

모래지반에서 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구변형

Permanent Deformations of Piles in Sand Under Cyclic Lateral Loads

백 규 호¹ Paik, Kyu-Ho

박 원 우² Park, Won-Woo

Abstract

Monopiles, used as one foundation option for offshore wind turbines, are usually subjected to great cyclic lateral loads due to wind and wave. In this study, model pile load tests were performed using calibration chamber and three model piles with different pile lengths in order to investigate the behavior of laterally cyclic loaded piles driven into sand. Model test results show that the first loading cycle generates a bigger displacement than the following ones, and the permanent displacement of piles by one loading cycle decreases with increasing the number of cycles. 1-way cyclic loading causes the permanent displacement in the same direction as cyclic loading, whereas 2-way cyclic loading causes the permanent displacement in the reverse direction of initial loading. It is also observed that the permanent displacement of piles due to cyclic lateral loads increases with decreasing relative density of soil and with increasing the magnitude of cyclic loads. However, it is insensitive to the earth pressure ratio of soil and embedded pile length. In addition, based on the model pile load test results, equations for estimation of the permanent lateral displacement and rotation angle of piles due to 1-way cyclic lateral loads are proposed.

요 지

해상풍력발전기의 기초로 사용되는 단말뚝은 풍력과 파랑하중에 의해 큰 크기의 반복수평하중을 받는다. 본 연구에서는 모래지반에서 반복수평하중을 받는 항타말뚝의 거동 특성을 조사하기 위해서 가압토조와 길이가 다른 3개의 모형말뚝을 이용해서 모형말뚝재하시험을 수행하였다. 실험결과에 따르면 하중의 최초 재하는 그 이후에 가해지는 반복재하보다 말뚝의 수평변위를 크게 발생시키고, 반복하중의 재하횟수가 증가함에 따라 1회 재하로 인해 발생하는 말뚝의 수평변위량은 감소하는 것으로 나타났다. 하중의 한방향 반복재하는 말뚝의 영구수평변위를 재하방향으로 증가시킨 반면, 양방향 반복재하는 최초 재하방향과 반대방향으로 말뚝의 영구수평변위를 증가시켰다. 그리고 반복하중으로 인한 말뚝의 영구수평변위는 지반의 상대밀도가 감소하거나 말뚝에 가해지는 반복하중의 크기가 커질수록 급격히 증가하였고, 지반의 토압계수나 말뚝의 근입길이 변화에는 크게 영향을 받지 않았다. 또한 모형실험의 결과에 근거해서 하중이 한방향으로 반복재하될 때 말뚝의 영구수평변위와 영구회전각을 예측할 수 있는 산정식을 제안하였다.

Keywords : Calibration chamber test, Cyclic lateral load, Driven pile, Permanent deformation

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

2 테조엔지니어링 지반부 사원, 전 관동대학교 토목공학과 석사 (Staff, Geotechnical Engrg. Div., Teso Engrg.; Formerly, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kwandong Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 세계적으로 석탄과 석유와 같은 화석연료의 고갈에 대한 대비와 함께 지구온난화의 주범으로 지목되는 이산화탄소의 배출량 감소를 위해서 태양광이나 풍력 등과 같은 신재생에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 신재생에너지 중 경제성이 가장 우수한 것으로 알려진 풍력발전은 풍부한 풍력자원의 활용을 위해 발전지역을 육상에서 해상으로 이동시키고 있으며, 수심이 15-30m인 해상에서는 단말뚝(monopile)을 기초로 사용해서 풍력발전기를 건설하고 있다. 이러한 해양구조물들은 대부분 연직하중보다 바람이나 파랑하중으로 인한 반복수평하중을 더 크게 받기 때문에 구조물의 안정성과 기능을 확보하기 위해서는 기초로 사용되는 단말뚝의 수평지지력 확보와 함께 반복수평하중에 의한 말뚝의 누적 영구변위량이나 누적 영구회전각의 제한이 필수적이다(Achmus 등 2009). 따라서 해양구조물의 설계를 위해서는 반복하중을 받는 말뚝의 누적 영구변위량이나 영구회전각을 산정하는 것이 필요하다.

기존의 연구결과에 따르면 말뚝의 수평거동은 정하중(monotonic load)이 작용할 때와 반복하중(cyclic load)이 작용할 때 크게 달라지며, 반복수평하중을 받는 말뚝의 거동도 지반조건(상대밀도와 응력상태 등)과 말뚝조건(말뚝의 재질과 설치방법, 근입길이), 하중특성(작용하중의 최대 크기와 진폭, 작용횟수, 작용방법 등)에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다(Long과 Vannest 1994, Lin과 Liao 1999). 그러나 모래지반에서 반복수평하중을 받는 말뚝의 거동특성을 조사하기 위해서 많은 실내 및 현장실험이 수행되었음에도 불구하고 이들 실험의 대부분이 매우 제한된 조건하에서 수행됨으로써 현재까지 지반 및 말뚝조건과 반복하중의 특성이 말뚝의 거동에 미치는 영향에 대한 종합적인 연구결과는 보고되지 않고 있다.

또한 몇몇 연구자들은 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구변위를 산정하기 위해서 각종 실험이나 수치해석 결과에 근거해서 다양한 형태의 영구변위 산정식을 제안하였다. API 설계기준(2000)에서는 p-y곡선법에 반복수평하중에 의한 지반저항 감소계수를 도입해서 모래지반에 설치된 말뚝의 영구변위를 산정하고 있으나 반복하중의 재하횟수와 진폭(amplitude)을 변수로 고려하지 않아서 하중특성에 따른 말뚝의 거동변화를 제대로 반영하지 못하고 있다. Hettler(1981)와 Little과 Briaud(1988)은 반복

수평하중을 받는 말뚝의 영구수평변위 산정식을 반복하중의 재하횟수에 대한 로그함수와 거듭제곱함수의 형태로 제안했지만, 이들 산정식들은 실측치와 상당히 다른 결과를 제공하였다(Achmus 등 2009). 그리고 Rosquoet 등(2007)은 조밀한 지반에 설치된 말뚝에 대해 반복수평하중의 재하횟수와 진폭을 변수로 하는 영구수평변위 산정식을 제안하였고, Achmus 등(2009)은 수치해석 결과에 근거해서 반복수평하중의 크기와 재하횟수를 고려한 영구변위 산정도표를 제안하였다. 그러나 이들의 방법들은 그 정확도가 객관적으로 검증되지 않았거나 계산과정이 복잡하다는 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 반복수평하중을 받는 단말뚝의 거동 특성을 조사하기 위해 가압토조와 길이가 다른 3개의 모형 말뚝을 이용해서 모형말뚝재하실험을 수행하였다. 모형실험의 결과를 통해서 지반의 상대밀도와 응력상태, 반복수평하중의 크기와 작용방법(한방향 또는 양방향 재하), 말뚝의 근입길이가 모래지반에 타입된 말뚝의 영구수평변위와 영구회전각에 미치는 영향을 조사하였고, 실험결과에 근거해서 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구수평변위와 영구회전각을 예측하기 위한 산정식을 제안하였다. 그리고 또 다른 조건에서 수행된 모형실험의 결과를 이용해서 제안된 영구변위 산정식의 정확도를 검증하였다.

