

## 모래지반에서 반복수평하중을 받는 항타말뚝의 거동 Behavior of Laterally Cyclic Loaded Piles Driven into Sand

백규호<sup>1)</sup>, Kyu-Ho Paik, 박원우<sup>2)</sup>, Won-Woo Park, 김영준<sup>2)</sup>, Young-Jun Kim

<sup>1)</sup> 관동대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kwandong University

<sup>2)</sup> 관동대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kwandong University

**SYNOPSIS** : Fourteen model pile load tests using a calibration chamber and instrumented model pile were performed to investigate the variation of the behaviors of driven piles in sands with soil and lateral cyclic loading conditions. Results of the model tests showed that the first loading cycle generated more than 70% of the pile head rotation developed for 50 lateral loading cycles. Lateral cyclic loading also made an increase of the ultimate lateral load capacity of piles for  $K_0=0.4$  and an decrease for  $K_0$  higher than 0.4. Higher portion of the increase or decrease in the ultimate lateral load capacity by lateral cyclic loading was generated for the first loading cycle due to densification of loosening of the soil around the pile by lateral cyclic loading. It was also observed that a two-way cyclic loading caused higher ultimate lateral load capacity of driven piles than a one-way cyclic loading. When the pile was in the ultimate state, the maximum bending moment developed in the pile increased with increasing  $K_0$  value of soil and was insensitive to the magnitude and number of lateral cyclic loading.

**Keywords** : lateral cyclic loading, magnitude of cyclic loading, number of cycles, bending moment, driven piles, calibration chamber test.

### 1. 서론

고층빌딩이나 송전철탑, 각종 해양구조물의 경우에는 자중에 의한 연직하중보다 바람이나 송전선에 의한 장력, 그리고 파랑하중 등에 의한 반복수평하중이 더 크게 된다. 따라서 이러한 구조물의 기초를 설계할 때에는 연직하중보다 수평하중이 설계 지배인자가 되므로 기초의 수평거동을 정확하게 예측, 분석하는 것은 매우 중요하다(Murff와 Hamilton 1993), 특히 기초로 사용되는 말뚝의 거동은 반복하중(cyclic loading)이 작용할 때와 정적하중(static loading)이 작용할 때 크게 달라지는 것으로 알려져 있기 때문에 반복수평하중을 받는 구조물의 기초를 설계할 때 지반특성과 함께 하중특성은 고려하는 것은 매우 중요하다(Long과 Vanneste 1994, Lin과 Liao 1999, Rollins 등 2006, Rosquoet 등 2007).

현재까지 보고된 연구결과에 따르면 반복수평하중을 받는 말뚝의 수평거동은 말뚝조건(말뚝의 재질과 설치방법, 관입깊이), 지반조건(응력상태, 상대밀도 등), 반복수평하중의 특성(최대 작용하중의 크기와 하중의 진폭, 작용횟수, 작용속도, 작용방법 등)에 따라 달라지는 것으로 나타났다(Long과 Vanneste 1994, Lin과 Liao 1999). 그러나 현재까지 보고된 연구결과의 대부분은 매우 제한된 조건하에서 얻어진 것이거나 반복수평하중이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 정성적으로만 분석한 것이 대부분이며, 그로 인해 현재까지도 반복수평하중의 영향을 고려해서 말뚝의 수평거동을 합리적으로 예측할 수 방법이 정립되지 못하고 있다.

본 연구에서는 반복수평하중의 크기 및 작용횟수와 지반조건이 모래지반에 타입된 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 분석하기 위해서 가압토조와 모형말뚝을 이용한 반복수평재하시험을 수행하였다. 또한 반복수평하중과 정적수평하중을 받는 말뚝의 거동을 비교하기 위해서 정적수평재하시험도 함께 수행하였다. 특히 모형말뚝에는 8개 위치에 총 16개의 스트레인 게이지를 부착해서 재하시험을 수행하는 동안 하중단계별로 말뚝에 발생하는 휨모멘트를 측정함으로써 지반조건과 반복수평하중의 크기 및 작용횟수, 작용방법이 말뚝의 극한수평지지력 뿐만 아니라 말뚝에 발생하는 휨모멘트에 미치는 영향에 대해서도 조사하였다.

## 2. 실내모형시험

### 2.1 모형지반 조성

일반적으로 현장의 지반상태는 원심모형시험기(centrifuge)나 가압토조(calibration chamber)를 이용해서 실내에서 재현될 수 있으며, 본 연구에서는 모형지반의 조성을 위해서 가압토조를 사용하였다. 시험에 사용된 가압토조는 그림 1과 같이 모형지반이 조성되는 모래 저장조(container)와 모형지반의 균질도와 상대밀도를 조절하는 지반조성장치로 구성된다. 모래 저장조는 직경이 775mm이고 높이가 1250mm로, 그 바닥과 측벽에는 고무막(membrane)을 설치하여 압력조절기(regulator)를 통해서 크기가 조절된 압축공기를 고무막에 전달함으로써 모형지반의 응력상태를 자유롭게 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 지반조성장치는 모래상자(sand hopper)와 모래분산장치(sand diffuser)로 구성되는데, 모래상자의 바닥에는 크기 조절이 가능한 구멍을 다수 개 설치해서 모래 저장조로 낙하하는 모래의 유출량을 조절할 수 있도록 하였다. 또한 모래상자 아래에 설치된 모래분산장치는 8번과 10번체로 구성되며, 모래상자에서 유출된 모래가 모래분산장치를 통과하도록 함으로써 모래 저장조에 균질한 모형지반이 조성되도록 하였다.

이상과 같은 가압토조에 모형지반을 조성하기 위해서 함수비가 0.5% 이하가 되도록 대기중에서 건조된 주문진 표준사를 사용하였다. 시험에는 모형지반의 균질성을 높이고 모래의 평균입경에 대한 시험말뚝의 직경 비로 정의되는 내적치수효과(internal scale effect)를 최소화하기 위해서 10번체를 통과한 모래만 사용하였으며, 이렇게 정제된 시험모래의 비중( $G_s$ )은 2.66이었고 최대 및 최소건조단위중량은 각각  $16.37\text{kN/m}^3$ 과  $13.53\text{kN/m}^3$ 으로 측정되었다. 그리고 체분석시험을 통해서 얻어진 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_c$ )는 각각 1.43과 0.90이었으며, 시험모래는 통일분류법에 의해 SP(poorly grade sand)로 분류되었다.

