

그물식 뿌리말뚝의 최적 타설경사각에 관한 실험 연구

An Experimental Study on Optimum Slanting Angle in
Reticulated Root Piles Installation

이 승 현*1	김 정 환*2
Lee, Seong-Hyun	Kim, Jeong-Hwan
김 병 일*3	김 명 모*4
Kim, Byung-Il	Kim, Myoung-Mo

Abstract

Load tests are executed on model reticulated root piles (RRP) to figure out the optimum slanting angle in the piles installation. One set of model RRP consists of 8 slanting piles which are installed in circular patterns forming two concentric circles, each of which is made by 4 piles. Each pile which is a steel bar of 5mm in diameter and 300mm in length is coated to become a pile of 6.5mm in diameter. The slanting angle of the model RRP varies from 0° to 20° .

Comparing ultimate bearing capacities of the model RRP of different installation angles, it is observed that the ultimate capacities of the RRP increase as the installation angle increases until 15° , and the optimum slanting angle of the RRP is around 15° . The ultimate bearing capacity of the 15° -RRP is found to be 22% bigger than that of the vertical RRP and 120% bigger than that of the circular surface footing whose diameter is same with the circle formed by outer root piles' heads. However, it is noticed that when the slanting angle of the RRP is increased over 15° , the ultimate capacity starts to be reduced. The ultimate capacity of 20° -RRP is even smaller than that of the vertical RRP by as much as 5%.

From the observation of the load-settlement curve obtained during the RRP load tests, it is known that as the slanting angle gets bigger the load-settlement behavior becomes more ductile.

요 지

본 연구에서는 여러 가지의 타설경사각을 갖는 모형 그물식 뿌리말뚝을 제작하여 모형토조에 설치하고 레이닝(raining)방법으로 지반을 조성한 다음 재하시험을 하여 그물식 뿌리말뚝의 타

*1 정희원, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*2 정희원, 서울대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*3 정희원, 명지대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*4 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

설경사각과 극한지지력 사이의 관계를 비교분석 하였다. 모형말뚝은 0°, 10°, 15°, 20°의 타설경사각을 갖는 직경 5mm의 강봉에 모래를 입힌 것으로 직경이 6.5mm, 길이가 300mm가 되도록 하였다. 그리고, 모형 원형 얇은기초를 제작하여 재하시험을 수행한 다음 극한지지력을 구해 뿌리말뚝의 극한지지력과 비교하였다.

실험결과 타설경사각이 15°일 때 극한지지력이 최대가 되었다. 타설경사각이 15°인 뿌리말뚝의 극한지지력은 원형 얇은기초의 극한지지력과 비교하면 2.2배이고, 연직으로 타설된 뿌리말뚝의 경우와 비교하면 22%의 극한지지력 증가효과가 있었다. 반면에 타설경사각이 20°인 경우의 극한지지력은 연직 뿌리말뚝의 극한지지력보다 5% 감소된 값을 가짐을 알 수 있었다. 하중-침하량곡선은 타설경사각이 없는 경우에 전반전단파괴 형태를 나타내며, 타설경사각이 10°인 경우, 하중은 극한지지력에 도달한 후 일정한 값을 유지하는 양상을 보인다. 타설경사각이 15°, 20°로 증가하면서 하중은 극한지지력에 도달한 후에도 계속 증가하는 경향이 있다. 따라서, 타설경사각이 있는 경우의 뿌리말뚝은, 극한지지력을 초과하여 하중을 받더라도 급격한 파괴에 이르지 않고 점차로 변위가 증가하는 연성(ductile)거동을 보일 것으로 예상된다.

1. 서론

그물식 뿌리말뚝(reticulated root pile)은 중심에 보강재가 들어있는 직경 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, 옹벽, 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 제약을 받지 않는다. 또한 시공중 소음이나 진동 등의 공해가 없는 특징이 있다.⁽¹⁾

그러나, 이런 장점들에도 불구하고 R.R.P.를 이용한 지반 보강 및 기초의 설치 방법에 대한 역학적 특성이 아직 명확히 밝혀지지 않고 있

으며, 뿌리말뚝의 직경, 길이, 설치간격, 설치 방향 등에 대한 기준이 없고, 설계 또한 경험에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은 깊은 기초로 작용하는 모형 뿌리말뚝에 대해, 타설경사각을 변화시켜 재하시험을 실시하고, 타설경사각과 극한 지지력 관계를 비교분석하여 최적 타설경사각을 제시하는 데 있다.

