

선단확장형 PHC 말뚝

송기용*, 허갑수**, 유충식**

1. 개요

산업화의 가속 및 경제 성장과 더불어 건축 및 토목구조물이 대형화, 중량화 되어 가는 경향으로 인해 구조물의 하중을 지반에 전달하여 지지하는 깊은 기초 중 말뚝기초가 많이 이용되고 있다. 국내의 경우 풍화대가 비교적 발달되어 있고, 기반암의 깊이가 그다지 깊지 않은 지반 특성상 말뚝 선단의 지지력으로 구조물을 지탱하는 선단지지말뚝이 주를 이루고 있다. 그러나 예전과는 달리 민원이나 지반 특성으로 인해 직타공법에 의한 말뚝공사가 불가한 경우가 최근 들어 급증하면서 말뚝공사비는 시공주체로 하여금 고민의 대상이 아닐 수가 없게 되었다. 때문에 원가절감, 공기단축, 품질향상 등의 경제성 확보를 위한 방안으로 재료나 구조, 시공방법 등을 개선한 특수말뚝 및 신공법에 관한 기술개발이 활발히 진행되고 있다(이명환 등 1995a).

기성말뚝의 시공에 있어 기존의 직향타 공법은 소음 및 진동 등 건설공해 요인으로 인해 민원 등의 문제가 발생하는 경우가 많아 이를 해결하기 위해 선굴착 후 말뚝을 매입하는 공법이 적용되고 있다. 매입공법은 일반적으로 시멘트페이스트 주입여부에 따라 선굴착 및 최종향타공법과 시멘트페이스트 주입공법으로 구분되나 시멘트페이스트 주입공법이 주로 사용되고 있다. 시멘트페이스트 주입공법은 선굴착시 케이싱 사용여부 및 말뚝을 지지층에 안착시키는 방법에 따라 SIP, SDA, COREX 공법들로 구분되며 이러한 공법을 적용할 경우 정밀시공을 통한 품질관리가 지지력 확보 측면에서 매우 중요한 부분을 차지한다(이명환 등 1995b). 즉, 매입말뚝은 선굴착 후 말뚝을 설치하는 시공법의 특성상 선단 및 주면지반의 교란효과로 인해 동종 직향타 말뚝에 비해 선단 및 주면지력이 30~50%정도만 발휘되는 것으로 보고되고 있으며 특히 시멘트페이스트 주입과정에서의 철저한 시공관리가 필요하다. 한편, 시공관이 철저히 된 매입말뚝의 지지력은 주면마찰력이 상당한 부분을 차지하나 시멘트페이스트 주입에 따

* 이엑스티유한회사 대표이사

** 비회원, (주)국동건설 기술연구소 선임연구원

** 성균관대학교 토목환경공학과 교수(csyoo@skku.edu)

선단확장형 PHC 말뚝

른 시공 품질 상태에 따라 주면지지력의 발현정도가 결정되므로 설계/시공시 주면지지력이 충분히 발현될 것이라는 확신을 가지고 이를 지지력 산정시 반영하기가 상당히 어려우며 따라서 선단지지력이 매우 중요하게 간주되고 있다.

이러한 맥락에서 최근 들어 매입공법으로 시공되는 PHC 말뚝의 지지력 증진 방안으로서 선단에 선단확장판을 설치하여 선단 확장을 통해 선단지지력을 증가시키는 개념(일명 EXT-Pile)이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 본 원고에서는 EXT-Pile의 개념과 현장재하시험 결과를 소개하고자 한다.

2. EXT-Pile 개요

EXT-Pile은 그림 1에서와 같이 PHC 말뚝의 선단에 두께 17mm의 강철판(SS400)으로 제작된 선단보강판을 용접으로 부착하여 선단을 확장하는 개념을 적용하고 있다. 선단확장판의 제원은 그림 2에 정리되어 있는 바와 같이 PHC 말뚝의 직경에 따라 달라지게 되나 근본적으로 말뚝의 직경이 총 50mm가 늘어나는 형태로 되어 있다. 따라서 EXT-Pile 말뚝의 두께를 고려한 선단의 순단면적은 말뚝의 직경에 따라 PHC 말뚝 대비 56~77% 증가하게 된다(표 1).

