

사질토 지반에서 군말뚝의 수평거동에 관한 연구

Lateral Behavior of Group Pile in Sand

김 영 수*¹ Kim, Young-Su

김 병 탁*² Kim, Byung-Tak

Abstract

This paper discusses the lateral behavior of group pile in homogeneous and non-homogeneous (two layered) soil. In the group pile, the model tests were to investigate the effects on spacing-to-diameter ratio of pile, pile array, ratio of pile spacing, constraint condition of pile tip, eccentric load and ground condition. The group efficiency and lateral deflection induced in active piles were found to be highly dependent on the spacing-to-diameter ratio of pile, number of pile. Lateral bearing capacities in the group piles of fixed tip, in the case of 6D spacing and 3×3 array, were 40 - 100% higher than those in the group pile of free tip. Based on the results obtained, a spacing-to-diameter of 6.0 seems to be large enough to eliminate the group effect for the case of relative density of 61.8% and 32.8%, and then each pile in such a case behaves essentially the same as a single pile. However, in the case of dense sand, it can be estimated that a spacing-to-diameter of 8.0 seems to be large enough to eliminate the group effect. In this study the group efficiency is illustrated in experimental function with spacing-to-diameter, S/D, relative density and number of pile. The distribution of shear force in lead row piles, in the case of 3×3 array group pile, was 41.6 - 52.4% for 3D spacing and 34 - 40% for 6D spacing, respectively. The shadowing effect for the parallel direction of lateral loading appears to be more significant than the one for the perpendicular direction of lateral loading.

요 지

본 논문은 균질 및 비균질 지반에서의 군말뚝 수평거동에 관하여 고찰하였다. 본 연구는 군말뚝 수평거동에 대한 말뚝 중심간격, 말뚝 배열, 말뚝 중심 간격비, 말뚝 선단 구속조건, 편심하중 그리고 지반조건의 영향들에 관하여 실험적인 연구를 수행하였다. 주동말뚝에서의 군말뚝 효율과 수평변위는 말뚝 중심간격과 말뚝 수에 상당히 의존함을 알 수 있다. 말뚝 중심간격이 6D이고 3×3 배열 말뚝인 경우, 선단 고정말뚝의 수평 지지력은 선단 자유말뚝의 경우보다 40 - 100% 크게 나타났다. 모형실험의 결과들에 근거하여, 군말뚝의 개개 말뚝이 단일말뚝과 동일하게 거동하는 말뚝 중심간격은 상대 밀도 61.8%와 32.8%의 경우 6D 로 나타났으나, 상대밀도 90%의 조밀한 지반에서는 8D 간격으로 추정할 수 있다.

본 연구에서는 군말뚝 효율에 대하여 말뚝 중심간격, 말뚝 수, 그리고 지반 상대밀도의 변수로 표현되는 실험식을 제안하였다. 3×3 배열의 군말뚝에서 앞행(lead row) 말뚝의 하중 분담율은 말뚝 중심간격 3D인 경우에 41.6% - 52.4% 정도 그리고 6D인 경우에 34% - 40% 정도로 나타났다. 군말뚝에서 중첩효과(shadowing effect)는 하중 직각방향 보다는 하중 재하방향에서 더 크게 발생하였다.

Keywords : Group pile, Non-homogeneous, Shadowing effect, Group efficiency, Distribution of shear force, Model test

*1 정희원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

말뚝은 예로부터 토목, 건축의 각종 구조물 기초에 널리 사용되어 오고 있다. 산업의 급속한 발달과 더불어 이러한 구조물이 점차 복잡하여지고 말뚝의 사용재료, 설치 방법 및 사용 목적도 다양화되고 있다. 구조물이 복잡하여짐에 따라 말뚝에 작용하는 하중상태도 복잡하여지고 있다. 이러한 하중조건은 자연적으로 말뚝의 거동을 복잡하게 하고 있으며, 다양하여진 사용목적에 맞게 말뚝을 안전하고 경제적으로 설계하려면 무엇보다도 이런 복잡한 하중조건하에서의 말뚝의 거동 및 말뚝과 지반사이의 상호작용에 관한 연구가 이루어질 필요성이 있다.

말뚝은 상부구조물의 하중을 하부 지반에 안전하게 전달시키기 위하여 사용되었다. 연직하중을 받는 말뚝에 대하여서는 일찍부터 연구되어 설계에 유용하게 활용되고 있다. 그러나, 말뚝에 의하여 지지되고 있는 구조물이 토압, 풍압, 파력, 토사유동에 의한 측방토압 등을 받게 되면 말뚝머리에는 연직력뿐만 아니라 수평력과 휨모멘트도 동시에 작용하게 된다. 기존의 말뚝의 설계에서는 이러한 수평력에 대하여서는 검토가 행하여지지 않았다. 그러나, 최근에는 구조물의 대형화로 인하여 수평력을 받는 말뚝에 주목하지 않을 수 없게 되어, 이에 관한 연구가 국내·외에서 최근에도 활발히 진행되고 있는 실정이다.

현장에서의 군말뚝 실험 수행의 어려움과 과다한 비용으로 인하여 군말뚝에서 각 말뚝의 하중 분담율을 효과적으로 제시할 수 있는 현장실험 결과들이 국외에서는 일부 발표되고 있다. 또한, 국외의 몇몇 현장실험과 실내 모형 실험 결과들에서는 군말뚝의 수평변위가 단말뚝보다 상당히 발생하고 있다고 발표하고 있다(Matlock et al., 1980; Meimon et al., 1986; Brown et al., 1987; McVay et al., 1996). McVay et al.(1994)는 3×3 배열의 군말뚝 실험을 원심모형시험기를 이용하여 Reid Bedford 모래지반에서 상대밀도와 말뚝간격 3D, 5D의 모형실험을 수행하였다. McVay et al.(1998)는 군말뚝 실험을 말뚝간격 3D에서 말뚝 수를 달리한 원심모형실험을 수행하였다. Rao et al.(1996)는 2 - 3개 말뚝의 배열을 달리하며 해성 점성토 지반에서 군말뚝의 거동에 대한 실내 모형실험을 수행하였다. 그리고 Ochoa(1989)는 강성 Matrix방법을 이용하여 군말뚝에서 말뚝 상호작용에 관한 해석연구를 포화 사질 토지반에 대하여 수행하였다. 그러나, 국내에서는 수평하중을 받는 주동 군말뚝의 중요성에 비하여 거동특성, 군말뚝 효율 및 하중 분담율 그리고 지반반력의 감쇄성(p - y

multiplier)에 대한 연구가 거의 없는 실정이다. 군말뚝의 경우에는 모형실험의 어려움으로 그 거동분석이 단일말뚝에 비하여 다양하게 연구되지 못한 실정이며 또한 기존의 국내 연구들은 군말뚝의 수직 및 수평거동에 대한 다양한 연구가 수행되지 않은 실정이다. 따라서, 말뚝 설계시 군말뚝의 수평거동에 대한 다양한 영향인자들의 명확한 이해 및 고려가 되고 있지 못하고 있다.

이에 본 논문에서는 낙동강 유역의 모래를 이용한 균질 및 비균질 건조지반에서의 군말뚝 수평거동에 미치는 말뚝수, 말뚝 배열, 말뚝 중심간격, 지반조건, 그리고 편심하중의 영향을 정량적으로 분석하고 각 말뚝에서 분담하는 수평하중 분담율(distribution of shear force, Q_{EP}/Q_g)과 군말뚝 효율에 관하여 고찰하였으며 군말뚝 효율에 대한 실험식을 모형실험 결과들을 근거로 제안하였다. 그리고, 본 연구에서는 군말뚝의 수평거동을 하중과 변위의 관계에 대하여만 고찰하였다.

2. 모형실험

모형실험에서의 말뚝의 시공상태는 지반 성형 이전에 말뚝을 수직상태로 유지하여 지반을 성형함으로써 주변 지반과의 접촉을 100% 허용하는 방법인 매입말뚝을 사용하였다.

2.1 모형실험 시료

모형실험에서 사용한 낙동강 유역(화원지역)의 모래에 대한 물리적 특성치는 표 1과 같다. 조성된 지반은 시료의 유효직경에 대한 말뚝 직경비가 실제와 다름으로써 내적 크기 효과(internal scale effect)가 발생하여 말뚝의 수평거동에 영향을 줄 수가 있으나, 본 연구에서는 시료의 유효직경에 대한 말뚝 직경비가 85.7로서 내적 크기 효과가 무시될 수 있는 50보다 크기 때문에 사용한 낙동강 모래와 모형 말뚝의 내적 크기 효과는 무시할 수 있다(Peterson, 1988; 김영수의 외인, 1998).