본 시험에서 모형지반은 모래상자에서 유출되는 모래의 양과 낙하고의 조절을 통해서 지반의 상대밀도를 조절하는 낙사법(raining method)으로 조성되었으며, 모형지반은 90%의 상대밀도로 조성되었다. 모형지반의 균질성을 확보하기 위해서 1회의 강사(pluviation)를 통해서 조성되는 모형지반의 높이를 10cm로 제한함으로써 가압토조 내 모형지반은 총 13회의 강사에 의해 조성되었다. 이러한 방법으로 모형지반을 조성한 후 가압토조의 뚜껑을 결합하고, 토조의 측벽과 바닥에 설치한 고무막에 계획된 크기의 압축공기를 18시간 동안 계속해서 가함으로써 모형지반을 소정의 응력상태로 압밀시켰다.

한편, 모형지반을 조성하는 동안 지반의 상대밀도를 확인하기 위해서 모형지반의 두께가 100cm가 되었을 때 직경이 5cm이고 높이가 4cm인 소형 그릇을 가압토조의 중심으로부터 20cm 떨어진 지점에 대칭으로 설치하였다. 그리고 시험말뚝에 대한 재하시험을 완료한 후 모형지반을 해체하는 과정에서 조심스럽게 이 두개의 그릇을 회수하고, 이때 몰드에 담겨진 모래의 중량을 측정함으로써 모형지반의 상대밀도를 확인하였다. 그 결과 낙사법으로 조성된 모형지반의 상대밀도 편차는 계획된 상대밀도 대비 2% 이내로 매우 균질한 것으로 나타났다.



그림 1. 시험에 사용된 가압토조

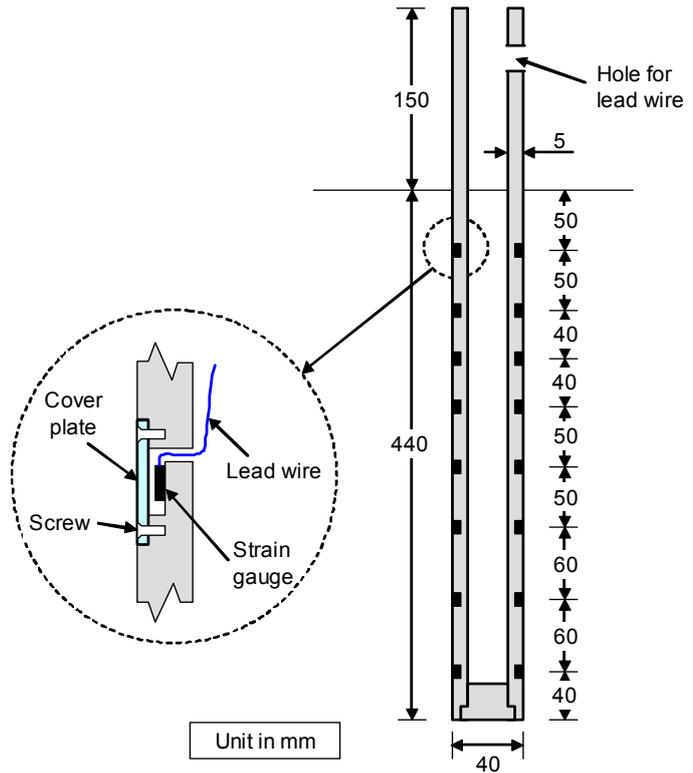


그림 2. 모형말뚝의 개략도

## 2.2 모형말뚝

본 시험에서는 지반특성과 말뚝의 두부에 작용하는 반복수평하중의 특성이 모래지반에 타입된 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 벽 두께가 5mm이고 직경이 40mm, 길이가 590mm인 원형 폐단말뚝(close-ended pile)을 시험말뚝으로 사용하였다. 특히 수평하중을 받는 말뚝의 경우 말뚝의 수평 지지력과 함께 말뚝에 유발되는 휨모멘트도 중요한 설계요소가 된다. 따라서 모형말뚝에 대한 수평재하시험이 진행되는 동안 하중 단계별로 말뚝에 발생하는 휨모멘트를 측정하기 위해서 그림 2와 같이 모형말뚝에서 지반에 관입되는 440mm 부분에 대해 8개 위치(지표면으로부터 5, 10, 14, 18, 23, 28, 34, 40mm)에 16개의 스트레인 게이지를 대칭으로 부착하였다. 특히 모형지반에 시험말뚝을 타입하는 동안 말뚝에 설치한 스트레인게이지가 파손되는 것을 막기 위하여 스트레인게이지를 부착할 지점의 말뚝 표면에 폭이 3mm이고 길이와 깊이가 각각 10mm와 3mm인 스트레인게이지 설치용 홈을 성형한 후 그 홈 내부에 스트레인게이지를 부착하고 홈의 입구부는 얇은 철판으로 막았다. 또한 시험말뚝에 설치된 스트레인게이지의 전선들은 스트레인게이지 설치용 홈의 상부에 설치한 배선용 구멍을 통해 시험말뚝의 내부로 배선하고 말뚝 두부에 설치한 전선 구멍으로 빼냄으로써 모형말뚝시험을 수행하는 동안 스트레인게이지의 전선이 파손되거나 시험에 지장을 주는 것을 방지하였다.

한편, 시험말뚝에 대한 수평재하시험이 진행되는 동안 말뚝에 발생하는 휨모멘트를 정확하게 측정하기 위해서는 말뚝에 대칭으로 부착한 스트레인게이지가 정확하게 하중 작용방향 선상에 있어야 한다. 따라서 본 시험에서는 시험말뚝을 모형지반에 타입하는 동안 말뚝에 부착한 스트레인게이지들이 정확하게 수평하중 작용방향 선상에 놓이도록 하기 위해서 그림 3과 같이 스트레인게이지를 설치한 방향과 직각되는 곳에 말뚝의 설치방향을 유도하는 폭과 깊이가 각각 3mm이고 길이가 150mm인 가이드 홈(guide groove)을 설치하였다. 또한 가압토조의 뚜껑 중심부에 결합시킨 향타 가이드(driving guide)에는 말뚝에 설치한 가이드 홈에 끼워질 수 있는 가이드 핀(guide pin)을 수평하중 작용방향과 직각되는 곳에 설치해서 말뚝을 150mm 깊이로 지반에 타입할 때까지 말뚝에 부착한 스트레인게이지가 하중작용 방향 선상에 위치하도록 하였다.