EXT-Pile 말뚝의 시공은 매입말뚝의 형태로 시

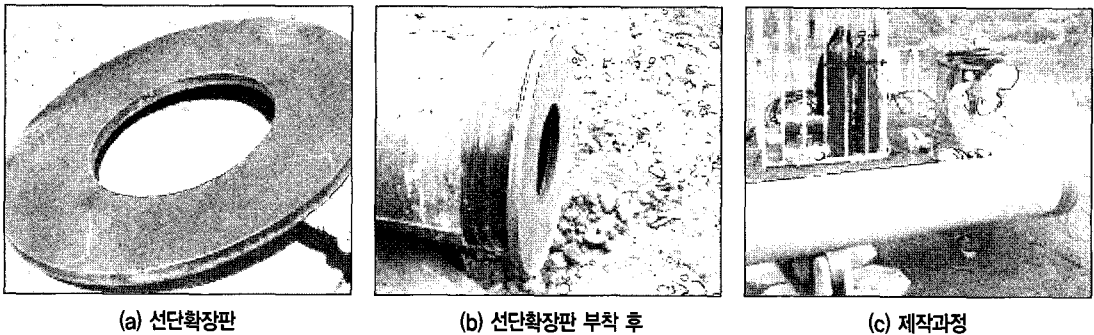


그림 1. EXT-Pile에 적용되는 선단확장판 및 제작과정

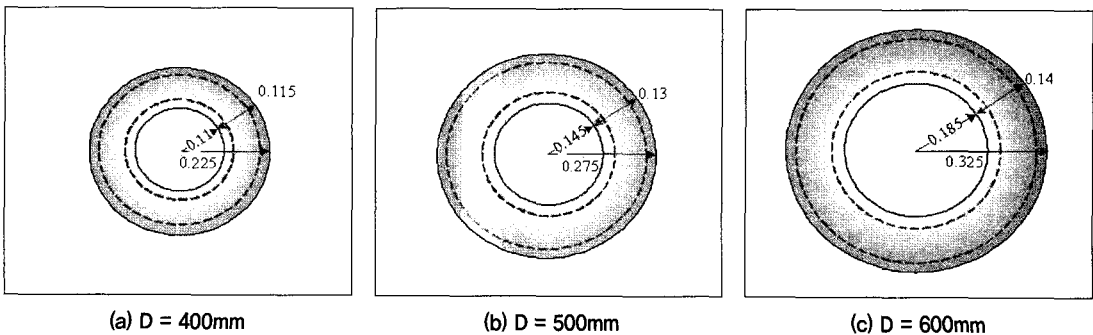


그림 2. PHC 말뚝 직경별 선단 확장판 제원

표 1. PHC 말뚝과 EXT-Pile의 제원

말뚝 직경 (mm)	PHC		EXT			
	말뚝 벽 두께 (mm)	순단면적 (cm ²)	내·외측 확정폭 (mm)	선단외경 (mm)	순단면적 (cm ²)	순단면적 증가율 (%)
400	65	684	25	450	1,210	177
500	80	1,055	25	550	1,714	163
600	90	1,044	25	650	2,242	156

표 2. PHC 말뚝과 EXT-Pile의 시공순서 비교

PHC	EXT-Pile
① Leader의 수직도 확인, 오거로 굴착	① 좌 동
② 일정 깊이까지 굴착 (N치 50/10 이하)	② Ext-Pile의 종류에 따라 굴착 깊이 조절 (N치 50/20~6 해당)
③ Cement Paste 주입시 오거로 선단교반 (Slime 제거 포함)	③ 제자리에서 고압분사(약20~30초)로 Slime제거 (오거로 선단교반 금지)
④ Cement Paste 주입하며 오거 인발	④ 좌 동
⑤ 자중에 의한 말뚝 침설	⑤ 말뚝 침설 전 선단부 청소 후 말뚝 침설
⑥ 경타로 허용 오차 이내 타입	⑥ 좌 동

공되는 기존 PHC 말뚝 시공방법과 동일하나 표 1에 정리된 바와 같이 선굴착 후 시멘트페이스트 주입 시 고압분사로 선단부 슬라임을 제거하여 선단부 지지층이 교란되는 것을 최소화하도록 하는데 주안점을 두고 있다.

