

모래지반에서 측방변형을 받는 무리말뚝의 실험적 연구

The Study of Group Piles under Lateral Soil Movement in Sand by Model test

배 종 순¹ Bae, Jong-Soon

권 민 재² Kwon, Min-Jea

김 성 호³ Kim, Sung-Ho

Abstract

This study describes a series of model tests on instrumented pile groups embedded in HAP-CHEN sand undergoing lateral movement. We tried to find the effect of group piles dependent on a number of factors, including the position of the pile in a group, the pile spacing, and the pile arrangement. The results of test are as follows. For the group piles, the bending moment profile for each pile is similar in shape to that of single pile, although the magnitude and the position of the maximum bending moment are different. R_M (the ratio of maximum bending moment) and R_F (the ratio of resistance to lateral soil movement) were found to increase with increasing pile spacing. When a pile is in a group under lateral soil movement, R_M increased in the order of the middle row, front row, back row, according to the direction of lateral deformation, and the outer pile has a larger R_M than the inner pile.

요 지

본 연구에서는 합천사에 매설되어 측방변형을 받는 무리말뚝의 거동특성을 분석하였다. 무리말뚝의 위치, 말뚝의 간격과 말뚝배열이 미치는 무리말뚝의 영향을 알고자 하였다. 실험결과는 다음과 같다. 무리말뚝에서는 모멘트 형상은 단독말뚝과 유사하나 최대 휨모멘트의 발생깊이가 깊어지고, 그 크기는 감소하였다. 말뚝의 중심간격이 증가할수록 최대휨모멘트비(R_M)와 수평력분담비(R_F)는 증가하였다. 지반변형에 따른 R_M 은 열방향에서는 후열, 전열, 중간열의 순으로 크게 나타났고 줄방향에서는 내측보다 외측이보다 크게 나타났다.

Keywords : Effect of group, Group piles, Lateral movement, Pile arrangement, Pile spacing

1. 서 론

측방변형은 지반의 유동에 의해 발생하며, 이러한 측방유동은 연약지반위의 교대기초나 건물기초 및 사면의 억지말뚝 등에 영향을 줄 수 있다. 실제 피해사례를 Franx & Boonstra(1948), Heyman(1965), Nicu(1971) 등이 보고한 바 있으며 이는 기초말뚝으로 지지된 교대가

뒷채움 성토편재하중으로 인하여 하부 연약지반에 수평변위가 발생한 사례 등에 관한 것이다. De Beer(1997), Hargery & Peck(1971)은 말뚝향타시 근접말뚝에 주는 영향은 연구하였으며, Tschebotarioff(1973), Ito & Mastui(1975), 홍원표(1983), 김영인(1994) 등은 측방토압의 이론식을 제안하였다. Poulos(1973), 장서용(1999), 배종순(2002) 등이 무리말뚝의 거동을 분석하는 등 많은 연구가

1 正會員, 慶尙大學校 土木工學科 教授, 工學研究院 研究員 (Member, Prof., Dept., of Civil Eng., Gyeongsang Univ., Researcher, Engrg. Research Institute)

2 正會員, 慶尙大學校 大學院 土木工學科 博士科程 (Member, Graduate Student, Dept., of Civil Eng., Gyeongsang Univ., kminjea@paran.com, 교신저자)

3 正會員, 慶尙大學校 大學院 土木工學科 博士科程 (Member, Graduate Student, Dept., of Civil Eng., Gyeongsang Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

발표되었다. 그러나 측방변형속의 무리말뚝의 거동은 말뚝과 지반의 상호작용, 말뚝의 중심간격, 상대밀도, 배열형태 등에 따라 서로 다르게 나타나며, 특히 열과 줄이 늘어나는 무리말뚝의 경우는 역학적으로 규명하지 못한 불확실한 요인들이 존재하기 때문에 이론적으로 규명하기가 매우 어려운 실정이라서 아직까지 이렇다할 군효과에 대한 이론적 제안식이 없어 현장 및 모형 실험에 통한 거동 파악은 기본적으로 매우 유용한 방법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 측방변형을 받는 모래지반 속에 설치된 무리말뚝의 거동특성을 규명하기 위하여 무리말뚝의 배열형태, 말뚝의 중심간격, 말뚝의 수를 변화시켜가며 실내 모형시험을 실시하여, 변형에 따른 힘과 휨모멘트를 이용하여 단독말뚝과 무리말뚝의 거동특성을 비교 분석하였다. 본 연구 결과를 이용하여 측방변형을 받는 기초말뚝이나, 사면내의 말뚝 등에 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

그림 1은 모형실험에 사용된 실험장치로서 ①은 강체프레임, ②는 토조, ③은 측방변형 유도레일, ④는 수평변위계, ⑤는 측방변형 토조, ⑥은 모형말뚝, ⑦은 하중전달장치, ⑧은 하중계(load cell), ⑨는 가력(수평하중)장치, ⑩은 변형을 측정장치(Data Logger), ⑪은 진동다짐 장치를 각각 나타낸다.