2. 모형말뚝재하실험

2.1 모형지반 조성

본 연구에서는 소정의 상대밀도와 응력상태를 갖는 모형지반을 조성하기 위해서 가압토조(calibration chamber)를 사용하였으며, 가압토조는 그림 1과 같이 모형지반이 조성되는 모래 저장조(container)와 모형지반의 상대밀도와 균질도를 조절하기 위한 지반조성장치로 구성된다. 모래 저장조는 직경이 775mm이고 높이가 1250mm로, 그 바닥과 측벽에는 고무막(membrane)을 설치하여 압축공기를 이용한 모형지반의 응력상태 조절이 가능하도록 하였다. 그리고 지반조성장치는 다시 모래상자(sand hopper)와 모래분산장치(sand diffuser)로 구성되는데 모래상자의 바닥에는 크기 조절이 가능한 여러 개의 구멍을 설치해서 모래의 유출량을 조절할 수 있도록 하였다. 모래상자의 아래에 위치하는 모래분산장치는 8번과 10번 체(sieve)로 구성되며, 모래상자에서 유출된 모래가 모래분산장치를 통과함으로써 모형지반이 균질

하게 조성되도록 하였다.

이상과 같은 가압토조에 모형지반을 조성하기 위해서 대기 건조된 주문진 표준사 중 10번 체를 통과한 모래만을 지반조성 재료로 사용하였다. 지반조성용 모래의 비중(G_s)은 2.66이었고, 최대 및 최소건조단위중량은

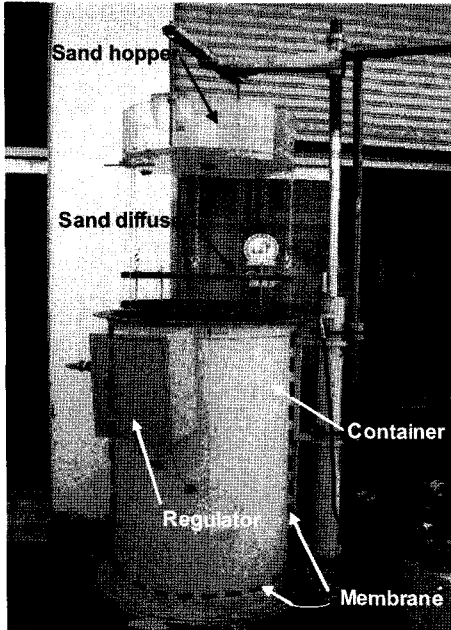


그림 1. 가압토조

각각 16.37kN/m^3 과 13.53kN/m^3 으로 측정되었다. 또한 체분석시험으로부터 얻어진 균등계수(C_u)와 곡률계수(C_c)는 각각 1.43과 0.90이었고, 통일분류법에 의해서는 SP(poorly graded sand)로 분류되었다.

모형지반은 모래상자로부터 유출되는 모래의 양과 모래분산장치로부터 떨어지는 모래입자의 낙하고를 조절해서 지반의 상대밀도를 결정하는 낙사법(raining method)으로 조성하였고, 본 실험에서는 상대밀도가 $D_r=30, 60, 90\%$ 인 세가지 상태의 모형지반을 조성하였다. 모형지반은 깊이방향의 균질성을 확보하기 위해 13개 층으로 나누어 조성하였고, 지반 조성 후 가압토조의 뚜껑을 결합시키고 토조의 바닥과 측벽에 설치한 고무막에 계획한 크기의 압축공기를 18시간 동안 가함으로써 소정의 상대밀도와 응력상태를 갖도록 하였다.

2.2 모형말뚝

본 모형실험에서는 반복수평하중을 받는 말뚝의 거동 특성을 조사하기 위해서 그림 2와 같이 외경이 40mm로 일정하고 길이가 480, 590, 700mm로 각기 다른 3개의 폐단말뚝(closed-ended pile)을 시험말뚝으로 사용하였다. 그리고 수평하중을 받는 말뚝의 중요 설계인자 중 하나

