

모형실험에 의한 선단확장파일의 지지력 특성

Behavior of bearing Capacity of Piles with an Extended Head by Model Tests

유충식¹⁾, Chungsik Yoo, 김선빈²⁾, Sunbin Kim, 이봉원³⁾, Bongwon Lee, 김영훈³⁾, Younghun Kim, 변요셉³⁾, Joseph Byun, 허갑수⁴⁾, Kabsoo Heo, 송기용⁵⁾, Kiyong Song

- 1) 성균관대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ
- 2) 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 3) 성균관대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.
- 4) 극동건설 주식회사 기술연구소 선임연구원, Manager, Kukdong Corporation.
- 5) 이엑스티 유한회사, 대표이사, President, EXT Korea Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this study the behavior of piles with an extended head is investigated experimentally using reduced-scale model tests. Special attention is given to verifying the increase of end bearing capacity of piles with spreading head. Model piles and extended head plates made of steel pipe were used in this study. Bearing capacity of piles is regarded as only end bearing capacity. The study analyzed the tendency of single and group pile of bearing capacity compared with the existing PHC pile, and examined optimum effect of extended head.

Key words : Bearing capacity, Extended head, No-friction, Single pile, Group pile

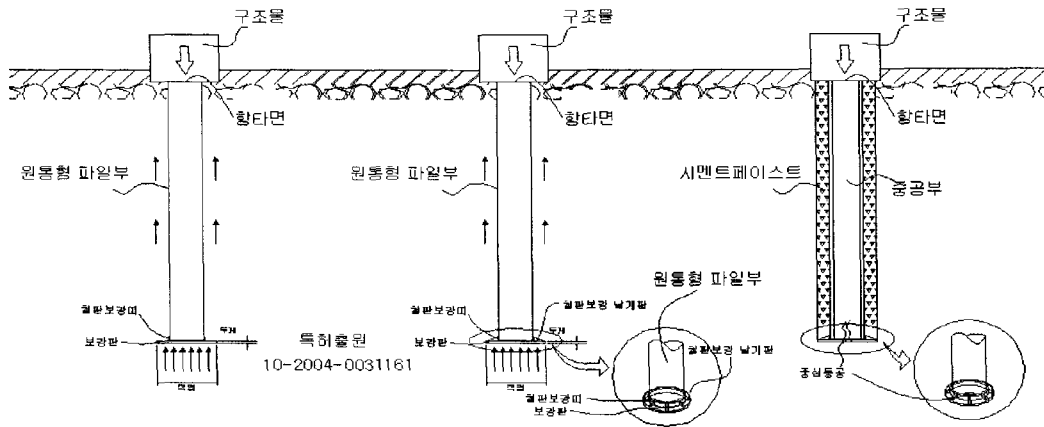
1. 서 론

산업화의 가속 및 경제 성장과 더불어 근래 들어서는 고층빌딩 및 아파트 뿐만 아니라 교량 등의 건축 및 토목 구조물이 대형화, 중량화 되고 있으며, 이러한 이유로 구조물의 하중을 지반에 전달하여 지지하는 말뚝 기초의 시공사례 또한 증가하게 되었다. 한편 국내 지반의 특성상 기반암까지의 깊이가 그다지 깊지 않아 말뚝 선단의 지지력으로 구조물을 지탱하는 선단지지 말뚝이 주를 이루며, 재질상 프리스트레싱(prestressing) 방식으로 제작된 기성 PHC 말뚝(Pretensioned Span High Strength Concrete Piles)으로 가장 일반적으로 사용되고 있다. 이러한 기성 PHC 파일의 경우 파일의 자체 내력 중 50~80% 정도가 설계지지력으로 발현되며, 시공상의 부주의 및 기타 영향 요인에 의해 그 이하의 지지력을 나타내는 경우도 있다.

