

# 모래지반에서 재하방법이 반복수평하중을 받는 말뚝의 거동에 미치는 영향

## Effects of Loading Method on the Behavior of Laterally Cyclic Loaded Piles in Sand

백 규 호<sup>1</sup> Paik, Kyu-Ho  
김 영 준<sup>2</sup> Kim, Young-Jun  
이 승 연<sup>3</sup> Lee, Seung-Yeon

### Abstract

The behavior of laterally cyclic loaded piles is affected by the magnitude and number of cycles of cyclic lateral loads as well as loading method (1-way or 2-way loading). In this study, calibration chamber tests were carried out to investigate the effects of loading method of cyclic lateral loads on the behavior of piles driven into sand. Results of the chamber tests show that the permanent lateral displacement of 1-way cyclic loaded piles is developed in the same direction as the first loading, whereas that of 2-way cyclic loaded piles is developed in the reverse direction of the first loading. 1-way cyclic lateral loads cause a decrease of the ultimate lateral load capacity of piles, and 2-way cyclic lateral loads cause an increase of the ultimate lateral load capacity of piles. The change of ultimate lateral load capacity with loading method of cyclic lateral loads increases with increasing number of cycles. It is also observed that the 1-way cyclic loads generate greater maximum bending moment than 2-way cyclic loads for piles in cyclic loading step and generates smaller maximum bending moment for piles in the ultimate state. It can be attributed to the difference in compaction degree of the soil around the piles with loading method of cyclic lateral loads. In addition, it is founded that 1-way and 2-way cyclic lateral loads cause a decrease in the maximum bending moment of piles in the ultimate state compared with that of piles subjected to only monotonic loads.

### 요 지

반복수평하중을 받는 말뚝의 거동은 반복하중의 크기와 재하횟수 뿐만 아니라 반복하중의 재하방법(한방향 또는 양방향 재하)에도 영향을 받는다. 본 연구에서는 반복수평하중의 재하방법이 모래지반에 타입된 항타말뚝의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 가압토조를 이용한 모형말뚝재하시험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 반복수평하중을 한방향으로 받는 말뚝의 누적 영구수평변위는 최초 재하방향과 같은 방향으로 발생하지만, 반복하중을 양방향으로 받는 말뚝의 영구수평변위는 최초 재하방향과 반대 방향으로 발생하였다. 그리고 이와 같은 반복하중의 재하방법에 따른 말뚝 영구수평변위의 변화로 인해 한방향 반복재하는 말뚝의 반복극한수평지지력을 감소시키고 양방향 반복재하는 말뚝의 반복극한수평지지력을 증가시켰으며, 수평하중의 반복재하횟수가 많아질수록 하중의 재하방법에 따른 말뚝의 반복극한수평지지력 차이는 더욱 확대되었다. 또한 반복수평하중의 재하방법에 따른 말뚝 주변지반의 다짐도 차이로 인해 수평하중이 반복재하되는 동안 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 반복하중이 양방향보다 한방향으로

1 정회원, 관동대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ., pkh@kd.ac.kr, 교신저자)

2 관동대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 9월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

재하되는 경우에 더 크게 나타났다. 그러나 극한상태에서 말뚝에 발생한 최대 휨모멘트는 반복하중이 한방향보다 양방향으로 재하된 경우에 그리고 반복재하를 받은 경우보다 그렇지 않은 경우에 더 큰 것으로 조사되었다.

**Keywords :** Calibration chamber test, Cyclic lateral load, Loading method, Ultimate lateral load capacity, Bending moment

## 1. 서론

송전철탑이나 풍력발전기, 석유시추선 등의 구조물은 연직하중보다 풍력이나 파랑하중에 의한 반복수평하중을 더 많이 받으며, 이러한 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 합리적인 방법으로 말뚝의 수평지지력을 결정하는 것이 필요하다. Long과 Vanneste(1994)와 Lin과 Liao(1999), Rosquoet 등(2007)의 연구결과에 따르면 반복수평하중을 받는 말뚝의 거동은 정적수평하중을 받는 경우와 크게 다르기 때문에 반복수평하중을 받는 말뚝기초를 설계할 때에는 반복하중의 특성을 고려하는 것이 매우 중요하다.

현재까지 보고된 연구결과를 종합하면, 반복수평하중을 받는 말뚝의 수평거동은 반복하중의 재하횟수와 정적극한수평지지력에 대한 상대적인 크기 뿐만 아니라 재하방법(한방향 또는 양방향)에도 영향을 받는 것으로 나타났다(Matlock 1974, Vucetic과 Dobry 1988, Long과 Vannest 1994, Lin과 Liao 1999). 그리고 반복수평하중을 받으면 그렇지 않은 경우보다 말뚝의 극한수평지지력이 작아진다는 연구결과가 Broms(1964)와 Reese 등(1974), O'Neill과 Murchison(1983), Little과 Briaud(1988), Rollins 등(2006)에 의해 보고되었다. 특히 반복수평하중의 재하방법이 말뚝의 거동에 미치는 영향과 관련해서, Parry와 Sanglamer(1977)와 Barton(1982)은 양방향 반복재하보다 한방향 반복재하를 받은 말뚝에서 영구수평변위가 더 크게 발생한다고 보고하였고, Brown 등(1988)은 수평하중이 한방향보다 양방향으로 반복재하될 때 말뚝 주변지반의 다짐도가 더 커진다는 결과를 보고하였다. 또한 Long과 Vanneste(1994)는 수평하중이 양방향보다 한방향으로 반복재하되었을 때 말뚝의 수평지지력 감소폭이 더 커진다는 연구결과를 보고하였다.

이상과 같이 몇몇 연구자에 의해 반복하중의 재하방법에 따른 말뚝의 거동 및 수평지지력 변화가 보고되었지만, 현재까지 이와 관련해서 보다 체계적이고 구체적

인 연구가 충분히 이뤄지지 않았다. 그 결과 현재까지 많은 지지력산정식이나 설계기준에서는 p-y곡선법에 사용되는 지반반력계수에 일정한 크기의 감소계수를 적용(Prakash 1961, Broms 1964, Davisson과 Salley 1970, Reese 등 1974, O'Neill과 Murchison 1983)하거나 반복수평하중의 재하횟수를 고려해서 지반반력계수를 적절히 감소(Long과 Vanneste 1994)시키는 방법으로 반복수평하중을 받는 말뚝의 수평지지력을 산정하고 있다. 이처럼 현재까지 제안된 반복수평하중을 받는 말뚝에 대한 설계기준에서는 여러가지 하중특성 중 반복수평하중의 크기와 재하횟수만을 변수로 사용하고 있다. 따라서 반복수평하중을 받는 말뚝의 수평지지력을 정확하게 산정하기 위해서는 하중특성 중 여타 요소들과 함께 반복수평하중의 재하방법이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 정성 및 정량적으로 조사하고, 그 결과를 기존의 지지력산정식이나 설계기준에 반영하는 작업이 필요하다.

본 연구에서는 반복수평하중의 재하방법(한방향 또는 양방향 재하)이 모래지반에 타입된 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 가압토조(calibration chamber)를 이용한 모형말뚝재하시험을 수행하였다. 모형시험의 결과에 근거해서 반복수평하중의 재하형태가 말뚝의 영구수평변위와 수평지지력, 그리고 반복재하단계와 극한상태에서 말뚝에 발생하는 휨모멘트에 미치는 영향 등을 정성 및 정량적으로 규명하였다. 이러한 모형시험 결과들은 반복수평하중을 받는 말뚝에 대한 지지력산정식이나 설계기준의 정확도를 높이기 위한 연구의 기초자료로 큰 의미를 가질 것으로 기대한다.

