

압축 및 인발하중을 받는 그물식 뿌리말뚝의 최적 타설경사각

An Optimum Slanting Angle in Reticulated Root Piles Installation
under Compressive and Uplift Loads

이 승 현*¹

Lee, Seung-Hyun

김 명 모*²

Kim, Myoung-Mo

Abstract

In order to investigate the influence of slanting angle of reticulated root piles(RRP) on their bearing capacities, model tests of compressive and uplift loads on RRP with different slanting angles, which were installed in sandy soils with a relative density of 47%, were carried out. Each pile which is made of a steel bar of 5mm in diameter and 300mm in length, is coated with sand to be 6.5mm in diameter. One set of RRP consists of 8 piles which are installed in circular patterns forming two concentric circles, each of which has 4 piles. Slanting angles of RRP for load tests are 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, and 25°. In addition, compressive load tests on circular footing whose diameter is the same as the outer circle of RRP were carried out.

Test results show that maximum load bearing capacities of RRP by regression analysis are obtained at about 12° and 13° of slanting angles for compressive and uplift load tests, respectively. Maximum compressive bearing capacity is estimated to be 13% bigger than that of the vertical RRP and 95% bigger than that of surface footing. Maximum uplift capacity is estimated to be 21% bigger than that of the vertical RRP. And it can be appreciated that increasing the slanting angle makes the load-Settlement behavior more ductile.

요 지

본 연구에서는 여러가지의 타설경사각을 갖는 모형 그물식 뿌리말뚝을 제작하여 모형토조에

*¹ 정회원, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*² 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

설치하고 레이닝(raining)방법으로 지반을 조성한 다음 압축시험 및 인발시험을 하여 그물식 뿌리말뚝의 타설경사각과 하중지지력 사이의 관계를 비교분석 하였다. 모형말뚝은 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 그리고 25°의 타설경사각을 갖는 직경 5mm의 강봉에 모래를 입힌 것으로 직경이 6.5mm, 길이가 300mm가 되도록 하였다. 모형 뿌리말뚝의 배치는 동일한 타설경사각을 갖는 8개의 모형 말뚝을 4개씩 2개의 크고 작은 동심원에 접하도록 하였다. 그리고 모형 원형 얇은 기초를 제작하여 압축시험을 수행한 다음 지지력을 구하여 뿌리말뚝의 지지력과 비교하였다.

압축시험 및 인발시험 결과를 회귀분석하면 하중지지능력이 최대가 되는 타설경사각은 대략 12°~13°사이이다. 최적 타설경사각에서의 뿌리말뚝의 압축지지력은 원형 얇은기초의 지지력과 비교하면 약 2.0배이고, 연직으로 타설된 뿌리말뚝의 경우와 비교하면 13%의 지지력 증대효과가 있다. 그리고 최적타설경사각에서의 뿌리말뚝의 인발저항력은 연직으로 타설된 뿌리말뚝의 경우에 비해 21%의 인발저항력 증대효과가 있다. 압축시험으로부터 얻은 하중-침하량곡선은 타설 경사각이 없는 경우에 전반전단파괴 형태를 나타내며, 타설경사각이 5°, 10°인 경우, 하중은 극한 지지력에 도달한 후 일정한 값을 유지하는 양상을 보인다. 타설경사각이 15°, 20°, 25°로 증가하면서 하중은 극한지지력에 도달한 후에도 계속 증가하는 경향이 있다. 따라서, 타설경사각이 있는 경우의 뿌리말뚝은 압축지지력을 초과하여 하중을 받더라도 급격한 파괴에 이르지 않고 점차로 변위가 증가하는 연성(ductile)거동을 보일 것으로 예상된다.

Keywords : Slanting Angle, Reticulated Root Pile, Bearing Capacity, Compressive Test, Uplift Test, Circular Shallow Footing, General Shear Failure, Ductile Behavior

1. 서론

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

그물식 뿌리말뚝 공법은 굴착기의 발달로 인해 모든 종류의 흙에 적용 가능하며, 불안정한 지반에서도 부가적인 응력을 주지 않고 시공이 가능하고, 소형 보링 기계를 사용하므로 작업 공간에 제약을 받지 않는다. 또한 시공중

소음이나 진동 등의 공해가 없는 특징이 있다.

그러나, 이런 장점들에도 불구하고 RRP를 이용한 지반보강 및 기초의 설치 방법에 대한 역학적 특성이 아직 명확히 밝혀지지 않고 있으며, 뿌리말뚝의 직경, 길이, 설치간격, 설치 방향 등에 대한 기준이 없고, 실제 또한 경험에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 깊은 기초로 작용하는 모형 뿌리말뚝에 대하여, 타설경사각을 변화시켜 압축 및 인발시험을 실시하고, 타설경사각과 각 하중 지지력 사이의 관계를 비교분석하여 최적 타설경사각을 제시하는데 있다.