2. 모형실험 계획 및 장치

본 모형실험에서는 뿌리말뚝의 무리효과를 연구한 Lizzi의 실험^(1, 2)에 착안하여 8개로 구성된 모형 그물식 뿌리말뚝을 그 타설경사각을 변화시켜가며 재하시험을 실시하였고 비교의 목적으로 모형 원형 얇은기초를 제작하여 재하시험을 하였다. 재하시험에 사용한 모형말뚝은 0°, 10°, 15°, 20°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 동심

원상의 말뚝들의 배치방향은 서로 엇갈리도록 하였다. 모형 원형 얇은기초는 바깥쪽 동심원에 외접한 말뚝머리의 최외단을 포함하도록 직경을 94mm로 하여 제작하였다. 캐핑된 모형 뿌리말뚝과 뿌리말뚝의 형상은 그림 1, 2와 같다. 그림 2에서 α 는 타설경사각을 나타낸다.

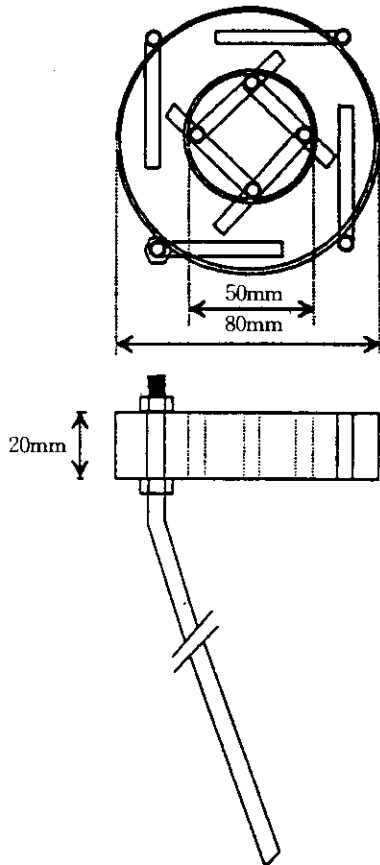


그림 1. 캐핑된 모형 뿌리말뚝의 개략도

모형지반은 비중이 2.66, 상대밀도가 47%, 내부마찰각이 35°, 균등계수가 1.93인 모래지반으로 모형그물식 뿌리말뚝을 토조 중앙에 설치한 다음 토조 위 1.4m의 높이에 설치한 직경 5mm인 체를 통하여 낙하시켜 조성하였다.^(3, 4) 토조의 제원은 폭이 1m, 길이가 2m, 높이가 2.5m이다.

실험장치는 그림 3과 같다. 실험절차는 형성된 모형지반의 지반면 위에 돌출해 있는 뿌리

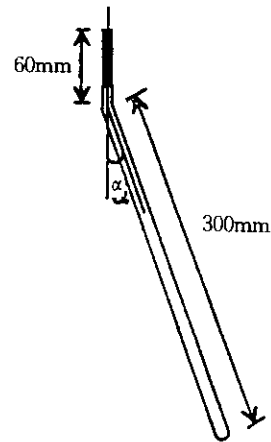
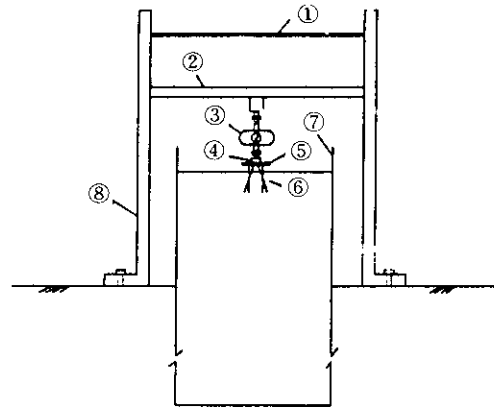


그림 2. 뿌리말뚝의 형상

말뚝 위에 재하판을 놓고 침하 측정기와 하중 측정장치를 설치한 다음 유압잭으로 하중을 가하여 하중-침하량 곡선을 얻는 순으로 하였다.⁽⁵⁾



- ① sieve
- ② H beam
- ③ proving ring
- ④ swivel head loading ram
- ⑤ loading plate
- ⑥ model pile
- ⑦ model box
breadth=1m, length=2m,
height=2.5m
above G.L : steel box
below G.L : concrete box
- ⑧ supporting structure

그림 3. 실험장치

실험계획을 표로 나타내면 표 1과 같으며 추가로 모형 원형 얇은기초에 대해서도 4회 재하

시험을 실시하여 하중-침하량곡선을 얻었다.

