

# 강관말뚝의 수평거동에 대한 모형실험 연구( I ) - 대구지역 낙동강 모래에 대하여 -

Model Tests on the Lateral Behavior of Steel Pipe Piles( I )  
- in the Nak-dong River Sand -

김 영 수* <sup>1</sup>	김 병 탁* <sup>2</sup>
Kim, Young-Su	Kim, Byung-Tak
허 노 영* <sup>3</sup>	정 성 관* <sup>3</sup>
Heo, No-Young	Jung, Sung-Gwan

---

## Abstract

This paper shows the results of a series of model tests on the behavior of single steel pipe pile which is subjected to lateral load in Nak-dong river sand. The purpose of the present paper is to estimate the effect of Non-homogeneous soil, constraint condition of pile head, lateral load velocity, relative density of soil, embedded pile length, and flexural stiffness of pile on the behavior of single pile which is embedded in Nak-dong river sand. These effects can be quantified only by the results of model tests.

The nonlinear responses of lateral load-deflection relationships are fitted to 2nd polynomial equations by model test results. Also, the lateral load of a deflection, yield and ultimate lateral load, max. bending moment, and yield bending moment can be expressed as exponential function in terms of relative density and deflection ratio. By comparing Brom's results with model results on the lateral ultimate load, it is found that short and long pile show the contrary results with each other. The contrary results are due to the smaller assumed soil reaction than the soil reaction of the Nak-dong river sand at deep point.

By comparing lateral behavior on the homogeneous soil with non-homogeneous soil, it is shown that lateral load-deflection relationship is very dependent on the upper relative density. This phenomenon is shown remarkably as the difference between upper and lower relative density increases.

---

\*<sup>1</sup> 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*<sup>2</sup> 정희원, (주) 보성 토목 1부

\*<sup>3</sup> 정희원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*<sup>4</sup> 정희원, 경북대학교 농과대학 조경학과 조교수

## 요 지

본 논문은 낙동강 유역의 사질토 지반에서 수평하중을 받는 강관 말뚝의 수평거동을 모형실험을 통해 관찰하였다. 본 연구의 목적은 말뚝의 수평거동(하중-변위 관계, 지반내 말뚝의 모멘트 분포, 최대 모멘트-변위 관계 등)에 대한 말뚝의 강성, 말뚝의 근입깊이, 지반의 상대밀도, 하중재하속도, 말뚝두부의 구속조건, 그리고 지반내의 비균질도의 영향에 관하여 실험적인 연구를 수행하고 이러한 영향들을 정량화 할 수 있는 결과들을 얻고자 한다. 비선형적인 하중-변위 관계는 모형실험의 결과들로부터 2차 곡선방정식으로 회귀분석하여 구하였으며, 임의 수평변위에 대한 수평하중, 항복하중, 극한하중 그리고 최대 휨모멘트와 항복휨모멘트는 상대밀도를 포함하는 지수함수식의 형태로 회귀분석하여 구하였다.

수평 극한하중에 관한 Brom's의 이론 결과와 실험결과 비교에서, 짧은 말뚝과 긴 말뚝의 결과가 서로 반대로 나타난 것은 가정한 지반반력이 깊은 지점에서 낙동강 사질토의 지반반력보다 작아서 나타나는 것으로 판단된다. 균질층과 비균질토 지반의 수평거동 비교에서, 하부지반의 상대밀도보다 상부지반의 상대 밀도가 하중-변위관계에 더 큰 영향을 끼치고 있으며, 하부와 상부 지반의 상대밀도 차가 클수록 그런현상은 뚜렷하게 나타났다.

Keywords : Model test, Vertical pile, Lateral load, Non-homogeneous soil, Ultimate load

### 1. 서 론

상부 구조물에서 말뚝에 가해지는 하중에는 수직하중이 일반적이지만, 용벽에 가해지는 토압과 말뚝 측면의 토사 유동에 의한 정적 수평하중이나 지진 및 기계의 진동에 의한 동적 수평하중 그리고 풍하중이나 해안 구조물의 경우에 파도에 의하여 발생하는 반복수평하중도 있다.

따라서 상부하중을 지지하는 말뚝은 수직 하중 뿐만 아니라 수평 하중에도 충분히 지지할 수 있어야 한다. 가해지는 수평 하중에 지지하는 말뚝에 있어 중요한 것은 변위의 예측과 말뚝의 휨 모멘트에 대한 안전성 확보라고 할 수 있다. 말뚝의 수평 거동은 흙의 응력-변형거동이 낮은 응력에서도 비선형적이므로 예측이 상당히 어려우며, 지반의 응력상태나 상대밀도 등의 지반조건과 말뚝의 직경, 강성계수, 말뚝 선단·두부의 구속조건, 말뚝 근입깊이, 말뚝 표면의 거칠기 등의 말뚝조건에 따라 크게 달라진다. 따라서 말뚝의 수평거동을 예측하는

p-y곡선과 Vlasov 모델에 의한 해석방법 등은 지반의 강성계수와 말뚝의 직경, 근입깊이 그리고 지반의 탄성계수 등을 변수로 사용하므로서 이들 요소들이 수평거동이 미치는 영향을 해석에 반영하고 있다.(김영수 외 2인, 1997)

Yan and Byrne(1992)는 fine Ottawa silica sand에 대하여 현장상태와 유사한 응력조건을 재현하는 HGS(hydraulic gradient similitude)기술을 이용하여 수직말뚝의 정적 수평거동에 미치는 수평하중의 영향에 대하여 연구하였다. 이 논문에서는 실험에 의한 p-y곡선은 비선형적이고 지반응력에 의존하며 API 추천 code와 상당히 다른 결과를 보여주고 있다. 그리고 p-y 곡선의 초기 기울기에 대한 말뚝 직경의 영향은 적으나, 큰 변형에서는 영향을 미치는 것으로 나타났으며, p-y 곡선은 편심하중 또는 말뚝두부 구속 같은 하중조건에 대하여는 민감하지 않는 것으로 나타났다. 또한 API code에서의 초기 지반계수,  $k_n$  와 최대 지반탄성계수,  $E_{max}$  의 비교에서, 얇은 지반에서는  $k_n$  가  $E_{max}$ 와 잘 일치하나 지반이 깊어질수록  $E_{max}$

을 초과하는 것을 보여주고 있다.

Budhu와 Davies(1990)는 연약 점성토지반에 수평하중을 받는 수직말뚝기초에 대한 단말뚝 기초의 수평거동의 해석적 방법에 대하여 연구하였고, 이외에도 Matlock(1970), Georgiadis와 Butter Field(1992), Murchison와 O'neill(1984), Ting(1987), Abendroth와 Greimann(1990), 김영수의 3인(1996) 등의 연구자들도 수직 말뚝기초에 대한 수평거동을 연구하였다.

Long과 Vanneste(1994)는 34개의 현장실험의 결과를 이용하여 반복하중의 재하방법, 지반의 상대밀도, 말뚝의 시공방법, 그리고 하중 반복횟수의 함수로 정의되는 지반반력의 감쇄로 말뚝기초의 수평거동을 모델화 하였고, Ting, Kauffman과 Lovicsek은 반복하중과 동적 수평하중에 의한 포화 사질토 지반의 수직 말뚝의 거동에 대한 연구를 수행하였다. 이 논문에서는 “중간정도의 조밀한 사질토 지반에서 API의 반복하중에 대한 p-y곡선이 큰 수평 변위에서 동적 p-y 곡선보다 과소평가되었다”고 발표하였다.(김영수의 3인, 1996)

이와 같이 국외 학자들의 연구는 수 십년 간에 걸쳐서 꾸준히 이루어져 오고 있다. 그러나, 국내에서는 주로 수직하중에 의한 지지력 산정의 연구에 대하여 수행되어 왔으며, 최근 들어 수평거동에 관한 연구가 일부 진행되고 있으나 그것도 소수의 연구에 불과하다. 이상원 외 2인(1996)은 보-기둥(beam-column)해석법을 이용한 단말뚝 및 군말뚝의 수평거동분석을 위한 해석기법을 개발하였다. 그러나, 해석기법의 검증은 국외의 자료들에 의하여 이루어졌다. 이외에도 말뚝의 수평거동에 대하여 연구한 연구자가 있으나, 말뚝에 관한 수평거동의 연구 필요성에 비하여 구체적인 연구가 이루어지지 못하여, 국내에서 말뚝기초의 설계시 국외자료에 의존해야 하는 실정이다.