## 2. 모형말뚝재하시험

### 2.1 모형지반 조성

모형지반의 조성을 위해 가압토조를 사용하였고, 실험에 사용된 가압토조는 그림 1과 같이 지반이 조성되

고 조성된 지반의 응력상태를 조절하는 모래 저장조와 지반의 상대밀도 조절을 위해 모래의 강사특성을 변화시키는 모래상자와 모래분산장치로 구성되었다. 모래 저장조는 직경과 높이가 각각 775mm와 1250mm였고, 모형지반의 연직 및 수평응력을 조절하기 위해 저장조의 바닥과 측벽에 압축공기를 주입할 수 있는 고무막을 갖추고 있다. 그리고 모래상자의 바닥면에는 크기 조절이 가능한 모래유출구멍을 설치해서 모형지반의 상대밀도와 밀접하게 관련되는 모래의 유출량을 조절할 수 있도록 했고, 모래분산장치는 8번과 10번 채로 구성해서 모래상자에서 유출되는 모래 입자의 낙하고를 조절하고 모래 입자가 저장조 내에 균등하게 분산되도록 하였다.

모형지반은 모래상자로부터 유출되는 모래의 양과 모래분산장치로부터 떨어지는 모래입자의 낙하고에 의해 지반의 상대밀도를 조절하는 낙사법으로 조성되었고, 지반조성을 위해 대기 건조된 주문진 표준사를 사용하였다. 지반조성용 모래는 표 1과 같은 기본물성치를 갖고 있으며, 통일분류법에 의해 SP(poorly graded sand)

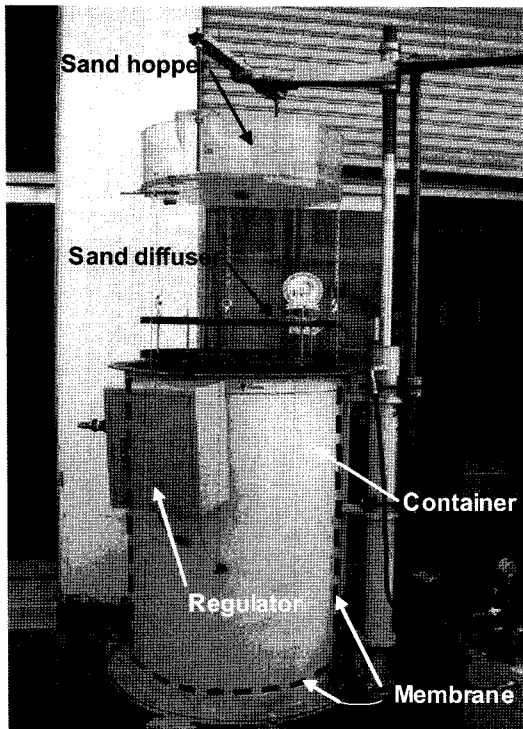


그림 1. 가압토조

로 분류되었다. 모형지반은 깊이방향의 균질성 확보를 위해 13개 층으로 나누어 조성되었고, 지반의 상대밀도는  $D_R=30, 60, 90\%$ 의 세가지 상태로 하였다. 모형지반이 조성된 후 가압토조의 뚜껑을 결합시키고 토조의 바닥과 측벽에 설치한 고무막에 각각 98.0kPa과 39.2kPa의 압축공기를 18시간 동안 가해서 모형지반이  $K_0=0.4$ 의 토압계수를 갖도록 하였다.

## 2.2 모형말뚝

모형실험에서는 그림 2와 같이 외경이 40mm이고 길이가 590mm인 폐단말뚝(closed-ended pile)을 시험말뚝으로 사용하였고, 수평재하시험동안 말뚝에 발생하는 휨모멘트 분포를 측정하기 위해서 모형말뚝 중 지반에 관입되는 하부 440mm 부분에 총 16개의 스트레인게이지를 대칭으로 부착하였다. 시험말뚝의 설치나 재하시험 동안 말뚝에 부착된 스트레인게이지가 파손되는 것을 방지하기 위해서 스트레인게이지는 말뚝의 표면에 성형한 게이지 설치용 홈의 내부에 부착했고, 게이지 설치 후 홈은 덮개 철판으로 폐쇄하였다. 그리고 말뚝에 부착된 스트레인게이지의 전선들은 시험말뚝 내부를

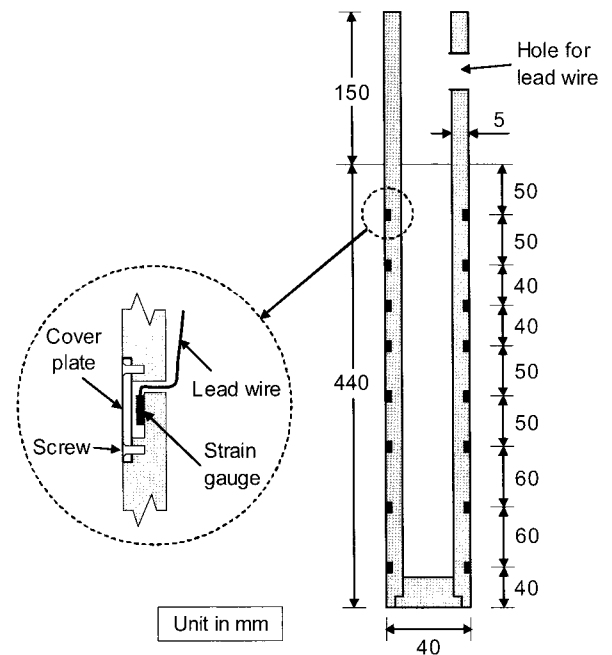


그림 2. 모형말뚝의 개략도

표 1. 지반조성용 모래의 기본 물성치

물성	비중, $G_s$	$\gamma_{max}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_{min}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$C_u$	$C_c$
값	2.66	16.37	13.53	1.43	0.90

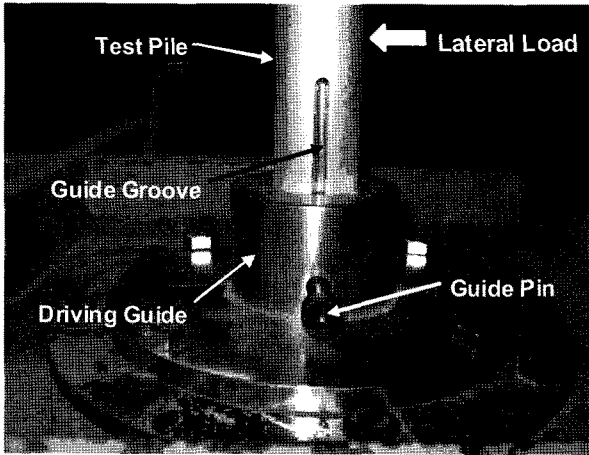


그림 3. 항타 시 말뚝 설치방향 안내용 홈과 핀을 이용한 시험말뚝의 설치방향 정렬방법

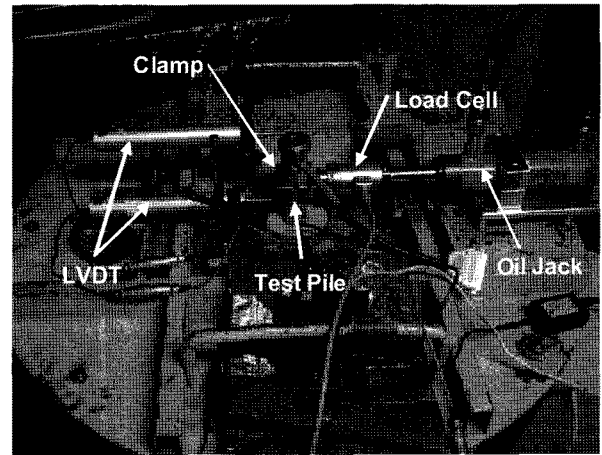


그림 4. 시험말뚝의 수평재하시험 전경

통해서 말뚝 두부에 설치한 전선구멍으로 배선되었다.

