

# 비균질 지반에서 향타 관입한 단일 강성말뚝의 수평거동 연구

## Lateral Behavior of Single Rigid Driven Pile in Non-Homogeneous Sand

김 영 수\*<sup>1</sup>  
Kim, Young-Su

김 병 탁\*<sup>2</sup>  
Kim, Byung-Tak

---

---

### Abstract

A series of model tests was performed to find the characteristics of lateral behavior of single rigid pile. This paper shows the results of model tests on the lateral behavior of single rigid driven pile in non-homogeneous(two layered) Nak-Dong River sands. The purpose of this paper is to investigate the effect of the ratio of lower layer thickness to embedded pile length, the coefficient ratio of the subgrade reaction and the pile construction conditions(driven & embedded piles) on the characteristics of lateral behavior of single pile. The results of model tests show that the lateral behavior in non-homogeneous soil depends upon drop energy considerably, that is, in the case of  $H/L=0.75$ , as the drop energy increases three times the decrease percentage increases about 2.12 times. In the driven pile with non-homogeneous soil of  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ , the effect of upper layer with large stiffness on the decrease of lateral deflection is remarkably smaller than embedded pile. In non-homogeneous soil, the maximum bending moment of driven pile is in the range of 100 - 132% in comparison with embedded pile. The reason is that the stiffness of soil around pile increases with drop vibration and so the pile behavior is similar to the flexible pile behavior by means of the increase of relative stiffness of pile. In this paper, the experimental equations for lateral load and  $H/L$  on  $y_D/y_E$  &  $MBM_D/MBM_E$  are suggested from model tests.

### 요 지

수평거동의 특성을 파악하기 위하여 일련의 연속된 모형실험을 수행하였다. 본 논문은 균질 및 비균질의 사질토 지반에서 향타 시공된 단일 강성말뚝의 수평거동에 대한 모형실험 결과들을 고찰하였다. 본 연구의

---

\*1 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

목적은 말뚝의 수평거동 특성에 대한 말뚝 시공상태(Driven & Embedded), 말뚝 근입깊이에 대한 하부지반의 두께비(H/L), 그리고 지반반력 계수비의 영향에 관하여 실험적인 연구를 수행하였다. 모형실험 결과들에 의하면, 수평거동은 비균질 지반에서 항타 에너지에 상당히 의존하고 있다. 즉, H/L=0.75의 경우 항타 에너지가 3배 증가에 의하여 매입말뚝에 대한 수평변위 감소율이 약 2.12배 정도 증가하였다.  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반에서 항타말뚝의 경우 수평변위의 감소에 대한 강성이 큰 상부층의 효과가 매입말뚝에 비하여 상당히 적게 작용하였다. 항타 진동으로 토립자의 재배열 현상으로 말뚝주변 지반 강성이 증가하고 이로 인하여 말뚝의 상대강성이 크게 증가하여 말뚝이 휨성말뚝과 비슷한 거동을 보였으며, 비균질 지반에서 항타 시공에 따른 최대 휨모멘트는 매입말뚝의 100 - 132%정도 크게 나타났다. 본 연구에서는  $y_D/y_E$  와  $MBM_D/MBM_E$ 에 대한 수평하중과 H/L의 영향들을 모형실험 결과들로부터 실험식으로 제안하였다.

**Keywords** : Laterally loaded pile, Non-homogeneous, Driven Pile, Two layers

## 1. 서 론

근래에 들어 말뚝을 항타 시공하는 과정에서 발생하는 지반진동과 소음 등 건설공해로 인하여 항타공법의 적용이 크게 위축되고는 있으나, 항타공법은 지금까지 개발된 다른 어떤 공법들보다도 가장 확실한 지지력을 확보할 수 있으며 시공관리가 용이하고 경제성 또한 가장 우수한 장점을 갖고 있는 바, 아직도 국내 말뚝 시공의 상당부분을 차지하고 있다.

수평하중에 지지하는 말뚝에 있어 중요한 것은 정확한 수평변위의 예측과 말뚝의 항복 휨모멘트에 대한 구조적 안전성 확보라고 할 수 있다. 균질 또는 비균질 지반에서 수평하중과 경사하중을 받는 말뚝들의 수평거동에 관한 연구는 Brinch Hansen(1961), Broms(1964), Meyerhof and Ranjan(1972), Meyerhof and Sastry(1985), Poulos and Davis(1980), Sastry et al. (1986), Meyerhof and Sastry(1995), 김영수 외(1996, 1997, 1998, 1999) 등에 의하여 지금도 계속 수행되고 있으며, Yalcin and Meyerhof (1994)는 사질토 위 점성토가 놓인 지반에 매입된 수직말뚝에 편심하중과 경사하중이 가해질 경

우의 하중-변위 관계를 연구하였다. Meyerhof and Sastry(1995)는 2개층 점성토 지반에 매입된 말뚝의 수평거동 특성에 대하여 연구하였다. 최근, 일본에서는 항타말뚝의 수평거동 연구를 활발히 수행하고 있으며, 연구자들 중에서 中西외 3인(1994)은 50kg×cm의 항타 에너지로 관입된 알루미늄 말뚝의 하중-변위관계에 대하여 연구하였다. 그의 연구결과에 의하면, 항타 시공으로 인한 말뚝두부의 수평변위는 매입말뚝의 70%정도였다. 그러나, 기존의 국내 연구들은 항타말뚝의 수직거동에 대해서만 수행하였고 비균질 지반 및 항타 에너지에 따른 거동 특성변화 정도에 관한 연구는 미흡한 실정이며 수평거동에 대한 다양한 영향인자들의 명확한 이해 및 고려가 되고 있지 못한 실정이다.

이에 본 논문에서는 낙동강 유역의 모래를 이용한 비균질 지반에서 항타말뚝의 수평거동에 미치는 말뚝 근입깊이에 대한 하부지반 두께의 비(H/L), 항타 에너지, 그리고 지반 반력계수비( $E_{h1}/E_{h2}$ )의 영향을 모형실험으로서 정량적으로 분석하고 그 특성을 규명하였다. 그리고, 항타말뚝의 수평거동은 매입말뚝의 결과와 비교분석하였으며 실험결과로부터 비균질 지반에서 시공시

매입말뚝에 대한 항타말뚝의 수평변위 및 최대 휨 모멘트 비를 수평하중 또는 H/L 변수로 하는 실험식으로 얻었다.

## 2. 모형실험

모형실험에서의 말뚝의 시공상태는 지반 성형 이전에 말뚝을 수직상태로 유지하여 지반을 성형함으로써 주변지반과의 접촉을 100% 허용하는 방법인 매입말뚝과 하중 램을 직접 말뚝두부에 항타하는 방법(김영수·김병탁, 1999)인 항타말뚝을 사용하였다. 항타말뚝에서 수평거동 특성에 영향을 미치는 항타에너지는 1kg의 햄머로 3가지 항타고(DH)에 대하여 5, 10, 15kg×cm의 항타에너지로 모형실험을 수행하였다.

### 2. 1 지반성형 시료

모형실험에서 사용한 낙동강 유역의 모래에 대한 물리적 특성치는 표 1과 같다. 본 연구에서 사용한 낙동강 모래와 모형말뚝의 내적크기 효과(internal scale effect)는 무시할 수 있다(Peterson, 1988; 김영수의 1인, 1998a).

표 1. 낙동강 모래의 물성치

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

\*) 최소간극비는 자유낙하법으로 그리고 최대 간극비는 진동법에 의하여 결정

### 2. 2 모형말뚝

모형실험에서의 모형 말뚝은 표 2와 같은 스테인레스 재질의 강관을 사용하였다. 모형실험에 앞선 모형 말뚝에 대한 검증과 모형말뚝의 표면에 부착한 변형 게이지에 대한 휨 모멘트(M)와 변형률( $\epsilon$ )의 상관계수( $\alpha$ ,  $M=EI \epsilon/y = \alpha \epsilon$ ) 결정

은 김영수의 1인(1998a, 1999)에서 상세히 설명하였다.

표 2. 모형 말뚝 제원

직경(cm)	두께(mm)	근입길이(cm)	탄성계수(E, kg/cm <sup>2</sup> )	항복 휨모멘트(kg*cm)	강성(EI, kg*cm <sup>2</sup> )
1.2	0.25	21	$2.1 \times 10^6$	70.0	34,090

### 2. 3 지반성형 및 실험 Setting

본 연구에서의 사질토 지반의 성형방법은 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 이용하는 공중낙하법을 사용하였다. 균질지반과 비균질지반의 성형방법에 대한 설명은 김영수의 1인(1998a)에서 상세히 설명하였다.

낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 요약하면 표 3과 같다. 항타말뚝의 설치는 소요지반고까지 공중 낙하법으로 성형한 지반위에 항타장치(김영수의 1인, 1999)를 설치하고 햄머를 수직상승시켜 낙하하는 드롭햄머 방식으로 수행하였다. 본 연구에서는 항타시 말뚝의 수직상태를 유지하였으며 항타횟수와 각 항타에 대한 침하를 측정하였다. 성형한 지반에서 말뚝의 선단 및 두부조건은 모두 자유조건으로 모형실험을 수행하였으며, 본 모형실험에서의 지반조건 및 모형말뚝조건은 표 4와 같다. 사질토 지반에서 하중 재하속도에 따른 선단강도의 변화는 거의 없는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서는 각 하중단계의 하중 재하시간(200g/min)을 동일하게 유지하는 하중제어 방법으로 실험을 수행하였다.