그림 2와 같이 측방변형을 받는 지반에 매입된 말뚝

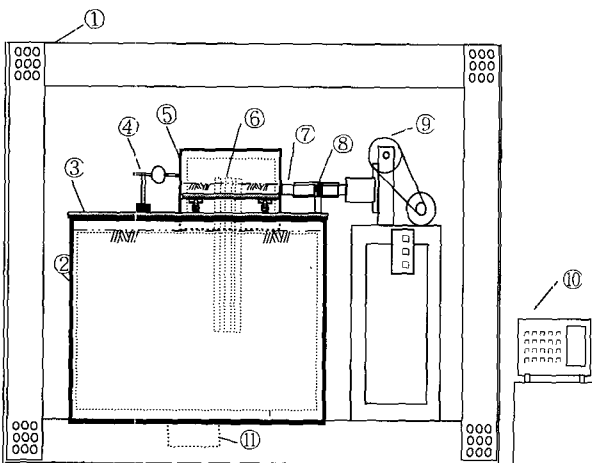


그림 1. 실험장치

에 대한 부동층에 매입된 말뚝의 길이비가 2가 되도록 설치하였고, 말뚝의 선단과 두부의 구속조건은 자유가 되도록 하였다. 지반은 최대 12mm 변형까지 유도하였다.

2.1.1 모형말뚝

모형말뚝은 표 1과 같은 제원의 사각동관을 사용하였으며, 선단으로부터 10cm 간격으로 스트레인 게이지를 부착하여 그림 3과 같이 한 개의 말뚝에 6개의 스트레인 게이지를 부착하여 휨 변형을 측정하였고 말뚝의 머리와 선단부분은 말뚝의 매입 시에 모래의 침입을 막기 위하여 실리콘으로 밀봉하였다. 지반변형에 의해 발생하는 측방하중이 비교적 작아 말뚝의 강성이 클 경우 해석에 필요한 충분한 변형이 발생하지 않을 수 있어 비교적 강성(EI)이 약한 동관을 사용하였으며, 이로 인해 발생할 수 있는 재료적 상사는 휨모멘트를 비로 표현하여 탄성계수에 영향을 받지 않도록 하여 해석하였다.

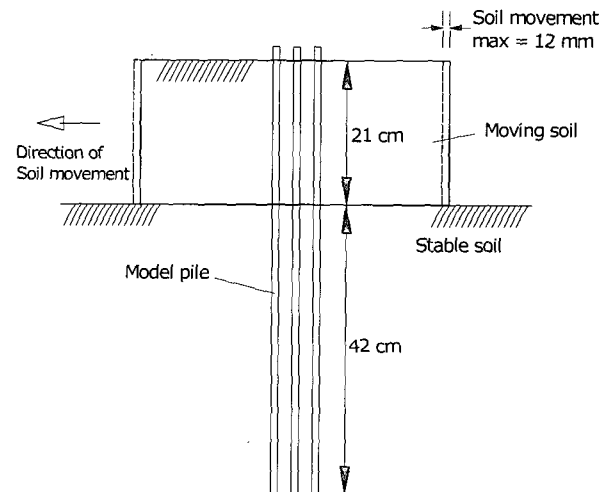


그림 2. 모형지반에 설치된 말뚝

표 1. 말뚝의 제원

Breadth (mm)	Thickness (mm)	Total length (mm)	Embedded length (mm)	E (kgf/cm ²)	I (kgf·cm ²)
11.4	0.6	650	630	1.25×10^6	63,180

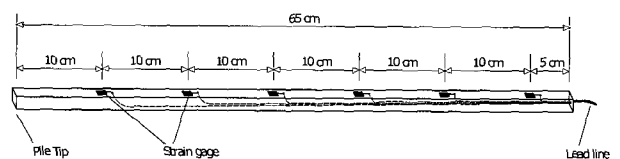


그림 3. 모형말뚝

2.2 지반의 특성

사용된 시료는 낙동강유역의 합천사로서, 물리·역학적 특성은 표 2와 같다.

모형지반의 제작순서는 먼저 토조 윗면에 일정간격을 가진 두 겹의 No.4체 눈금크기의 망을 설치하고, 모래가 체를 거쳐 자유낙하 되도록 한 뒤에 지반을 평평하게 한 후 토조 밑에 설치된 진동모터를 이용하여 소요의 상대밀도(Dr)를 얻었다. 수많은 조건변화를 주어 관측한 결과, 2초간의 진동다짐시의 지반의 상대밀도는 52%~54%로 나타나 평균값인 53%를 이 지반을 대표하는 상대밀도로 나타내었다.

2.3 실험순서 및 조건

실험은 다음 순서로 시행하였다.

①토조위에 측방변형 토조와 로드셀을 설치하여 고정시킨후, 말뚝거치대를 이용하여 일정한 배열과 간격으로 말뚝을 설치한다. ②토조 상부에 No. 4눈금의 체를 설치하여 모래를 일정높이 까지 자유낙하 시킨후, 2초간의 진동다짐을 가하여 일정한 상대밀도의 모형지반으로 성형하고, 말뚝거치대를 분리한다. ③변위계 및 각종 계측기를 Data logger에 연결시킨다 ④변위제어법에 의해 1mm/min의 일정한 속도로 측방변형을 가하여 0.5mm의 간격으로 12mm때까지의 말뚝의 휨 변형과 측방력을 측정한다.

