

풍화암에 근입된 선단확장형 PHC 말뚝의 선단지지력

End Bearing Capacity of Pile Tip-enlarged PHC Piles in Weathered Rock

유 충 식¹ Yoo, Chung-Sik
허 감 수³ Heo, Kab-Soo

김 선 빙² Kim, Sun-Bin
송 기 용⁴ Song, Ki-Yong

Abstract

Recently a concept of pile-tip enlarged PHC pile (Ext-PHC pile), for use in the auger-drilled construction method, has been developed and is being implemented in practice. A series of field axial load tests on both PHC and Ext-PHC piles were conducted at an experimental site. In addition, a parametric study on a number of influencing factors was made using a validated finite element model. The field axial load tests indicated an enhanced load-settlement characteristics for the Ext-PHC piles compared with the PHC piles, giving approximately 50% increase in the end bearing capacity. Also found in the results of the parametric study was that the increase in the end bearing capacity of Ext-PHC piles slightly varies with the mechanical properties of supporting ground as well as pile length, in the range of 1.25 to 1.4 time that of PHC. Overall, the results of the field tests as well as the numerical study confirmed that the end bearing capacity of PHC pile can be improved by the concept of Ext-PHC pile.

요 지

매입공법으로 시공되는 PHC 말뚝의 선단지지력 증진 방안으로서 선단에 선단확장판을 설치하여 선단 확장을 통해 선단지지력을 증가시키는 개념(일명 Ext-PHC 말뚝)이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 본 연구에서는 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력 증가 효과를 확인하고 현장 적용성 검토의 일환으로 직경 400mm 말뚝에 대한 현장재하시험을 실시하였으며 검증된 유한요소해석 모델을 이용하여 다양한 조건에 대한 매개변수 연구를 실시하였다. 현장재하시험 결과를 분석한 결과 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력은 PHC 말뚝 대비 약 40~50% 증가되는 것으로 나타났으며 다양한 변수에 대한 매개변수 결과에서는 선단 지지층의 역학적 특성과 말뚝 길이에 따라 일반 PHC 대비 선단지지력 증가비는 1.2~1.4 정도를 보이는 것으로 분석되었다. 이러한 연구결과에 근거할 때 본 연구에서 고려한 시공조건에 있어 Ext-PHC 말뚝을 적용함으로써 일반 PHC 말뚝의 선단지지력 증진 효과를 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Auger-drilled pile, Axial load test, End bearing capacity, Finite element analysis, PHC 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 이유

로 구조물의 하중을 지반에 전달하여 지지하는 말뚝기초가 활발히 적용되고 있다. 이러한 말뚝기초의 사용물량은 주택건설 수요와 서해안 개발 등 대규모 사회기반시설의 확충으로 인해 앞으로도 꾸준히 증가할 것으로 예상된다. 말뚝기초의 시공 물량 증가와는 반대로 시공대

1 정회원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

2 성균관대학교 토목환경공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., ksb9677@hanmail.net, 교신저자)

3 극동건설 주식회사 기술연구소 선임연구원 (Senior Researcher, Research Institute, Kukdong Corporation)

4 정회원, 이엑스티 유한회사, 대표이사 (Member, President, EXT Korea Co., Ltd.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

상 지반의 조건은 갈수록 열악해져가고 있어 종래 비교적 양호한 지반조건 보다는 해안지역 등 불리한 지반조건에서의 말뚝 시공이 증가할 것으로 예상되어 경제적인 말뚝의 지지력 확보 방안이 매우 중요하게 대두되고 있다.

- 기성 말뚝으로 콘크리트 말뚝은 강관 말뚝에 비해 저렴하다는 장점으로 각종 구조물 기초로의 사용량이 증가하고 있다. 종래에는 기성 콘크리트 말뚝으로서 압축강도 500kg/cm^2 정도의 원심력 PC 말뚝이 많이 적용되었으나 시공시 낮은 재질강도와 시공 관리의 부적절함 등의 원인으로 두부파손, 중파, 그리고 중방향 균열 발생 등이 문제점으로 지적받아 왔다. 이러한 문제점에 대응하기 위해 1992년부터 국내에서도 사용되기 시작한 원심력 고강도 콘크리트 말뚝(Pretensioned Span High Strength Concrete Piles, PHC 말뚝)이 개발 적용되고 있다. PHC 말뚝의 압축강도는 기존의 원심력 PC 말뚝보다 60% 가량 향상된 800kg/cm^2 로서 철저한 시공 관리와 함께 항타시 두부 손상 및 중파 등 기존의 문제점을 피할 수 있는 것으로 알려져 있다.

