

KGS Spring '95 National Conference
25, March, 1995/Seoul/Korea

인발하중을 받는 그물식 뿌리말뚝의 최적 타설경사각

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

이 승현^{*}, Seung-Hyun Lee, 최 병성^{**}, Byung-Sung Choi, 김 명모^{***}, Myoung-Mo Kim

* 서울대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University

** 서울대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University

*** 서울대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Uplift load tests are executed on model reticulated root piles (RRP) to find 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 uplift capacities of the model RRP of different installation angles after executing regression analysis, it is observed that the ultimate uplift capacity of the slanting RRP is bigger than that of the vertical RRP, and the optimum slanting angle of the RRP is around 12° . As a result of regression analysis, the ultimate uplift capacity of the 12°-RRP is found to be 20% bigger than that of the vertical RRP, and the ultimate uplift capacities of 15° -RRP, 20° -RRP are larger than that of vertical RRP by as much as 18%, 10% respectively.

1. 서론

그물식 뿌리말뚝(reticulated root pile)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(Lizzi, 1982).

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

그러나, 이런 장점들에도 불구하고 R.R.P.를 이용한 지반 보강 및 기초의 설치 방법에 대한 역학적 특성이 아직 명확히 밝혀지지 않고 있으며, 뿌리말뚝의 직경, 길이, 설치간격, 설치 방향 등에 대한 기준이 없고, 설계 또한 경험에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구의 목적은, 본 실험에 앞서 수행하였던 압축하중을 받는 그물식 뿌리말뚝의 극한지지력에 관한 실험연구(김정환, 1994)에 이어 깊은기초로 작용하는 모형 뿌리말뚝에 대해, 타설경사각을 변화시켜 인발시험을 실시하고, 타설경사각과 인발지지력관계를 비교분석하여 압축하중 및 인발하중에 대한 종합적인 최적 타설경사각을 제시하는 데 있다.

2. 모형실험 계획 및 장치

본 모형실험에서는 뿌리말뚝의 그물효과를 연구한 Lizzi(1979)의 실험에 착안하여 8개로 구성된 모형 그물식 뿌리말뚝을 그 타설경사각을 변화시키며 인발시험을 실시하였다. 인발시험에 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 배치하였

는데 각 동심원에 접하는 4개의 말뚝은 평면상에서 보았을 때 인접 모형말뚝머리의 중심을 지나도록 하였으며 안쪽 동심원상의 말뚝과 바깥쪽 동심원상의 말뚝들의 배치방향은 서로 엇갈리도록 하였다. 켈핑된 모형 뿌리말뚝과 뿌리말뚝의 형상은 그림 1, 2 와 같다. 그림 2에서 α 는 타설경사각을 나타낸다(김정환, 1994).

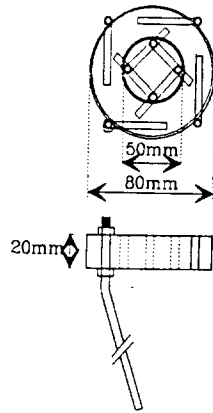


그림 1 켈핑된 모형 뿌리말뚝

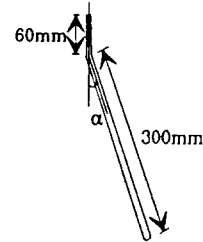


그림 2 뿌리말뚝의 형상

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 5mm인 체를 통하여 낙하시켜 조성하였다(이원택, 1991). 토조의 체원은 폭이 1m, 길이가 2m, 높이가 2.5m이다.

실험장치는 그림 3과 같다. 실험절차는 형성된 모형지반의 지반면 위에 돌출해 있는 뿌리말뚝췌에 인발장치를 설치하고 인발량 측정기와 하중 측정기를 장치한 다음 유압잭으로 하중을 가하여 하중-인발량 곡선을 얻는 순으로 하였다.