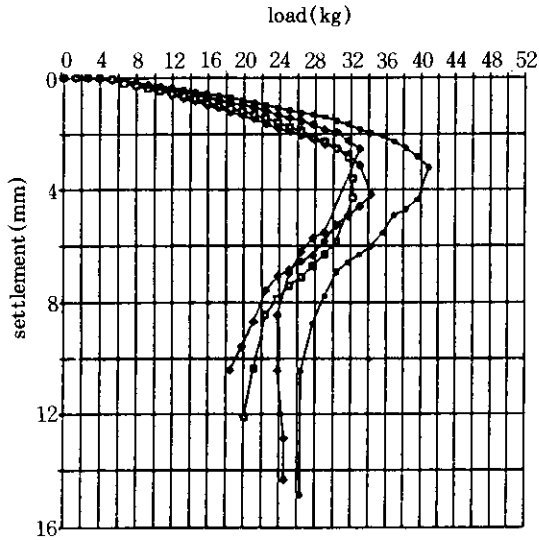
표 1. 실험 계획

실험순서	1st	2nd	3rd	4th	모형 원형기초
타설각	0°	10°	15°	20°	-
실험회수	4회	4회	4회	4회	4회

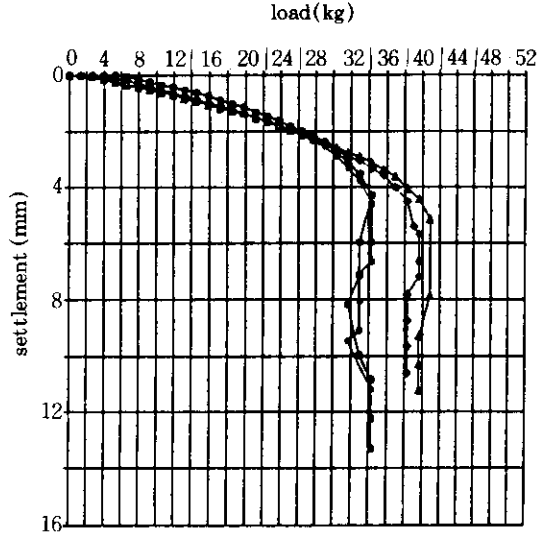
3. 실험결과 및 분석

3.1 말뚝 타설경사각과 극한지지력

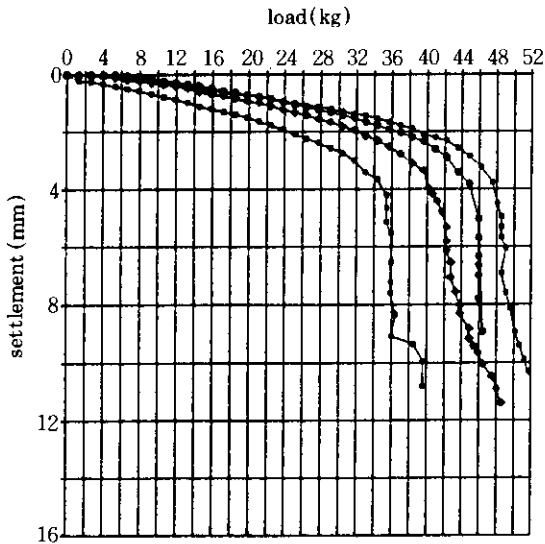
말뚝 타설경사각의 변화에 따른 극한지지력은 표2와 같으며 각 타설경사각에 대한 하중-침하량곡선은 그림4와 같다. 그림5는 각 타설