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, SAIP, COREX 공법 들로 구분되

며(이명환 등 1995) 이러한 공법을 적용할 경우 정밀시공을 통한 품질관리가 지지력 확보 측면에서 매우 중요한 부분을 차지한다. 즉, 매입말뚝은 선굴착후 말뚝을 설치하는 시공법의 특성상 선단 및 주면지반의 교란효과로 인해 동종 직향타 말뚝에 비해 선단 및 주면지력이 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 정도만 발현되는 것으로 보고되고 있으며 특히 시멘트페이스트 주입과정에서의 철저한 시공관리가 필요하다. 한편, 시공관리가 철저히 된 매입말뚝의 지지력은 주면마찰력이 상당한 부분을 차지하나 시멘트페이스트 주입에 따른 시공 품질 상태에 따라 주면지지력의 발현정도가 결정되므로 설계/시공시 주면지지력이 충분히 발현될 것이라는 확신을 가지고 이를 지지력 산정시 반영하기가 상당히 어려우려 따라서 선단지지력이 매우 중요하게 간주되고 있다.

이러한 관점에서 최근 들어 매입공법으로 시공되는 PHC 말뚝의 지지력 증진 방안으로서 선단에 선단확장판을 설치하여 선단 확장을 통해 선단지지력을 증가시키는 개념(일명 Ext-PHC 말뚝)이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 본 연구에서는 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력 증가 효과를 확인하고 현장 적용성을 검토하는 일환으로 현장 재하시험을 실시하였으며 이 결과를 토대로 Ext-PHC 말뚝의 지지력 증가효과를 정량적으로 분석하였다.

2. Ext-PHC 말뚝

Ext-PHC 말뚝은 그림 1에서와 같이 PHC 말뚝의 선단에 두께 17mm의 강철판(SS400)으로 제작된 선단보강판

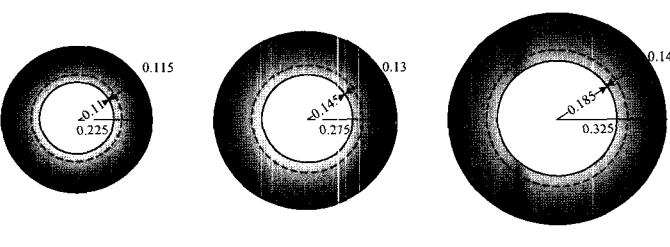


그림 1 Ext-PHC 말뚝 개념

표 1. 선단 단면적 비교

말뚝직경 (mm)	순단면적(cm^2)			폐색단면적(cm^2)		
	PHC	Ext-PHC	단면적 증가비(%)	PHC	Ext-PHC	단면적 증가비(%)
400	684	1,210	177	1,257	1,590	127
500	1,055	1,714	130	1,963	2,376	121
600	1,044	2,242	140	2,827	3,318	117

