

횡방향하중을 받는 그물식 뿌리말뚝의 최적 타설경사각

The Optimum Installation Angle of Reticulated Root Piles under Lateral Loads

이 승 현*1

Lee, Seung-Hyun

김 명 모*2

Kim, Myoung-Mo

Abstract

In order to investigate the influence of installation angle of reticulated root piles(RRP) on their lateral load capacities, model tests of lateral loads on RRP with various installation angles(0° , 5° , 10° , 15° , 20° , and 25°) are carried out. One set of RRP consists of 12 piles which are installed in circular patterns forming two concentric circles, each of which has 6 piles. Each pile made of a steel bar of 5mm in diameter and 350mm in length, is coated with sand until the bar has the diameter of 6.5mm.

According to the test results, RRP's response is heavily influenced by the displacement level. At low displacement level(1mm), lateral load capacity increases as the installation angle is increased. However, the value of the optimum installation angle decreases as the displacement level is increased. In fact, it is found to be 17.5° at 6mm lateral displacement. The ratios of the lateral resistances for the optimum installation angles to those for the vertical RRP decrease as the lateral displacements are increased. Thus the effect of slanting angle of RRP is expected to be reduced at higher level of lateral displacement.

요 지

본 연구에서는 그물식 뿌리말뚝의 타설경사각과 횡방향저항력 사이의 관계를 비교분석하고자 여러가지의 타설경사각을 갖는 모형 그물식 뿌리말뚝을 제작하여 모형지반에 설치한 다음 횡방향재하시험을 하였다. 모형 뿌리말뚝의 배치는 12개의 말뚝을 6개씩 2개의 크고 작은 동심원에 접하도록 하였는데 각각의 시험에 사용한 모형말뚝은 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° 의 타설경사각을 갖는 직경 5mm의 강봉에 모래를 입힌 것이다.

횡방향하중을 받는 뿌리말뚝에 있어서 실험을 통해 얻은 하중-변위곡선으로 판단해 볼 때 1mm 정도의 횡방향변위에서는 타설경사각이 커질수록 횡방향저항력도 커지지만 최적 타설경사각은 횡방향변위가 증가할수록 감소하며 6mm의 횡방향변위에서는 17.5° 정도에 이른다. 타설경사각 0° 일 때의 횡방향저항력에 대한 최적 타설경사각에서의 횡방향저항력의 비는 횡방향변위가

*1 정희원, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*2 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

증가할수록 감소하므로 횡방향변위가 커질수록 말뚝을 경사지게 배치함으로써 얻는 저항력 증대효과는 줄어들 것으로 예상된다.

Keywords : Installation angle, RRP, Lateral load capacity, Displacement level

1. 서론

현대에 들어서서 급속한 산업화가 진행됨에 따라 도시지역내의 건설수요도 증가하게 되어 인접 구조물에 근접해서 행해지는 공사가 빈번해지는 추세에 있으며 기존구조물의 노후화에 따른 보강방안이 필요한 시점에 이르렀다. 그동안 우리나라에서는 아파트, 빌딩 등의 신축 사업이 대부분이었기 때문에 깊은기초로서의 역할을 PC 말뚝 또는 피어가 주로 담당해왔으나 말뚝타입으로 인한 소음과 진동으로 인한 민원이 증대되고 있는 실정을 감안해 볼 때 이러한 문제점들을 극복하면서도 깊은기초의 역할을 수행할 수 있는 공법이 요구되고 있다.

그물식 뿌리말뚝(RRP, reticulated root piles)은 중심에 보강재가 들어있는 직경 약 75~250mm인 소구경 현장 시공 콘크리트 말뚝으로서, 자연 상태의 나무의 경우, 흠과 강력하게 부착된 나무뿌리가 흠속에 사방으로 퍼져 있어 나무뿌리와 흠이 일체로 외력에 저항하는 점에 착안하여, 나무 뿌리 역할을 하는 요소를 지반에 인공적으로 설치하여 구조물을 지지하거나 또는 지반을 보강하고자 한 것으로 구조물 기초, 옹벽기초, 사면 안정 그리고 지지력이 약화된 기존 구조물의 보강 등에 널리 쓰이고 있다.

그물식 뿌리말뚝 공법은 굴착기의 발달로 인해 모든 종류의 흠에 적용 가능하며, 불안정한 지반에서도 부가적인 응력을 주지 않고 시공이 가능하고, 소형 보오링 기계를 사용하므로 작업 공간에 제약받지 않는다. 또한 시공중 소음이나 진동 등의 공해가 없는 특징이 있다. (Lizzi, 1964)

그러나, 이런 장점들에도 불구하고 RRP를 이용한 지반보강 및 기초의 설치 방법에 대한

역학적 특성이 아직 명확히 밝혀지지 않고 있으며, 뿌리말뚝의 직경, 길이, 설치간격, 설치방향 등에 대한 기준이 없고, 설계 또한 경험에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 깊은기초로 작용하는 모형 그물식 뿌리말뚝에 대하여, 타설경사각을 변화시켜 횡방향 재하시험을 실시하고 시험결과 얻은 하중-횡방향변위곡선으로부터 횡방향변위에 따른 저항력의 크기를 비교하여 최적타설경사각의 변화양상을 파악하고 해석적 방법에 의해 얻은 하중-변위곡선을 재하시험을 통해 구한 하중-변위곡선과 비교하는데 있다.