2. 모형실험 계획 및 장치

본 모형실험에서는 뿌리말뚝의 무리효과를 연구한 Lizzi의 실험(Thorburn and Littlejohn, 1993)에 착안하여 8개로 구성된 모형 그

물식 뿌리말뚝을 그 타설경사각을 변화시켜가며 압축 및 인발시험을 실시하였고 압축시험결과와 비교할 목적으로 모형 원형 얇은 기초를 제작하여 압축시험을 하였다. 압축 및 인발시험에 사용한 모형말뚝은 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 그리고 25°의 타설경사각을 갖는 직경 5mm의 강봉에 모래를 입힌 것으로 직경이 6.5mm, 길이가 300mm가 되도록 하였다. 동일한 타설경사각을 갖는 8개의 모형말뚝을 4개씩 2개의 크고 작은 동심원에 접하도록 배치하였는데 각 동심원에 접하는 4개의 말뚝은 평면상에서 보았을 때 인접 모형말뚝머리의 중심을 지나도록 하였으며 안쪽 동심원상의 말뚝과 바깥쪽 동심원상의 말뚝들의 배치방향은 서로 엇갈리도록 하였다(이승현, 1995). 모형 원형 얇은 기초는 바깥쪽 동심원에 외접한 말뚝머리의 최외단을 포함하도록 직경을 94mm로 하여 제작하였다. 캡핑된 모형 뿌리말뚝과 뿌리말뚝의 형상은 그림 1, 2와 같다. 그림 2에서 α 는 타설경사각을 나타낸다.

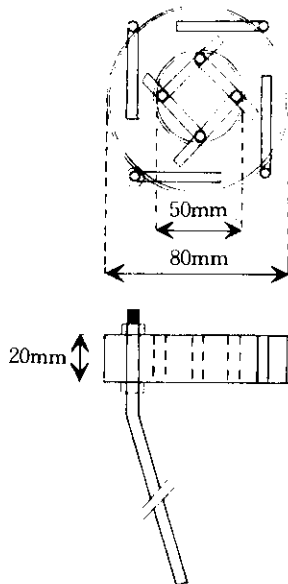


그림 1. 캡핑된 모형 뿌리말뚝의 개략도

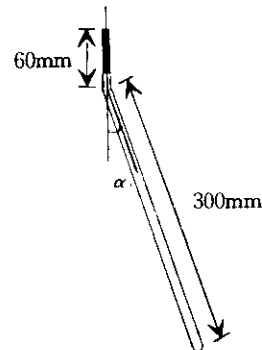


그림 2. 뿌리말뚝의 형상

모형지반은 비중이 2.66, 상대밀도가 47%, 내부마찰각이 35°, 균등계수가 1.93인 모래지반으로 모형그물썩 뿌리말뚝을 토조 중앙에 설치한 다음 토조 위 1.4m의 높이에 설치한 직경 5mm인 체를 통하여 낙하시켜 조성하였다(이원택, 1991). 토조의 재원은 폭이 1m, 길이가 2m, 높이가 2.5m이다.

압축 및 인발시험에 사용한 실험장치는 그림 3 및 그림 4와 같다. 실험순서는 압축시험의 경우, 형성된 모형지반의 지반면 위에 돌출해 있는 뿌리말뚝 위에 재하판을 놓고 침하 측정기와 하중 측정장치를 설치한 다음 유압잭으로 하중을 가하여 하중-침하량 곡선을 얻은 순으로 하였으며 인발시험의 경우도 압축시험의 경우와 마찬가지로 지반면 위에 돌출해 있는 뿌리말뚝에 인발장치와 인발량 측정기 및 하중 측정장치를 설치하고 유압잭으로 하중을 상향으로 가하여 하중-인발량 곡선을 얻는 순으로 하였다.

실험계획을 표로 나타내면 표1과 같으며 추가로 모형 원형 얇은기초에 대해서도 4회 압축 시험을 실시하여 하중-침하량곡선을 얻었다.

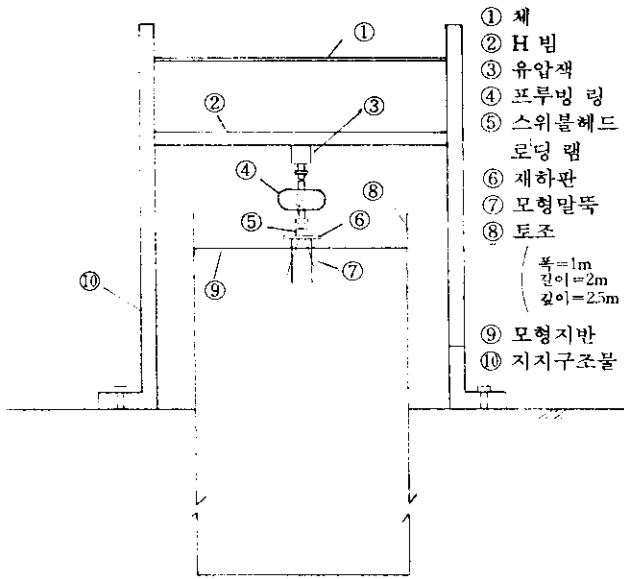


그림 3. 압축시험장치

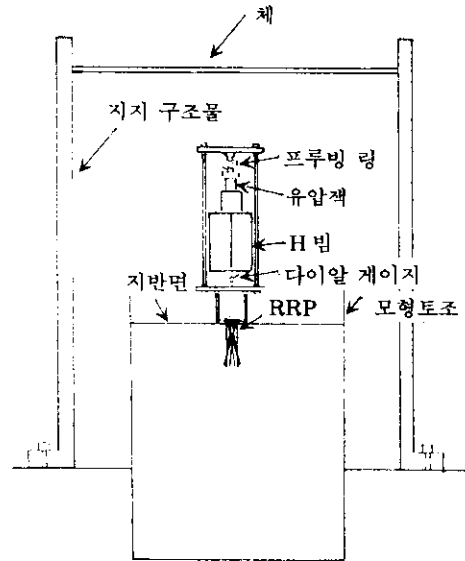


그림 4. 인발시험장치

표 1. 실험 계획

실험종류 및 실험순서	압축시험							인발시험					
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	모형 원형 얕은 기초	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th
타설경사각	0°	5°	10°	15°	20°	25°	—	0°	5°	10°	15°	20°	25°
실험회수	4회	4회	4회	4회	4회	4회	4회	4회	4회	4회	4회	4회	4회