3. 현장재하시험

현장 말뚝 시공조건에서 EXT-Pile의 선단지저력 증진 효과를 보다 구체적으로 확인하기 위해 직경 400mm의 기성 PHC 말뚝과 EXT-Pile을 시험시공하고 이에 대한 동재하 및 정재하시험을 수행하였다. 본 장에서는 현장재하시험에 대한 개요와 그 결과를 소개하고자 한다.

3.1 현장시험 개요

현장재하시험은 재하시험을 보다 수월하게 관리하고 진행하기 위해 시험시공 측면에서 현장관리가 용이한 부지인 경기도 수원시 장안구 천천동에 소재한 성균관대 소재 지반시험장에서 수행하였다. 성균관대 지반시험장의 크기는 약 225m²(15m×15m)로서 총 6본에 대한 시험시공이 가능한 공간을 확보하도록 하였다. 한편, 현장재하시험을 원활히 수행할 수 있도록 주변 정지작업 후에 말뚝시공 장비 및 재하시험 장치를 반입하여 현장재하시험을 수행하였다.

시험말뚝의 타설에 앞서 지반시험장의 지질특성 파악을 위해 시추조사를 실시하였다. 시추조사는 시추기(OP-200)를 이용하여 BX사이즈로 수행하였으며, 조사 결과 대상 지층은 상부에 조밀한 상태의 모래질 점토 및 실트질 매립층이 위치하고 그 하부에는 조밀하게 형성된 풍화잔류토가, 그리고 그 아래에 풍화암 내지 연암이 위치하는 것으로 나타났다. 시추조사로부터 작성된 표준관입시험결과와 주상도(그림 3) 분석결과 깊이 4~5m에 위치하는 매립층

선단확장형 PHC 말뚝

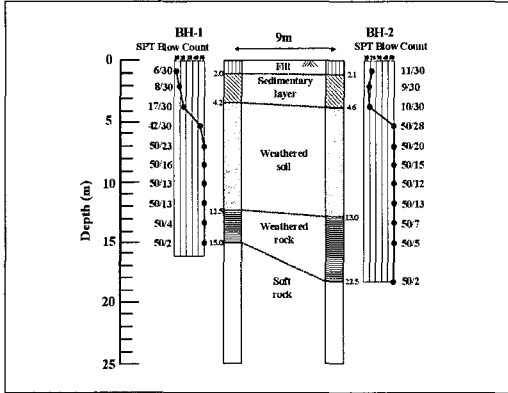


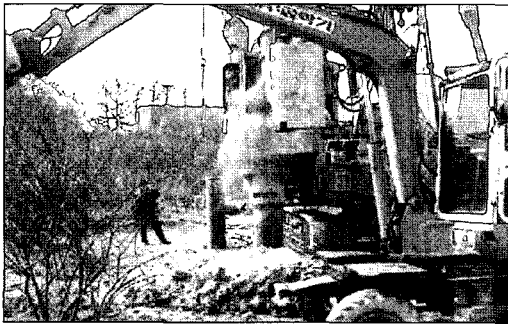
그림 3. 재하시험 현장부지의 주상도

/퇴적층은 10내외의 N치를 보였으며 그 하부 약 8~9m의 두께로 위치하는 풍화토는 50/30~50/15 정도로서 매우 조밀하게 형성되어 있는 것으로 조사 되었다. 한편, GL-12m 정도에 위치하는 암반층은 N치가 50/10 이상으로 조사되었다.