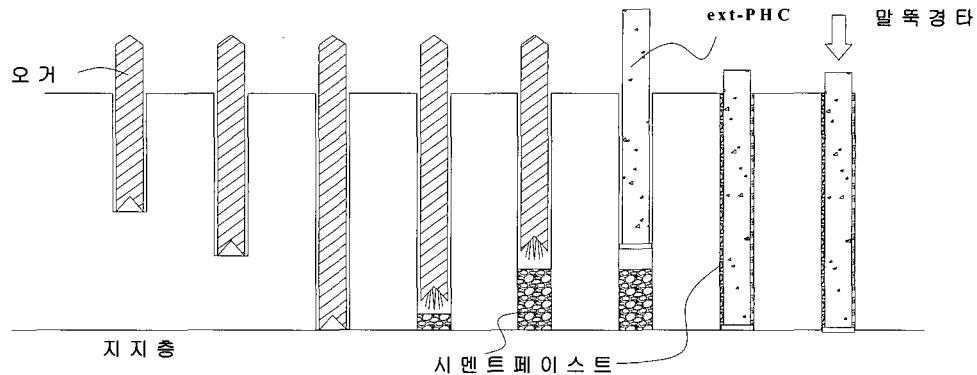


그림 2. Ext-PHC 말뚝의 시공 순서

표 2. Ext-PHC 및 PHC 말뚝의 시공순서 비교

기성 PHC 말뚝 시공순서	Ext 말뚝 시공순서
① Leader의 수직도 확인, 오거로 굴착	① 좌 등
② 일정 깊이까지 굴착(N치 50/10~6 해당)	② Ext-Pile의 종류에 따라 굴착 깊이 조절(N치 50/20~6 해당)
③ 시멘트페이스트 주입시 오거로 선단교반(슬라임 제거 포함)	③ 제자리에서 고압분사(약20~30초)로 슬라임제거(오거로 선단교반 금지)
④ 시멘트페이스트 주입하며 오거 인발	④ 좌 등
⑤ 자중에 의한 말뚝 침설	⑤ 말뚝 침설 전 선단부 청소 후 말뚝 침설
⑥ 경타로 허용 오차 이내 탑입	⑥ 좌 등

을 부착하여 선단을 확장하는 개념을 적용하고 있다. 선단확장판의 재원은 표 1에 정리되어 있는 바와 같이 PHC 말뚝의 직경에 따라 달라지게 되나 근본적으로 말뚝의 직경이 총 50mm가 늘어나는 형태로 되어 있다. 따라서 Ext-PHC 말뚝의 두께를 고려한 선단의 순단면적은 말뚝의 직경에 따라 PHC 말뚝 대비 56~77% 증가하게 된다.

Ext-PHC 말뚝의 시공은 매입말뚝의 형태로 시공되는 기존 PHC 말뚝 시공방법과 동일하나(그림 2) 표 2에 정리된 바와 같이 선굴착 후 시멘트풀 주입시 고압분사로 선단부 슬라임을 제거하여 선단부 지지층이 교란되는 것을 최소화하도록 하는데 주안점을 두고 있다.

3. 현장재하시험

3.1 개요

현장 재하시험은 Ext-PHC 말뚝의 선단확장으로 인한

PHC 말뚝 대비 선단지지력 증가 확인에 초점을 맞추었으며 동일한 시공 조건에서 선단지지력의 직접적인 비교가 가능하도록 계획하였다. 이를 위해 직경 $D = 400 \text{ mm}$ 의 PHC 말뚝과 Ext-PHC 말뚝 각각 세 본에 대한 재하시험을 실시하여 객관성을 확보할 수 있도록 하였다. 한편, 재하시험을 보다 수월하게 관리하고 진행하기 위해 시험시공 측면에서 현장관리가 용이한 부지인 경기도 수원시 장안구 천천동에 소재한 성균관대학교 지반시험장에서 수행하였다. 아래에서는 현장재하시험 및 결과에 대한 내용을 상세히 다루었다.

3.2 현장조건

그림 3은 재하시험이 실시된 성균과대학교 야외 지반시험장 전경을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 대상 부지는 약 225 m^2 ($15\text{m} \times 15\text{m}$)로서 총 6 본에 대한 시험시공이 가능한 공간을 확보하도록 하였으며 현장재