2. 모형실험

2.1 실험장치 및 실험절차

모래지반에 설치한 모형 그물식 뿌리말뚝에 대하여 횡방향재하시험을 실시하였다. 모형지반은 비중이 2.66, 상대밀도가 47%, 내부마찰각이 35°, 균등계수가 1.93 인 모래지반으로 모형 그물식 뿌리말뚝을 토조 중앙에 설치한 다음 토조 위 1.4m의 높이에 설치한 직경 5mm 인 체를 통하여 낙하시켜 조성하였다.(이승현, 1997)

토조의 제원은 폭이 1m, 길이가 2m, 높이가 2.5m이다. 횡방향 재하시험장치는 그림 1과 같다. 횡방향하중을 가할 때의 반력장치로는 수평이동이 없도록 제작한 반력판을 사용하였고 반력판 위에는 모터 및 기어박스가 장착된 조정판을 얹어 하중을 가하기 전에 반력판을 상하로 움직여 상하 위치조정을 하고 조정판을 좌우로 움직여 좌우 위치조정이 가능하도록 하였다. 횡방향 하중은 모터에 의해 기어박스의 스트로크가 전진하면서 가하도록 하였는데 스트로크에는 로드셀이 달려있는 강봉을 부착하

여 서로 떨어져 있는 뿌리말뚝 캡과 기어박스 사이에 하중이 전달되도록 하였다. 실험순서는 형성된 모형지반의 지반면 위에 돌출해 있는 뿌리말뚝 캡핑부의 재하점과 강봉의 앞부분이 일치하도록 반력판 및 조정판을 상하좌우로 조정하여 맞춘 다음 뿌리말뚝 캡핑부에 횡방향 변위 측정장치를 설치하고 횡방향하중을 가하여 하중-변위 곡선을 얻는 순으로 하였다.

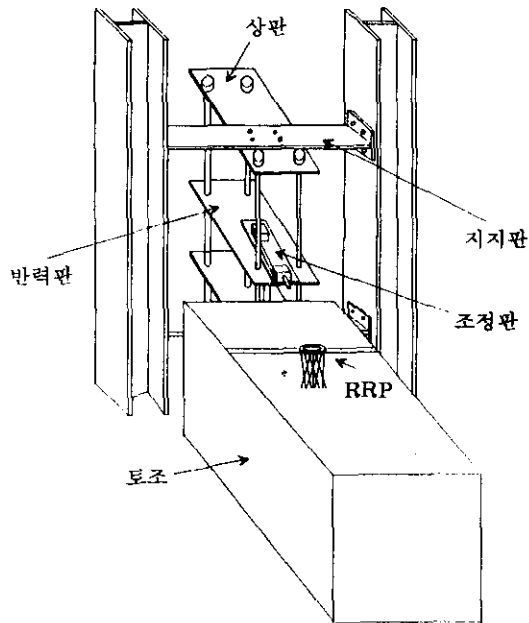


그림 1. 횡방향 재하장치

2.2 모형실험 계획

본 모형실험에서는 뿌리말뚝의 무리효과를 연구한 Lizzi의 실험에 착안하여 12개의 뿌리말뚝으로 구성된 그물식 뿌리말뚝에 대하여 타설경사각을 변화시켜가며 횡방향 재하시험을 실시하였다.(Thorburn and Littlejohn, 1993)

모형실험에 사용한 말뚝은 0°, 5° 10°, 15°, 20° 그리고 25°의 타설경사각을 갖는 직경 5mm의 강봉에 모래를 입힌 것으로 직경이 6.5mm, 길이가 350mm가 되도록 하였다. 그물식 뿌리말뚝은 동일한 타설경사각을 갖는 12개의 모형

말뚝을 6개씩 2개의 크고 작은 동심원에 접하도록 배치하였는데 각 동심원에 접하는 6개의 말뚝은 평면상에서 보았을 때 인접 모형말뚝머리의 중심을 지나도록 하였으며 안쪽 동심원상의 말뚝과 바깥쪽 동심원상의 말뚝들의 배치방향은 서로 엇갈리도록 하였다. 캡핑된 모형 그물식 뿌리말뚝과 뿌리말뚝의 형상은 그림 2와 같다.