표 1. 낙동강 유역의 모래의 물성치

G_s	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c	$e_{max}^{*1)}$	$e_{min}^{*1)}$
2.675	0.265	0.14	2.0	1.23	1.19	0.88

*1) 최소간극비는 진동법으로 그리고 최대 간극비는 자유낙하법에 의하여 결정

2.2 모형말뚝

표 2. 모형말뚝의 제원

직경 (cm)	두께 (mm)	근입길이 (cm)	탄성계수 (E, kg/cm ²)	항복 휨모멘트 (M _y , kg×cm)	강성 (EI, kg×cm ²)
1.2	0.25	21	2.1×10 ⁶	70.0	34,090

모형실험에서의 모형 말뚝제원은 표 2와 같은 스테인레스 재질의 강관을 사용하였다. 모형실험에 앞선 모형 말뚝에 대한 검증과 모형말뚝의 표면에 부착한 변형 게이지에 대한 휨 모멘트(M)와 변형율(ε)의 상관관계수(α, M=EI ε /y=α ε) 결정은 김영수의 1인(1998, 1999)에서 상세히 설명하였다.

그리고, Broms(1964), Chang(1937) 그리고 Poulos(1971)는 강성 말뚝과 휨성 말뚝의 구분기준으로 각각 무차원 길이계수(βL & ηL)와 상대강성계수(K_r)로 제안하고 있으며, 이 기준들을 근거로 본 연구에 사용한 말뚝의 휨강성을 구분하면 표 3과 같다. 구분기준에 의하면, D_r=90% 지반에서의 K_r & ηL 값은 강성 및 휨성말뚝의 기준을 완전히 만족하지는 못하고 있으나 각 기준들에 있어서 강성과 휨성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 강성 말뚝의 기준값에 더 근접하여 있다.

2.3 지반성형

사질토 지반의 성형방법에는 모래의 낙하방법에 따라 mass spreader법과 traveling spreader법이 있으나, 외부 공기흐름의 영향을 최소화할 수 있다면 모래지반의 높은 균질성을 얻을 수 있는 traveling spreader법으로 지반을 성형하는 동안 외부공기의 유입을 막기 위하여 실험공간을 외부와 차단하여 지반을 성형하였다. 성형한 모래지반의 상대밀도는 모래지반을 성형하기 전에 수 차례에 걸쳐 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 반복 실험하여 구하였다. 낙하높이와 유출 구멍크기의 관계를 요약하면 표 4와 같다. 모형지반을 성형하기 전에 모형 말뚝기초를 모델 박스

표 3. 말뚝 구분기준 (무차원 길이 계수, βL & ηL, 상대강성계수, K_r)

Diameter (mm)	Pile thickness (mm)	Embedded length(cm)	β ¹¹ L, K _r ²¹ , η ³¹ L			Flexural stiffness (10 ⁻³ t×m ²)
			D _r =32.8%	61.8%	90%	
12.0	0.25	21	0.74 ¹¹ (R ⁴¹)	0.82 ¹¹ (R)	1.25 ¹¹ (R)	3.41
			0.18 ²¹ (R)	0.12 ²¹ (R)	0.03 ²¹ (? ⁴¹)	
			1.84 ³¹ (R)	1.99 ³¹ (R)	2.80 ³¹ (?)	

1) β = ⁴√(E_p/4EI) (Chang, 1937); E_p = 말뚝 직경 길이에서의 지반반력
 2) K_r = EI/E_pL⁴ (Poulos, 1971); L=말뚝 근입길이; E_p=말뚝선단부의 지반반력, 즉 62.65t/m²(D_r =90%), 14.67t/m²(D_r =61.8%)
 3) η = ⁵√(n_h/EI) ; E = 2.14×10⁷ t/m² ; I = 말뚝의 단면 2차 모멘트
 n_h =지반반력상수(=E_p/D=nhzn/D at z=D), 즉 1.442t/m³(D_r =90%), 260t/m³(D_r =61.8%); 김영수의 3인(1998a, 1999)
 4) R = 강성말뚝 (rigid pile); ? = 강성말뚝의 기준값 사이에 존재하며 엄밀하게는 강성말뚝으로 보기 어려움

내에 수직을 유지하여 둔 상태에서 모형지반의 성형을 단일말뚝과 군말뚝의 지반조건으로 공중 낙하법에 의해 지반을 3층으로 나누어서 낙동강 모래를 평균 125cm의 낙하 고로 공중 낙하하여 지반을 성형하였다. 공중 낙하법에 의하여 조성된 지반은 상대밀도의 편차가 2%정도로 매우 균질한 것으로 알려져 있으나, 본 연구에서는 조성된 지반의 상대밀도의 편차가 ±3%로 나타났다. 비균질 지반에 대한 지반 성형시에는 임의 깊이를 기준으로 2개층의 상부와 하부의 상대밀도를 서로 달리 성형하기 위하여 먼저 하부층 상대밀도에 대하여 모래를 자유낙하한 후, 다소 불규칙한 지반면을 진공기로 평탄하게 하고 다시 상부층의 상대밀도로 지반을 성형하였다(김영수외, 1998, 1999).

표 4. 낙하높이와 유출구멍 크기 관계

유출구멍 직경 (mm)	낙하고 (cm)	단위중량 (g/cm ³)	내부 마찰각 (°)	상대밀도 (%)
8.0	125	1.40	40 ¹⁾ (36 ²⁾)	90.0
18.0	125	1.34	35 ¹⁾ (30 ²⁾)	61.8
25.0	125	1.28	27	32.8

1) 포화토에서 CU 시험으로 결정(김병탁, 1993),
 2) 건조토에 대한 내부 마찰각

2.4 모형실험 장치

군말뚝의 수평거동은 단일말뚝의 수평거동과는 달리 대부분 말뚝두부가 회전구속 조건으로 시공되고 있다. 본 연구에서 군말뚝의 구속조건은 두부가 회전구속 조건이며 선단부는 자유 및 고정조건(사진 1)으로 하였다. 말뚝 두부에는 정적 수평하중을 가하였으며 군말뚝에 수평하중이 작용할 경우 각 말뚝두부에 작용하는 수평하중을 측정하기 위하여 변형 게이지를 말뚝 상단부에 2개를 부착하였다. 그리고 말뚝두부에서 회전구속 조건을 만족시키기 위하여 모형말뚝 상부에 말뚝 캡을 설치하고 이들 캡은 다시 군말뚝 수평하중 재하판에 연결하여 재하판의 회전을 막았다. 군말뚝에서 말뚝 배열에 따른 실험을 위하여 재

