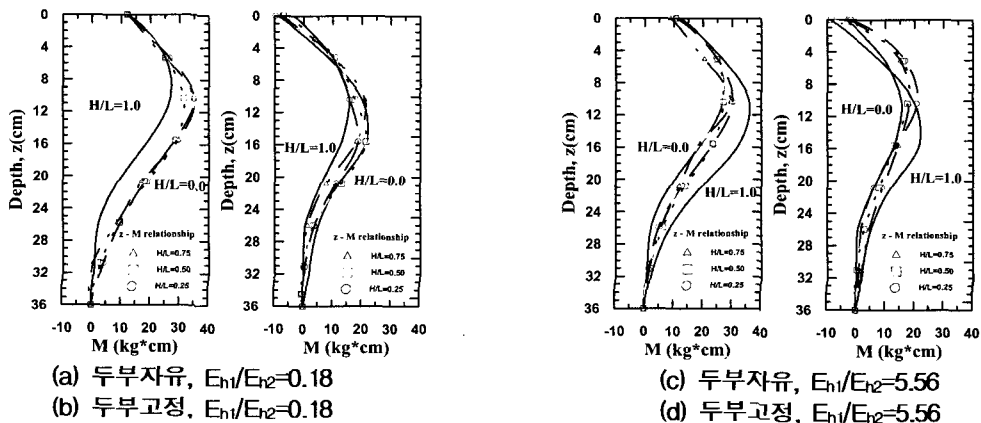


그림 4. M - z 관계

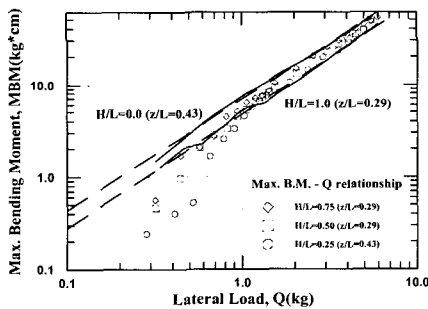
건인 경우, 깊이에 따른 휨모멘트 분포는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56 모두의 경우에 대하여 비균질 지반의 분포곡선이 상부층 상대밀도에 해당하는 균질지반의, 즉 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 의 경우 61.8% 상대밀도 지반과 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 의 경우 90% 상대밀도 지반, 분포곡선에 더 근접하게 나타났다. 이는 말뚝두부가 자유조건인 경우에는 휨모멘트 분포가 비균질 지반의 상부층 상대밀도에 의존하고 있음을 보여주는 결과이다.

말뚝 두부가 고정조건인 경우에는 말뚝두부에 정(positive)의 모멘트가 아닌 부(negative)의 모멘트가 작용하여 지표면에서 부 모멘트가 그림4(c), (d)에서와 같이 낮은 상대밀도($D_r=61.8\%$)에서는 동일 수평하중에서도 지표면에서의 큰 변위 발생으로 인하여 90% 상대밀도의 지표면 휨모멘트보다 큰 부 모멘트가 나타났다. 두부 고정조건인 경우의

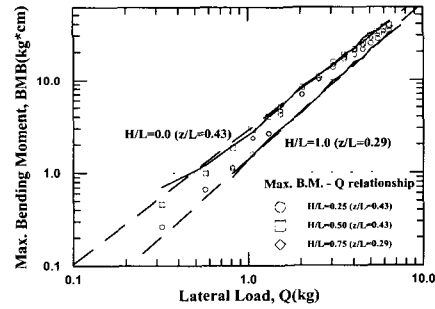
휨모멘트 분포곡선이 자유조건인 경우와는 달리 임의의 균질지반의 분포곡선에 편중되어 나타나지는 않았으며, H/L 의 증가에 따라 최대 휨모멘트는 규칙적으로 증가하여 나타나지는 않았다. 그러나, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 의 비균질 지반에서는 상부층의 높은 상대밀도로 인해 저항력이 증가하여 최대 휨모멘트 발생깊이가 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반보다 얕게 ($z/L=0.29$) 나타났다. 그러나, $z/L=0.14$ 깊이에서의 휨 모멘트값이 실험에서 다소 과대평가 되어 나타난 것 같다.

