

모래지반에서 반복수평하중을 받는 항타 말뚝의 수평거동

Lateral Behavior of Driven Piles Subjected to Cyclic Lateral Loads in Sand

백 규 호¹ Paik, Kyu-Ho

Abstract

The behavior of laterally cyclic loaded piles is different from that of piles under monotonic loading and depends on soil and load characteristics. In this study, model pile load tests were performed using a calibration chamber to investigate the effects of load characteristics on the behavior of laterally cyclic loaded piles in sand. Results of the model tests show that the ultimate lateral load capacity of laterally cyclic loaded piles decreases linearly with increasing the number of cycles and increases slightly with increasing the magnitude of cyclic lateral loads. When the piles reach the ultimate state, the maximum bending moment developed in the piles decreases linearly with increasing the number of cycles and it occurs at a depth of 0.36 times pile embedded length for all the number of cycles. However, both the magnitude and depth of the maximum bending moment of piles in the ultimate state increase slightly as the magnitude of cyclic lateral loads increases. It is also observed that the cyclic lateral loading generates a decrease in the ultimate lateral load capacity and maximum bending moment for piles in the ultimate state. In addition, based on the model test results, a new empirical equation for the ultimate lateral load capacity of laterally cyclic loaded piles in dense sand is also proposed. A comparison between predicted and measured load capacities shows that the proposed equation reflects satisfactorily the model test results.

요 지

반복수평하중을 받는 말뚝의 거동은 정적하중을 받는 경우와 다르며, 지반 및 하중특성에 영향을 받는다. 본 연구에서는 모래지반에서 반복하중특성이 말뚝의 수평거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압토조를 이용한 모형말뚝 재하시험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 반복수평하중을 받는 말뚝의 극한수평지지력은 하중의 반복재하횟수가 많아질수록 선형적으로 감소하였고 수평하중의 크기가 커질수록 조금씩 증가하였다. 그리고 수평하중의 반복재하횟수가 증가할수록 극한상태에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 감소했으나 그 발생위치는 말뚝 근입길이의 0.36배 되는 곳으로 일정하였다. 반면 반복수평하중의 크기가 증가하면 극한상태에서 말뚝의 최대 휨모멘트와 그 발생위치가 조금씩 증가하였으며, 반복수평하중은 정적하중에 비해 말뚝의 극한수평지지력과 극한상태에서 말뚝의 최대 휨모멘트를 감소시키는 것으로 나타났다. 또한 모형실험결과에 근거해서 조밀한 모래지반에서 반복수평하중을 받는 말뚝의 극한수평지지력을 산정할 수 있는 지지력산정식을 제안하였으며, 제안식으로부터 얻은 계산치를 실험치와 비교한 결과 제안식은 모형실험의 결과를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

Keywords : Cyclic lateral load, Load characteristic, Ultimate lateral load capacity, Bending moment, Calibration chamber test

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

일반적으로 송전철탑이나 부두, 석유시추선 등과 같은 구조물은 말뚝기초에 의해 지지되며, 이러한 구조물의 기초로 사용되는 말뚝은 구조물의 자중에 의한 연직하중보다 풍력이나 파랑하중에 의한 반복수평하중을 더 크게 받는다. 따라서 이러한 구조물의 기초를 설계할 때에는 연직하중보다 수평하중이 설계 지배인자가 되므로 기초로 사용될 말뚝의 수평거동을 정확하게 예측하는 것이 필요하다. 특히 Long과 Vanneste(1994)와 Lin과 Liao(1999), Rosquoet 등(2007)의 연구결과에 따르면 반복수평하중(cyclic lateral loading)을 받는 말뚝의 거동은 정적하중(monotonic loading)을 받는 경우와 크게 다르기 때문에 반복수평하중을 받는 말뚝기초를 설계할 때에는 수평하중의 특성을 고려하는 것이 무엇보다 중요하다.

현재까지 보고된 연구결과에 따르면 반복수평하중을 받는 말뚝의 수평거동은 말뚝의 재질과 설치방법, 근입 길이와 같은 말뚝조건과 지반의 상대밀도와 응력상태와 같은 지반조건 외에도 반복수평하중의 재하횟수와 상대적인 크기(정적극한수평지지력에 대한 수평하중의 비), 진폭(최대하중과 최소하중의 차이), 재하방법(한방향과 양방향)과 같은 하중특성에 따라 달라지는 것으로 나타났다(Matlock 1974, Vucetic과 Dobry 1988, Long과 Vannest 1994, Lin과 Liao 1999). 특히 Long과 Vannest (1994)와 Rosquoet 등(2007)은 모형 및 현장재하시험을 통해서 반복수평하중의 재하횟수가 증가하고 진폭이 커질수록 p-y곡선법에서 사용하는 지반반력계수는 감소하며, 하중이 반복재하되는 동안 반복재하횟수가 많아질수록 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 증가한다고 보고하였다. 그러나 반복수평하중을 받는 말뚝의 거동과 관련하여 현재까지 보고된 연구결과들의 대부분은 매우 제한된 조건하에서 얻어진 것으로, 반복수평하중의 특성이 말뚝의 지지력과 말뚝에 발생하는 휨모멘트에 미치는 영향에 대해 체계적으로 연구한 사례는 매우 드문 실정이다. 그 결과 몇몇 연구자들(Prakash 1961, Broms 1964, API 1993, Long과 Vanneste 1994)이 현재까지 보고된 연구결과들에 근거해서 p-y곡선법을 이용한 반복수평하중을 받는 말뚝의 지지력산정법을 제안하기도 하였으나, 현재까지 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 진폭과 재하횟수, 재하방법 등을 고려한 지지력산정식은 제안되지 못하고 있다. 따라서 반복수평하중을 받는 말

뚝의 극한수평지지력과 최대 휨모멘트를 정확히 산정하기 위해서는 무엇보다도 반복수평하중의 특성이 말뚝의 지지력과 최대 휨모멘트에 미치는 영향에 대한 정성적이고 정량적인 조사가 우선되어야 한다.