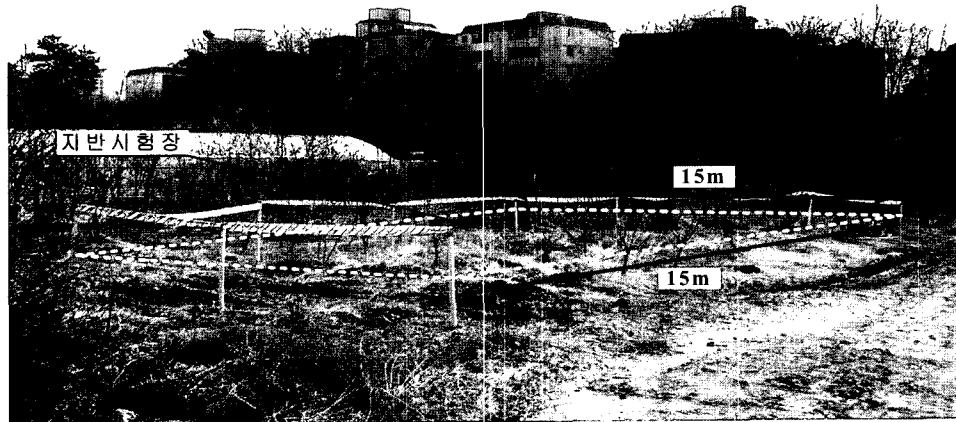


그림 3. 재하시험을 위한 지반시험장

시험을 원활히 수행할 수 있도록 주변 정지작업 후에 말뚝시공 장비 및 재하시험 장치를 반입하여 현장재하시험을 수행하였다.

시험말뚝의 시공에 앞서 지반시험장의 지질특성 파악을 위해 시추조사를 실시하였다. 시추조사는 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 표준관입시험결과

와 주상도를 보여주고 있는 그림 4를 관찰하면 보이는 바와 같이 지표면으로부터 깊이 4~5m까지 6~10 정도의 N치를 보이는 매립층과 퇴적층이 위치하며 그 하부에 약 8~9m의 두께로 위치하는 N치 50/30~50/15 정도의 조밀한 풍화토가 형성되어 있는 것으로 조사되었다. 한편, 그 아래에는 GL-12m 정도에 위치에 N치 50/7 이하의 풍화암내지 연암이 위치하는 것으로 조사되었다.

3.3 시험말뚝 시공

앞서 언급한 바와 같이 시험 대상 말뚝으로는 A-type의 $D=400\text{ mm}$ PHC 말뚝과 선단확장판을 부착한 동일 직경의 Ext-PHC 말뚝을 대상으로 하였다. 시험결과의 반복성 확보를 위해 말뚝 타설 본수는 PHC 및 Ext-PHC 말뚝 각각 3 본씩으로 하였으며 N치 50/10이하의 암반에에 안착시키는 것으로 계획하였다. 표 3은 본 재하시험에 적용된 PHC 말뚝의 제원을 정리하고 있다.

그림 5는 시험말뚝 시공과정을 사진으로 보여주고 있는데 먼저 DH508-105M 오거를 이용하여 선굴착 후 케이싱($\Phi 480\text{ mm}$)과 함께 말뚝을 설치하고 케이싱 인발 후 최종 경타를 실시하는 일명 SAIP 공법으로 시공하였다. 일반적으로 SAIP 공법은 시멘트풀을 선단부 뿐만 아니라 주면 전체에 주입하여 주면 마찰력을 확보하나 본 재하시험은 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력 증가 효과

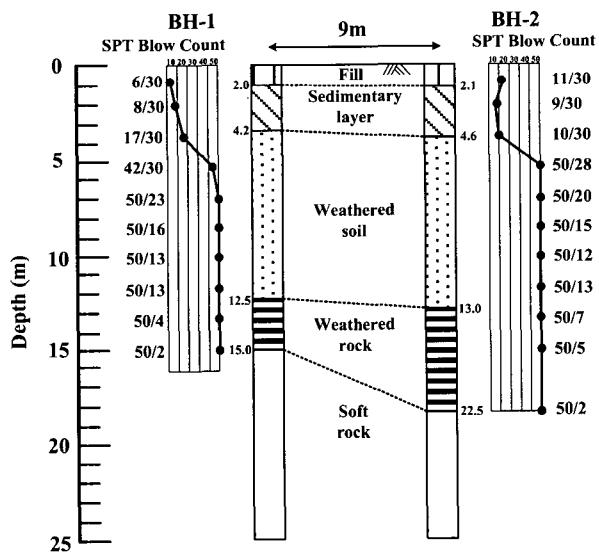


그림 4. 재하시험 현장부지의 주상도

표 3. 시험말뚝의 말뚝의 제원

외경 $D(\text{mm})$	두께 $t(\text{mm})$	종별	콘크리트 단면적 $A_c(\text{cm}^2)$	환산단면적 $A_s(\text{cm}^2)$	축방향 허용하중 $P_a(\text{ton})$
400	65	A type	684	704	112