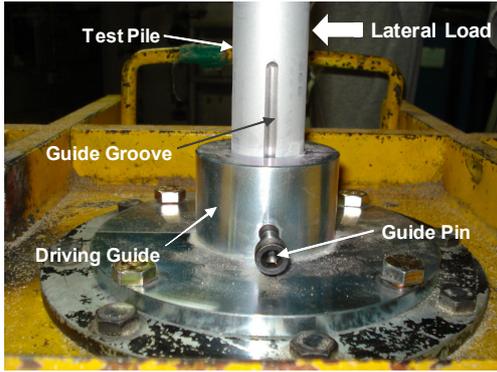


그림 3. 가이드 핀과 가이드 홈

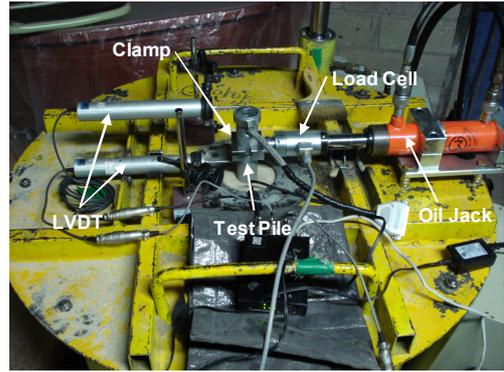


그림 4. 수평재하시험 전경

### 2.3 시험방법

모형말뚝재하시험은 표 1과 같이 모형지반의 응력상태와 반복수평하중의 크기 및 반복횟수, 작용방법을 바꿔가면서 총 14회를 수행하였으며, 모든 모형시험에서 모형지반의 상대밀도와 연직응력은 각각 90%와 98kPa로 그리고 시험말뚝의 관입깊이는 44cm로 일정하게 하였다. 지반의 수평응력에 따른 말뚝의 정적 및 동적 수평거동 변화를 알아보기 위해서 말뚝의 관입깊이 중간부에 작용하는 연직응력에 대한 수평응력의 비로 정의되는 모형지반의 정지토압계수( $K_0$ )를 0.4와 0.7, 1.0으로 변화시키면서 총 3회의 정적수평재하시험을 수행하였고, 여기서 얻어진 정적극한수평지지력의 40%에 해당하는 수평하중을 해당 지반조건에 설치된 말뚝에 한방향으로 10회 작용하는 방법으로 3회의 반복수평재하시험을 수행하였다. 그리고 모형지반의 정지토압계수가  $K_0 = 0.4$ 일 때 정적극한수평지지력의 40%에 해당하는 수평하중을 말뚝의 두부에 한방향으로 1, 5, 10, 25, 50회 반복재하하면서 5회의 반복수평재하시험을 수행함으로써 반복수평하중의 작용횟수에 따른 말뚝의 수평거동 변화를 조사하였다. 또한 말뚝에 가해지는 반복수평하중의 크기와 작용방법(한방향과 양방향)이 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 모형지반의 정지토압계수가  $K_0 = 0.4$ 인 상태에서 해당 지반조건에서 측정된 말뚝의 정적극한수평지지력의 20%, 40%, 60%에 해당하는 수평하중을 말뚝에 한방향으로 10회 가하는 방법으로 3회의 반복수평재하시험을 수행하였고, 말뚝의 정적극한수평지지력의 40%에 해당하는 수평하중을 말뚝에 양방향으로 5회와 10회 가하는 방법으로 2회의 반복수평재하시험을 추가로 수행하였다.

표 1. 모형시험의 지반 및 하중조건

기 호	지반조건			하중조건			정재하시험 수행여부
	$D_R$ (%)	$\sigma_{h0}$ (kPa)	$K_0$	크기, H	작용횟수, N	작용방향	
K0.4-0.2H-N10-1D	90	98	0.4	$0.2H_u$	10	1방향	
K0.4-0.4H-Nx-1D	90	98	0.4	$0.4H_u$	1/5/10/25/50	1방향	
K0.4-0.6H-N10-1D	90	98	0.4	$0.6H_u$	10	1방향	○
K0.7-0.4H-N10-1D	90	98	0.7	$0.4H_u$	10	1방향	○
K1.0-0.4H-N10-1D	90	98	1.0	$0.4H_u$	10	1방향	○
K0.4-0.4H-Nx-2D	90	98	0.4	$0.4H_u$	5/10	2방향	

이상에 언급된 14개의 수평재하시험을 간략하게 표기하기 위해 각 재하시험의 명칭은 표 1에서 보듯이 4개의 문자로 구성하였다. K로 시작되는 첫번째 문자는 시험말뚝의 관입깊이 중간부에 작용하는 연직응력에 대한 수평응력의 비로 정의되는 정지토압계수이며, H로 끝나는 두번째 문자는 시험말뚝에 가해지는 반복수평하중의 크기를 동일 지반조건에서 측정된 말뚝의 정적극한수평지지력( $H_{us}$ )에 대한 비율로 표시한 것이다. 또한 N으로 시작되는 세번째 문자는 말뚝에 가해지는 반복수평하중의 작용횟수를 나

타내고, D로 끝나는 네번째 문자는 반복수평재하시험의 하중재하 방법에 관한 것으로, 이 값이 1이면 수평하중을 한방향으로 반복재하하는 것이고 2이면 양방향으로 반복재하하는 것을 나타낸다.