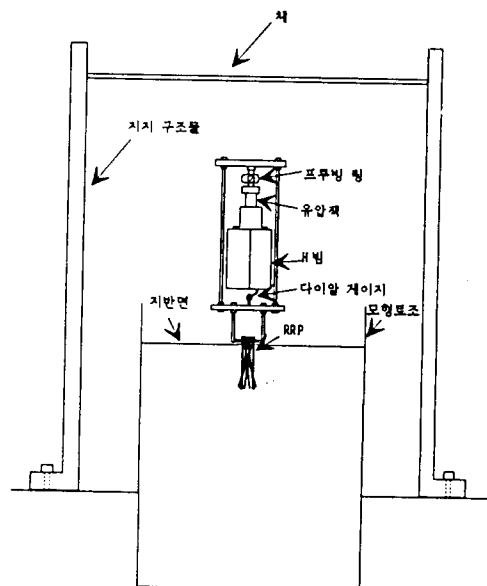


그림 3 실험장치

실험계획을 표로 나타내면 표 1과 같다.

표 1 실험 계획

실험 순서	1st	2nd	3rd	4th
타설경사각	0°	10°	15°	20°
실험회수	4회	4회	4회	4회

3. 실험결과 및 분석

3.1 말뚝 타설경사각과 인발지지력

말뚝 타설경사각의 변화에 따른 인발지지력은 표 2와 같으며 각 타설경사각에 대한 하중-인발량곡선은 그림 4와 같다. 그림 5는 각 타설경사각에서의 인발지지력과 그 평균값을 나타낸 것이다.

표 2 타설경사각의 변화에 따른 인발지지력

타설경사각	0°				10°				15°				20°			
	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회	1회	2회	3회	4회
인발지지력(kg)	9.2	6.8	7.4	8.9	11.0	9.56	11.3	9.2	9.5	9.8	8.6	8.0	8.0	7.76	10.4	10.7
평균 인발 지지력(kg)	8.08				10.27				8.98				9.22			

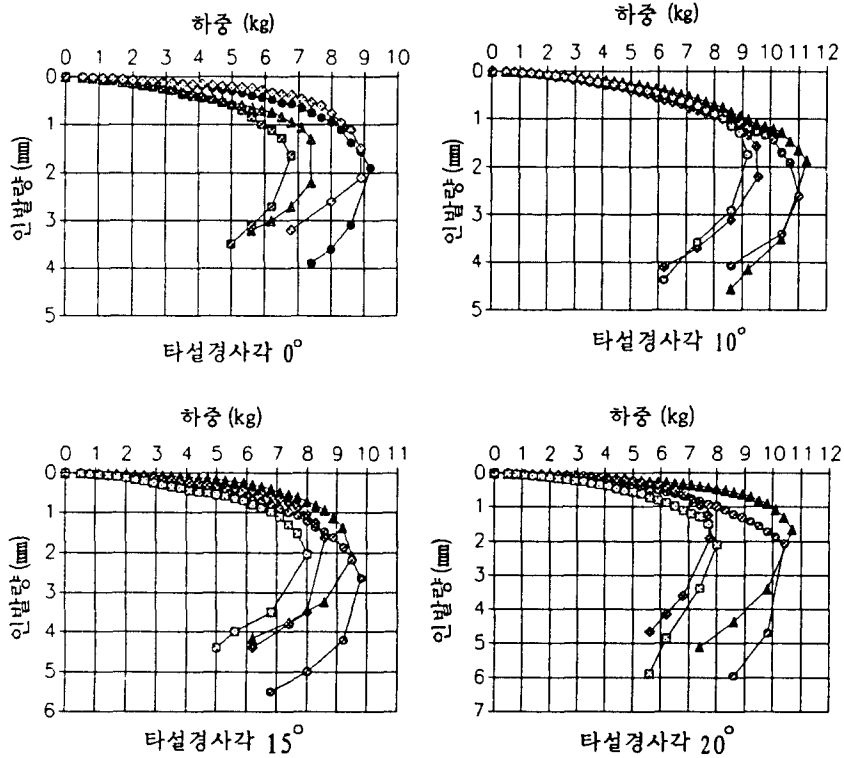


그림 4 말뚝 타설경사각과 하중-인발량곡선

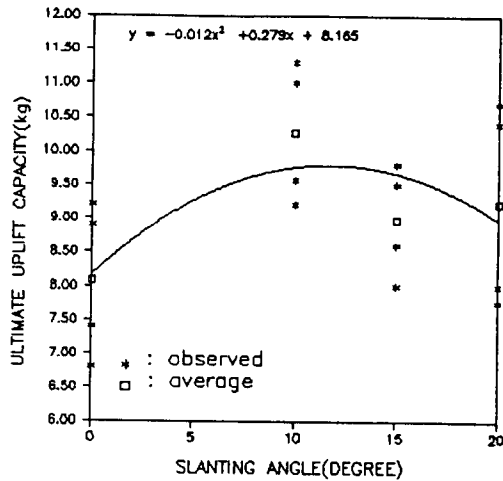


그림 5 말뚝 타설경사각과 인발지지력(2차 회귀분석)