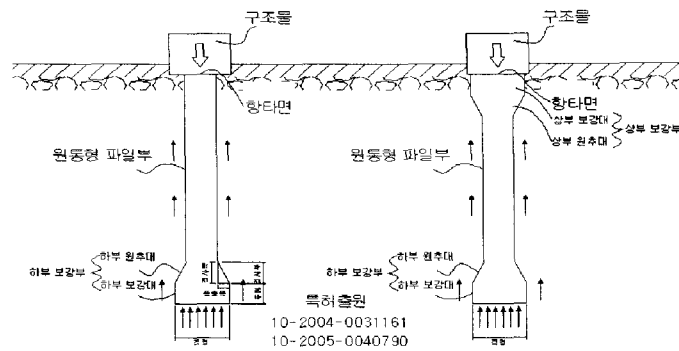
이러한 맥락에서 기성 PHC 파일의 지지력을 개선하고자 파일의 선단면적을 확장하여 선단지지력을 증가시킨 EXT-Pile(Pile with an Extended Head)이 개발되었으며, 본 연구에서는 EXT-pile의 시공방법 중 선굴착 후 항타 공법에 적용되는 선단 확장형 파일에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 본 연구에서 대상으로 하는 EXT-pile의 시공방법 및 과정은 다음과 같다. PHC 파일에 선단을 확장할 수 있는 방법은 PHC 파일에 보강띠를 구성하고 선단부에 철판을 붙이는 방법과 PHC 파일을 일체로 제작하는 방법이 있을 수 있으며, 시공은 선굴착 후 시멘트 페이스트를 근입하고 파일을 관입시켜 최종 경타로서 파일의 침하량을 측정하여 품질을 유지한다. 또한 말뚝의 효율적인 안착을 위하여 하단부에 적정 흙을 두고 상부 면이 항타될 수 있도록 제작하고 이를 현장에 적용하고 있다.

본 연구에서는 개발된 EXT-Pile을 이용하여 선단확장형 파일의 지지력 거동특성을 연구하였다. 본 연구에서는 지지력 거동 특성을 규명하기 위해 실내모형실험을 수행했으며 구체적인 본 연구의 목적은

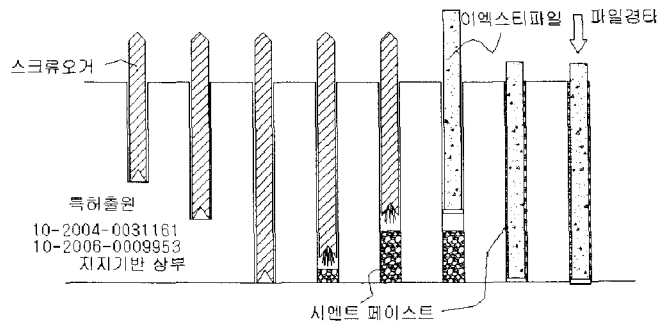
선단확장형 파일의 선단 확장크기에 따른 선단지지력 증가경향 분석, 매입식 선단확장형파일의 군말뚝의 선단 지지력 경향분석 최적의 선단확장 효과분석을 검토하였다.



(a) Ext-ST1 PILE



(b) Ext-CON1 PILE



(c) 선굴착 후향타공법

그림 1. 선단 확장형 파일 시공방법 및 과정 (예)

2. 모형실험의 제원 구성요소 및 실험방법

2.1 모형실험의 제원 및 구성요소

그림 2~그림5는 본 연구에서 사용한 모형실험장치와 실험 방법을 보여주고 있다. 토조는 1,800mm

× 780mm × 1,200mm(가로×세로×높이)의 크기로 30mm 두께의 아크릴판으로 제작하였으며 토조내 지반조성 및 하중재하시 변형이 발생하지 않도록 강재로 측벽부를 보강하였다

모형파일은 하중재하시 말뚝자체의 탄성변형과 주변마찰력이 배제된 선단확장 효과가 선단지저력을 통해서 반영될 수 있도록 강성이 크고 표면이 매끈한 강관으로 제작하였다. 파일 제원은 직경 50mm, 두께 5mm, 길이 620mm이 파일과 직경100mm, 두께 5mm, 길이 620mm이며 현장에 적용되는 선단확장형파일의 선단확장판을 고려하여 선단확장판을 축소하여 제작하였다.

표 1. 모형 파일 및 선단확장판 제원

구분	모형파일			선단확장판					
	직경 (mm)	길이 (mm)	두께 (mm)	외경 (mm)	내경 (mm)	두께 (mm)	길이 (mm)	지압면적 (mm ²)	초기면적 비율(%)
제원	50	620	5	50	20	15.0	10	1648	100
				55	20	17.5	10	2060	125
				60	20	20	10	2374	152
				55	30	1.25	10	1668	81
					25	1.5	10	1884	90
					20	17.5	10	2060	100
					15	2	10	2198	107
				0	55	10	1257	152	
	100	100	70	15	10	4003	100		
		110	70	20	10	5652	141		
		120	70	25	10	7457	186		
		110	80	15	10	4474	79		
			70	20	10	5652	100		
			60	25	10	6672	118		
			50	30	10	7536	133		
		0	110	10	9498	168			

구체적인 모형파일의 제원 및 선단확장판의 제원은 표 1과 같다. 모형지반은 그림 4(a)의 강사장치를 이용하여 주문진 표준사를 1.8m 높이에서 강사하여 상대밀도 85% 정도가 되도록 조성하였다. 하중재하는 유압실린더와 연결봉, 조인트 구좌, 재하판, 파일을 일체화 시킨후 변위 제어로서 1mm/min의 속도로 재하하였다. 계측은 그림 5에서 보이는 바와 같이 파일재하판과 연결봉 사이에 위치한 로드셀(10ton 용량)을 이용하여 재하하중을 측정하였으며, 파일 재하판에 2개의 LVDT를 위치시켜 침하량을 측정하였다.