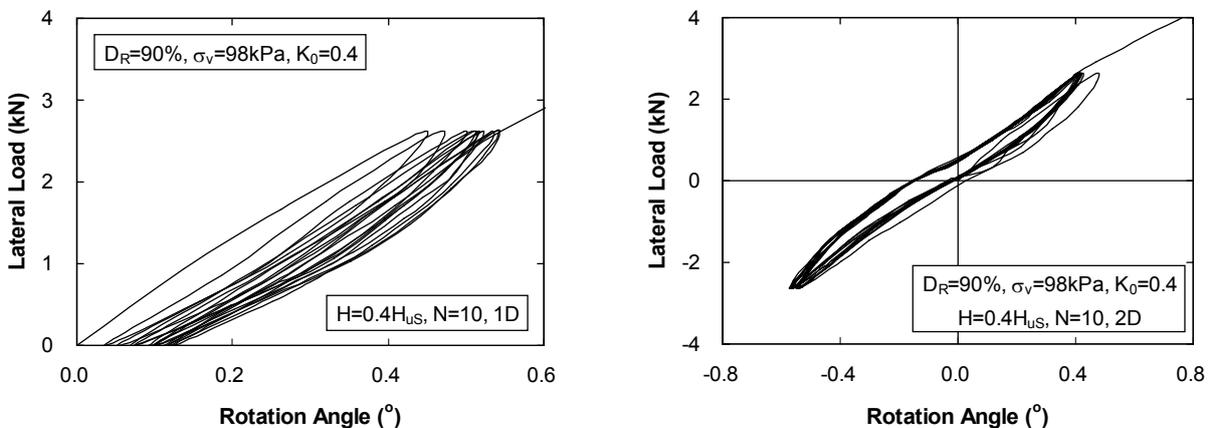
표 1에 보이는 지반조건을 갖는 모형지반이 낙사법으로 가압토조에 조성되면 약 89kN의 무게를 갖는 도넛형 햄머를 50cm 높이에서 자유낙하시켜서 시험말뚝을 모형지반에 44cm 깊이까지 타입하였다. 이 과정에서 말뚝에 부착된 스트레인게이지들이 수평하중 작용방향 선상에 높이도록 하기 위해서 항타가이드에 설치된 가이드 핀을 시험말뚝 선단에 형성한 가이드 홈에 결합시킨 상태에서 시험말뚝을 약 15cm 깊이까지 타입하였고, 그 이후에는 가이드 핀을 제거한 상태에서 동일한 항타방법으로 시험말뚝을 44cm의 깊이까지 계속해서 타입하였다.

모형지반에 시험말뚝을 타입한 후 그림 4에서 보이듯이 지표면으로부터 75mm 떨어진 높이에서 시험말뚝에 수평하중을 가했으며, 하중이 재하되는 동안 지표면으로부터 각각 45mm와 145mm 떨어진 지점에 설치된 2개의 LVDT를 이용해서 말뚝의 하중단계별 수평변위와 두부 회전각을 측정하였다. 특히 시험말뚝에 양방향으로 반복수평하중을 재하하기 위해 1개의 복동식 유압잭을 사용하였고, 유압잭에 연결된 하중계(load cell)와 시험말뚝의 두부는 클램프(clamp)를 이용해서 힌지(hinge)형태로 결합시켰다. 시험말뚝과 계측기의 설치가 완료된 후 실시한 말뚝의 정적수평재하시험에서 수평하중은 하중단계별로 약 20분 정도 일정하게 유지하였고, 20분이 경과한 후에도 말뚝의 변위가 계속 발생하는 경우에는 말뚝의 시간당 회전각이  $0.1^\circ$  이하가 될 때까지 하중 크기를 일정하게 유지하였다. 반면, 시험말뚝에 대한 반복수평재하시험에서는 동일 지반조건하에서 수행된 정적수평재하시험으로부터 얻어진 정적극한수평지지력의 20%나 40%, 60%에 해당하는 수평하중을 시험말뚝의 두부에 한방향 또는 양방향으로 계획된 횟수만큼 작용시킨 후 시험말뚝에 가한 수평하중을 완전히 제거한 상태에서 위에 언급한 정적수평재하시험법과 동일한 방법으로 방법으로 수평재하시험을 연속해서 수행하였다. 이때 수평재하시험을 수행하는 동안 하중의 빠른 재하로 인해 시험말뚝에 관성력(inertia)이 발생하는 것을 막기 위해 시험말뚝에 가해지는 수평하중은 충분히 느리게 재하(반복하중 1회 재하에 약 30초 소요)하였다.

### 3. 시험결과 및 분석

#### 3.1 말뚝의 두부변위

그림 5는  $K_0=0.4$ 인 지반에 타입된 시험말뚝에 정적극한수평지지력( $H_{us}$ )의 40%에 해당하는 하중을 한방향과 양방향으로 10회 작용시켰을 때 말뚝의 두부에 작용하는 수평하중과 말뚝 두부의 회전각 간의 관계를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 일정한 크기의 반복수평하중이 한방향으로 작용하면 하중 작용횟수가 증가함에 따라 말뚝 두부의 회전각은 점차 커졌고 말뚝의 단위 회전각에 대한 수평하중 변화량으