3.1.3 수평하중 - 최대 휨모멘트 관계

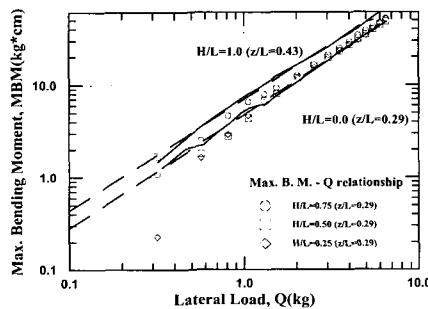
말뚝에 수평하중이 가해지는 경우 말뚝의 안정성을 평가하기 위하여는 말뚝의 구조적 위험요소인 휨모멘트가 필수적이라 할 수 있다. 본 연구에서는 실험에서 측정한 휨모멘트 중에서 최대값과



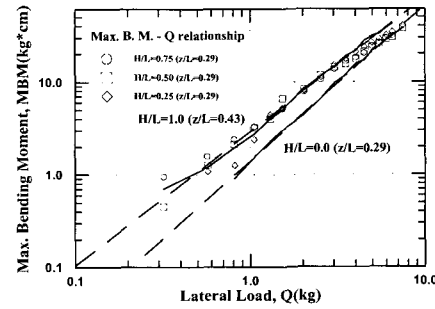
(a) 두부자유, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 조건



(b) 두부고정, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 조건



(c) 두부자유, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 조건



(d) 두부고정, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 조건

그림 5. Q - MBM 관계

수평하중의 관계를 분석하였다.

그림 5는 수평하중(Q)-최대 휨모멘트 (MBM) 관계에 대한 H/L과 E_{h1}/E_{h2} , 그리고 말뚝 두부의 구속조건의 영향에 대하여 도시한 것이다. 그림 5(a), (b)는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반에 대한 것으로서, 그림에서와 같이 상부와 하부지반의 상대밀도가 동일한 균질지반($H/L=1.0$, $D_r=90\%$)에서 하부지반의 두께(H)가 증가함에 따른 Q-MBM곡선의 형상은 변화 없이 규칙적인 증가 현상을 나타내었다. 이러한 현상은 말뚝두부의 구속성과 무관하게 나타났다.

그림 5(c), (d)에서 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$, 두부 자유조건의 비균질 지반에서 상부층의 두께가 0.25L까지, 즉 $H/L=0.75$, 감소하더라도 최대 휨모멘트는 $H/L=0.0$ 과 $H/L=1.0$ 의 중간정도 값으로 나타났으며 두부 고정조건에서의 Q-MBM곡선은 수평하중이 증가함에 따라 상부층 상대밀도($D_r=90\%$)의 균질지반의 곡선에 아주 근접하여 나타났다.

이는 Q-y관계에서 분석한 것과 같이, 지반내 최대 휨모멘트 또한 말뚝두부가 자유조건인 경우 E_{h1}/E_{h2} 에 상당히 의존하고 있는 결과를 보여주고 있다. 전반적으로, 본 실험에서 수행한 비균질 지반($H/L=0.25 - 0.75$)에서 1kg이상의 수평하중에 대한 최대 휨모멘트 값들이 각 층의 균질지반 ($H/L=0, 1.0$)의 최대 휨모멘트 값들 사이에서 나타났으며 상부층의 지반강성이 하부층보다 큰 비균질 지반($E_{h1}/E_{h2}=5.56$)에서는 수평하중 증가에 따라 최대 휨모멘트가 $H/L=0.0$ ($D_r=90\%$) 지반의 값에 아주 근접하여 나타났다.

Hsiung과 Chen(1997)에 의하면, Q - MBM관계를 $Q = aMBM^b$ 식으로 회귀분석하여 제안하고 있으며, 이때 지반반력계수는 깊이에 따라 일정하거나 직선적으로 증가한다고 가정하였다. 이에 본 모형실험에서의 Q-MBM관계를 회귀분석한 결과, 다른 함수식들보다 Hsiung과 Chen(1997)이 제안한 식과 같은 식 (1)의 함수식으로 회귀분석 되었다.

표 7. 상수 a와 b의 요약

E_{h1}/E_{h2}	H/L	a		b	
		Fix	Free	Fix	Free
0.18	0.25	1.76	4.70	1.67	1.27
	0.50	2.59	5.17	1.51	1.29
	0.75	1.99	5.81	1.64	1.30
1.0	61.8%	2.90	6.95	1.44	1.20
	90%	1.40	4.74	1.68	1.23
5.56	0.25	2.47	4.55	1.47	1.17
	0.50	2.78	4.58	1.35	1.27
	0.75	3.27	5.73	1.22	1.28

$$MBM = a Q^b \quad (1)$$

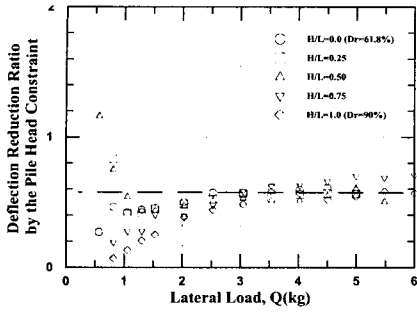
여기서, a와 b는 H/L에 따른 상수들이며 $R^2=0.95 - 0.99$ 로서 표 7에 요약되어 있다.