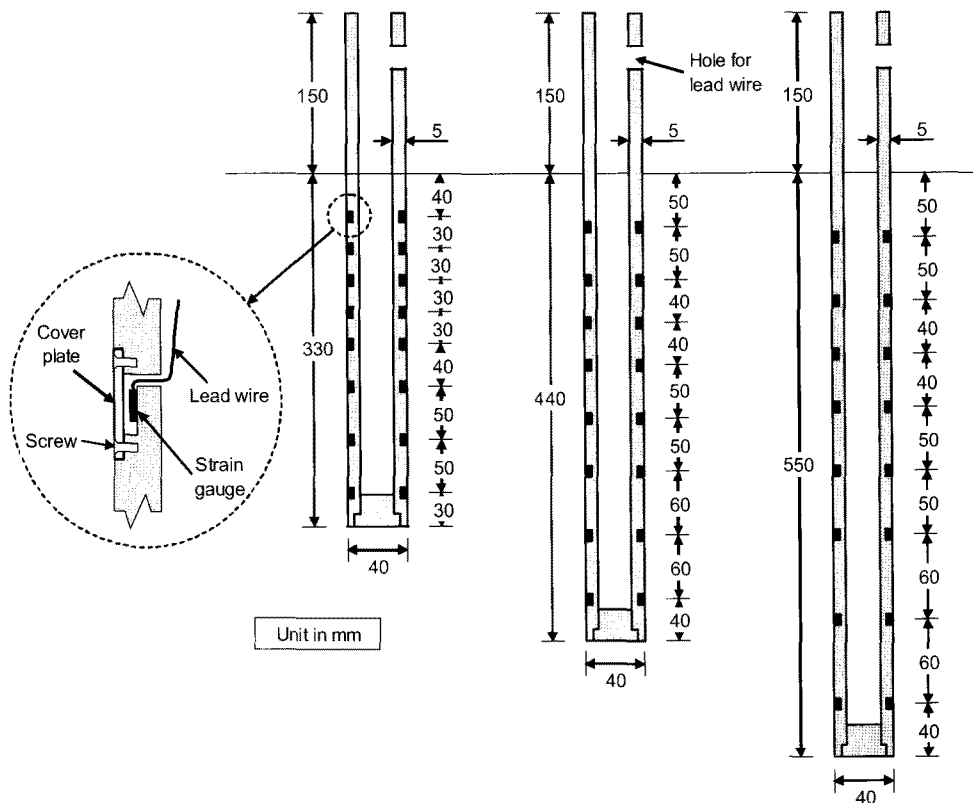


그림 2. 모형말뚝의 개략도

인 말뚝에 유발되는 휨모멘트 특성을 조사하기 위해서 시험말뚝 중 모형지반에 관입되는 부분(시험말뚝 하부 330, 440, 550mm)에 총 16개의 스트레인게이지를 8개 위치에 대칭으로 부착하였다. 특히 시험말뚝을 모형지반에 타입하는 동안 말뚝에 설치한 스트레인게이지가 파손되는 것을 방지하기 위해서 말뚝 표면에 폭과 길이가 각각 3mm와 10mm이고 깊이가 3mm인 홈을 성형한 후 그 홈 내부에 스트레인게이지를 설치하였고, 홈의 입구부는 덮개 철판(cover plate)으로 폐쇄하였다. 이때 스트레인게이지의 전선들은 그림 2에서 보듯이 스트레인게이지 설치용 홈의 상부에 설치한 배선용 구멍을 통해서 시험말뚝 내부로 배선되어 말뚝 두부에 설치한 전선 구멍으로 빼냄으로써 모형말뚝실험을 수행하는 동안 스트레인게이지의 전선이 파손되거나 재하시험에 지장을 주지 않도록 하였다.

2.3 실험방법

본 연구에서는 표 1과 같이 모형지반의 상대밀도와 응력상태, 반복수평하중의 크기와 재하횟수, 작용방법, 그리고 말뚝의 근입깊이를 변경하면서 7회의 정적수평재하시험과 11회의 반복수평재하시험을 수행하였다. 먼저, 모형지반의 상대밀도(D_R)가 30, 60, 90%인 경우와 토압계수(K_0)가 0.4, 0.7, 1.0인 경우 그리고 말뚝의 근입깊이(L)가 330, 440, 550mm인 경우에 대해서 정적수평재하시험을 수행함으로써 다양한 조건하에서 말뚝의 정적극한수평지지력(H_{US})을 결정하였다. 그리고 지반의 상대밀도와 응력상태에 따른 반복수평하중을 받는 말뚝의 거동 변화를 조사하기 위해서 모형지반의 상대밀도를 30, 60, 90%로 그리고 토압계수를 0.4, 0.7, 1.0

으로 변경하면서 5회의 반복수평재하시험을 수행하였다. 또한 말뚝에 재하되는 수평하중의 크기(H)와 재하방법이 말뚝의 거동에 미치는 영향을 규명하기 위해서 말뚝에 가해지는 하중을 동일 조건하에서 측정된 정적극한수평지지력의 0.2, 0.4, 0.6배로 변화시켰고, 이들 수평하중을 한방향(1-way)과 양방향(2-way)으로 반복재하하면서 4회의 반복수평재하시험을 실시하였다. 그 외에도 말뚝의 근입깊이에 따른 수평거동 변화를 조사하기 위해서 지반 및 하중조건은 일정하게 유지한 상태에서 말뚝의 근입깊이만을 330, 440, 550mm로 증가시키면서 반복수평재하시험을 수행하였다.

표 1에 보이는 지반조건을 갖는 모형지반이 조성되면 무게가 49N인 도넛형 햄머를 50cm높이에서 자유낙하시키는 방법으로 시험말뚝을 모형지반에 330, 440, 550mm 깊이로 타입하였다. 시험말뚝이 타입되면 그림 3에서 보듯이 지표면으로부터 75mm 떨어진 높이에서 시험말뚝에 수평하중을 반복재하했고, 하중이 재하되는 동안

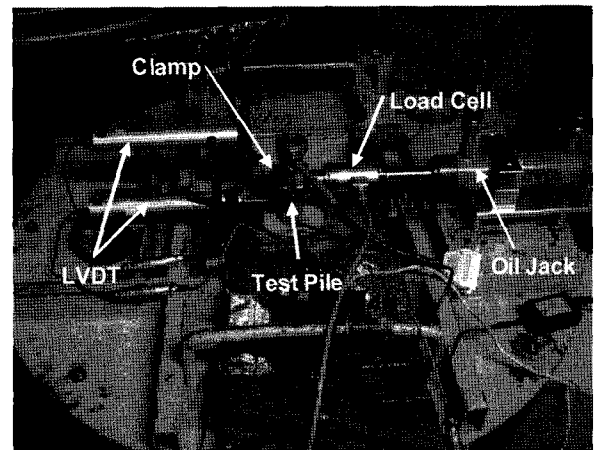


그림 3. 시험말뚝의 수평재하시험 전경

표 1. 모형수평재하시험의 조건

근입깊이 (mm)	상대밀도 (%)	응력조건 (kPa)			하중크기 H/H_{US}	작용횟수 N	재하방법	정재하시험
		연직응력	수평응력	K_0				
440	30	98	39.2	0.4	0.4	10	1-way	○
440	60	98	39.2	0.4	0.4	10	1-way	○
440	90	98	39.2	0.4	0.4	10, 50	1-way	○
440	90	98	68.6	0.7	0.4	10	1-way	○
440	90	98	98	1.0	0.4	10	1-way	○
440	90	98	39.2	0.4	0.2	10	1-way	
440	90	98	39.2	0.4	0.6	10	1-way	
330	90	73.5	29.4	0.4	0.4	10	1-way	○
550	90	122.5	49	0.4	0.4	10	1-way	○
440	90	98	39.2	0.4	0.4	10	2-way	

지표면으로부터 각각 45mm와 145mm 떨어진 높이에서 LVDT를 이용해서 하중단계별 말뚝의 수평변위를 측정하였다. 특히 시험말뚝에 반복수평하중을 한방향과 양방향으로 원활하게 재하할 수 있도록 재하장치로 복동식 유압잭을 사용하였고, 수평하중의 측정을 위해 유압잭과 연결된 로드(rod)의 단부에는 하중계(load cell)를 설치했다, 그리고 수평재하시험이 진행되는 동안 시험말뚝의 단부를 자유단 상태로 유지하기 위해서 유압잭에 연결된 하중계와 시험말뚝의 두부는 클램프(clamp)를 이용해서 힌지(hinge)형태로 결합시켰다.