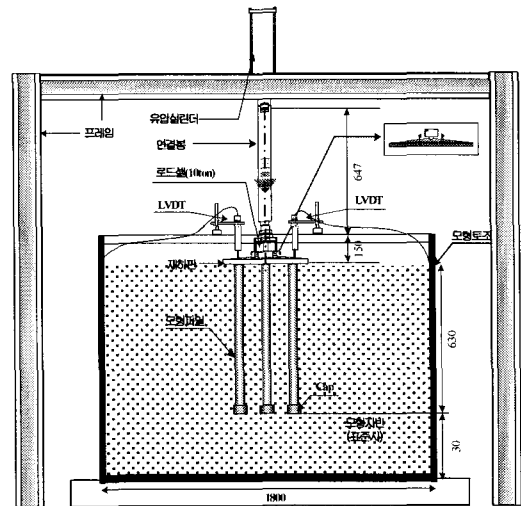


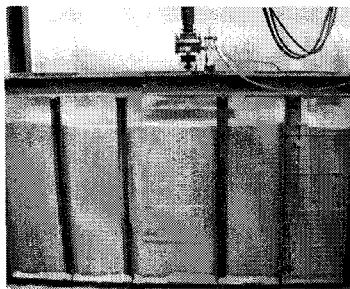
그림 2. 모형실험장치 모식도(단위, mm)

2.2 실험 방법

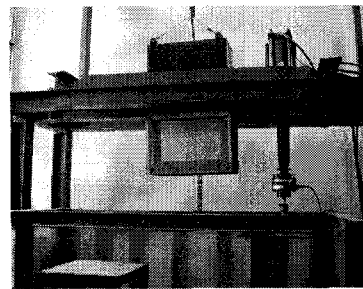
그림 3는 모형실험의 과정에 대하여 정리하고 있으며, 모든 실험은 2회 이상의 반복실험을 실시하여 반복성을 확보하였다. 그림 4은 강사장치 및 지반조성 후의 LVDT가 설치된 모습이며 그림 5는 계측 장비로서 로드셀 및 재하장치가 구좌에 의해 일체화된 모습과 변위제어를 위하여 LVDT를 설치한 모습이다.

파일거치	· 파일재하장치 일체화 후 파일선단이 바닥에서 30cm 상부에 위치하도록 거치
모형지반 조성	· 지지력에 가장 중요한 영향을 미치는 파일선단 위치까지 균질하게 강성한 후 파일 거치 · 파일 선단 상부지반 성토 · 지반의 균질성 확보를 위하여 20cm 성토시 마다 벽체에 20회씩 타격 하여 지반을 조성 · 편심을 확인하기 위하여 LVDT를 2개설치
하중재하	· 유압을 이용하여 변위제어로 하중재하 (1mm/min) · 로드셀, LVDT 및 Data Logger를 이용하여 계측

그림 3. 모형실험 순서



(a) 강사장치



(b) 파일 및 모형지반 조성후 모형실험장치

그림 4. 모형지반 조성후 모형실험장치

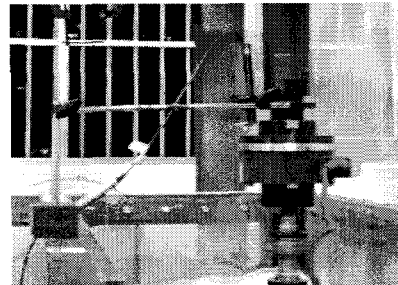
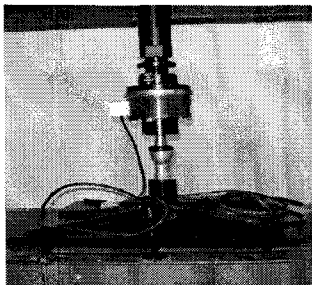


그림 5. 계측장비

3. 예비 실험

본 모형실험에서 사용한 모형파일은 주면마찰로 인한 영향을 최소화하고 선단확장에 따른 영향만을 분석하기 위하여 표면이 매끈한 강관으로 제작하여 주면마찰력의 영향이 매우 적을 것으로 예상하였다. 이에 대한 확인을 위해 모형말뚝에 하중재하시 주면마찰력이 유발되는지 여부를 분석하기 위하여 본 절에서는 그림 6과 같이 파일 표면에 사포를 붙여 벽체와 지반간에 주면마찰이 충분히 확보된 경우와 두개의 비닐층 사이에 그리스를 칠하여 벽체와 지반간에 마찰이 거의 발생하지 않은 경우의 두 조건에 대하여 모형파일의 지지력을 비교하였