3. 2 각 영향인자들이 수평거동 특성에 미치는 영향

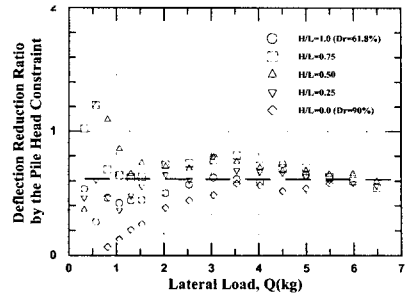
2개층으로 이루어진 비균질 지반에서 수평하중을 받는 말뚝에 있어 중요한 요소인 수평변위와 지반내 말뚝에서 발생하는 최대 휨모멘트에 대한 말뚝두부의 구속조건, E_{h1}/E_{h2} , 그리고 H/L의 영향들을 고찰하기 위하여 수평변위와 최대 휨모멘트를 정규화($y_{H/L}/y_{H/L=1.0}$, $y_{H/L}/y_{H/L=0}$, $y_{fix-head}/y_{free-head}$, $MBM_{fix-head} / MBM_{free-head}$, $MBM_{H/L} / MBM_{H/L=0}$, $MBM_{H/L} / MBM_{H/L=1.0}$)하여 도시하였다.

3.2.1 수평변위

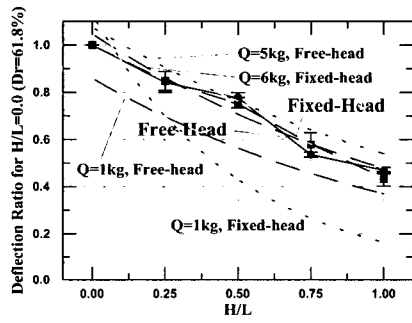
그림 6과 7은 각각 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56이며 말뚝두부가 고정 및 자유조건인 경우의 H/L과 말뚝두부의 구속성이 수평변위에 미치는 영향들을 나타낸 것이다. 말뚝두부의 고정으로 인한 수평변위의 감소비($y_{fix-head}/y_{free-head}$)는 E_{h1}/E_{h2} 에 무관하게 수평하중의 증가에 따라 증가한 후, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우 약 3.5kg의 수평하중 이상에서 거



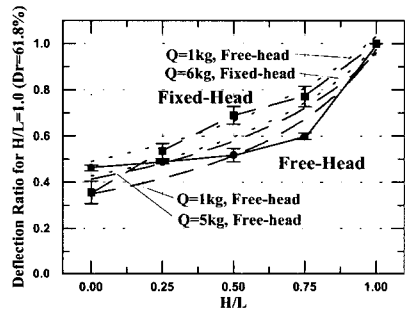
(a) $Q - y_{\text{fix-head}}/y_{\text{free-head}}$ 관계



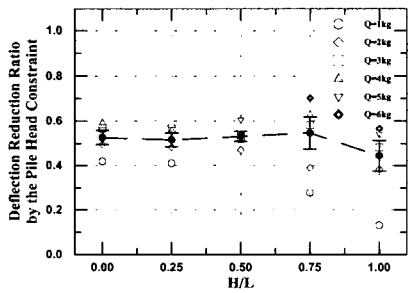
(a) $Q - y_{\text{fix-head}}/y_{\text{free-head}}$ 관계



(b) 두부고정과 자유조건에 대한 $H/L - y_{H/L}/y_{H/L=1.0}$ 관계

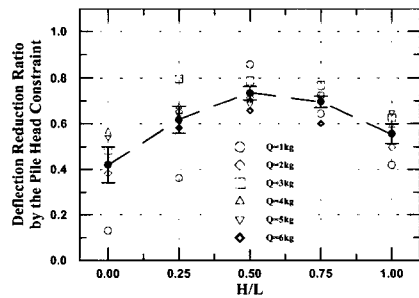


(b) 두부고정과 자유조건에 대한 $H/L - y_{H/L}/y_{H/L=1.0}$ 관계



(c) $H/L - y_{\text{fix-head}} / y_{\text{free-head}}$ 관계

그림 6. 수평변위에 대한 말뚝시공 방법과 H/L의 영향 ($E_1/E_2=0.18$)