이에 본 논문에서는 낙동강 유역의 모래를 이용하여 말뚝의 수평거동에 미치는 말뚝의 강성, 말뚝의 근입깊이, 지반 상대밀도, 하중재하

속도, 말뚝두부의 구속조건, 그리고 비균질 지반(two layer) 등의 영향들을 소형 모델실험으로서 파악하고, 이러한 영향들을 정량화할 수 있는 실험적인 결과들을 얻음으로서 말뚝기초의 설계에 도움을 주고자 한다. 하중-변위 관계는 모형실험의 결과들로부터 최적의 곡선식(2차 방정식)으로 회귀분석하여 구하였으며, 임의 수평변위에 대한 수평하중, 항복하중, 극한하중 그리고 최대 휨모멘트와 항복 휨모멘트는 상대밀도를 포함하는 지수함수식의 형태로 현장에서 간편하게 예측할 수 있도록 회귀분석 방법으로 구하였다.

## 2. 실험 방법 및 실험 조건

본 연구에서는 말뚝기초의 수평 지지력과 수평변위에 관련되는 비선형적인 응력-변형 거동을 현장에서 수행하는 것이 가장 좋은 결과를 얻을 수 있지만, 큰 비용과 경험적 판단의 어려움과 변수들의 제어가 어려움으로 인하여 적은 비용과 응력 및 지반조건의 통제가 가능한 모형실험을 실시하였다.

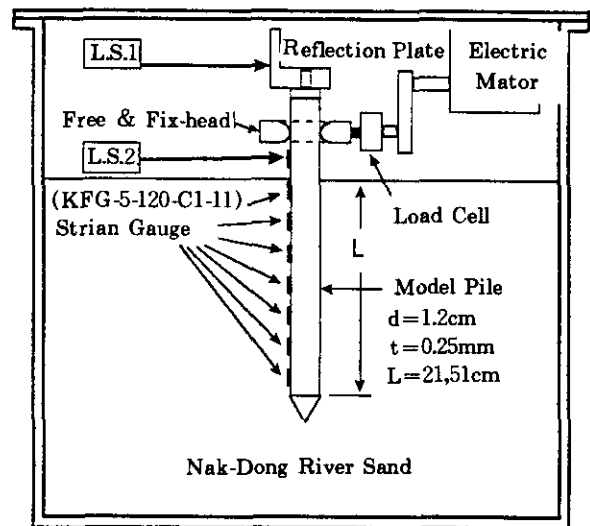


Fig. 1. Schematic of the test setup

## 2.1 실험 장치

모델박스는 30×50×80cm의 박스로 양측면과 후면 그리고 밑면이 5mm 두께의 스테인레스 강의 재질로 되어 있으며, 앞면은 실험 동안의 관찰을 용이하게 하기 위해 2cm 두께의 아크릴 판으로 되어 있다(Fig.1).

모델박스내에 지반을 성형하기 위하여 큰 스테인레스 용기 아래에 호스를 연결하여 모래를 공중 낙하시킬 수 있고 낙하량과 낙하높이로 지반의 상대밀도를 조절할 수 있는 지반 성형 방법을 사용하였다.

말뚝의 재료는 스테인레스 강관이며, 탄성계수는  $2.14 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 로 사용된 모형말뚝의 제원은 Table 1과 같다. 모델박스의 등가직경이 39.3cm로 실험에 사용된 모형말뚝의 최대 직경과 비교할 때 직경비는 약 32.8에 이른다. 변형계이지가 양면에 부착된 말뚝 기초에 수평 하중이 가해지는 경우, 측정된 변형값에 의한 축력이 거의 발생되지 않아서 본 연구에 사용한 말뚝기초에는 한면만 변형계이지를 부착하였다.

Table 1. Physical properties of model piles

직경(cm)		두께(mm)		전 길이(cm)		탄성계수(kg/cm <sup>2</sup> )		휨 강성(t×m <sup>2</sup> )	
Model	Field	Model	Field	Model	Field	Model	Field	Model	Field
1.2	40.8	0.25	8.5	25	850	$2.14 \times 10^6$	$7.27 \times 10^7$	$3.41 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^5$
1.2	40.8	0.25	8.5	55	1,870	$2.14 \times 10^6$	$7.27 \times 10^7$	$3.41 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^5$

## 2.2 실험 조건

본 연구에서 수행한 모형실험은 현장의 1/34배 크기로 축소한 모형모델내에서 실험을 실시하였다. 모형실험에서는 대구지역의 낙동강 모래를 이용하여 모형지반을 성형하였으며 낙동강 모래의 물리적 특성치는 Table 2와 같다. 조성된 지반은 시료의 유효직경에 대한 말뚝의 말뚝직경의 비가 실제와 다르므로써 내적 크기 효과(internal scale effect)가 발생하여 말뚝의 수평거동에 영향을 줄 수 있으나, 본 실험에서는 시료의 유효직경에 대한 말뚝직경의 비가 85.7로서 내적 크기 효과가 무시될 수 있는 50보다 크기 때문에 내적 크기 효과는 무시할 수 있다.(Peterson, 1988)

Table 2. Physical properties of Nak-dong river sand

Gs	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>10</sub> (mm)	Cu	Cc	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>
2.675	0.265	0.14	2.0	1.23	1.19	0.88

본 연구의 모형실험에 사용한 모형 지반조건과 모형기초의 조건을 모델과 현장상태에 대하여 요약하면 Table 3과 같다.

## 2.3 실험 방법

일반적으로 지반의 상대밀도를 조절하는 방법은 모래의 낙차가 클수록 상대밀도가 커지는 낙차에 의한 조절방법과 모래상자의 모래유출구멍의 크기가 작을수록 상대밀도가 커지는 모래유출량에 의한 조절방법을 들 수 있다. 그리고 모래의 낙하방법에 따라 mass spreader법과 traveling spreader법이 있다. 그러나 traveling spreader법은 모래의 자유낙하시 공기흐름에 의한 영향으로 낙하속도가 일정하게 유지되기가 어려움으로 인하여 모래지반의 균질성이 떨어질 가능성이 있으나, 외부공기흐름의 영향을 최소화할 수 있다면 모래지반의 높은 균질성을 얻을 수 있는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 모래지반의 높은 균질

Table 3. Summary of pile conditions and foundation conditions

실험 code	모형 모델상태(현장상태)					말뚝 두부 구속 조건
	직경(cm)	두께(mm)	근입길이 (cm)	휨 강성 ( $t \times m^2$ )	상대밀도 (%)	
DT1-19	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	90.0	자유
DT1-22	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	61.8	자유
DT1-23	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	32.8	자유
DT2-12	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	61.8	자유
DT2-16	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	90.0	자유
DT2-26	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	32.8	자유
DT2-27	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	62.8(U <sup>1</sup> ), 90.0(D) <sup>2</sup>	자유
DT3-05	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	32.8(U <sup>1</sup> ), 61.8(D) <sup>2</sup>	자유
DT3-06	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	32.8(U <sup>1</sup> ), 90.0(D) <sup>2</sup>	자유
DT5-20	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	32.8	고정
DT5-21	1.2	0.25	51(1,734)	$3.41 \times 10^{-3}$	90.0	고정
DT5-27	1.2	0.25	21(714)	$3.41 \times 10^{-3}$	90.0	자유
DT5-28	1.2	0.25	21(714)	$3.41 \times 10^{-3}$	32.8	자유
DT5-29	1.2	0.25	21(714)	$3.41 \times 10^{-3}$	32.8	고정

주1) U: 비균질토층의 상부층  
 주2) D: 비균질토층의 하부층

Table 4. Effect of drop height and hole size on the relative density

유출구멍 직경(mm)	낙하고 (cm)	단위 중량 ( $g/cm^3$ )	상대 밀도 (%)
10.0	125.0	1.51	90.0
18.0	125.0	1.40	61.8
25.0	125.0	1.00	32.8

성을 얻을 수 있는 traveling spreader법으로 지반을 성형하기 위하여 모래지반의 성형동안 외부공기의 유입을 막기 위하여 실험공간을 외부와 차단하여 지반을 성형하였다. 공기의 흐름을 최소화하여 성형한 모래지반의 상대밀도는 모래지반을 성형하기 전에 수차례에 걸쳐 낙하높이와 유출구멍크기의 관계를 실험하여 낙하높이와 유출구멍크기의 관계에서 모래지반의 상대밀도를 구하였다. 낙하높이와 유출구멍크기의 관계를 요약하면 Table 4와 같다.