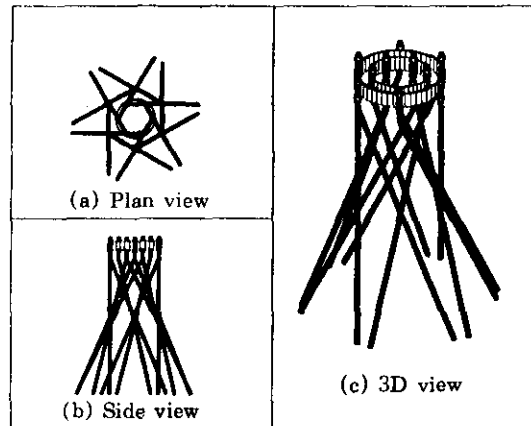


그림 2. 모형말뚝캡과 뿌리말뚝의 형상 (횡방향 재하시험)

실험은 각각의 타설경사각을 갖는 그물식 뿌리말뚝에 대하여 4회 재하시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 말뚝타설경사각과 횡방향저항력

각각의 타설경사각에 대한 하중-횡방향변위 곡선은 그림 3과 같다. 현재까지 횡방향 재하시험을 통해 구한 하중-횡방향변위 자료를 해석하는 방법이 잘 정립되어 있지 않은 실정이며 보통 실제크기 말뚝에 대하여 특별한 규정이 없는 경우에는 파괴하중(failure load)을 6.25mm의 말뚝머리 변위에 대응하는 하중으로 정의하고 있다.(Prakash and Sharma, 1990)

본 모형실험의 경우 실제크기 말뚝과 모형말뚝 사이의 크기효과로 인해 6.25mm 판정기준

을 적용하기에는 무리가 있는 것으로 판단된다. 따라서 실험을 통해 구한 하중-횡방향변위 곡선의 해석은 측정된 말뚝머리의 변위에 대하여 각각의 타설경사각을 갖는 그물식 뿌리말뚝의 횡방향저항력을 비교분석하는 것으로 한다. (Sands, 1992)

횡방향변위는 모형말뚝 직경의 15%에 해당하는 1mm 에서부터 모형말뚝 직경의 92%에 해당하는 6mm 까지 1mm 씩 증가한 값으로 하였는데 횡방향변위 1mm, 6mm에 대하여 타설경사각에 따른 횡방향저항력을 나타내면 그림 4와 같다.

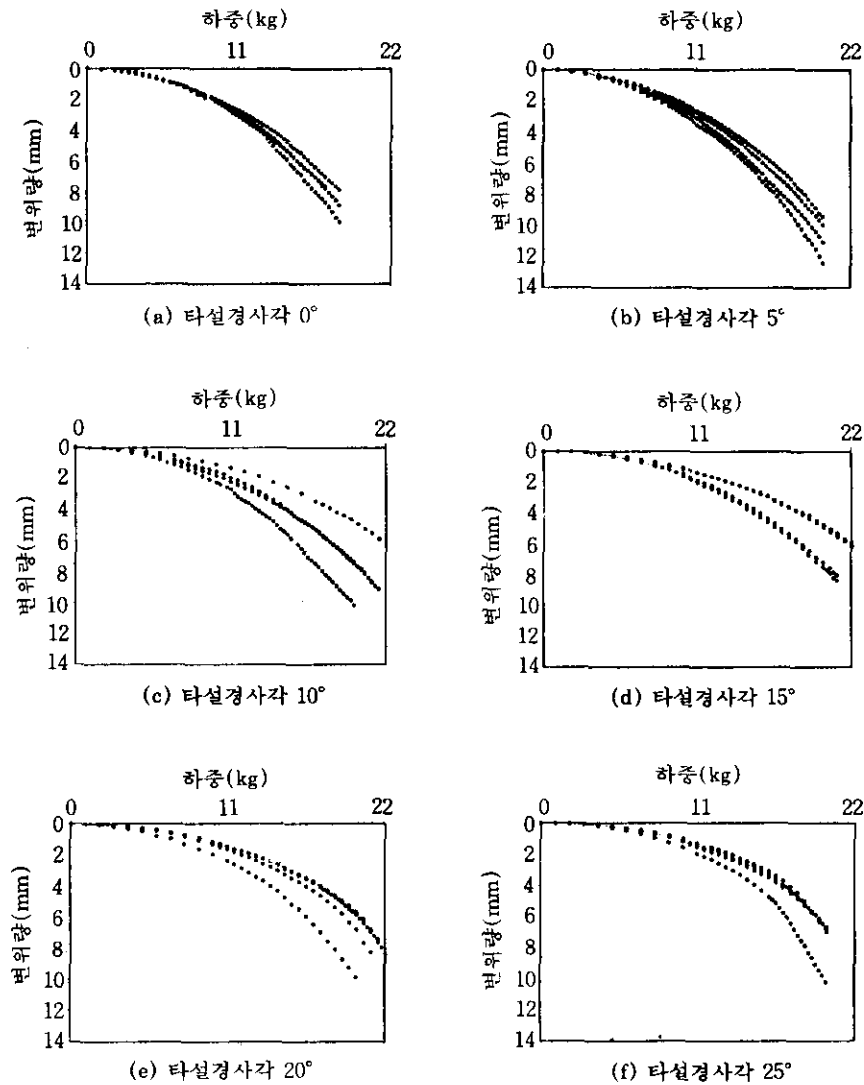


그림 3. 말뚝 타설경사각에 따른 하중-횡방향변위곡선

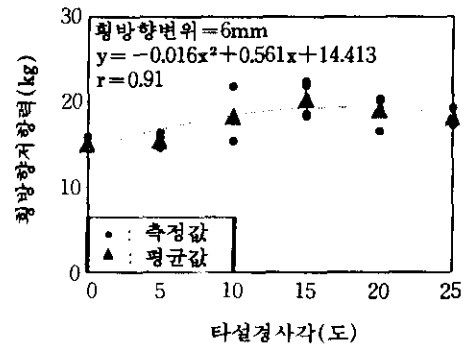
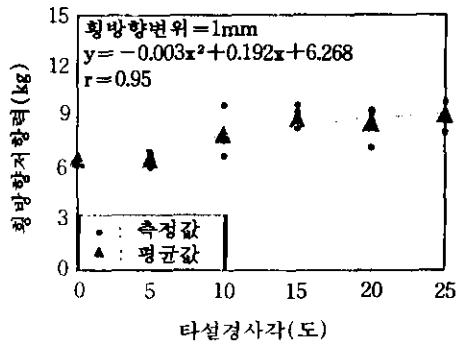