(c) $H/L - y_{\text{fix-head}} / y_{\text{free-head}}$ 관계

그림 7. 수평변위에 대한 말뚝시공 방법과 H/L의 영향 ($E_1/E_2=5.56$)

표 8. 식(2)와 (3)의 상수들 요약

Q	$E_{h1}/E_{h2}=0.18$		$E_{h1}/E_{h2}=5.56$	
	Free	Fixed	Free	Fixed
1	$a_1^{1)}=0.933$ $b_1^{1)}=-1.041$	$a_1=1.000$ $b_1=-1.508$	$a_2^{2)}=-1.833$ $b_2^{2)}=2.860$	-
2	$a_1=0.980$ $b_1=-0.808$	$a_1=1.000$ $b_1=-1.054$	$a_2=-1.833$ $b_2=2.860$	$a_2=-1.071$ $b_2=2.039$
3	$a_1=1.000$ $b_1=-0.725$	$a_1=1.000$ $b_1=-0.817$	$a_2=-1.533$ $b_2=2.581$	$a_2=-1.180$ $b_2=2.186$
4	$a_1=1.050$ $b_1=-0.711$	$a_1=1.018$ $b_1=-0.738$	$a_2=-1.400$ $b_2=2.458$	$a_2=-1.088$ $b_2=2.110$
5	$a_1=1.036$ $b_1=-0.753$	$a_1=1.040$ $b_1=-0.649$	$a_2=-1.376$ $b_2=2.419$	$a_2=-1.453$ $b_2=2.465$
6	-	$a_1=1.047$ $b_1=-0.621$	-	$a_2=-1.334$ $b_2=2.345$

¹⁾ $a_1 = 1.0$ (free & fixed-head), $b_1 = -0.989Q^{-0.222}$ (free-head, $R^2= 0.82$), $b_1 = -1.486Q^{-0.507}$ (fixed-head, $R^2= 0.99$) 로 회귀분석 됨.

²⁾ $a_2 = -1.922Q^{-0.203}$ (free-head, $R^2= 0.84$), $b_2 = 2.940Q^{-0.117}$ (free-head, $R^2= 0.85$) 및 $a_2 = -0.897Q^{0.231}$ (fixed-head, $R^2= 0.74$), $b_2 = 1.836Q^{0.145}$ (fixed-head, $R^2= 0.70$) 로 회귀분석 됨.

의 일정하게 나타났으나(그림 6a), $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우 약 3.5kg의 수평하중 이상에서는 다소 감소하였다(그림 7a). 그러나 3.5kg의 수평하중 이상에서의 두부 고정으로 인한 변위의 감소비는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 지반의 경우 대략 0.58정도 그리고 $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 지반의 경우 대략 0.61정도 값으로 H/L에 관계없이 수렴하였다.

2개층($E_{h1}/E_{h2}=0.18$) 지반에서 지반 강성이 큰 하부층 두께의 증가에 따른 변위 감소($y_{HL}/y_{HL=0}$)는 그림 6(b)에 나타내고 있다. H/L=0.0에서 0.25까지는 두부 고정 및 자유조건 모두 수평변위가 약 15%정도 감소하였으며, H/L= 0.25에서 0.75까지 하부층 두께가 증가함에 따라 변위 감소는 거의 직선적인 증가를 보이며 약 29%정도 감소하였다. 말뚝두부의 구속조건과는 무관하게 하부층 두께의 증가에 따른 변위의 감소가 거의 비슷하게 나타나고 있다.

2개층($E_{h1}/E_{h2}=5.56$) 지반에서 지반 강성이 큰 상부층 두께의 증가에 따른 변위 감소($y_{HL}/y_{HL=1.0}$)는

그림 7(b)에 나타내고 있다. 두부 자유조건인 경우(그림 7b), H/L=1.0에서 0.75까지는 수평변위가 약 40%정도 크게 감소하나, H/L=0.75이하에서는 90% 상대밀도인 상부층의 두께가 증가하여도 수평변위비는 크게 감소하지 않았다. 이는 2개층 지반에서 지반 강성이 큰 상부층의 수평변위 감소역할이 H/L=0.75이상에서는 무의미하다는 사실을 알 수 있다. 두부 고정조건인 경우(그림 7b), 자유조건과는 다소 다른 양상을 보였다. 즉, H/L=1.0에서 0.75까지는 수평변위가 약 30%정도 크게 감소하며 또한 H/L=0.75에서 zero까지는 약 38%정도의 수평변위 감소를 나타냈다.