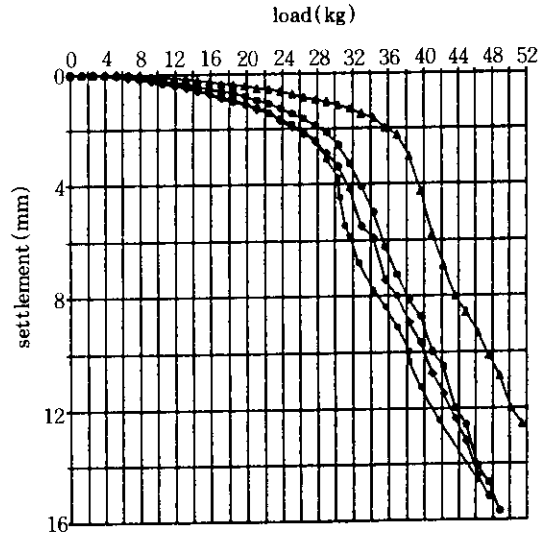
(a) 타설경사각이 0° 일때



(b) 타설경사각이 10° 일때



(c) 타설경사각이 15° 일때



(d) 타설경사각이 20° 일때

그림 4. 말뚝 타설경사각과 하중-침하량곡선

경사각에서의 극한지지력을 나타내고 있으며 이들의 평균값을 원만한 곡선으로 연결하여 점선으로 표시하였다. 극한지지력은 하중-침하

랑곡선 끝의 직선부분이 시작되는 점에서의 하중을 극한지지력으로 하는 Terzaghi/Yelinek 방법을 이용하여 결정하였다.^(6, 7, 8, 9, 10)

표 2. 타설경사각의 변화에 따른 극한지지력

타설경사각	0°				10°				15°				20°			
	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회
극한지지력(kg)	32.2	34.3	40.9	33.0	34.3	39.6	40.9	34.8	48.5	42.2	45.9	35.3	31.7	33.0	38.3	30.3
평균 극한지지력(kg)	35.10				37.40				42.98				33.33			

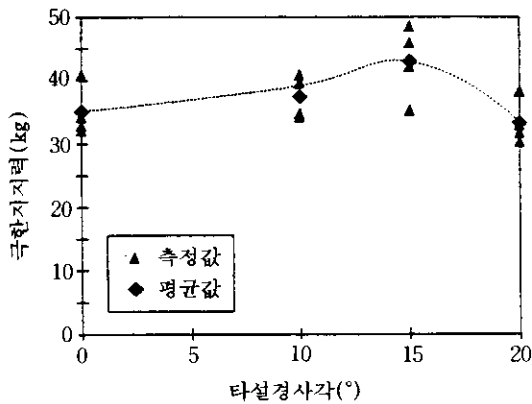


그림 5. 말뚝 타설경사각과 극한지지력

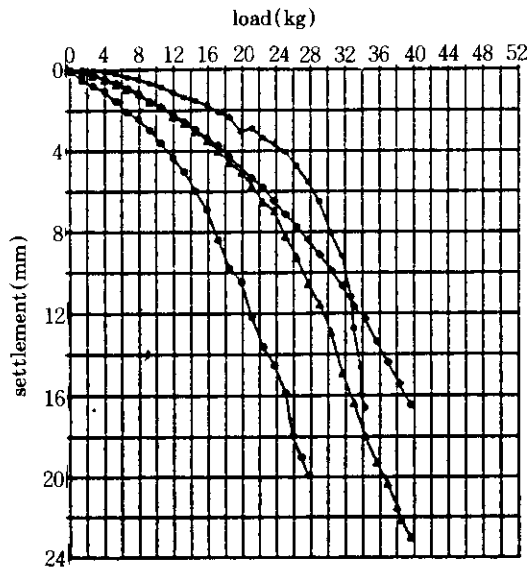


그림 6. 모형 원형 얇은 기초의 하중-침하량 곡선

또한 모형 원형 얇은기초에 대해 4회 재하시험을 실시하여 구한 하중-침하량 곡선은 그림 6과 같으며 극한지지력은 표3과 같다.

표 3. 모형 원형 얇은 기초의 극한지지력

실험회수(회)	1	2	3	4
극한지지력(kg)	23.7	25.1	17.1	13.2
평균 극한지지력(kg)	19.78			

표2와 그림5에서 알 수 있듯이 타설경사각이 15°일 때 극한지지력이 최대가 된다. 타설경사각이 15°인 뿌리말뚝의 극한지지력은 원형 얇은기초의 극한지지력과 비교하면 2.2배 이고, 연직 뿌리말뚝의 경우와 비교하면 22% 극한지지력 증대효과가 있다. 반면에, 타설경사각이 20°인 경우의 극한지지력은 연직 뿌리말뚝 극한지지력보다 5% 작은 값을 갖는다.

3.2 하중-침하량 곡선의 양상

하중-침하량 곡선(그림4)에서 보는 바와 같이 연직 뿌리말뚝의 경우, 하중-침하량 곡선은 전반 전단파괴의 형태를 나타내며, 타설경사각이 10°인 경우, 하중은 극한지지력에 도달한 후 일정한 값을 유지하는 양상을 보인다. 타설경사각이 15°, 20°로 증가하면서 하중은 극한지지력에 도달한 후에도 계속 증가하는 경향이 있다. 따라서 말뚝에 타설경사각이 있는 경우에는 극한지지력을 초과하여 하중을 받더라도 급격한 파괴에 이르지 않고 점차로 변위가 증가하는 연성(ductile)거동을 보일 것으로 예상된다.