그림 4. 타설경사각에 따른 횡방향저항력(회방향변위 = 1mm, 6mm)

그림 4를 통해 알 수 있듯이 회방향변위 1mm일 때의 회귀분석결과에 의하면 타설경사각이 커질수록 횡방향하중에 대한 저항력도 커지는 경향을 나타내며 실험에서 고려하였던 최대 타설경사각 25°일 때 최대 저항력이 발휘된다. 이와 달리 회방향변위가 증가함에 따라 저항력이 최대가 되는 타설경사각은 점차 감소하여 변위 6mm 일 때는 최적 타설경사각이 17.5°가 된다.

회귀분석결과를 통하여 구한, 회방향변위에 따른 최적 타설경사각과 6가지의 회방향변위에 대하여 최적 타설경사각에 대응하는 횡방향저항력 및 타설경사각 0°일 때의 횡방향저항력 그리고 두가지 저항력의 비율 나타내면 표 1과 같다. 회방향변위에 대한 최적 타설경사각의 변화양상을 그림으로 나타낸 것이 그림 5이며

회방향변위에 대한 저항력비의 변화양상을 나타낸 것이 그림 6이다.

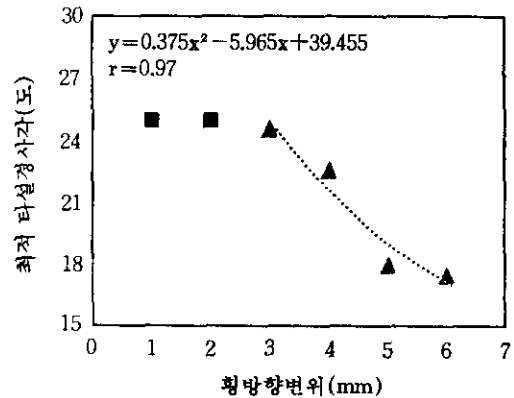


그림 5. 회방향변위에 대한 최적 타설경사각의 변화

표 1 회방향변위에 따른 최적 타설경사각과 저항력비(회귀분석)

회방향변위 (mm)	최적 타설경사각	최적 타설경사각에 대응하는 횡방향 저항력 (kg)	타설경사각 0°에 대응하는 횡방향 저항력 (kg)	회방향저항력비
1	(25)*	9.15	6.27	1.46
2	(25)	12.5	8.79	1.42
3	24.6°	14.8	10.57	1.40
4	22.6°	16.7	12.10	1.38
5	18°	18.1	13.24	1.37
6	17.5°	19.3	14.41	1.34

* : 괄호안의 값은 최적 타설경사각이 아닐 수 있는데 회방향변위 1mm, 2mm일 때의 회귀곡선에서는 극대값이 존재하지 않기 때문이다.

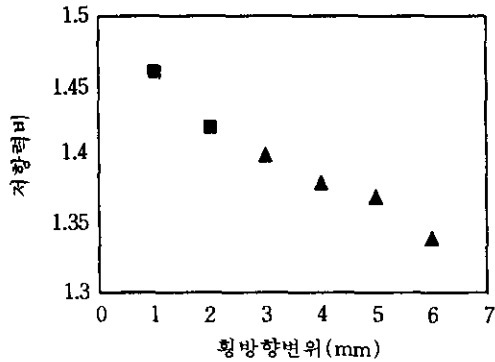


그림 6. 횡방향변위에 대한 저항력비

그림 5에서 접선은 회귀곡선을 나타내며 회귀분석은 3mm 이상의 횡방향변위에 대한 최적 타설경사각(세모로 표시된 점)에 대해서만 하였는데 변위가 1mm, 2mm일 경우(네모로 표시된 점)에는 모형실험에 적용한 최대 타설경사각(25°)보다 큰 타설경사각에서 저항력이 최대가 될 수 있으므로 회귀분석에서 제외하였다.

표 1과 그림 5를 통해 볼 때 횡방향변위가 증가할수록 최적 타설경사각이 변위 3mm일 때의 24.6°에서부터 점차 감소하여 변위 6mm일 때에는 17.5°가 됨을 알 수 있다.

횡방향변위에 대한 저항력비의 변화양상을 그림 6을 통해 볼 때 횡방향변위가 증가할수록 타설경사각 0°일 때의 횡방향저항력에 대한 최적 타설경사각에서의 횡방향저항력의 비는 변위 3mm일 때의 1.4에서부터 변위 6mm일 때의 1.34로 감소하므로 횡방향변위가 증가할수록 저항력비가 떨어짐을 알 수 있는데 이를 통해 볼 때 횡방향변위가 커질수록 말뚝을 경사지게 배치함으로써 얻는 저항력증대효과가 감소한다고 볼 수 있다.