시험말뚝의 타입과 계측기 설치가 완료된 후에는 정적 혹은 반복수평재하시험을 수행하였다. 정적수평재하시험을 위해 수평하중은 단계별로 약 20분간 일정하게 유지하였고, 20분이 경과한 후에도 말뚝의 변위가 계속 발생할 경우에는 말뚝의 시간당 회전각이 0.1° 이하가 될 때까지 해당 하중단계를 유지하였다. 반면 반복수평재하시험을 위해 동일 지반 및 말뚝조건 하에서 측정된 정적극한수평지지력의 20, 40, 60%에 해당하는 수평하중을 시험말뚝의 두부에 한방향 또는 양방향으로 계획된 횟수(N)만큼 재하(load)와 제하(unload)한 후 위에서 언급한 정적수평재하시험과 동일한 방법으로 수평재하시험을 수행하였다. 이때 그림 4에서 보듯이 1회의 한방향 반복재하는 최초 재하방향으로 하중을 재하 및 제하하는 것이고, 1회의 양방향 반복재하는 최초 재하방향으로 하중을 재하 및 제하한 후 연속해서 최초 재하방향과 반대방향으로 동일 크기의 수평하중을 재하 및 제하하는 것이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 정적극한수평지지력

일반적으로 말뚝의 극한수평지지력은 말뚝 두부의 수

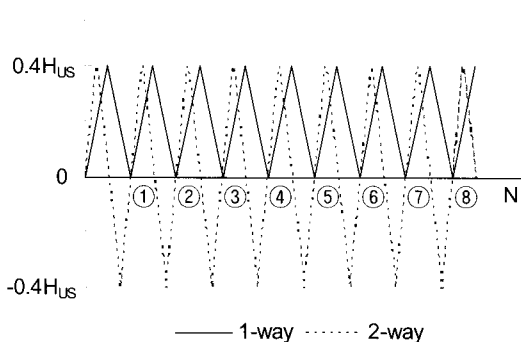
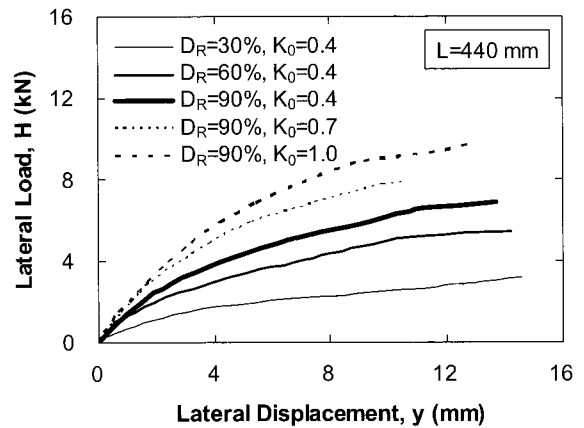


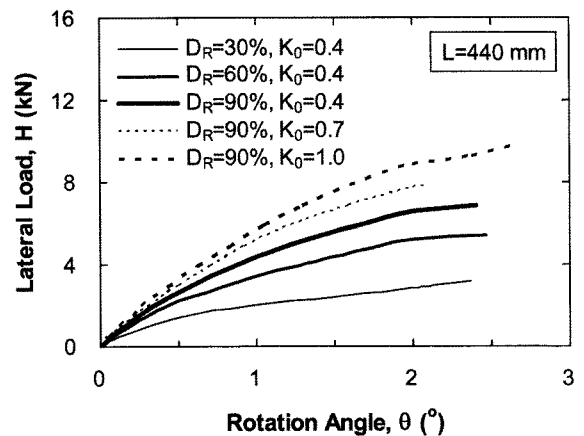
그림 4. 반복수평하중의 재하방법

평변위나 회전각에 의해 정의되거나 재하시험에서 얻어진 하중-변위 곡선에 도식적인 방법을 적용해서 결정한다. Davidson 등(1982)은 말뚝 두부가 2° 회전했을 때 말뚝에 작용하는 하중을 그리고 Meyerhof 등(1981)은 수평하중-변위 곡선에서 초반부의 비선형 곡선 이후에 나타나는 직선부의 시작점에 해당하는 하중을 극한수평지지력으로 정의하였다. 또한 Lee 등(2010)은 모형말뚝실험의 결과를 이용해서 Davidson 등(1982)과 Meyerhof 등(1981)의 방법에 의해 결정되는 극한수평지지력이 큰 차이를 보이지 않음을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 해석의 편의성을 고려해서 Davidson 등(1982)의 방법을 이용하여 시험말뚝의 극한수평지지력을 결정하였다.

그림 5는 반복수평재하시험이 수행된 지반 및 말뚝조건과 동일한 조건하에서 수행한 정적수평재하시험의 결과를 수평하중-회전각 곡선으로 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 말뚝 두부의 회전각이 일정할 때 지반의 상대밀도가 커질수록 그리고 지반의 연직응력에 대한



(a) 지반조건에 따른 변화



(b) 근입길이에 따른 변화

그림 5. 지반 및 말뚝조건에 따른 정적수평재하시험 결과의 변화

표 2. 말뚝의 정적극한수평지지력

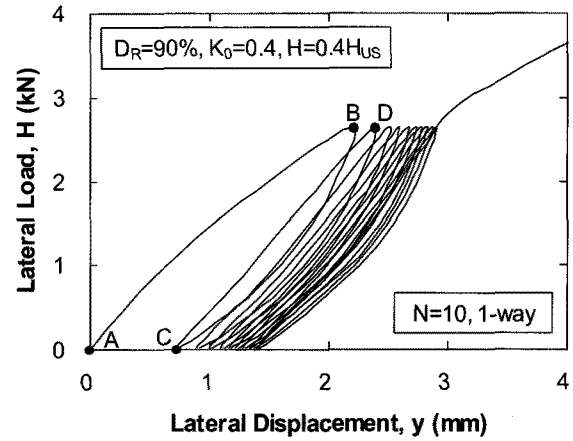
근입길이 (mm)	상대밀도 (%)	응력조건 (kPa)			H_{US} (kN)
		연직응력	수평응력	K_0	
440	30	98	39.2	0.4	2.87
440	60	98	39.2	0.4	5.23
440	90	98	39.2	0.4	6.60
440	90	98	68.6	0.7	7.71
440	90	98	98	1.0	8.87
330	90	73.5	29.4	0.4	3.55
550	90	122.5	49	0.4	8.35

수평응력의 비로 정의되는 토압계수가 커질수록 말뚝이 지지하는 수평하중은 증가하였다. 그리고 말뚝의 근입길이가 증가할수록 일정한 크기의 말뚝 회전각에서 말뚝이 지지하는 수평하중의 크기도 증가하였다.