3.3 가상 흙-말뚝 복합체

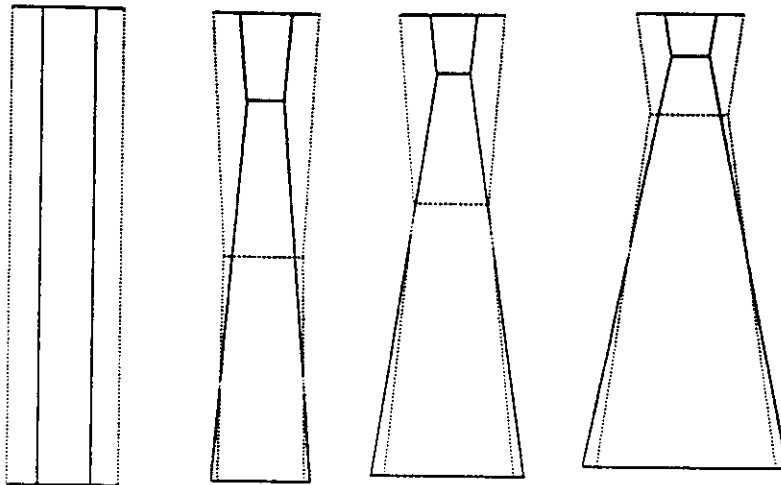
뿌리말뚝의 그물효과를 정성적으로 알아보고자 타설경사각에 따른 흙-말뚝 복합체의 형상으로부터 뿌리말뚝의 최소면적 발생깊이, 깊이에 따른 내측, 외측 말뚝무리면적등을 계산하였다.

그리고, 뿌리말뚝의 그물효과를 고찰하기 위

해, 말뚝무리를 외측 4개의 말뚝무리와 내측 4개의 말뚝무리로 구분하고, 일정 깊이에서 4개의 말뚝이 통과하는 점을 꼭지점으로 하는 4각형의 면적을 계산하였다. 지표면, 말뚝 선단, 최소면적 발생위치에 대한 면적이 표4에 나타나 있다. 그림7은 앞에서 계산한 사각형의 단면을 연직면 상에 나타낸 그림이다.

표 4. 지표에서부터 깊이에 따른 내, 외측 말뚝 무리 면적

면 적		타설 경사각				
		0°	10°	15°	20°	
지표면적(cm ²)	외측무리	46.24	46.24	46.24	46.24	
	내측무리	10.89	10.89	10.89	10.89	
말뚝선단 면적	외측	선단깊이(cm)	30.00	29.54	28.98	28.19
		면적(cm ²)	46.24	31.36	68.89	132.25
	내측	선단깊이(cm)	30.00	29.54	28.98	28.19
		면적(cm ²)	10.89	39.69	96.04	174.24
최소면적	외측	발생깊이(cm)	46.24	23.12	23.12	23.12
		면적(cm ²)	깊이에 따라 동일	15.60	10.26	7.56
	내측	발생깊이(cm)	10.89	5.45	5.45	5.45
		면적(cm ²)	깊이에 따라 동일	5.67	3.73	2.75



(a) 타설경사각 0° (b) 타설경사각 10° (c) 타설경사각 15° (d) 타설경사각 20°

그림 7. 가상 흙-말뚝 복합체의 형상

앞에서도 언급하였듯이 그림7은 본 실험결과를 통해 구한 그물식 뿌리말뚝의 극한지지력 변화양상을 흙-말뚝 복합체의 형상을 고려하여 설명하고자 그려본 것이지만 각 타설경사각에 따른 그물식 뿌리말뚝의 하중지지능력과 흙-말뚝 복합체의 형상 사이에서 어떤 특정한 관계를 찾아 보기는 어려웠다.

3.4 연직 뿌리말뚝에 대한 실험값과 이론값과의 비교

연직 뿌리말뚝에 대한 실험 결과, 극한지지력은 35.1kg을 나타내었다. Vesic의 말뚝기초 극한지지력산정 방법을 이용하여 모형 지반에 위치한 연직 뿌리말뚝의 극한지지력을 산정하면 다음 표5와 같다.^(11, 12)

표 5. 연직 뿌리말뚝에 대한 실험값과 이론값의 비교 (Vesic 방법)

		주면 마찰력 (Q_s)	선단 지지력 (Q_p)	$Q_s + Q_p$
단말뚝 지지력의 합		15.6kg	2.37kg	17.97kg
블럭 파괴에 의한 극한 지지력	외측블럭	19.47kg	23.22kg	42.69kg
	내측블럭	10.31kg	6.5kg	16.81kg
실험결과		-		35.1kg

실험결과는 외말뚝 극한지지력 개개의 합보다 2배 가량 크며, 블럭 파괴를 가산한 지지력의 경우 외측 말뚝무리에 의한 지지력과 내측 말뚝무리에 의한 지지력의 사이값을 나타낸다.