그림 3의 하중-횡방향변위곡선으로부터 하중-횡방향변위의 관계가 선형적인 변위는 대체로 1mm내에서의 값이며 설계하중을 약 1mm 정도의 횡방향변위에 대응하는 하중으로 본다면 타설경사각이 클수록 횡방향저항력도 크게 된다고 볼 수 있다.

3.2 실험결과와 해석적 방법에 의한 RRP의 하중-변위 관계의 비교

실험결과와 해석적 방법에 의한 RRP의 하중-횡방향변위관계를 비교해 보았다. 해석적 방법으로는 지반반력계수를 써서 지반을 스프링으로 치환하여 해석하는 지반반력법과 지반을 탄성지반으로 이상화시켜 해석하는 근사적 탄성해법을 이용하였는데 지반반력법을 이용해서는 선형해석과 비선형해석을 하였다.

3.2.1 선형해석 및 결과

말뚝설계에 있어서 지지력과 더불어 변위에 대한 검토가 필요하게 되는데 일반적으로 설계 하중 범위내의 하중과 변위는 선형적인 관계에 있다고 한다.(Randolph, 1979)

하중-변위 관계가 선형이 되는 그물식 뿌리말뚝의 강성(stiffness)을 실험결과 및 해석적 방법을 통하여 구하고 상호 비교하였다.

지반반력법은 지반을 일련의 스프링으로 치환하여 말뚝의 하중-변위 관계를 알아보는 방법으로서 그물식 뿌리말뚝의 강성을 구하기 위하여 지반반력계수를 이용하는 무리말뚝 해석 프로그램을 이용하였다. 편의상 이 프로그램을 이용한 해석법을 지반반력법이라 한다.(Bowles, 1988)

지반반력법의 입력값으로서는 뿌리말뚝의 축방향강성 및 횡방향강성이 필요하다. 뿌리말뚝의 축방향강성은 기존의 정역학적 지지력공식을 이용하여 구한 허용지지력을 허용지지력이 작용할 때의 침하량으로 나누어 구하였는데 뿌리말뚝의 허용지지력 및 허용지지력이 작용할 때의 침하량은 Vesić가 제안한 방법을 통하여 구하였다.(Prakash and Sharma, 1990) (Vesić, 1977)

뿌리말뚝의 횡방향강성은 다음의 그림 7과 같이 말뚝을 유한개의 요소로 나누어 해석하는 방법을 사용하였다.(Bowles, 1988)

그림 7(a)는 말뚝요소의 분할방식을 나타내는 것이고 그림 7(b)는 임의의 i번째 요소에 대한 외력(P)과 그에 대응하는 변위(X) 그리

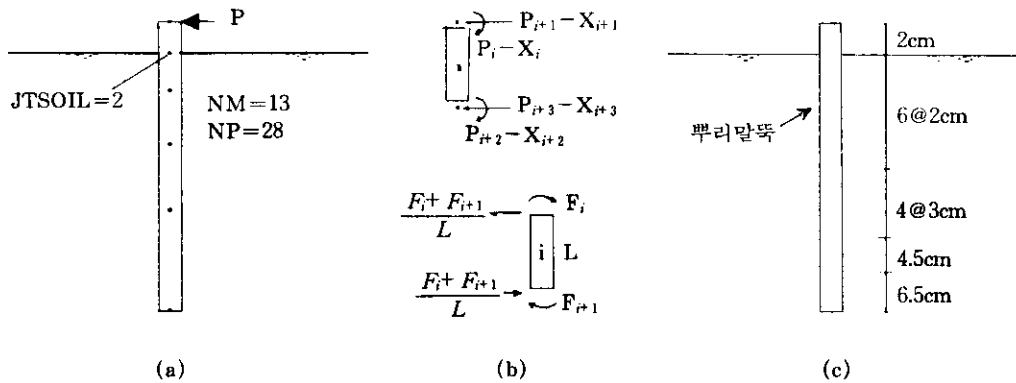


그림 7. 외말뚝의 모델링

고 부재력(F)를 나타낸다. 계산방법은 각 요소에 대한 외력과 변위의 관계를 나타내는 강성행렬로부터 말뚝 전체에 대한 강성행렬을 구한 다음 이 행렬의 역행렬을 구하여 변위(X)와 부재력(F)를 구하는 것이다. 그림 7(c)는 뿌리말뚝의 모델링을 나타낸다. 그림 7에 개략적으로 나타낸 방법에 따라 말뚝의 횡방향강성을 구하기 위해서는 입력값으로서 횡방향 지반반력계수가 필요하게 되는데 횡방향지반반력계수는 말뚝 측면에서의 전단저항의 영향을 고려하여 연직지반반력계수에 2을 곱한 값을 사용하였다.(Bowles, 1988) 연직지반반력계수는 얇은기초의 극한지지력하에서 일정한 침하량이 유발된다고 보아 극한지지력을 일정한 침하량으로 나눈 값으로 하였는데 얇은기초의 극한지지력은 Brinch Hansen의 지지력공식을 이용하여 구하였다.

