

Soil Nail

Application and its reinforcing effect of soil nailed-drilled shafts

1), Sang-Seom Jeong, 2), Byung-Chul Kim, 3), Dae-Soo Lee,
4), Dae-Hong Kim, 5), Dae-Hak Kim

- 1) , Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.
- 2) , Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Yonsei. Univ.
- 3) , Project Manager, Korea Electric Power Research Institute.
- 4) , Korea Electric Power Research Institute.
- 5) , Vice President, Backyoung G&C.

개요(SYNOPSIS) : In this study reinforcing effect of soil nailed-drilled shafts subjected to axial and lateral loads were evaluated. Special attention was given to the reinforcing effects of soil nails placed from the drilled shafts to surrounding weathered- and soft-rocks based on model tests, numerical analyses and load tests. The model tests and numerical analyses are conducted to analyze the reinforcing effect of various conditions of number, inclination, position and length. The results of 1/40 scale model tests and numerical analyses show that as the number of reinforcing level increases, the incremental effect of reinforcement tends to increase, whereas the reinforcing effect on relative position is negligible. In addition there is a reinforcing effect as the inclination angle increases up to 30 degrees. Based on the results of tensile load tests, soil nailed-drilled shafts has a considerably smaller settlement to reach the ultimate level when compared with the result of un-reinforced drilled shafts. For compression tests, there is a reinforcing effect of about 200% measured.

주요어(Key Words) : soil nailed-drilled shafts, reinforcing effect, model test, numerical analysis, load test

1. 서론

최근 국내에서 현장타설말뚝의 사용이 보편화되면서 말뚝의 지지력과 하중전이특성을 분석하는 등

가

soil nail

soil nail

가

가

. 이에 본 연구에서는 현장타설말뚝에 soil nail을 정착시킴으로써 주변지반의 강성을 높이고 보강재(soil nail)의 저항력에 의해 지지력을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 보강형 및 무보강 현장타설말뚝에 대하여 실내모형실험, 수치해석 및 현장재하시험을 수행하여 soil nail로 보강된 현장타설말뚝의 보강효과와 그 적용성을 분석하였다.

2. 실내모형실험

2.1 실험개요 및 실험종류

보강형 현장타설말뚝의 최적 보강형태를 파악하기 위하여 보강재의 보강형태를 변화시켜가면서 실내 모형실험을 수행하였다. 본 실험에서는 모형토조 상부에 거치대를 설치하여 유압식 하중재하장치를 장착 후 계측기(하중계, 변위계)가 장착된 모형기초체에 인발하중을 재하 하였다. 모형기초체 보강형태 및 실험종류는 다음과 같다 (표 1, 그림 1).