본 연구에서는 하중형태(반복수평하중과 정적하중)와 반복수평하중의 특성(크기와 재하횟수)이 말뚝의 극한수평지지력과 휨모멘트에 미치는 영향을 조사하기 위하여 가압토조를 이용한 모형말뚝재하시험을 수행하였다. 그리고 모형실험결과에 근거해서 조밀한 모래지반에서 반복수평하중이 한방향으로 재하되는 경우에 대해 말뚝의 극한수평지지력을 예측할 수 있는 지지력산정식을 제안하였고, 모형실험의 결과를 이용해서 제안식의 정확도를 간략하게 검증하였다.

2. 모형말뚝재하시험

2.1 모형지반 조성

본 연구에서 모형지반은 가압토조(calibration chamber)를 이용해서 조성되었으며, 실험에 사용된 가압토조는 그림 1과 같이 모형지반이 조성되는 모래 저장조(container)와 모래의 유출량을 조절할 수 있는 모래상자(sand hopper), 모형지반의 상대밀도와 균질도를 조절하는 모래분산장치(sand diffuser)로 구성되어 있다. 직경과 높이가 각각 775mm와 1250mm인 모래 저장조의 바닥과 측벽에는 고무막(membrane)을 설치하고 크기가 조절된

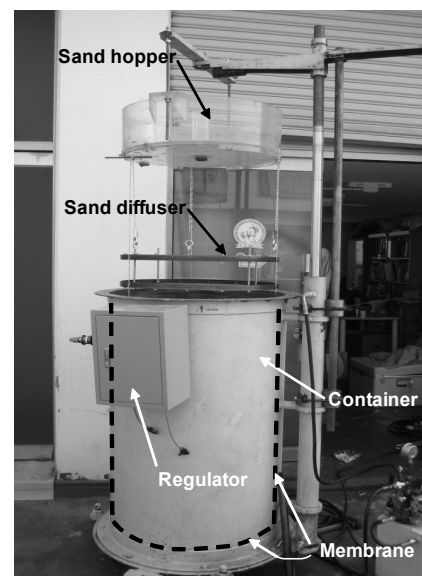


그림 1. 가압토조

표 1. 지반조성용 모래의 기본 물성치

물성	비중, G_s	γ_{max} (kN/m ³)	γ_{min} (kN/m ³)	C_u	C_c
값	2.66	16.37	13.53	1.43	0.90

압축공기를 주입함으로써 모형지반의 응력상태를 조절할 수 있도록 하였다. 그리고 모래분산장치는 8번과 10번 채(sieve)로 구성함으로써 모래 저장조 내에 모래가 균등하게 분산되도록 함과 동시에 모래 입자의 낙하고 조절이 용이하도록 하였다.

모형지반은 모래상자로부터 유출되는 모래의 양과 모래분산장치로부터 떨어지는 모래입자의 낙하고를 조절해서 상대밀도를 결정하는 낙사법(raining method)에 의해 조성되었다. 모형지반의 조성을 위해 대기 중에서 건조된 주문진 표준사가 사용되었고, 통일분류법에 의해 SP(poorly graded sand)로 분류되는 지반조성용 모래의 기본물성치는 표 1과 같았다. 모형지반은 깊이방향의 균질성 확보를 위해 13개 층으로 나누어 조성하였고, 상대밀도는 $D_r=90\%$ 로 하였다. 지반 조성이 완료된 후 가압토조의 뚜껑을 결합시키고 토조의 바닥과 측벽에 설치한 고무막에 계획된 크기의 압축공기를 18시간 동안 가해서 모형지반이 계획한 응력상태를 갖도록 하였다.

2.2 모형말뚝

본 모형실험에서는 반복수평하중의 특성이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 그림 2와 같이 외경이 40mm이고 길이가 590mm인 폐단말뚝을 시험말뚝으로 사용하였다. 그리고 수평하중에 의해 말뚝에 발생하는 휨모멘트의 특성을 조사하기 위해서 모형말뚝 중 모형지반에 관입되는 하부 440mm 부분에 총 16개의 스트레인게이지를 8개 위치에 대칭으로 부착하였다. 스트레인게이지는 시험말뚝의 표면에 성형한 게이지 설치용 홈의 내부에 부착했고, 게이지 설치 후 홈의 입구는 덮개 철판으로 폐쇄하였다. 그리고 스트레인게이지의 전선들은 실험 중에 파손되거나 재하시험의 결과에 영향을 주지 않도록 시험말뚝 내부를 통해서 말뚝 두부에 설치한 전선구멍으로 배선되었다.

한편 재하시험 동안 시험말뚝에 발생하는 휨모멘트 분포를 측정하기 위해서는 말뚝에 대칭으로 부착한 스트레인게이지들을 수평하중 작용선 상에 위치시켜야 한다. 이를 위해 본 실험에서는 그림 3과 같이 시험말뚝 하단부에 스트레인게이지들과 직각되는 방향으로 150

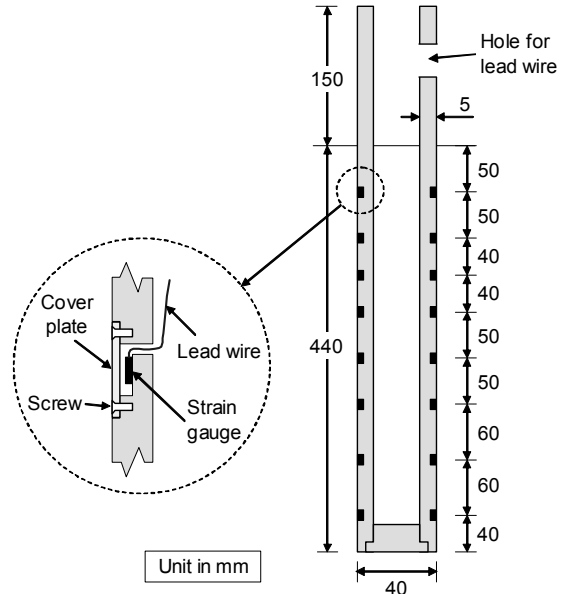
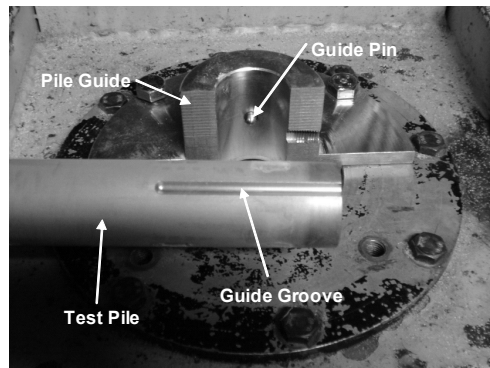
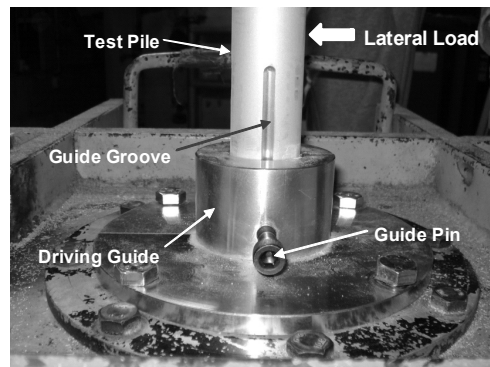