그림 4는 모형실험을 위한 말뚝의 배열형태와 말뚝의

표 2. 모형지반의 특성

G_s	r_{dmax} (kgf/m ²)	r_{dmin} (kgf/m ²)	C_u	C_g	F.M.	ϕ (Dr=53%)
2.54	1.61	1.42	2.50	0.92	2.59	32.61

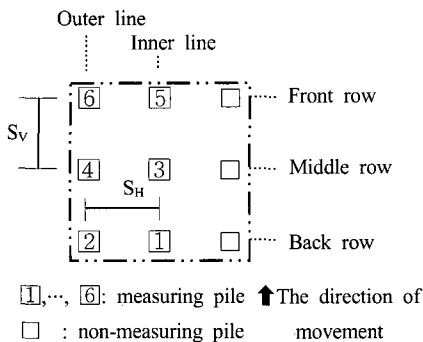


그림 4. 그룹말뚝배치도(3×3)

위치를 나타낸 그림으로 3×3배열의 예이다. 측방변형의 방향으로 늘어선 말뚝을 줄말뚝이라 하고, 그 말뚝중심 간의 연직간격을 S_v , 측방변형 방향의 수직방향으로 늘어선 말뚝을 열말뚝으로 그 말뚝중심 간의 수평간격을 S_h 로 정의하였다. 그리고, 측방변형 토조에 가해지는 수평하중의 작용점이 중앙이며 말뚝배열이 대칭구조이므로 대칭위치에 있는 말뚝은 휨 변형을 측정하지 않았다.

표 3은 본 모형실험의 실험종류를 나타낸 표이다. 각 배열에서 말뚝의 수평간격(S_h)을 2.5B, 4.5B, 6.5B로, 말뚝의 연직간격(S_v)를 3.5B, 4.5B, 5.5B, 6.5B로 넓혀가며 모형실험을 실시하고, 단독말뚝에서는 동일한 3개의 말뚝에 대하여 2회씩 실험을 실시하여 총 6회의 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 수평저항력(F_L)

3.1.1 변위에 따른 수평저항력

그림 5는 단독말뚝이 있을 때와 없을 때의 측방변형에 따른 수평저항력을 나타낸 그림으로, 말뚝이 저항하는 수평력은 단독말뚝이 있을 때의 수평저항력(F_{L0})에

표 3. 모형지반의 특성

Pile Arrangement	S_v/B	S_h/B	Test cases
single pile			6
3×1	2.5, 4.5, 6.5		3
1×3		3.5, 4.5, 5.5, 6.5	4
3×2	2.5, 4.5, 6.5	3.5, 4.5, 5.5, 6.5	12
2×3	2.5, 4.5, 6.5	3.5, 4.5, 5.5, 6.5	12
3×3	2.5, 4.5, 6.5	3.5, 4.5, 5.5, 6.5	12
Total Test cases :			49

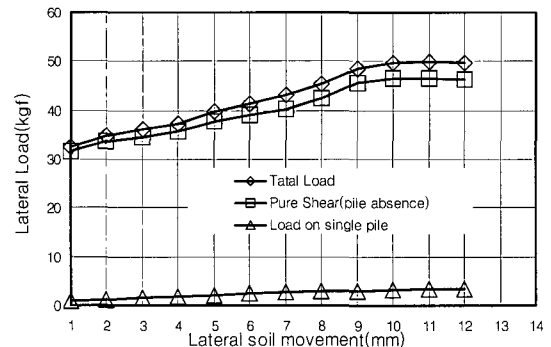


그림 5. 단독말뚝과 순수전단 시의 수평저항력

서 말뚝이 없을 때의 수평저항력(F_{La})을 빼 구할 수 있다. 두 가지의 경우 지반변형이 약 10mm일 때 강도가 일정해 지는 잔류강도 형태로 나타나 비슷한 변형거동을 보이고 있는데, 이는 단독말뚝으로서는 측방토압을 받는 면적이 협소하기 때문에 지반전체의 변형을 억지하는 효과는 적다는 것을 말해주고 있다. 그러나, 지반에 말뚝이 설치되면서 활동에 대한 수평저항력 증대에는 효과가 있음을 알 수 있다.

그림 6은 $S_h = S_v = 4.5B$ 일 때의 무리말뚝의 측방변형에 따른 수평저항력을 나타낸 그림이다.

단독말뚝이 약 10mm에서 임계점이 나타나 수평저항력이 일정해지는 것과는 다르게 무리말뚝에서 10mm 변형을 살펴보면 말뚝의 배열의 많아질수록 수평저항력이 크고 또한 선형의 임계점이 점점 더 큰 변형에서 나타나는 양상을 보이고 있다. 순수한 지반의 전단파괴가 10mm 정도인 것을 감안하면, 말뚝배열이 증가할수록 말뚝에 전가되는 수평저항력 및 변형의 저항성이 커짐으로써 보다 더 큰 변형에서 지반의 전단 파괴가 예상되므로 무리말뚝에서는 말뚝과 지반이 상호보완적으로

활동하는 것을 알 수 있다. 그리고, 수평저항력은 동일한 간격에서는 3×2배열이 2×3배열보다 크고, 3×1이 1×3보다 크게 나타나므로 열배열이 줄배열보다 효과가 큰 것을 알 수 있다.