표 1. 하중조건과 실험종류

하중조건	인발
보강재 단수	무보강, 1, 2, 3단 보강
보강재 개수	4, 8개
보강재 경사	0°, 25°, 40°
보강재 배열	수평, 교차

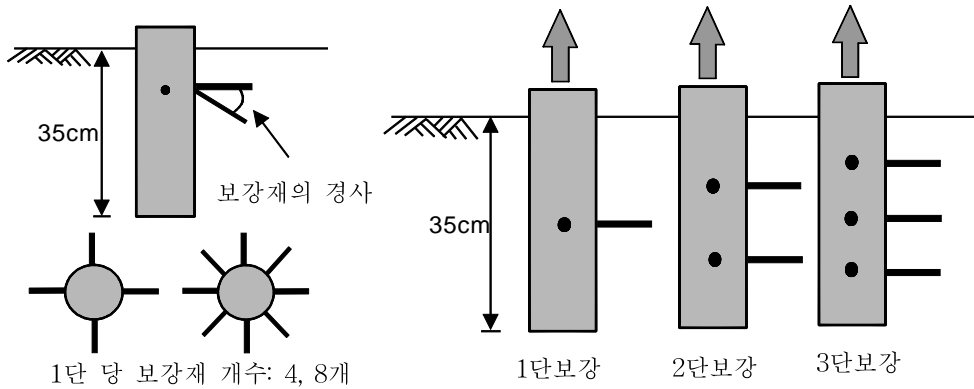


그림 1. 모형기초의 보강형태

실규모 기초체와 지반간의 상대강성과 모형기초와 모형지반간의 상대강성이 서로 일치하는 조건하에서 기초체의 재원을 선정하였다. 그 결과, 모형기초는 PVC계통의 플라스틱(MC 나이론, $E_s : 3.2 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$)을, 보강재는 탄성계수가 약 30000kg/cm^2 정도의 엔지니어링 플라스틱 재료를 사용하였다. 지반조성은 vibrator를 사용하여 조밀도를 증가시켜 상대밀도를 약 80%이상으로 유지하였다. 모형지반의 물성치는 표 2 와 같다.

표 2. 모형지반의 기본물성

모형지반	상대밀도 (%)	내부마찰각	N치	E_s (kg/cm^2)	포아송비
주문진 표준사	80	38°	44	344	0.35

주) N치는 Dunham식 ($\phi = \sqrt{12N} + 15$; 입자가 둥글고 입경이 균일한 사질토)을 역계산

탄성계수는 사질토 지반에 적용하는 Schmertmann식 ($E_s = 766N$ (kpa))을 적용하여 계산

2.2 실험 결과 및 분석

인발하중을 받는 기초체에 대하여 보강재의 경사를 수평, 25도, 4도로 변화시키며, 또한 보강재의 개수를 1단 당 4개, 8개로 바꾸어 가며 실험을 수행하였다. 그 결과 말뚝 두부에서의 변위를 측정하여 하중-침하 곡선을 분석함으로써 보강효과를 나타내었으며 보강효율은 무보강시 최대하중과 보강시 최대하중의 비로 나타내었다 (표 3).

표 3. 인발실험 결과

보강재 경사각	보강재 개 수 (1단당)	최 대 하 중 (kg)					보 강 효 율				비 교
		무보강	1 단 보강	2 단 보강	3 단 보강	3단 보강 교차배열	1 단 보강	2 단 보강	3 단 보강	3단 보강 교차배열	
0도	4개	37.61	39.97	54.99	56.99	59.14	1.06	1.46	1.51	1.57	변위 1.5mm~ 2.5mm 내에서 최대하중 발생
	8개		43.99	51.14	52.94	-	1.17	1.36	1.41	-	
25도	4개	37.61	46.42	57.54	59.07	61.15	1.23	1.53	1.57	1.63	
	8개		51.53	57.17	57.75	-	1.37	1.52	1.54	-	
40도	4개	37.61	56.40	59.17	60.94	60.74	1.50	1.57	1.62	1.61	
	8개		-	-	56.65	-	-	-	1.51	-	

인발실험결과 무보강보다 2, 3단 보강시 보강효과가 좋은 것으로 나타났으며 보강재가 수평일 때 보다 경사진 보강재의 보강효과가 좋은 것으로 나타났다. 또한 2, 3단 보강시 보강효과의 차이와 25°, 40° 각도의 보강효과 차이는 미미한 것으로 나타났다. 3단 보강 시 보강재의 개수가 단 당 4개보다 8개가 보강효과가 작은 것으로 나타난 이유는 보강재의 간격이 좁아지면서 지반교란의 정도가 커졌기 때문인 것으로 판단된다.

3. 수치해석

3.1 모델링 및 입력물성

현재 국내에서 철타기초로 사용된 현장타설말뚝의 일반적인 크기는 직경 3~4m, 구체길이 6~20m의 범위인 것으로 나타났다. 본 절에서는 앞서 수행된 모형실험의 한계를 보완하기 위하여 Flac 3D 해석에 근거하여 실규모 현장타설말뚝(직경 3m, 12m)의 보강형태별 보강재의 효과분석을 수행하였다.