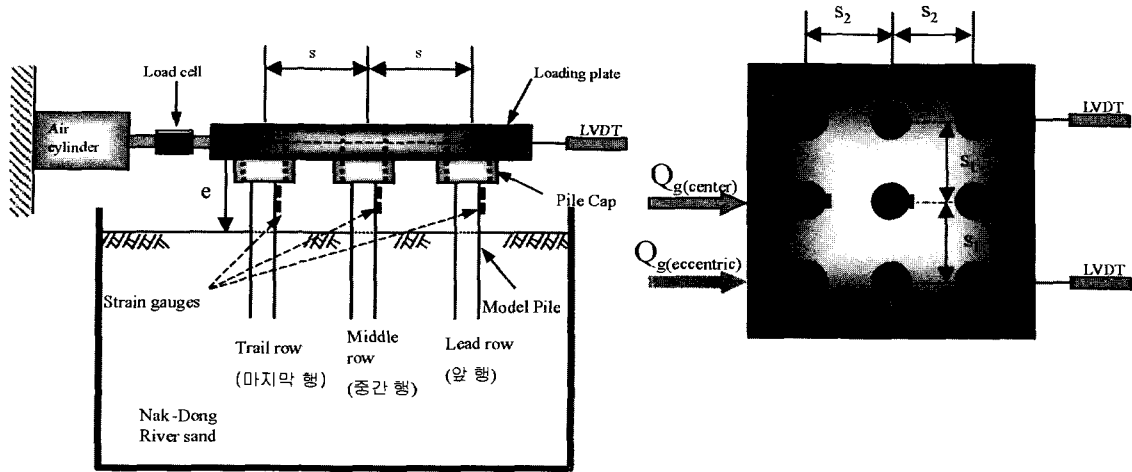


그림 1. 군말뚝 모형실험 장치 개요도

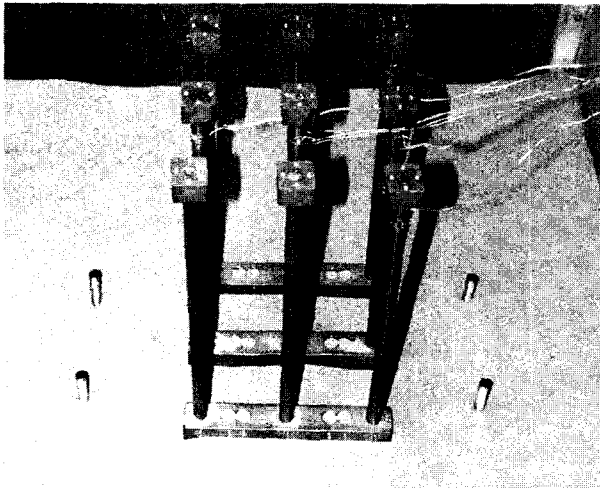


사진 1. 말뚝 선단 고정

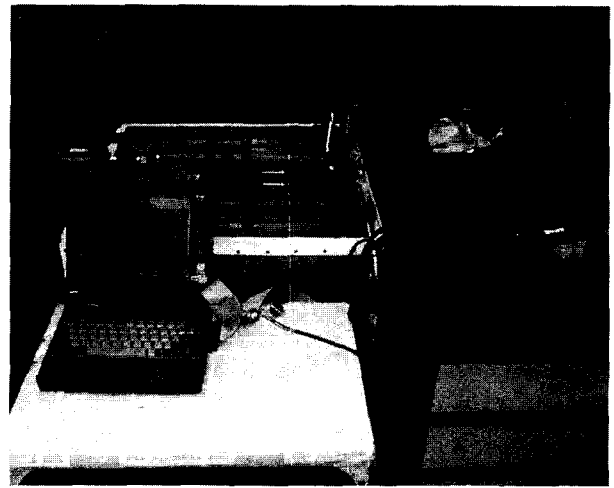


사진 2. 군말뚝 모형실험 전

하판에 각 배열에 필요한 말뚝 캡과의 연결 나사구멍을 미리 제작하여 모형실험을 수행하였다. 군말뚝 수평하중은 말뚝 재하판과 같은 레벨에 최대 100kg의 하중을 가할 수 있는 공기압 실린더를 설치하였다. 그리고 공기압 실린더 전면에 하중계(load cell)를 설치하여 직접 수평하중을 측정하였다. 군말뚝의 수평변위는 하중방향과 평행한 위치

에서 군말뚝의 좌우 말뚝 열에 2개의 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였다.

본 지반공학 연구실에서 지금까지 일련의 계속된 단일 말뚝의 수평거동 특성에 관한 모형실험에 사용한 모형토조의 크기(40×28×80cm)는 군말뚝의 실험에 사용하기에 적합하지 못하여 70×70×45cm 크기의 모형토조를 새

표 5. 모형실험의 말뚝 및 지반의 조건들

Test	Pile spacing		Pile array	Relative density (%)	Non-homogeneity (H/L)	Loading type	Remark
	S ₁	S ₂					
I	3D - 6D	3D - 6D	3×3	90.0, 61.8, 32.8	Homo	Center loaded	Effect of D _i , spacing
II	3D - 6D	3D - 6D	3×1 3×2 3×3	90.0			Effect of array, spacing
III	3D	3D - 6D	3×3	61.8			Effect of S ₂ /S ₁
IV	3D	3D	3×3	E _{H2} /E _{H1} =0.18, 5.56	0.25 - 0.75 (Non-homo)	Eccentric loaded	Effect of H/L
V	3D	3D	3×2	90.0	Homo		Effect of loading type
VI	3D	3D - 6D	3×3	61.8			

로 제작하여 균말뚝 실험을 수행하였다. 그리고, 균말뚝의 모형실험 장치 개요도는 그림 1과 같다. 균말뚝 수평하중에 의한 각 말뚝에서의 수평하중은 소형 하중계 대신에 변형 게이지로 측정된 변형률(ϵ_U, ϵ_D)로부터 구하였으며, 그 식은 다음과 같다.

$$Shear Force = \frac{dM}{dz} = \frac{M_U - M_D}{h} = \frac{\alpha \epsilon_U - \beta \epsilon_D}{h} \quad (1)$$

여기서, h 는 변형 게이지들간의 거리이며 아래첨자 U 와 D 는 변형 게이지의 상부와 하부표시이고 α 및 β 는 변형 게이지와 휨 모멘트관계 곡선의 기울기이다.

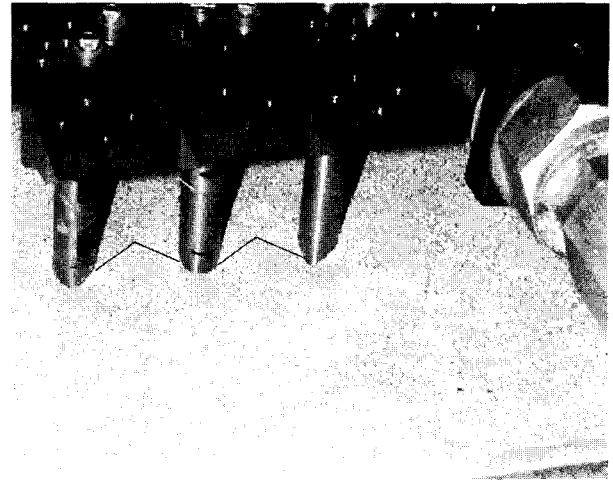
실험장치들을 성형된 지반에 위치한 말뚝기초 주변에 각각 배치한 후 이들을 M&TKOREA 사에서 자체 제작한 MT16 데이터 수집기에 연결하고, 수집한 말뚝기초의 응력 변형율, 수평변위, 그리고 수평하중의 데이터들은 다시 PC 컴퓨터의 PCMCIA 카드를 통하여 저장된다. (사진 2)

3. 모형실험 결과 및 분석

Peterson et al.(1996)에 의하면, 3D 간격의 균말뚝에서 수평변위는 동일 평균 수평하중(Q_g/n)에서의 단일말뚝 수평변위보다 2-2.5배 증가하여 발생한다고 발표하였다. 그러나, 낙동강 유역의 사질토 지반에 대한 균말뚝 모형실험 결과에서는 상대밀도 90%인 균질지반에서 단일말뚝보다 4.3배정도 나타났다. 균말뚝에서 각 말뚝이 단일말뚝으로서의 거동을 보이는 한계 말뚝간격을 Rao et al.(1996)는 6D이상, McVay et al.(1998)는 5D이상 그리고 Barton (1980)는 8D이상으로 제안하고 있다. 이와 같이, 한계 말뚝간격에 대한 결과들이 각 지반의 특성에 따라 상당히 차이를 보이고 있다. 이에 본 연구에서는 낙동강 사질토 지반에 대한 지반조건, 말뚝간격, 말뚝의 배열, 균말뚝의 선단 고정조건들이 균말뚝 효율과 균말뚝의 수평거동 그리고 균말뚝에서의 하중분담률에 미치는 영향성을 총 37회의 모형실험 결과로부터 고찰하였으며, 균말뚝 기초의 설계 시 적용하는 균말뚝 효율에 관한 다양한 자료를 제공하고 자 한다.

3.1 균말뚝의 수평거동

균말뚝에서 개개의 말뚝 거동은 단일말뚝의 거동과는 대체로 다른 양상을 보이고 있다. 즉, 균말뚝과 단일말뚝



(a) 3×3 배열, 3D, $D_r=90\%$



(b) 3×3 배열, 4D, $D_r=90\%$

사진 3. 모형실험 후 마지막 행(trail row) 말뚝에서의 중첩 효과

에서의 동일한 평균 수평하중(Q_g/n)에 대한 수평변위의 발생정도는 단일말뚝보다 균말뚝에서 상당히 일어나고 있다. 이는 균말뚝에서의 말뚝과 말뚝 상호간의 지반반력 영향범위가 중복되기 때문이며, 이를 Brown et al.(1987)이 중첩 효과라고 제안한바 있다. 그리고 이 효과는 점성토 지반에서 보다는 사질토 지반에서 더 크게 발생하는 것으로 발표되었다.

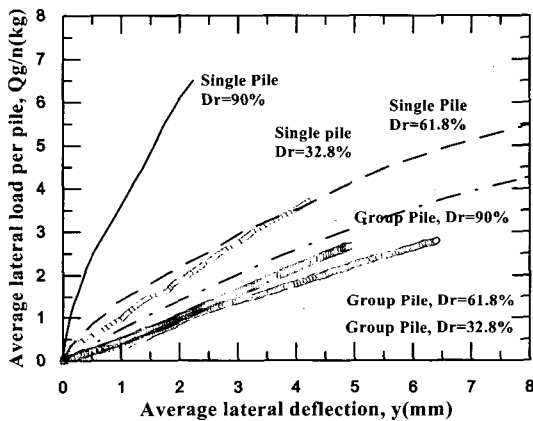
균말뚝의 앞 행에서는 동일 행(row) 말뚝간의 지반반력 중복현상이 발생하나, 중간 행(middle row)과 마지막 행(trail row)에서는 동일 행 말뚝뿐만 아니라 하중재하 방향 앞쪽 말뚝간의 지반반력 중복현상이 발생한다. 이러한 현상은 말뚝 중심간격이 좁을수록 상당히 일어나고 있으며, 모형실험에서 이를 직접 관찰할 수 있었다(사진 3). 사진 3은 $D_r=90\%$ 인 균질지반에 3×3 배열의 말뚝이 3D와 4D의 말뚝 중심간격으로 모형실험 하는 동안에 발생하는 중첩

효과를 나타낸 것이며 사진내 검정선은 중첩 효과에 의하여 나타나는 지반 용기부분의 선이다. Norris(1998)에 의하면, 사각형 말뚝의 수평저동시 주변지반의 저항이 말뚝 양측면에서 시계 또는 반시계 방향으로 내부 마찰각 만큼의 범위로 작용한다고 제안한바 strain wedge 모델을 제안하고 있다. 본 모형실험에서 측정된 주변지반의 저항범위 각은 각 상대밀도 90, 61.8, 32.8%에 대하여 55°, 49°, 45°로 나타나며 이는 건조토의 내부 마찰각보다 50-60% 큰 값으로 Norris의 제안과는 다른 실험결과를 얻었다.