3.1.2 수평저항력비(R_F)

수평저항력비는 무리말뚝의 한 말뚝이 평균적으로 부담하는 저항력을 단독말뚝이 부담하는 저항력으로 나눈 값으로 식 (1)과 같다.

$$R_F = \frac{F_{Lg} - F_{La}}{(F_{Ls} - F_{La}) \times n} \quad (1)$$

여기서, n : 말뚝의 갯수

F_{Lg} : 무리말뚝(Group Piles)일 때 측방저항력

F_{Ls} : 단독말뚝(Single Pile)일 때 측방저항력

F_{La} : 말뚝이 없을(Pile Absence) 때 측방저항력

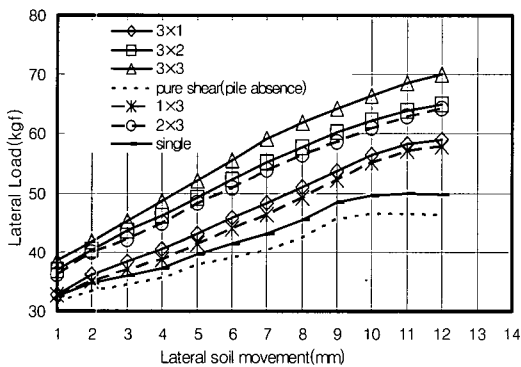
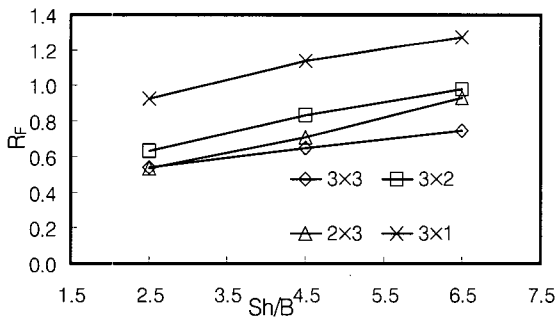
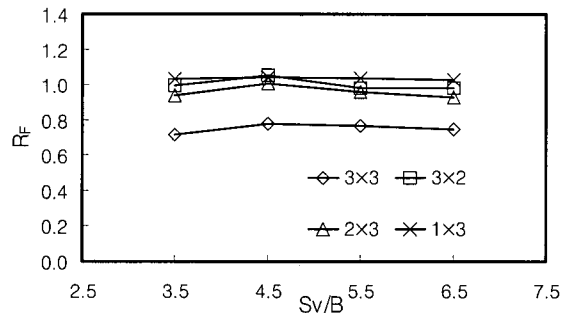


그림 6. 측방변형 시 무리말뚝의 수평저항력

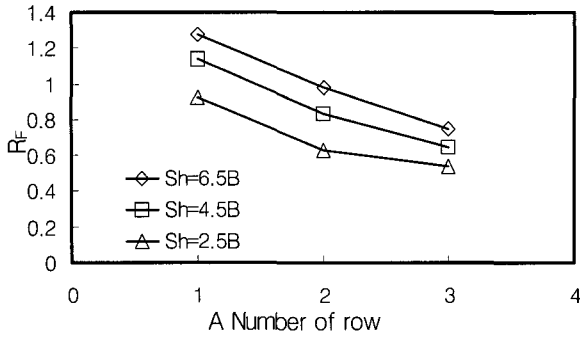


(a) 열방향($S_v = 6.5B$)

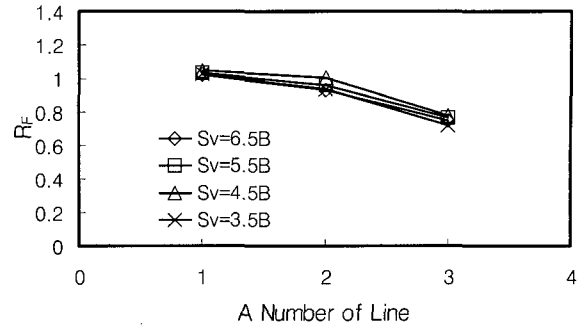


(b) 줄방향($S_h = 6.5B$)

그림 7. 무리말뚝의 간격과 거리에 따른 수평저항력



(a) 열수 증가



(b) 줄수 증가

그림 8. 말뚝증가에 따른 R_F

증가에 큰 영향을 주지 않은 것으로 나타났다.

그림 8(a), (b)는 $S_v = 6.5B$ 만큼 열수를 증가했을 때의 S_h 에 따른 수평저항력비와 $S_h = 6.5B$ 만큼 줄수를 증가했을 때의 S_v 에 따른 수평저항력비를 각각 나타낸 그림이다. 그림 8에서 말뚝의 줄수나 열수가 늘어날수록 수평저항력비는 감소함을 알 수 있는데 이는 말뚝간의 수평저항력의 중첩영역이 늘어나 균효과가 떨어지기 때문인 것으로 판단된다. 아울러 그림 8(b)에서 선형이 거의 중첩되는 것을 볼 수 있는데 이 또한 S_v 의 증가가 S_h 보다 수평저항력에 큰 영향을 주지 못함을 보여주는 것이다.