표 3. 낙하높이와 유출구의 관계

유출구멍 직경(mm)	낙하고(cm)	단위중량(g/cm <sup>3</sup> )	내부 마찰각(°)	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

표 4. 모형실험의 조건

Test	Pile Construction condition	H/L	Dr(%)		Remark
			Upper	Lower	
1	Driven(DH=5), $E_{h1}/E_{h2}^* = 0.18$	0.0	61.8	61.8	Effect of H/L, $E_{h1}/E_{h2}$ , DH
		0.25 - 0.75	61.8	90.0	
		1.0	90.0	90.0	
2	Driven(DH=15), $E_{h1}/E_{h2}=0.18$	0.0	61.8	61.8	
		0.25 - 0.75	61.8	90.0	
		1.0	90.0	90.0	
3	Embedded(DH=0), $E_{h1}/E_{h2}=0.18$	0.0	61.8	61.8	
		0.25 - 0.75	61.8	90.0	
		1.0	90.0	90.0	
4	Driven(DH=5), $E_{h1}/E_{h2}=5.56$	0.0	90.0	90.0	
		0.25 - 0.75	90.0	61.8	
		1.0	61.8	61.8	
5	Driven(DH=15), $E_{h1}/E_{h2}=5.56$	0.0	90.0	90.0	
		0.25 - 0.75	90.0	61.8	
		1.0	61.8	61.8	
6	Embedded(DH=0), $E_{h1}/E_{h2}= 5.56$	0.0	90.0	90.0	
		0.25 - 0.75	90.0	61.8	
		1.0	61.8	61.8	
7	Embedded	0.5	61.8	90.0	
	Driven(DH=5,10,15), $E_{h1}/E_{h2}= 0.18$				

\* 하부층에 대한 상부층의 지반반력 계수비 (Kim et al., 1998b)

표 5. 말뚝 구분 기준(무차원 길이계수,  $\beta L$  &  $\eta L$ , 상대 강성계수,  $K_r$ )

Diameter (mm)	Pile thickness (mm)	Embedded length(cm)	$\beta^1 L, K_r^2, \eta^3 L$			Flexural stiffness ( $10^{-3} t \times m^2$ )
			$D_r=32.8\%$	61.8%	90%	
120	0.25	21	0.74 <sup>1)</sup> (R <sup>4)</sup> )	0.82 <sup>1)</sup> (R)	1.25 <sup>1)</sup> (R)	3.41
			0.18 <sup>3)</sup> (R)	0.12 <sup>3)</sup> (R)	0.03 <sup>3)</sup> (? <sup>4)</sup> )	
			1.84 <sup>3)</sup> (R)	1.99 <sup>3)</sup> (R)	2.80 <sup>3)</sup> (?)	

1)  $\beta = \sqrt[4]{(E_p/4EI)}$  (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  $62.65t/m^2(D_r=90\%)$ ,  $14.67t/m^2(D_r=61.8\%)$

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

$n_h$  =지반반력상수(= $E_p/D=n_h z^n/D$  at  $z=D$ ), 즉  $1,442t/m^3(D_r =90\%)$ ,  $260t/m^3(D_r =61.8\%)$ ; 김영수의 3인(1998a, 1999)

4) R = 강성말뚝 (rigid pile); ? = 강성과 휨성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 엄밀하게는 강성말뚝으로 보기 어려움

수평거동 실험을 하기 위하여 필요한 각종 장치들에 대한 제원과 연결계통(그림 1)은 김영수의 1인(1998a)에서 상세히 설명하였다. Broms (1964), Chang(1937) 그리고 Poulos(1971)

는 강성 말뚝과 휨성 말뚝의 구분기준으로 각각 무차원 길이계수( $\beta L$  &  $\eta L$ )와 상대강성계수( $K_r$ )로 제안하고 있으며, 이 기준들을 근거로 본 연구에 사용한 말뚝의 휨강성을 구분하면 표 5와 같다.

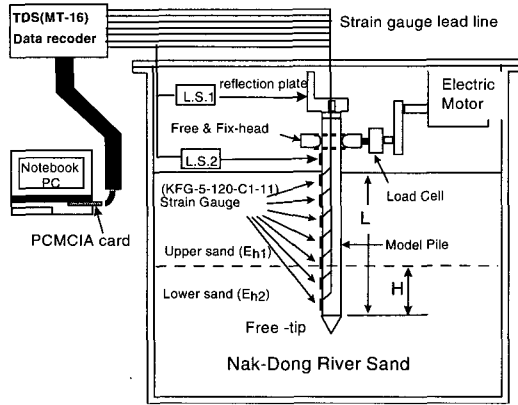


그림 1. 모형실험 장치도

구분기준에 의하면,  $D_r=90\%$  지반에서의  $K_r$  &  $\eta$  L 값은 강성말뚝의 기준을 완전히 만족하지는 못하고 있으나 각 기준들에 있어서 강성과 휨성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 강성말뚝의 기준값에 더 근접하여 있다.

### 3. 모형실험 결과 및 비교분석

말뚝의 수평 지지력 확보측면에서 매입말뚝보다 유리한 항타말뚝의 경우, 항타 에너지의 증가에 따른 말뚝주변의 조밀화 현상으로 말뚝의 구조적 안

표 6. 모형실험 결과 요약

No	L/D	Pile Cons. cond.	H/L	$E_{h1}/E_{h2}$	Q = 1kg 일때		Q = 4kg 일때		최대 휨 모멘트 발생 깊이, z/L
					y/D	$M_{max}/M_y^{(7)}$	y/D	$M_{max}/M_y^{(7)}$	
1	17.5	Driven (DH=5)	0.0	1.0	0.029	0.090	0.328	0.334	0.43
2			0.25	0.18	0.038	0.082	0.297	0.337	0.29 → 0.43
3			0.50		0.029	0.074	0.250	0.343	0.29 → 0.43
4			0.75		0.023	0.087	0.202	0.350	0.29 → 0.43
5			1.0		1.0	0.033	0.093	0.192	0.336
6		Driven (DH=15)	0.0	1.0	0.023	0.090	0.202	0.315	0.29 → 0.43
7			0.25	0.18	0.032	0.111	0.195	0.391	0.29 → 0.43
8			0.50		0.027	0.098	0.158	0.357	0.29 → 0.43
9			0.75		0.030	0.097	0.145	0.363	0.29 → 0.43
10			1.0		1.0	0.016	0.071	0.141	0.307
11		Driven (DH=5)	0.0	1.0	0.033	0.093	0.192	0.336	0.29
12			0.25	5.56	0.022	0.064	0.201	0.328	0.29 → 0.43
13			0.50		0.030	0.074	0.238	0.338	0.29
14			0.75		0.023	0.062	0.308	0.358	0.29 → 0.43
15			1.0		1.0	0.029	0.090	0.328	0.334
16		Driven (DH=15)	0.0	1.0	0.016	0.071	0.141	0.307	0.29 → 0.43
17			0.25	5.56	0.032	0.091	0.162	0.331	0.29 → 0.43
18			0.50		0.026	0.071	0.166	0.296	0.29
19			0.75		0.029	0.083	0.200	0.327	0.29 → 0.43
20			1.0		1.0	0.023	0.090	0.202	0.315
21		Embedded	0.5	0.18	0.040	0.071	0.383	0.371	0.43
22		DH = 5			0.029	0.074	0.250	0.343	0.29 → 0.43
23		DH = 10			0.034	0.106	0.251	0.407	0.29 → 0.43
24		DH = 15			0.027	0.098	0.158	0.357	0.29 → 0.43

주)  $M_y$  = 말뚝의 항복 휨모멘트(70kgcm)

표 7. 각  $E_{h1}/E_{h2}$  에 대한 총 항타 횡수

$E_{h1}/E_{h2}$	DH (cm)	H/L		
		0.25	0.5	0.75
0.18	5	50 (1.39) <sup>°</sup>	65 (1.48) <sup>°</sup>	80 (1.33) <sup>°</sup>
	15	26 (1.44) <sup>°</sup>	31 (1.55) <sup>°</sup>	36 (1.38) <sup>°</sup>
5.56	5	60	44	36
	15	26	20	18
0.18	5	65		
	10	40		
	15	31		

\* 근입길이에 대한 강성이 큰 층이 차지하는 비율이 동일한 H/L의 항타횡수 비,  
항타횡수( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ )/항타횡수( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ )

정에 영향을 미치는 최대 휨모멘트는 증가하게 되는 것으로 알려져 있다(김영수·김병탁, 1999d). 그러나, 이러한 결과들에 영향을 미치는 항타 에너지의 효과와 비균질 지반에서의 거동 특성 그리고 어느 정도의 수평하중까지 말뚝주변의 조밀화 효과가 유효할 것인가? 에 대한 자세한 연구가 거의 없는 실정이다.

본 연구에서 수행한 모형실험들의 결과는  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56인 비균질 지반에 항타 시공된 단일 강성말뚝의 수평거동 특성(수평하중-변위관계, 수평변위-최대 휨모멘트관계) 규명과 각 영향인자(DH,  $E_{h1}/E_{h2}$ , H/L)들이 말뚝의 수평변위와 최대 휨모멘트에 미치는 영향으로 나누어서 분석하였다. 모형실험들의 결과들중 임의 수평하중(1kg, 4kg)에 대하여 요약하면 표 6과 같다. 낙동강 유역 사질토 지반에서 강성말뚝의 근입에 필요한 총 항타횡수는 모형실험으로 부터 표 7과 같이 얻어졌으며, 성형된 지반상에서 항타말뚝의 실험을 위한 모형말뚝의 항타 장면은 그림 2와 같다. 비균질 지반에서 근입길이에 대한 강성이 큰 층이 차지하는 비율이 동일한 경우, 즉 H/L=0.25( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ )와 0.75( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ ), 하부층의 강성이 큰 지반에서 항타횡수가 더 크게 나타났다. 표 6에서의 최대 휨모멘트( $M_{max}$ )는 말

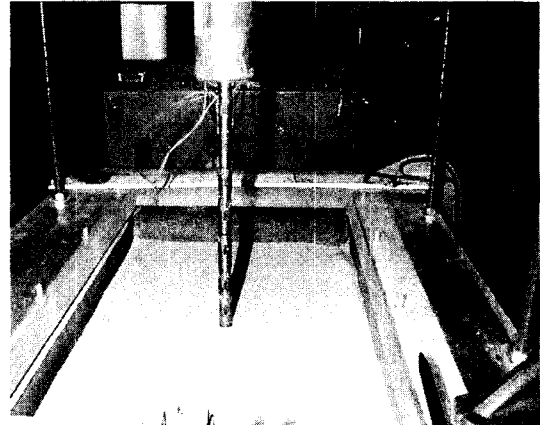


그림 2. 항타말뚝 실험장면

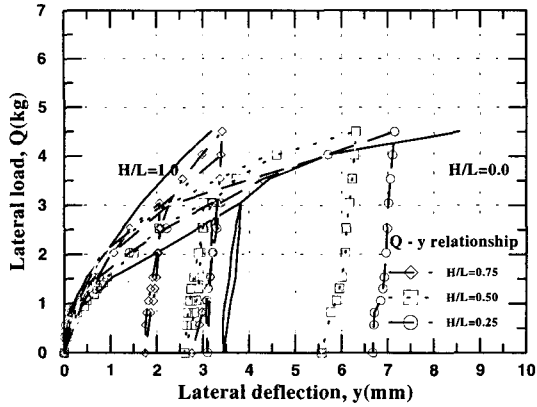
뚝 표면에 설치한 변형계이지 위치에서 얻어진 결과들이며, 총 항타횡수는 항타 에너지의 3배 증가에 대하여 대략 1/2로 감소하는 결과를 나타내고 있다.