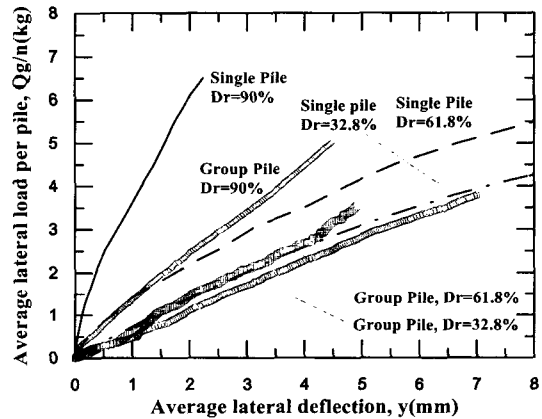
3.1.1 말뚝 중심 간격과 상대밀도의 영향

그림 2는 3×3 배열의 군말뚝에서 말뚝 중심간격을 3D, 4D, 6D로 달리하며 각 말뚝 중심간격에서 지반의 상대밀도를 3가지로 달리한 경우와 말뚝 선단 경계조건을 달리하여 모형실험한 평균 수평하중(Q_g/n) - 평균 수평변위(y) 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이, 군말뚝의 Q_g/n - y 관계는 단일말뚝의 경우와 거의 동일한 현상으로 상대밀도 90%인 조밀한 지반과 상대밀도 61.8%의 중간밀도 지

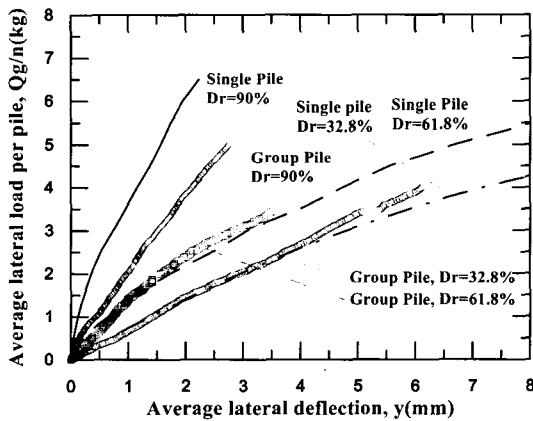
반에서 상당한 차이를 보이거나 중간 밀도 지반과 상대밀도 32.8%의 느슨한 지반과는 큰 차이를 보이지 않았다. 말뚝 중심간격이 6D인 경우에 군말뚝의 Q_g/n - y 곡선은 중간밀도의 지반과 느슨한 지반에서 단일말뚝의 Q - y 곡선에 아주 근접하여 수평하중이 증가할수록 단일말뚝의 경우보다 적은 수평변위를 나타내고 있다. 말뚝 중심간격이 4D인 경우, 평균 수평하중에 대한 수평변위의 발생정도가 단일말뚝의 경우보다 대략 1.5-2.0배 증가하였으며, 군말뚝의 Q_g/n - y 곡선은 말뚝 중심간격에 관계없이 하중증가에 따라 거의 직선적인 증가를 보이고 있다. 이는 단일말뚝에서 지반의 항복이 발생한 후 작용하는 수평하중을 말뚝기초가 부담하게 되는데 이때 강성말뚝인 경우 진행성 수평변위가 상당히 급속도로 진행되나, 군말뚝의 경우 작용하는 수평하중에 대하여 하중방향으로 가장 앞쪽에 있는 행 말뚝이 가장 큰 하중 분담을 하고 있으며 이로 인하여 앞 행 말뚝 주변지반의 항복이 발생하더라도 중간 행과 마지막 행 말뚝 주변지반의 항복은 발생하지 않게 되어 군말뚝 수평하중의 증가에 따른 하중을 중간 행과 마지막 행 말뚝



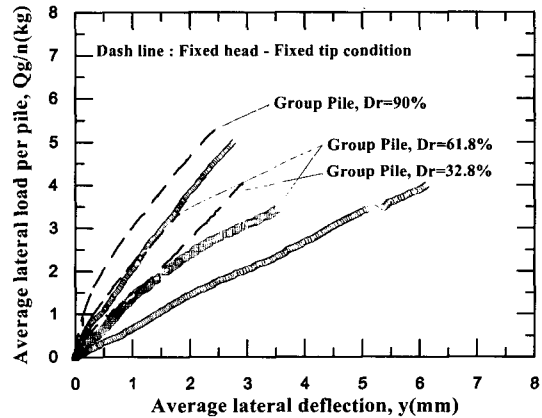
(a) 3D 말뚝 중심 간격



(b) 4D 말뚝 중심 간격



(c) 6D 말뚝 중심 간격



(d) 말뚝 두부자유-선단 고정조건 (6D 간격)

그림 2. 말뚝 간격에 따른 Q_g/n - y 관계 ($D_r=90, 61.8, 32.8\%$)

에 분담하기 때문으로 사료된다.

그리고 말뚝 중심간격이 6D인 경우의 군말뚝에서 말뚝 선단 구속에 의한 평균 수평하중은 수평변위 1mm에서 40%($D_r=90\%$) - 100%($D_r=32.8$) 범위로 증가하여 나타났으나, 지반의 상대밀도가 증가할수록 동일 수평변위에서의 수평하중 증가정도는 감소하여 나타났다(그림 2-d). 이는 지반의 상대밀도가 느슨할수록 말뚝 선단 고정조건에서는 수평거동이 말뚝의 강성에 지배를 받기 때문이다.

3.1.2 군말뚝 배열의 영향

대부분의 현장에서 시공되는 말뚝의 배열형태는 정방형 배열뿐만 아니라 직사각형 및 다양한 배열로 시공되고 있다. 이에 본 모형실험에서는 정방형 배열과 직사각형 배열에 대한 군말뚝 수평거동 특성을 고찰하였다. 정방형 배열은 3×3 배열이며 직사각형 배열은 3×2 배열과 3×1 배열의 군말뚝에 대하여 모형실험을 수행 하였다. 그림 3은 말뚝배열과 말뚝 중심간격을 각각 3가지로 달리하며 상대 밀도 90%인 지반에 대하여 실험한 $Q_g/n - y$ 관계를 나타낸 것이다.

말뚝 중심간격이 3D인 경우, 말뚝 수가 3개로 증가함에 따라 3×1 배열의 군말뚝에서 평균 수평 지지력은 수평변위 2mm에 대하여 단일말뚝의 43% 정도로 상당히 적게 나타났다으며 말뚝의 열 수가 증가함에 따라 횡방향 말뚝간의 중첩 효과가 적게 발생하여 동일 수평변위에 대한 평균 수평 지지력은 10% - 17% 정도의 범위로 감소하였다.

말뚝 중심간격이 6D인 경우, 3×1 배열의 군말뚝에서 평균 수평 지지력이 수평변위 2mm에서 단일말뚝의 84% 정도로 감소하여 나타났으며 말뚝의 열 수가 증가함에 따라 동일 수평변위에 대한 평균 수평 지지력은 8% - 16% 정도의 범위로 감소하였다. 실제로, 모형실험 동안에 말뚝

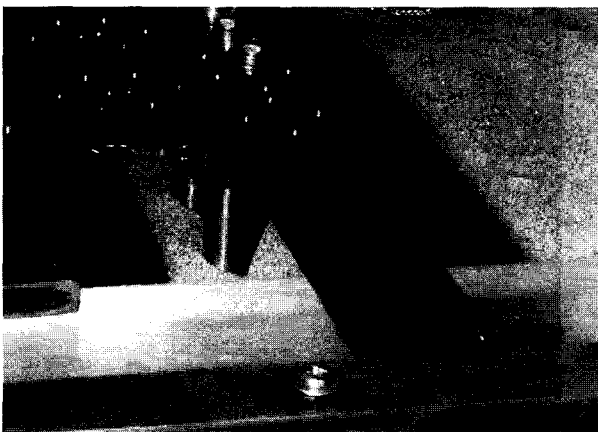
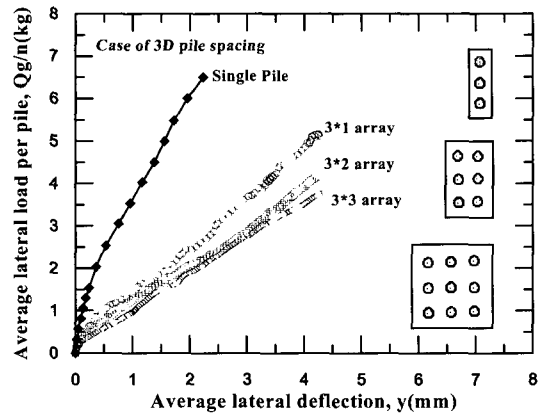


사진 4. 마지막 행 말뚝에서의 지반 용기

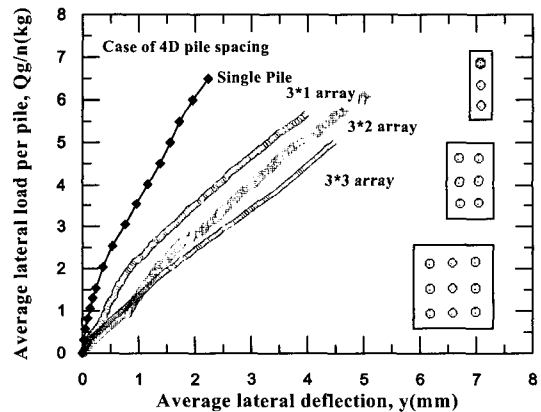
중심간격이 3D로 좁은 군말뚝에서 각 말뚝의 지반반력 범위가 중첩되어 나타나는 지반의 용기형상을 관찰 할 수 있었다(사진 4).