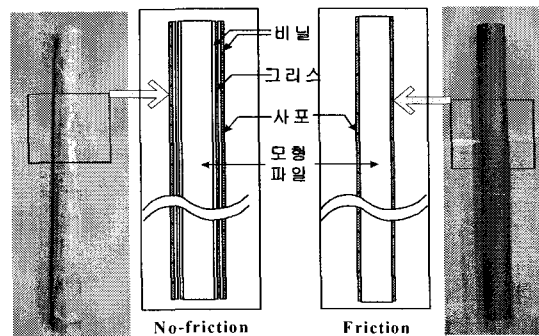


그림 6. 모형 파일

다. 이 결과를 표 2에서 보이는 바와 같이 모형파일의 지지력은 비닐을 설치한 no-friction에 근접한 결과를 주는 것으로 나타나 주면마찰력은 무시할 수 있는 것으로 사료된다.

표 2. 모형파일의 주면마찰로 인한 효과 분석결과

파일 조건	지지력 산정법	항복하중 증감
비닐설치	P-S 곡선법	121kg → 116kg (100% → 96%)
	Log P - Log S 곡선법	99kg → 99kg (100% → 100%)
	침하(10mm)를 이용한 방법	128kg → 119kg (100% → 93%)
사포설치	P-S 곡선법	121kg → 150kg (100% → 124%)
	Log P - Log S 곡선법	99kg → 115kg (100% → 116%)
	침하(10mm)를 이용한 방법	128kg → 158kg (100% → 123%)

4. 선단 확장에 따른 지지력 변화경향

기성 PHC 말뚝의 지지력을 개선하고자 말뚝의 선단면적을 확장시킨 선단확장형파일의 선단확장에 따른 지지력 증가효과를 분석하기 위하여 단일말뚝 50mm와 100mm에 대하여 실험을 실시하였으며 또한 군말뚝에 대해 50mm와 100mm에 대하여 2×2와 3×3의 재하실험을 수행하였다.

4.1 단일 말뚝의 선단확장 효과

그림 7은 단일말뚝의 선단확장에 따른 하중-침하량 곡선을 나타내고 있으며, 이 결과를 토대로 P-S 곡선법과 LogP-LogS 곡선법을 이용하여 산정한 지지력 변화경향을 그림 8에서 정리하고 있다. 보이는 바와 같이 분석법에 따라 지지력은 다소 차이가 나타나나 선단확장에 따라 증가하는 경향을 보여 선단 확장판의 직경이 50mm에서 55mm, 60mm로 증가시, 지지력은 각각 23%, 37% 가량 증가하는 것으로

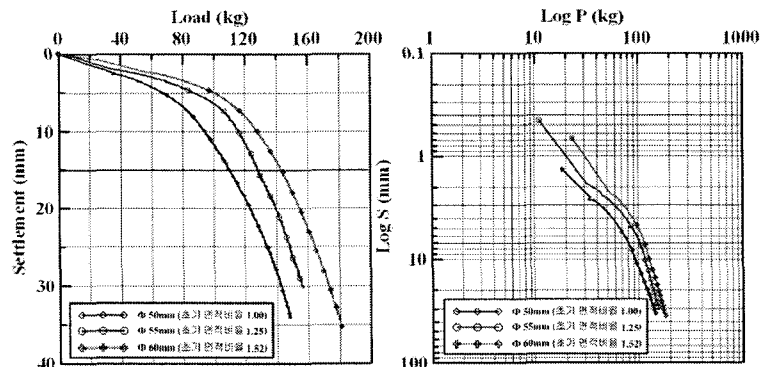


그림 7. 단일말뚝의 55mm선단확장에 따른 하중-침하량 곡선

나타났으며 파일 직경 100mm에 선단 확장판의 직경을 100mm에서 110mm, 120mm로 증가시 역시 지지력은 각각 33%와 99% 증가 하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 파일직경의 확대 없이 선단 확장판만의 크기를 증가시킴으로써 선단지지력의 증가를 기대할 수 있음을 보여주는 것으로서 현장적용시 원가절감에 효과적일 것으로 사료된다.