수평재하시험이 진행되는 동안 시험말뚝에 발생하는 휨모멘트 분포를 측정하기 위해서는 말뚝에 대칭으로 부착된 스트레인게이지들이 정확하게 수평하중 작용선 상에 위치해야만 한다. 이를 위해 본 연구에서는 그림 3과 같이 시험말뚝의 하단부에 스트레인게이지들과 직각되는 방향으로 150mm 길이의 말뚝 설치방향 안내용 홈(guide groove)을 설치하였고, 가압토조 뚜껑의 중심부에 결합되는 항타 가이드(driving guide)에는 시험말뚝에 작용하는 수평하중과 직각되는 곳에 말뚝 설치방향 안내용 핀(guide pin)을 설치하였다. 따라서 수평하중 작용선 상에 시험말뚝에 부착된 스트레인게이지들을 위치시키기 위해 최초 150mm 깊이까지는 말뚝 설치방향 안내용 홈과 핀을 결합시킨 상태에서 시험말뚝을 모형지반에 타입하였고, 그 이후에는 말뚝 설치방향 안내용 핀을 제거한 상태에서 시험말뚝을 타입하였다.

### 2.3 실험방법

모형말뚝재하시험은 표 2와 같이 상대밀도가  $D_R=30$ ,

60, 90%이고 초기 연직 및 수평응력이 각각 98kPa과 39.2kPa인 모형지반에서 수행하였고, 시험말뚝의 항타 깊이는 440mm로 일정하게 하였다. 반복수평하중을 받는 말뚝의 극한수평지지력을 결정하기 위해서는 먼저 시험말뚝에 일정한 크기의 수평하중을 반복해서 재하해야 한다. 따라서 시험말뚝에 가할 반복수평하중의 상대적인 크기를 결정하기 위해  $D_R=30, 60, 90\%$ 인 지반조건에서 시험말뚝에 대한 정적수평재하시험을 실시했고, 여기서 얻어진 수평하중-변위 곡선으로부터 말뚝의 정적극한수평지지력( $H_{US}$ )을 결정하였다. 그리고 반복수평하중의 재하방법에 따른 말뚝의 거동 특성을 조사하기 위하여 타입이 완료된 시험말뚝의 두부에 정적극한수평지지력의 40%에 해당하는 수평하중을 한방향(1-way)과 양방향(2-way)으로 각각 1, 10, 25, 50회 반복재하한 후 수평재하시험을 실시하는 방법으로 총 12회의 반복수평재하시험을 실시하였다

시험말뚝은 무게가 약 49N이고 낙하고가 500mm인 햄머를 이용해서 지반에 타입되었다. 반복수평재하시험을 위해 그림 4와 같이 지표면으로부터 75mm 떨어진 지점에 반복수평하중이 재하되었고, 재하시험이 진행되

표 2. 모형수평재하시험의 조건

상대밀도 (%)	응력조건 (kPa)			하중크기 $H/H_{US}$	재하방법	작용횟수 N
	연직응력	수평응력	$K_0$			
30	98	39.2	0.4	0.4	1-way	10
					2-way	
60	98	39.2	0.4	0.4	1-way	10
					2-way	
90	98	39.2	0.4	0.4	1-way	1, 10, 25, 50
					2-way	

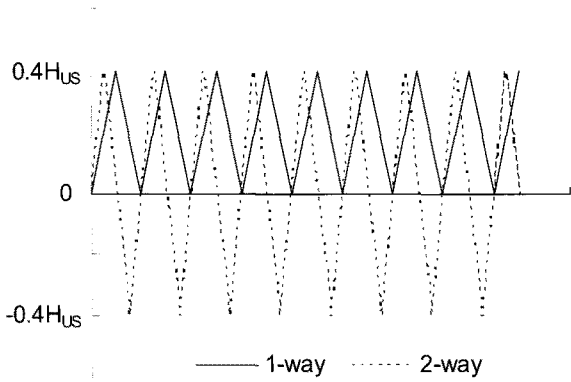


그림 5. 반복수평하중의 재하방법

는 동안 지표면으로부터 각각 45mm와 145mm 떨어진 지점에서 LVDT를 이용하여 말뚝의 수평변위를 측정하였다. 그리고 시험말뚝에 가해지는 수평하중은 유압잭과 연결된 강봉(rod)의 단부에 설치된 하중계(load cell)에 의해 측정되었고, 시험말뚝의 두부를 자유단 상태로 유지하기 위해 유압잭에 연결된 하중계와 시험말뚝의 두부는 클램프(clamp)를 이용해서 힌지(hinge)상태로 결합시켰다.

시험말뚝에 대한 정적수평재하시험을 수행하는 동안 각 하중단계는 20분동안 일정하게 유지되었고 20분이 경과한 후에도 말뚝의 변위가 계속 발생할 경우에는 말뚝의 시간당 회전각이  $0.1^\circ$  이하가 될 때까지 해당 하중 단계를 유지하였다. 그리고 반복수평재하시험을 위해 동일한 지반조건에서 측정된 정적극한수평지지력의 40%에 해당하는 수평하중을 시험말뚝의 두부에 한방향 또는 양방향으로 계획된 횟수만큼 반복해서 재하한 후 정적수평재하시험과 동일한 방법으로 수평재하시험을 수행하였다. 이때 그림 5에서 보듯이 한방향 반복재하에서는 1/2주기에서 시험말뚝에 하중을 재하하고 2/2주기에서 수평하중을 제하하였다. 반면 양방향 반복재하에서는 1/4과 3/4주기에서 최초 재하방향 및 그 반대방향으로 수평하중을 재하하고, 2/4와 4/4주기에서 수평하중을 제하하였다. 또한 모든 수평재하시험은 시험말뚝 두부의 회전각이  $2.3^\circ$ - $2.5^\circ$ 에 도달했을 때 종료하였다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 정적극한수평지지력