3. 실험결과 및 분석

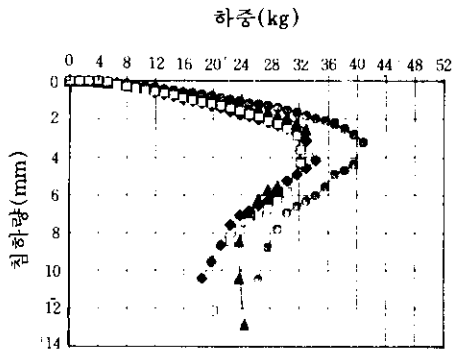
3.1 압축시험 결과

3.1.1 말뚝 타설경사각과 압축지지력

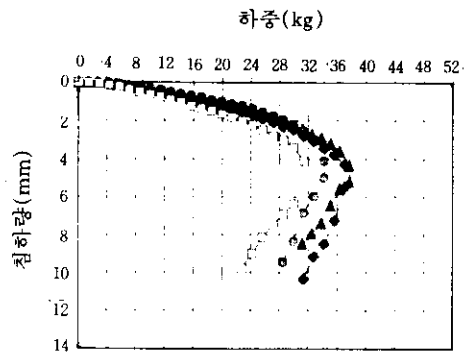
각 타설경사각에 대한 하중-침하량곡선은 그림 5와 같으며 원형 얕은기초에 대한 하중-침하량곡선은 그림 6과 같다. 그림 7에는 각 타설경사각에서의 압축지지력을 2차 회귀분석한 결과를 나타냈으며 표2에는 말뚝 타설경사각의 변화에 따른 압축지지력 및 회귀분석에 의

한 압축지지력 그리고 원형 얕은 기초의 압축지지력이 나타나 있다. 압축지지력은 하중-침하량곡선 끝의 직선부분이 시작되는 점에서의 하중을 압축지지력으로 하는 Terzaghi/Yelinek 방법(Dieter Salden, 1980)을 이용하여 결정하였다.

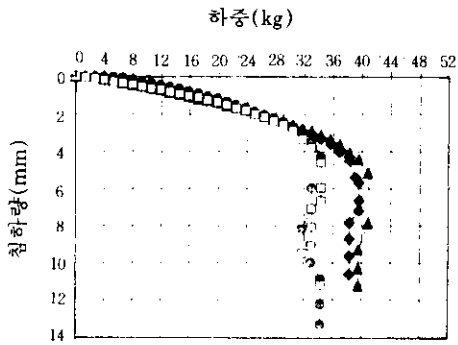
그림 7의 2차 회귀분석 결과에 의하면 타설경사각이 약 12°일 때 압축지지력이 최대가 되고 그 값은 38.57kg이다. 타설경사각이 12°인 뿌리말뚝의 압축지지력은 원형 얕은기초의 압축지지력과 비교하면 2.0배이고, 연직 뿌리말