그림 5에 보인 곡선은 2차식으로 회귀분석한 결과를 나타낸다. 표 2와 그림 5에서 알 수 있듯이 대략 타설경사각 12° 정도일 때 인발지지력이 최대가 되는데, 이때의 인발지지력은 연직 뿌리말뚝의 경우와 비교하면 20% 인발지지력 증대효과가 있다. 또한 타설경사각 15°, 20°의 그물식 뿌리말뚝의 인발지지력은, 회귀분석 결과들을 이용하여, 연직으로 타설된 그물식 뿌리말뚝의 경우와 비교하면 각각 18%, 10%의 인발지지력 증대효과가 있다.

3.2 기상 흙-말뚝 복합체

그물식 뿌리말뚝의 그물효과에 의한 하중지지력 증대 미개니즘을 알아보려고 타설경사각에 따른 흙-말뚝 복합체의 형상으로부터 말뚝무리를 외측 4개의 말뚝무리와 내측 4개의 말뚝무리로 구분하고, 일정 깊이에서 4개의 말뚝이 통과하는 점을 꼭지점으로 하는 4각형의 면적을 계산하였다. 지표면적, 말뚝 선단면적, 최소면적 발생 깊이 및 최소면적이 표 3에 나타나 있으며 그림 6은 흙-말뚝 복합체의 형상을 연직면 상에 나타낸 것이다.

표 3 지표에서부터 깊이에 따른 내, 외측 말뚝 무리 면적

깊이에 따른 면적		타설 경사각(α)				
		0°	10°	15°	20°	
지표	외측무리면적(cm^2)	47.20	47.20	47.20	47.20	
	내측무리면적(cm^2)	11.09	11.09	11.09	11.09	
말뚝선단	외측	선단깊이(cm)	30.00	29.54	28.98	28.19
		면적(cm^2)	47.20	32.49	66.91	125.99
	내측	선단깊이(cm)	30.00	29.54	28.98	28.19
		면적(cm^2)	11.09	35.52	88.17	164.86
최소면적	외측	발생깊이(cm)	깊이에 따라 동일	15.82	10.41	7.67
		면적(cm^2)	47.20	23.60	23.60	23.60
	내측	발생깊이(cm)	깊이에 따라 동일	5.78	3.81	2.80
		면적(cm^2)	11.09	5.54	5.54	5.54

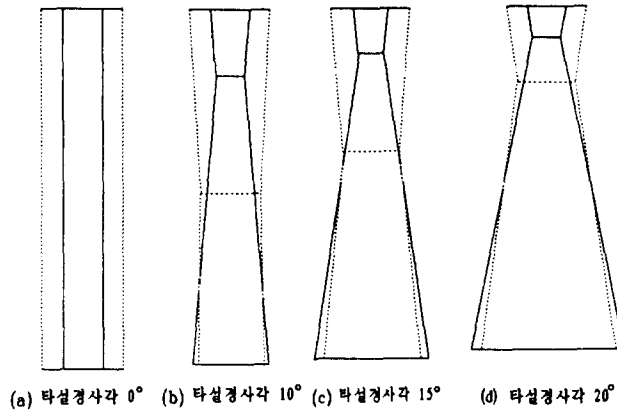


그림 6 가상 흙-말뚝 복합체의 형상

타설경사각이 있는 미소 무리말뚝의 압축 또는 인발지지력이 연직 방향으로 설치된 뿌리말뚝의 지지력에 비해 크게 나타나는 것은 말뚝의 경사 배치에 따른 그물효과에 기인하며 이 그물효과는 내외측 무리 말뚝에 의해 형성되는 흙-말뚝 복합체의 형상에 영향을 받는다고 생각된다. 본 실험에 앞서 실시했던 그물식 뿌리말뚝에 대한 압축시험 결과와 본 인발시험 결과에 의하면 두 경우 모두 극한지지력이 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.

3.3 실험값과 기존의 말뚝지지력 산정방법에 의한 값의 비교

실험값과 기존의 말뚝지지력 산정공식을 사용하여 구한 인발지지력 값이 표 4에 나타나 있다.