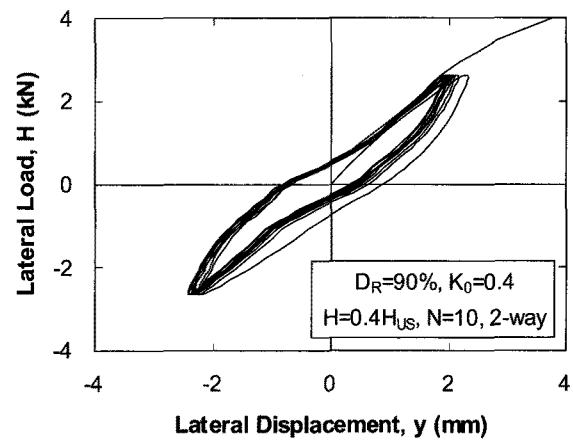
또한 모형실험에서 측정된 수평하중-회전각 곡선에 Davidson 등(1982)의 파괴기준을 적용해서 다양한 조건 하에서 말뚝의 정적극한수평지지력을 구한 결과 표 2와 같았다. 표에서 보듯이 말뚝의 정적극한수평지지력은 지반의 상대밀도와 토압계수, 그리고 말뚝의 근입길이가 커질수록 증가하였다. 이러한 정적극한수평지지력의 경향은 사질토 지반에서 말뚝의 극한수평지지력이 지반의 단위중량과 수동토압계수, 말뚝의 근입길이에 비례한다는 Broms(1964)의 지지력산정식이 갖는 의미와 일치하는 것이다.

3.2 영구수평변위 특성

그림 6은 상대밀도가 $D_R=90\%$ 이고 토압계수가 $K_0=0.4$ 인 모형지반에 440mm 깊이로 타입한 말뚝에 대해서 정적극한수평지지력(H_{US})의 0.4배에 해당하는 수평하중(H)을 한방향과 양방향으로 10회 반복재하했을 때 측정된 하중-변위 곡선이다. 그림 6(a)에서 보듯이 한방향 재하의 경우 첫번째 하중 재하가 그 이후에 가해진 반복재하보다 말뚝에 매우 큰 수평변위를 일으켰으며, 하중의 반복재하횟수가 증가할수록 하중 재하(unloading) 시 말뚝의 잔류변위인 누적 영구변위는 커졌지만 1회의 반복재하로 인한 영구변위량은 감소하였다. 이것은 말뚝에 하중이 반복재하될 때 말뚝 전면부의 지반이 계속 다져질 뿐만 아니라 말뚝에 가해진 하중이 재하(unloading)될 때 말뚝 전면부에 발생한 틈새에 주변의 모래가 채워지고, 이렇게 충전된 모래는 다음 번 하중 재하 시 추가로 다져지게 되기 때문이다(Kishida 등 1985). 또한 그림



(a) 한방향 재하



(b) 양방향 재하

그림 6. 하중 재하방법별 말뚝의 수평하중-변위 곡선

에서 선분 \overline{AB} 의 기울기로 정의되는 최초 재하로 인한 최초접선강성(initial tangent stiffness)은 선분 \overline{CD} 등의 기울기로 정의되는 반복재하로 인한 반복접선강성(cyclic tangent stiffness)보다 매우 작았으며, 반복하중의 재하 횟수가 증가함에 따라 말뚝 전면부 지반의 다짐도 증가로 인해 하중-변위 곡선의 접선강성도 증가하였다.

반면 양방향 재하의 경우에는 그림 6(b)에서 보듯이 하중의 반복재하횟수가 증가할수록 초기 재하방향의 영구변위는 계속 감소하고 반대방향의 영구변위는 미세하게 증가하였다. 그 결과 10회의 반복재하가 완료된 후에 말뚝은 초기 재하방향의 반대방향으로 영구변위가 발생한 상태였으며, 이것은 동일한 크기의 하중을 말뚝에 양방향으로 반복재하하더라도 초기 재하 시 말뚝 전면부 지반은 원지반보다 다져지는 반면 후면부 지반은 틈새의 발생으로 인해 원지반보다 느슨해지기 때문이다. 또한 한방향 재하의 경우와 마찬가지로 양방향 재하의 경우에도 최초 재하에 의한 영구변위가 이 이후에

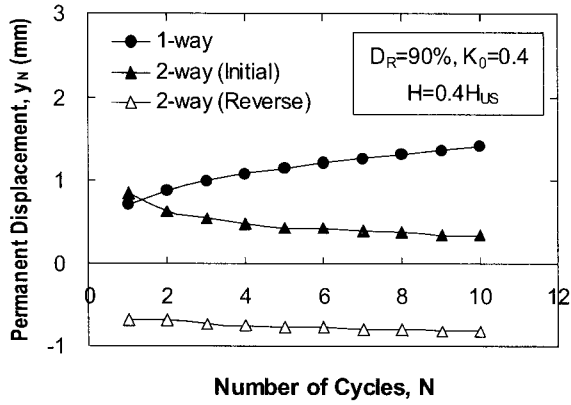
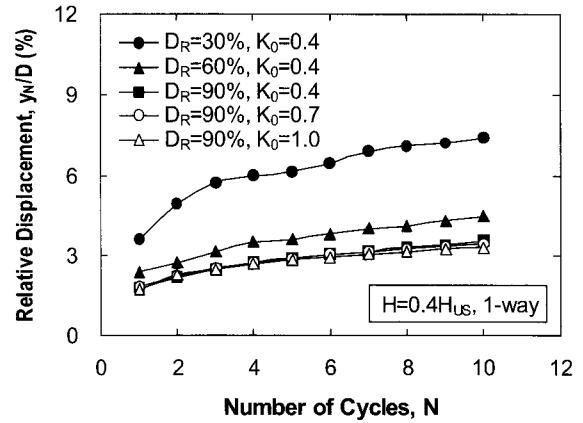


그림 7. 하중 재하횟수에 따른 말뚝의 영구수평변위 변화

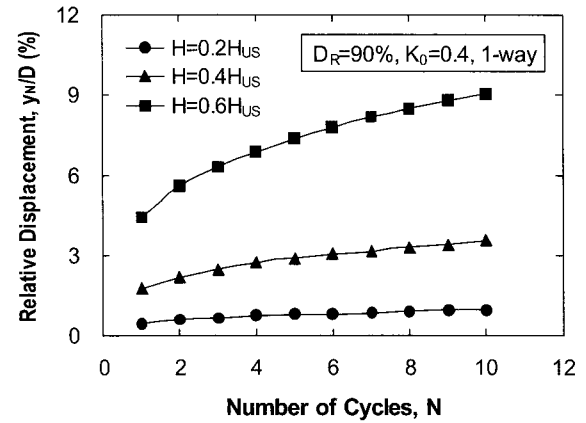
가해지는 재하에 의한 영구변위보다 매우 큰 것으로 나타났다. 이처럼 반복하중의 재하방법에 따른 말뚝의 수평거동 변화는 하중의 재하방법별 재하횟수와 말뚝의 영구수평변위간의 관계를 나타낸 그림 7에서 분명하게 볼 수 있다.