그림 2. 모형말뚝의 개략도



(a) 말뚝 설치방향 안내용 홈과 핀



(b) 말뚝 설치방향 안내용 홈과 핀을 이용한 말뚝 설치방법

그림 3. 항타 시 시험말뚝의 설치방향 정렬방법

mm 길이의 말뚝 설치방향 안내용 홈(guide groove)을 설치하였고, 가압토조 뚜껑의 중심부에 결합되는 항타 가이드(driving guide)에는 말뚝에 작용하는 수평하중과 직각되는 곳에 말뚝 설치방향 안내용 핀(guide pin)을 설치하였다. 따라서 최초 150mm 깊이까지는 시험말뚝의

표 2. 모형수평재하시험의 조건

근입길이 (mm)	상대밀도 (%)	응력조건 (kPa)			하중크기 H/H _{US}	작용횟수 N	정재하 시험
		연직응력	수평응력	K ₀			
440	90	98	39.2	0.4	0.2	10	
440	90	98	39.2	0.4	0.4	1, 10, 25, 50	○
440	90	98	39.2	0.4	0.6	10	

설치방향 안내용 홈과 핀을 결합시킨 상태에서 시험말뚝을 모형지반에 향타함으로써 시험말뚝의 스트레인게이지들이 수평하중 작용선 상에 위치하도록 하였고, 그 이후에는 말뚝 설치방향 안내용 핀을 제거한 상태에서 시험말뚝을 타입하였다.

2.3 실험방법

본 연구에서 수행한 모든 모형실험은 상대밀도가 $D_R=90\%$ 이고 모형지반에 가해지는 연직응력에 대한 수평응력의 비로 정의되는 토압계수가 $K_0=0.4$ 인 모형지반에서 수행하였고, 시험말뚝의 근입길이는 440mm로 일정하게 하였다. 표 1에 정리된 바와 같이 반복수평재하시험에서 시험말뚝에 가할 수평하중의 상대적인 크기를 결정하기 위해 정적수평재하시험을 통해서 말뚝의 정적극한수평지지력(H_{US})을 결정하였다. 그리고 반복수평하중의 크기와 재하횟수가 향타말뚝의 극한수평지지력과 휨모멘트 분포에 미치는 영향을 조사하기 위하여 한방향으로 재하되는 반복수평하중(H)의 크기를 정적극한수평지지력의 0.2, 0.4, 0.6배로 변화시켰고, 수평하중의 반복재하횟수도 1, 10, 25, 50회로 변경하면서 반복수평재하시험을 수행하였다.

시험말뚝은 500mm높이에서 자유낙하하고 무게가 49N인 햄머를 이용해서 모형지반에 440mm 깊이로 타입되었다. 수평재하시험을 위해 시험말뚝에 가해지는 수평하중은 그림 4와 같이 지표면으로부터 75mm 떨어진 지점에 재하되었고, 재하시험이 진행되는 동안 지표면으로부터 각각 45mm와 145mm 떨어진 지점에서 LVDT를 이용하여 하중단계별 말뚝의 수평변위를 측정하였다. 그리고 시험말뚝에 가해지는 수평하중을 측정하기 위해 유압잭에 연결된 로드(rod)의 단부에 하중계를 설치했으며, 시험말뚝의 두부를 자유단 상태로 유지하기 위해 유압잭에 연결된 하중계와 시험말뚝의 두부는 클램프(clamp)를 이용해서 힌지(hinge)상태로 결합시켰다.

시험말뚝을 설치한 후 가장 먼저 정적수평재하시험

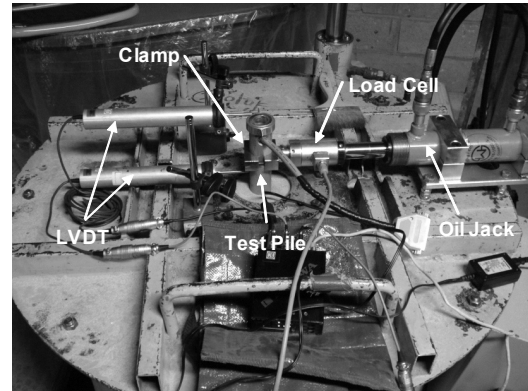


그림 4. 시험말뚝의 수평재하시험 전경

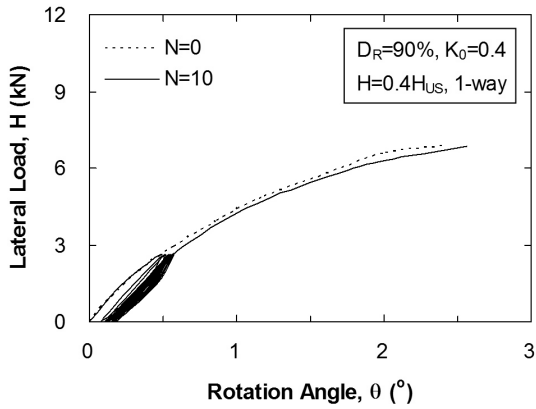
을 수행했으며, 이때 각 하중단계는 20분동안 일정하게 유지되었고 20분이 경과한 후에도 말뚝의 변위가 계속 발생할 경우에는 말뚝의 시간당 회전각이 0.1° 이하가 될 때까지 해당 하중단계를 유지하였다. 반면 반복수평재하시험에서는 동일 지반 및 말뚝조건 하에서 측정된 정적극한수평지지력의 20, 40, 60%에 해당하는 수평하중을 시험말뚝의 두부에 한방향으로 계획된 횟수만큼 반복재하한 후 연속해서 앞에 언급한 정적수평재하시험과 동일한 방법으로 수평재하시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