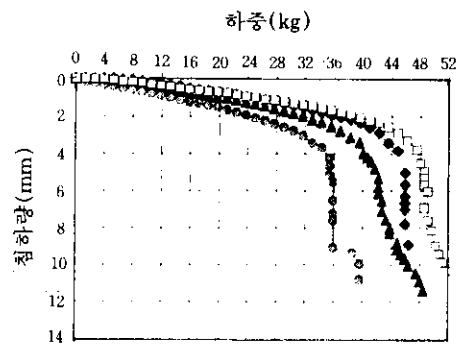
(a) 타설경사각 0°



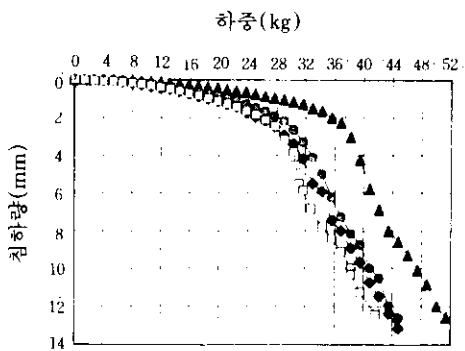
(b) 타설경사각 5°



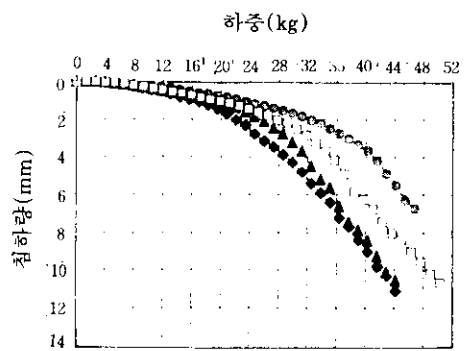
(c) 타설경사각 10°



(d) 타설경사각 15°



(e) 타설경사각 20°



(f) 타설경사각 25°

그림 5. 타설경사각에 따른 하중-침하량곡선

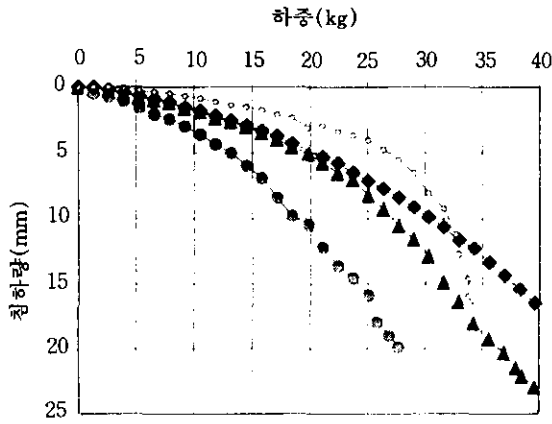


그림 6. 모형 원형 얽은기초에 대한 하중-침하량곡선

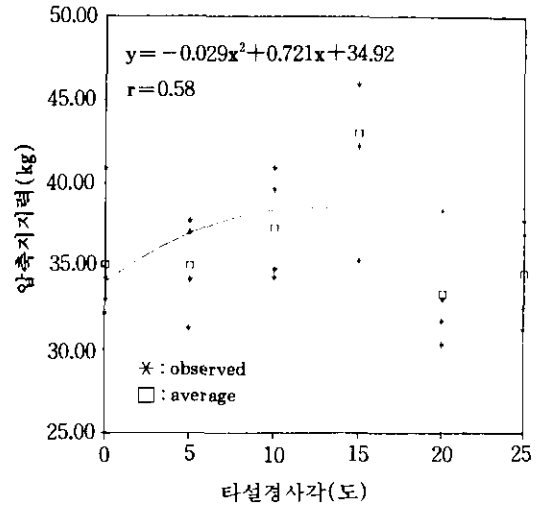


그림 7. 타설경사각에 따른 압축지지력(회귀분석)

표 2. 타설경사각의 변화에 따른 압축지지력 및 원형 얽은기초의 압축지지력

타설경사각	압축지지력(kg)				평균 압축지지력(kg)	압축지지력(kg) (회귀분석)
	1회	2회	3회	4회		
0°	32.2	34.3	40.9	33.0	35.10	34.09
5°	37.7	34.2	37.0	31.3	35.05	36.97
10°	34.3	39.6	40.9	34.3	37.28	38.40
15°	48.5	42.2	45.9	35.3	42.98	38.38
20°	31.7	33.0	38.3	30.3	33.33	36.91
25°	31.2	37.7	32.5	36.9	34.58	33.99
모형 원형 얽은 기초	23.7	25.1	17.1	13.2	19.78	-

뚝의 경우와 비교하면 13% 압축지지력 증대효과가 있다.

3.1.2 하중-침하량 곡선의 양상

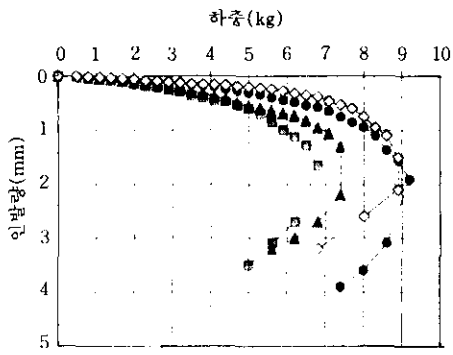
하중-침하량 곡선(그림 5)에서 보는 바와 같이 타설경사각이 0°, 5°인 경우, 하중-침하량 곡선은 전반 전단파괴의 형태를 나타내며, 타설경사각이 10°인 경우, 하중은 압축지지력에 도달한 후 일정한 값을 유지하는 양상을 보인다. 타설경사각이 15°, 20°, 25°로 증가하면서 하중은 압축지지력에 도달한 후에도 계속 증가하는 경향이 있다. 따라서 말뚝에 타설경사각

이 있는 경우에는 압축지지력을 초과하여 하중을 받더라도 급격한 파괴에 이르지 않고 점차로 변위가 증가하는 연성(ductile)거동을 보일 것으로 예상된다.

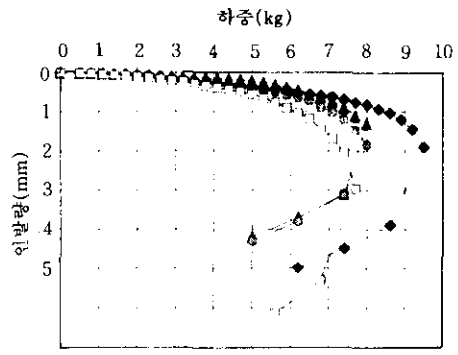
3.2 인발시험 결과

3.2.1 말뚝 타설경사각과 인발저항력

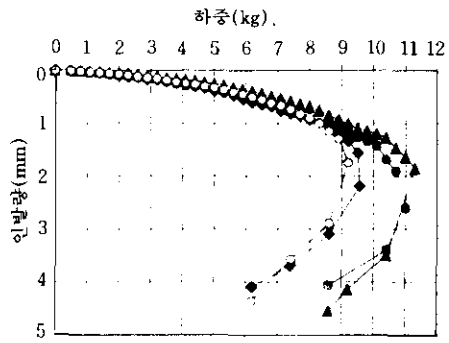
각 타설경사각에 대한 하중-인발량곡선은 그림 8과 같다. 그림 9는 각 타설경사각에서의 인발저항력을 2차 회귀분석한 결과를 나타내고 있으며 표3에는 말뚝 타설경사각의 변화에