모래 지반에서 무리말뚝의 효율에 관해서는 자료가 많지 않으나 모래가 비교적 느슨하거나 말뚝중심간격이 크지 않은 경우의 무리효율 η 는 1보다 큰 것이 보통이며 η 값의 일반적인 범위는 1.3~2 사이이다.⁽¹³⁾ 연직 뿌리말뚝에 대한 극한지지력의 실험값을 외말뚝의 극한지지력의 합으로 나누어서 구한 무리효율 η 는 1.96이다.

4. 결론 및 연구과제

본 실험연구는 말뚝 타설경사각에 따른 그물

식 뿌리말뚝의 극한지지력 변화를 알아보기 위한 것으로 모형 그물식 뿌리말뚝에 대한 재하시험을 실시하였다. 실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 행한 모형실험 결과에 따르면 그물식 뿌리말뚝의 극한지지력은, 0°, 10°, 15°, 20°의 4가지 타설경사각 중 타설경사각이 15°일 때 최대가 되었으며, 그 값은 모형 원형 얇은기초 극한지지력의 2.2배, 연직 뿌리말뚝 극한지지력의 1.22배 이었다.
- (2) 하중-침하량곡선은 타설경사각이 없는 경우에 전반 전단파괴(general shear failure) 형태를 나타내고 타설경사각이 있는 경우에는 국부 전단파괴(local shear failure) 형태를 나타내었다. 따라서, 타설경사각이 있는 경우의 뿌리말뚝은 극한지지력을 초과하여 하중을 받더라도 급격한 파괴에 이르지 않고 점차로 변위가 증가하는 연성(ductile) 거동을 보일 것으로 예상된다.
- (3) 본 실험은 그물식 뿌리말뚝의 극한지지력을 최대로 하는 타설경사각을 알아보기 위한 것으로 이 외에도 수평방향 회전각, 근입비, 상대밀도, 말뚝 중심간격에 따른 뿌리말뚝의 거동에 대한 연구가 보완되어야 할 것이며 궁극적으로는 크기효과를 규명하기 위한 현장시험이 필요하다.

참 고 문 헌

1. Lizzi, F.(1964), "Root Pattern Piles Underpinning", In Symposium on Bearing Capacity of Piles, Roorkee, India.
2. Underpinning and Retention(1993), Edited by S. Thorburn & G. S. Littlejohn., Blackie Academic & Professional, 2nd edition., pp. 84~156.
3. 이원택(1991), 얇은 기초에 있어서 그물식 뿌리말뚝의 지반 보강 효과에 관한 연구, 서울대, 박사학위 논문.

4. 김용일(1988), 균일한 상대밀도를 갖는 시료 형성을 위한 레이닝(raining)법의 이용 연구, 서울대, 석사학위 논문.
5. 김정환(1994), 그물식 뿌리말뚝의 극한지지력에 관한 실험연구, 서울대, 석사학위 논문.
6. Dieter Salden(1980), "Der Einfluss der Sohlenform auf die Traglast von Fundamenten", Baugrundinstitut, Stuttgart.
7. Alam Singh(1981), "Soil Engineering in Theory and Practice-Geotechnical Testing and Instrumentation", Apt. Books Inc., pp. 358~413.
8. Winterkorn, H.F. & Fang, H.Y.(1975), "Foundation Engineering Handbook", Van Nostrand Reinhold Company., pp.557~595.
9. Tomlinson, M. J.(1986), "Foundation Design and Construction", Longman Scientific & Technical. pp.398~501.
10. Tomlinson, M.J.(1977), "Pile Design and Construction Practice", A View Point Publication, 3th edition. pp.97~183.
11. Das, B.M.(1990), "Principles of Foundation Engineering", PWS-KENT Publishing Company. pp.444~495.
12. Vesic, A.S.(1977), "Design of Pile Foundation", Transportation Research Board., pp. 12~22.
13. Poulos, H.G. & Davis, E.H.(1980), "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley & Sons., pp.19~38.

(접수일자. 1994. 9. 26)