### 3.1 수평거동 특성 분석

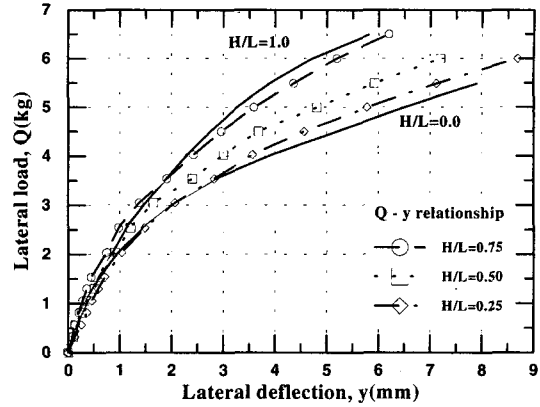
#### 3.1.1 수평하중(Q) - 변위(y) 관계

모형실험에서 얻어진 수평하중과 수평변위 관계들을 정리하면 그림 3과 4와 같다. 본 연구에서는 하중재하(loadung)-제하(unloading)의 과정으로 모형실험을 수행하였으나, 그림에서는 결과들의 명확한 비교를 위하여 일부 그림에서 하중제하의 결과를 생략하였다. 그림 3과 4는 표 4에서 요약한 모든 실험들의 수평하중(Q) - 변위(y) 관계에 대한 H/L과 항타말뚝에서 항타고(DH) 조건에 관하여 도시한 것이다.

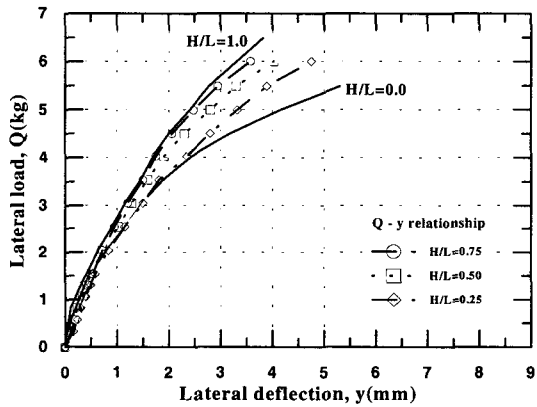
그림 3-(a), (b) 그리고 (c)는 비균질( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ ) 지반의 매입말뚝(DH=0cm)과 항타말뚝(DH=5, 15cm)의 Q-y곡선을 각각 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 비균질 지반의 Q-y 곡선은 항타 에너지에 관계없이 상대밀도 90%와 61.8%인 균질지반의 Q-y 곡선 범위내에서 존재하며 항타 에너지가 클수록, 즉  $15\text{kg}\times\text{cm}$ 인 항



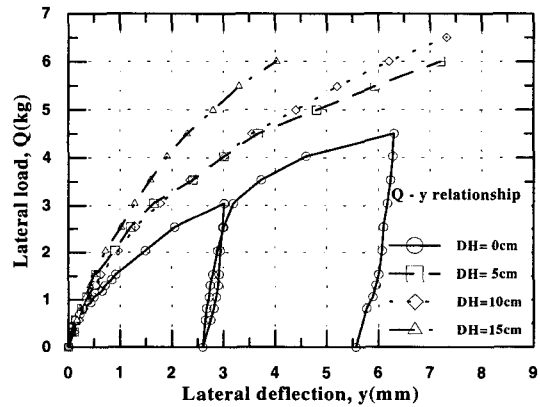
(a) 매입말뚝



(b) 향타 말뚝 (DH=5cm)



(c) 향타 말뚝 (DH=15cm)



(d) 향타 말뚝 (H/L=0.5)

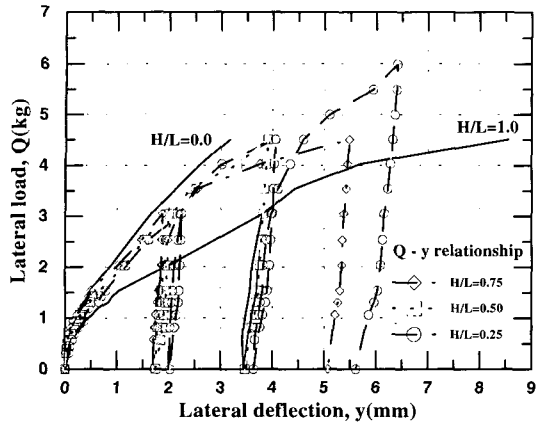
그림 3. Q - y 관계 ( $E_{n1}/E_{n2}=0.18$  조건)

타에너지, 균질지반의 Q-y 곡선의 범위가 좁아지고 비균질 지반에 대한 곡선이 상대밀도 90%인 균질지반의 곡선에 근접하여 나타났다. 그리고, 향타고가 증가할수록 곡선의 기울기가 급하게 나타나고 향타고가 낮은 향타말뚝(DH=5cm)에서는 낮은 향타에너지로 인한 총 향타횟수의 증가로 말뚝 선단부에는 조밀화(densify)가 일어나나, 1kg이하의 수평하중에서는 지표면 부근에서의 지반교란이 일어나 초기 Q-y곡선의 기울기가 크게 완만하였다.

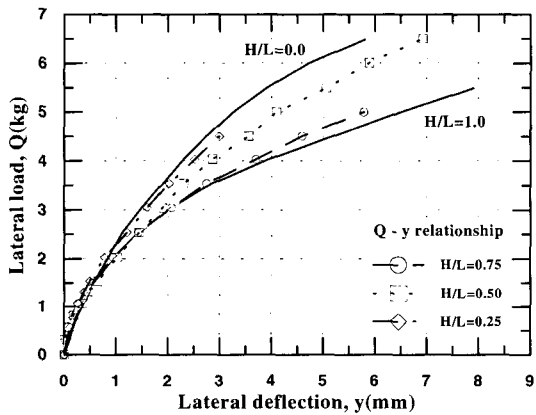
비균질(H/L=0.5) 지반에서 Q-y관계에 대한 향타말뚝 시공시 타격하는 향타 에너지의 영향을 나타낸 것은 그림 3-(d)와 같다. 향타 에너지가

증가함에 따른 수평변위의 감소현상이 뚜렷하게 나타났다. 그리고 10kg×cm와 5kg×cm 향타 에너지에서의 Q-y 곡선은 4kg의 수평하중 이하에서는 거의 동일하게 나타났으나, 그 이상의 수평하중부터는 향타 에너지의 영향을 파악할 수 있었다. 김영수·김병탁(1999)에 의하면, 4.5kg의 수평하중에서 균질지반의 매입말뚝에 대한 향타말뚝의 수평변위 비( $y_{Driven}/y_{Embedded}$ ,  $y_D/y_E$ )는 상대밀도 90%와 61.8% 각각에 대하여 0.629-0.874와 0.382-0.627의 범위로 발표하였다.

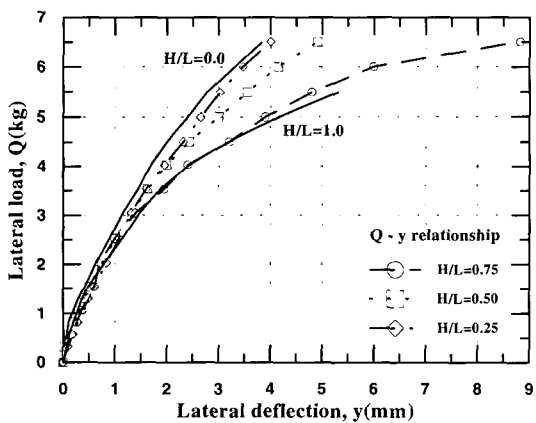
그러나, 본 연구에서 비균질 지반(H/L=0.5)에 대한 향타말뚝에 대한 매입말뚝의 수평변위 비( $y_D/y_E$ )는 각 향타 에너지에 따라 0.365(DH



(a) 매입말뚝



(b) 향타 말뚝 (DH=5cm)



(c) 향타 말뚝 (DH=15cm)

그림 4. Q - y 관계 ( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$  조건)

$=15\text{cm})-0.592(DH=5\text{cm})$ 의 범위로 얻어져, 비균질 지반의 수평변위 비( $y_D/y_E$ )는 향타 에너지가 클수록 적게 나타나 향타 에너지 3배 증가에 수평변위는 1.55배 감소하였다. 그리고  $H/L=0.5$ 인 비균질 지반에서의  $y_D/y_E$ 는 상부층의 상대밀도( $D_r=61.8\%$ )에 해당하는 균질지반의 수평변위 비( $y_D/y_E$ )에 아주 근접하는 결과로 얻어지는 것을 알 수 있다. 이는 향타 에너지에 의한 지반의 조밀화 현상이 하부층의 상대밀도가 큰 경우에서 크게 발생하고 있음을 보여주는 간접적인 결과라고 할 수 있다. 그리고 말뚝 향타시 상부층 지반의 조밀화 현상은 모형실험 동안에 말뚝 직경의 30-40%정도의 주변지반 함몰에 의한 체적변화로 관찰할 수 있었다.