3.1.3 말뚝 중심간격비(S_2/S_1)의 영향 및 중심말뚝의 제거 효과

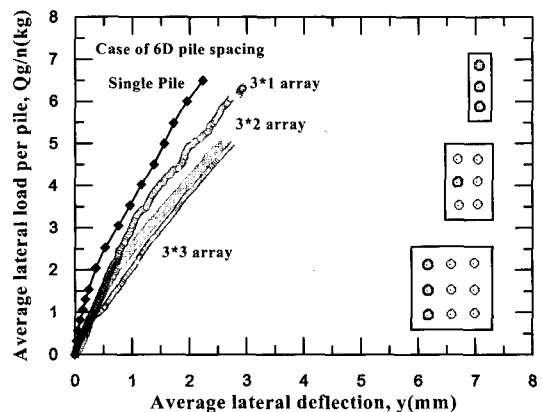
그림 2와 3에서 고찰한바와 같이 군말뚝 수평하중 재하



(a) 3D 말뚝 중심간격



(b) 4D 말뚝 중심간격



(c) 6D 말뚝 중심간격

그림 3. 말뚝 배열에 따른 $Q_g/n - y$ 관계 (3D, 4D, 6D 말뚝 간격)

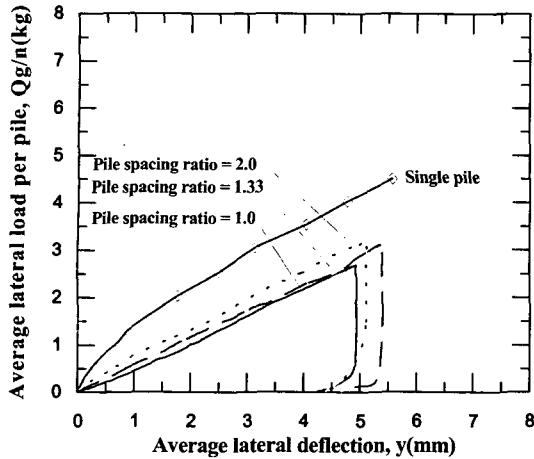


그림 4. 말뚝 중심간격비(S_2/S_1)에 따른 $Q_g/n - y$ 관계

방향과 직각방향으로의 중첩 효과가 상당히 발생하며, 특히 조밀한 지반에서의 중첩 효과가 느슨한 지반에서 보다 크게 발생하고 하중 직각방향 보다도 하중 재하방향의 중첩 효과가 더 크게 나타나고 있음을 실험결과들로부터 알 수 있다. 이에 본 연구에서는 하중 직각방향의 말뚝 중심간격(S_1)을 3D로 고정하고 하중 재하방향의 말뚝 중심간격(S_2)을 달리하여 중간밀도($D_r=61.8\%$)의 지반이고 3×3 말뚝배열의 경우에 대하여 모형실험을 수행하였다. 중간밀도의 균질 지반에서 S_1 이 3D이고 S_2 을 3D($S_2/S_1=1.0$) - 6D($S_2/S_1=2.0$)로 증가한 실험의 $Q_g/n - y$ 관계는 그림 4와 같다. 그림에서 말뚝 간격비(S_2/S_1)가 2배 증가함에 따라 수평변위 2mm에서의 평균 수평하중은 약 35% 증가하여 나타났으며 하중 직각방향의 말뚝 중심간격이 좁은 관계로 하중 재하방향의 말뚝 중심간격을 2배 증가하여도 중첩 효과의 저감효과는 크게 나타나지 않았다.

군말뚝에서 수평하중이 작용할 경우 말뚝 중심열에서는 각 말뚝두부에서 동일한 수평변위가 발생하게 된다. 이때 말뚝 재하방향의 앞 행에서 부담하는 하중이 마지막 행에서 부담하는 하중보다 크게 발생하는 것으로 알려져 있다(Matlock et al., 1980; Meimon et al., 1986; Brown et al., 1987; McVay et al., 1996). 이는 앞서 설명한바와 같이 중첩 효과로 인한 것이다. 실제로 본 실험에서도 말뚝 중심열에서 마지막 행 말뚝의 하중 분담률이 가장 적게 나타났다. 이에 본 연구에서는 정방형으로 배열(3×3)된 군말뚝(3D 간격)에서 중심말뚝의 지지력에 대한 역할을 파악하고자 중심말뚝을 제거한 군말뚝의 모형실험을 수행하였으며, 중심말뚝을 제거한 군말뚝의 $Q_g/n - y$ 관계는 그림 5와 같다. 그림에서 보는바와 같이 제거한 군말뚝과 제거하지 않는 군말뚝의 $Q_g/n - y$ 곡선은 거의 일치하여 나타나 군말뚝

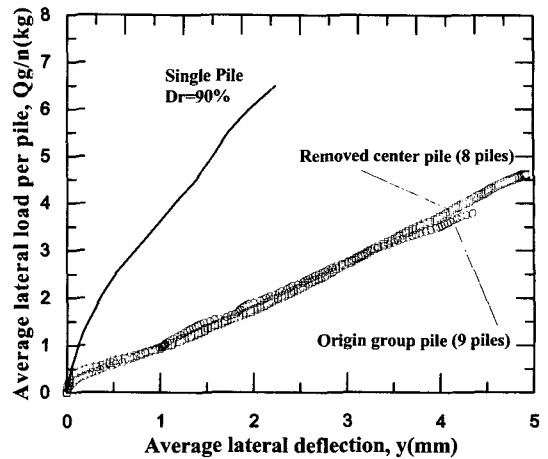


그림 5. $Q_g/n - y$ 관계에 대한 가운데 말뚝의 제거효과

효율 측면에서 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이는 중심말뚝이 제거된다 하더라도 마지막 행의 중심말뚝에서 제거된 중심말뚝의 하중을 분담함으로써 가능하다고 사료된다.

3.1.4 지반의 비균질성 영향

비균질 지반에서의 군말뚝 수평거동이 단일말뚝의 수

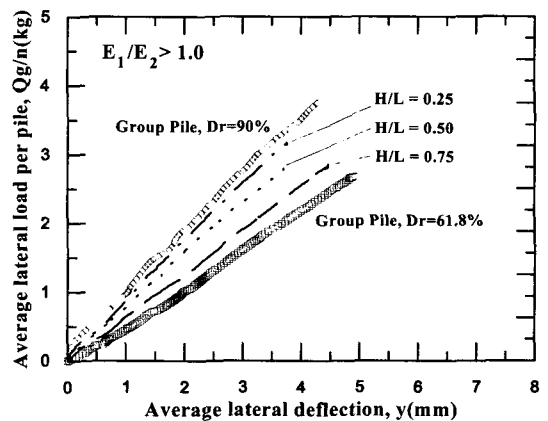
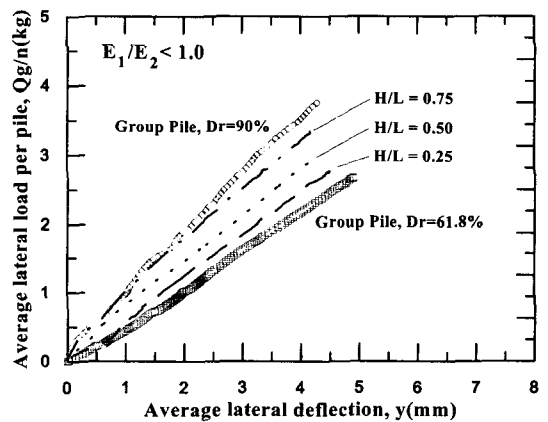