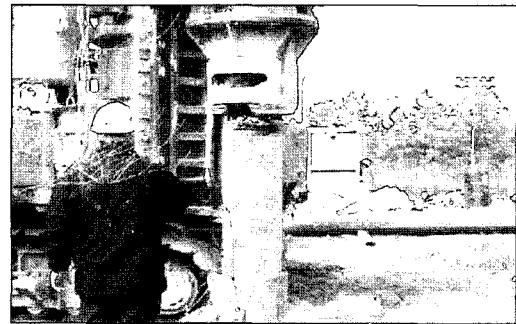
시험말뚝으로는 A-Type 직경 400mm 말뚝의 기성 PHC 말뚝(PHC400)과 PHC400에 선단보강판을 장착한 EXT-Pile(EXT400)을 대상으로 하였다. 말뚝 타설 본수는 PHC400, EXT400 각각 3본씩 설치 하였으며 N치 50/10이상의 풍화암에 안착시키는 것

표 3. 시험말뚝 제원(기성 PHC 말뚝)

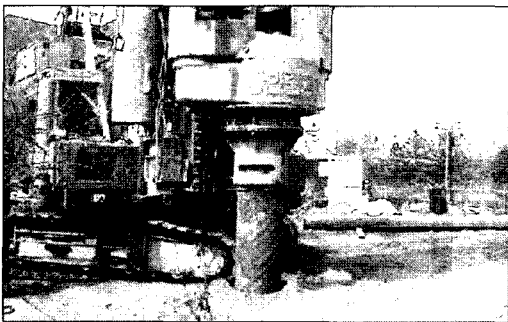
외경 D (mm)	두께 t (mm)	종별	콘크리트 단면적 Ac (cm ²)	환산단면적 As (cm ²)	허용 축방향 하중 Pa (ton)
400	65	A-Type	684	704	112



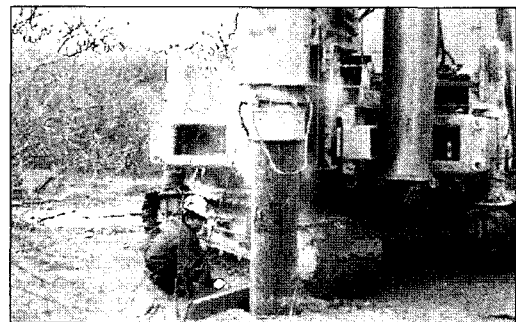
(a) 오거 천공 및 케이싱 삽입



(b) 시멘트 밀크 주입 및 말뚝 근입



(c) 케이싱 인발



(d) 말뚝 경타

그림 4. 시험말뚝 시공과정

으로 하였다. 말뚝 설치 후 측정된 관입깊이는 PHC 400 및 EXT400 공히 약 13m 정도가 되는 것으로 나타났다. 표 3은 본 재하시험에 적용된 PHC 말뚝의 제원을 정리하고 있다.

시험말뚝은 선굴착 후 케이싱과 함께 말뚝을 설치하고 케이싱 인발 후 최종 경타를 실시하는 일명 SDA공법으로 시공하였다. 표 2와 그림 4는 말뚝 시공 순서를 정리 요약하고 있다. 보이는 바와 같이 먼저 DH508-105M 장비의 오거를 이용하여 50/10 이상의 풍화암 내지 연암층 위치까지 천공을 하였

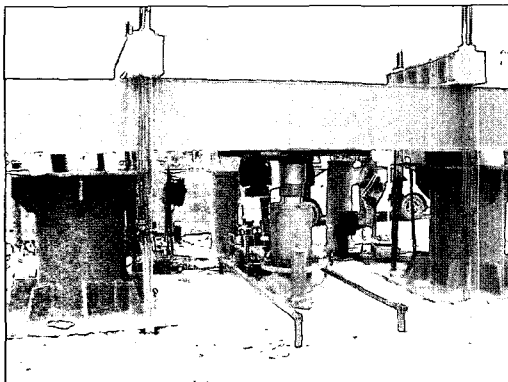
다. 천공은 선단확장판의 외경 450mm를 감안하여 케이싱 직경을 480mm 하여 수행하였으며, 이후 선단이 지지층과 일체화가 되도록 하기 위해 선단부에 시멘트페이스트를 주입하면서 말뚝을 침설하였다. 일반적으로 SDA 공법은 시멘트 페이스트를 선단부 뿐만이 아니라 주면 전체에 주입하여 주면마찰력을 확보하나 본 재하시험은 EXT-Pile의 선단지지력 증가 효과를 확인하는데 주목적을 두고 선단부에만 시멘트페이스트를 주입하고 주면에는 주입하지 않는 방법으로 의도적으로 주면마찰을 제거되도록 하였다. 그림 4는 시공과정을 보여주고 있으며 그림 5는 말뚝 설치 평면도를 보여주고 있다.