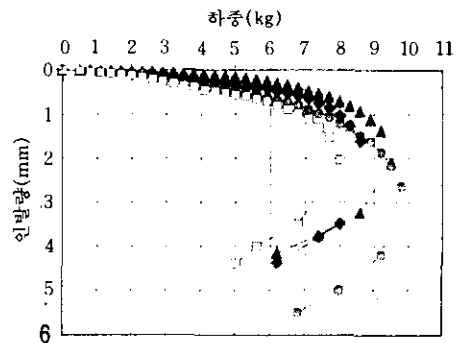
(a) 타설경사각 0°



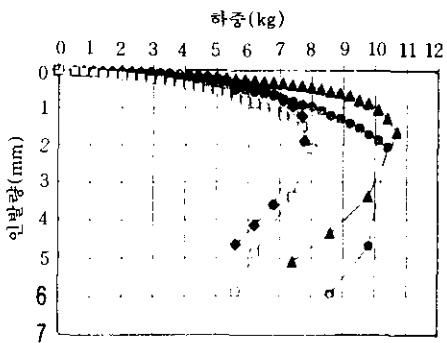
(b) 타설경사각 5°



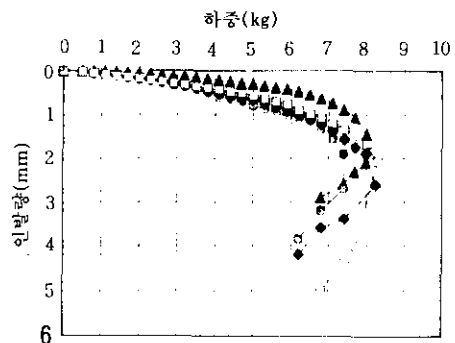
(c) 타설경사각 10°



(d) 타설경사각 15°



(e) 타설경사각 20°



(f) 타설경사각 25°

그림 8. 타설경사각에 따른 하중-인발량곡선

표 3. 타설경사각의 변화에 따른 인발저항력

타설경사각	인발저항력 (kg)				평균 인발저항력 (kg)	인발저항력 (kg) (회귀분석)
	1회	2회	3회	4회		
0°	9.2	6.8	7.4	8.9	8.08	7.89
5°	8.0	8.0	9.5	7.7	8.30	8.93
10°	11.0	9.6	11.3	9.2	10.27	9.48
15°	9.5	9.8	8.6	8.0	8.98	9.52
20°	8.0	7.8	10.4	10.7	9.22	9.07
25°	8.0	7.4	8.2	8.3	7.99	8.11

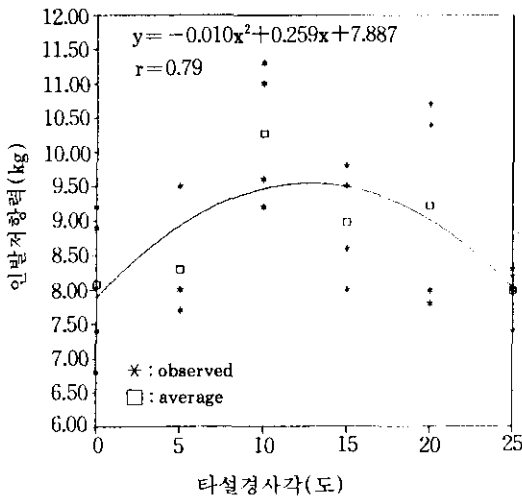


그림 9. 타설경사각에 따른 인발저항력(회귀분석)

다른 인발저항력과 2차 회귀분석에 의한 인발저항력이 나타나 있다.

그림 9의 2차 회귀분석 결과에 의하면 타설경사각이 약 13°일 때 인발저항력이 최대가 되며 그 값은 9.56kg이다. 타설경사각이 13°인 뿌리말뚝의 인발저항력은 연직 뿌리말뚝의 경우와 비교하면 21% 인발저항력 증대효과가 있다.

3.3 가상 흙-말뚝 복합체

그물식 뿌리말뚝의 그물효과에 의한 하중지

지력 증대, 미캐니즘을 알아보고자 타설경사각에 따른 흙-말뚝 복합체의 형상으로부터 말뚝 무리를 외측 4개의 말뚝무리와 내측 4개의 말뚝무리로 구분하고, 일정깊이에서 4개의 말뚝이 통과하는 점을 꼭지점으로 하는 4각형의 면적을 계산하였다. 이렇게 하여 계산한 지표면적, 말뚝선단면적, 최소면적, 최외주면의 표면적 그리고 최외주면에 의해 형성되는 부파가 표4에 나타나 있으며 그림10은 흙-말뚝 복합체의 형상을 연직면 상에 나타낸 것이다. 그림10에서 점선은 외측 말뚝무리에 의해 형성되는 흙-말뚝 복합체의 외주면을 나타내고 실선은 내측 말뚝무리에 의해 형성되는 흙-말뚝 복합체의 외주면을 나타낸다.

타설경사각이 있는 미소 무리말뚝의 압축지 지력과 인발저항력이 연직방향으로 설치된 뿌리말뚝의 지지력에 비해 크게 나타나는 것은 말뚝의 경사배치에 따른 그물효과에 기인하며 이 그물효과는 내외측 무리말뚝에 의해 형성되는 흙-말뚝 복합체의 형상에 영향을 받는다고 생각된다. 그물식 뿌리말뚝에 대한 압축시험 및 인발시험 결과에 의하면 두 경우 모두 하중 지지능력이 최대가 되는 타설경사각은 10°에서 15°사이인데, 압축 및 인발시험 결과를 종합적으로 검토해 볼 때 하중지지능력과 흙-말뚝 복합체의 형상 사이에서 어떤 특정한 관계를 찾아 보기는 어려웠다.