표 3. 단일말뚝의 선단확장 시 항복하중 산정 결과

구분		P-S 곡선법(kg)	LogP - LogS 곡선법(kg)	침하량 분석법(kg)
선단직경	초기 면적비율			
Φ 50mm	1.00	88	78	94
Φ 55mm	1.26	107	99	116
Φ 60mm	1.52	121	99	128
Φ 100mm	1.00	142	125	157
Φ 110mm	1.41	196	185	210
Φ 120mm	1.86	282	264	310

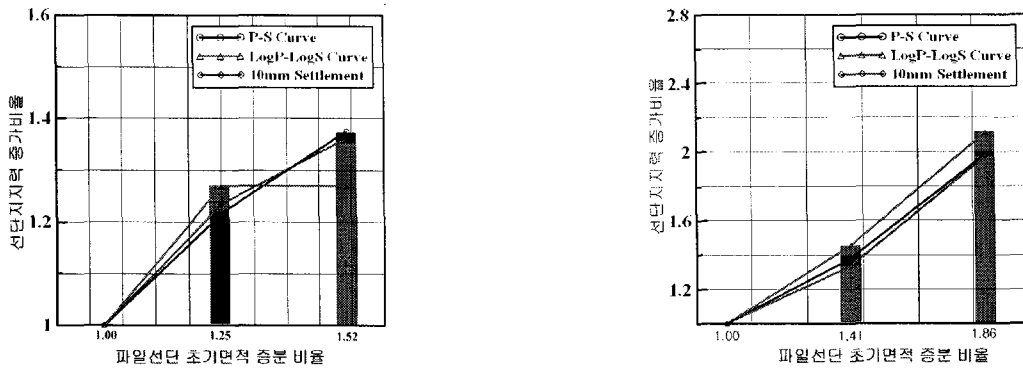


그림 8. 단일말뚝의 선단확장에 따른 지지력 증분

4.2 군말뚝의 선단확장 효과

그림 9는 50mm와 100mm파일의 2×2, 3×3 군말뚝의 선단을 20% 확장한 경우에 대한 하중-침하량 곡선을 나타내고 있으며, 이 결과를 토대로 산정한 지지력 변화경향을 표 4와 그림 10에서 정리하고 있다. 그림 10에서 보이는 바와 같이 군말뚝에 있어서도 선단이 확장되는 경우 지지력이 증가하는 경향을 보여 선단 확장판의 직경이 20% 증가시 지지력은 각각 50mm파일은 20%~40% 100mm파일은 96%~167% 가량 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 단일말뚝에서 뿐만이 아니라 군말뚝에서도 선단확장으로 인한 지지력을 충분히 확보할 수 있을 것으로 기대되어 현장적용에 유용할 것으로 판단된다.

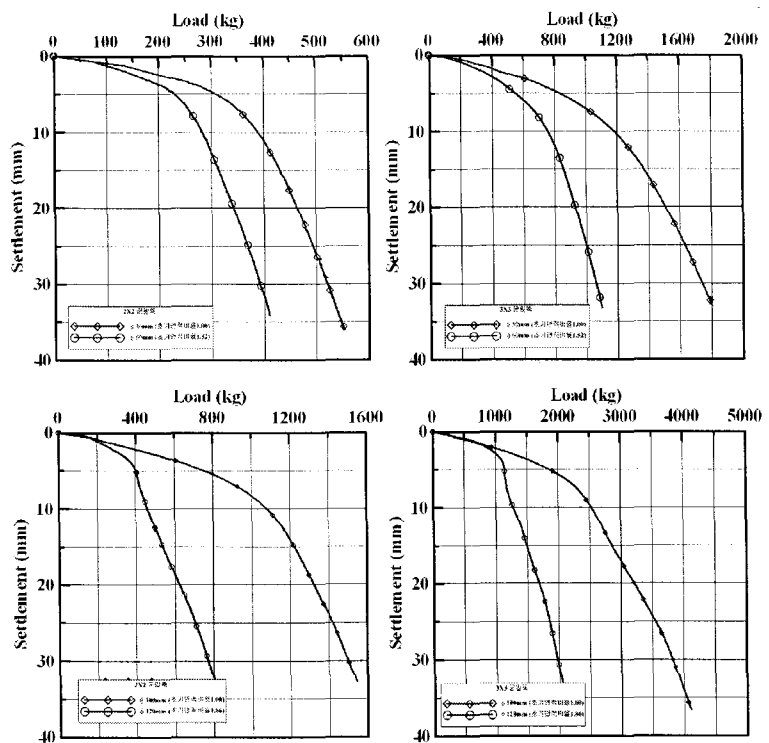


그림 9. 군말뚝의 선단확장에 따른 하중-침하량 곡선

표 4. 군말뚝의 선단확장시 항복하중 산정 결과

말뚝갯수	구분		P-S 곡선법 (kg)	LogP - LogS 곡선법(kg)	침하량 분석법 (kg)	효율
	선단직경	초기면적 비율				
2×2	φ 50mm	1.00	285	220	280	0.8097
	φ 60mm	1.52	353	290	345	0.7293
3×3	φ 50mm	1.00	705	690	708	0.8902
	φ 60mm	1.52	1003	1010	960	0.9210
2×2	φ100mm	1.00	392	354	462	0.6901
	φ120mm	1.86	1048	970	1050	0.9291
3×3	φ100mm	1.00	1200	1100	1250	0.9389
	φ120mm	1.86	2350	2240	2520	0.9259