그림 4-(a), (b) 그리고 (c)는 비균질( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ ) 지반의 매입말뚝( $DH=0\text{cm}$ )과 향타말뚝( $DH=5, 15\text{cm}$ )의 Q-y곡선을 각각 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 매입말뚝의 비균질 지반의 Q-y곡선은 4kg의 수평하중까지는  $H/L=0.0$ 의 Q-y곡선에 근접한 후 그 이상의 수평하중에서는  $H/L=1.0$ 의 Q-y곡선에 근접하여 나타났다. 그러나, 향타말뚝에서는 하부층 두께의 증가에 따른 Q-y곡선의 형상은 매입말뚝의 형상 양상과는 달리 아주 규칙적으로 변화하고 있다. 그리고  $H/L=0.25$ 와  $0.75$ 의 Q-y곡선들은 각기 상부층과 하부층의 상대밀도에 해당하는 균질지반의 향타말뚝 Q-y곡선에 아주 근접하는 것을 볼 수 있다. 강성이 큰 지반이 상부에 위치한 비균질 지반의 향타 에너지 증가에 의한 수평변위 비( $y_D/y_E$ )는,  $DH=5\text{cm}$ 의 경우,  $0.769-0.836$ 이며,  $DH=15\text{cm}$ 의 경우,  $0.544-0.590$ 이었다. 이와 같이, 향타에 의한 수평변위의 감소성은 향타 횟수보다는 향타 에너지의 크기에 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

비균질 지반에서 상부층과 하부층의 강성을 서로 바꿔서 실험한 수평변위 비( $y_D/y_E$ )를 4kg의

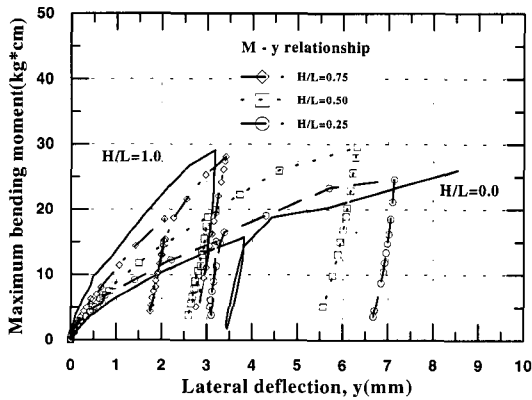


표 8. Q=4kg에서의 매입말뚝에 대한 항타말뚝의 수평변위 비 ( $y_D/y_E$ )

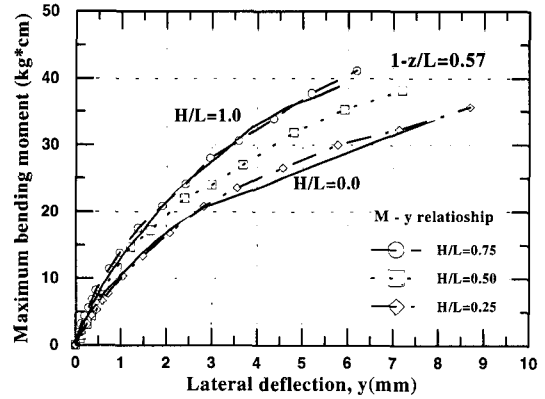
$E_{h1}/E_{h2}$	DH (cm)	H/L		
		0.25	0.5	0.75
0.18	5	0.625	0.653	0.814
	15	0.410	0.413	0.585
5.56	5	0.796(1.273)*	0.858(1.314)*	0.983(1.201)*
	15	0.642(1.566)*	0.598(1.448)*	0.638(1.091)*
0.18	5	0.653 (H/L=0.5)		
	10	0.655 (H/L=0.5)		
	15	0.413 (H/L=0.5)		

\* 동일한 H/L에서의 지반반력 계수비 ( $E_{h1}/E_{h2}$ )에 대한 수평변위 비의 비율, 즉  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 의  $y_D/y_E / E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 의  $y_D/y_E$

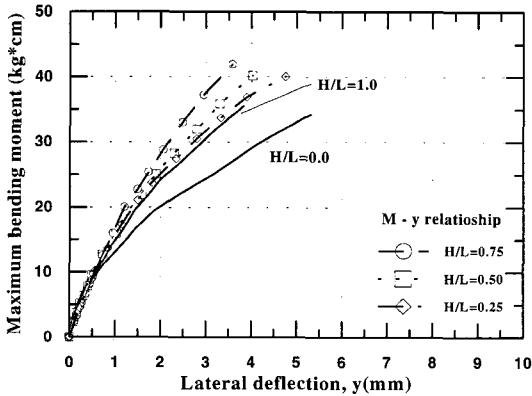
수평하중에 대하여 표 8과 같이 나타낼 수 있다. 표 8에서와 같이, 항타 시공에 따른 수평변위의 감소성은 명확하게 나타나고 있다. 그리고, 동일 H/L에서의 항타말뚝의 수평변위 감소는 상부층의 강성이 큰 경우( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ )보다 하부층의 강성이 큰 경우( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ )의 비균질 지반에서 더 작은 감소를 나타내고 있다. 이는 표 7에서  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반의 항타 횡수가  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반의 항타 횡수가 작게 나타나고 있음과 같이, 항타 시공시 항타 진동에 의한 지반의 입자 재배열이  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반과 같이 조밀한 모래가 깊은 영역에 존재하고 있어 더 활발하게 발생하고 이로 인



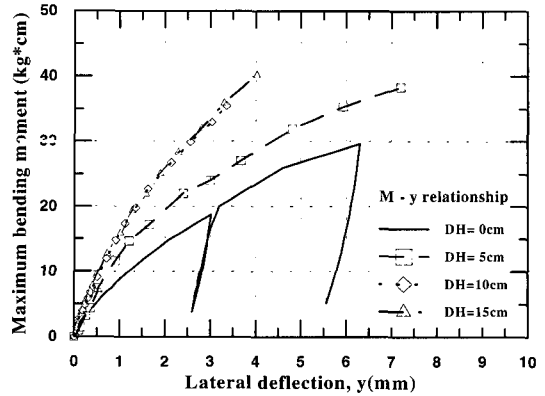
(a) 매입말뚝



(b) 항타 말뚝 (DH=5cm)



(c) 항타 말뚝 (DH=15cm)



(d) 항타 말뚝 (H/L=0.5)

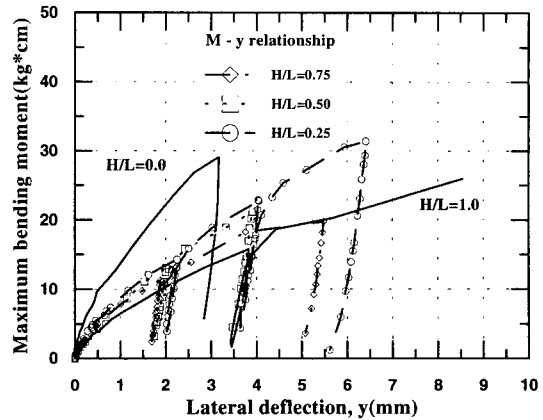
그림 5. MBM - y 관계 ( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$  조건)

하여 지반반력의 증가를 가져와 수평변위의 감소 현상이 두드러지게 나타나는 것으로 판단된다. 이와 같이, 그림 3과 4를 통하여 고찰한 비균질 지반에서 항타 관입한 강성말뚝의 Q-y관계는 항타 에너지에 더 의존하여 거동하고 있으며, 그 영향 정도는 H/L=0.75의 경우 항타 에너지가 3배 증가에 의하여 매입말뚝에 대한 수평변위 감소율이 19.6%에서 41.5%로 약 2.12배 정도 증가하였다. 또한, 항타말뚝인 경우가 매입말뚝인 경우보다 Q-y곡선이 항타 에너지증가에 의하여 더욱 직선적인 거동을 나타내며, 이는 김영수·김병탁(1999)에서 설명한바와 같이 말뚝의 항타 시공시 항타 에너지에 의한 지반의 토립자 재배열로 인하여 지반의 조밀화가 이루어지기 때문이며 이 영향은 느슨한 지반에서 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.

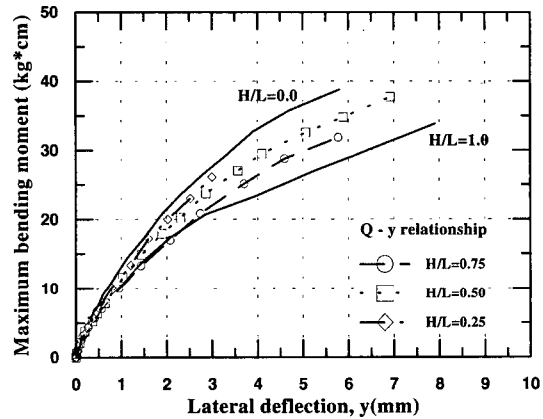
### 3.12 수평변위 - 최대 휨모멘트 관계

말뚝에 수평하중이 가해지는 경우 말뚝의 안정성을 평가하기 위하여는 말뚝의 구조적 위험요소인 휨모멘트가 필수적이라 할 수 있다. 그러나, 국내에서는 아직도 항타에 의한 지반내 말뚝에서 발생하는 최대 휨모멘트가 매입말뚝에 비하여 어느 정도 크게 발생할 것인가에 대한 연구가 수행되어 있지 못한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 실험에서 측정한 휨모멘트 중에서 최대값(MBM)과 수평변위의 관계를 분석하였다. 그림 5와 6는 수평변위(y)-최대 휨모멘트(MBM) 관계에 대한 H/L과  $E_{h1}/E_{h2}$ , 그리고 말뚝 시공상태 조건의 영향에 대하여 도시한 것이다.