그림 6. 비균질 지반에서 군말뚝의 $Q_g/n - y$ 관계

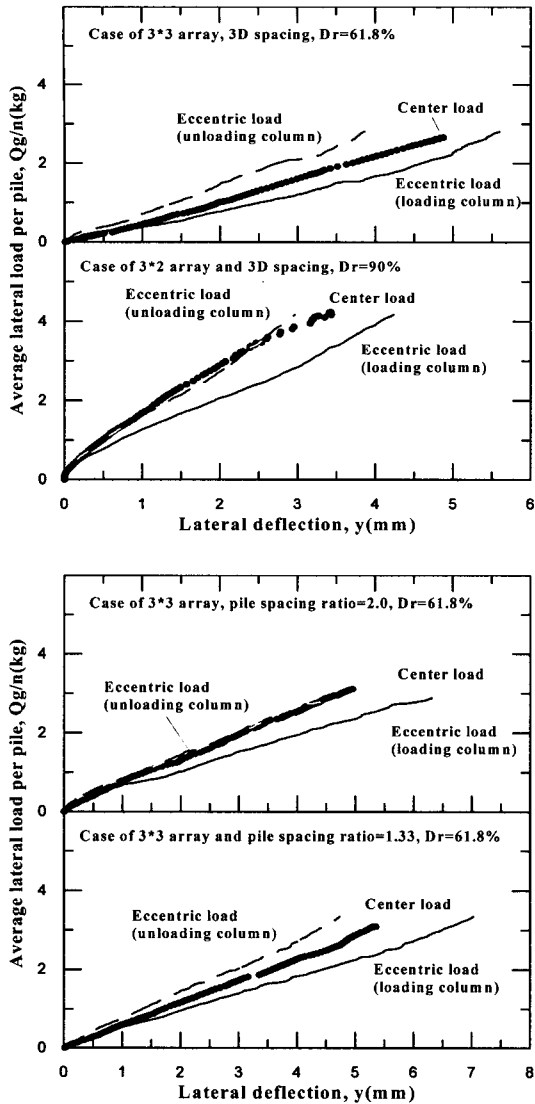


그림 7. 하중 편심에 의한 $Q_g/n - y$ 관계의 변화

평거동과 다른 양상을 보이는가를 파악하기 위하여 본 연구에서는 상부층 또는 하부층의 지반강성이 큰 비균질 지반을 단일말뚝과 동일하게 말뚝 근입길이의 25, 50, 75% 지점에서 상부와 하부층의 지반 상대밀도를 달리하여 모형실험을 3×3 말뚝배열과 3D($S_2/S_1=1.0$) 그리고 말뚝두 부 고정 - 선단 자유조건에 대하여 수행하였다. 비균질 지반에서 군말뚝의 $Q_g/n - y$ 관계는 그림 6과 같다. $Eh_1/Eh_2=0.18$ 인 비균질 지반에서 지반강성이 큰 하부층의 두께가 증가함에 따른 평균 수평 지지력은 22%($H/L=0.25$) - 80%($H/L=0.75$) 정도 증가하였으며, $Eh_1/Eh_2=5.56$ 인 비균질 지반에서 상부층의 두께가 증가함에 따른 평균 수평 지지력은 22%($H/L=0.25$) - 94%($H/L=0.75$) 정도 증가하였다. 그리고 군말뚝의 $Q_g/n - y$ 곡선은 단일말뚝의 $Q_g/n - y$ 곡선들과는 달리 균질지반의 곡선 범위내에서 상대밀도 90%인 균질지반의 곡선에 편중하지 않고 나타났다.

3.1.5 하중 편심영향

군말뚝에 가해지는 수평하중이 군말뚝의 중심열에만 작용하는 경우가 대부분을 차지하는 것은 아니다. 즉, 고대부분에서 부등침하로 또는 상부구조물의 부등하중으로 인한 편심하중이 가해질 경우가 발생하게 된다. 이때 이러한 편심하중에 의한 군말뚝의 부등변위가 발생하여 군말뚝 하중 재하방향으로의 회전이 발생하게 된다. 이에 본 연구에서는 군말뚝의 S_1 을 3D로 일정하게 한 후 군말뚝의 S_2 을 달리한 경우와 3×2의 말뚝 배열에 대한 $Q_g/n - y$ 관계를 고찰하였으며, 그 결과는 그림 7과 같다.

편심하중 재하시 군말뚝의 수평변위는 하중을 재하하는 열(column)과 기초중심과 대칭되는 말뚝열에서 측정하였다. 편심하중에 의한 하중재하지점의 $Q_g/n - y$ 곡선은 S_2 가 증가할수록 중심열 하중재하 $Q_g/n - y$ 곡선에서 벗어나 상당히 완만하여지며 2kg의 평균 수평하중에 대한 수평변위가 $S_2/S_1=2.0$ 의 경우 36% 증가하였다. 편심하중 재하 말뚝열과 중심 대칭되는 말뚝열에서의 수평변위는 S_2 가 증가할수록 그리고 군말뚝의 하중 재하방향 길이와 하중 직각방향 폭의 비가 2.0인 경우, 즉 $S_2/S_1=2.0$ 이고 S_1 이 3D이며 3×2 말뚝배열의 경우, 에서 중심열 하중재하시의 평균 수평변위와 거의 일치하였으며, 편심하중 재하시 군말뚝의 하중재하 방향으로의 회전각도는 1.471° ($S_2/S_1=1.0$), 1.166° ($S_2/S_1=1.33$), 0.898° ($S_2/S_1=2.0$)로 S_2 가 증가할수록 지반에서의 수동저항이 증가하여 S_2 가 2배 증가에 회전각도가 39% 감소하였다.

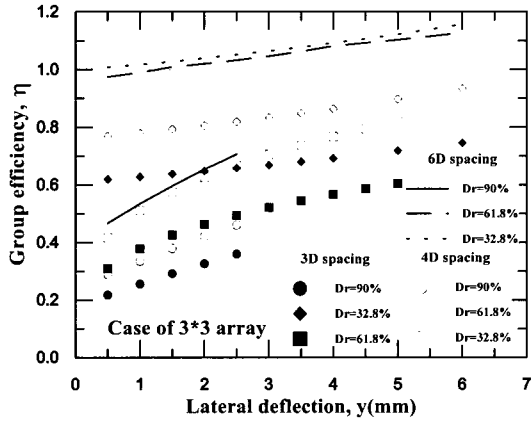
3.2 군말뚝의 효율

일반적으로, 군말뚝에서 수직하중에 의한 군말뚝 효율은 말뚝 중심간격이 충분히 클 경우에 1.0 이상으로 알려져 있다. 그러나 수평하중을 받는 군말뚝의 효율은 설계시대 개 1.0정도로 사용하여 설계하고 있는 실정이다. 이는 군말뚝의 수평거동에 관한 연구가 국내에서 거의 전무하여 명확한 군말뚝 효율을 얻을 수 없기 때문으로 판단된다. 본 연구에서는 군말뚝 효율을 극한 수평하중의 비로 결정할 수가 없었다. 이는 모형말뚝의 연속적인 사용을 위하여 말뚝의 휨모멘트가 항복점 이하에서 발생하도록 실험을 수행하였으며, 또한 대부분의 말뚝 설계에서도 말뚝의 구조적 안전성을 전제로 설계되고 있기 때문이다. 모형실험의 결과에 의한 수평변위와 군말뚝 효율의 관계를 3×3 말뚝 배열의 경우와 상대밀도 90%의 지반 경우에 대하여만 나타내면 그림 8과 같다. 그림에서처럼 군말뚝 효율은 수평

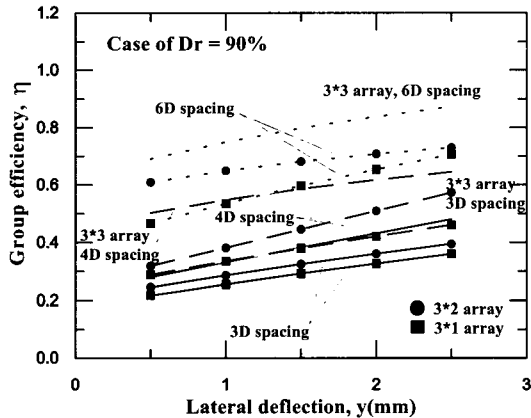
표 6. 각 모형실험 조건에서의 군말뚝 효율 ($y/D=20\%$ 의 경우)

Case of 3×3 array, $S_2/S_1=1.0$				Case of $D_r=90\%$, $S_2/S_1=1.0$			
$D_r(\%)$	Pile spacing			Pile array	Pile spacing		
	3D	4D	6D		3D	4D	6D
90.0	0.40	0.46	0.71	3×1	0.53	0.64	0.87
61.8	0.50	0.67	1.04	3×2	0.40	0.52	0.73
32.8	0.66	0.82	1.08	3×3	0.40	0.46	0.71