표 4. 지표에서부터 깊이에 따른 각 면적과 부피

깊이에 따른 면적		타설 경사각(α)						
		0°	5°	10°	15°	20°	25°	
지표	외측무리면적(cm^2)	47.20	47.20	47.20	47.20	47.20	47.20	
	내측무리면적(cm^2)	11.09	11.09	11.09	11.09	11.09	11.09	
말뚝선단	외측	선단깊이(cm)	30.00	29.80	29.54	28.98	28.19	27.20
		면적(cm^2)	47.20	23.73	32.49	66.91	125.99	198.42
	내측	선단깊이(cm)	30.00	29.80	29.54	28.98	28.19	27.20
		면적(cm^2)	11.09	10.63	35.52	88.17	164.86	246.25
최소면적	외측	발생깊이(cm)	깊이에 따라 동일	29.80	15.82	10.41	7.67	5.97
		면적(cm^2)	47.20	23.73	23.60	23.60	23.60	23.60
	내측	발생깊이(cm)	깊이에 따라 동일	11.66	5.78	3.81	2.80	2.19
		면적(cm^2)	11.09	5.54	5.54	5.54	5.54	5.54
최외주면의 표면적(cm^2)		824.40	699.70	664.64	776.15	891.04	999.12	
최외주면에 의해 형성되는 부피(cm^3)		1415.91	1036.73	943.07	1344.58	1918.03	2593.07	

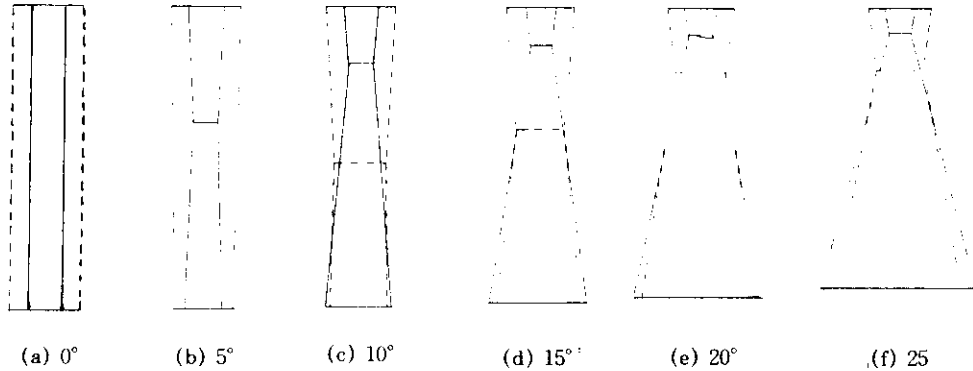


그림 10. 흙-말뚝 복합체의 형상

3.4 실험값과 기존의 말뚝지지력 산정방법에 의한 값의 비교

Poulos(1980)는 실제적으로 적용되는 말뚝 경사각의 범위에 대하여 극한 말뚝 축방향하중과 말뚝축에 수직인 방향으로의 극한 수직하중은 말뚝축에 대한 지표면의 경사에 의해 크게

영향을 받지 않는다고 가정할 수 있다 하였다. 이에 따라 기존의 말뚝지지력 산정방법을 사용하여 외말뚝의 압축지지력 및 인발 저항력 산정시 그림 11과 같이 연직 하중을 받는 경사말뚝의 경우(그림 11(a))와 경사하중을 받는 연직말뚝의 경우(그림 11(b))를 동일한 문제로 보았다.

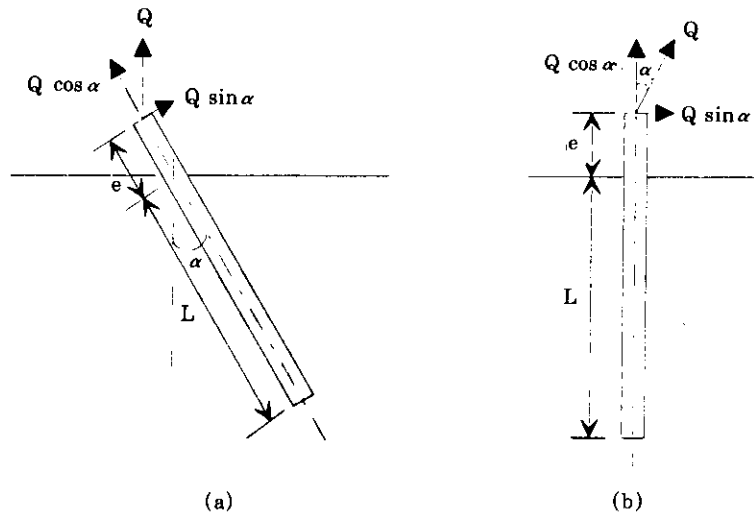


그림 11. 등가문제

편의상 압축의 경우 그림 11(b)에서의 경사 하중(Q)에 의한 지지력을 압축지지력, 경사하중의 연직성분($Q \cos \alpha$)에 의한 지지력을 연직 압축지지력, 경사하중의 수평성분($Q \sin \alpha$)에 의한 지지력을 수평지지력이라고 하였으며 인발의 경우도 압축의 경우와 마찬가지로 그림 11(b)에서의 경사하중(Q)에 의한 저항력을 인발저항력, 경사하중의 연직성분($Q \cos \alpha$)에 의한 저항력을 연직 인발저항력, 경사하중의 수평성분($Q \sin \alpha$)에 의한 지지력을 수평지지력이라고 하였다.