모형지반을 성형하기 전에 모형 말뚝기초를

모형 박스내에 수직을 유지하여 둔 상태에서 모형지반의 성형을 Table 4와 같은 조건으로 공중낙하법에 의해 지반을 3층으로 나누어서 낙동강 모래를 평균 125cm의 낙하고로 공중낙하하여 지반을 성형하였다. 공중낙하법에 의하여 조성된 지반은 상대밀도의 편차가  $\pm 2\%$  정도로 매우 균질하다고 알려져 있으며, 본 연구에서 공중낙하법에 의한 지반의 상대밀도 편차는 평균  $\pm 3\%$ 로 나타났다.

비균질토 지반에 대한 실험에서는 지반내 말뚝 근입길이의 1/2지점 상부와 하부의 상대밀도를 서로 달리 성형하기 위하여 먼저 하부층 상대밀도에 대하여 모래를 자유낙하한 후 다소 불규칙한 지반면을 평탄하게 하고 다시 상부층 상대밀도로 지반을 성형하였다.

### 3. 모형 실험 결과 분석

말뚝기초에 수평하중이 가해지는 경우에 있

Table 5. Summary of model tests

실험 code	발폭두부 구속조건	상대밀도 (%)	상대강성 계수, $K_r$ ( $EI/E_sL^4$ )	극한하중 (kg)	$y/d=0\%$ 때 (1회 반복시) 발생위치 (cm)	$y/d=5\%$ 때		$y/d=10\%$ 때		최대 휨모멘트 발생위치 (cm)
						수평하중 (kg)	최대 휨모멘트 (kg·cm)	수평하중 (kg)	최대 휨모멘트 (kg·cm)	
DT1-19	자유	90.0	0.000089	4.71	21.5	0.705	9.67	1.353	19.35	9.0(7.5D)
DT1-22	자유	61.8	0.000102	3.30	26.0	0.385	4.80	0.746	9.60	9.0~13.0(7.5D~10.8D)
DT1-23	자유	32.8	0.000106	2.92	26.0	0.314	4.67	0.611	9.35	13.0(10.8D)
DT2-16	자유	90.0	0.000089	5.41	26.0	0.762	9.67	1.467	19.35	9.0(7.5D)
DT2-12	자유	61.8	0.000102	4.16	26.0	0.421	6.09	0.820	12.18	9.0~13.0(7.5D~10.8D)
DT2-26	자유	32.8	0.000106	3.05	31.5	0.318	4.91	0.616	9.80	9.0~13.0(7.5D~10.8D)
DT2-27	자유	90.0(D)61.8(U)	-	3.22	21.5	0.433	7.56	0.835	15.12	1.0~13.0(7.5D~0.8D)
DT3-05	자유	61.8(D)32.8(U)	-	3.52	26.0	0.379	7.02	0.736	14.04	13.0(10.8D)
DT3-06	자유	90.0(D)32.8(U)	-	2.80	31.5	0.413	7.35	0.794	14.70	13.0(10.8D)
DT5-20	고정	32.8	0.000106	3.97	21.5	0.427	5.04	0.829	10.08	21.5(17.9D)
DT5-21	고정	90.0	0.000089	9.38	26.0	1.111	8.55	2.152	17.11	9~13.0(7.5D~10.8D)
DT5-27	자유	90.0	0.000486	3.52	-	0.996	-	1.264	-	-
DT5-28	자유	32.8	0.000551	0.68	-	0.103	-	0.171	-	-
DT5-29	고정	32.8	0.000551	2.35	-	0.221	-	0.363	-	-

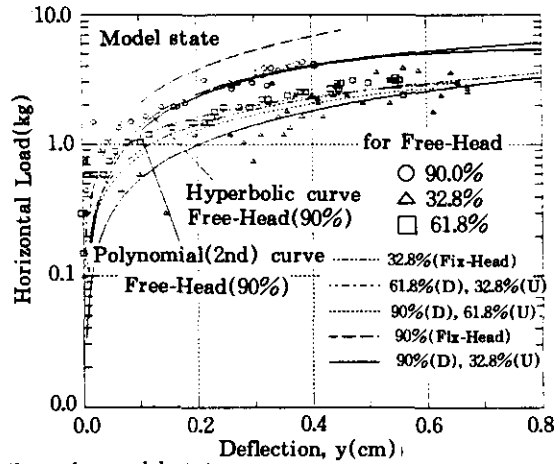
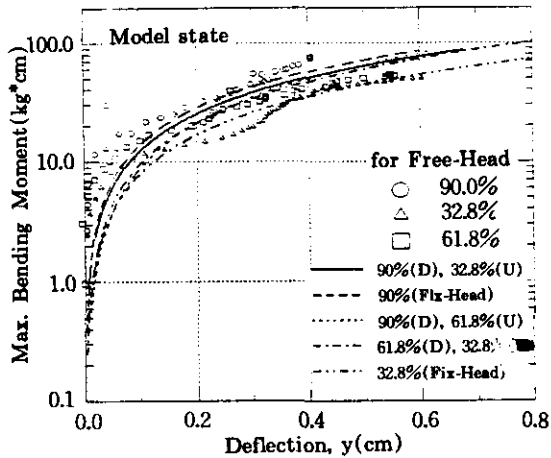


Fig. 2. Behaviors of pile under model state

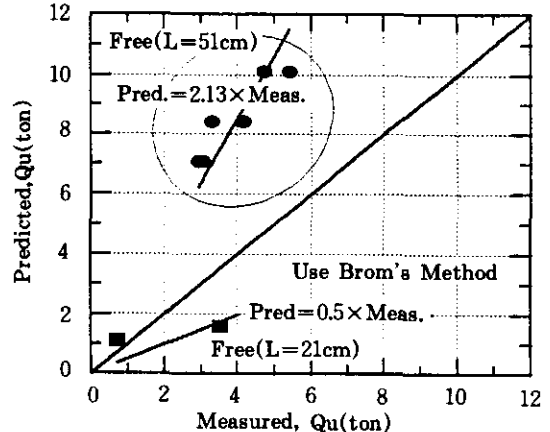
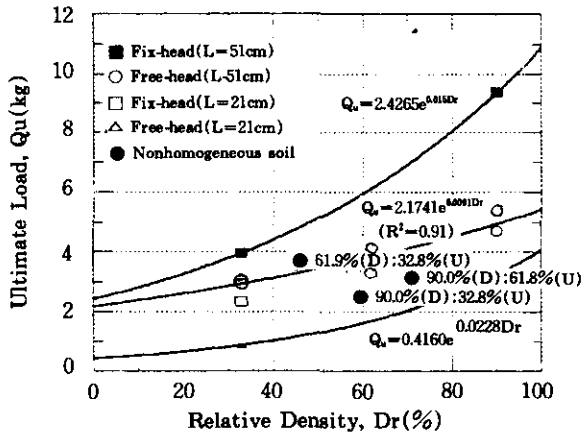


Fig. 3. Ultimate lateral load-relative density relationship and comparing the measured with predicted results for ultimate load

어, 하중 변위곡선에서 초기의 작은 변형에서는 지반과 기초는 탄성영역에 있으며, 하중이 증가함에 따라 지반이 소성영역으로 이동하면서 지반의 이동으로 인하여 하중-변위곡선은 1차 굴절을 하게 된다. 그리고 하중이 더욱 증가하면서 기초 또한 소성영역으로 이동하여 하중-변위곡선에 2차 굴절이 발생하며 결국은 기초의 파괴로 이어진다. 이러한 1차 굴절은 본 실험에서 하중 ( $\log Q$ ) - 수평변위 ( $\log y$ ) 곡선으로 명확히 관찰할 수가 있다. 지반의 붕괴(1차 굴절)에서 기초의 파괴(2차 굴절)까지는 짧은 시

간내에 소요됨으로 지반붕괴시의 하중(항복하중,  $Q_y$ ) 결정은 중요하다 할 수 있다.