수치모델링은, 그림 2 와 같이 현장타설말뚝과 지반은 깊이방향에 대한 축대칭으로 가정하여 반 단면만을 모델링 하였고, 말뚝이 영향을 받지 않는 영향거리를 고려하여 30m×15m×36m의 직육면체 경계를 사용하였다. 경계조건은 하단의 경우 깊이방향에 대해서는 변위를 발생시키지 않도록 수평방향으로만 이동 가능하도록 하였다. 양 쪽지점에 대해서는 모든 자유도를 구속하여 해석을 수행하였으며 측면부의 경우 깊이방향에 대한 자유도를 부과하였다. 지반은 탄·소성을 해석할 수 있는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며 현장타설말뚝은 탄성체로 가정하였다. 또한 soil nail은 탄성체로 가정하여 Beam요소를 사용, 기초체 주면에 정착시켰다. 표 4는 본 수치해석에 사용된 말뚝기초와 대상지반의 입력 물성치를 나타낸다.

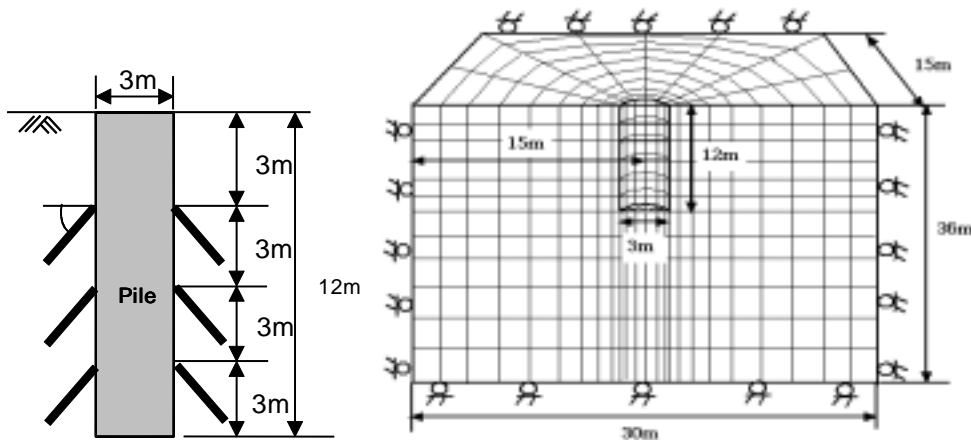


그림 2. 말뚝과 지반의 모델링

4.

구분		말뚝기초	풍화토	풍화암	연암	접촉면
건조단위중량 (kN/m ³)		25	19	22	23	
탄성물성치	포아송비	0.20	0.35	0.30	0.30	
	체적탄성계수(kPa)	13.9E6	35.0E3	81.7E3	41.7E4	
	전단탄성계수(kPa)	10.4E6	11.7E3	37.7E3	19.2E4	
강도정수	점착력(kPa)		36	49	100	지반강도정수의 70%사용
	내부마찰각(°)		28	35	40	
접촉면	수직강성도(kPa/m)		54.0E5	10.0E5	10.0E5	
	전단강성도(kPa/m)		16.0E5	50.0E5	50.0E5	

3.2 수치해석 결과

표 5 는 연직하중의 경우 허용연직변위 0.02m, 수평하중의 경우 허용수평변위 0.01m를 기준으로 보강 형태별로 정리한 것으로 무보강 현장타설말뚝에 대한 보강형 현장타설말뚝의 보강효과를 의미한다. 표 5에서 음영 처리된 값은 각 경우에 있어 최대하중비, 즉 최대보강효과를 나타내는 값이다.

5.