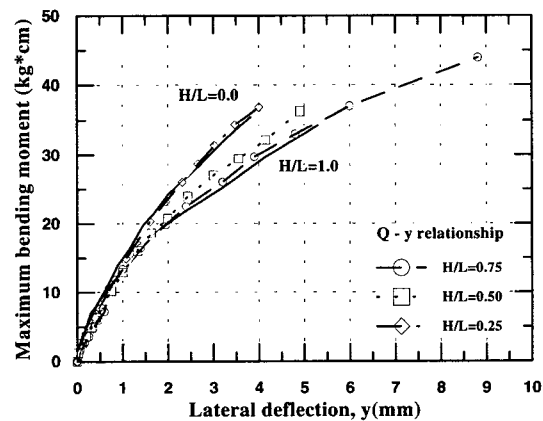
그림 5-(a)와 (b), (c)는 비균질 지반에서 매입말뚝과 항타말뚝(DH=5, 15cm)의 y-MBM 관계를 나타낸 것으로서, 동일 수평변위에서의 최대 휨모멘트는 느슨한 지반일수록 항타말뚝에서 크게 증가하고 있으며 비균질 지반의 경우에 DH=5cm에서는 H/L=0.75의 y-MBM곡선이



(a) 매입말뚝



(b) 항타 말뚝 (DH=5cm)



(c) 항타 말뚝 (DH=15cm)

그림 6. MBM - y 관계 ( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$  조건)

H/L=1.0(Dr=90%)의 곡선에 거의 일치하고 H/L=0.25의 y-MBM곡선이 H/L=0.0(Dr=61.8%)의 곡선에 거의 일치하여 나타났다. 그러나, DH=15cm의 비균질 지반에서는 H/L=0.25-0.75의 곡선들이 모두 H/L=1.0 (Dr=90%)의 곡선보다 위쪽에 위치하였다. 이는 수평하중(Q)-변위(y)관계에서 설명한바와 같이 하부층의 강성이 큰 비균질 지반에서 항타시 지반 토립자의 재배열이 수평변위 측면에서는 상당히 유리하나, 동일 수평변위에서의 최대 휨모멘트 측면에서는 상당히 불리하게 작용함을 실험으로 보여주는 결과라 할 수 있다. 그림 5-(d)는  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질(H/L=0.5) 지반에서 매입말뚝과 항타말뚝의 y-MBM관계를 비교하기 위하여 나타낸 것이다. 실험 결과에 의하면, 항타 에너지가 증가함에 따른 최대 휨모멘트가  $y/D=0.2$ 일 때 약 38%~73% 증가하여 나타나며 항타고 10cm 이상에서는 y-MBM곡선이 항타고 15cm의 y-MBM곡선과는 크게 차이가 나지 않았다.

$E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반의 항타 시공에 의한 y-MBM관계는 그림 6과 같다. 그림에서와 같이, 매입말뚝의 경우 비균질 지반의 y-MBM곡선들은 H/L=0.0인 지반보다는 H/L=1.0인 지반의 y-MBM곡선에 더 근접하여 나타나나 항타말뚝의 비균질 지반의 y-MBM곡선은 항타 진동에 의한 지반 강성이 상부층보다 상대적으로 약한 하부층의 강성 증가로 하부층 두께의 증가에 따라 규칙적으로 증가하였으며, 항타 에너지가 증가할수록 상부 또는 하부층의 두께가 말뚝 근입길이의 75%를 차지하는 비균질 지반의 y-MBM곡선은 말뚝 근입길이의 75%를 차지하는 층의 상대밀도에 해당하는 균질지반의 y-MBM곡선에 아주 근접하여 나타났다. 비균질 지반에서 상부층과 하부층의 강성을 서로 바꿔서 실험한 최대 휨모멘트 비( $MBM_D/MBM_E$ )를 4kg의 수평하중에 대하여 표 9와 같이 나타낼 수 있다.

표 9. Q=4kg에서의 매입말뚝에 대한 항타말뚝의 최대 휨모멘트 비 ( $MBM_D/MBM_E$ )

$E_{h1}/E_{h2}$	DH (cm)	H/L		
		0.25	0.5	0.75
0.18	5	1.008	0.925	0.964
	15	1.171	0.962	1.000
5.56	5	1.210(1.200)*	1.247(1.348)*	1.372(1.423)*
	15	1.221(1.043)*	1.092(1.135)*	1.253(1.253)*
0.18	5	0.924 (H/L=0.5)		
	10	1.097 (H/L=0.5)		
	15	0.962 (H/L=0.5)		

\* 동일한 H/L에서의 지반반력 계수비 ( $E_{h1}/E_{h2}$ )에 대한 최대 휨모멘트 비의 비율, 즉  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 의  $MBM_D/MBM_E$  /  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 의  $MBM_D/MBM_E$

김영수·김병탁(1999)에 의하면 4kg의 수평하중에서 상대밀도 90%인 균질지반의 경우 최대 휨모멘트에 대한 항타 에너지의 영향은 거의 없으나 상대밀도 61.8%인 균질지반에서는 DH=5cm에서 최대 휨모멘트가 약 53%정도 증가하는 결과를 발표하였다. 표 9의 결과에서는 상부층의 강성이 큰 비균질 지반의 경우가 하부층의 강성이 큰 비균질 지반의 경우보다 최대 휨모멘트가 항타말뚝에서 최대 37.2%정도나 크게 증가하여, 항타말뚝에서는 최대 휨모멘트의 증가성은 비균질 지반의 하부층 강성에 해당하는 균질지반의 증가정도에 아주 근접하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

### 3. 2 각 영향인자들이 수평거동 특성에 미치는 영향

비균질 지반에서 수평하중을 받는 말뚝에 있어 중요한 요소인 수평변위와 지반내 말뚝에서 발생하는 최대 휨모멘트에 대한 말뚝의 시공조건,  $E_{h1}/E_{h2}$ , 그리고 H/L의 영향들을 고찰하기 위하여 수평변위와 최대 휨모멘트를 정규화( $y_{H/L}/y_{H/L=0}$  or  $H/L=1.0$ ,

$y_{Driven}/y_{Embedded}$ ,  $MBM_{H/L}/MBM_{H/L=0}$  or  $H/L=1.0$ ,  $MBM_{Driven}/MBM_{Embedded}$ ) 하여 도시하였다. 그리고, 비균질 지반에서 수평하중의 증가에 따른 수평변위 및 최대 휨모멘트 비의 변화를 모형실험 결과로부터 분석한 결과, 동일한 실험식을 식 (1)과 같이 얻을 수 있었다.

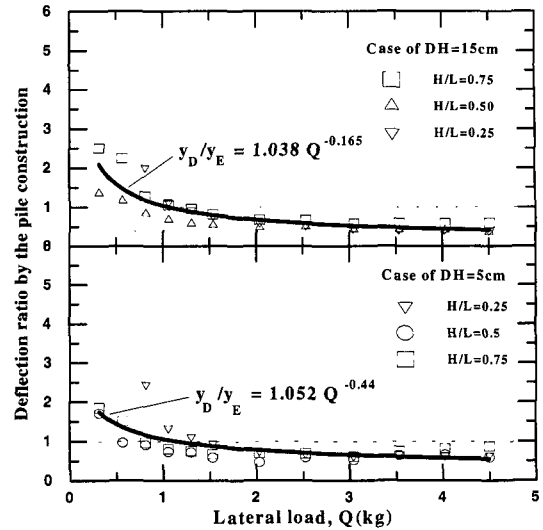
$$MBM_D/MBM_E \text{ or } y_D/y_E = \alpha Q^\beta \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$  및  $\beta$ 는 각 조건에서의 상수들이며, 이 값들은 그림 7 - 12에 식과 함께 표기하였다.

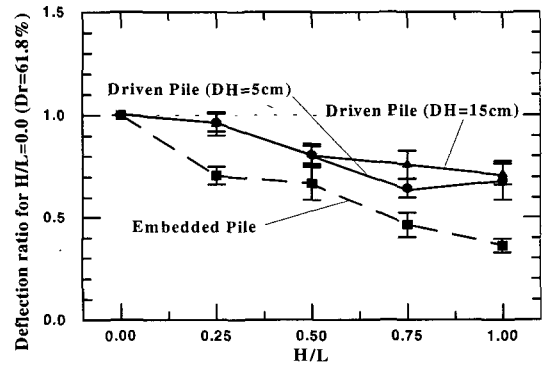
### 3.2.1 수평변위

그림 7과 8는 각각  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 의 비균질 지반이며 항타고(DH)와 H/L이 수평변위에 미치는 영향들을 나타낸 것이며, 수직말뚝이 항타 시공됨에 따른 수평변위의 감소성( $y_{Driven}/y_{Embedded}$ , i.e  $MBM_D/MBM_E$ )을 수평하중 및 H/L의 증가에 대하여 분석한 결과들이다.

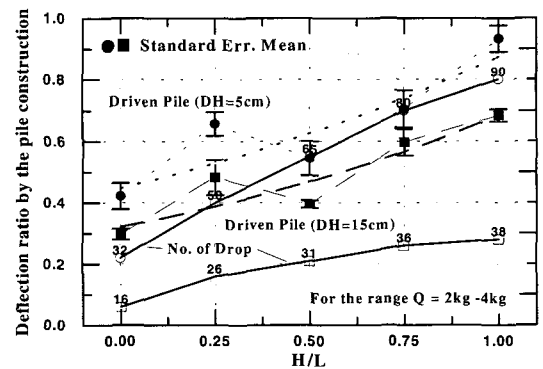
비균질 지반에서 항타말뚝의 수평변위는 매입말뚝보다 항타고가 증가함에 따라 감소현상을 보이나, 비균질 지반의 하부층의 지반 강성이 큰 경우가 항타에너지의 증가에 대한 수평변위 감소성이 크게 나타남을 알 수 있다. 즉,  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반에서는  $y_D/y_E=0.4-0.6$ (DH=15cm)와  $0.56-0.7$ (DH=5cm) 그리고  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반에서는  $y_D/y_E=0.63-0.66$ (DH=15cm)와  $0.74-0.94$ (DH=5cm)였다(그림 7-a, 8-a). 그리고,  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 와  $5.56$ 인 비균질 지반에서 말뚝 근입길이에 대한 하부 또는 상부층의 상대밀도가 61.8%인 지반 강성이 차지하는 비율이 낮을수록, 즉  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 에서는 H/L이 증가할수록 그리고  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 에서는 H/L이 감소할수록, 느슨한 층의 상대밀도에 해당하는 균질지반의 수평변위와 비균질 지반의 수평변위 비( $y_{H/L}/y_{H/L=1.0}$  or  $H/L=0.0$ )는 매입말뚝의 경우보다 항타말뚝의 경우가 감소정도가 상당