Poulos(1980)는 실제적으로 적용되는 말뚝 경사각의 범위에 대해서 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 인발지지력 산정시 그림 7과 같이 연직 하중을 받는 경사말뚝의 경우와 경사하중을 받는 연직말뚝의 경우를 동일한 문제로 보았으며 편의상 그림 7(b)에서의 경사하중(Q)에 의한 지지력을 인발지지력, 경사하중의 연직성분(Q cos α)에 의한 지지력을 연직 인발지지력, 경사하중의 수평성분(Q sin α)에 의한 지지력을 수평지지력이라고 하였다.

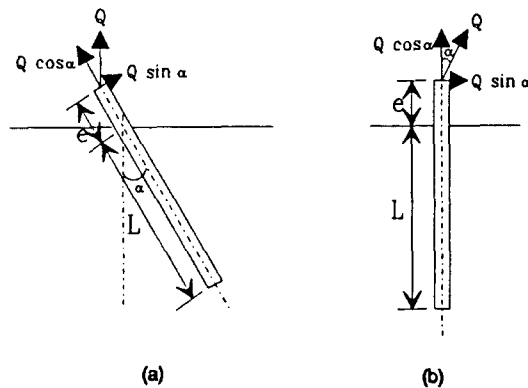


그림 7 연직하중을 받는 경사말뚝과 경사하중을 받는 연직말뚝

그리고 사질토의 경우, 수평하중에 의한 측방향 지지력의 증가에 대한 많은 논의가 있어 왔으나 케이슨 형태의 말뚝을 제외하고는 수평하중에 의한 측방향 지지력의 증가가 거의 없음이 실험적으로 입증되었다고 한다(W.G.K Fleming et al., 1985). 또한 대부분의 말뚝의 경우, 측방향 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 인발지력과 수평지력 산정시 두개의 지지력을 독립적으로 산정하였다.

수평지력은 Broms(1965)방법을 사용하여 계산하였으며, 연직 인발지력은 Vesic(1970)방법, Meyerhof(1976)방법, Das and Seeley(1982)방법, NAVFAC DM-7(1982)방법으로 계산하였다. 기존의 말뚝지력 산정공식을 사용하여 연직 인발지력을 계산할 경우는 극한 압축하중의 2/3배한 값을 연직 인발지력으로 하였다(Poulos, 1980).

표 4 기존의 방법과 실험결과를 통한 인발지력의 비교

타설경사각 (α)		0°		10°		15°		20°	
		외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계	외말뚝	합계
연직 인발력에 의한 인발지력 (kg)	Vesic	1.21	9.68	1.23	9.84	1.25	10.00	1.29	10.32
	Meyerhof	0.13	1.04	0.13	1.06	0.13	1.08	0.14	1.11
	Das and Seeley	0.71	5.68	0.72	5.77	0.74	5.88	0.76	6.04
	NAVFAC DM-7	0.26	2.08	0.26	2.08	0.27	2.16	0.28	2.24
수평력에 의한 인발지력 (kg)	Broms	-	-	21.65	173.22	14.53	116.22	10.99	87.95
불러파괴에 의한 인발지력 (kg)	75° -방법	10.87		-		-		-	
	NAVFAC DM-7	10.11		-		-		-	
실험결과(kg)		8.08		10.27		8.98		9.22	

표 4에 나타나 있는 값들은 실험결과값과 외말뚝에 대한 기존의 말뚝지력 산정방법을 통해 구한 수평지력, 연직 인발지력에 경사각(α)을 고려한 인발지력(Q)을 나타낸 것으로 수평지력과 연직 인발지력에 의한 인발지력값을 비교하여 작은 값을 인발지력으로 하였으며 두 값을 비교해 보면 그물식 뿌리말뚝의 파괴는 연직 인발력에 의한 인발파괴로 볼 수 있다. 외말뚝의 합으로 그물식 뿌리말뚝의 인발지력을 계산하는 경우에는 무리효과를 고려하지 않았으며 타설경사각 0° 인 그물식 뿌리말뚝의 인발지력은, 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 흙불력의 중량으로 구하였다(NAVFAC DM-7.2).