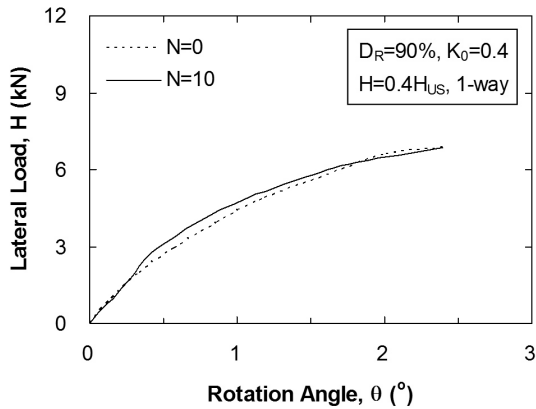
3.1 하중-회전각 곡선

3.1.1 하중 형태의 영향

그림 5는 모형지반에 440mm 깊이로 타입된 시험말뚝에 정적극한수평지지력(H_{US})의 40%에 해당하는 수평하중을 한방향(1-way)으로 10회 작용시키면서 수행한 반복수평재하시험의 결과를 반복재하횟수가 0($N=0$)인 정적수평재하시험의 결과와 함께 하중-회전각 곡선으로 나타낸 것이다. 그림 5(a)에서 보듯이 10회의 반복수평하중을 받은 말뚝은 반복재하로 인해 수평재하시험을 수행하기 이전에 0.172° 의 영구 회전각이 발생하였고, 이로 인해 동일한 말뚝 회전각에서 정적하중을 받는



(a) 측정된 하중-회전각 곡선



(b) 측정된 하중-회전각 곡선

그림 5. 정재하 및 반복재하시험에서 얻은 하중-회전각 곡선

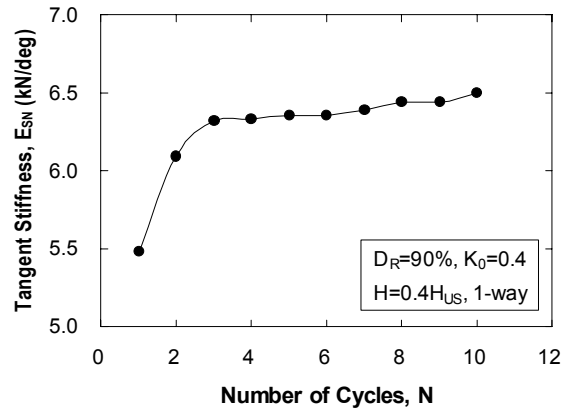


그림 6. 수평하중의 반복재하횟수에 따른 접선강성의 변화

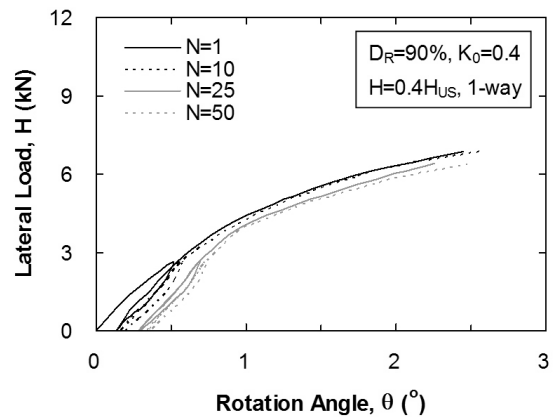


그림 7. 수평하중의 반복재하횟수에 따른 하중-회전각 곡선의 변화

말뚝보다 수평하중을 지지하는 능력이 작은 것으로 조사되었다.

한편 Kishida 등(1985)과 Rosquoet 등(2007), Achmus 등(2009)의 연구결과에 따르면 모래지반에 설치된 말뚝에 반복수평하중이 한방향으로 가해지면 재하(loading)로 인한 말뚝 전면부 지반의 다짐과 재하(unloading)로 인해 말뚝 전면부에 발생하는 틈새에 모래가 충전되는 과정이 반복되면서 일정 범위의 말뚝 전면부 지반이 지속적으로 다져지고, 그 영향으로 수평하중의 반복재하 횟수가 많아질수록 말뚝의 단위 회전각 발생에 필요한 하중크기로 정의되는 접선강성(tangent stiffness)이 증가하였다. 이러한 기존의 연구결과는 그림 5(a)로부터 얻어진 하중재하횟수에 따른 접선강성 E_{SN} 의 변화를 나타낸 그림 6에서 그리고 반복수평재하시험의 결과 중에서 반복재하 이후에 수행한 수평재하시험의 결과만을 정적수평재하시험의 결과와 함께 나타낸 그림 5(b)에서도 확인할 수 있다. 그림 5(b)와 그림 6에서 보듯이 반복재하에 의한 말뚝 전면부 지반의 다짐으로 인해 말뚝의

변위 초기에는 지반의 접선강성이 커졌다. 그러나 그림 5(a)와 같이 말뚝의 거동을 전체적으로 보면 반복재하에 의한 영구변위로 인해 반복수평하중을 받는 말뚝은 동일한 회전각에서 정적하중을 받는 말뚝보다 하중지지능력이 감소하였다. 따라서 반복수평하중은 말뚝 전면부 지반을 다지는 효과가 있기도 하지만 반복재하 동안 발생하는 영구변위로 인해 동일한 말뚝 변위에서 말뚝의 하중지지능력을 감소시키는 것으로 나타났다.

3.1.2 반복재하횟수의 영향

그림 7은 시험말뚝에 정적극한지지력의 40%에 해당하는 수평하중을 1, 10, 25, 50회 반복재하했을 때 반복수평재하시험에서 측정된 수평하중-회전각 곡선을 보인 것이다. 이때 모든 시험결과를 분명하게 표현하기 위해 모든 하중-회전각 곡선은 계획된 반복재하 과정 중 마지막 반복재하 단계와 그 이후에 수행한 수평재하시험에서 측정된 결과만을 나타내었다. 재하시험 결과 말뚝에 가해지는 반복수평하중의 크기가 일정하더라도

수평하중의 반복재하횟수가 증가할수록 동일한 말뚝의 회전각에서 말뚝의 하중지지능력은 감소하였다. 또한 앞절에서 언급한 바와 같이 말뚝에 대한 수평하중의 반복재하횟수가 증가하면 말뚝 전면부 지반의 다짐과 그에 따른 접선강성의 증가로 인해 말뚝의 하중지지능력이 커질 수 있으나 그림 7의 실험결과도 이와 반대의 경향을 보인다. 따라서 반복수평하중을 받는 말뚝의 경우 하중의 반복재하에 의한 지반다짐과 그로 인한 하중지지능력의 증가 효과보다는 반복재하에 의한 영구변위의 발생과 그로 인한 말뚝의 하중지지능력 감소 효과가 더 큰 것으로 나타났다.