3.2 휨모멘트

3.2.1 깊이별 휨모멘트

그림 9는 3×3배열의 무리말뚝에서 $S_h = S_v = 6.5B$ 일 때와 단독말뚝에서의 측방변형 12mm에서의 깊이별 휨모멘트를 위치별로 나타낸 그림이다.

최대모멘트 발생 깊이는 두부에 가해지는 주동말뚝 실험을 한 Chang(1937)과 김재현(2003)의 4.5B~7.5B보다 깊은, 활동면에서 10~11B에 발생하는데 이는 측방변형토포로부터 전해지는 측방토포압이 집중하중이 아닌 분포하중으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 단독말뚝에 비해 무리말뚝은 위치에 관계없이 최대휨모멘트의 크기가 작으나 포물선의 형상이 아래로 약간 처지면서 발생깊이가 다소 깊어지는 경향을 보이고 있는데, 이는 무리말뚝에서는 하중분담의 분배에 의해 한 말뚝이 분담하는 휨모멘트가 적어지기 때문이며, 또한 말뚝간의 상호작용으로 활동면 아래에 말뚝에 작용하는 지반반력의 중첩에 의해 지반의 고정효과가 떨어져 위

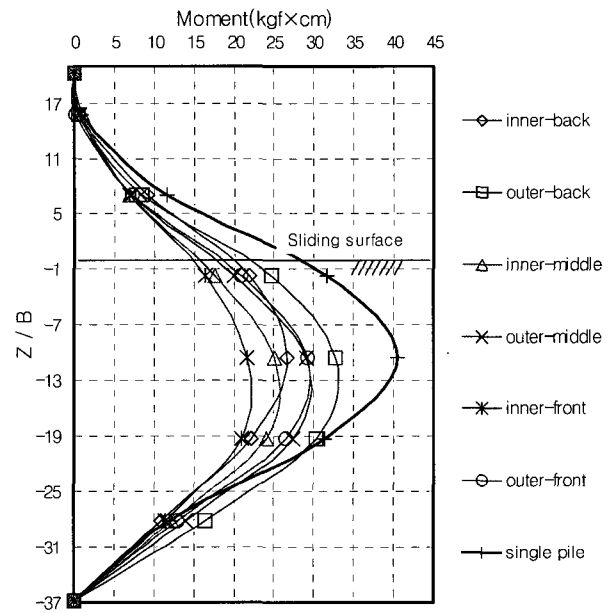
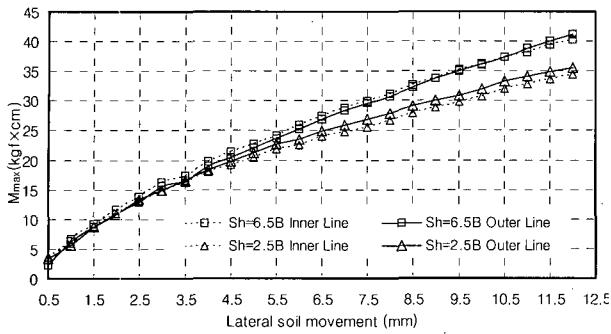


그림 9. 깊이별 휨 모멘트(3×3)

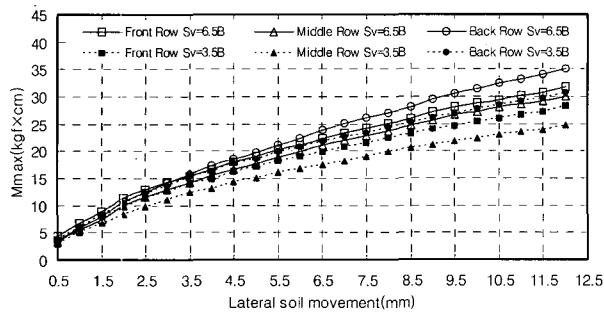
치가 깊어지는 것으로 사료된다.

3.2.2. 지반변형에 따른 최대휨모멘트 변화

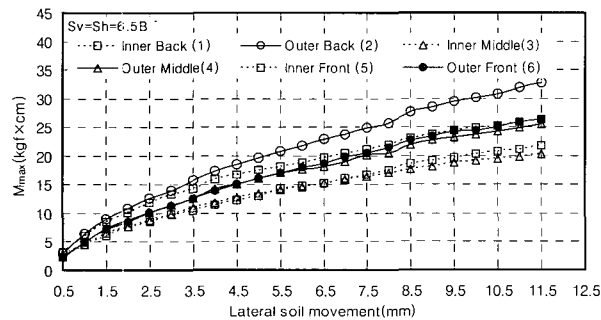
그림 10은 지반측방변형에 따른 최대휨모멘트의 변화를 나타낸 것이다. 그림 10(a)에서 외부말뚝이 내부말뚝보다 크를 알 수 있으며 수평간격이 증가할수록 최대휨모멘트가 커짐을 알 수 있다. 그림 10(b)에서 중앙말뚝이 가장 작게 나타나고 있으며 대부분 후열말뚝이 전열보다 큰 것으로 나타났다. 그림 10(c)에서, (a), (b)와 같이 후열 외부줄에서 가장 큰 값이 나타나고 있으며 중앙열 내부줄에서 가장 작은 값을 나타내고 있다. 이는 중앙말뚝이 활동면 아래에서 저항하는 지반반력의 중첩이 가장 많이 발생하기 때문이라 생각된다.