이는 말뚝두부 고정으로 인하여 말뚝의 수평변위를 억제하는 지반의 저항심도가 두부 자유조건인 경우보다 깊어짐으로서 발생하는 것이다. 따라서, Fixed-head 말뚝에서 지반 강성이 큰 상부층의 수평변위 감소역할이 상당히 기대된다고 할 수 있다.

그림 6(b)와 7(b)의 H/L - $y_{HL}/y_{HL=1.0}$ 와 H/L -

$y_{H/L}/y_{H/L=0.0}$ 관계들의 실험식을 도출하기 위하여 회귀분석을 수행한 결과 다음과 같이 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56인 지반의 실험식이 다르게 구하여졌다.

Free & Fixed-head, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$:

$$y_{H/L}/y_{H/L=0.0} = a_1 \exp (b_1 H/L) \quad (2)$$

Free & Fixed-head, $E_{h1}/E_{h2}=5.56$:

$$y_{H/L}/y_{H/L=1.0} = 1 / (a_2 H/L + b_2) \quad (3)$$

여기서, a_1, b_1, a_2, b_2 는 상수들이며 표 8와 같이 요약된다. 이들 상수는 모두 $R^2 = 0.92 - 0.99$ 로 나타났다.

H/L 의 증가에 따른 수평변위의 감소비($y_{fix-head}/y_{free-head}$)를 그림 6(c)와 7(c)에 도시하였다. 그림 6(c)에서는 2개층($E_{h1}/E_{h2}=0.18$) 지반에 대한 각 H/L 의 두부 구속에 따른 수평변위의 감소성을 1-6kg의 수평하중 범위내에서 도시한 것으로서, 수평변위 감소비는 비균질($H/L=0.25 - 0.75$) 지반에서 H/L 이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고는 있으나 증가정도가 아주 작게 나타났다. 하부층 두께가 말뚝 근입길이의 75%까지는 수평변위 감소비가 0.52 평균값으로 얻어졌으며 $H/L=0.75$ 와 1.0사이에서 변위감소가 14% 증가하였다.

그림 7(c)에서는 2개층($E_{h1}/E_{h2}=0.18$) 지반에 대한 각 H/L 의 두부 구속에 따른 수평변위의 감소성을 도시한 것으로서, $H/L=0.5$ 를 기준으로 H/L 이 증가하거나 감소하더라도 변위의 감소는 26%이상으로 나타났다. 즉, 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 크다는 것이며, 이는 상부층 두께에 의한 영향이 크다는 사실을 보여주는 결과이다. 또한, 비균질 지반($H/L = 0.25-0.75$)의 평균 $y_{fix-head}/y_{free-head}$ 값은 약 0.7로서 균질 지반의 $y_{fix-head}/y_{free-head}$ 보다 약

25% ($D_r = 61.8\%$), 67%($D_r=90\%$) 정도 작은 수평변위 감소를 나타내었다.

그림 6(c)와 7(c)의 $H/L - y_{fix-head}/y_{free-head}$ 관계들의 실험식을 도출하기 위하여 회귀분석을 수행한 결과 다른 함수식들보다 다음의 직선 함수로 $E_{h1}/E_{h2} = 0.18$ 과 5.56인 지반의 실험식이 구하여졌다.

$E_{h1}/E_{h2}=0.18$:

$$y_{fix-head}/y_{free-head} = 0.52 \quad 0 \leq H/L \leq 0.75$$

$$y_{fix-head}/y_{free-head} = -0.315H/L + 0.763 \quad H/L \geq 0.75 \quad (4)$$

$E_{h1}/E_{h2}=5.56$:

$$y_{fix-head}/y_{free-head} = 0.64H/L + 0.58 \quad 0 \leq H/L \leq 0.5$$

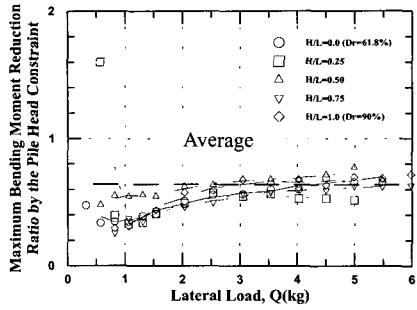
$$y_{fix-head}/y_{free-head} = -0.44H/L + 0.96 \quad H/L \geq 0.5 \quad (5)$$

여기서, 식(4)와 (5)는 모두 $R^2 = 0.92 - 0.95$ 로 구하여졌다.