도로교통표준시방서(건설부)에 의하면, 말뚝의 수평변위를 1.5cm까지 허용하도록 규정하고 있어 본 연구에서는  $y/d=5$ (2cm), 10%(4cm)때의 각 실험조건들에 대한 수평거동을 고찰하였으며, 수평하중과 최대 휨모멘트 및 발생위치에 대한 실험결과는 Table 5와 같다. 수평하중-변위 관계는 실험에서 얻어진 결과들로부터 2차 방정식으로 회귀분석하여 구하였으며, 회귀분석한 결과 모두  $R^2=0.90$  이상으로

나타났다. Mayne & Kulhawy(1991)는 수평 하중-변위 관계를 쌍곡선(hyperbolic) 함수,  $\delta = (H/K_s)/(1-H/H_0)$ , 식으로 제안하고 있어, 본 실험의 결과를 이용하여 회귀분석한 식을 Fig.2에 나타내었다. 그리고 수평 극한하중에 대하여 회귀분석한 쌍곡선 함수식을 2차 방정식과 비교한 결과, 2차 방정식의 결과보다 2.2배 크게 나타났다.

모형실험의 결과를 수평변위에 대한 최대 휨모멘트 및 수평하중 관계를 나타내면 Fig. 2와 같다. 그리고 일반적으로 현장에서 흙과 말뚝의 수평거동의 예측에 자주 이용되고 있는 Brom's의 이론은 모래지반의 수평 최대 지반반력( $p_0$ )이  $3K_p D^2 y$ 와 같다는 가정에 근거한 이론으로서 수평 극한하중( $Q_u$ )를 모형실험의 결과와 비교하였으며, 극한하중에 대한 상대밀도, 비균질토 지반, 말뚝두부의 구속조건 및 말뚝의 길이 영향을 Fig. 3과 같이 고찰하였다. 그리고 이 결과들은 근입길이 51cm, 두부 자유조건의 실험결과에 대한 회귀분석 결과(지수함수식)에 근거하여 지수함수식들로 회귀분석하여 곡선화하였다.

모형실험에서 얻어진 수평 극한하중은 말뚝의 상대 강성계수,  $K_s (=E_p I_p / E_s L')$ 에 따라 상반된 결과를 나타내고 있다. 말뚝길이가 51cm인 경우에 예측한 결과(Brom's)가 실험결과보다 2.13배나 크게 나타나고 있으나, 21cm인 경우에는 반대로 실험결과가 예측결과에 약 2배 크게 나타났다. 이는 Yan과 Byrne(1992)의 연구결과에서 밝힌바와 같이 Brom's 이론에서 가정한 극한 지반반력은 실제의 지반 극한반력보다 얕은 부분에서는 적으며, 깊은 부분에서는 초과하고 있는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이와 같이, 실제 지반과 가정한 지반의 반력분포가 임의깊이를 기준으로 크거나 작게 나타남으로서, 짧은 말뚝과 긴 말뚝에서 예측결과에 대한 실험결과가 반대로 나타난다고 할 수 있다.

따라서, 실제 지반에 대한 극한 지반반력의 산정은 간편한 방법에 의한 말뚝의 수평거동

예측을 위하여 상당히 중요한 부분이라 할 수 있다.

### 3.1 하중재하속도 및 지반조건의 영향

사질토 지반에서 하중 재하속도에 따른 전단강도는 변화가 거의 없는 것으로 알려져 있다. 그러나 말뚝의 경우에는 흙과 구조물의 거동특성에 의존하는 3차원적인 거동을 보이고 있어 재하속도에 따른 수평거동의 특성을 고찰할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 수평하중 및 최대 휨모멘트-수평변위관계와  $y/d=5$ , 10%의 최대 휨모멘트 및 극한하중에 대한 상대밀도와 하중 재하속도의 영향에 관한 실험을 실시하였다.(Fig.4) 그림에서와 같이 동일 수평변위에 대한 수평하중은 하중재하속도가 0.47 cm/min 일때가 1.6cm/min일때 보다 더 크게 나타났으며, 동일 재하속도에 대한 수평하중은 상대밀도가 32.8%에서 61.8%로 증가할 경우보다 61.8%에서 90.0%로 증가할 경우가 더 큰 증가를 보였다. 특히, 상당히 작은 상대밀도( $D_s=32.8\%$ )에서는 재하속도의 영향이 거의 없음을 알 수 있다. 그리고 동일 수평변위에 대한 최대 휨모멘트는 0.47cm/min의 경우 상대밀도의 증가에 대하여 거의 직선적인 증가를 보였으나, 1.6cm/min의 경우 상대밀도가 32.8%에서 61.8%로 증가할 경우보다 61.8%에서 90.0%로 증가할 경우가 더 큰 증가를 보였다. 최대 휨모멘트의 발생깊이는 재하속도에는 거의 영향을 받지 않고, 상대밀도가 작을수록 깊어지며 지반이 느슨해질수록 직경의 9배에서 13배로 발생지점이 말뚝의 선단으로 이동하고 있다. 이는 상대밀도가 작을수록 지반내 말뚝저부에서의 지지력이 감소되어 말뚝선단부분의 고정효과가 감소되기 때문이다. 말뚝두부가 자유조건이며 근입길이가 51cm( $L/d=42.5$ )인 조건의 경우, 말뚝의 수평하중( $Q$ ), 항복하중( $Q_y$ ), 그리고 항복하중이 발생할때의 최대 휨모멘트, 즉 항복 최대휨모멘트(MBM<sub>y</sub>),와 최대 휨모멘트(MBM)에 대한 상대밀도와 수평



변위의 영향성을 파악하기 위하여 회귀분석한 결과, 다음의 지수함수 식(1)~(4)로 표현할 수 있는 실험식을 얻었다.

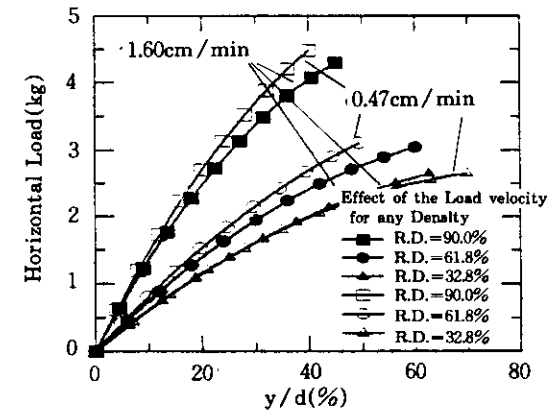
$$Q = \left(0.03421 \frac{y}{d}\right) \times \exp \left[0.0148 \times \exp \left(-0.0025 \frac{y}{d}\right) D_r\right] \quad (R^2=0.94) \quad (1)$$