그리고 사질토의 경우, 수평하중에 의한 축방향 지지력의 증가에 대한 많은 논의가 있어 왔으나 케이슨 형태의 말뚝을 제외하고는 수평하중에 의한 축방향 지지력의 증가가 거의 없음이 실험적으로 입증되었다고 한다(W.G.K Fleming et al., 1985). 또한 대부분의 말뚝의 경우, 축방향 지지력에 미치는 수평하중의 영향은 말뚝 상부에서 말뚝지름의 수배만큼만 미치며 작은 수평하중에 대해서는 말뚝 전면에서의 수직응력의 증가가 말뚝 배면에서의 수직응력의 감소에 의해 부분적으로 상쇄된다고 생각할 수 있으므로 연직 인발저항력과 수평지지력

산정시 두개의 지지력을 독립적으로 산정하였다.

압축의 경우, 수평지지력은 Broms(1965)방법을 사용하여 계산하였고 연직 압축지지력은 Vesic(1977)방법, Meyerhof(1976)방법, Meyerhof and Ranjan(1972)방법, NAVFAC DM-7(1982)방법을 사용하여 계산하였다(Bowles, 1988; Das, 1990; Prakash, 1990). Meyerhof and Ranjan 방법은 연직압축지지력과 수평지지력에 의한 압축지지력 크기를 비교하여 압축지지력을 구하는 방법이 아니라 반경험식을 통하여 압축지지력을 구하는 방법이다. 인발의 경우, 수평지지력은 압축의 경우와 마찬가지로 Broms 방법을 사용하여 계산하였고 연직 인발저항력은 Vesic 방법, Meyerhof 방법, Das and Seeley 방법(1982), NAVFACDM-7방법으로 계산하였다(Bowles, 1988; Das, 1990; Prakash, 1990). 기존의 말뚝지지력 산정공식을 사용하여 연직 인발저항력을 계산할 경우는 극한 주변마찰력을 2/3배한 값을 연직 인발저항력으로 하였다(Poulos, 1980).

실험값과 기존의 말뚝지지력 산정방법에 의한 값을 비교한 것이 표 5, 표 6에 나타나 있다.

표 5. 실험값과 기존의 압축지지력 공식에 의한 값의 비교

기존의 방법 및 실험결과		타설경사각(α)		0°		5°		10°		15°		20°		25°	
		외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계
연직 압축지지력에 의한 압축지지력 (kg)	Vesić	2.59	20.72	2.60	20.8	2.63	21.04	2.68	21.44	2.76	22.08	2.86	22.88		
	Meyerhof	0.37	2.96	0.37	2.96	0.38	3.04	0.38	3.04	0.39	3.12	0.41	3.28		
	Meyerhof and Ranjan	0.68	5.44	0.68	5.44	0.69	5.52	0.70	5.6	0.71	5.68	0.73	5.84		
	NAVFAC DM-7	0.62	4.96	0.62	4.96	0.63	5.04	0.64	5.12	0.66	5.28	0.68	5.44		
수평지지력에 의한 압축 지지력(kg)	Broms	-		43.14	345.12	21.65	173.2	14.53	116.24	10.99	87.92	8.90	71.2		
실험결과(kg)		35.1		35.05		37.28		42.98		33.33		34.58			

표 6. 기존의 방법과 실험결과를 통한 인발저항력의 비교

기존의 방법 및 실험결과		타설경사각(α)		0°		5°		10°		15°		20°		25°	
		외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계
연직 인발저항력에 의한 인발저항력 (kg)	Vesić	1.21	9.68	1.21	9.68	1.23	9.84	1.25	10.00	1.29	10.32	1.34	10.72		
	Meyerhof	0.13	1.04	0.13	1.04	0.13	1.04	0.13	1.08	0.14	1.11	0.14	1.12		
	Das and Seeley	0.71	5.68	0.71	5.68	0.72	5.77	0.74	5.88	0.76	6.04	0.78	6.24		
	NAVFAC DM-7	0.26	2.08	0.26	2.08	0.26	2.08	0.27	2.16	0.28	2.24	0.29	2.32		
수평지지력에 의한 인발 저항력(kg)	Broms	-		43.14	345.12	21.65	173.2	14.53	116.24	10.99	87.92	8.90	71.2		
블럭과괴에 의한 인발 저항력(kg)	75° 방법	10.87		-		-		-		-		-			
	NAVFAC CM-7	10.11		-		-		-		-		-			
실험결과(kg)		8.08		8.30		10.27		8.98		9.22		7.99			

표 5에는 수평지지력 및 연직 압축지지력에 경사각(α)을 고려한 압축지지력이 나타나 있으며 표6에는 수평지지력 및 연직 인발저항력에 경사각(α)을 고려한 인발저항력이 나타나 있다. 수평지지력에 의한 압축지지력 및 인발저항력을 연직 압축지지력과 연직 인발저항력에 의한 압축지지력 및 인발저항력과 비교하여 보면 그물식 뿌리말뚝의 파괴는 압축의 경우는

연직 압축력에 의해 일어나고 인발의 경우는 연직 인발력에 의해 일어남을 알 수 있다. 외말뚝의 합으로 그물식 뿌리말뚝의 압축지지력을 계산하는 경우에는 무리효과를 고려하지 않았으며 인발의 경우, 타설경사각 0°인 그물식 뿌리말뚝의 블럭과괴에 따른 인발저항력은, 그물식 뿌리말뚝의 외주면의 선단면 양끝점으로부터 수평면에 대해 75°의 각도(75°-방법)

(Prakash, 1990)와 연직길이와 수평길이의 비가 4:1이 되는 각도로 상향으로 선을 그어 형성되는 사각뿔대의 부피에 해당하는 흙블럭의 중량으로 구하였다(NAVFAC DM-7.2).