말뚝의 극한수평지지력은 수평재하시험에서 얻은 하중-변위 곡선에 말뚝 두부에서 발생하는 일정 크기의 수

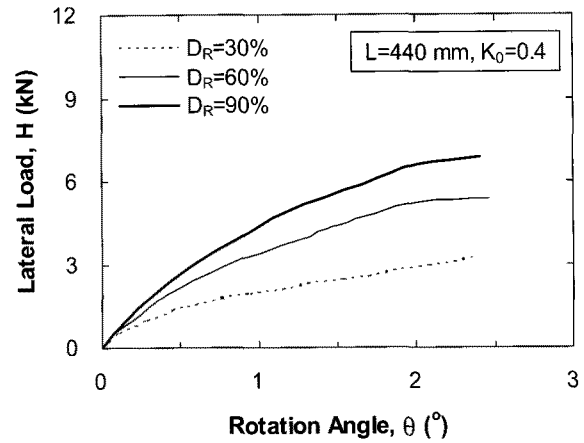


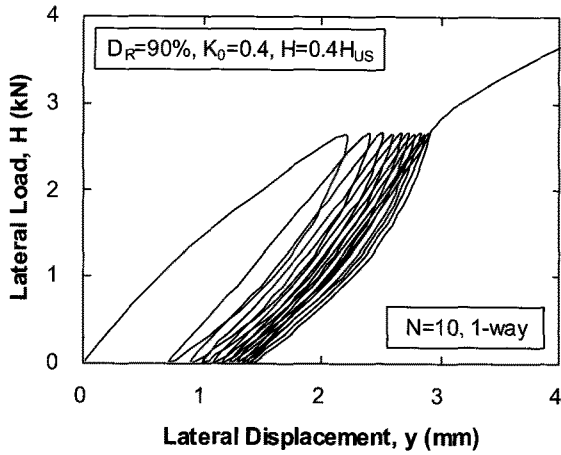
그림 6. 정적수평재하시험에서 측정된 수평하중-회전각 곡선

평변위나 회전각을 적용해서 결정할 수 있다. Davidson 등(1982)은 말뚝 두부가  $2^\circ$ 회전했을 때 말뚝에 작용하는 하중을 그리고 Meyerhof 등(1981)은 수평하중-변위 곡선이 초반의 비선형에서 선형으로 전환되는 시점의 하중을 극한수평지지력으로 정의하였다. 본 연구에서는 해석의 편의성을 고려해서 수평재하시험의 결과에 Davidson 등(1982)의 파괴기준을 적용해서 시험말뚝의 극한수평지지력을 결정하였다.

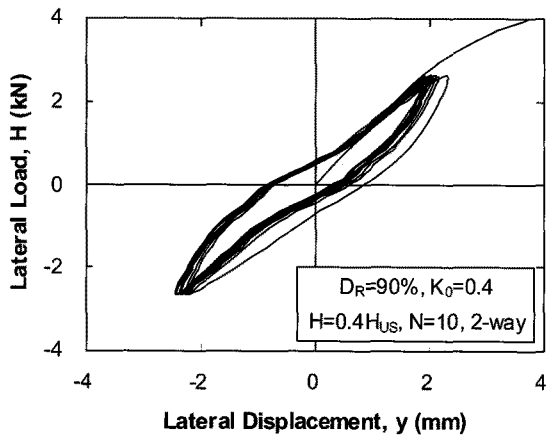
그림 6은 지반의 상대밀도가  $D_R=30, 60, 90\%$ 일 때 시험말뚝에 대한 정적수평재하시험의 결과를 하중-회전각 곡선으로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 지반의 상대밀도가 증가할수록 동일한 회전각에서 시험말뚝의 하중 지지능력은 커졌으며, 이러한 재하시험 결과에 Davidson 등(1982)의 파괴기준을 적용했을 때 상대밀도가  $D_R=30, 60, 90\%$ 인 지반에서 시험말뚝의 정적극한수평지지력( $H_{us}$ )은 각각 2.87, 5.23, 6.60kN으로 결정되었다. 따라서 반복수평재하시험에서는  $D_R=30, 60, 90\%$ 인 지반에 타입된 말뚝의 두부에 한방향과 양방향으로 각각 1.15, 2.09, 2.64kN의 수평하중을 계획한 횟수만큼 반복재하하였다.

#### 3.2 영구수평변위

그림 7은  $D_R=90\%$ 인 지반에 타입된 시험말뚝에 정적극한수평지지력( $H_{us}$ )의 40%에 해당하는 2.64kN의 수평하중을 한방향과 양방향으로 10회 반복재하했을 때 측정된 하중-변위 곡선이다. 그림과 같이 수평하중을 한 방향으로 반복재하한 경우에는 하중의 반복재하횟수가 증가함에 따라 말뚝 두부의 누적 영구수평변위가 초기 재하방향으로 계속 증가하지만 한 주기(1-cycle) 동안 발생한 영구수평변위량은 뚜렷하게 감소하는 경향을



(a) 한방향 재하



(b) 양방향 재하

그림 7. 반복재하 단계에서 하중의 재하방법별 말뚝 두부의 수평하중-회전각 곡선

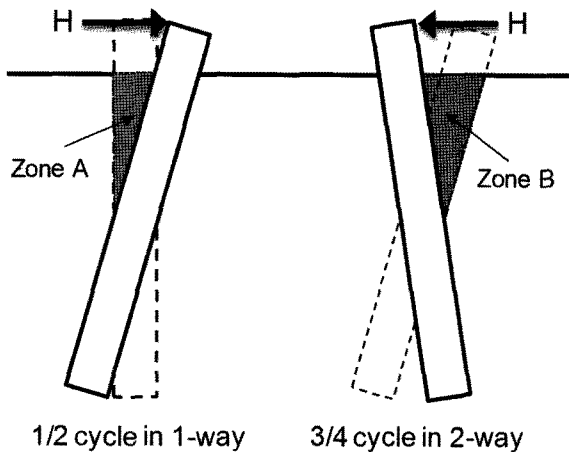


그림 8. 수평하중의 재하방법별 말뚝 주변에 발생하는 틈새 비교

보였다. 반면 수평하중을 양방향으로 반복재하한 경우에는 하중의 반복재하횟수가 증가함에 따라 말뚝 두부의 누적 영구수평변위가 최초 재하방향과 반대방향(3/4 주기에서 하중을 재하한 방향)으로 증가하였고, Parry와

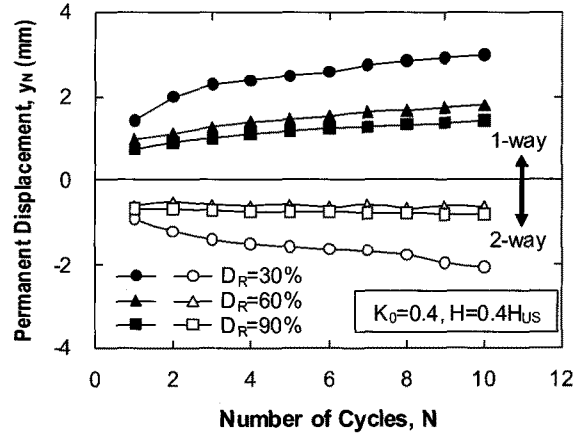


그림 9. 지반조건과 하중 재하횟수에 따른 말뚝의 영구수평변위 변화

Sanglamer(1977)와 Barton(1982)의 연구결과와 마찬가지로 반복하중의 재하횟수에 따른 영구수평변위량의 증분도 한방향 재하의 경우에 비해 매우 작게 나타났다. 이처럼 반복수평하중의 재하방법에 따라 말뚝 두부에 발생하는 영구수평변위가 달라지는 것은 재하방법에 따라 말뚝 주변지반의 다짐상태가 달라지기 때문이다. 즉, 그림 8과 같이 한방향 반복재하의 경우 1/2주기에서 하중을 재하할 때 말뚝 후면부에 발생한 틈새(A영역)에 주변의 모래가 채워져서 하중을 제거하더라도 말뚝이 원상태로 돌아오지 못하게 되므로 반복하중이 재하될수록 영구수평변위가 초기 재하방향으로 계속 증가하는 것이다. 반면 양방향 반복재하의 경우에는 그림과 같이 3/4주기에서 하중을 재하할 때 말뚝 후면부에 발생한 큰 크기의 틈새(B영역)에 주변의 모래가 다량 유입되므로 4/4주기에서 수평하중을 제거하더라도 말뚝은 초기 상태로 돌아오지 못하고 최초 재하방향(1/4주기의 재하방향)과 반대방향으로 이동하게 되는 것이다.