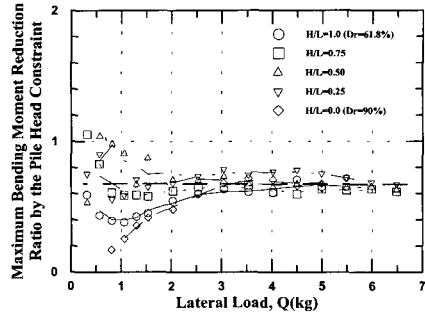
3.2.2 최대 휨모멘트

그림 8과 9는 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56이고 말뚝두부가 고정 및 자유조건인 경우의 H/L 과 말뚝두부의 구속성이 최대 휨모멘트에 미치는 영향들을 나타낸 것이다. $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56인 지반에서 말뚝두부의 고정으로 인한 최대 휨모멘트비($MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$)는 수평하중의 증가에 따라 증가 또는 감소하다가 3kg이상의 수평하중에서는 각각 약 0.65와 0.68정도 값으로 수렴하여 각각 35%와 32%의 최대 휨모멘트 감소를 가져왔다(그림 8a, 그림 9a).

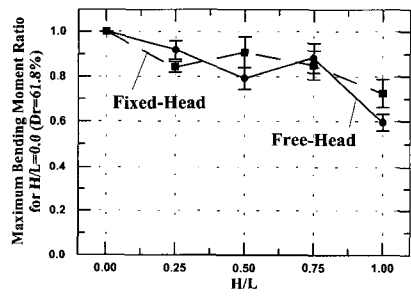
그림 8(b)와 그림 9(b)는 말뚝두부의 자유 및 고정조건에 대하여 각각 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56의 비균질 지반에서 하부층 또는 상부층 두께의 증가에 따른 최대 휨모멘트의 변화를 나타낸 것이다. 그림



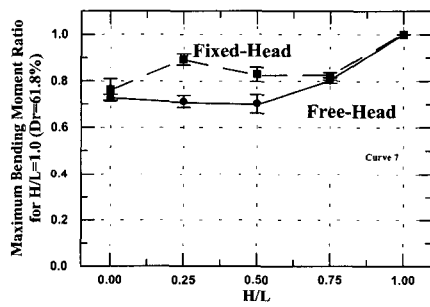
(a) $Q - MBM_{\text{fix-head}}/MBM_{\text{free-head}}$ 관계



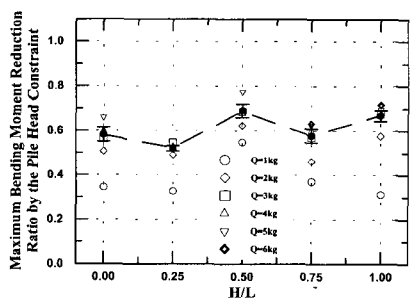
(a) $Q - MBM_{\text{fix-head}}/MBM_{\text{free-head}}$ 관계



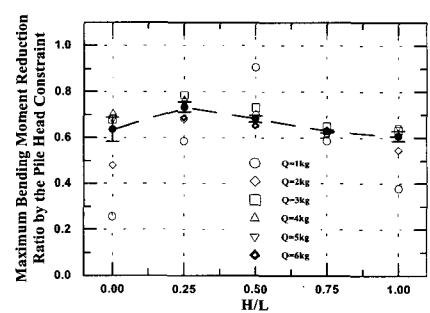
(b) 두부고정과 자유조건에 대한 $H/L - MBM_{H/L} / MBM_{H/L=1.0}$ 관계



(b) 두부고정과 자유조건에 대한 $H/L - MBM_{H/L} / MBM_{H/L=1.0}$ 관계



(c) $H/L - MBM_{\text{fix-head}} / MBM_{\text{free-head}}$ 관계



(c) $H/L - MBM_{\text{fix-head}} / MBM_{\text{free-head}}$ 관계

그림 8. 최대 휨모멘트에 대한 말뚝시공방법과 H/L 의 영향 ($E_{n1}/E_{n2}=0.18$)

그림 9. 최대 휨모멘트에 대한 말뚝시공방법과 H/L 의 영향 ($E_{n1}/E_{n2}=5.56$)

8(b)의 경우, H/L=0에서 0.25로 증가함에 따라 두부 자유 및 고정조건의 수평변위 감소비는 각각 0.91과 0.84이며, 비균질(H/L=0.25-0.75) 지반에서의 수평 변위 감소비는 0.84 - 0.91 (fixed-head), 0.8 - 0.91(free-head) 범위로 나타났다. 하부층 두께가 말뚝 근입길이의 75%이상에서 변위의 감소비가 27%(fixed-head), 40%(free-head) 정도로 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.