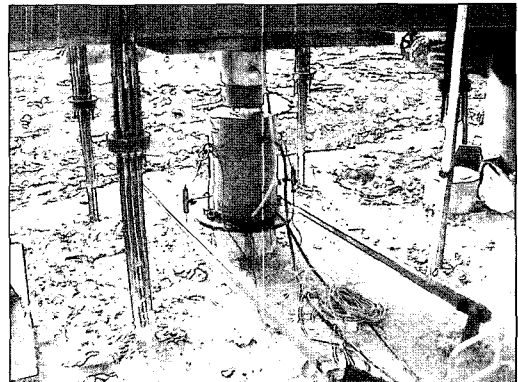
그림 5. 시험말뚝 설치 위치 및 개략도

3.2 정재하시험 장치 및 방법

본 재하시험에서는 시험말뚝의 극한하중까지 재하하고자 300ton 이상의 매우 큰 하중이 필요할 것으로 예상되어 반력앵커를 설치하여 재하하는 방법을 채택하였다. 사용된 반력앵커는 공당 약 100ton의 용량을 보유하도록 9가닥의 PC강연선(각 강선의 직경 12.7mm)을 수직으로 약 25m 설치하고 전면을



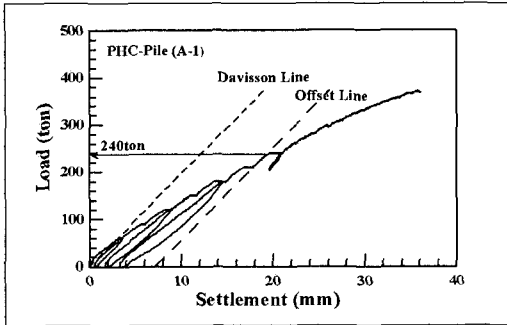
(a) 재하시험 세팅



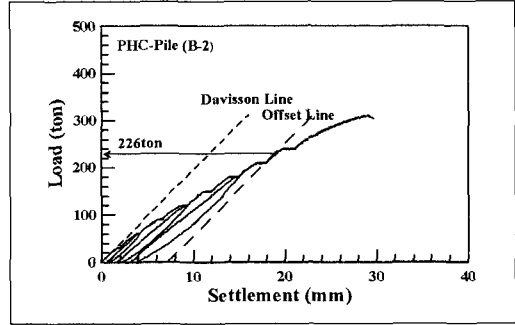
(b) 하중재하장치

그림 6. 재하시험 장치 사진

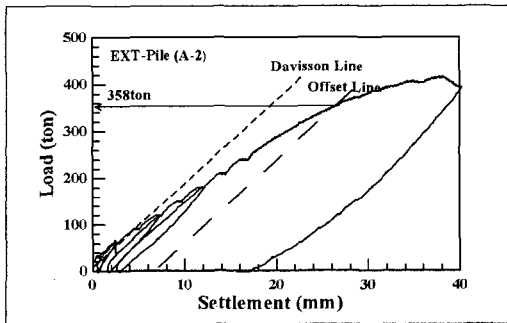
선단확장형 PHC 말뚝



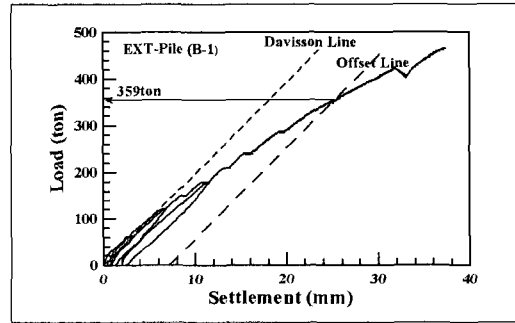
(a) P1(PHC)