본 실험결과에 의하면 타설경사각 10° 에서의 인발지력을 최대값으로 하여 10° 보다 작고 큰 타설경사각에서는 인발지력이 감소하는 경향을 보인다. 그러나 표 4에도 나타나 있듯이 기존의 방법을 통하여 외말뚝의 인발지력을 산정하고 그 합으로 그물식 뿌리말뚝의 인발지력을 계산하는 경우 타설경사각이 증가함에 따라 인발지력도 증가함을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 언급한 기존의 말뚝지력 산정방법으로 뿌리말뚝의 인발지력을 예측하는 것은 그물식 뿌리말뚝의 그물효과로 표현되는 복잡한 하중지지 미개니즘을 고려해 볼 때 무리가 있음을 알 수 있다. 불러파괴를 가정한 경우 타설경사각 0° 인 그물식 뿌리말뚝의 인발지력은, 75° - 방법으로 계산한 값보다는 26%, NAVFAC DM-7 방법으로 계산한 값보다는 20% 작은 값을 나타내었다.

4. 결론 및 연구과제

본 실험연구는 말뚝 타설경사각에 따른 그물식 뿌리말뚝의 인발지지력 변화를 알아보기 위한 것으로 모형 그물식 뿌리말뚝에 대한 인발시험을 실시하였다. 실험결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 그물식 뿌리말뚝의 인발지지력은 타설경사각이 대략 12° 정도일 때 최대가 되었으며, 그 값은 연직 그물식 뿌리말뚝 인발지지력의 1.2배 이었다.
- 2) 본 실험결과는 압축하중을 받는 그물식 뿌리말뚝 실험결과(1994년도 대한 토목학회 정기 학술 발표회 개요집)와 정확하게 일치하는 것은 아니지만 대체적인 경향은 동일하다고 볼 수 있다. 두가지 결과를 종합하여 보면 뿌리말뚝이 압축 또는 인장을 받는 경우 타설경사각이 10°에서 15° 사이일 때 하중지지능력이 가장 크며 지지력 증대효과는 대략 20% 정도이다.
- 3) 압축 및 인발시험 결과들을 종합해 볼 때, 뿌리말뚝의 타설경사각에 따른 하중지지능력의 변화와 흙-말뚝 복합체의 형상 사이에 어떤 특정한 관계를 찾아 보기는 어렵다.
- 4) 계산에 의한 인발지지력은 타설경사각이 커질수록 크게 산정되는데, 본 실험결과로부터 판단할 때, 이 지지력 증가를 무시하는 편이 더 타당하다.
- 5) 본 실험은 그물식 뿌리말뚝의 인발지지력을 최대로 하는 타설경사각을 알아 보기 위해 수행하였으며 이외에도 수평방향 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 원 택 (1991), 얇은 기초에 있어서 그물식 뿌리말뚝의 지반 보강 효과에 관한 연구, 서울대, 박사학위 논문.
- (2) 김 정 환 (1994), 그물식 뿌리말뚝의 극한지지력에 관한 실험 연구, 서울대, 석사학위 논문.
- (3) Broms, B.B. (1964), "Lateral resistance of piles in cohesionless soils. J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 91(SM4), pp.123~156
- (4) Das, B. M. (1990), "Principles of Foundation Engineering", PWS-KENT Publishing Company. pp.480~483
- (5) Lizzi, F.(1982), "The 'Pali Radice'(Root Piles)-A state - of the art Report", Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques, Bangkok, 29 Nov.-3 Dec. 1982

- (6) Lizzi, F. and Carnevale, G.(1979), "Les reseaux de pieux Racines pour la Consolidation des Sols, Aspects Theoretique et Essais sur Modeles", Proc. Int. Conf., Soil Reinforcement, Paris, Vol.2, pp.317~324
- (7) NAVFAC DM-7.2(1982), pp.192~195, 205
- (8) Poulos, H. G. & Davis, E. H. (1980), "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley & Sons., pp.46, 154~157.
- (9) Prakash Shamsheer & Hari D. Sharma(1990), "Pile Foundations in Engineering Practice", John Wiley & Sons. pp. 307~311
- (10) Vesić(1970), "Tests on Instrumented Piles, Ogeechee River Site," JSMFD, ASCE, Vol. 96, SM2, March, pp.561~584
- (11) W.G.K. Fleming et al.(1985), "Piling Engineering", Surrey University Press, pp.166~169

토목섬유 Session