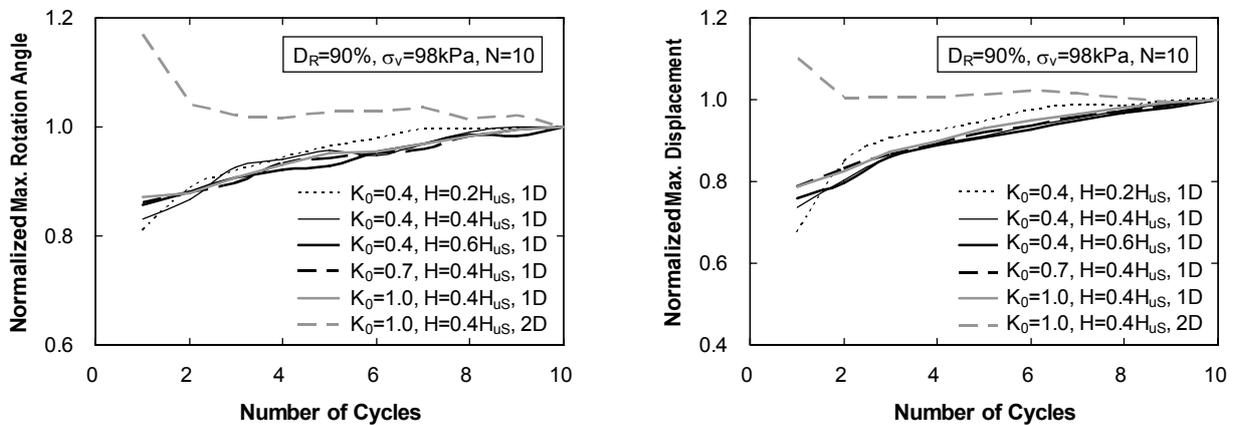
(a) 한방향 재하 시

(b) 양방향 재하 시

그림 5. 반복수평재하 시 수평하중-회전각 곡선

로 정의되는 말뚝 강성도(stiffness)도 조금씩 증가하였다. 그러나 수평하중이 양방향으로 작용하면 하중 작용횟수가 많아짐에 따라 말뚝 두부의 회전각과 강성도는 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 또한 한방향 재하의 경우에는 반복수평하중의 작용횟수가 많아질수록 재하방향으로 발생하는 영구변위가 증가하였으나 양방향 재하의 경우에는 최초 재하방향과 반대방향으로 영구변위가 증가하는 것으로 나타났다.

그림 6은 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 작용횟수에 따른 말뚝 두부의 회전각(또는 수평변위) 변화를 반복하중이 10회 작용했을 때의 회전각(또는 수평변위)으로 규준화해서 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 10회의 반복수평하중이 한방향으로 작용하는 동안 말뚝 두부에 발생한 회전각의 80-87%와 수평변위의 70-80%가 최초의 반복수평하중이 작용했을 때 발생하였고, 반복수평하중이 양방향으로 재하된 경우에는 반복하중이 2-3회 작용했을 때 최종 회전각(또는 수평변위)에 도달하였다. 이것은 말뚝에 수평하중이 반복해서 재하되면 그림 5와 같이 말뚝의 수평변위가 증가했다가 일정량만큼 회복(rebound)하게 되는데 이때 말뚝의 수평변위가 회복되면서 말뚝 전면부에서 발생하는 공극에 주변의 모래가 유입되어 지반이 다져지기 때문에 반복수평하중의 작용횟수가 증가할수록 말뚝의 수평변위 증가량은 감소하는 것이다. 특히 이상과 같은 반복수평하중의 작용횟수에 따른 말뚝 두부의 변위 특성은 지반의 토압계수나 반복수평하중의 크기와 큰 관계가 없는 것으로 나타났다.



(a) 회전각

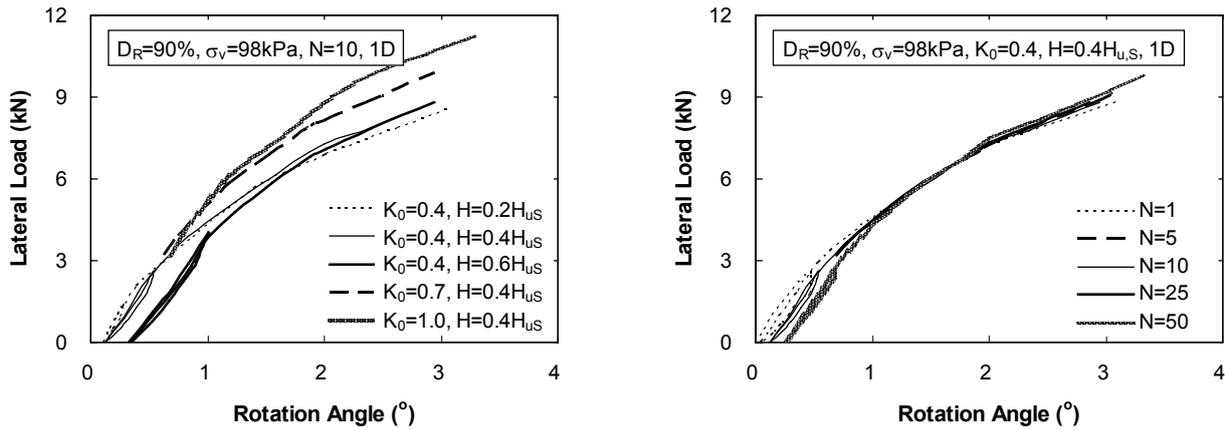
(b) 수평변위

그림 6. 반복수평하중의 작용횟수에 따른 말뚝 두부의 회전각과 수평변위 변화

그림 7은  $K_0$  값이 다른 3가지 조건의 지반에 타입된 시험말뚝에 정적극한수평지지력( $H_{us}$ )의 20, 40, 60%에 해당하는 크기의 수평하중을 반복해서 작용시켰을 때 후반 2회의 반복하중 재하 시와 그에 연속해서 수행한 수평재하시험으로부터 얻어진 말뚝의 수평하중-회전각 곡선을 보인 것이다. 그림에서 보듯이 지반조건이 일정할 때 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 크기가 커지면 말뚝에 반복수평하중이 작용하는 동안 발생하는 영구수평변위와 그로 인한 주변지반의 다짐도가 커져서 수평재하시험의 초기 하중단계에서 말뚝의 강성도는 커지지만 말뚝 두부의 회전각이 커지게 되면 반복수평하중의 크기와 무관하게 말뚝의 수평하중-회전각 곡선은 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 말뚝에 가해지는 반복수평하중의 크기와 작용횟수가 동일하더라도 지반의  $K_0$  값이 커지면 반복수평하중에 의한 말뚝 두부의 회전각은 감소하고 말뚝의 강성도는 커지는 경향을 보였다. 또한 지반조건이 일정할 경우 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 작용횟수가 많아지면 반복수평하중에 의해 발생하는 영구수평변위가 커져서 주변지반의 다짐도가 커지게 되므로 반복하중 작용 후 말뚝의 강성도도 커지는 것으로 나타났다. 그러나 이 경우에도 말뚝의 두부변위가 커지면 반복수평하중의 작용횟수와 관계없이 말뚝의 수평하중-회전각 곡선은 일정하게 유지되었다.