(b) P2(PHC)



(c) E1(EXT-PHC)



(d) E2(EXT-PHC)

그림 7. 정재하시험 결과 (하중-침하곡선)

정착하여 25m의 정착장을 갖도록 시공하였다. 또한 말뚝 1본당 4개소의 반력앵커를 설치하여 말뚝에 400ton 이상을 재하할 수 있도록 계획하였다. 앵커 정착을 위한 그라우팅은 물-시멘트비를 45% 이하로 배합하여 3일 재령후 압축강도가 220kg/cm² 이상 되도록 하였다. 그림 6은 재하시험 장치 구성과 재하시험 전경을 보여주고 있다.

정재하시험은 말뚝을 시공 완료 후 20일 경과 후에 KS F-2445 규정에 의거한 완속시험법에 근거하여 수행하였다. 한편, KS F-2445 규정에서 외말뚝의 경우 설계하중의 2배 이상을 가하도록 규정하였으나 앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서는 극한하중 하에서의 하중-변위 특성을 파악하기 위해 300ton

이상의 하중을 가하여 말뚝 혹은 지반이 극한상태에 도달하여 파괴에 이를 때까지 재하하도록 하였다.

3.4 재하시험 결과

그림 7은 시험말뚝의 말뚝 두부에서의 하중-변위(P-S) 곡선을 보여주고 있다. 이 그림에서 비교할 수 있는 바와 같이 임의 재하하중에서 EXT-Pile이 PHC 말뚝에 비해 상대적으로 작은 변위를 주고 있어 하중 지지특성이 향상된 것으로 나타났다.

표 4는 P-S 곡선을 이용하여 Davisson 방법(Davisson 1973)을 이용하여 산정한 극한지지력과 안전율 2.0을 적용하여 결정된 허용지지력을 비교

표 4. Davisson 분석법을 이용한 허용하중 결과 비교

말뚝종류		극한지지력(ton)		허용지지력 (ton)		증가비
		본당 지지력	평균	본당 지지력	평균	
PHC	P1	240.0	233	120.0	117	150
	P2	226.0	113.0			
	P3	110.0	-	55.0	-	
EXT-PHC	E1	358.0	358	179.0	179	
	E2	359.0	179.5			
	E3	280.0	-	140.0	-	

표 5. 동재하시험결과의 CAPWAP방법을 통한 극한 및 허용지지력 산정

말뚝번호	말뚝종류	시험일자	CAPWAP Capacity(ton)			안전율	허용지지력 (ton)
			주면마찰력	선단지지력	전체지지력		
P1	PHC	2006.03.17	1.0	175.9	176.9	2.5	70.76
P2	PHC	2006.03.17	9.4	176.7	186.1		74.44
P3	PHC	2006.03.18	4.7	170.9	175.6		70.24
E1	EXT	2006.03.17	9.8	258.3	268.1		107.24
E2	EXT	2006.03.18	14.6	251.1	265.8		106.32
E3	EXT	2006.03.18	1.0	265.4	266.4		106.56

하고 있다. 이 표에서 관찰할 수 있는 바와 같이 Davisson 방법에 근거할 때 PHC 말뚝은 110~240ton 정도의 극한지지력을, EXT-Pile은 280~360ton 정도의 극한지지력을 보이는 것으로 분석되어 EXT-Pile 말뚝이 PHC 대비 150% 정도의 극한 지지력을 보이는 것으로 나타났다.