그림 9(b)의 경우, 두부 자유조건에서는 H/L=0.5 까지 그리고 고정조건에서는 H/L= 0.75까지 최대 휨모멘트가 각각 약 28% 그리고 18%정도 감소하였으나, 각 말뚝두부 구속조건의 그 H/L 값 이후에서는 거의 변화 없거나 조금 감소하였다. 이는 2개 층 지반에서 지반 강성이 큰 상부층의 최대 휨모멘트 감소역할이 말뚝두부 자유조건에서 고정조건보다 크게 작용한다는 것을 보여주는 결과이다.

그림 8(c)와 9(c)는 비균질 지반(H/L= 0.25 - 0.75)에서의 자유조건에 대한 고정조건의 최대 휨모멘트비의 변화를 각 실험하중들의 평균치로서 $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56인 지반에 대하여 각각 도시한 것이다. 외부의 수평하중에 대하여 비균질 지반내에서 발생하는 최대 휨모멘트 감소비 ($MBM_{fix-head} / MBM_{free-head}$)는 각각 하부층 및 상부층의 두께가 근입말뚝 길이의 25%일 경우가 가장 적게 나타났다. 또한, $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56의 비균질 지반(H/L=0.25-0.75)의 평균 $MBM_{fix-head} / MBM_{free-head}$ 값은 각각 약 0.54와 0.7로서 균질 지반의 $MBM_{fix-head} / MBM_{free-head}$ 보다 각각 11% ($D_r=90\%$), 15% ($D_r=61.8\%$) 정도 작은 그리고 18%($D_r=90\%$), 7% ($D_r=61.8\%$) 정도 큰 최대 휨모멘트 감소를 나타내었다.

그림 8(c)와 9(c)의 H/L - $MBM_{fix-head} / MBM_{free-head}$ 관계들의 실험식을 도출하기 위하여 회귀분석을 수행한 결과 다른 함수식들보다 다음의 직선 함수로 $E_{h1}/E_{h2}= 0.18$ 과 5.56인 지반의 실험식이 구하여졌다.

$E_{h1}/E_{h2}=0.18 :$

$$MBM_{fix-head} / MBM_{free-head} = \begin{cases} -0.244 H/L + 0.58 & 0 \leq H/L \leq 0.25 \\ 0.108H/L+0.492 & 0.25 \leq H/L \leq 0.75 \\ 0.388H/L+0.282 & H/L \geq 0.75 \end{cases} \quad (6)$$

$E_{h1}/E_{h2}=5.56 :$

$$MBM_{fix-head} / MBM_{free-head} = \begin{cases} 0.392H/L+0.248 & 0 \leq H/L \leq 0.25 \\ -0.171H/L+0.781 & H/L \geq 0.25 \end{cases} \quad (7)$$

여기서, 식(6)과 (7)은 모두 $R^2= 0.92 - 0.95$ 로 구하여졌다. 그리고, 그림 8(c)의 H/L= 0.5인 경우가 회귀분석 된 위의 식(6)과는 잘 일치되지 않았다.

4. 결 론

본 연구에서는 말뚝의 수평거동에 대한 H/L과 상부 및 하부층 지반반력비(E_{h1}/E_{h2}) 그리고 말뚝 두부 구속성(fixed & free)의 영향을 알기 위하여 지반조건, 말뚝재료 및 두부 구속조건의 한정된 조건하에 모형실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수평하중-수평변위 관계에서는 말뚝두부의 구속성 영향뿐만 아니라 비균질 지반의 E_{h1}/E_{h2} 비에도 의존하고 있는 것으로 나타났다. 특히, E_{h1}/E_{h2} 가 1이상이고 H/L= 0.75이하인 비균질 지반에서 수평변위의 감소가 다른 조건들보다 크게 나타났다.
- 2) 지반내 말뚝의 휨모멘트 분포도의 양상은 말뚝두부가 자유조건과 고정조건인 경우가 두부에서 부 모멘트가 작용함으로서 다르게 나타났다. 그리고 4kg의 수평하중이 작용할 경우 말뚝두부를 구속함에 따라 최대 휨모멘트는 자유조건인 경우보다 30 - 50% 정도의 감소효과를 보였다.