							+	+			+	+
	1	1.15	1.08	1.03	1.09	1.08	1.02	1.05	1.06	1.08	1.00	1.01
	2	1.26	1.20	1.08	1.14	1.21	1.05	1.08	1.12	1.26	1.01	1.02
	3	1.32	1.27	1.13	1.19	1.35	1.08	1.11	1.16	1.42	1.03	1.03
		1.32	1.27	1.22	1.19	1.25	1.09	1.17	1.16	1.52	1.05	1.05
		1.32	1.27	1.13	1.19	1.35	1.03	1.13	1.16	1.42	1.03	1.01
		1.29	1.27	1.04	1.17	1.35	1.01	1.05	1.16	1.37	1.01	1.05
	0°	1.44	1.27	1.15	1.19	1.35	1.08	1.12	1.16	1.42	1.03	1.05
	20°	1.50	1.43	1.15	1.23	1.73	1.08	1.14	1.26	2.15	1.03	1.05
	30°	1.50	1.50	1.15	1.33	1.90	1.08	1.15	1.33	2.42	1.03	1.05
	40°	1.56	1.57	1.15	1.41	2.03	1.05	1.12	1.42	2.65	1.03	1.05
	60°	1.56	1.57	1.08	1.47	2.08	1.05	1.12	1.49	2.71	1.03	1.05

3.3 결과 검토

실내모형실험과 수치해석 결과, 보강효과 발현을 위한 최적보강 형태는 다음과 같다.

표 6. 보강재의 최적형태

40°	3	8
-----	---	---

4. 현장재하시험

4.1 재하시험의 종류

본 연구에서는 현장 재하시험을 위하여 무보강 및 보강형 현장타설말뚝을 직경 0.4m, 길이 1.5m 크기로 12개, 직경 1.5m, 길이 3.0m 크기로 1개를 제작하였다(그림 3, 그림 4). 표 7에 나타난 바와 같이 현장 재하시험은 총 13회의 압축, 인발 및 수평재하시험을 실시하였다. 하중재하방식은 표준 반복 재하 방식을 채택하였으며 침하속도가 시간당 2.54/100cm 이하 일 때 단계하중을 종료하는 방식을 적용하였다.

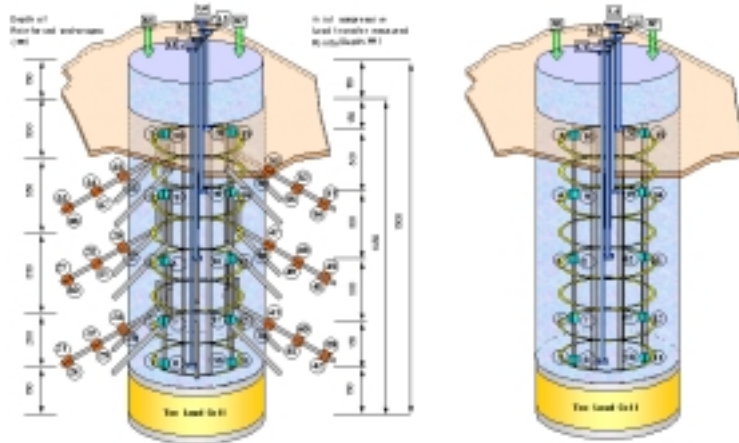


그림 3. 무보강 및 보강형 현장타설말뚝 (1/8 모형)