(a) 3×1 배열



(b) 1×3 배열



(c) 3×3 배열

그림 10. 지반변형에 따른 최대휨모멘트

3.2.3 최대휨모멘트비(R_M)

최대휨모멘트비(R_M)는 무리말뚝의 각 말뚝에서 발생하는 최대휨모멘트를 단독말뚝의 최대휨모멘트로 나눈값으로 식 (2)와 같다.

$$R_M = \frac{M_{\max i}}{M_{\max \text{single}}} \quad (2)$$

여기서, $M_{\max i}$: i 번 말뚝에 발생하는 최대 휨 모멘트
 $M_{\max \text{single}}$: 단독말뚝에 발생하는 최대 휨 모멘트

그림 11은 수평간격비(S_h/B)증가에 따른 최대휨모멘트비(R_M)를 나타낸 것으로 R_M 은 줄말뚝의 최대휨모멘트

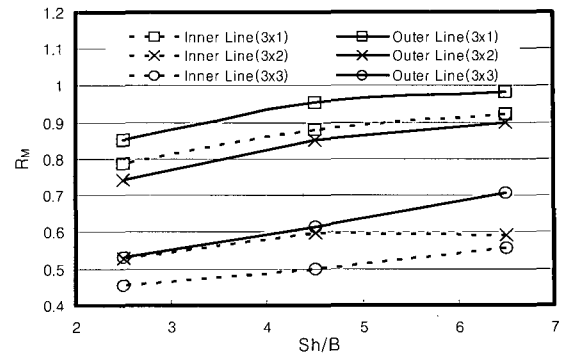


그림 11. 수평간격비 증가에 따른 R_M

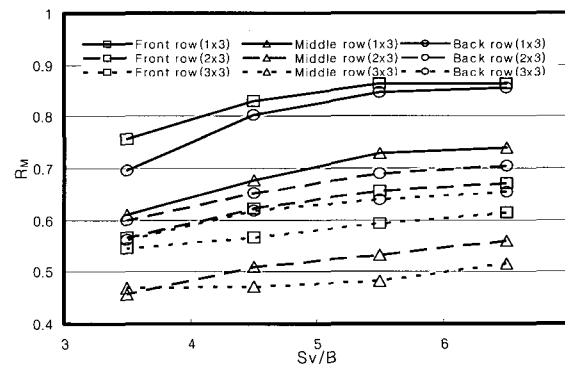


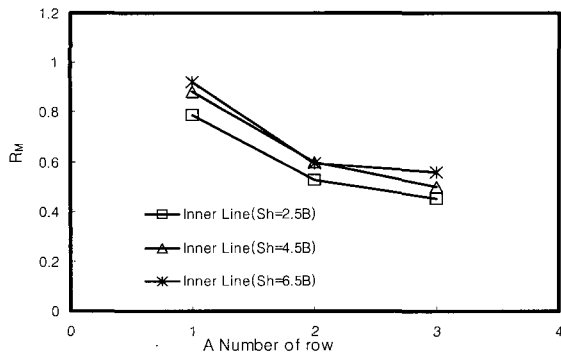
그림 12. 연직간격비 증가에 따른 R_M

트의 평균값을 내부파일과 외부파일의 열로 구분하여 구하였다. 수평간격비가 증가할수록 최대 휨 모멘트비는 증가하는 경향을 나타내고, 외부파일이 내부파일보다 R_M 이 크게 나타나 외측이 하중분담을 크게 받는 것을 알 수 있다.

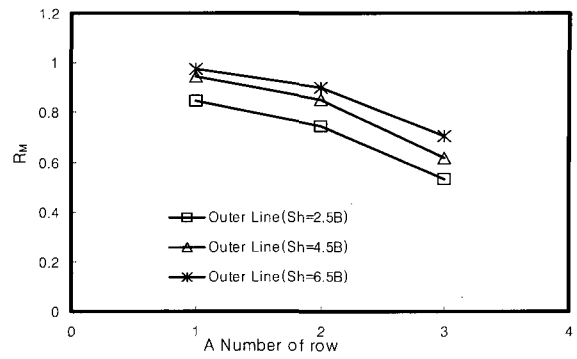
그림 12는 연직간격비(S_v/B)증가에 따른 최대휨모멘트비를 나타낸 것으로 열말뚝의 평균값을 전·중간·후열로 구분하여 구하였다.

연직간격비가 증가하다가 5.5B에서 비교적 일정해지는 것을 알 수 있는데 이는 Poulos(1997)의 연구에서 줄배열의 최대간격인 5B보다는 조금 크게 나타났다. 1×3배열을 제외하고는 후열의 하중분담이 전열보다 다소 크게 나타났으며, 모든 경우에 중간열이 가장 작게 분담하는 것으로 나타났다.