그림 9는 말뚝에 0.4HUS의 수평하중이 반복재하될 때 말뚝 두부에서 발생하는 영구수평변위의 변화를 지반의 상대밀도와 하중의 반복재하횟수에 대해 나타낸 것이다. 앞에서 언급하였듯이 한방향 반복재하 시에는 말뚝의 누적 영구수평변위가 최초 재하방향으로 발생하고 양방향 반복재하 시에는 최초 재하방향과 반대 방향으로 발생하는 것을 그림 9에서 분명하게 볼 수 있다. 또한 한방향 반복재하의 경우에는 지반의 상대밀도와 무관하게 수평하중의 반복재하횟수가 증가함에 따라 말뚝의 누적 영구수평변위도 증가하지만, 양방향 반복재하의 경우에는 지반의 상대밀도가 커질수록 수평하중의 반복재하횟수에 따른 말뚝의 누적 영구수평변위 변화율이 급격히 감소하는 경향을 보였다.

### 3.3 극한수평지지력

그림 10은 반복수평하중의 재하방법별 하중의 재하 횟수(N)에 따른 말뚝의 반복극한수평지지력( $H_{uc}$ ) 변화를 보인 것이다. 이때 말뚝의 반복극한수평지지력은 반복수평재하시험에서 얻어진 수평하중 변위 곡선에 말뚝의 두부가 2°회전했을 때를 극한상태로 간주하는 Davidson 등(1982)의 파괴기준을 적용해서 얻어졌다. 그림에서 보듯이 수평하중이 한방향으로 반복재하되는 경우 말뚝의 반복극한수평지지력은 동일 조건하에서 측정된 정적극한수평지지력보다 작았고, 하중의 반복재하횟수가 증가할수록 말뚝의 반복극한수평지지력은 감소하였다. 그러나 수평하중이 양방향으로 반복재하되는 경우에 말뚝의 반복극한수평지지력은 N=1회일 때만 정적극한수평지지력보다 작았고 N≥10회일 때는 정적극한수평지지력보다 크게 나타났다. 또한 한방향 반복재하의 경우와 달리 하중을 양방향으로 반복재하하는 경우에는 하중의 재하횟수가 증가함에 따라 말뚝의 반복극한수평지지력도 조금씩 증가하는 경향을 보였다.

이상에서 언급한 바와 같이 동일 조건하에서도 반복수평하중의 재하방법에 따라 말뚝의 반복극한수평지지력이 달라지는데, 이것은 그림 7에서 설명한 바와 같이 반복수평하중의 재하방법에 따라 말뚝 두부에서 발생하는 영구수평변위가 달라지기 때문이다.  $D_R=90\%$ 이고 N=25회인 반복수평재하시험에서 하중의 반복재하 이후에 수행한 수평재하시험의 결과만을 나타낸 그림 11(a)에서 볼 수 있듯이, 수평하중을 한방향으로 반복재하할 경우 말뚝의 영구수평변위는 정적수평재하시험의 경우보다 양(+)의 방향으로 발생하지만, 수평하중을 양방향으로 반복재하한 경우에는 정적수평재하시험의 경우에

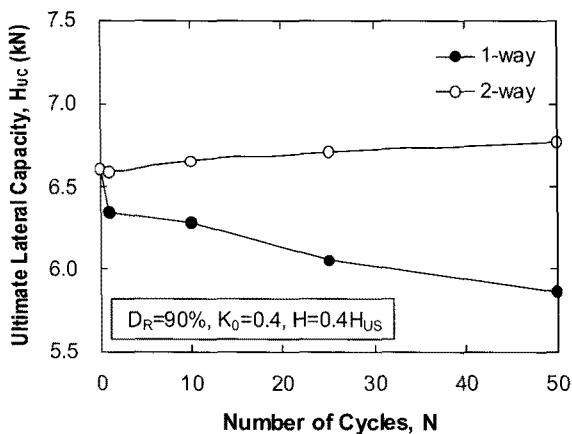
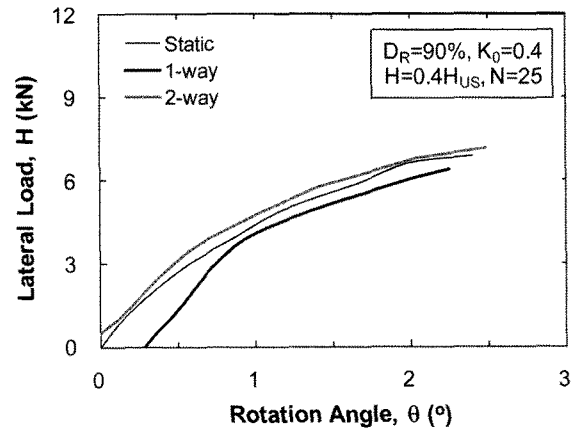


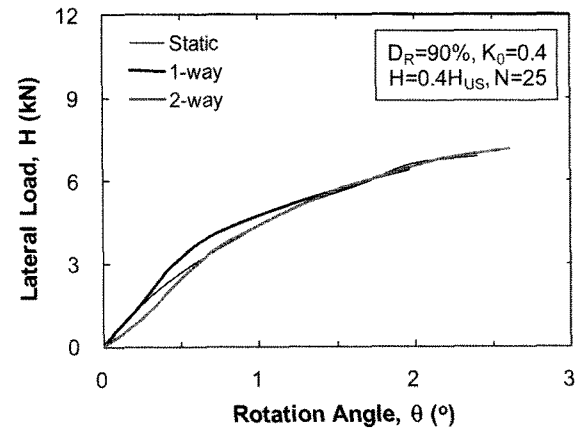
그림 10. 반복수평하중의 재하방법별 말뚝의 극한수평지지력 변화

비해 음(-)의 방향으로 영구수평변위가 발생한다. 따라서 말뚝 두부의 회전각이 2°일 때 말뚝에 가해지는 하중을 극한수평지지력으로 정의하는 상황에서 한방향 반복재하로 인해 발생하는 양(+)의 영구수평변위는 말뚝의 극한수평지지력을 감소시키게 되고, 양방향 반복재하로 인해 발생한 음(-)의 영구수평변위는 말뚝의 극한수평지지력을 증가시키게 된다. 또한 수평하중의 반복재하횟수가 많아질수록 반복재하 단계에서 발생하는 누적 영구수평변위가 더 커지게 되므로 한방향 반복재하를 받는 말뚝의 반복극한수평지지력은 정적극한수평지지력보다 더욱 작아지게 되고, 양방향 반복재하를 받는 말뚝의 반복극한수평지지력은 정적극한수평지지력보다 더욱 커지게 되는 것이다.