3.1.3 하중크기의 영향

시험말뚝에 정적극한수평지지력(H_{US})의 20, 40, 60%에 해당하는 수평하중을 10회 반복재하했을 때 반복수평재하시험 중 마지막 반복재하 단계와 그 이후에 계속된 수평재하시험에서 측정된 하중-회전각 곡선을 그림 8에 나타냈다. 그림에서 보듯이 반복재하 직후에는 반복수평하중의 크기가 클수록 반복재하에 의한 영구변위가 커져서 동일 회전각에서 말뚝의 하중지지능력은 감소하였다. 그러나 말뚝의 변위가 큰 구간에서는 반복수평하중의 크기가 클수록 동일 회전각에서 말뚝의 하중지지능력이 조금씩 증가하였다.

3.2 극한수평지지력

수평하중을 받는 말뚝의 극한상태를 정의하는 위한 파괴기준은 여러 연구자들에 의해 다양한 형태로 제안되었으며, 말뚝재하시험의 결과가 동일하다 할지라도 시험결과에 어떠한 파괴기준을 적용하느냐에 따라 말

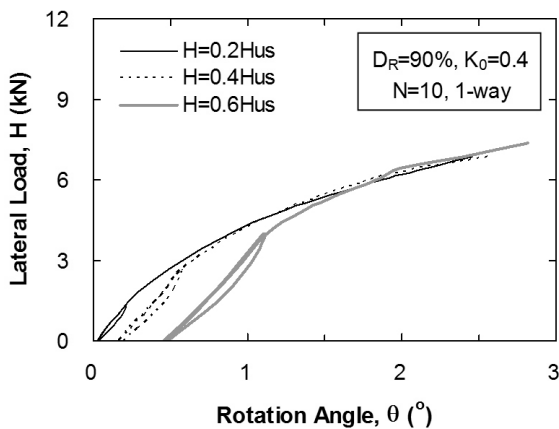
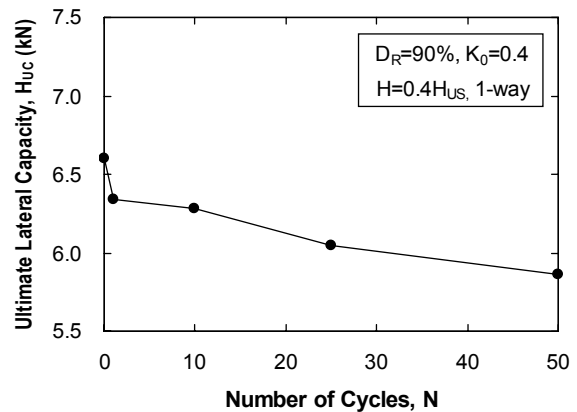


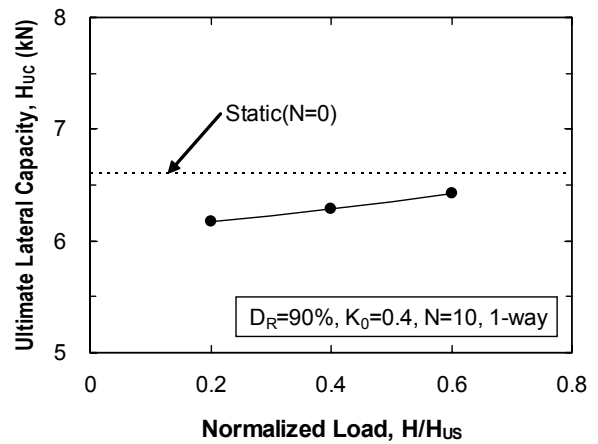
그림 8. 반복수평하중의 크기에 따른 하중-회전각 곡선 변화

뚝의 극한수평지지력이 크게 달라질 수 있다. 따라서 말뚝재하시험을 통해서 조사항목에 대한 일관된 연구결과를 얻기 위해서는 모든 시험결과에 일정한 파괴기준을 적용하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 시험말뚝의 극한수평지지력을 결정하기 위하여 말뚝의 두부가 2°회전했을 때를 극한상태로 간주하는 Davidson 등(1982)의 파괴기준을 모형실험의 결과에 적용하였다.

그림 9는 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 재하횟수와 크기가 말뚝의 극한수평지지력(H_{UC})에 미치는 영향을 보인 것이며, 수평하중의 형태별 극한수평지지력의 변화를 함께 나타내기 위해 반복하중의 재하횟수가 $N=0$ 에 해당하는 정적극한수평지지력(H_{US})을 그림에 함께 나타냈다. 그림 9(a)에서 보듯이 반복수평하중을 받는 말뚝의 극한수평지지력은 수평하중의 반복재하횟수가 1회에서 50회로 증가함에 따라 거의 선형으로 감소하였고, 수평하중이 1회 반복재하되었을 때 말뚝의 극



(a) 반복재하횟수의 영향



(b) 하중 크기의 영향

그림 9. 수평하중의 반복재하횟수와 크기가 말뚝의 극한수평지지력에 미치는 영향

한수평지지력은 동일 지반 및 말뚝조건하에서 측정된 정적극한수평지지력의 0.96배로 나타났다.

또한 반복수평하중의 크기와 말뚝의 극한수평지지력 간의 관계를 나타낸 그림 9(b)에서 보듯이 반복수평하중의 크기가 커질수록 말뚝의 극한수평지지력은 조금씩 증가하였으나 동일한 지반 및 말뚝조건하에서 측정된 정적극한수평지지력보다는 항상 작았다. 따라서 이러한 실험결과를 통해서 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 크기가 커질수록 반복재하에 의한 영구변위와 그에 따른 지지력 감소보다는 말뚝 전면부 지반의 다짐도 증가와 그에 따른 지지력 증대 효과가 더 커짐을 알 수 있다.