Case of $D_r=61.8\%$, 3×3 array				Case of Non-homogeneous, $3D, 3 \times 3$ array			
Pile spacing	Center loading	Eccentric loading	E_{n1}/E_{n2}	H/L	H/L	H/L	H/L
				$=0.75$	$=0.50$	$=0.25$	
3D	S_1	S_2					
	3D	0.50	0.38	0.18	0.43	0.39	0.38
	4D	0.54	0.44	0.56	0.38	0.41	0.39
6D	0.63	0.49					



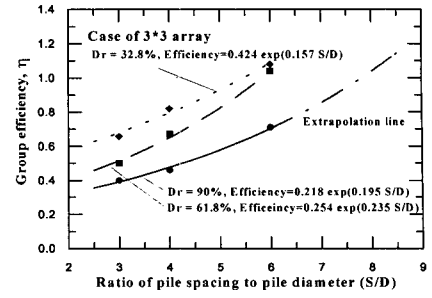
(a) 3×3 말뚝배열의 경우



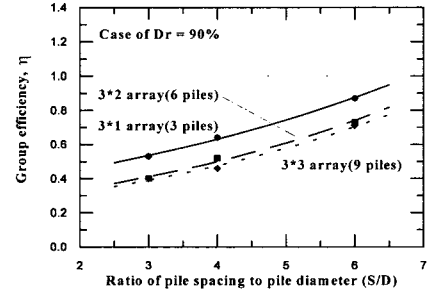
(b) 상대밀도 90%의 경우

그림 8. 수평변위에 따른 군말뚝 효율의 변화

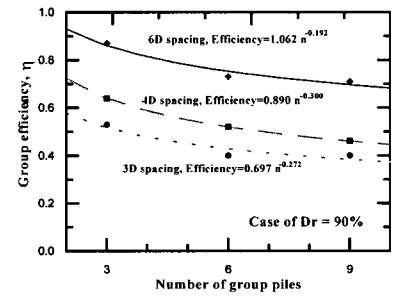
변위의 증가에 따라 비선형적인 증가양상을 보이고 있으며 말뚝 중심간격이 4D 이상에서 효율이 상당히 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 군말뚝 효율의 결정시 극한수평



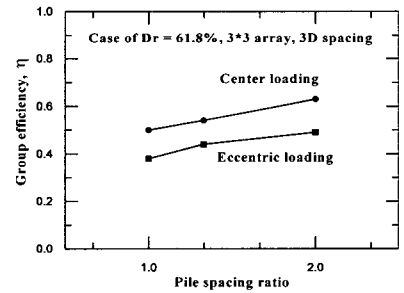
(a) 상대밀도의 영향 ($D_r=90, 61.8, 32.8\%$)



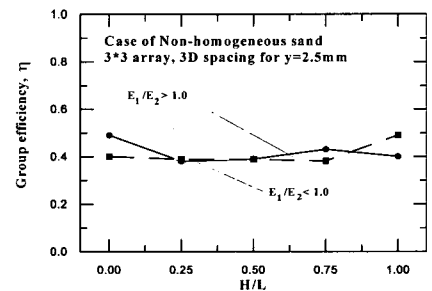
(b) 말뚝 배열의 영향 ($3 \times 1, 3 \times 2, 3 \times 3$ array)



(c) 군말뚝 수의 영향



(d) 말뚝 중심 간격비의 영향



(e) 비균질성의 영향

그림 9. 군말뚝 효율에 대한 인자들의 영향

하중의 비를 이용한다면 과도한 수평변위 발생시의 효율을 적용할 수 있으며 균말뚝 효율 자체가 과대평가 될 가능성이 있다. 또한, 일본 도로교 시방서와 우리나라 도로교 시방서에서 말뚝의 허용 수평변위를 1.5cm로 적용하고 있는 실정에서는 극한 수평하중의 비로써 균말뚝 효율을 적용하는 것은 말뚝 구조물의 안정성에 문제가 발생할 수 있는 가능성이 있다.

따라서 본 연구에서는 동일 평균 수평변위에서의 수평하중의 비로 결정하였으며, 산정 식은 다음과 같다. 식 (2)에 의한 각 모형실험에서의 균말뚝 효율(η_h)을 요약하면 표 6, 그림 9와 같다.

$$\begin{aligned} \text{균말뚝 효율} (\eta_h) \\ = \frac{\text{동일 수평변위에서의 균말뚝 수평하중, } Q_g}{\text{동일 수평변위에서의 단일말뚝 수평하중의 합, } nQ_s} \end{aligned} \quad (2)$$

3.2.1 말뚝 중심간격과 상대밀도의 영향

그림 9에서와 같이 3×3 말뚝배열(그림 9-a)에 있어 균말뚝 효율은 말뚝 중심간격의 증가에 대하여 비선형적으로 증가하고 있으며, 특히 상대밀도 61.8% 이하의 균질지반에서는 말뚝 중심간격이 6D인 경우 균말뚝 효율이 1.0 이상으로 균말뚝내의 각 말뚝이 단일말뚝과 동일한 응력 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 조밀한 지반에서는 말뚝 중심간격이 6D에서도 균말뚝 효율이 1.0이하로서 균말뚝이 단일말뚝과 같은 응력거동을 보이는 한계 말뚝간격이 8D 이상으로 제한한 Barton(1980)의 결과가 본 연구에서 사용한 낙동강 유역 모래에도 적용 가능할 것으로 사료되며 이에 대한 정확한 검증을 위하여 8D의 말뚝간격에 대한 모형실험의 수행이 요구된다. 그리고 균말뚝 효율에 대한 실험식은 지수함수식의 형태로 제안하였으며 그림과 함께 나타내었다. 균말뚝 효율은 상대밀도 및 말뚝 중심간격에 상당히 의존하여 나타났다. 즉, 상대밀도가 90%에서 61.8%로 느슨할 경우 균말뚝 효율이 1.25 - 1.46배 증가하였다.

3×3의 정방형 말뚝배열이고 $S_2/S_1=1.0$ 인 균말뚝에서의 효율은 실험 결과로부터 다음과 같은 식 (3)에서 지반 상대밀도와 말뚝 중심간격(S/D)을 변수로 하는 실험식으로 제안할 수 있다.

$$\eta = 0.146 \times e^{\frac{34.9}{D_r} + 0.188 \frac{S}{D}} \quad (3)$$

3.2.2 균말뚝 배열과 말뚝 수의 영향

균말뚝 효율에 대한 말뚝 배열의 영향은 정방형 말뚝 배열에서 1개의 열을 소거하더라도 동일한 말뚝 중심간격에서의 균말뚝 효율은 큰 차이를 보이지 못하였다(그림 9-b). 즉, 3×3 배열에서 3×2 배열로 말뚝 배열이 바뀐다하여도 수평하중을 받는 균말뚝에서의 중첩 효과는 여전히 말뚝과 말뚝간에 존재하고 있어 균말뚝 효율의 증가에는 큰 효과를 나타내지 못하였다. 그리고, 균말뚝 배열에서 말뚝열 수를 1/3로 줄일 경우 균말뚝 효율은 약 23 - 39%정도 증가하여 나타나나 말뚝 중심간격이 넓을수록 균말뚝 효율 증가에는 큰 효과가 나타나지 않았다(그림 9-c). 이는 말뚝 배열이 3×3 인 경우보다 3×1 인 경우에서 말뚝 상호간의 지반반력 중첩에 의한 중첩 효과가 적게 나타나기 때문으로 판단된다. 그리고 상대밀도 90%인 균질지반에서 $S_2/S_1=1.0$ 인 균말뚝에서의 효율은 실험 결과로부터 다음과 같은 식 (4)에서 말뚝 수(n)와 말뚝 중심간격(S/D)을 변수로 하는 실험식으로 제안할 수 있다.

$$\eta = 0.372 \times (S/D)^{0.6} n^{-0.25} \quad (4)$$

3.2.3 하중 편심과 비균질성의 영향

균말뚝의 S_1 을 3D로 한 상태에서 S_2 을 1.33, 2.0배 증가시킨 경우 균말뚝의 효율이 $S_2/S_1=2.0$ 에서 1.26배 정도 증가하였다(그림 9-d). 또한 3×3의 말뚝 배열에서 균말뚝 수평하중이 말뚝의 중심에서 3D 떨어진 지점에 작용하는 편심하중에 의한 균말뚝 효율의 크기는 그림 9-(d)에서와 같이 $S_2/S_1=2.0$ 이상에서 거의 증가하지 않으며 균말뚝 중심열에 작용하는 경우보다 19% - 24% 감소하여 나타났다. 이와 같이, 균말뚝의 경우에서도 편심하중이 균말뚝 효율에 대하여 영향을 미치고 있으므로 설계시 편심하중의 작용여부를 고려하여 균말뚝 효율의 산정이 필요하다고 사료된다.

균말뚝 효율에 대한 지반의 비균질성의 영향을 고찰하면 그림 9-(e)와 같이 도시할 수 있다. 비균질 지반에서 지반강성이 큰 하부층 또는 상부층의 두께가 증가함에 따른 균말뚝 효율은 비균질 지반의 상부층 및 하부층의 상대밀도에 해당하는 균질지반에서의 균말뚝 효율값의 범위내에 존재하나, 거의 변화없이 일정하여 $E_1/E_2=0.18$ 및 5.56인 비균질 지반 모두에서 약 0.4로 제한할 수 있으며 이 제한한 값은 본 모형실험에서의 제한된 실험조건내의 경우에 한정된다 할 수 있다.