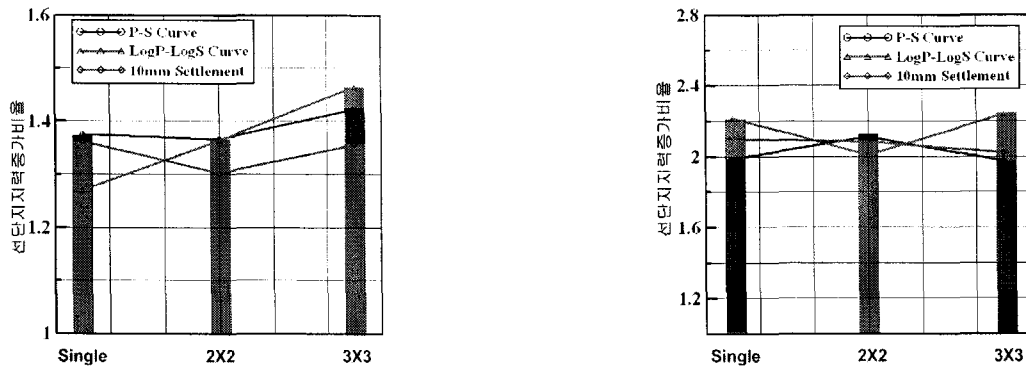


그림 10. 55mm와 100mm말뚝의 선단 확장시 군말뚝의 지지력 증분

5. 선단폐색이 지지력에 미치는 영향

선단확장형파일의 지지력 산정시 개방된 부분에 대한 면적을 고려하여야 하는데 이에 대한 고찰을 위해 선단폐색이 지지력에 미치는 영향을 고찰하였다.

5.1 단일말뚝의 선단폐색 효과

그림 11은 단일말뚝의 선단확장시 폐색여부에 따른 하중-침하량 곡선을 나타내고 있으며, 이 결과를 토대로 산정한 지지력 변화경향을 표 8~표 9와 그림 12에서 정리하여 보이고 있다. 그림 12의 그래프에서 보이는 바와 같이 선단확장시 폐색에 대한 지지력은 50mm 말뚝의 경우 영향은 10% 이내로 나타나 크지 않은 것으로 분석되었으며 100mm 말뚝의 경우 30%~60%로 나타나는 것을 확인하였다. 100mm 파일의 경우 내경의 면적 증분량이 크며 폐색시 작업의 난이도와 선단확장시 지지력 증분량을 고려한다면 폐색의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

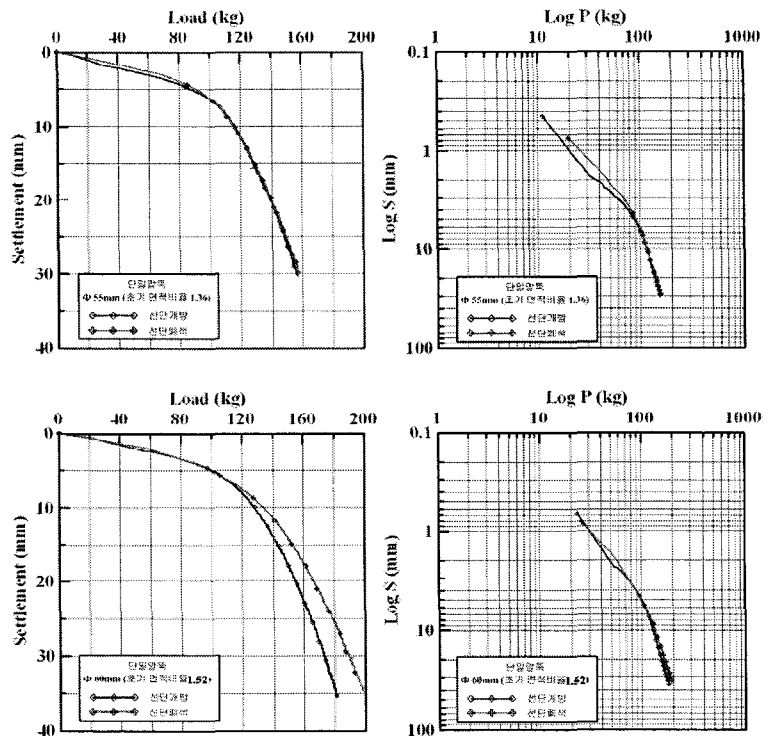


그림 11. 단일말뚝의 선단폐색 여부에 대한 하중-침하 곡선(φ50mm)