(a) Q -  $y_{Driven}/y_{Embedded}$  관계

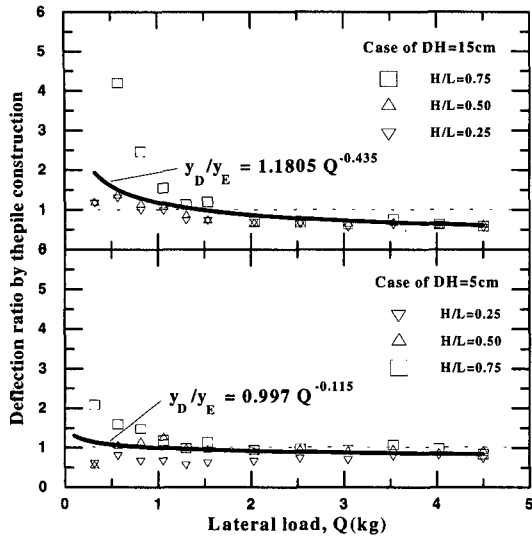


(b) H/L -  $y_{H/L}/y_{H/L=0.0}$  관계

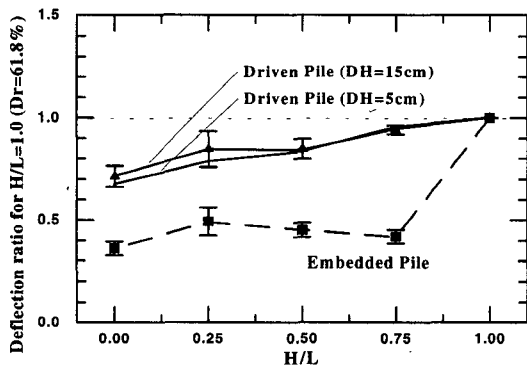


(c) H/L -  $y_{Driven}/y_{Embedded}$  관계

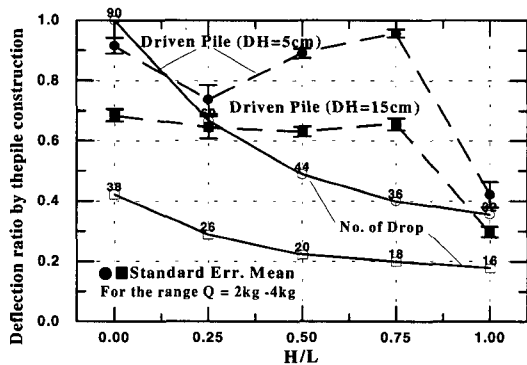
그림 7. 수평변위에 대한 시공방법과 H/L의 영향 ( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$  조건)



(a) Q -  $y_{Driven}/y_{Embedded}$  관계



(b) H/L -  $y_{H/L}/y_{H/L=0.0}$  관계



(c) H/L -  $y_{Driven}/y_{Embedded}$  관계

그림 8. 수평변위에 대한 시공방법과 H/L의 영향 ( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$  조건)

히 적게 나타났다. 특히,  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반에서 매입말뚝의 경우 수평변위의 감소에 대한 강성이 큰 상부층의 효과가 크게 작용하였으나, 항타말뚝의 경우 상부층의 효과가 매입말뚝보다 상당히 적게 작용하고 있다. 따라서, 비균질 지반에서 수평변위 측면에서는 항타 시공의 영향이 불리하게 작용할 것으로 사료된다. 즉,  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반의 경우 0.7-0.47(매입말뚝) 0.96-0.63(항타말뚝)으로  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반의 경우 0.49-0.40(매입말뚝) 0.96-0.78(항타말뚝)로 감소하였다(그림 7-b, 8-b).

그림 7-(b)와 8-(b)의  $H/L-y_{H/L}/y_{H/L=0.0}$ 와  $H/L-y_{H/L}/y_{H/L=1.0}$  관계들의 실험식을 도출하기 위하여 회귀분석을 수행한 결과 다음과 같이  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 과 5.56인 지반의 실험식이 다르게 구하여졌다.

Embedded & Driven Piles,  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$   
 $y_{H/L}/y_{H/L=0.0} = a_1 \exp(-b_1 H/L)$  (2)

Embedded & Driven Piles,  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$   
 Embedded :  $y_{H/L}/y_{H/L=1.0}$

$$= 1 / (-a_2 H/L + b_2) \quad (3)$$

Driven :  $y_{H/L}/y_{H/L=1.0}$

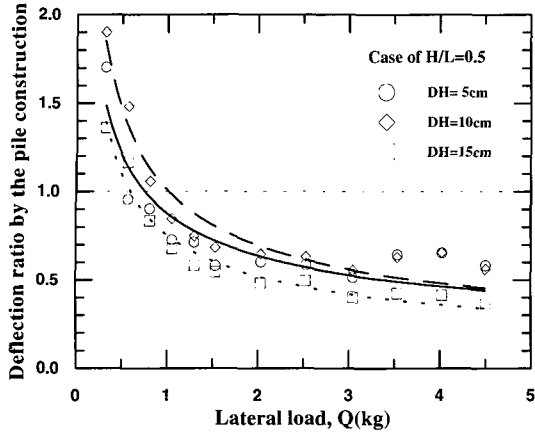
$$= a_3 \{b_3 - \exp(-c_3 H/L)\} \quad (4)$$

여기서,  $a_1, b_1, a_2, b_2, a_3, b_3, c_3$ 는 상수들이며 표 10과 같이 요약된다. 이들 상수는 모두  $R^2=0.74-0.99$ 로 나타났다.

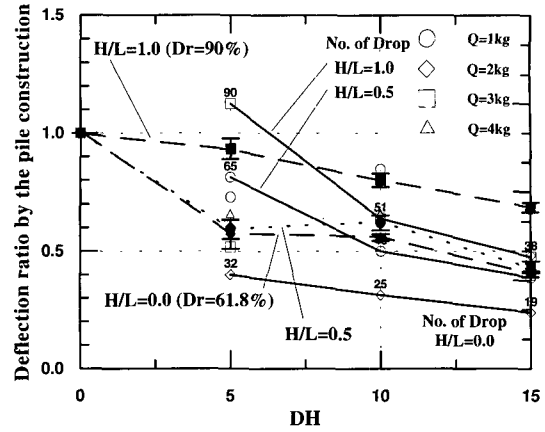
표 10. 식 (2), (3)와 (4)에서의 상수들

Constants						
$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$a_3$	$b_3$	$c_3$
0.982 <sup>1)</sup>	0.972 <sup>1)</sup>	2.280 <sup>1)</sup>	3.340 <sup>1)</sup>	-	-	-
1.023 <sup>2)</sup>	0.471 <sup>2)</sup>	-	-	0.879 <sup>2)</sup>	1.769 <sup>2)</sup>	0.467 <sup>2)</sup>
1.010 <sup>3)</sup>	0.367 <sup>3)</sup>	-	-	0.555 <sup>3)</sup>	2.308 <sup>3)</sup>	0.656 <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> 매입말뚝, <sup>2)</sup> 항타말뚝(DH=5cm), <sup>3)</sup> 항타말뚝(DH=15cm)



(a) Q -  $y_{Driven}/y_{Embedded}$  관계



(b) DH -  $y_{Driven}/y_{Embedded}$  관계

그림 9. 수평변위에 대한 시공방법과 DH의 영향 ( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$  조건)

$E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 와 5.56인 비균질 지반에서 항타 시공에 따른 지표면 수평변위의 감소정도를 고찰하기 위한  $H/L-y_D/y_E$  관계를 나타내면 그림 7-c, 8-c와 같다. 일반적으로, 항타말뚝의 수평변위는 매입말뚝의 수평변위보다 감소하여 나타나는 것으로 알고 있으나, 어느정도의 값인지는 정확히 알지 못하고 있다. 본 연구에서의 낙동강 유역 사질토에 대한  $y_D/y_E$  값은 항타 에너지에 따라 확연한 차이를 보이며 나타나고 있다.  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반의 경우, 강성이 큰 하부층 지반 두께의 증가에 따라  $y_D/y_E$  값이 전반적으로 증가하여  $H/L=0.75$ 에서 0.7(평균값,  $DH=5cm$ )와 0.6(평균값,  $DH=15cm$ )으로 나타났다. 그러나,  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반의 경우, 강성이 큰 상부층 지반 두께의 증가에 따른  $y_D/y_E$  값은  $H/L=1.0$ 에서 0.75사이에서 크게 증가한 후  $H/L$ 이 감소하여도 크게 증가하지 않았으며  $DH=15cm$ 에서 평균  $y_D/y_E$  값( $H/L=0.250.75$ )이 약 0.64정도였다. 이러한 결과들에 의하면, 느슨한 지반이 말뚝 근입길이에 차지하는 두께 비율이 클수록 수평변위 비의 감소성은  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반에서 크게 나타나나,  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반에서는 느슨한 지반의 두께비

율이 50%이상에서도 수평변위 비의 감소가 거의 발생하지 않았다. 이는 그림 8-b의 매입말뚝의 수평변위 비에서와 같이 상부층의 두께가 근입길이의 25%일때 수평변위가 상당히 감소하여  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ 인 비균질 지반에서 상부층 효과가 상당히 크게 나타나, 상대적으로 항타말뚝에서 항타진동에 의한 토립자의 재배열 효과가  $H/L=0.75$ 에서 크게 나타나지 않은 것으로 사료된다.

그리고, 항타말뚝과 매입말뚝의 수평변위 비( $y_D/y_E$ )에 대한 모형실험 결과들로부터 실험식을 제안하면 다음과 같은 bilinear의 함수형태와 같다.

$$\begin{aligned} \text{For } E_{h1}/E_{h2} = 0.18 \\ DH = 5cm : y_D / y_E \\ = 1/(2.153 - 1.057 H/L) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} DH = 15cm : y_D / y_E \\ = 1/(2.879 - 1.442 H/L) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{For } E_{h1}/E_{h2} = 5.56 \\ \text{Case of } DH = 5cm : \\ y_D / y_E = 0.053 H/L + 0.87 \\ (0 \leq H/L \leq 0.75) \end{aligned} \quad (7)$$

$$y_D / y_E = -1.94 H/L + 2.365 \quad (0.75 \leq H/L \leq 1.0) \quad (8)$$

Case of DH = 15cm :

$$y_D / y_E = 0.66 \quad (0 \leq H/L \leq 0.75) \quad (9)$$

$$y_D / y_E = -1.44 H/L + 1.74 \quad (0.75 \leq H/L \leq 1.0) \quad (10)$$

비균질 지반에서 항타 에너지에 따른 수평변위의 감소성을 고찰하기 위하여 H/L=0.5이고 E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=0.18인 비균질 지반에 대하여 항타높이를 3가지 (5, 10, 15cm) 경우로 모형실험을 수행하였으며 DH - y<sub>D</sub>/y<sub>E</sub> 관계의 결과는 그림 9와 같다.