### 3.2 극한수평지지력

일반적으로 말뚝의 극한수평지지력은 말뚝 두부의 수평변위나 회전각에 의해 정의되거나 재하시험에



(a) 지반의  $K_0$ 와 반복하중의 크기에 따른 변화                      (b) 반복하중의 작용횟수에 따른 변화

그림 7. 지반 및 하중조건에 따른 말뚝의 수평거동 변화

서 얻어진 하중-변위 곡선에 도식적인 방법을 적용해서 결정한다. Davidson 등(1982)은 말뚝의 두부가  $2^\circ$  회전했을 때 말뚝에 작용하는 하중을 그리고 Meyerhof 등(1981)은 수평하중-변위 곡선에서 전반부의 비선형 곡선 이후에 나타나는 직선부의 시작점에 해당하는 하중을 극한수평지지력으로 정의하였다. 또한 Lee 등(2007)은 모형말뚝시험의 결과를 이용해서 Davidson 등(1982)과 Meyerhof 등(1981)의 방법에 의해 결정되는 극한수평지지력이 큰 차이를 보이지 않음을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 시험말뚝의 극한수평지지력을 결정하기 위해서 Davidson 등(1982)의 방법을 적용하였다.

그림 8은 말뚝의 정적극한수평지지력( $H_{us}$ )과 말뚝에  $0.4H_{us}$  크기의 수평하중이 10회 반복해서 작용했을 때 말뚝의 반복극한수평지지력( $H_{uc}$ )을 지반의  $K_0$ 값에 대해서 나타낸 것이다. 전반적으로 지반의  $K_0$ 가 커질수록 말뚝의 정적 및 반복극한수평지지력이 증가하였다.  $K_0=0.4$ 인 지반에서는 반복수평하중이 작용함에 의해 말뚝의 극한수평지지력이 증가하였으나  $K_0>0.7$ 일 때는 말뚝의 극한수평지지력이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 반복수평하중이 가해지는 과정에서 말뚝 주변 지반의 다짐으로 인한 수평지지력 증가와  $K_0>0.4$ 인 지반의 지표면 부근에서 토압계수가 자연퇴적 상태의 값인 0.4에 수렴함에 따른 수평지지력 감소가 원인으로 판단된다. 즉,  $K_0=0.4$ 인 지반에서는 반복수평하중에 의해 말뚝 주변지반이 다져져서 극한수평지지력이 증가하는 반면,  $K_0>0.4$ 인 경우에는 말뚝 주변지반의 다짐에 의한 지지력 증가보다 토압계수의 감소에 따른 지지력 감소가 더욱 커서 말뚝의 극한수평지지력이 감소하는 것이다.

그림 9와 10은 지반의 정토압계수가  $K_0=0.4$ 일 때 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 크기와 작용횟수에 따른 말뚝의 극한수평지지력 변화를 보인 것이다. 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 크기가 커지면 말

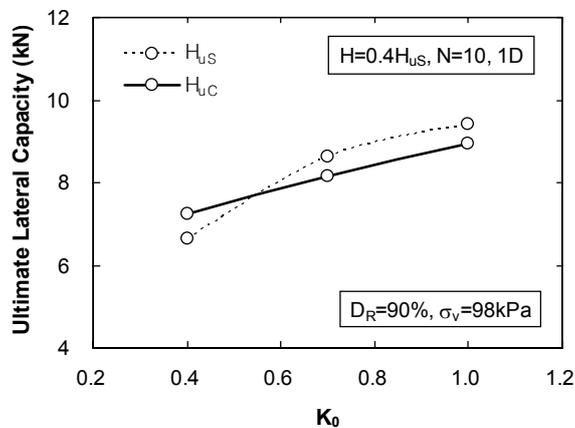


그림 8. 지반의  $K_0$ 에 따른 극한수평지지력의 변화

뚝의 수평변위와 회복량(rebound)이 커지게 되고 그 과정에서 발생하는 말뚝 주변지반의 다짐도가 커져서 말뚝의 극한수평지지력이 증가하게 된다(그림 9). 그러나 반복수평하중의 크기가 정적극한수평지지력의 0.4배를 넘어서면 반복재하 시 발생하는 말뚝 주변지반의 다짐도 증가에 따른 극한지지력의 증가보다 말뚝의 변위 증가로 인한 극한지지력의 감소 효과가 더욱 커서 전체적으로 말뚝의 극한수평지지력이 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 효과는 그림 7(a)에서 더욱 분명하게 볼 수 있다. 또한 말뚝에 반복수평하중이 1회 작용했을 때 극한수평지지력의 증가량이 반복수평하중을 50회 작용시켰을 때 극한수평지지력 증가량의 약 70%를 차지하였다(그림 10). 이로부터 반복수평하중으로 인한 말뚝 주변 지반 다짐량의 대부분은 최초 반복수평하중 작용 시 발생함을 알 수 있고, 이러한 결과는 그림 6에서도 볼 수 있다.