표 8. 단일말뚝의 선단폐색 효과

구분		지지력 산정법	항복하중 증분
선단직경	초기면적비율		
φ50mm	1.00	P-S 곡선법	88kg → 103kg (100% → 117%)
		Log P - Log S 곡선법	78kg → 89kg (100% → 114%)
		침하(10mm)를 이용한 방법	94kg → 108kg (100% → 115%)
φ55mm	1.25	P-S 곡선법	98kg → 110kg (100% → 112%)
		Log P - Log S 곡선법	89kg → 99kg (100% → 111%)
		침하(10mm)를 이용한 방법	109kg → 116kg (100% → 1.06%)
φ60mm	1.52	P-S 곡선법	121kg → 132kg (100% → 109%)
		Log P - Log S 곡선법	99kg → 99kg (100% → 100%)
		침하(10mm)를 이용한 방법	128kg → 134kg (100% → 105%)

표 9. 단일말뚝의 선단폐색 효과

구분		지지력 산정법	항복하중 증분
선단직경	초기면적비율		
φ100mm	1.00	P-S 곡선법	142kg → 215kg (100% → 151%)
		Log P - Log S 곡선법	125kg → 188kg (100% → 150%)
		침하(10mm)를 이용한 방법	157kg → 242kg (100% → 154%)
φ110mm	1.41	P-S 곡선법	196kg → 310kg (100% → 158%)
		Log P - Log S 곡선법	182kg → 293kg (100% → 161%)
		침하(10mm)를 이용한 방법	210kg → 340kg (100% → 1.62%)
φ120mm	1.86	P-S 곡선법	282kg → 410kg (100% → 145%)
		Log P - Log S 곡선법	264kg → 380kg (100% → 144%)
		침하(10mm)를 이용한 방법	310kg → 414kg (100% → 134%)

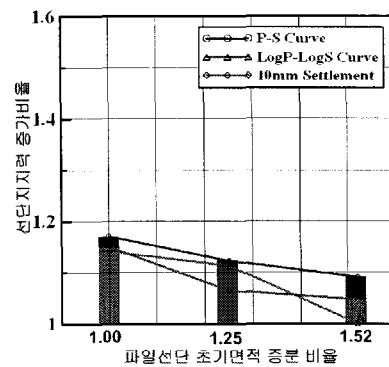
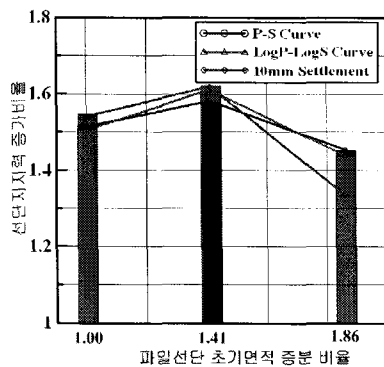


그림 12. 단일말뚝의 선단폐색에 따른 지지력 증가경향

5.2 군말뚝의 선단폐색 효과

2×2, 3×3 군말뚝의 선단확장시 폐색여부에 따른 하중-침하량 증가는 크지 않은 것으로 나타났다. 이 결과를 토대로 산정한 지지력 변화경향을 표 10과 그림 13에서 정리하고 있다. 보이는 바와 같이 군말뚝에서 선단확장시 폐색에 대한 지지력의 영향은 10% 내외로 단일말뚝의 경우와 마찬가지로 그다지 크지 않은 것으로 평가되었다.

표 10. 군말뚝의 선단폐색 효과

말뚝갯수	파일 직경		지지력 산정법	항복하중 증분
	선단직경	초기면적비율		
2×2	φ50mm	1.00	P-S 곡선법	285kg → 270kg (100% → 95%)
			Log P - Log S 곡선법	220kg → 230kg (100% → 105%)
			침하(10mm)를 이용한 방법	280kg → 290kg (100% → 104%)
	φ60mm	1.52	P-S 곡선법	353kg → 380kg (100% → 108%)
			Log P - Log S 곡선법	290kg → 305kg (100% → 105%)
			침하(10mm)를 이용한 방법	345kg → 390kg (100% → 113%)
3×3	φ50mm	1.00	P-S 곡선법	705kg → 760kg (100% → 108%)
			Log P - Log S 곡선법	690kg → 690kg (100% → 100%)
			침하(10mm)를 이용한 방법	708kg → 785kg (100% → 111%)
	φ60mm	1.52	P-S 곡선법	1003kg → 1130kg (100% → 113%)
			Log P - Log S 곡선법	1010kg → 1000kg (100% → 99%)
			침하(10mm)를 이용한 방법	960kg → 1130kg (100% → 118%)