그림 13(a), (b)는 3줄말뚝의 열 수의 증가에 따른 외부줄과 내부줄의 최대휨모멘트비를 각각 평균하여 나타낸 것이다. 최대휨모멘트비는 전반적으로 감소하고, S_h 가 증가할수록 증가하는 경향을 띄며 3×2배열에서 내부파일과 외부파일의 차이가 큼을 알 수 있으며, 이는 지반과 말뚝의 상호작용으로 상대적으로 외측열 말뚝

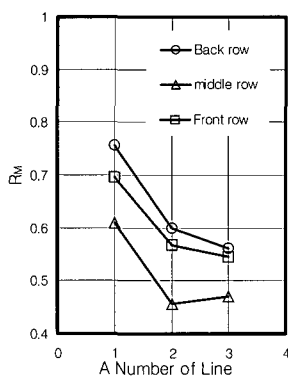


(a) 내부줄 말뚝

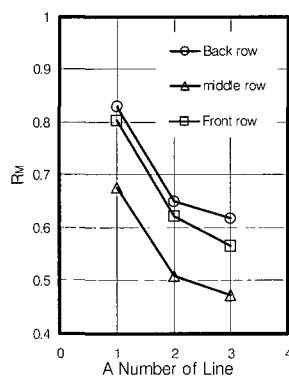


(b) 외부줄 말뚝

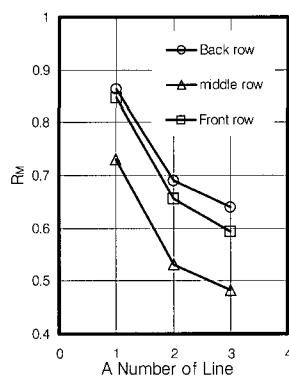
그림 13. 열증가 따른 R_M



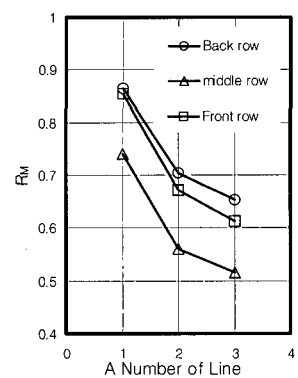
(a) $S_v = 3.5B$



(b) $S_v = 4.5B$



(c) $S_v = 5.5B$



(d) $S_v = 6.5B$

그림 14. 줄배열 증가에 따른 R_M

이 수평저항력을 많이 받아 내측말뚝의 힘이 감소한 것으로 사료된다.

그림 14는 무리 말뚝의 줄 방향 배열증가에 따른 전·중간·후열의 최대휨모멘트비를 각각 평균하여 수평간격별로 나타낸 것이다. 각 말뚝의 최대휨모멘트비는 말뚝의 줄수가 증가할수록 감소하고 1×3배열에 비하여 2×3, 3×3배열 무리말뚝의 최대휨모멘트비가 비교적 작은 것을 알 수 있다. 이는 말뚝의 줄 수가 증가할수록 활동토괴에 저항하는 말뚝 개수가 많아짐으로써 하중의 분담력이 감소하는 즉 군효과에 의한 것으로 판단된다.

그림 13과 14를 살펴보면 수평간격과 연직간격이 증가할수록 R_M 이 증가하는 반면 동일한 간격에 줄 또는 열수의 증가는 오히려 R_M 을 감소시키는 것으로 나타나 군효과는 상대적으로 떨어지는 것으로 분석되었다.

3.2.4 말뚝 위치에 따른 수평분담

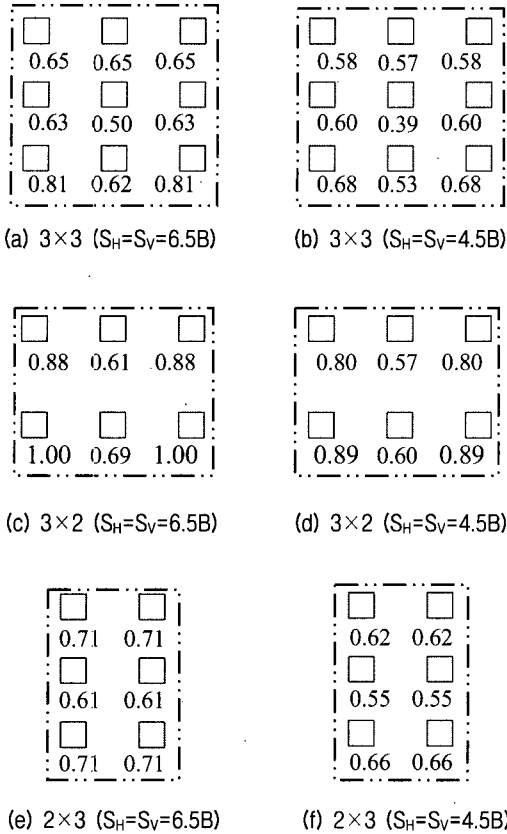
그림 15는 측방변형을 받는 무리말뚝의 활동면 아래에 발생하는 최대휨모멘트비를 말뚝의 위치별로 나타

낸 그림이다.