이러한 반복수평하중의 재하방법에 따른 말뚝의 반복극한수평지지력 변화의 원인은 그림 11(b)에서 더욱 분명하게 볼 수 있다. 그림 11(b)는 그림 11(a)에 보인 수평재하시험의 결과에서 반복재하 과정에서 발생한 영



(a) 측정된 하중-회전각 곡선



(b) 수정된 하중-회전각 곡선

그림 11. 수평하중의 재하방법별 말뚝의 수평하중-회전각 곡선

구수평변위를 0으로 간주했을 때 말뚝의 수평하중-회전 각 곡선을 보인 것이다. 그림과 같이 말뚝의 극한수평지 지지력을 결정할 때 수평하중을 반복재하하는 동안 발생한 영구수평변위를 고려하지 않는다면 말뚝의 두부가 2° 회전했을 때의 하중인 말뚝의 극한수평지 지지력은 반복수평하중의 재하방법과 관계없이 거의 비슷하게 된다. 따라서 반복수평하중을 받는 말뚝의 반복수평극한 지지력이 반복하중의 재하방법에 따라 크게 달라지는 것은 하중의 재하방법에 따라 하중이 반복재하되는 동안 발생한 영구수평변위의 크기와 발생 경향이 다르기 때문이라 할 수 있다.

또한 그림 11(b)에서 보듯이 하중의 반복재하 후 수행한 수평재하시험의 초기단계에서 한방향 반복재하를 받은 말뚝의 하중지지가능력이 가장 크고 양방향 반복재하를 받은 말뚝의 하중지지가능력이 가장 작았다. 그러나 말뚝의 수평변형이 큰 상태에서는 한방향 반복재하보다 양방향의 반복재하를 받은 말뚝의 강성(단위 회전각에 대한 수평하중의 변화량)이 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 시험결과로부터 반복재하 단계 직후에 한방향 반복재하를 받은 말뚝의 전면부 지반은 하중의 반복재하로 인한 다짐도 증가로 인해 원지반보다 조밀해지고, 양방향 반복재하를 받은 말뚝의 전면부 지반은 하중이 반복재하되는 동안 발생한 큰 크기의 틈새로 인해 다짐도가 감소해서 원지반보다 느슨해짐을 알 수 있다. 그러나 말뚝의 수평변형이 커지면 그림 8에서 보듯이 한방향보다 양방향 반복재하 시 압축되는 흙의 양이 많게 되므로 Brown 등(1988)이 보고한 바와 같이 한방향보다 양방향 반복재하 시 말뚝의 전면부 지반이 더 조밀하게 된다는 것을 알 수 있다.

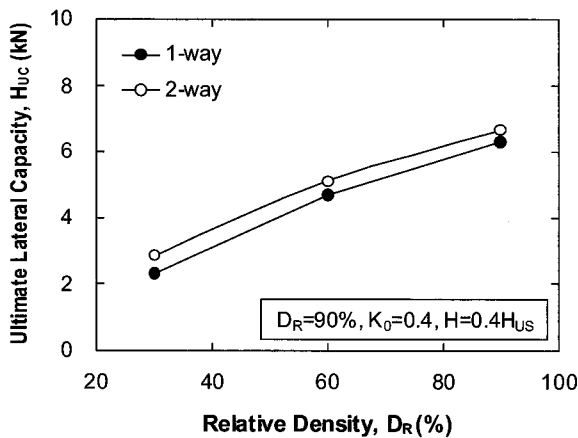


그림 12. 반복하중의 재하방법별 지반의 상대밀도에 따른 말뚝의 반복 극한수평지 지지력 변화

그림 12는 반복수평하중이 한방향과 양방향으로 재하될 때 지반의 상대밀도에 따른 말뚝의 반복극한수평 지지력 변화를 보인 것이다. 그림과 같이 모든 상대밀도에서 한방향보다 양방향 반복재하를 받은 말뚝의 반복 극한수평지 지지력이 큰 것으로 나타났다. 그리고 반복하중의 재하방법을 한방향에서 양방향으로 전환했을 때 반복극한수평지 지지력의 증분은 지반의 상대밀도가  $D_R=30, 60, 90\%$ 일 때 각각 23.1%, 8.7%, 5.9%로, 지반의 상대밀도가 커질수록 반복하중의 재하방법에 따른 말뚝의 반복극한수평지 지지력 변화량은 감소하였다.

### 3.4 휨모멘트

그림 13은  $D_R=90\%$ 인 지반에 타입된 말뚝에  $0.4H_{Us}$  크기의 수평하중을 한방향과 양방향으로 10회 반복재하하는 동안 한방향 재하 시에는 1/2주기 단계에서 그리고 양방향 재하 시에는 1/4주기 단계에서 말뚝에 발생하는 휨모멘트 분포를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 반복수평하중을 양방향보다 한방향으로 재하했을 때 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트가 더 크고, 최대 휨모멘트의 발생하는 깊이도 반복하중이 한방향으로 재하될 때 더 깊은 것으로 나타났다.

이러한 시험결과는 반복수평하중의 재하방법에 따른 주변 지반의 다짐도 차이와 그로 인해 극한상태에서 말뚝에 작용하는 수동토압의 차이 때문에 발생한다. 즉, 그림 14와 같이 일정한 크기의 반복수평하중이 한방향과 양방향으로 재하될 때 한방향 재하의 경우(영역 A와

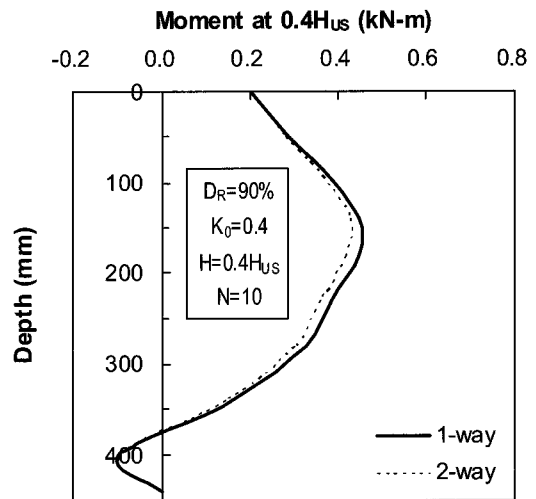


그림 13. 반복하중 재하 시 하중 재하방법에 따른 말뚝 내 휨모멘트 변화



A')보다 양방향 재하의 경우(영역 B와 B')에 말뚝에 의해 수평으로 밀리는 흙의 양이 더 많아서 말뚝 주변지반의 다짐도가 더 크게 된다. 또한 말뚝에 일정 크기의 수평하중이 반복재하되는 동안 말뚝 상부의 전면부와 하부의 후면부에 작용하는 수동토압도 반복하중이 한방향보다 양방향으로 재하되었을 때 더 크게 된다. 그 결과 말뚝에 큰 크기의 수동토압이 작용하는 양방향 반복재하의 경우보다 상대적으로 작은 크기의 수동토압이 작용하는 한방향 반복재하의 경우에 지표면으로부터 더 깊은 깊이에서 반복수평하중과 수동토압이 힘평형을 이루게 된다. 따라서 말뚝에 작용하는 수평 전단력(즉 수평하중의 합력)이 0인 지점에서 휨모멘트가 최대가 되는 점을 고려하면 말뚝에 양방향보다 한방향으로 반복수평하중이 재하될 때 말뚝 내 최대 휨모멘트의 발생 깊이가 더 깊어지고, 양방향보다는 한방향 반복재하 시에 수평하중과 수동토압의 작용점까지 거리가 더 길어지게 되므로 말뚝 내에 발생하는 최대 휨모멘트의 크기도 양방향보다 한방향 반복재하 시에 더 크게 됨을 알 수 있다.