근사적 탄성해석법은 지반을 탄성연속체로 가정하게 되는데 일반적인 무리말뚝에 있어서는 작용하중(working load)이 무리말뚝에 가해지는 경우에 무리말뚝 내의 말뚝에 대한 하중분담이나 변위를 계산할 경우는 지반을 선형탄성체로 고려해도 별 무리가 없다는 가정에 근거를 두고 있다.(Randolph, 1979) 실험결과와의 비교를 위한 무리말뚝 해석 프로그램으로는 PIGLET을 이용하였으며 편의상 이 프로

그램을 이용한 해석법을 탄성해석법이라 부른다. 탄성해석법의 입력값은 말뚝세장비, 말뚝의 탄성계수(E_p), 포아송비(ν), 지반의 전단탄성계수(G)이다.

각각의 타설경사각을 갖는 그물식 뿌리말뚝에 대하여 하중-횡방향변위곡선의 초기 선형부분의 기울기로 구한 뿌리말뚝의 강성과 프로그램 실행으로 구한 뿌리말뚝의 강성은 표 2와 같고 실험값 및 두가지 방법에 의하여 구한 타설경사각 0° 일 때의 강성에 대한 각각의 타설경사각에 대응하는 강성의 비를 나타내면 그림 8과 같다. 실험결과 얻은 하중-횡방향변위곡선의 초기 선형부분은 선형 회귀분석을 했을 때

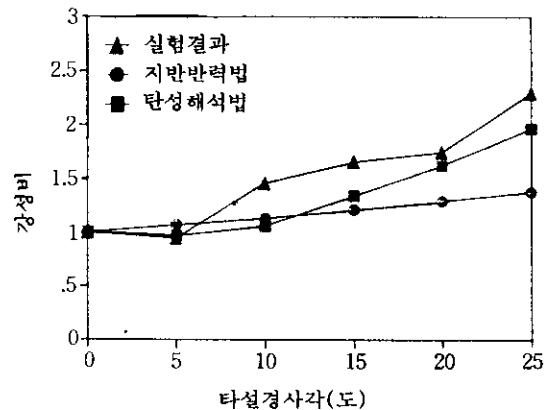


그림 8. 강성비의 변화

표 2 타설경사각에 따른 뿌리말뚝의 강성

뿌리말뚝의 강성 타설경사각	실험값(kg/cm)					지반반력법 (kg/cm)	탄성해석법 (kg/cm)
	1회	2회	3회	4회	평균값		
0°	72.46	62.50	78.74	81.30	73.75(1)	165.6(1)	80.10(1)
5°	68.97	69.44	64.52	77.52	70.11(0.95)*	177.3(1.07)	77.88(0.97)
10°	80.00	75.19	108.70	166.67	107.64(1.46)	187.3(1.13)	84.72(1.06)
15°	93.46	113.64	104.17	178.57	122.46(1.66)	200.0(1.21)	107.68(1.34)
20°	126.58	153.85	156.25	79.37	129.01(1.75)	213.7(1.29)	129.94(1.62)
25°	172.41	172.41	140.85	192.31	169.50(2.30)	228.8(1.38)	157.58(1.97)

* : 괄호 안의 값은 타설경사각 0°일때의 강성에 대한 각각의 타설경사각에서의 강성의 비율 나타낸다.

상관계수가 0.97 이상되는 하중 및 횡방향변위까지로 하였다.

지반반력법의 입력값으로서의 뿌리말뚝의 압축강성과 횡방향강성을 비교하면 압축강성이 크다. 횡방향하중을 받는 뿌리말뚝은 타설경사각이 증가할수록 축력으로 부담하는 하중분담량도 많게 되는데 이 경우 압축강성이 횡방향강성보다 크면 뿌리말뚝의 횡방향강성도 커지게 된다. 따라서 표 2에 나타나 있듯이 지반반력법에 의한 강성은 타설경사각이 커질수록 증대되는 경향을 나타낸다. 탄성해석법의 입력값인 모형말뚝의 압축강성 또한 횡방향강성에 비하여 그 값이 커서 뿌리말뚝의 강성증대가 예상되며 아울러 타설경사각의 증가에 따른 말뚝 사이의 상호작용효과의 감소로 인한 강성증대도 생기게 된다. 표 2의 탄성해석법에 의한 강성값도 타설경사각이 증가함에 따라 커지는 경향을 나타낸다. 표 2를 통해 볼 때 실험결과에 의한 강성의 크기는 탄성해석법의 결과와 유사함을 알 수 있고 말뚝의 경사배치에 따른 저항력증대효과의 변화양상을 나타낸다고 볼 수 있는, 타설경사각에 따른 강성비의 변화양상도 탄성해석법의 결과가 지반반력법의 결과보다 실험결과와 유사함을 알 수 있다.

3.2.2 비선형해석 및 결과

지반반력법을 이용하여 외말뚝의 하중-변위의 비선형 관계를 고려한 뿌리말뚝해석을 실시

하였다. 뿌리말뚝의 비선형해석을 위해서는 뿌리말뚝을 구성하는 각각의 말뚝에 있어서 하중-변위에 대한 비선형관계가 필요하게 된다.