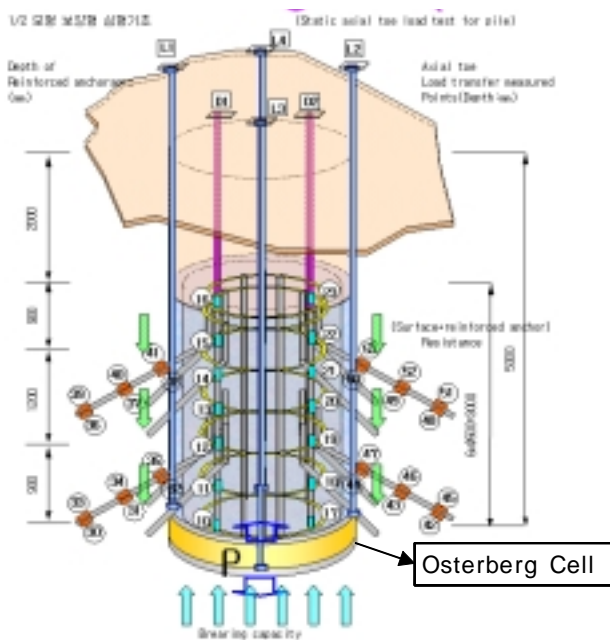


그림 4. 1/2 모형 현장타설말뚝 및 Osterberg Cell

표 7. 기초형식별 현장재하시험 방법

모형축척	형 식	지반조건	압축재하	인발재하	수평재하	계	비고
1/8	보 강	풍화암	1	1	-	2	
	무보강	풍화암	1	1	-	2	
	보 강	연 암	1	3	1	5	
	무보강	연 암	1	1	1	3	
1/2	보 강	연 암	-	1	-	1	Osterberg Cell
계			4	7	2	13	

4.2 1/8 모형 재하시험 결과

4.2.1 보강효과

1/8 모형 재하시험 결과를 통해 soil nail에 의한 보강효과를 분석하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 압축, 인발, 수평 모두 보강재에 의한 지지력 증가 효과가 있었으며 변위 25mm를 기준으로 압축, 수평 재하시험 결과 100% 이상의 보강효과가 나타났다.

4.2.2 주면마찰력 분석

하중 단계에 따른 변위와 주면마찰력을 도시해 본 결과(그림 6), 철타기초와 같은 대규모 현장타설말뚝 설계시 사용되는 주면마찰력 값인 풍화암 10t/m², 연암 15t/m²(한국전력공사 765kV 송전철타기초 표준설계정수)보다 큰 주면마찰력 값을 얻을 수 있었다. 주면마찰력 값의 증가를 통해 현장타설말뚝의 최적설계를 할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 1/2 모형 재하시험 결과

1/2 모형의 인발재하시험으로부터 얻은 하중-변위 곡선은 그림 4와 같으며, 약 25mm의 변위가 발생했을 때 650ton에서 파괴가 일어났다. 극한 상태에서 산정된 주면마찰력 값은 약 38t/m² 이었다. 또한 보강재의 거동을 분석해 본 결과 전체 하중의 약 22%의 하중 분담율을 갖는 것으로 나타났다.

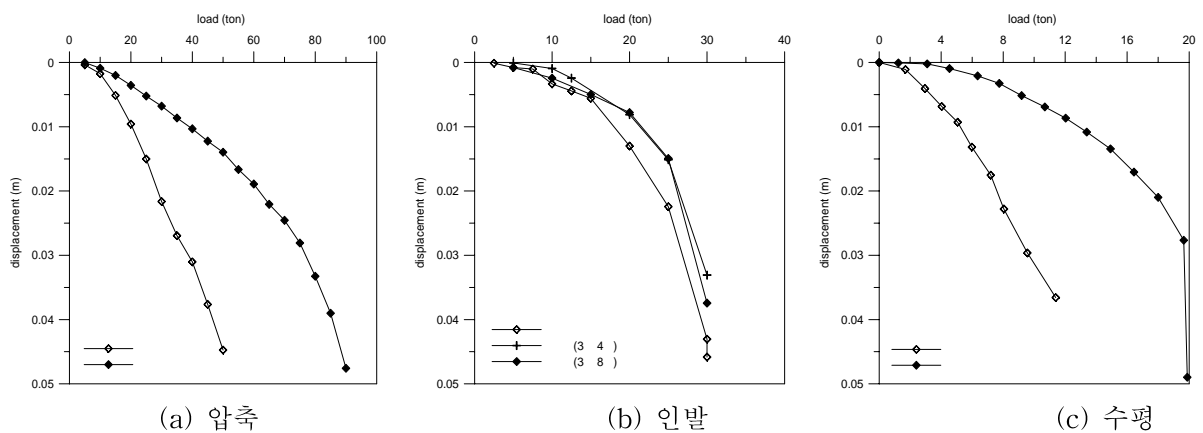


그림 5. 풍화암 재하시험 하중-변위 곡선 (1/8 모형실험)