또한 그림 13에서 얻어진 시험결과는 반복수평하중의 재하방법별로 하중의 재하횟수에 따른 말뚝 내 최대 휨모멘트의 크기와 발생 깊이의 변화를 나타낸 그림 15에서 더욱 분명하게 볼 수 있다. 그림 15(a)에서 보듯이 양방향보다는 한방향 반복재하를 받는 말뚝에서 최대 휨모멘트가 더 크게 발생하고, 반복수평하중의 재하횟수가 증가함에 따라 반복하중의 재하방법에 따른 말뚝 내 최대 휨모멘트의 차이도 커지는 것으로 나타났다. 또한 그림 15(b)에서 보듯이 반복수평하중의 재하횟수와 무관하게 양방향보다 한방향 반복재하를 받는 말뚝에서 최대 휨모멘트의 발생 깊이가 더 깊었다.

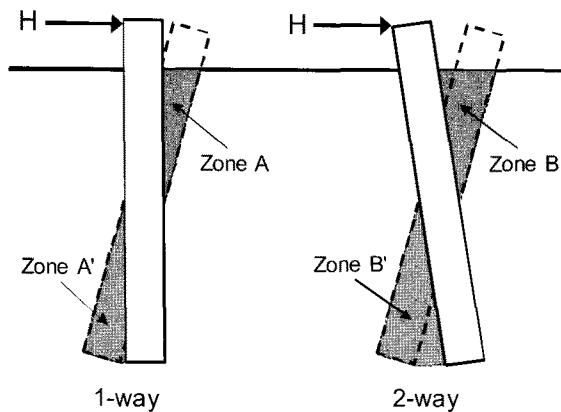
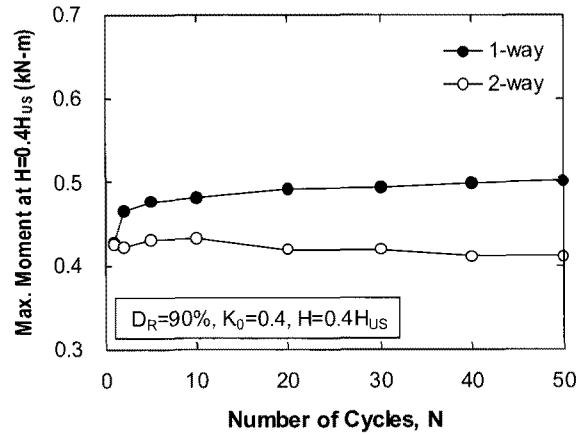
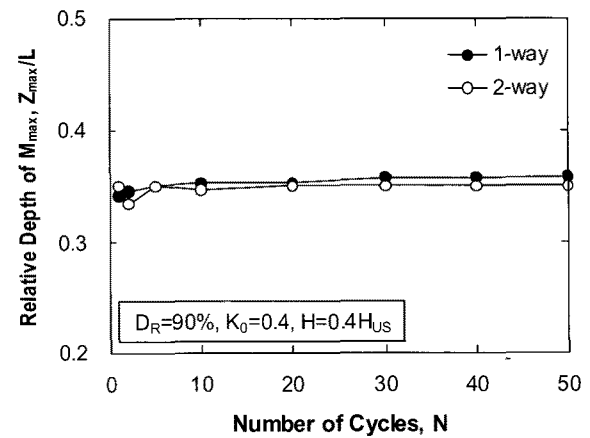


그림 14. 반복수평하중의 재하방법별 주변지반의 다짐 영역 비교

한편, 그림 16은  $D_R=90\%$ 인 지반에 타입된 말뚝에  $0.4H_{US}$  크기의 수평하중을 한방향과 양방향으로 10회 반복재하한 후 수평재하시험을 수행했을 때 극한상태



(a) 최대 휨모멘트 크기



(b) 최대 휨모멘트 발생깊이

그림 15. 반복하중 재하 시 하중의 재하횟수에 따른 재하방법별 말뚝 내 최대 휨모멘트의 크기 및 발생깊이 변화

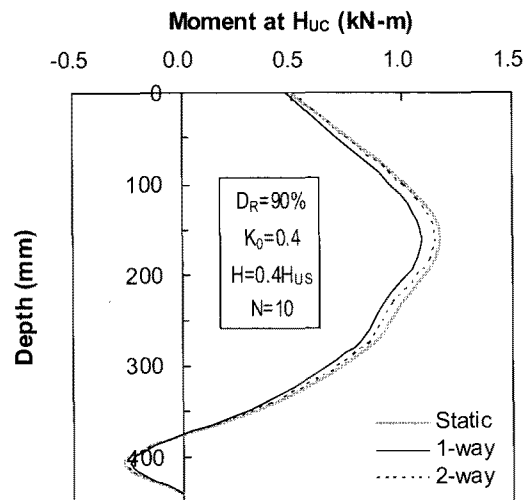
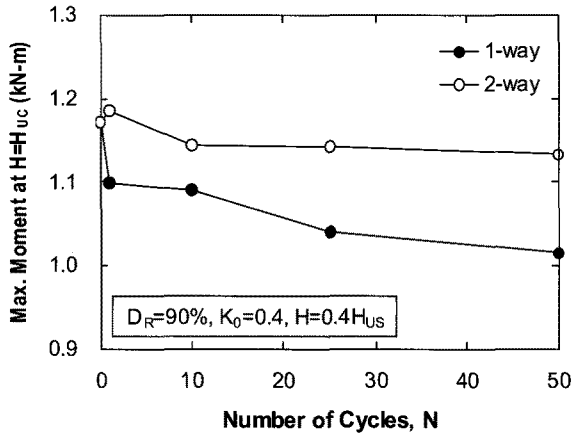
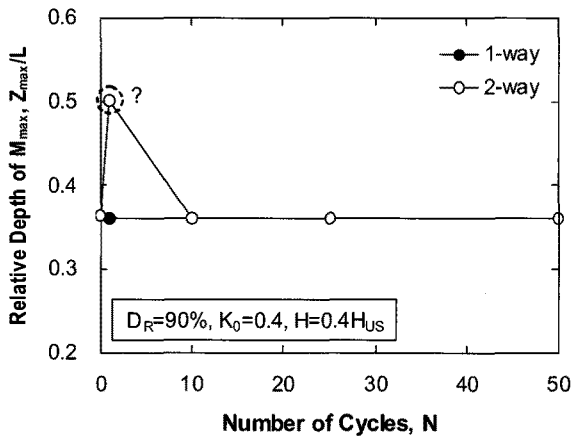


그림 16. 극한상태에서 반복하중의 재하방법별 말뚝 내 휨모멘트 곡선



(a) 최대 휨모멘트의 크기



(b) 최대 휨모멘트의 발생 깊이

그림 17. 극한상태에서 반복하중의 재하횟수에 따른 재하방법별 말뚝 내 최대 휨모멘트의 크기 및 발생깊이 변화

에서 말뚝에 발생한 휨모멘트 분포를 보인 것이다. 극한 상태에서 반복하중을 받은 말뚝에 발생한 최대 휨모멘트는 정적하중만을 받은 말뚝에 발생한 최대 휨모멘트보다 작았고, 그림 13과 15의 결과와 달리 한방향보다 양방향으로 반복재하를 받은 경우에 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트가 큰 것으로 나타났다. 이것은 일정한 크기의 수평하중이 작용하는 반복재하 단계와 달리 말뚝이 극한상태에 도달하면 그림 10과 같이 반복수평하중이 한방향보다 양방향으로 재하될 때 말뚝의 반복극한수평지지력이 더 크기 때문이며, 그 결과 반복수평하중이 한방향보다 양방향으로 재하될 때 극한상태에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트가 더 커지는 것이다.