압축력을 받는 뿌리말뚝에 대한 축방향하중-침하량의 비선형관계는 Vijayvergiya(1972)가 제안한 q-z 곡선 및 t-z 곡선을 이용하여 구하였는데 q-z 곡선은 식 (1)과 같다.(Coyle and Reese, 1966)(Vijayvergiya and Focht, 1972)

$$q = \left(\frac{z_p}{z_{max}} \right)^{1/3} q_{max}, \quad z_p \leq z_{max} \quad (1)$$

식 (1)에서 q는 말뚝선단변위 δ_p 에 대응하는 선단지지력을 나타내며 단위는 응력단위이다. z_p 와 z_{max} 는 각각 말뚝선단변위와 극한 선단지지력에 대응하는 말뚝선단변위를 나타내며 단위는 길이단위이고 q_{max} 는 극한 선단지지력을 나타내는 것으로 단위는 응력단위이다.

식 (1)에서 극한 선단지지력에 대응하는 말뚝선단변위 z_{max} 값은 뿌리말뚝 직경의 30%에 해당하는 0.2cm로 하였다. t-z 곡선은 다음의 식 (2)와 같다.

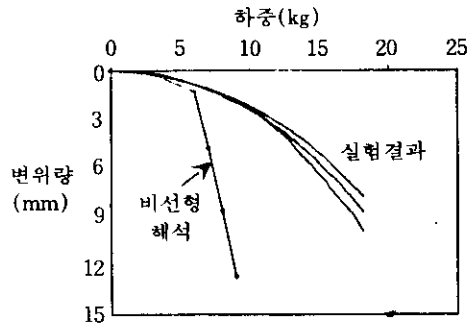
$$t/t_{max} = 2\sqrt{z/z_{max}} - z/z_{max} \quad (2)$$

식 (2)에서 t는 말뚝주면 변위 z가 발생할 때의 전단응력을 나타내고 z_{max} 는 최대 주면마찰력을 발휘하는데 필요한 말뚝주면변위를, 그리고 t_{max} 는 극한주면마찰력을 나타낸다. 식 (2)에서 z_{max} 는 Vijayvergiya에 의한 추천값 0.5cm로

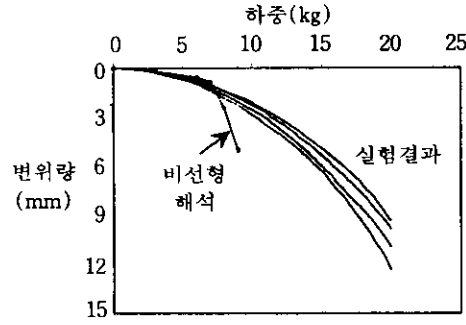
하였다.

횡방향하중-횡방향변위의 비선형관계는 무차원해를 이용하여 구한 횡방향변위와 뿌리말뚝에 대하여 작성한 p-y 곡선과의 적합조건을 만족하도록 하여 구하였다.(Matlock and Reese, 1962)(Prakash and Sharma, 1990)

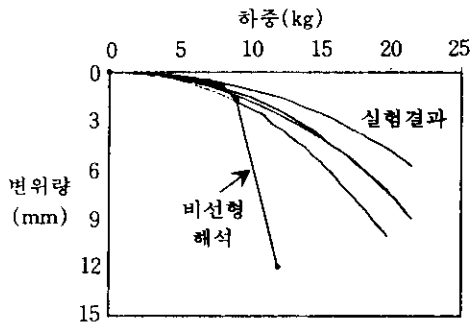
(Reese, 1970)(Reese and Francis, 1974)(Reese, 1977) 뿌리말뚝에 대한 비선형 하중-변위관계를 이용하여 구한 그물식 뿌리말뚝의 하중-횡방향변위관계 및 실험을 통해 얻은 하중-횡방향변위관계를 그림으로 나타내면 그림 9와 같다.