표 7. 각 모형실험 조건에서의 하중 분담률

Case of 3×3 array, $S_2/S_1=1.0$				Case of $D_r=90\%$, $S_2/S_1=1.0$			
D_r (%)	Pile spacing			Pile array	Pile spacing		
	3D	4D	6D		3D	4D	6D
90.0	41.6	41.5	40.0	3×1	40.0	41.2	38.0
61.8	47.3	42.0	35.0	3×2	42.3	42.0	40.0
32.8	52.4	44.0	34.0	3×3	41.6	41.5	40.0
Case of $D_r=61.8\%$, 3×3 array				Case of Non-homogeneous, 3D, 3×3 array			
Pile spacing		Center loading	Eccentric loading	E_{h1}/E_{h2}	H/L =0.75	H/L =0.50	H/L =0.25
S_1	S_2						
3D	3D	47.3	48.6	0.18	44.0	45.4	47.1
	4D	45.0	48.0				
	6D	47.7	48.1	0.56	43.4	46.7	48.3

3.3 하중 분담률

본 연구에서는 각 말뚝에서의 하중 분담률을 측정하기 위하여 앞서 설명한바와 같이 변형 게이지를 말뚝두부 상단에 2개 부착하였으며, 이들 변형 게이지에서 얻어진 군말뚝 앞 행에서의 하중 분담률은 표 7과 같다.

표 7에서와 같이 3×3 말뚝배열에서의 앞 행 말뚝의 하중 분담률은 말뚝 중심간격이 증가할수록 그리고 지반의 상대 밀도가 낮을수록 감소하여 나타나고 있으며 말뚝 중심간격이 3D인 경우에는 앞 행 말뚝의 하중 분담률이 41.6-52.4%의 범위로 나타났다. 이 값의 범위는 McVay et al. (1996)이 사질토 지반에서 말뚝 중심간격이 3D인 경우에 대하여 제안한 앞 행 말뚝의 하중 분담률 43.3%($D_r=36\%$) - 46.6%($D_r=55\%$) 의 범위와 비슷하게 얻어졌으나, 느슨한 지반에서는 낙동강 유역의 모래가 조금 크게 나타났다.

상대밀도 90%의 지반에서 군말뚝 수평하중의 직각방향으로 말뚝열 수가 증가함에 따른 앞 행 말뚝의 하중 분담률은 크게 증가하지 않았으며, 모형실험에서의 평균 하중 분담률은 40.7%였다. 본 모형실험 결과에 의하면, 하중 분담률에 대한 편심하중의 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, 편심하중에 의하여 하중 분담률은 약 3% 정도만 증가하였다. 그리고, 비균질 지반에서의 하중 분담률은 균질 지반의 하중 분담률 범위내에서 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 말뚝의 수평거동에 대한 일련의 연속된 실험과 연구의 결과들로서 군말뚝의 수평거동에 영향을 미치는 다양한 인자들의 조건하에서 모형실험을 실시하

여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 군말뚝 모형실험의 결과에 의하면, 3×3 배열에서 군말뚝의 수평변위 감소성은 지반의 상대밀도 보다는 말뚝 중심간격에 더 의존하고 있는 것으로 나타났다.
- 2) 말뚝 중심간격이 6D이고 3×3 배열 말뚝인 경우의 군말뚝에서 말뚝 선단 구속에 의한 평균 수평하중은 수평변위 1mm에서 100%($D_r=32.8$) - 40%($D_r=90\%$) 범위로 증가하여 나타났으나, 지반의 상대밀도가 증가할수록 동일 수평변위에서의 수평하중 증가정도는 감소하여 나타났다.
- 3) 말뚝의 배열수가 증가함에 따라 동일 수평변위($y=2mm$ 경우)에 대한 각 말뚝의 수평 지지력은 3×1 배열에서 3×2 배열로 증가할때 16% 감소하고 3×2 배열에서 3×3 배열로 증가할때는 8% 정도 감소하였다. 즉, 2열 이상에서의 군말뚝에서는 말뚝열 수의 증가에 따른 증첩 효과가 증가하지는 않았다. 군말뚝에서의 증첩 효과는 하중 직각방향보다도 하중 재하방향에서 더 크게 발생함을 실험결과로부터 알 수 있었다.
- 4) 군말뚝의 개개 말뚝이 단일말뚝과 같이 거동하는 한계 말뚝 중심간격을 외국의 여러학자들이 달리 제안하고 있으나, 본 사질토 지반의 3×3 배열 말뚝 경우에는 중 간 정도의 상대밀도($D_r=61.8\%$) 이하의 지반에서는 한계 말뚝 중심간격이 6D 로 나타나며 조밀한 지반($D_r=90\%$)의 경우 최소 8D 로 추정할 수 있다. 그리고 모형실험의 연구결과를 바탕으로 군말뚝 효율에 대하여 지반의 상대밀도, 말뚝 중심간격 그리고 말뚝 수를 변수로 하는 실험식을 제안하였다.
- 5) 3×3 배열 말뚝에서 군말뚝 수평하중이 말뚝의 중심에서 3D 떨어진 지점에 작용하는 편심하중에 의한 군말뚝 효율의 크기는 군말뚝 중심에 작용하는 경우보다 19%-24% 감소하여 나타났다. 따라서, 편심하중이 군말뚝 효율에 대하여 영향을 미치고 있으므로 설계시 편심하중의 작용여부를 고려하여 군말뚝 효율의 산정이 필요하다고 사료된다.
- 6) 3×3 배열의 군말뚝에서 수평하중에 의한 앞 행 말뚝의 하중 분담률은 말뚝 중심간격 3D인 경우에 41.6% - 52.4% 정도 그리고 6D인 경우에 34% - 40% 정도로 나타났다.

참고 문헌

1. 김병탁 (1993), “낙동강 유역 모래의 전단강도 특성에 관한 실험적

- 연구” , 경북대학교 대학원 석사학위 논문.
2. 김영수의 1인 (1998), “균질지반과 비균질 지반에서 강관 모형말뚝의 수평거동 특성에 관한 모형실험” , 한국지반공학회지, 제14권, 제 6호, pp.153-166.
 3. 김영수의 2인 (1999), “2개층 지반에서의 강성 강관말뚝의 수평거동에 대한 말뚝두부 구속효과” , 한국지반공학회, '99 봄 정기 학술 발표 논문집, pp.217-224.
 4. Barton, Y. O. (1984), “Response of pile groups to lateral loading in the centrifuge” , Proc., Application of Centrifuge Modeling to Geotech. Des., W. H. Craig, ed., A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp.456-472.
 5. Brown, D. A., Reese, L. C., and O'Neill, M. W. (1987), “Behavior of a large scale pile in group subjected to cyclic lateral loading” , J. Geotech. Engrg., ASCE, 113(11), pp.1326-1343.
 6. Matlock, H., Ingram, W. B., Kelley, A. E., and Bogard, D. (1980), “Field tests of the lateral load behavior of pile group in soft clay” , 12th Ann. Offshore Technol. Conf., OTC, Houston, Texas.
 7. Mcvay, M. C., Bloomquist, D., Vanderlinde, D., and Clausen, J. (1994), “Centrifuge modeling of laterally loaded pile group in sands” , Geotech. Testing J., ASTM, 17(2), pp.129-137.
 8. Mcvay, M. C., Casper, R., and Shang, T. I. (1996), “Laterally response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing” , J. Geotech. Engrg., ASCE, 112(5), pp.436-441.
 9. McVay et al. (1998), “Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands” , J. of Geot. and Geoenvironmental Eng., Vol.124, No.10, pp.1016-1026
 10. Meimon, Y., Baguelin, F., and Jezequel, J. F. (1986), “Pile group behaviour under long time lateral monotonic and cyclic loading” , Proc., 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Pilling, Inst. Francais Du Petrole, Nantes, France, pp.286-302.
 11. Norris et al. (1998), “Lateral loading of a pile in layered soil using the strain wedge model” , J. of Geot. and Geoenvironmental Eng., Vol.124, No.4, pp.303-315.
 12. Ochoa, M. and O'Neill, M. W. (1989), “Lateral pile interaction factors in submerged sand” , ASCE, Vol115, No.3.
 13. 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.
 14. Peterson, K. T., and Rollins, K. M. (1996), “Static and dynamic lateral load testing of full-scale pile group in clay” , Civ. Engrg. Dept. Res. Rep. CEG.96-02, Brigham Young Univ., Provo, Utah.
 15. Rao et al. (1996), “Behavior of pile-supported dolphins in marine clay under lateral loading” , J. of Geot. and Geoenvironmental Eng., Vol.122, No.8, pp.607-612.

(접수일자 1999. 10. 11)