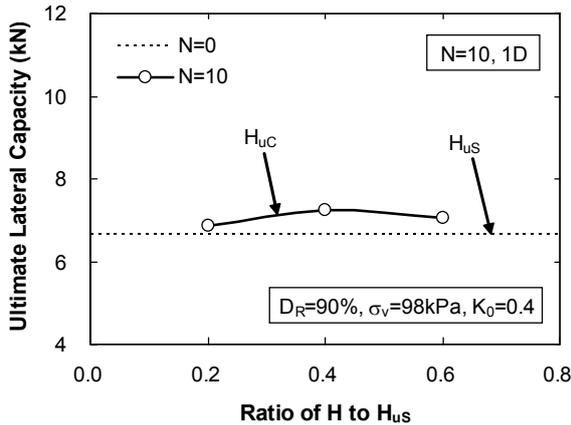


그림 9. 반복하중의 크기와 극한지지력의 관계

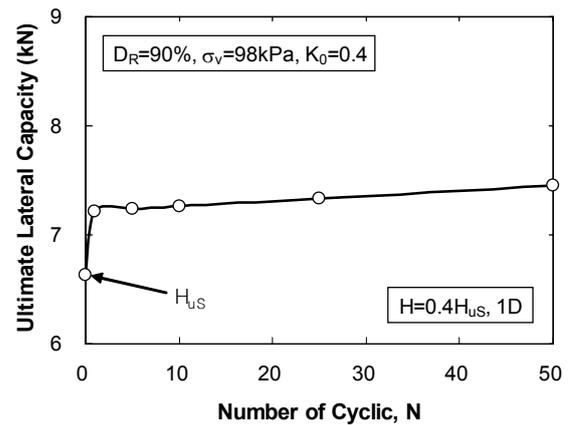
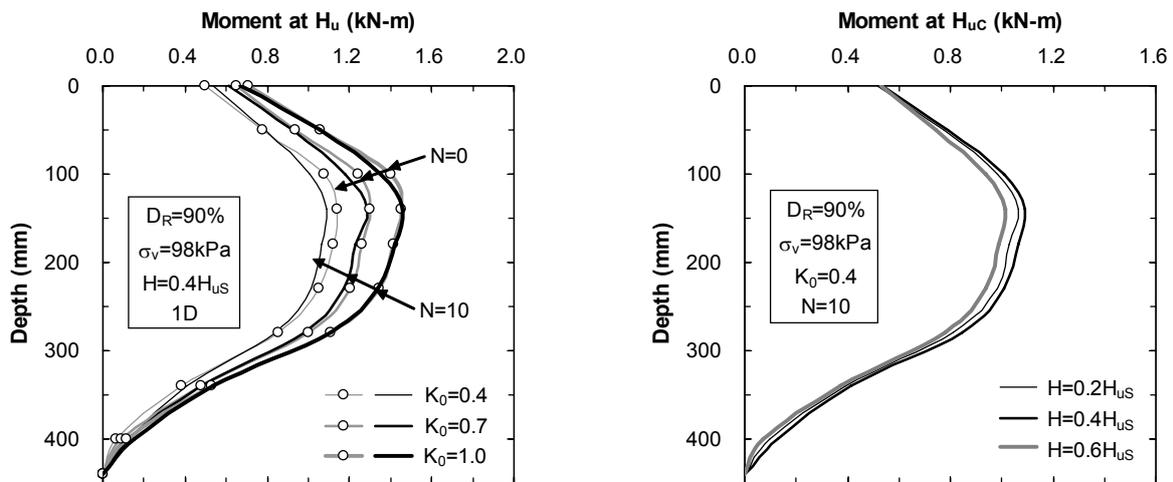


그림 10. 반복하중의 작용횟수와 극한지지력의 관계

### 3.3 휨모멘트 분포

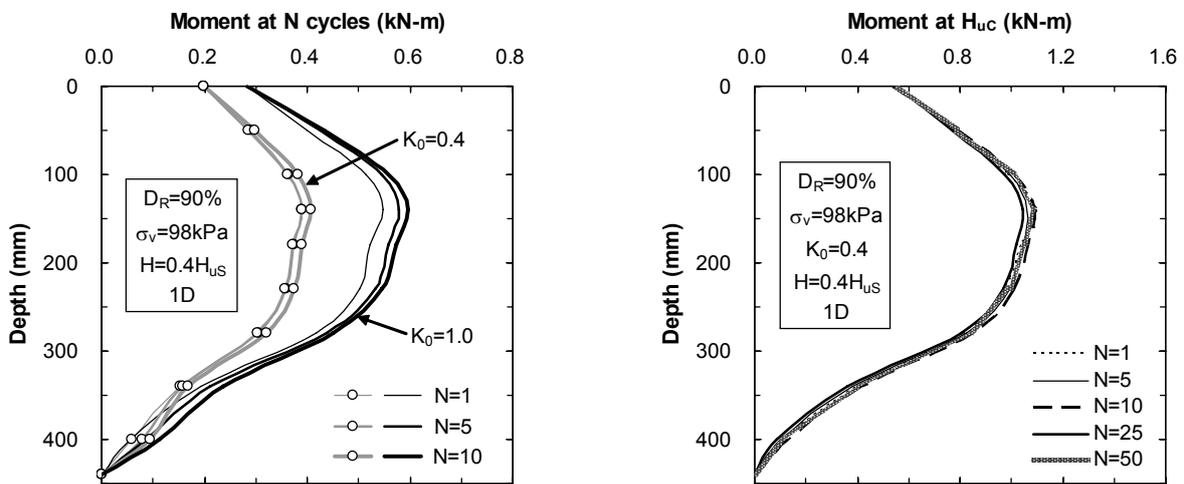
수평하중을 받는 말뚝을 설계함에 있어서 지반정수를 이용한 말뚝의 극한지지력 산정만큼 중요한 것이 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트이다. 그림 11은  $K_0$ 가 다른 3가지 상태의 지반에 설치된 말뚝에 10회의 반복수평하중이 작용했을 때( $N=10$ )와 전혀 작용하지 않았을 때( $N=0$ ) 극한상태에서 말뚝에 발생하는 모멘트 분포를 보인 것이다. 수평하중에 의해 말뚝에 유발된 최대 휨모멘트는 El Naggar와 Wei(1998)가



(a) 지반의  $K_0$  변화  
 (b) 반복수평하중의 크기 변화  
 그림 11. 지반의  $K_0$ 와 반복수평하중의 크기에 따른 휨모멘트 분포 변화

보고한 바와 같이 지반의  $K_0$ 와 말뚝에 가해진 반복수평하중의 크기 및 작용횟수와 무관하게 말뚝 근입 심도의 1/3지점에서 발생하였으며, 지반의  $K_0$ 가 커질수록 그 크기가 증가하였다. 그림 11(a)에서 보듯이  $K_0=0.4$ 인 경우에는 반복수평하중의 작용횟수가 많아질수록 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트가 감소하였으나 지반의  $K_0$ 가 커질수록 반복수평하중의 작용횟수에 따른 최대 휨모멘트의 변화가 매우 작아졌다. 특히 말뚝에 반복수평하중이 작용하면 하중이 작용하지 않을 때보다 지표면 부근에서 휨모멘트의 증가율이 작아졌으며, 이로부터 반복수평하중이 작용하면 지표면부근에서 말뚝에 작용하는 토압이 커짐을 알 수 있다. 그리고 반복수평하중을 받는 말뚝의 극한수평지지력이 클수록 극한상태에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트도 커지는 것을 그림 11(b)에서 볼 수 있다.