그림 8은 지반조건과 하중의 크기, 말뚝의 근입깊이가 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구변위에 미치는 영향을 보인 것으로, 그림에서 y_N 은 하중이 N 회 반복재하되었을 때 말뚝에 발생한 영구수평변위이고 D 는 말뚝의 직경을 의미한다. 그림과 같이 말뚝에 발생한 영구수평변위는 지반조건과 반복하중의 크기, 말뚝의 근입깊이를 달리한 모든 경우에서 말뚝에 가해지는 반복하중의 재하횟수가 많아질수록 증가하였고, 지반의 상대밀도가 감소하거나 말뚝에 가해지는 반복수평하중의 크기가 커질수록 말뚝의 영구수평변위도 급격히 증가하였다. 반면 말뚝에 정적극한수평지지력의 0.4배에 달하는 수평하중이 일정한 횟수만큼 반복해서 가해질 때 지반의 토압계수에 따른 영구수평변위의 변화는 무시할 정도였고, 말뚝의 근입깊이에 따른 영구수평변위 변화도 그다지 크지 않았다. 따라서 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구수평변위는 말뚝의 정적극한수평지지력과 말뚝에 가해지는 반복수평하중의 비로 정의되는 정규화된 수평하중(H/H_{US})의 크기와 지반의 상대밀도에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

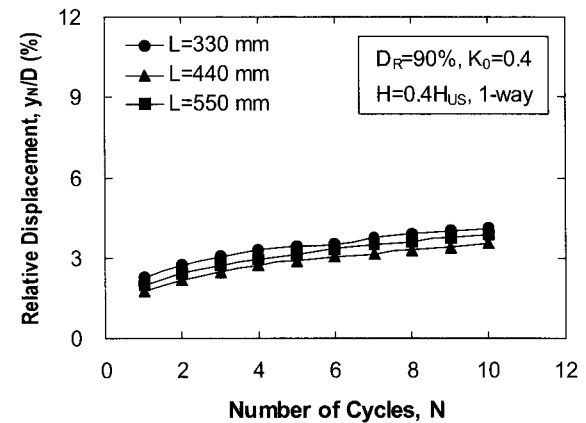
한편, 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구수평변위 특성을 정량화하기 위해 그림 8의 상대영구변위(y_N/D)를 최초 재하로 인한 영구수평변위(y_1)에 대한 반복재하로 인한 영구수평변위(y_N)의 비로 정의되는 정규화된 영구변위(y_N/y_1)로 변환시켜서 그림 9에 나타났다. 그림에서 보듯이 지반 및 하중조건과 말뚝의 근입깊이를 달리한



(a) 지반조건에의 영향



(b) 하중크기에의 영향

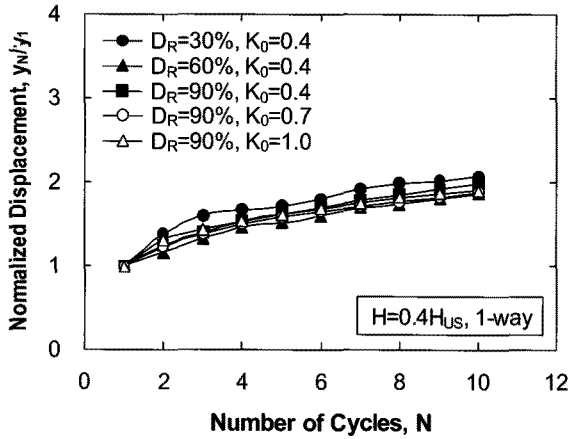


(c) 말뚝깊이에의 영향

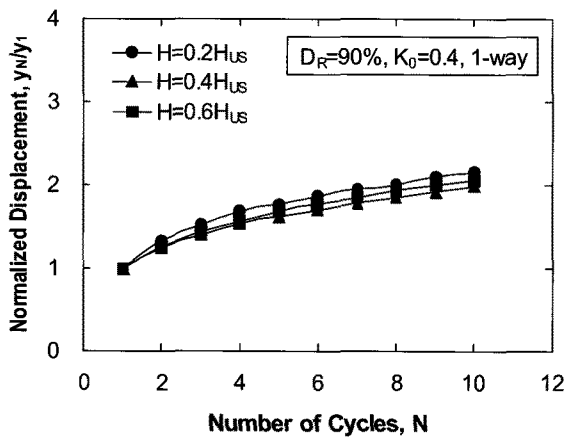
그림 8. 지반 및 하중조건, 말뚝 근입깊이가 말뚝의 영구수평변위에 미치는 영향

모든 경우에서 반복수평하중의 재하횟수가 많아질수록 말뚝의 정규화된 영구변위도 증가하였다. 또한 그림 8에서 보인 상대영구변위와 달리 말뚝의 정규화된 영구변위는 지반의 상대밀도와 토압계수, 반복수평하중의 크기, 말뚝의 근입깊이에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 말뚝에 작용하는 반복수평하

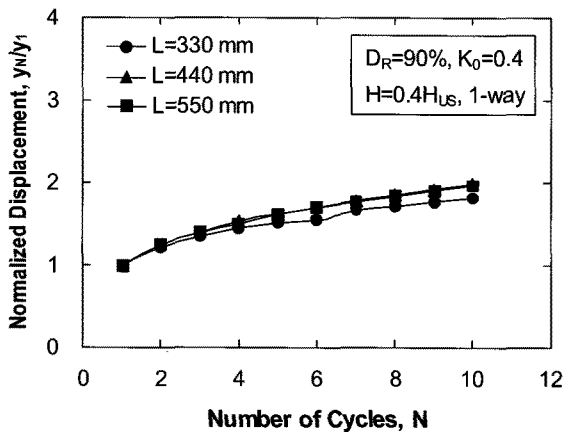
중이 커질수록 말뚝의 정규화된 영구수평변위도 증가한다는 Achmus 등(2009)의 연구결과와는 상반되지만, 반복하중을 받는 말뚝의 정규화된 영구수평변위는 반복수평하중의 크기와 무관하다는 Hettler(1981)와 Little과 Briaud(1988)의 연구결과와는 일치한다.