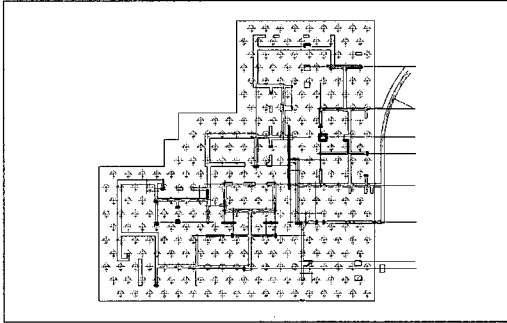
한편, 말뚝설치시 최종단계에서 경타시키는 과정에서 정재하시험 아울러 시험말뚝의 시공직후 선단 지지력 확인 및 해머의 효율 측정과 말뚝의 건전도 점검을 위해 향타분석기(Pile Driving Analyzer, PDA)를 이용하여 동재하시험(End of Initial Driving Test, EOID Test)을 실시하였다. 표 5는 동재하시험 결과를 토대로 CAPWAP 분석을 실시하여 산정한 극한 및 허용지지력을 정리하고 있다. 표 5에서와 관찰할 수 있는 바와 같이 동재하시험이 정재하시험에 비해 선단지지력이 모든 말뚝에 있어 과소

평가 되고는 있으나 EXT-Pile의 극한/허용지지력은 PHC말뚝 대비 약 140%의 정도를 보이고 있어 증가비의 측면에서는 정재하시험과 유사한 것으로 나타났다.

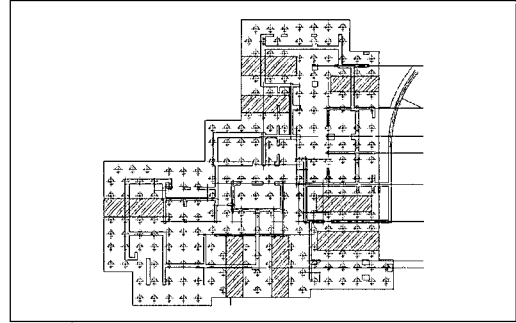
4. EXT-Pile의 건축현장 적용사례

본 장에서는 EXT-Pile이 적용된 건축현장 사례를 기술하였다. 당 현장에서는 당초 60~70ton의 설계하중으로 직경 400mm PHC 말뚝을 적용하는 것으로 설계되었으나 EXT-Pile로 변경하면서 현장 정재하 및 동재하시험 결과에 근거하여 100ton의 설계하중을 적용하였다. 그림 8은 당 현장에 PHC 말뚝 적용시와 EXT-Pile 적용시 도면을 비교하고 있는데 좌측은 PHC 말뚝을 사용한 경우와 우측은 EXT-Pile을 사용한 도면을 비교할 경우 말뚝의 수

선단확장형 PHC 말뚝



(a) PHC 말뚝 적용시



(b) EXT-Pile 적용시

그림 8. 기존 PHC 말뚝(a)과 EXT-Pile(b) 설계 예

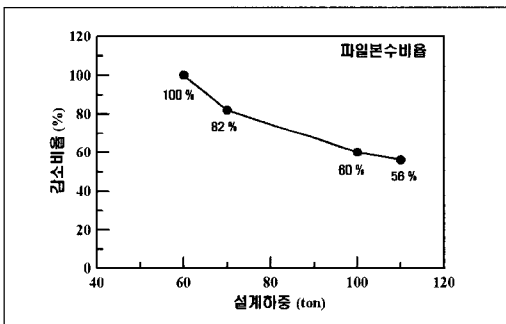


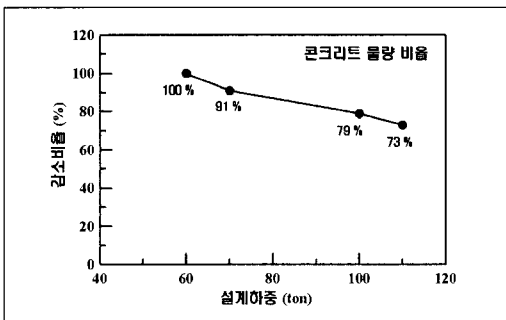
그림 9. 설계하중별 말뚝수량의 변화

량이 현격히 줄어드는 것을 알 수 있다. 한편, 그림 9는 당 현장에서 EXT-Pile 적용시 말뚝 본수 감소를 보여주고 있는데 평균 30% 이상의 말뚝 본수를