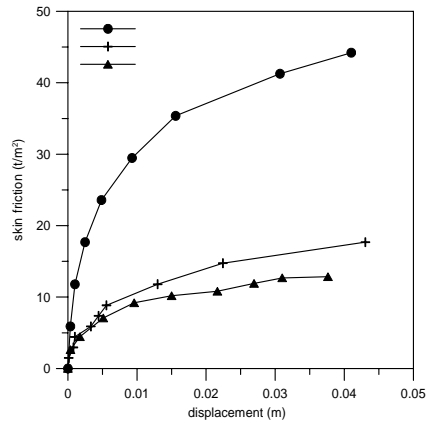


그림 6. 주면마찰력 - 변위 곡선 (1/8 모형실험)

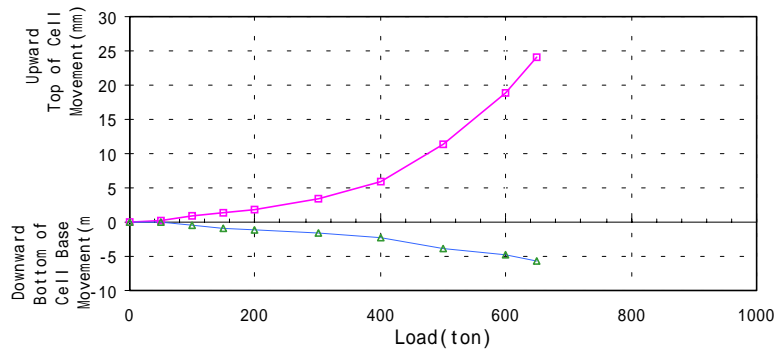


그림 7. 하중-변위 곡선 (1/2 모형 실험)

5. 결론

본 연구에서는 보강형 및 무보강 현장타설말뚝에 대하여 보강효과에 영향을 미치는 인자들인 보강재의 단수, 경사, 배열에 따른 일련의 실내모형실험 및 3차원 수치해석을 수행하였다. 또한 보강효과의 검증과 실제 현장에서의 시공성 및 적용성을 알아보기 위하여 현장재하시험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 무보강 현장타설말뚝의 하중 단계에 따른 변위와 주면마찰력 검토결과, 주면마찰력은 최소 풍화암층에서는 13 t/m^2 , 연암층에선 17 t/m^2 이상 발휘됨을 알 수 있었다
- (2) 실내모형과 수치해석을 통해 보강재 3단, 8개, 40° 경사의 교차배열에서 가장 큰 보강효과가 나타났다.
- (3) 1/8 모형재하실험에서는 압축, 인발, 수평 모두 보강재에 의한 지지력 증가효과가 나타났으며, 변위 25mm를 기준으로 압축 및 수평실험에서는 100% 이상의 보강효과가 나타났다.
- (4) 1/2 모형재하실험에서는 약 25mm의 변위가 발생하였을 때 인발하중 650ton에서 파괴가 일어났으며, 약 22%의 보강재에 의한 지지력 증가효과가 있는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. (2000), ,
2. , (2004), Soil nail , 20 , 1 ,
3. Seidel, J. P., (2002), , 18 , 5 , pp. 281 -293.
4. (1997), .
5. 한국전력공사(2003), 보강형 심형기초 공법개발, 최종보고서.
6. Briaud, J. L.(1992), The Pressuremeter, A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 136-144.
7. Kim, S. I., Jeong, S. S., Cho, S. H., and Park, I. J. (1999), "Shear Load Transfer Characteristics of Drilled Shafts in Weathered Rocks", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmenta Engineering*, ASCE, Vol.125, No.11., pp.999 -1010.
8. California Department of Transportation(1997), Static Pile Load Testing and Dynamic Pile Monitoring, pp. 8.1-8.8.
9. New York Department of Transportation(1999), Static Pile Load Test Manual, Geotechnical Eng. Bureau GCP-18.
10. Hardin, B. O. and Black, W. L.(1966), "Sand Stiffness under Various Triaxial Stresses". *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 92, No. SM2, pp. 27-42.