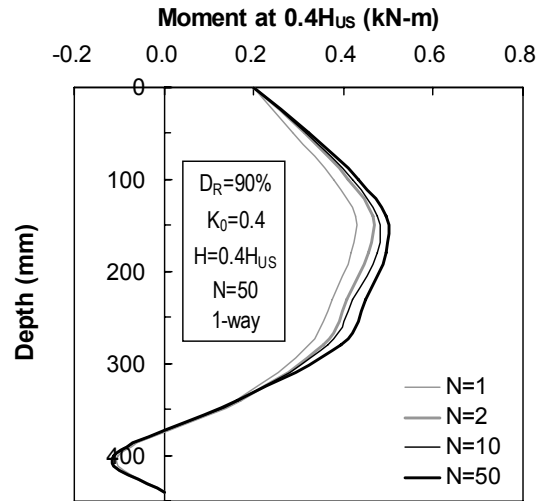
3.3 휨모멘트

3.3.1 반복재하횟수의 영향

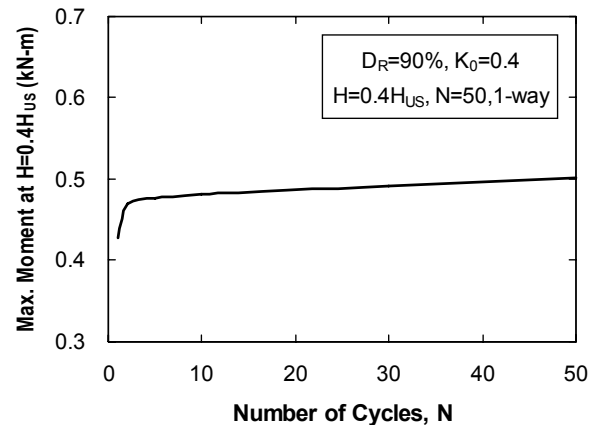
그림 10은 시험말뚝에 정적극한지지력의 40%에 해당하는 수평하중을 한방향으로 50회 반복재하하는 동안 재하횟수가 1, 2, 10, 50회일 때 시험말뚝에 유발되는 휨모멘트 분포와 반복재하횟수에 따른 최대 휨모멘트의 변화를 보인 것이다. 시험결과에 따르면 반복수평하중의 크기가 일정할 때 반복재하횟수가 증가할수록 수평하중에 의해 말뚝에 유발되는 휨모멘트의 최대치는 증가하였다. 특히 그림 10(b)에서 더욱 분명하게 볼 수 있듯이 최대 휨모멘트는 반복하중이 2회 재하될 때까지 급증하다가 그 이후에는 반복재하횟수에 비례해서 거의 선형으로 완만하게 증가하였다. 이러한 실험결과는 수평하중의 반복재하에 따른 말뚝 주변지반의 다짐도 증가와 말뚝 회전점 깊이의 증가 때문으로 판단된다. 즉 그림 11과 같이 말뚝에 일정한 크기의 수평하중이 반복재하되면 말뚝의 수평변위가 0인 회전점(rotation point)의 윗부분에 있는 말뚝 전면부 지반(영역 A)과 회전점의 아랫부분에 있는 말뚝 후면부 지반(영역 B)이 다져져서 이들 영역에 작용하는 수동토압이 커질 뿐만 아니라 말뚝 회전점의 깊이가 점차 깊어져서(Archmus 등 2009) 말뚝에 발생하는 휨모멘트가 커지는 것이다.

반면 그림 12는 정적극한수평지지력의 40%에 해당하는 수평하중이 말뚝에 1, 25, 50회 반복재하된 후 수평재하시험을 통해서 시험말뚝이 극한상태에 도달했을 때 말뚝에 발생한 휨모멘트 분포와 최대 휨모멘트의 크기 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 반복수평하중의 재하횟수가 1회에서 50회로 커짐에 따라 극한상태

에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 거의 선형으로 감소하였고, 최대 휨모멘트의 발생 깊이는 지표면으로부터 말뚝 근입길이의 0.36배로 일정하게 유지되었다. 또한 말뚝에 반복하중이 작용하면 정적하중이 작용할



(a) 휨모멘트 분포의 변화



(b) 최대 휨모멘트의 변화

그림 10. 수평하중 반복재하 시 말뚝 내 휨모멘트의 변화

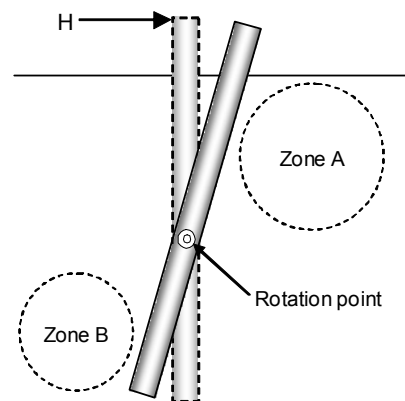


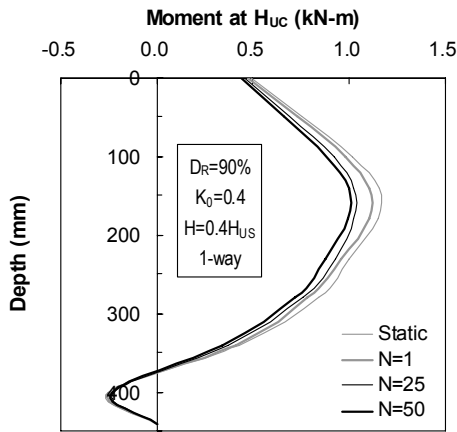
그림 11. 반복수평하중을 받는 말뚝 주변지반의 다짐

때보다 말뚝에 발생하는 휨모멘트가 작아지고 최대 휨모멘트의 발생깊이도 약간 얕아지는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과는 수평하중의 반복재하 시 말뚝 주변 지반의 다짐도 증가로 인한 휨모멘트 증가 효과보다 극한지지력의 감소에 따른 휨모멘트 감소 효과가 더 크기 때문으로 판단된다. 즉 그림 9와 관련하여 설명했듯이 말뚝에 작용하는 수평하중의 반복재하횟수가 많아질수록 말뚝의 극한수평지지력(H_{UC})은 감소한다. 그 결과 말뚝의 극한지지력 감소에 의한 말뚝 내 휨모멘트의 감소가 그림 11을 통해 설명한 반복재하에 의한 휨모멘트 증가효과보다 크기 때문에 하중의 반복재하횟수가 많아질수록 극한상태에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트가 감소하는 것이다. 또한 이러한 사실은 그림 12(b)에 보인 반복재하횟수에 따른 말뚝내 최대 휨모멘트의 변화가 그림 9(a)에서 보인 하중의 반복재하횟수에 따른 말뚝의 극한지지력 변화와 매우 유사한 것으로부터