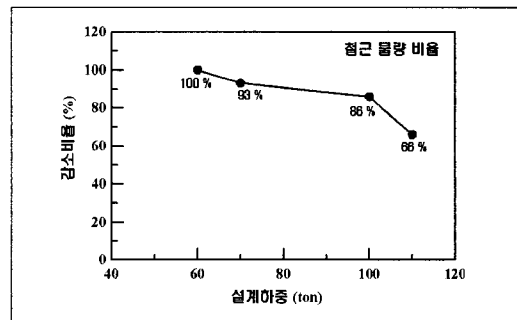
감소시킬 수 있는 것으로 나타났으며 말뚝의 본수 절감에 따라 말뚝 공사 기간이 감소되고 말뚝의 배열을 달리할 수 있으므로 말뚝기초의 철근 및 콘크리트의 물량도 절감할 수 있는 이점이 있다(그림 10).

5. 결 언

본 고에서는 기성 PHC 말뚝의 선단에 선단확장판을 부착하여 선단지지력을 향상시킨 EXT-Pile을 소개하였다. 현장시험을 통해 EXT-Pile의 선단지지력은 PHC 말뚝대비 140~150% 정도를 확보할 수



(a) 콘크리트 물량 감소비율



(b) 철근 물량 감소비율

그림 10. 설계하중에 따른 말뚝기초의 콘크리트 물량 및 철근물량 감소율

있는 것으로 나타나 매입공법으로 시공되는 PHC 말뚝의 주면마찰에 의한 지지력이 불확실하여 선단 지지력 확보가 중요한 시공조건에서는 EXT-Pile 적용을 통해 기존의 설계하중을 증가시켜 적용할 수 있는 것으로 나타났다.

건축현장에 적용한 사례를 분석한 결과 EXT-Pile 적용시 추가의 선단지지력 확보를 통해 설계하중을 상향 조정할 경우에는 말뚝 설치 본수가 줄어들어 따라 말뚝 배열의 조정을 통해 벽체나 기둥의 직하부에서 구조물의 하중을 지반에 전달할 수 있게 하여 말뚝기초의 콘크리트 두께 및 철근량도 줄어드는 효과를 얻을 수 있어 경제적인 말뚝 시공이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 이명환, 홍헌성, 이원제, 전영석, 전영석, 강영천 (1995a). 선단지지력이 보강된 강관말뚝공법, 95 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.55~67.
2. 이명환, 홍헌성, 조천환, 이장덕, 이원제, 전영석 (1995b). 매입 말뚝공법의 지지력 특성, 95 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.1~10.
3. Davisson, M. T. (1973). High Capacity Piles, Department of civil Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois

2006년 댐·제방기술위원회 학술발표회 개최 및 논문모집 안내

댐·제방기술위원회에서는 2006년 학술발표회에 댐·제방 기술과 관련된 논문을 모집하오니 회원 여러분의 많은 참여와 협조 부탁드립니다.

1. 일 자 : 2006년 9월 27일 (수) 13:00 ~ 18:00
2. 장 소 : 과총회관 대강당
3. 주 제 : 댐 및 제방의 지반공학적 안전관리
4. 논문초록마감 : 2006년 8월 25일
5. 논문원고마감 : 2006년 9월 10일
6. 문의 및 논문초록 제출은 신중호 교수(건국대) 혹은 신동훈 박사(한국수자원공사 댐기술연구소)에게 해 주십시오.
7. 연 락 처 : 신중호 교수 (02-2049-6081, 011-9078-8212, jhshin@konkuk.ac.kr)
신동훈 박사 (042-860-0323, 016-9770-9674, cute_lion@hanmail.net)

※ 댐·제방 기술위원회의 운영위원회에서 활동을 희망하시는 회원께서는 언제든지 위원장(임희대 교수) 및 간사(박한규 박사(hgpark@kowaco.or.kr))에게로 연락주시기 바랍니다.