그리고 그림 17은 반복수평하중의 재하방법별로 극한상태에서 반복하중의 재하횟수에 따른 말뚝 내 최대 휨모멘트의 크기와 발생 깊이를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 반복수평하중의 재하방법과 무관하게

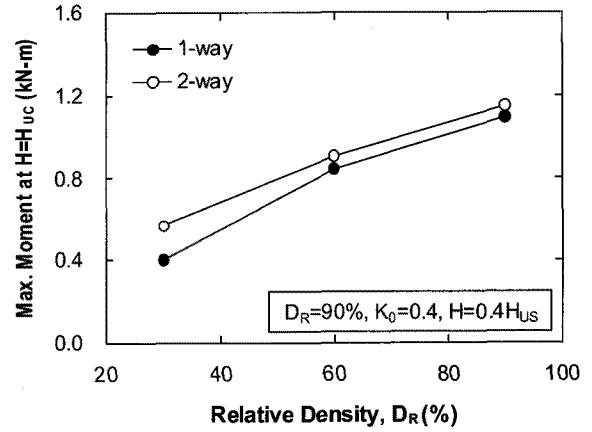


그림 18. 극한상태에서 지반의 상대밀도에 따른 하중 재하방법별 말뚝 내 최대 휨모멘트 변화

반복수평하중의 재하횟수가 증가할수록 말뚝에 유발되는 최대 휨모멘트의 크기는 감소하였다. 이것은 반복하중의 재하횟수가 많아질수록 말뚝 주변지반의 다짐도가 커지고 그에 따라 말뚝에 작용하는 수동토압이 커지게 되기 때문에 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트가 감소하는 것이다. 그러나 극한상태에서 말뚝 내 최대 휨모멘트의 발생 깊이는 반복하중의 재하방법 및 재하횟수와 무관하게 말뚝 근입길이의 0.36배로 일정하였다.

#### 4. 결론

반복수평하중을 받는 말뚝의 거동은 반복하중의 크기와 재하횟수 뿐만 아니라 반복하중의 재하방법(한방향 또는 양방향 재하)에 따라서도 달라지는 것으로 알려져 있으나, 현재까지 이에 대한 충분한 연구가 진행되지 않았을 뿐만 아니라 이러한 사실을 반영한 설계기준도 제안되지 않고 있다. 본 연구에서는 반복수평하중의 재하방법이 모래지반에 타입된 항타말뚝의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 가압토조를 이용한 모형말뚝재하시험을 수행하였으며, 실험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반복수평하중이 한방향으로 재하되는 말뚝의 누적 영구수평변위는 최초 재하방향으로 발생하지만 반복하중이 양방향으로 재하되는 말뚝의 영구수평변위는 최초 재하방향과 반대 방향으로 발생하였다.
- (2) 반복하중에 의한 영구수평변위의 발생 특성으로 인해 한방향 반복재하는 말뚝의 반복극한수평지지력을 감소시키고 양방향 반복재하는 말뚝의 반복극한

수평지지력을 증가시켰으며, 수평하중의 반복재하 횟수가 많아질수록 하중의 재하방법에 따른 말뚝의 반복극한수평지지력 차이는 더욱 커지는 경향을 보였다.

- (3) 반복수평하중의 재하방법에 따른 말뚝 주변지반의 다짐도 차이로 인해  $D_R=90\%$ 인 지반에서 수평하중이 10회와 50회 반복재하되는 동안 말뚝에 발생한 최대 휨모멘트는 반복하중이 양방향보다 한방향으로 재하되는 경우에 각각 11.3%와 22.1% 더 크게 나타났다.
- (4)  $D_R=90\%$ 인 지반에서 말뚝이 극한상태에 도달했을 때 말뚝에 발생한 최대 휨모멘트는 반복하중이 한방향보다 양방향으로 1-50회 재하된 경우에 4-16% 더 큰 것으로 나타났고, 반복수평하중을 받은 경우보다 그렇지 않은 경우에 더 큰 것으로 조사되었다.

### 감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 이공분야기초연구사업(2008-D00475)의 연구 결과임.

### 참고 문헌

- Barton, Y. O. (1982), Laterally loaded model piles in sand, centrifuge tests and finite element analyses, Ph.D. Thesis, Univ. of Cambridge.
- Broms, B. B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", *J. of Soil Mech. and Found. Eng., ASCE*, Vol.90, No.SM3, pp.123-156.
- Brown, D. A., Morrison, C. and Reese, L. C. (1988). "Lateral load behavior of pile group in sand", *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.114, No.11, pp.1261-1276.
- Davidson, H. L., Cass, P. G., Khilji, K. H., and McQuade, P. V. (1982), *Laterally loaded drilled pier research*, Report EL-2197, EPRI, 324p.
- Davisson, M. T., and Salley, J. R. (1970), "Model study of laterally loaded piles", *J. of Soil Mech. and Found. Eng., ASCE*, Vol.96, No.5, pp.1605-1627.
- Lin, S. -S., and Liao, J. -C. (1999), "Permanent strains of piles in sand due to cyclic lateral loads", *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, Vol.125, No.9, pp.798-802.
- Little, R. L., and Briaud, J. L. (1988), "Full scale cyclic lateral load tests on six single piles in sand", *Miscellaneous Paper GL-88-27, Geotech. Div., Texas A&M Univ., College Station, Texas*, 30p.
- Long, J. H., and Vanneste, G. (1994), "Effect of cyclic lateral loads on piles in sand", *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.120, No.1, pp.225-244.
- Matlock, H. (1974), "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay", *Paper No.1204, Proc. of the 2<sup>nd</sup> Annual Offshore Technology Conf.*, Houston, Texas, May, pp.577-594.
- Meyerhof, G. G., Mathur, S. K., and Valsangkar, A. J. (1981), "Lateral resistance and deflection of rigid wall and piles in layered soils", *Canadian Geotechnical J.*, Vol.18, pp.159-170.
- O'Neill, M. W., and Murchison, J. M. (1983), *An evaluation of p-y relationships in sands*, Research Report No. GT-DF02-83, Univ. of Houston, Houston, Texas.
- Parry, R. H. G., and Sanglamer, A. (1977), *Lateral load tests on single model piles with radiographic observations*, Cambridge Univ. Interim Report, CUED/C, Soils TR 36.
- Prakash, S. (1961), *Behavior of pile groups subjected to lateral loads*, Thesis, Univ. of Illinois, Urbana, 218p.
- Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D. (1974), "Analysis of laterally loaded piles in sand", *Paper No.2080, Proc. of the 6<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conf.*, Vol. 2, Houston, Texas, pp. 225-244.
- Rollins, K. M., Olsen, R. J., Egbert, J. J., Jensen, D. H., Olsen, K. G., and Garrett, B. H. (2006), "Pile spacing effects on lateral pile group behavior: load tests", *J. of Geotech. and Geoenviron. Eng., ASCE*, Vol.132, No.10, pp.1262-1271.
- Rosquoet, F., Thorel, L., Garnier, J., and Canepa, Y. (2007), "Lateral cyclic loading of sand-installed piles", *Soils and Foundations*, Vol.47, No.5, pp.821-832.
- Vucetic, M., and Dobry, R. (1988), "Degradation of marine clays under cyclic loading", *J. of Geotech. Eng., ASCE*, Vol.114, No.2, pp.133-149.

(접수일자 2010. 10. 13, 심사완료일 2010. 11. 15)