를 확인하는데 주목적을 두고 주면고정을 위한 시멘트 페이스트 주입은 실시하지 않아 의도적으로 주면마찰은 제거되도록 하였다. 한편 최종 경타는 50ton 햄머를 이용하여 실시하였다.

그림 6(a)는 시험말뚝 배치 평면도를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 말뚝사이의 간격은 3m를 유지하면

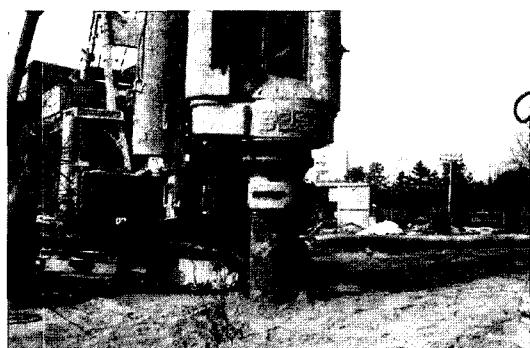
서 정방형 배치로 설치하여 재하시험시 발생하는 상호 간섭효과를 최대한 배제할 수 있도록 하였다. 한편, 시험말뚝은 그림 6(b)에서와 같이 총 관입길이는 약 13m 정도로서 선단부는 지자층(풍화암)에 최대 50cm 가량 근입된 것으로 파악되었다.



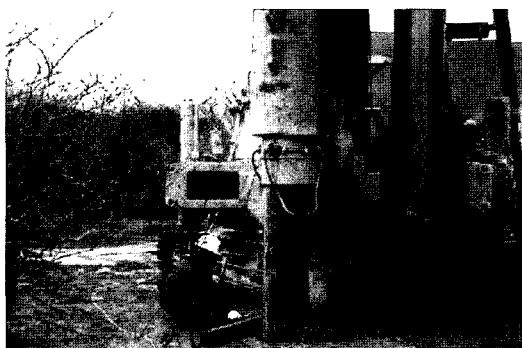
(a) 오거 천공 및 케이싱 삽입



(b) 말뚝 설치



(c) 케이싱 인발



(d) 말뚝 경타

그림 5. 시험말뚝 시공과정

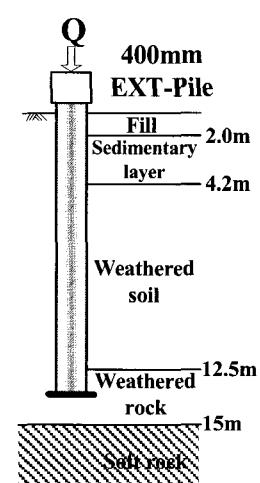
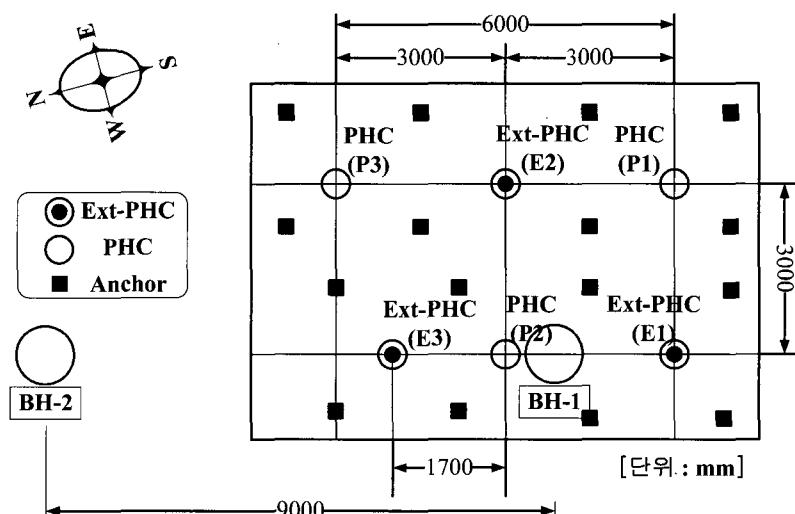