(a) 지반조건에의 영향



(b) 하중크기에의 영향



(c) 말뚝길이에의 영향

그림 9. 지반 및 하중조건, 말뚝 근입길이가 말뚝의 정규화된 영구수평변위에 미치는 영향

4. 말뚝의 영구변위 산정

4.1 영구수평변위

그림 10은 다양한 조건의 모형지반에 타입된 말뚝에 대해 다양한 크기의 수평하중을 한방향과 양방향으로 10회 반복재하했을 때 하중재하횟수에 따른 말뚝의 정규화된 영구변위(normalized permanent displacement)의 변화를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 수평하중을 한방향으로 반복재하한 경우에는 본 연구에서 수행한 모든 모형실험의 결과들이 좁은 범위안에 밀집하였으나, 하중을 양방향으로 반복재하한 경우에는 한방향 반복재하의 경우와 달리 실험결과들이 넓게 분산되었다. 그리고 반복하중이 한방향으로 재하된 경우에 하중재하횟수에 따라 오차의 정도가 약간씩 달라지지만 하중의 재하횟수와 말뚝의 정규화된 영구변위간의 관계는 식 (1)과 같이 표현될 수 있었다.

$$y_N/y_1 = N^{0.277} \quad (1)$$

여기서 y_1 과 y_N 은 수평하중이 말뚝에 각각 1회와 N회 반복재하되었을 때 발생한 말뚝의 영구수평변위이다. 따라서 말뚝에 대한 정적수평재하시험이나 p-y곡선법과 같은 이론적인 방법을 통해서 정하중 재하 시 말뚝의 영구수평변위를 파악하면 식 (1)을 이용해서 동일 조건 하에서 하중이 반복재하될 때 발생하는 말뚝의 영구수평변위를 산정하는 것이 가능하다.

반복수평하중을 받는 말뚝의 영구수평변위를 예측하기 위한 식 (1)의 정확도를 평가하기 위해서 제안식으로부터 계산된 예측치를 기존의 제안식들과 비교함과 동시

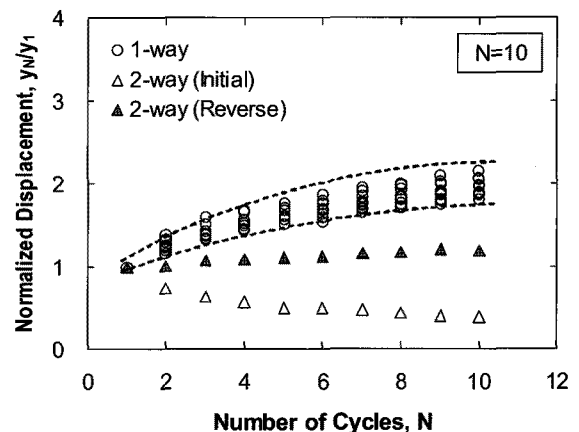


그림 10. 하중 재하횟수에 따른 말뚝의 정규화된 영구수평변위 변

에 $D_R=90\%$ 이고 $K_0=0.4$ 인 모형지반에 타입된 $L=440\text{mm}$ 인 말뚝에 $0.4H_{US}$ 크기의 수평하중을 한방향으로 50회 반복재하했을 때 측정된 모형실험 결과와도 비교하였다. 그 결과 그림 11에서 보듯이 식 (1)은 $N=50$ 회에서 실측치보다 말뚝의 영구수평변위를 약 10% 크게 예측하였다. 그러나 $N=50$ 회일 때의 실험결과가 제안식의 도출에 사용된 $N=10$ 회일 때 실험결과와 하단부에 위치함을 고려할 때 식 (1)은 반복수평하중의 재하횟수가 $N=50$ 일 때에도 다양한 지반 및 하중조건하에 있는 말뚝의 영구수평변위를 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 반면 아래 식 (2)와 (3)과 같이 말뚝의 정규화된 영구수평변위와 하중의 반복재하횟수간의 관계를 로그함수($\ln N$)로 가정한 Hettler(1981)와 Rosqueot 등(2007)의 제안식과 식 (4)와 같이 이들간의 관계를 거듭제곱(N^b)의 함수로 가정한 Little과 Briaud(1988)의 제안식은 말뚝의 영구수평변위를 매우 과소평가하는 것으로 나타났다.

$$y_N/y_1 = 1 + 0.2 \ln N \quad (2)$$

$$y_N/y_1 = 1 + 0.08 (DF/F_{max})^{0.35} \ln N \quad (3)$$

$$y_N/y_1 = N^{0.136} \quad (4)$$

여기서 F_{max} 는 말뚝에 가해진 반복수평하중의 최대값이며 DF 는 반복수평하중의 진폭, 즉 최대치와 최소치간의 차이이다. 뿐만 아니라 그림 11을 통해서 하중재하횟수의 로그값($\ln N$)과 말뚝의 정규화된 영구수평변위(y_N/y_1)가 직선관계에 있지 않다는 것을 알 수 있으며, 이러한 점에 근거할 때 하중의 반복재하횟수와 말뚝의 정규화된 영구수평변위는 Hettler(1981)와 Rosqueot 등(2007)

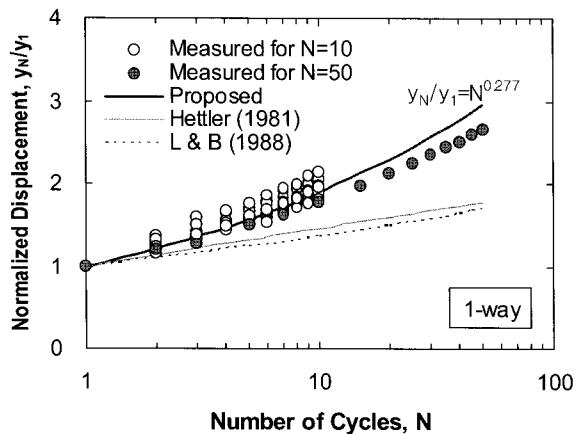
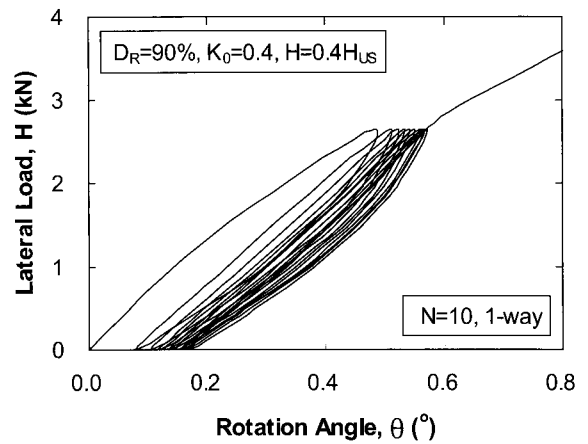


그림 11. 말뚝의 영구수평변위 산정식에 대한 정확도 검증

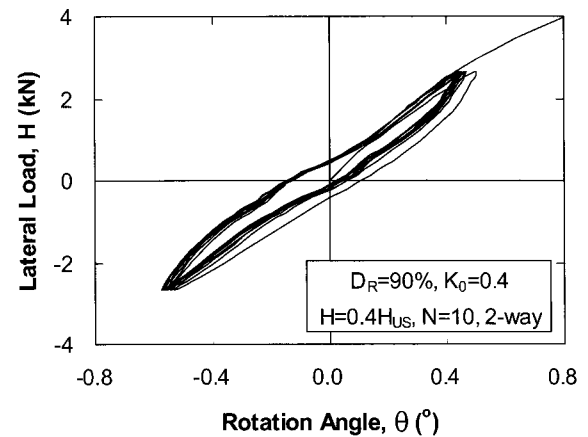
이 제안한 로그함수보다 Little과 Briaud(1988)이 사용한 거듭제곱함수로 연결되는 것이 더 타당한 것으로 판단된다.