항타말뚝에서 항타 에너지의 증가에 따라 H/L=0.5 (E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=0.18)인 비균질 지반의 수평변위 비는 상부와 하부 각층의 상대밀도에 해당하는 균질지반의 범위내에 존재하나, H/L=0.0인 균질지반의 DH - y<sub>D</sub>/y<sub>E</sub>곡선에 상당히 근접하여 나타났다. 이는 강성이 큰 지반이 2개층중 하부층에 존재할 경우 하부층의 두께가 말뚝 근입길이의 50%까지는 항타 에너지의 효과가 아주 크게 작용하고 있음을 실험결과로서 보여주고 있다. 항타시 상대밀도 90%의 하부층은 상당한 지반 조밀화 효과가 일어나며, 또한 상대밀도 61.8%의 상부층에서도 조밀화 효과가 발생한다. 이때 수평하중이 말뚝두부에 가해질 경우 말뚝내 최대 휨모멘트 지점이 말뚝길이의 29-43% 정도에서 발생하였다. 따라서, 말뚝의 수평변위가 zero인 지점은 최소한 최대 휨모멘트가 발생하는 지점보다도 아래에 위치하여 지표면에서 수평변위가 발생하지 않은 지점까지의 영역에서 지반의 저항력이 증가한다면 수평변위의 감소에 아주 큰 효과를 가져올 것이다. 그림 9-b는 이러한 설명을 입증하여 주는 것으로서 상부층과 하부층의 경계깊이가 말뚝 근입길이의 50%인 비균질 지반에서의 수평변위에 저항하는 얇은 깊이에서의 항타시 지반 조밀화는 상대밀도 90%인 균질지반보다 수평변위 측면에

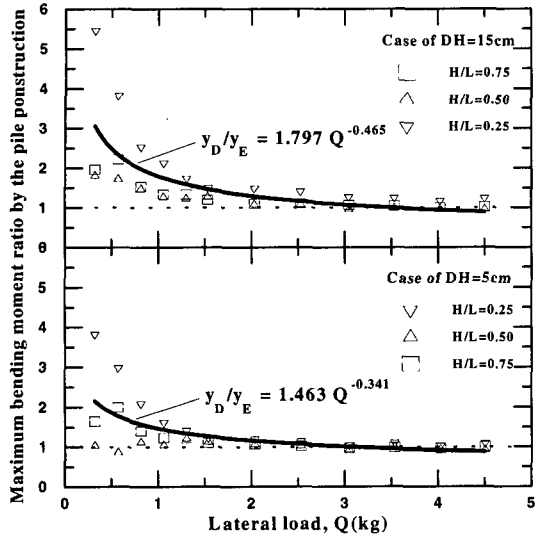
서 아주 유리하게 작용한다.

### 3.2.2 최대 휨모멘트

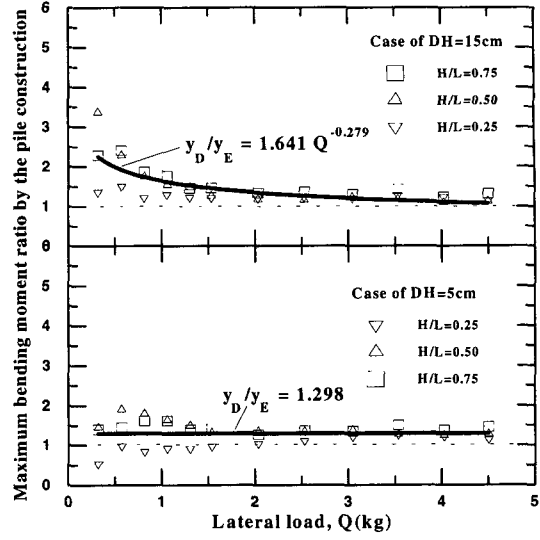
그림 10과 11은 각각 E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=0.18과 E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=5.56인 비균질 지반이며 말뚝 시공조건과 항타 에너지 그리고 지반반력 계수비가 수평변위에 미치는 영향들을 나타낸 것이며, 항타 시공됨에 따른 최대 휨모멘트 비(MBM<sub>Driven</sub>/MBM<sub>Embedded</sub>, i.e. MBM<sub>D</sub>/MBM<sub>E</sub>)를 수평하중 및 H/L에 대하여 분석한 결과들이다.

그림 10-a와 11-a에서와 같이 수평하중 증가에 따른 매입말뚝에 대한 항타말뚝의 최대 휨모멘트 비(MBM<sub>D</sub>/MBM<sub>E</sub>)는 비균질 지반의 지반반력 계수비에 무관하게 수평하중 3kg이상에서 거의 일정하여지며, 그 수렴 값은 DH=15cm의 항타고에서는 0.95-1.3, DH=5cm의 항타고에서는 0.75-1.25의 범위로 나타났다. 비균질 지반에서 상대밀도 61.8%의 균질지반을 기준으로 상대밀도 90%의 하부층(E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=0.18)이 증가하는 경우와 상대밀도 90%의 상부층(E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=5.56)이 증가하는 경우의 최대 휨모멘트 비(MBM<sub>H/L</sub>/MBM<sub>H/L=0 or H/L=1.0</sub>)를 상호 비교한 결과에 의하면(그림 10-b, 11-b), 지반 강성이 큰 층이 하부에 위치한 비균질 지반에서는 항타 에너지가 클수록 MBM<sub>H/L</sub>/MBM<sub>H/L=0</sub>은 H/L=0.0-0.25 사이에서 크게 증가한 후 감소하며 1.0 보다 크게 나타났다. 그리고 지반 강성이 큰 층이 상부에 위치한 비균질 지반에서는 항타 에너지에 따른 MBM<sub>H/L</sub>/MBM<sub>H/L=1.0</sub>은 1.0 이하에서 근접하나 큰 차이를 나타내지 못하였다. E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=0.18인 지반보다는 작은 최대 휨모멘트가 발생하여 말뚝의 구조적 안전성 측면으로 생각할 경우 E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>=5.56인 비균질 지반이 유리할 것으로 사료된다.

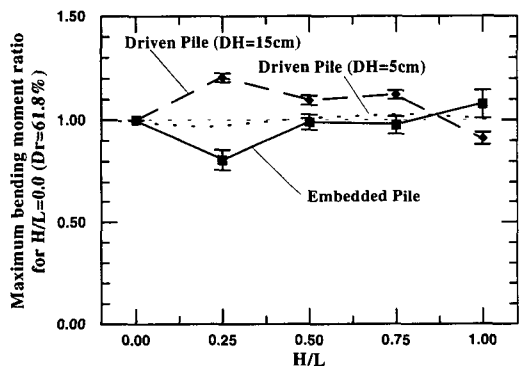
각 지반반력 계수비에서의 H/L-MBM<sub>D</sub>/MBM<sub>E</sub> 관계는 그림 10-c와 11-c와 같이 나타난다. E<sub>h1</sub>/E<sub>h2</sub>



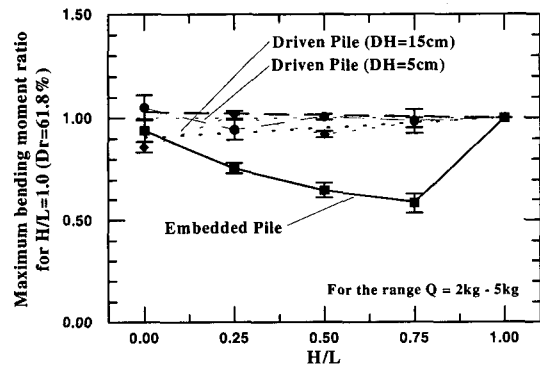
(a) Q - MBM<sub>Driven</sub>/MBM<sub>Embedded</sub> 관계



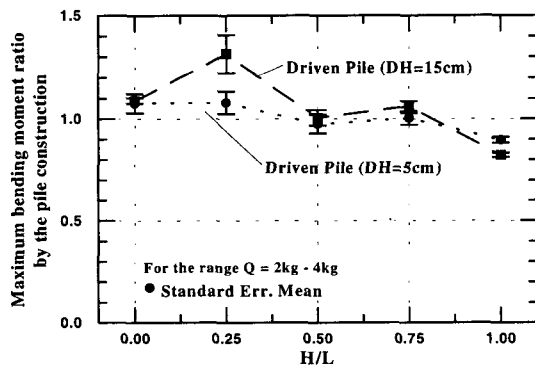
(a) Q - MBM<sub>Driven</sub>/MBM<sub>Embedded</sub> 관계



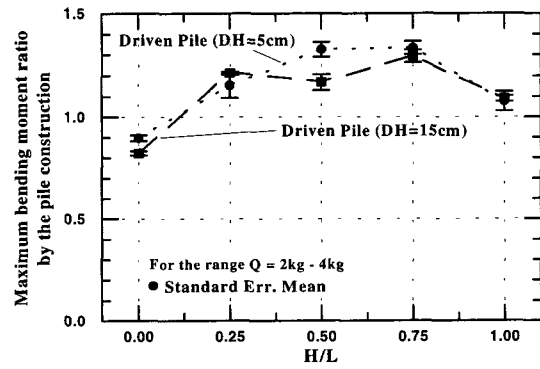
(b) H/L - MBM<sub>H/L</sub> / MBM<sub>H/L=0.0</sub> 관계