- 3) 본 연구에서는 모형실험한 결과들을 이용하여 수평하중 증가에 따른 최대 휨모멘트의 관계를 Hsiung & Chen(1997)에 제안한 식과 같이 표현되는 실험식을 제안하였다.
- 4) 수평변위 측면에서, 상부 또는 하부층의 두께가 증가함에 따른 수평 변위비의 관계를 본 연구에서는 식 (2)와 (3)과 같은 실험식을 제안하였다. 그리고, 말뚝두부 구조에 의한 수평변위의 감소비는 3.5kg의 수평하중 이상에서 0.58 ($E_{h1}/E_{h2} = 0.18$), 0.61 ($E_{h1}/E_{h2} = 5.56$)로 수렴하였다. H/L의 증가에 따른 수평변위의 감소비 ($y_{fix-head}/y_{free-head}$)는 E_{h1}/E_{h2} 가 1이하일 경우에 크게 나타났으며, 2개 층중에서 지반강성이 큰 지반에 말뚝이 75%이상 근입된 경우에 가장 크게 나타났다. 또한, 본 연구에서는 이들 $H/L - y_{fix-head}/y_{free-head}$ 관계에 대한 실험식을 다른 함수식들보다 직선 함수형태로 제안하였다.
- 5) 최대 휨모멘트 측면에서, 비균질 지반에서 하부 또는 상부층 두께의 증가에 따른 최대 휨모멘트는 다소 불규칙적으로 감소하여 회귀분석하기가 곤란하나, 전반적으로는 감소하여 나타났다. 지반내에서 발생하는 최대 휨모멘트에 대한 E_{h1}/E_{h2} 의 영향은 두부 자유조건에서 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이는 외부하중에 의한 지반의 응력이 지반상부 지표면 부근에 집중되고 고정조건과 달리 자유조건에서의 말뚝 부근의 토립자 이동이 상방향 대각선 이동이 용이함으로 인하여 나타나는 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 이들 $H/L - MBM_{fix-head}/MBM_{free-head}$ 관계에 대한 실험식을 직선 함수형태로 제안하였다.

참 고 문 헌

1. 김영수 · 김병탁 · 방인호 · 이상웅 (1996), 수평하중에 의한 강관말뚝에 관한 연구, 95035, 포항종합제철 연구보고서.
2. 김영수 · 서인식 · 김병탁 (1996), "원심모형실험에 의한 강관말뚝의 수평거동 연구", 한국지반공학회, 제12권, 제6호, pp.5~20.
3. 김영수 · 김병탁 · 허노영 · 정성관 (1997), "강관말뚝의 수평거동에 대한 모형실험 연구; 대구지역 낙동강 모래에 대하여", 한국지반공학회, 제13권, 제5호, pp.59~74.
4. 김영수 · 김병탁 (1998a), "균질지반과 비균질 지반에서 강관 모형말뚝의 수평거동 특성에 관한 모형실험", 한국지반공학회, 제14권, 제6호, pp.153~166.
5. Brinch, H.J. (1961), The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, Bulletin No. 12.
6. 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.
7. 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.
8. Hsiung, Y.M. and Chen, Y.L.(1997), "Simplified Method for Analyzing Laterally Loaded Single Piles in Clays", J. of Soil Mech. and Foun. Engrg., ASCE, Vol.123, NO.12, pp. 1018~1029.
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.
12. Meyerhof, G.G. and Ranjan, G. (1972), "The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand; Vertical piles", Canadian Geotech. J., Vol.9, pp.430~446.
13. Meyerhof, G.G. and Sastry, V.V.R.N. (1985), "Bearing Capacity of Rigid Piles under Eccentric and Inclined Loads", Canadian Geotech. J., Vol.22, pp.267~276.
14. Meyerhof, G.G. and Sastry, V.V.R.N. (1995), "Behaviour of Flexible Piles in Layered Clays under Eccentric and Inclined Loads", Canadian

- Geotech. J., Vol.32, pp.387~396.
15. Peterson, R.W. (1988), "Laboratory Investigation of the Penetration Resistance of Fine Cohesionless Materials", Proc. of 1st Int. Symp. on Penetration Testing, Orlando, pp.895~901.
16. Yalcin, A.S. and Meyerhof, G.G. (1994), "Displacements of Batter Piles in Layered Soil", ASCE, Geotechnical Special Pub., No. 40, Vol.2-1, pp.975~985.
17. Poulos, H.G. and Davies, E.H. (1980), Pile foundation analysis and design, John Wiley & Sons, New York.

(접수일자 1999. 2. 22)