4.2 영구회전각

그림 12는 $D_R=90\%$ 이고 $K_0=0.4$ 인 모형지반에 440mm 깊이로 타입된 말뚝에 대해 $0.4H_{US}$ 크기의 수평하중을 한방향과 양방향으로 10회 작용시켰을 때 말뚝의 수평하중-영구회전각 관계를 보인 것이다. 그림에서 보듯이 최초 반복하중은 그 이후에 가해진 반복하중보다 말뚝에 상당히 큰 영구회전각을 발생시켰으며, 하중 재하횟수가 증가할수록 단위 영구회전각에 대응하는 반복수평하중의 증분으로 정의되는 접선강성도 증가하였다. 이처럼 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구회전각 특성은 그림 7에서 보인 영구수평변위 특성과 정성적으로 동일한 것으로 나타났다.



(a) 한방향 재하 시



(b) 양방향 재하 시

그림 12. 하중 재하방법별 말뚝의 수평하중-회전각 곡선

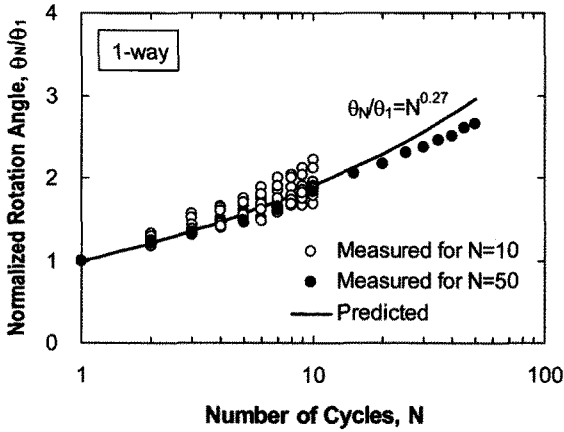


그림 13. 말뚝의 영구회전각 산정식에 대한 정확도 검증

그리고 말뚝에 수평하중을 한방향으로 10회 반복재하했을 때 측정된 반복수평하중의 재하횟수와 말뚝의 정규화된 영구회전각간의 관계를 그림 13에 나타냈다. 이때 정규화된 영구회전각(normalized permanent rotation angle)은 최초 재하 시 발생한 말뚝의 영구회전각(θ_1)과 반복재하로 인해 발생한 말뚝의 영구회전각(θ_N)의 비로 정의된다. 그 결과 $N=10$ 회일 때 측정된 모형실험의 결과에 근거해서 식 (5)와 같은 하중재하횟수와 말뚝의 정규화된 영구회전각간의 관계식이 도출되었으며, 이 제안식은 $N=50$ 회일 때 측정된 말뚝의 거동을 정성적으로나 정량적으로 비교적 정확하게 예측하였다. 또한 말뚝의 영구회전각을 산정하기 위한 식 (5)는 영구수평변위를 산정하기 위한 식 (1)과 형식 및 크기 측면에서 매우 유사한 것으로 나타났다.

$$\theta_N / \theta_1 = N^{0.27} \quad (5)$$

5. 결론

해상풍력발전기를 포함한 많은 해양구조물들은 풍력과 파랑하중에 의해 큰 크기의 반복수평하중을 받게 되며, 이러한 해양구조물의 기초로 사용되는 말뚝의 설계를 위해서는 극한수평지지력의 산정과 함께 반복하중에 의한 영구수평변위의 예측이 필요하다. 본 연구에서는 모래지반에서 반복수평하중을 받는 항타말뚝의 거동 특성을 조사하기 위해서 가압토조와 길이가 다른 3개의 모형말뚝을 이용해서 모형말뚝재하시험을 수행하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 최초의 하중재하는 이후에 가해지는 반복재하보다 말뚝에 매우 큰 수평변위를 발생시켰고, 수평하중의 반복재하횟수가 증가함에 따라 말뚝의 누적 수평변위는 증가하지만 1회 재하로 인해 발생하는 말뚝의 수평변위량은 감소하였다.
- (2) 반복수평하중의 한방향 재하는 하중재하 방향으로 말뚝의 영구수평변위를 일으키지만, 양방향 재하는 최초 하중재하 방향과 반대방향으로 말뚝의 영구수평변위를 발생시킨다.
- (3) 반복수평하중으로 인한 말뚝의 영구수평변위는 지반의 상대밀도가 감소하거나 말뚝에 작용하는 반복하중의 크기가 커질수록 급격히 증가하였으나, 지반의 토압계수와 말뚝의 근입깊이 변화에는 큰 영향을 받지 않았다.
- (4) 반복수평하중이 한방향으로 재하된 경우 최초 재하 시 발생한 영구수평변위에 대한 반복재하로 인한 누적영구수평변위의 비로 정의되는 말뚝의 정규화된 영구수평변위는 수평하중의 반복재하횟수에 매우 민감하게 반응했으며, 지반 및 말뚝조건과 하중특성의 변화에는 크게 반응하지 않았다.
- (5) 모형실험의 결과에 근거해서 하중이 한방향으로 반복재하될 때 말뚝의 영구수평변위와 영구회전각을 예측할 수 있는 산정식을 제안하였으며, 제안된 산정식은 반복수평하중을 받는 말뚝의 영구수평변위 특성을 비교적 정확하게 예측하였다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. American Petroleum Institute (2000), *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design: API recommended practice 2A-WSD (RP2A-WSD)*, 21st ed., API.
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. Davidson, H. L., Cass, P. G., Khilji, K. H., and McQuade, P. V. (1982), *Laterally loaded drilled pier research*, Report EL-2197, EPRI, 324p.
4. Hettler, A. (1981), *Verschiebungen starrer und elastischer Grund-*

- ungskorper in sand bei monotoner und zyklischer Belastung*, ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Geo- and Environmental Sciences, Institute of Soil Mechanics and Rock Mechanics, University of Karlsruhe.
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. 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*, Geotechnical Division, Texas A&M University, Texas, 30p.
 7. Lee, J. H., Paik, K. H., and Kim, D. H. (2010), "Estimation of ultimate lateral load capacity of piles in sands", *Submitted to Soils and Foundations*.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.

(접수일자 2010. 8. 2, 심사완료일 2010. 10. 14)