(b) H/L - MBM<sub>H/L</sub> / MBM<sub>H/L=0.0</sub> 관계



(c) H/L - MBM<sub>Driven</sub> / MBM<sub>Embedded</sub> 관계

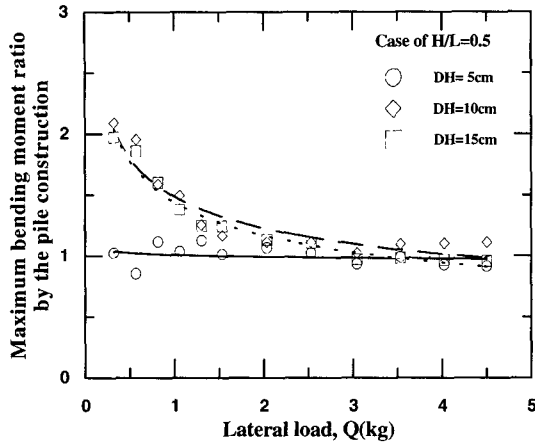


(c) H/L - MBM<sub>Driven</sub> / MBM<sub>Embedded</sub> 관계

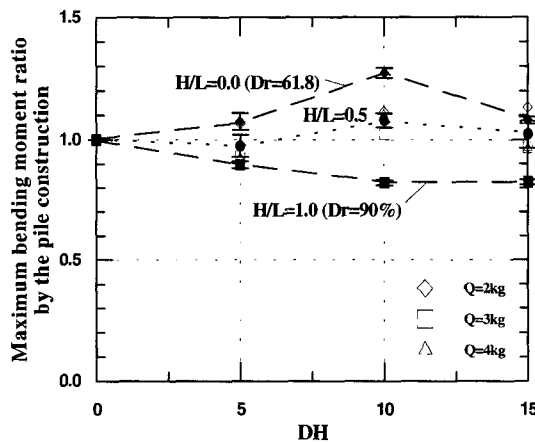
그림 10. 최대 휨모멘트에 대한 시공방법과 H/L의 영향 ( $E_{r1}/E_{r2}=0.18$  조건)

그림 11. 최대 휨모멘트에 대한 시공방법과 H/L의 영향 ( $E_{r1}/E_{r2}=5.56$  조건)





(a) Q - MBM<sub>Driven</sub>/MBM<sub>Embedded</sub> 관계



(b) DH - MBM<sub>Driven</sub>/MBM<sub>Embedded</sub> 관계

그림 12. 최대 휨모멘트에 대한 시공방법과 DH의 영향 ( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$  조건)

=0.18 인 비균질 지반에서는 항타 에너지 증가에 따라 항타말뚝의 최대 휨모멘트는  $H/L=0.25$  에서 매입말뚝의 1.32배 정도 증가하여  $H/L=0.75$  까지 감소하고는 있으나  $MBM_D/MBM_E$  가 1.0 이상으로 나타났다. 그러나,  $E_{h1}/E_{h2}=5.56$  인 비균질 지반에서는 강성이 큰 지반이 하부에 위치하는 경우와 달리 항타 에너지 증가에 따라  $MBM_D/MBM_E$  가 1.0 에 근접하고는 있으나 감소정도가 크지는 않았다. 비균질 지반에 대한 항타 시공시 항타말뚝의 수평변위는 매입말뚝의 40-66% 정도로 상당

히 감소하여 나타나고 있으나, 최대 휨모멘트는 매입말뚝의 100-132% 정도로 상당히 크게 나타났다. 이는 항타 진동으로 토립자의 재배열 현상이 발생하여 지표면 아래의 말뚝주변 지반 강성이 상대적으로 증가하고 이러한 현상으로 말뚝의 상대강성이 크게 증가하여 말뚝 근입길이 비( $L/D$ )가 큰 휨성말뚝과 비슷한 거동을 보이고 있기 때문으로 사료된다. 中西외 3인(1994)에 의하면, 상대밀도 90% 인 사질토 지반에서 항타말뚝의 지반반력계수는 매입말뚝에 비하여 105% 증가하는 것으로 밝히고 있다.

본 연구결과로는 비균질 지반에서 말뚝 구조물의 안정성 고려에 중요한 요소인 최대 휨모멘트 측면에서는 항타에 의한 말뚝시공이 매입말뚝보다 불리하게 작용하고 있는 결과를 보여주고 있다. 모형실험의 결과로부터 비균질 지반에서의  $H/L$ - $MBM_D/MBM_E$  관계에 대한 실험식은 linear 함수식 형태로 얻어질 수가 있으며, 다음의 식들과 같다.

For  $E_{h1}/E_{h2}=0.18(0.25 \leq H/L \leq 0.75)$  :

$$\begin{aligned} DH = 5\text{cm} : MBM_D / MBM_E \\ = -0.46 H/L + 1.375 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} DH = 15\text{cm} : MBM_D / MBM_E \\ = -0.14 H/L + 1.105 \end{aligned} \quad (12)$$

For  $E_{h1}/E_{h2}=5.56(0.25 \leq H/L \leq 0.75)$  :

$$\begin{aligned} DH = 5\text{cm} : MBM_D / MBM_E \\ = 0.39 H/L + 1.078 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} DH = 15\text{cm} : MBM_D / MBM_E \\ = 0.19 H/L + 1.128 \end{aligned} \quad (14)$$

비균질 지반에서 항타 에너지에 따른 최대 휨모멘트의 감소성을 고찰하기 위하여  $H/L=0.5$ 이고  $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ 인 비균질 지반에 대하여 모형실험을 수행하였고, DH- $MBM_D/MBM_E$  관계의 결과는 그림 12와 같다. 수평하중 증가에 따라 항

타 에너지가 클수록  $MBM_D/MBM_E$  는 1.0 보다 크게 나타났으며, 평균  $MBM_D/MBM_E$  는 0.93-1.07 범위였다. 그리고,  $H/L=0.5$  인 비균질 지반의 항타말뚝의 최대 휨모멘트 감소는 항타고 5cm 에서 나타나고 항타고 10cm 이상에서는 최대 휨모멘트의 증가로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 말뚝의 수평거동에 대한 일련의 연속된 연구의 결과로서  $H/L$ 과 지반반력 계수비 그리고 말뚝의 시공방법 영향을 알기 위하여 한정된 조건하에서 모형실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비균질 지반에서 항타말뚝의 총 항타횟수는 강성이 큰 층의 높이 비율이 동일한 경우에서 하부층의 강성이 큰 지반( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ )의 경우가 33-48%정도 크게 나타났다. 그리고 총 항타횟수는 항타에너지의 3배 증가에 대하여 대략 50% 감소하는 결과를 얻었다.
- 2) 비균질 지반에서 상부 또는 하부층의 두께 증가에 따른 항타말뚝의  $Q-y$ 곡선 형상은 매입말뚝의 형상 양상과는 달리 아주 규칙적으로 변하였다. 항타말뚝에서 하부층의 강성이 큰 지반의 경우 수평변위가 매입말뚝에 비하여 상당히 감소하지만, 최대 휨모멘트는 매입말뚝과 거의 차이가 없으며 수평변위의 감소가 상대적으로 적은 상부층의 강성이 큰 지반의 경우 최대 휨모멘트가 매입말뚝보다 최대 37.2% 증가하여 나타났다.
- 3) 본 연구에서의 모형실험 결과로부터 수평하중과 수평변위 비 및 최대 휨모멘트 비의 관계를 회귀분석으로 식(1)과 같이 제안하였다.
- 4) 동일  $H/L$ 에서의 항타말뚝의 수평변위 감소는 상부층의 강성이 큰 경우( $E_{h1}/E_{h2}=5.56$ )보다 하부층의 강성이 큰 경우( $E_{h1}/E_{h2}=0.18$ )의

비균질 지반에서 더 작게 감소하는 것으로 나타났다.

- 5) 비균질 지반에 대한 항타 시공시 항타말뚝의 수평변위는 매입말뚝의 40-66% 정도로 상당히 감소하여 나타나고 있으나, 최대 휨모멘트는 매입말뚝의 100-132% 정도로 상당히 크게 나타났다. 이는 항타 진동으로 토립자의 재배열 현상이 발생하여 지표면 아래의 말뚝주변 지반 강성이 상대적으로 증가하고 이러한 현상으로 말뚝의 상대강성이 크게 증가하여 말뚝이 휨성말뚝과 비슷한 거동을 보이고 있기 때문인 것으로 사료된다.
- 6) 모형실험 결과로부터 비균질 지반의  $H/L-MBM_D/MBM_E$  관계 및  $H/L-y_D/y_E$  관계를 직선 함수형태로 제안하였다.

#### 참고 문헌

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, 제 12권, 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. 김영수의 3인(1999a), "2개층 사질토지반에서의 단일 강성말뚝의 수평거동에 대한 두부 구속영향", 1999년도 봄정기지반학술발표 논문집, pp.217 - 224
6. 김영수 · 김병탁(1999b), "비균질 사질토지반에서 단일 휨성말뚝의 수평거동에 대한 말뚝 두부 구속효과 연구", 한국지반공학회, 제 15권, 제 5호, pp. 65-80
7. 김영수 · 김병탁(1999c), "Back Analysis for Prediction and Behavior of Laterally Loaded Single Pile in Sand", 대한토목학회, 제 15권, 제 5호, pp. 273-288
8. 김영수 · 김병탁(1999b), "사질토지반에서 단일 강성말뚝의 수평거동에 대한 시공방법의 영향", 한국

지반공학회, 게재예정

9. Brinch, H.J.(1961), "The ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark, Bulletin No. 12
10. 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
11. 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
12. 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
13. Kim, Y.S., Seo, I.S., Kim, B.T., and Lee, S.W. (1998c), "Model tests and Analysis of Laterally loaded piles in Sand", 17th Int. Conf. of Offshore Mechanics and Artic Engrg. (OMAE '98), Lysbon, Portugal.
14. Kim, Y.S., Kim, B.T.(1999), "A characteristics of Lateral behavior of steel pipe model pile in homogeneous and nonhomogeneous soils", 18th Int. Conf. of Offshore Mechanics and Artic Engrg.(OMAE '99), St. John's, Newfoundland, Canada
15. 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
16. 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
17. 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
18. 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
19. 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
20. 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
21. Poulos, H.G. and Davies, E.H.(1980), Pile foundation analysis and design, John Wiley & Sons, New York.

(접수일자 1999. 8. 26)