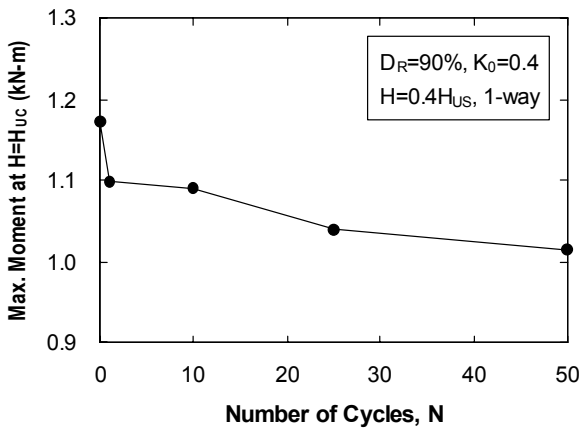
도 알 수 있다.

3.3.2 하중크기의 영향

그림 13은 말뚝에 반복재하되는 수평하중의 크기가 동일 지반 및 말뚝조건하에서 측정된 정적극한수평지지력의 20, 40, 60%일 때 극한상태에서 말뚝에 발생하는 휨모멘트 분포와 최대 휨모멘트의 크기 변화를 나타낸 것이다. 실험결과에 따르면 반복수평하중의 크기가 $0.2H_{US}$ 에서 $0.6H_{US}$ 로 커질수록 극한상태에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트의 크기는 미세하게 증가하였고, 최대 휨모멘트가 발생하는 깊이도 말뚝 근입길이의 0.34배에서 0.37배로 약간 깊어졌다. 이러한 실험결과는 그림 9(b)에서 보듯이 말뚝에 작용하는 반복수평하중이 커질수록 말뚝의 극한지지력이 커지기 때문으로 판단되며, 이러한 추론이 적합하다는 것은 그림 13(b)에 보이는 반복재하횟수와 최대 휨모멘트 간의 관계가 그림

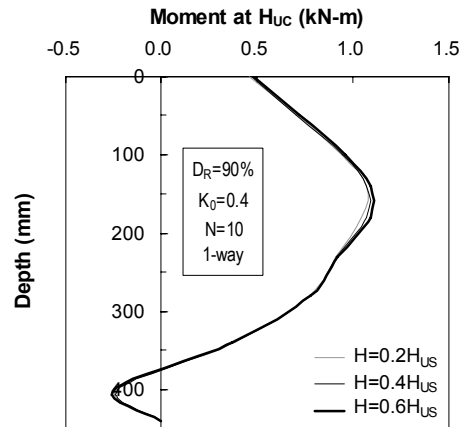


(a) 휨모멘트 분포의 변화

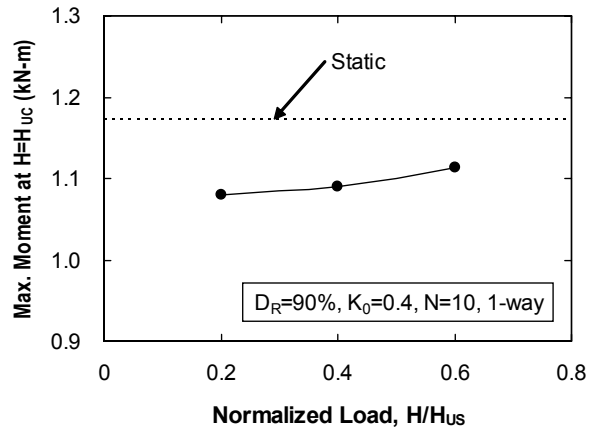


(b) 최대 휨모멘트의 변화

그림 12. 수평하중의 반복재하횟수가 극한상태에서 말뚝 내 휨모멘트에 미치는 영향



(a) 휨모멘트 분포의 변화



(b) 최대 휨모멘트의 변화

그림 13. 반복수평하중의 크기가 극한상태에서 말뚝 내 휨모멘트에 미치는 영향

9(b)에 보인 하중재하횟수와 극한지지력 간의 변화와 거의 흡사함을 통해서도 알 수 있다.

4. 지지력산정식

토압계수가 $K_0=0.4$ 인 조밀한 모래지반에 말뚝직경의 11배 길이로 타입된 말뚝에 정적극한수평지지력(H_{US})의 40%에 해당하는 하중을 한방향으로 반복재하했을 때 하중의 반복재하횟수에 따른 말뚝의 극한수평지지력 변화를 보인 그림 9(a)에서 보듯이 말뚝의 극한수평지지력은 수평하중의 반복재하횟수가 1회에서 50회로 증가함에 따라 거의 선형으로 감소하였고, 극한수평지지력과 반복재하횟수는 다음과 같은 관계를 갖고 있었다.

$$(H_{UC,N}/H_{UC,1})_{R_H=0.4} = 1 - 0.0016N \quad (\text{단 } N \geq 1) \quad (1)$$

여기서 $(H_{UC,1})_{R_H=0.4}$ 과 $(H_{UC,N})_{R_H=0.4}$ 은 정적극한수평지지력의 40%에 해당하는 반복수평하중을 말뚝에 각각 1회와 N 회 재하했을 때 말뚝의 극한수평지지력이고, $R_H(=H/H_{US})$ 는 말뚝의 정적극한수평지지력에 대한 말뚝에 작용하는 반복수평하중의 비로 정의되는 상대 수평하중이다. 그리고 모형실험에서 $(H_{UC,1})_{R_H=0.4}$ 은 동일 지반 및 말뚝 조건하에서 측정된 정적극한수평지지력 H_{US} 의 0.96배로 측정되었으므로 이 결과를 식 (1)에 대입하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$(H_{UC,N})_{R_H=0.4} = 0.96(1 - 0.0016N)H_{US} \quad (\text{단 } N \geq 1) \quad (2)$$