$$Q_y = 1.1085 \times \exp [0.0062 D_r] \quad (R^2=0.92) \quad (2)$$

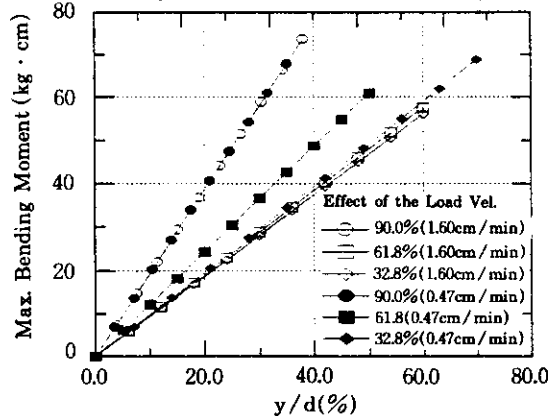
$$MBM = \left(0.59365 \frac{y}{d}\right) \times \exp \left[\left(0.01226 - 8.964 \times 10^{-6} \log \frac{y}{d}\right) D_r\right] \quad (R^2=0.95) \quad (3)$$

$$MBM_y = 22.7961 \times \exp [0.0017 D_r] \quad (R^2=0.93) \quad (4)$$

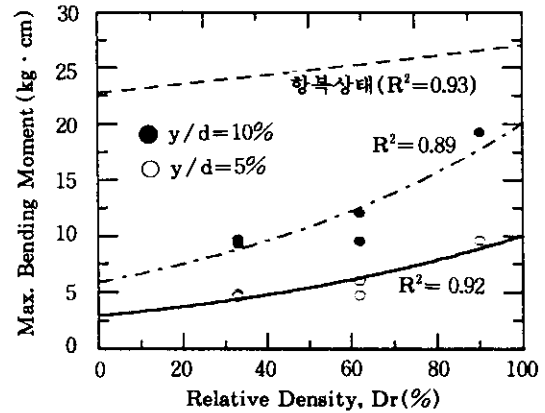
여기서, y는 말뚝두부의 수평변위, d는 말뚝의 직경, D<sub>r</sub>는 상대밀도이다.



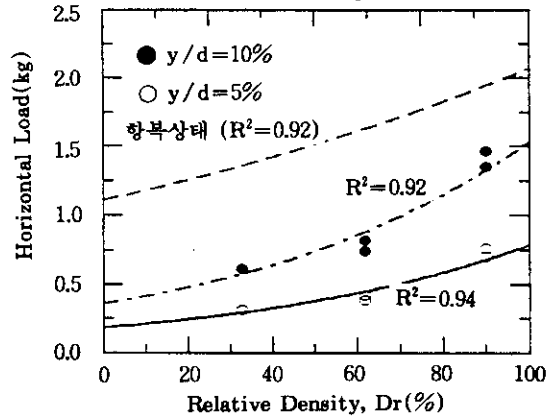
(a) y/d-horizontal load relationship



(b) y/d-max. bending moment. relationship



(c) Relative density-max. bending mom. relationship



(d) Relative density-horizontal load relationship

Fig. 4. Effect of load velocity and relative density

### 3.2 말뚝두부의 구속조건의 영향

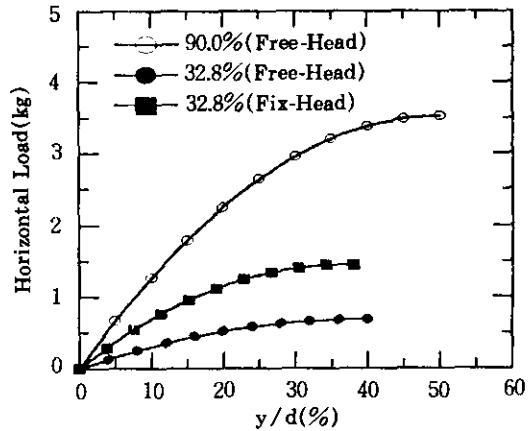
대부분의 이론적인 연구에서 말뚝 두부의 구속이 말뚝의 거동에 많은 영향을 주고 있다는 결론을 도출하고 있지만, 이러한 영향을 정량

화 할 수 있는 실험적인 결과는 거의 없다고 할 수 있다.(Yan & Byrne, 1992) 이에 본 연구에서는 말뚝의 근입길이와 지반상대밀도에 따른 하중변위관계, 휨 모멘트분포에 대한 말뚝 두부 구속조건의 영향을 관찰하였다.(Fig.5)

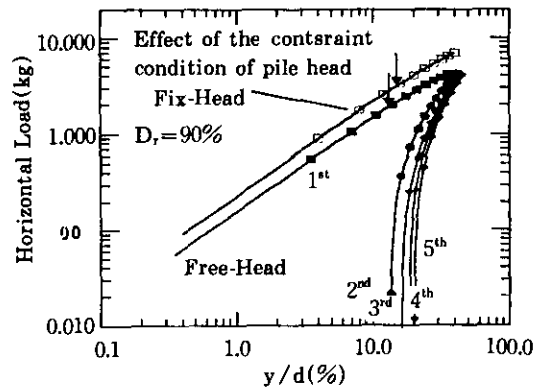
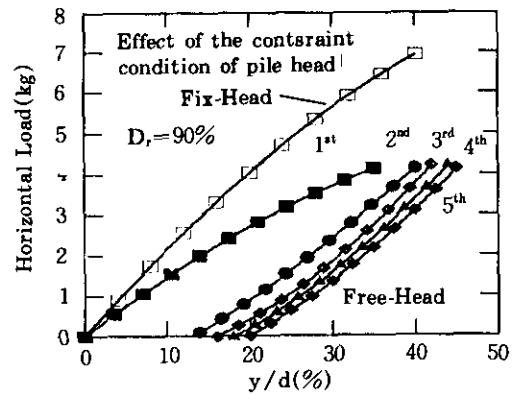
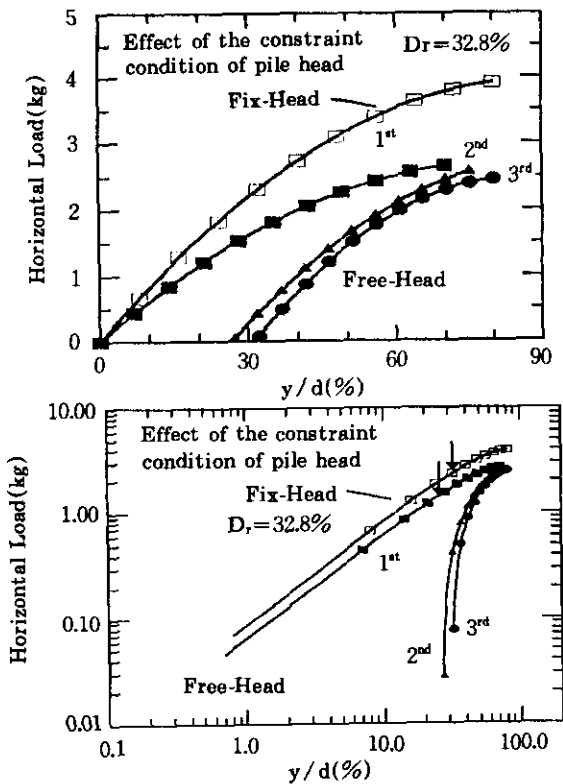
말뚝두부 구속조건에 영향을 준 입경이 51cm의 경우  $D_r=32.8$ , 90%를 그리고 입경이 21cm의 경우는  $D_r=32.8\%$ 의 지반에 대하여 수평하중을 재하(load)와 제하(unload)를 3~5회 반복해서 가하며 실험을 실시하였다.