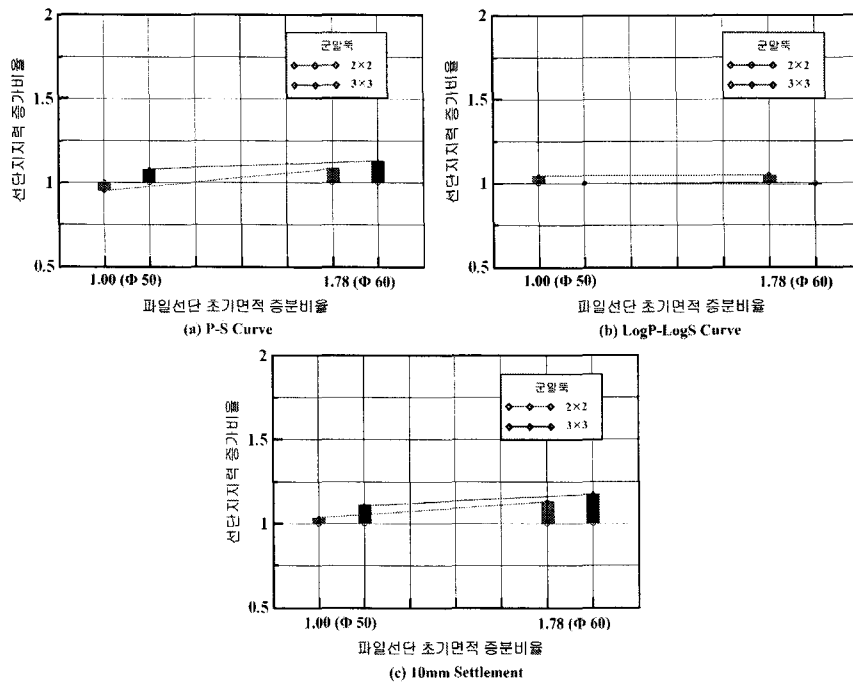


그림 13. 군말뚝의 선단폐색에 따른 지지력 증가경향

이상과 같은 결과에 의하면 본 실험에서 고려한 선단확장형 말뚝의 폐색효과는 본 실험조건에 있어서 그다지 크지 않은 것으로 나타났다.

6. 결론

1:8 비율로 축소로 한 모형실험을 통해 선단확장형파일의 선단확장 효과를 정성·정량적으로 분석하였으며, 선단 개방 혹은 폐색 효과가 지지력에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 또한 시험 결과를 종합하여 기존 지지력 산정식으로 산정된 지지력과의 비교를 통해 기존의 계산식의 선단확장형파일의 지지력 산정시 적용성을 고찰하였다.

- 1) 모형실험결과 단일/군말뚝에서 선단확장의 영향은 지지력 산정방법에 따라 다소의 차이는 있으나 50mm 파일 선단의 초기면적비율(100~152%)에 따라서 1.2~1.4배 정도의 지지력을 확보할 수 있으며 100mm 파일은 선단의 초기면적비율(100~181%)에 따라서 2배~2.7배 정도의 지지력이 확보되는 것으로 나타났다.
- 2) 모형실험에서 발생할 수 있는 치수효과를 고려할 때 선단면적 대비 지지력 증가율을 정량적으로 제시하기는 어려우나 말뚝의 직경 증가 없이 선단만을 확장함에 따라 20~170% 정도의 지지력 증가를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 본 실험조건의 제한성을 고려할 때 결론을 내리기는 어려우나 본 모형실험에서 관찰된 경향은 앞으로 본 연구에서 시도할 지지력 산정식의 개선을 시도할 때 방향을 제시해 주는 것으로서 실험에서 얻어진 선단확장 효과는 현재 제시된 지지력 산정식을 수정·보완하여 설계에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.
- 5) 모형실험을 통해 나타난 선단확장형 말뚝의 폐색효과는 10% 내외의 지지력 증가로 나타나 그다지 크지 않은 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 (주)극동건설과 EXT(유)의 지원에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2003) 구조물 기초설계기준
2. Janbu, N. (1953). "An Energy Analysis of Pile Driving with Use of Dimensionless Parameter", *Norwegian Geotechnical Institute*, Oslo, Publication No. 3.
3. Meyerhof, G. G. & Adams, J. I. (1968). "The Ultimate Capacity of Foundations", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 5, No. 4, pp. 225~244.
4. Meyerhof, G.G. (1976). "Bearing capacity and settlement of pile foundations," *ASCE J. Geot.*, Vol. 102, No. GT3, pp. 197~228.
5. Peck, R. B., Hanson, W. E. & Thornburn, T. H. (1953), *Foundation Engineering*.