그림 15(a), (b)에서, 후열 외측말뚝의 최대휨모멘트가 가장 크고, 중심에 위치한 말뚝의 최대 휨 모멘트가 가장 작은 것을 알 수 있다. 이는 중심말뚝의 지반반력 중첩영역의 증가와 군말뚝의 중심부에 있는 중앙말뚝은 위치적으로 다른 말뚝보다 상대적으로 적은 변형을 일으킬 것이므로 작은 힘을 받는 것이라 판단된다.

그림 15(c), (d)에서는 내측과 외측의 휨모멘트의 차이가 23~31%정도로 3×3배열보다 큰 것을 알 수 있는데 이는 중간열 말뚝의 부재로 인하여 말뚝 본수가 적어짐으로 인한 한개 당 말뚝분담력이 전반적으로 커지고, 아울러 상대적으로 활동토괴의 하중이 직접적으로 가해지는 후열의 외부파일의 가장 크게 나타났다.

그림 15(e), (f)에서 최대와 최소휨모멘트비의 차이 (10%이내)가 가장 작은 것을 알 수 있는데 3×2와 3×3의 배열보다 폭이 가장 작아 토괴활동의 영향을 가장 작게 받고 중간 줄말뚝의 부재로 전부 외부파일만 존재하므로 상대적으로 가장 작은 차이를 보이는 것으로 나타났다.



↑ The direction of Lateral soil movement

그림 15. 파일위치에 따른 하중분배

4. 결론

측방변형을 받는 무리말뚝의 모형실험을 통해 말뚝의 중심간격, 말뚝의 수와 배열형태가 무리말뚝의 수평 거동에 미치는 영향을 고찰하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 단독말뚝에서 최대휨모멘트는 전단면에서 말뚝 폭의 10-11배 깊이에서 발생하였고, 무리말뚝에서는 모멘트 형상은 유사하나 최대휨모멘트의 발생깊이가 깊어지고, 그 크기는 감소하였다.
- (2) 말뚝의 중심간격이 증가할수록 최대휨모멘트비 및 수평 저항력비가 증가하며, 특히 지반변형방향에

직각방향의 말뚝간격(S_H)증가가 효과적인 것으로 나타났다.

- (3) 최대휨모멘트비의 크기가 줄 방향에서는 내측보다 외측이, 열 방향에서는 후열, 전열, 중간열의 순으로 크게 나타났다.
- (4) 말뚝의 개수가 증가할수록 한말뚝당 최대휨모멘트비와 수평 저항력비는 모두 감소하는 군효과가 나타났다.

참고 문헌

1. 김영인 (1994), 소성변형 지반중의 H형 강말뚝에 작용하는 수평력에 관한 연구, 박사학위논문, 경상대학교.
2. 김재현 (2003), 모래지반에서 반복수평하중 방향에 따른 단독말뚝의 거동, 석사학위논문, 경상대학교.
3. 배중순 (2002), "제형하중에 의한 측방토압을 받는 열말뚝의 거동분석", *대한토목학회논문집*, 제22권, 제 5-C호, pp.517-524.
4. 장서용 (1999), 측방변형을 받는 수동 군말뚝의 거동분석, 석사학위논문, 연세대학교 대학원.
5. 홍원표 (1983), "모래지반속의 말뚝에 작용하는 측방토압", *대한토목학회논문집*, Vol.3, No.3, pp.63-69.
6. Chang, Y. L. (1937), "Lateral Pile-Loading Tests, Trans", *ASEC*, Vol.91, pp.272-278.
7. De Beer, E.E. (1977), "Piles subjected to static lateral loads", *Proc., 9th ISCMFE, Specialty Session 10, Tokyo* : pp.1-14.
8. Franx and Boostatra, G.C. (1948), "Horizontal pressure on pile foundations", *Proc., 2nd Int. conf. SMFE*, Vol.1, pp.131-135.
9. Hagerty, D.J., Peck, R.B. (1971), "Heave and lateral movements due to pile driving", *Journal of soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE*, No.11 : 1513-1532.
10. Heyman, L. (1965), "Measurement of influence of lateral earth pressure on pile foundation", *Proc., 6th ICSMFE*, Vol.2, pp.257-260.
11. Ito, T. and T. Matusi. (1975), "Method to estimate lateral force acting on stabilizing piles", *Soil and Foundation*, Vol.15, No.4, pp.43-59.
12. L. T. Chen, H. G. Poulos and T. S. Hill (1997), "Model tests on Pile Group Subjected to Lateral Soil Movement", *Journal of the Japanese Geotechnical Society, Soil and foundation*, Vol.37, No.1, pp.1-12.
13. Nicu, N.D., Antes, D.R. and Kessier, R.S. (1971), "Field measurement on instrumented piles under an overpass abutment", *High Research, Record.*, Vol.354, pp.90-99.
14. Poulos, H.G. (1973), "Analysis of piles in soil undergoing lateral movement", *Jour. SMFD, ASCE*, Vol.99, No.SM5, pp.391-405.
15. Tschebotaioff, G.P. (1973), *Foundations, retaining and earth structures*, McBraw-Hill Kogakusha, Tokyo, pp.389-414.

(접수일자 2006. 7. 25, 심사완료일 2006. 10. 13)