Fig.5-(b), (c)와 같이 말뚝두부의 고정조건이 자유조건보다  $D_r=32.8$ , 90% 각각에 대하여 수평하중( $y/d=5\%$ 의 경우)은 1.34배, 1.46배 증가하였고, 최대 휨모멘트는 고정조건이 자유조건에 102.6%( $y/d=5\%$ ,  $D_r=32.8\%$ 의 경우) 그리고 88.4%( $y/d=5\%$ ,  $D_r=90\%$ 의 경우) 발생하였다. Yan & Byrne(1992)에 의하면 말뚝두부의 고정조건으로 인하여 최대 휨모멘트가 1/2 감소하는 것으로 발표하였으나, 본 연구의 결과는 말뚝두부의 회전을 구속하지 않은 상태의 결과들로서 Yan & Byrne(1992)의 결

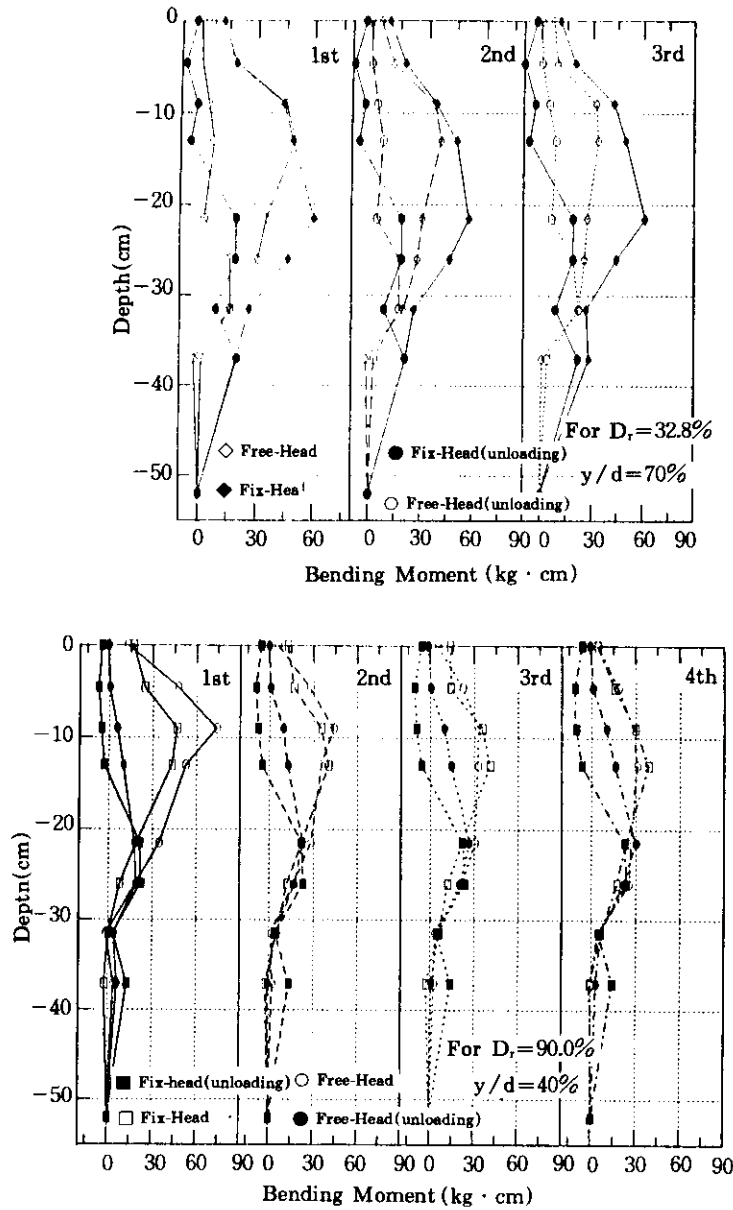
과보다는 크게 나타났다. 그리고 최대 휨모멘트의 발생깊이는 상대밀도가 클수록 거의 변화는 없는 것으로 나타났다. 말뚝두부의 회전이 구속된 고정조건에서 최대 휨모멘트가 자유조



(a)  $y/d$  - horizontal load relationship for  $L=21\text{cm}$



(b) Relationship between  $y/d$  and horizontal load for  $L=51\text{m}$



(c) Bending moment distribution of model pile for  $D_r=32.8\%$ ,  $90\%$

Fig.5. Effect of free and fix-head conditions

건보다 작은 모멘트를 보이는 이유는 말뚝의 하중 재하지점의 회전구속으로 인하여 자유조건과는 달리 하중방향과 반대의 회전모멘트가 발생하기 때문이다. 이때 지반내 최대 휨모멘트는 감소하나 말뚝두부의 전단파괴 가능성이

있으며, 이에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.

Fig. 5(c)에서, 하중 재하와 제하에 따른 지반의 함몰로 인하여  $y/d=0\%$ (unloading) 때 휨모멘트가 상대밀도 90%의 경우  $-21.5(17.9D) \sim -26\text{cm}(21.6D)$  깊이에서, 그리고 상대

밀도 32.8%의 경우  $-31.5(26.2D)$  깊이에서 재하시의 휨모멘트와 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그리고 실험결과에 의하면, 하중재하와 재하횟수가 증가할수록 재하시의 휨모멘트가 증가하였다.

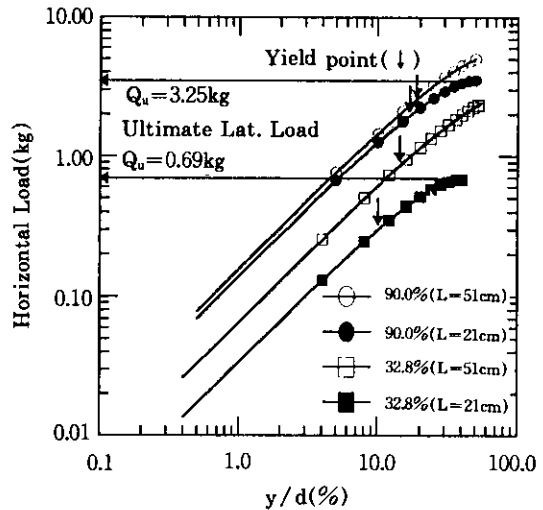
Fig. 5-(a)는 말뚝의 근입길이가 21cm인 경우에 대한 말뚝두부의 구속조건의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이  $D_s=32.8, 90\%$ 에 대하여 말뚝두부 구속조건 영향과 상대밀도의 영향을 고찰하면, 자유조건에서 상대밀도가 32.8%에서 90%로 증가함에 따라 수평하중은 6.47배( $y/d=5\%$ ), 6.23배( $y/d=10\%$ ) 증가하였다.

이는 말뚝의 근입길이가 51cm인 말뚝보다 증가비가 2.7배나 큰값이다. 상대밀도 32.8%에서 말뚝두부가 고정조건인 경우가 자유조건인 경우보다 수평하중이 2.15배( $y/d=5\%$ ), 2.12배( $y/d=10\%$ ) 증가하였다. 이상과 같이 말뚝의 근입길이가 21cm인 말뚝에서는 말뚝두부의 구속조건보다 지반의 상대밀도가 하중-변위곡선에 더 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

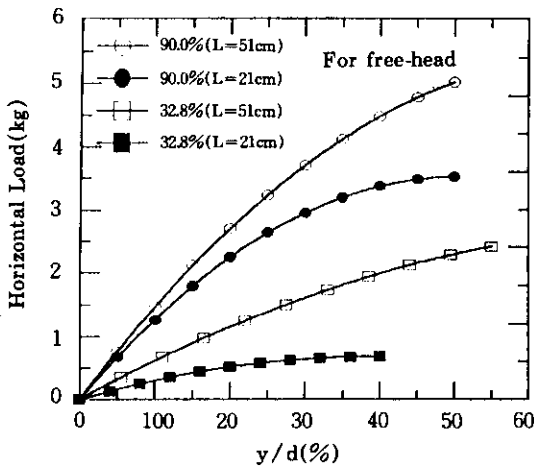
### 3.3 말뚝조건의 영향

지반에 근입된 수직 말뚝의 거동은 크게 강

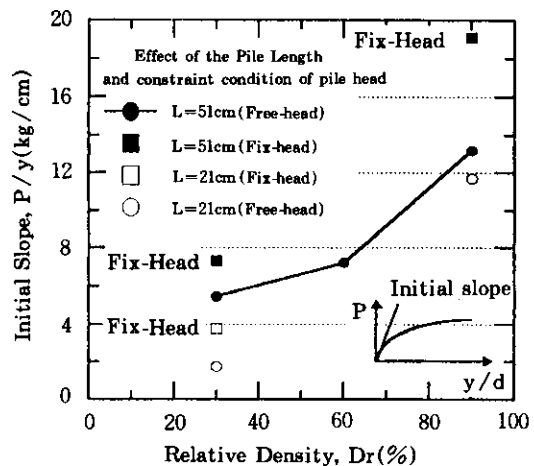
성말뚝(rigid pile)과 휨성말뚝(flexible pile)의 거동으로 구분할 수 있으며, 구분기준은 상대휨성계수,  $K_n$ ,에 의한다. 동일 말뚝강성( $E_p I_p$ )과 지반 상대밀도에서는 말뚝의 근입길이에 따라 휨성 및 강성말뚝으로 구분되며, 본 연구에서는 하중-변위곡선에서 초기 곡선기울기( $P/y$ )에 대하여 지반의 상대밀도, 말뚝두부의 구속조건에서의 말뚝 근입길이의 영향에 관하여 고찰하였다.(Fig. 6)