압축 및 인발시험을 통하여 얻은 값들을 회귀분석한 결과에 의하면 타설경사각 $12^{\circ} \sim 13^{\circ}$ 에서의 하중 지지력을 최대값으로 하여 $12^{\circ} \sim 13^{\circ}$ 보다 작고 큰 타설경사각에서는 압축지지력 및 인발저항력이 감소하는 경향을 보인다. 그러나 표5와 표6에도 나타나 있듯이 기존의 방법을 통하여 외말뚝의 지지력을 산정하고 그 합으로 그물식 뿌리말뚝의 지지력을 계산하는 경우, 압축지지력 및 인발저항력은 타설경사각이 증가함에 따라 그 값들도 증가함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 언급한 기존의 말뚝 지지력 산정방법으로 뿌리말뚝의 하중 지지력을 예측하는 것은 그물식 뿌리말뚝의 그물효과로 표현되는 복잡한 하중지지 미커니즘을 고려해 볼 때 무리가 있음을 알 수 있다.

4. 결론 및 연구과제

본 실험연구는 말뚝 타설경사각에 따른 그물식 뿌리말뚝의 하중 지지력 변화를 알아보기 위한 것으로 모형 그물식 뿌리말뚝에 대하여 압축시험 및 인발시험을 하였다. 실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 압축하중을 받는 그물식 뿌리말뚝의 실험 결과와 인발하중을 받는 그물식 뿌리말뚝의 실험결과가 정확히 일치하는 것은 아니지만 대체적인 경향은 동일하다고 볼 수 있다. 두가지 실험결과 및 회귀분석결과를 종합하여 보면 뿌리말뚝이 압축 또는 인장을 받는 경우 타설경사각이 대략 $12^{\circ} \sim 13^{\circ}$ 일 때 하중지지능력이 가장 크며 그 값들은 연직 그물식 뿌리말뚝의 하중 지지력에 비해 각각 13%, 21% 큰 값을 나타낸다.
- 2) 압축시험으로부터 얻은 하중-침하량곡선은 타설경사각이 없는 경우에 전반전단

파괴(general shear failure) 형태를 나타내고 타설경사각이 있는 경우에는 국부전단파괴(local shear failure) 형태를 나타낸다. 따라서 타설경사각이 있는 경우의 뿌리말뚝은, 압축지지력을 초과하여 하중을 받더라도 급격한 파괴에 이르지 않고 점차로 변위가 증가하는 연성(ductile)거동을 보일 것으로 예상된다.

- 3) 압축 및 인발시험 결과를 종합해 볼 때, 뿌리말뚝의 타설경사각에 따른 하중지지능력의 변화와 흙-말뚝 복합체의 형상 사이에 어떤 특정한 관계를 찾아 보기는 어렵다.
- 4) 계산에 의한 압축지지력 및 인발저항력은 타설경사각이 커질수록 크게 산정되는데, 본 실험결과로부터 판단할 때, 이 지지력 증가를 무시하는 편이 더 타당하다.
- 5) 본 실험은 그물식 뿌리말뚝의 하중 지지력을 최대로 하는 타설경사각을 알아 보기 위하여 수행하였으며 이외에도 수평방향 회전각, 근입비, 상대밀도 그리고 말뚝 중심간격 등의 변화에 따른 뿌리말뚝 거동에 대한 연구가 필요하며, 궁극적으로는 크기효과를 규명하기 위한 현장시험도 해 보아야 할 것이다.

참고 문헌

1. 이승현, 김정환, 김병일, 김명모(1995), "그물식 뿌리말뚝의 최적 타설경사각에 관한 실험 연구", 한국지반공학회지, 제11권, 제2호, pp. 29~36.
2. 이원택(1991), 얇은 기초에 있어서 그물식 뿌리말뚝의 지반 보강 효과에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대.
3. Bowles(1998), Foundation Analysis and Design, McGraw-Hill Book Company, pp.751.
4. Broms, B.B.(1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 91(SM4), pp. 123~156.
5. Das, B. M.(1990), Principles of Foundation Engineering, PWS-KENT Publishing Com-

- pany. pp.450, 480~483.
6. Dieter Salden(1980), Einfluss der Sohlenform auf die Traglast von Fundamenten, Baugrundinstitut, Stuttgart.
 7. NAVFAC DM-7.2(1982), pp. 192~195, 205
 8. Prakash Shamsheer & Hari D. Sharma(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley & Sons. pp. 223~224, 306~311, 464.
 9. Poulos, H. G. & Davis, E. H.(1980), Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley & Sons., pp. 46, 155~157.
 10. S. Thorburn & G.S. Littlejohn(1993), Underpinning and Retention, Blackie Academic & Professional, 2nd edition., pp. 84~156.
 11. Vesić, A. S.(1977), Design of Pile Foundation, Transportation Research Board., pp. 12~22.
 12. W.G.K. Fleming et al.(1985), Piling Engineering, Surrey University Press, pp. 166~169.
(접수일자 1995. 11. 25)