한편, 그림 12는 말뚝에  $0.4H_{us}$  크기의 반복수평하중이 한방향으로 작용할 때 반복하중의 작용횟수에 따른 말뚝 내 휨모멘트의 변화를 나타낸 것이다. 말뚝에 반복수평하중이 작용하는 동안 하중 작용횟수가 증가할수록 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트도 약간씩 증가하였으며, 지반의  $K_0$ 가 커질수록 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트의 증가율이 커지는 경향을 보였다. 그러나 말뚝이 극한상태에 도달했을 때 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 반복수평하중의 작용횟수와 무관하게 거의 일정한 값을 유지하는 것으로 나타났다.



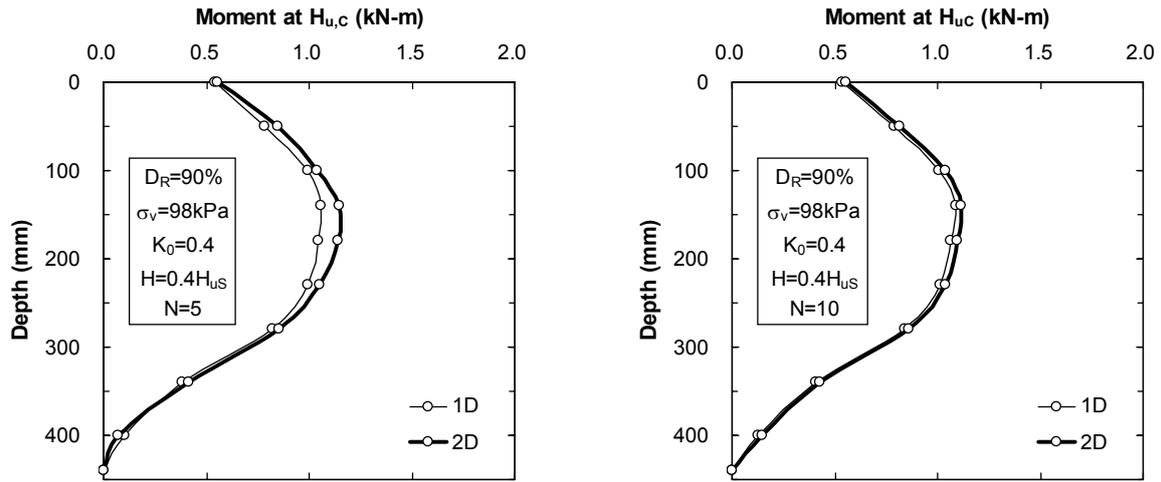
(a) 반복하중이 작용하는 동안 (b) 극한상태에서  
 그림 12. 반복수평하중의 작용횟수가 말뚝 내 휨모멘트에 미치는 영향

그림 13은 말뚝에  $0.4H_{us}$  크기의 반복수평하중이 한방향과 양방향으로 5회 작용했을 때 극한상태에서 말뚝 내 모멘트 분포를 비교한 것이다. 그림에 보이는 바와 같이 한방향 재하 시보다 양방향 재하 시 말뚝 주변지반의 다짐도가 더 커져서 말뚝의 극한수평지지력이 더 크게 되고, 그로 인해 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트도 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 재하방법에 따른 말뚝 내 최대 휨모멘트 차이는 반복수평하중의 작용횟수가 많아질수록 감소하였다.

#### 4. 결론

지반조건과 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 특성이 모래지반에 타입된 강성말뚝의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 총 13회의 가압토조를 이용한 모형말뚝재하시험을 수행하였으며, 시험결과를 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 50회의 반복수평하중으로 인해 발생하는 말뚝 두부변위의 약 70%가 최초 반복하중 작용 시 발생하였고, 지반의  $K_0$ 와 반복수평하중의 작용횟수가 커질수록 말뚝의 단위 회전각 대한 하중 증분의 비로 정



(a) 반복하중 5회 작용 시

(b) 반복하중 10회 작용 시

그림 13. 반복하중의 작용방법에 따른 말뚝 내 휨모멘트 변화

의 되는 말뚝의 강성도도 증가하였다.

2.  $K_0=0.4$ 인 지반에서는 반복수평하중의 작용횟수가 많아질수록 말뚝의 극한수평지지력이 증가하였고, 반복하중으로 인한 극한지지력 증분의 70% 정도가 최초 반복하중 작용 시 발생하였다. 반면  $K_0>0.4$ 인 지반에서는 반복수평하중으로 인한 주변지반의 다짐보다 지표면 부근 지반에서 토압계수의 감소 효과가 더욱 커서 말뚝의 극한수평지지력이 감소하는 경향을 보였다.
3. 일정한 횟수의 반복수평하중이 한방향으로 작용할 때보다 양방향으로 작용할 때 말뚝의 극한수평지지력과 최대 휨모멘트가 약간 더 큰 것으로 나타났다.
4. 극한상태에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 지반의  $K_0$ 가 커짐에 따라 뚜렷하게 증가하였으나 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 크기와 작용횟수의 변화에는 크게 영향을 받지 않았다.

## 참고문헌

1. Davidson, H. L., Cass, P. G., Khilji, K. H. and McQuade, P. V. (1982), *Laterally Loaded Drilled Pier Research*, Report EL-2197, EPRI. 324p.
2. El Naggar, M. H. and Wei, J. Q. (1998), "Response of Tapered Piles Subjected to Lateral Loading", *Canadian Geotechnical J.*, Vol. 36, pp. 52-71.
3. Lee, J. H., Paik, K. H. and Kim, D. H. (2007), "Estimation of Ultimate Lateral Load Capacity of Piles in Sands", *Geotechnique*, In Press.
4. 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.*, Vol. 125, No. 9, pp. 798-802.
5. Long, J. H. and Vanneste, G. (1994). "Effects of Cyclic Lateral Loads on Piles in Sand." *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 120. No. 1, pp. 225-244.
6. 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.
7. Murff, J. D. and Hamilton, J.. (1993). "P-Ultimate for Undrained Analysis of Laterally Loaded Piles." *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 119, No. 1, pp. 91-107.
8. 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.