(a)  $y/d$ -horizontal load relationship



(b)  $y/d$ -horizontal load relationship



(c) Relative density-initial slope relationship

Fig.6. Effect of pile length for a relative density and pile head condition

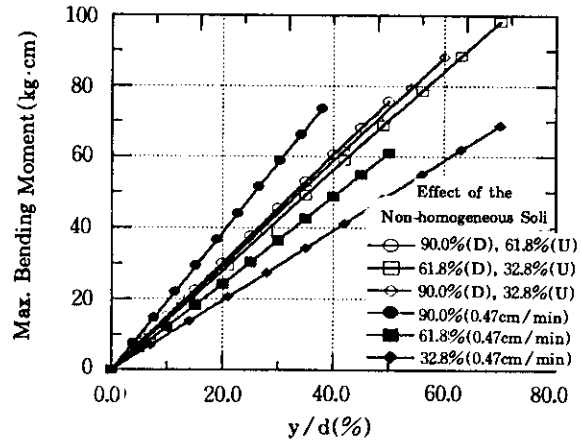
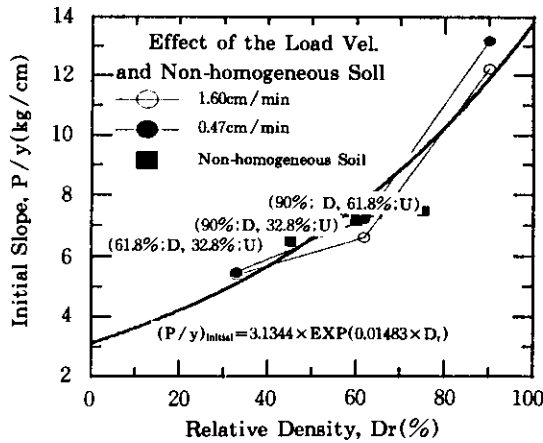
그 결과, 말뚝두부의 고정조건에 대하여 말뚝 근입길이가 21cm에서 51cm로 증가함에 따라  $D_r=32.8\%$ 의 경우, 초기  $P/y$ 가 3.78에서 7.3으로 증가하였다.  $D_r=32.8\%$ 에서 말뚝두부의 고정으로 인하여, 말뚝 근입길이 51cm의 경우, 초기  $P/y$ 가 5.47(free-head)에서 7/3(fix-head)으로 증가하였고, 말뚝 근입길이 21cm의 경우, 1.75에서 3.78로 증가하였다.

그리고, 상대밀도 90%에서는 말뚝 근입길이 51cm 경우, 13.2(free-head)에서 19.0(fix-head)으로 증가하였다. 말뚝 두부 자유조건에서 하중-변위관계는 말뚝직경에 대한 근입길이가 작을수록 동일 수평하중에 대한 변위가 크게 발

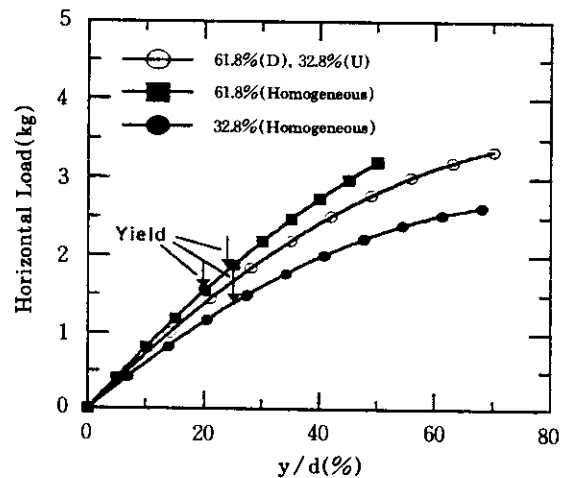
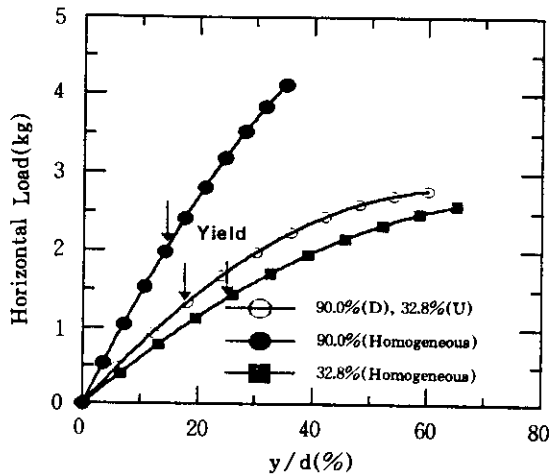
생하며 상대밀도 90%에서는  $y/d$ 가 45% ( $Q_u=3.25\text{kg}$ ) 그리고 32.8%에서는  $y/d$ 가 35%( $Q_u=0.69\text{kg}$ )에서 수평 극한하중이 발생하고 있다. 이와 같이, 말뚝의 수평거동에 대한 말뚝길이와 상대밀도 그리고 말뚝두부 구속조건에 대한 영향중에서도 지반의 상대밀도가, 특히 상대밀도가 클수록, 다른 영향인자들보다 더 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다.

### 3.4 지반의 이질성 영향

현장의 대부분 지반상태는 균질한 지반보다는 비균질토 지반에 가까운 상태를 이루고 있



(a) Comparison of initial slope,  $p/y$  and max. bending moment for homo. and non-homo. soil



(b)  $y/d$ -horizontal load relationship for homo. and non-homo. soil

Fig. 7. Effect of non-homogeneous soil foundation

으나, 모형실험에서 지반 성형의 어려움으로 비균질토 지반에 대한 실험이 거의 이루어지지 못하고 있다. 그러나 본 연구에서는 지반을 traveling spreader법에 의해 2개층으로 성형하여 모형실험을 실시하였다. 하중 변위곡선에 대한 비균질토의 영향은 말뚝두부가 자유조건이며 말뚝강성이  $3.41 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ , 근입길이가 51cm인 말뚝에 대하여 근입길이의 1/2을 기준으로 하부와 상부의 상대밀도가 서로 다른 비균질토로 성형하여 실험을 실시하였으며 그 결과는 Fig. 7과 같다.

균질층 지반과 비균질토 지반의 수평거동을 비교하기 위하여 지반내의 상, 하부 각 상대밀도에 해당하는 균질토 지반의 하중 변위곡선과 비균질토 지반의 곡선을 비교하였으며 그 결과는 Fig. 7-(b)와 같다. 그림과 같이 2개층의 상대밀도 차가 클수록 수평하중에 대한 지반의 지지력이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 그리고 61.8%(D)와 32.8%(U), 90.0%(D)와 32.8%(U)의 하중-변위곡선은 상부(32.8%)와 하부(61.8%, 90.0%)층 상대밀도의 하중-변위곡선 범위내에 존재하고 있으나, 수평변위-최대 휨모멘트관계에서는 하부층 상대밀도의 결과 범위내에서 직선으로 나타나고 있다. 그리고 상부층과 하부층의 상대밀도차가 클수록 상부층의 하중-변위곡선에 가까운 결과를 보여주며, 수평 극한하중은  $y/d$ 가 55%(32.8%:U;90.0%:D)에서 발생하고 있다.