또한 그림 9(b)에서 상대 수평하중이 $R_H=0.4$ 일 때 말뚝의 극한수평지지력을 1.0으로 하면 상대 수평하중과 말뚝의 극한수평지지력은 식 (3)과 같은 관계하에 있게 된다.

$$\frac{H_{UC,N}}{(H_{UC,N})_{R_H=0.4}} = 0.96 + 0.1R_H \quad (\text{단 } R_H \leq 1) \quad (3)$$

여기서 $H_{UC,N}$ 은 임의의 크기를 갖는 수평하중이 말뚝에 N 회 반복재하되었을 때 말뚝의 극한수평지지력이다. 따라서 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같은 관계식을 얻게 된다.

$$H_{UC,N} = 0.96(0.96 + 0.1R_H)(1 - 0.0016N)H_{US} \quad (\text{단 } N \geq 1, R_H \leq 1) \quad (4)$$

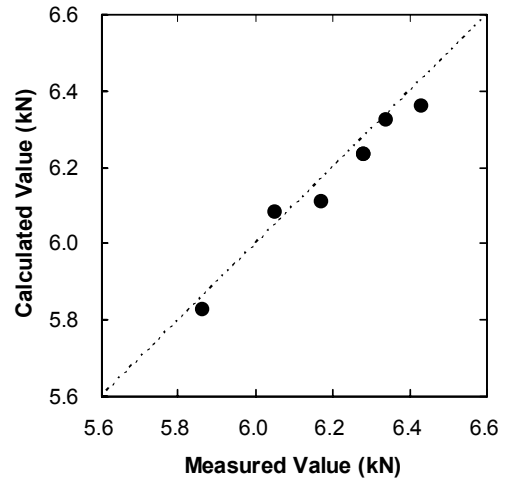


그림 14. 극한수평지지력에 대한 측정치와 계산치의 비교

따라서 식 (4)를 이용하면 $K_0=0.4$ 인 조밀한 모래지반에 타입된 말뚝에 반복수평하중이 한방향으로 재하될 때 말뚝의 극한수평지지력을 산정하는 것이 가능하다.

한편 모형말뚝재하시험의 결과에 근거해서 경험적으로 얻어진 식 (4)의 정확도를 검증하기 위해서 모형실험으로부터 측정된 극한수평지지력과 식 (4)로부터 계산된 결과를 비교하였고, 그 결과를 그림 14에 나타냈다. 그림에서 보듯이 식 (4)는 조밀한 모래지반에서 반복수평하중을 한방향으로 받는 말뚝의 극한수평지지력을 상당히 정확하게 예측하였다. 그러나 식 (4)는 제한된 지반조건과 말뚝조건하에서 얻은 실험결과에 근거해서 제안된 것이므로 이 제안식을 보다 다양한 조건에 적용하기 위해서는 식 (4)에 지반조건과 말뚝조건이 말뚝의 극한수평지지력에 미치는 영향을 반영해야만 한다. 따라서 모형실험의 결과를 종합적으로 반영한 지지력산정식이 개발된다면 반복수평하중을 받는 말뚝의 반복극한수평지지력은 해석적인 방법을 통해서 간편하게 예측하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 모래지반에서 반복수평하중의 특성이 항타말뚝의 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서 가압토조를 이용한 모형말뚝재하시험을 수행하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 말뚝의 극한수평지지력은 말뚝에 작용하는 수평하중의 반복재하횟수가 증가함에 따라 선형으로 감소

하였고, 반복수평하중의 크기가 커짐에 따라 선형으로 완만하게 증가하였다.

- (2) 반복수평하중을 받는 말뚝의 극한수평지지력은 정적하중을 받는 경우보다 항상 작았다.
- (3) 토압계수가 0.4인 조밀한 지반에서 반복수평하중이 한방향으로 재하될 경우 말뚝의 반복극한수평지지력은 반복수평하중의 크기와 재하횟수를 함수로 하는 하나의 수식으로 표현될 수 있었다. 따라서 모형 실험의 결과를 종합적으로 반영한 지지력산정식이 개발된다면 반복수평하중을 받는 말뚝의 반복극한수평지지력은 해석적인 방법을 통해서 간편하게 예측하는 것도 가능하다.
- (4) 말뚝에 일정한 크기의 반복수평하중이 작용하는 동안 하중의 반복재하횟수가 많아질수록 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트의 크기와 그 발생깊이는 증가하였다.
- (5) 수평하중의 반복재하횟수가 증가할수록 극한상태에서 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트는 거의 선형으로 감소하였고, 최대 휨모멘트의 발생깊이는 말뚝 근입길이의 0.36배로 일정하게 유지되었다.
- (6) 반복수평하중의 크기가 커질수록 말뚝 내 최대 휨모멘트의 크기와 최대 휨모멘트의 발생깊이는 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 그러나 정적하중을 받는 경우보다 반복수평하중을 받는 경우에 말뚝에 발생하는 최대 휨모멘트가 작았고 최대 휨모멘트의 발생깊이도 약간 얕았다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. American Petroleum Institute (1993), *Planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design*, RP2A-WSD, API, pp.65-67.
2. Achmus, M., Kuo, Y.-S., and Abdel-Rahman, K. (2009), "Behavior of monopile foundations under cyclic lateral load", *Computer and Geotechnics*, Vol.36, pp.725-735.
3. 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.
4. Davidson, H. L., Cass, P. G., Khilji, K. H., and McQuade, P. V. (1982), *Laterally loaded drilled pier research*, Report EL-2197, EPRI, 324p.
5. Kishida, K., Suzuki, Y., and Nakai, S. (1985), "Behavior of a pile under horizontal cyclic loading", *Proc. of the 11th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng.*, Vol.4, pp.1413-1416.
6. 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.
7. 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.
8. Matlock, H. (1974), "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay", *Proc. of the 2nd Annual Offshore Technology Conf.*, Paper No.1204, Houston, Texas, May, pp.577-594.
9. Prakash, S. (1961). *Behavior of pile groups subjected to lateral loads*, Thesis, Univ. of Illinois, Urbana, 218p.
10. 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.
11. 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. 9. 7, 심사완료일 2010. 10. 18)