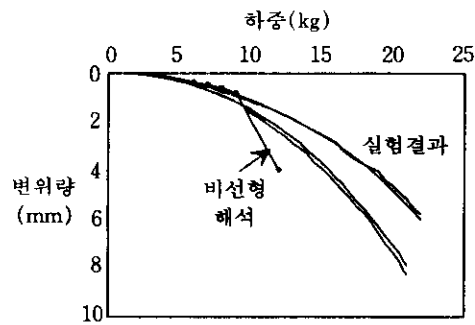
(a) 타설경사각 0°



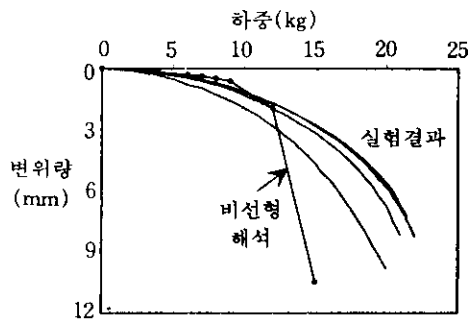
(b) 타설경사각 5°



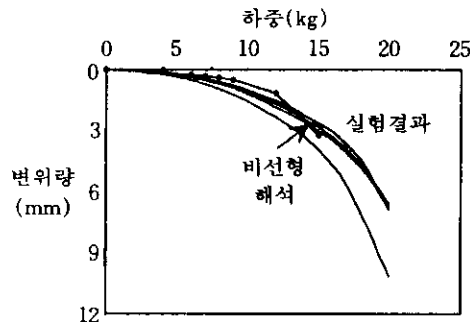
(c) 타설경사각 10°



(d) 타설경사각 15°



(e) 타설경사각 20°



(f) 타설경사각 25°

그림 9. 실험결과 및 비선형해석에 의한 하중-횡방향변위

그림 9를 통해 볼 때 타설경사각이 커질수록 실험을 통해 구한 하중-횡방향변위의 관계와 해석적 방법에 의해 구한 하중-횡방향변위의 관계가 유사해짐을 알 수 있으며 항복하중 이전의 하중범위 내에서는 대체로 좋은 비교를 보임을 알 수 있다.

4. 결론 및 향후 연구과제

본 실험연구는 말뚝 타설경사각에 따른 그물식 뿌리말뚝의 횡방향하중 저항능력의 변화를 알아보기 위한 것으로 모형 그물식 뿌리말뚝에 대하여 횡방향 재하시험을 하였다. 실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 횡방향하중을 받는 뿌리말뚝 실험을 통해 얻은 하중-변위곡선으로 판단해 볼 때 하중-변위관계가 선형성을 유지하는 정도의 횡방향변위(1mm)내에서는 타설경사각이 커질수록 횡방향저항력도 커지며 그 이후로는 횡방향변위가 증가함에 따라 횡방향 저항력이 최대가 되는 최적 타설경사각이 차차 감소하여 6mm의 횡방향변위에서는 17.5°정도에 이른다.
- 2) 타설경사각 0°일 때의 횡방향저항력에 대한 최적 타설경사각에서의 횡방향저항력의 비는 횡방향변위가 증가할수록 감소하므로 횡방향변위가 커질수록 말뚝을 경사지게 배치함으로써 얻는 저항력 증대효과는 줄어들 것으로 예상된다.
- 3) 뿌리말뚝의 하중-변위관계를 해석적 방법으로 유추하여 실험에서 얻은 하중-변위 곡선과 비교해 본 결과, 항복하중 이전의 하중범위 내에서는 대체로 좋은 비교를 보였다. 따라서, 이 논문에서 사용한 해석적 방법으로 현장 뿌리말뚝의 변형거동을 탄성영역내에는 합리적으로 모사할 수 있다고 판단된다.
- 4) 본 실험은 그물식 뿌리말뚝의 하중 지지력을 최대화 하는 타설경사각을 알아 보기 위하여 수행하였으며 이외에도 수평방

향 회전각, 근입비, 상대밀도 그리고 말뚝 중심간격등의 변화에 따른 뿌리말뚝 거동에 대한 연구가 필요하며, 궁극적으로는 크기효과를 규명하기 위한 현장시험도 해 보아야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 이 승 현 (1997), 그물식 뿌리말뚝의 최적 타설 경사각, 서울대, 박사학위 논문.
2. Bowles(1988), *Foundation Analysis and Design*, McGraw-Hill Book Company. pp. 848~857
3. Coyle, Harry M. and Lymon C. Reese(1966), "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 92, No. SM2, Proc. Paper 4702, March, pp. 1-26
4. Lizzi, F.(1964). "Root Pattern Piles Underpinning", In *Symposium on Bearing Capacity of Piles*, Roorkee, India.
5. Matlock, Hudson. and Lymon C. Reese (1962), "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles", *Transaction, ASCE*, Vol. 127, Part I, pp. 1220~1251
6. Prakash Shamsher and Hari D. Sharma (1990), *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Wiley & Sons. pp. 307~311
7. Randolph, M. F. and C. Peter Wroth(1979), "An Analysis of the Vertical Deformation of Pile Groups", *Geotechnique* 29, No. 4, pp. 423-439
8. Reese, Lymon C.(1970), "Generalized Analysis of Pile Foundations", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM1, January, pp.235-249
9. Reese, Lymon C. and Cox, William R., Koop, Francis D.(1974), "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand", *Offshore Technology Conference 6200 North Central Expressway, Dallas, Texas 75206*
10. Reese, Lymon C.(1977), "Laterally Loaded Piles: Program Documentation", *Journal of*

- the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT4, April, pp.287-305
11. Sands, M. J.(1992), Piling : European Practice and Worldwide Trends, Institution of Civil Engineers, pp.137~141
 12. Thorburn, S. and Littlejohn, G. S.(1993), Underpinning and Retention, Blackie Academic & Professional, 2nd edition., pp.84~156.
 13. Vesi, A. S.(1977), "Design of Pile Foundation", Transportation Research Board., pp.12~22.
 14. Vijayvergiya, V. N., and Focht, J. A. Jr. (1972), "A New Way to Predict Capacity of Piles in Clay", Offshore Technology Conference Paper 1718, Fourth Offshore Technology Conference, Houston, Texas

(접수일자 1997. 1. 4)