결과적으로 비균질토 지반에서의 말뚝거동은 상부층과 하부층 각 상대밀도에 대한 거동의 복합적인 형태로 나타나고 있으며, 지지력에 영향을 미치는 한계 깊이의 결정을 위하여 좀 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

낙동강 사질토지반에서 강관말뚝의 수평거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 모형실험의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 수평거동에 관한 하중-변위 관계에서 극한

하중은 Mayne과 Kulhawy가 제안한 쌍곡선 함수보다 2차 방정식이 실험결과와 더 잘 일치하였다. 임의 수평변위에 대한 수평하중, 수평 항복하중, 극한하중 그리고 최대 휨모멘트와 항복 최대휨모멘트는 상대밀도를 포함하는 지수함수식의 형태로 회귀분석하여 모델화 하였다.

2. 수평 극한하중에 관한 Brom's의 이론 결과와 실험결과 비교에서, 짧은 말뚝과 긴 말뚝의 결과가 서로 상이하게 나타난 것은 가정된 지반반력이 낙동강 사질토의 지반반력보다 임의깊이에서 작거나 크므로 인한 결과이며, 정확한 지반반력 분포의 파악은 모형실험 또는 현장실험으로만 가능하다.
3. 하중 재하속도와 지반조건의 영향에 관해서는 하중 재하속도가 느릴수록 동일 수평변위에 대하여 1.2~10%의 하중증가를 보이며, 최대 휨모멘트는 최고 27%(D,=61.8%)의 증가를 보였다. 그리고 상대밀도의 증가에 의한 수평하중 및 최대 휨모멘트 증가현상은 상대밀도가 클수록 급격히 증가하고 하중 재하속도가 느릴수록 높은 상대밀도에서 완만한 증가를 나타내고 있다.
4. 말뚝두부 구속조건의 영향에 관해서는 휨성말뚝(L=51cm)에서는 고정조건로 인하여 수평하중이 자유조건보다 34%( $y/d=5\%$ ,  $D=32.8\%$ ), 46%( $y/d=10\%$ ,  $D=90\%$ ) 더 증가하나, 강성말뚝(L=21cm)에서는 115%( $y/d=5\%$ ,  $D=32.8\%$ )로 휨성말뚝보다 3배이상의 증가를 보였다. 이는 휨성말뚝보다 강성말뚝에서 그리고 상대밀도가 클수록 말뚝두부 구속조건의 영향이 크게 작용하고 있음을 보여주고 있다.
5. 말뚝길이에 대한 영향에서 고정조건의 경우, 말뚝 근입길이가 길어짐에 따라 동일 수평변위에 대하여 초기  $P/y$ 가 93% 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 근입길이

21cm 말뚝에서는  $y/d$ 가 45%( $D_r=90\%$ ,  $Q_u=3.25\text{kg}$ )와 35%( $D_r=32.8\%$ ,  $Q_u=0.69\text{kg}$ )에서 수평 극한하중이 발생하고 있다.

6. 균질층 지반과 비균질층 지반의 수평거동의 차이를 알아보기 위한 실험의 결과에서, 하부지반의 상대밀도보다 상부지반의 상대밀도가 하중변위관계에 더 큰 영향을 끼치고 있으며, 하부와 상부지반의 상대밀도 차가 클수록 상부지반 상대밀도의 수평 극한하중과 거의 일치하는 것으로 나타났다.
7. 수평거동에 대한 하중 재하속도, 지반조건(상대밀도), 말뚝두부의 구속조건(자유, 고정), 말뚝조건(말뚝 근입길이), 비균질토의 영향에 관하여 연구한 결과, 지반의 상대밀도와 말뚝 근입길이의 영향이 다른 영향인자들 보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 모형실험으로 알 수가 있었다.

### 감사의 글

“본 연구는 1995년도 포항종합제철 주식회사의 자유공모과제 연구조성비에 의하여 연구가 수행되었으며, 연구비를 지원한 포항제철에 감사드립니다.” 본 연구에 연속해서 “수평 지반반력에 관한 연구”를 발표할 예정입니다.

### 참고 문헌

1. 김병탁·김영수·손원일(1995), “사질토지반에서 수평정적하중에 의한 강관말뚝의 거동에 관한 원심모형실험 연구”, 1995년도 대한토목학회 발표논문(Ⅲ), pp. 395~398.
2. 김병탁·김영수·서인식·이상웅(1996), “이질토지반에서 정적하중에 의한 강관 말뚝의 거동에 관한 실험연구”, 1996년도 대한토목학회 발표논문(Ⅲ), pp. 301~305
3. 김영수·김병탁·방인호·이상웅(1996), 수평하중에 의한 강관말뚝에 관한 연구, 95035, 포항종합제철.
4. 김영수·서인식·김병탁(1996), “원심모형실험에 의한 강관말뚝의 수평거동 연구”, 한국지반공학회, 제12권, 제6호, pp. 5~20.
5. 김영수·서인식·김병탁(1997), “수정 Vlasov 모델에 의한 휨성 강관말뚝의 수평거동 연구”, 대한 토목학회, 제12권, 제6호, pp. 5~20.
6. Kimiura et al.(1993) “水平力を受ける鋼管杭とブコンクリ杭の終局状態に關する遠心模型實驗”, 第28回 土質工學研究發表會, pp. 1785~1788.
7. Banerjee, P.K. and Davies, T.g(1978), “The Behavior of Axially and Laterally Loaded Single Piles Embedded in Non-homogeneous Soils”, *Geotechnique*, Vol.28, No.3, pp. 309~326.
8. Broms, B.B.(1964), “Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils”, *ASCE, SM3*, pp. 123~156.
9. Budhu, M. and Davies, T.g.(1987), “Nonlinear Analysis of Laterally Loaded Piles in Cohesionless Soils”, *Can. Geotech.*, J.24, pp. 289~296.
10. Fleming et al.(1985), *Piling Engineering, John Wiley and Sone, New York.*
11. Georgiadis et al.(1992), “Centrifugal Testing of Laterally Loaded Piles in Sand”, *Can. Geotech.*, J.29, pp. 208~216.
12. Mayne, P.W. and Kulhawy, F.H.(1991), “Load-displacement Behavior of Laterally loaded Rigid Shafts in Clay”, *Proc. 4th Int'l. Conf. On Piling and Deep Foundations, Stresa*, pp. 409~413.
13. Murchison, J.M. and O'Nill, M.W.(1984), Evaluation of p-y Relationships in cohesionless Soils, *In Analysis and Design of Pile Foundations*, New York, pp. 174~191.
14. Peterson, R.W.(1988), “Laboratory Investigation of the Penetration Resistance of Fine Cohesionless Materials”, *Proceedings of 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando*, pp. 895~901.
15. Poulos, H.G.(1971), “Behavior of Laterally Loaded Piles: I-Single Pile”, *ASCE, Vol.97, SM.5*, pp.711~731.
16. Ting, J.M., Kauffman, C.R. and Lovicsek, M(1987), “Centrifuge Static and Dynamic Lateral Pile Behavior”, *Can. Geotech. J.24*,

- pp. 198~207.
17. Ting, J.M.(1987), "Full-Scale Cyclic Dynamic Lateral Pile Response", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 113(1), pp. 30~45.
  18. Vallabhan, C.V.G. and Das, Y.C.(1991), "Modified Vlasov model for Beams on Elastic Foundation", *ASCE*, 177(6), pp. 956~966.
  19. Vlasov, V.Z. and Leont'ev, N.N.(1966), "Beams Plates and Shells on Elastic Foundations", *Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, Israel*.
  20. Vanneste, G., Long, J.H.(1994), "Effects of Cyclic Lateral Loads on Piles in Sand", *J. Geotech. Engrg., ASCE*, 120(1), pp. 225~244.
  21. Yan, L and Byrne, P.M.(1992), "Lateral Pile Response to Monotonic Pile Head Loading", *Can. Geotech.*, J.29, pp. 955~970.

(접수일자 1997. 5. 6)