그림 6. 시험말뚝 설치 위치 및 개략도

3.4 정재하시험 장치 및 시험과정

3.4.1 반력앵커

말뚝의 축방향 압축 재하시험에 필요한 재하하중은 실물하중이나 주변에 반력말뚝을 설치하여 재하할 수 있으며 소요하중이 클 경우에는 반력앵커를 설치하여 앵커의 반력을 이용하여 재하할 수 있다. 본 재하시험에서는 시험말뚝의 극한하중까지 재하하고자 300ton 이상의 매우 큰 하중이 필요할 것으로 예상되어 반력앵커를 설치하여 재하하는 방법을 선택하였다.

반력앵커는 공당 약 100ton의 용량을 보유하도록 9가닥의 PC강연선(각 강선의 직경 12.7mm)을 수직으로 약 25m 가량 설치하고 전면을 정착하여 25m의 정착장을 갖도록 시공하였다. 한편, 그림 6(a)와 같이 말뚝 1본당 4개소의 반력앵커를 설치하여 말뚝에 400ton 이상을 재하할 수 있도록 계획하였으며 기존의 연구결과(Comodromos et al. 2003)에 근거해 앵커와 말뚝의 상호작용이 최소화될 수 있도록 1.5m의 간격을 유지하도록 하였다. 앵커 정착을 위한 그라우팅은 물-시멘트비를 45% 이하로 배합하여 3일 재령 후 압축강도가 220kg/cm^2 이상 발현되도록 하였다.

재하시험에 앞서 반력앵커 시공 완료 3일후 최대인발하중을 확인하기 위하여 인발시험을 수행하였다(그림 7). 그림 7(b)는 인발하중-변위 관계곡선을 보여주고 있는데 약 60ton의 인발하중 재하까지는 선형의 하중-변위 관계를 보이다 그 이상의 하중에서는 다소 완만한 기울기를 보여 마치 항복한 것처럼 보이기는 하나 이는 그림 7(a)에서 재하판이 침하함에 따른 측정오차를 반영하는 것으로서 반력앵커로 활용하는데 무리가 없는

것으로 분석되었다.

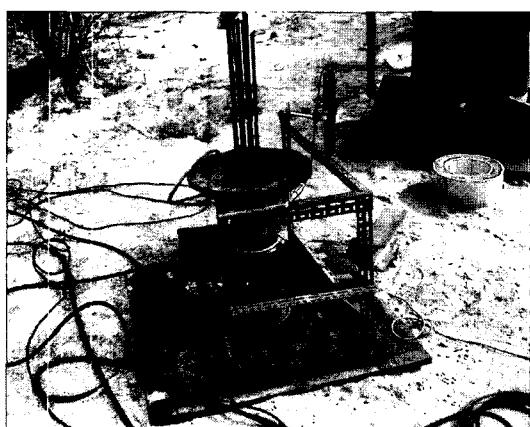
3.4.2 재하장치 구성

그림 8 및 9는 각각 재하시험 장치구성 개요도와 재하장치 세팅후 전경을 사진으로 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 재하하중은 말뚝 두부에 500ton 용량의 유압책을 이용하여 작용시켰으며 그 상부에 재하 프레임을 거치한 후 이를 앵커로 결속하여 말뚝에 재하하중이 작용될 수 있도록 하였다. 시험중 말뚝에 재하되는 하중과 두부에서의 침하량을 측정하기 위하여 각각 490ton 용량의 로드셀과 Tokyo Sokki사의 50mm 용량의 LVDT가 사용되었으며, TDS-303 데이터로거를 이용하여 실시간 자동 계측을 수행하였다.

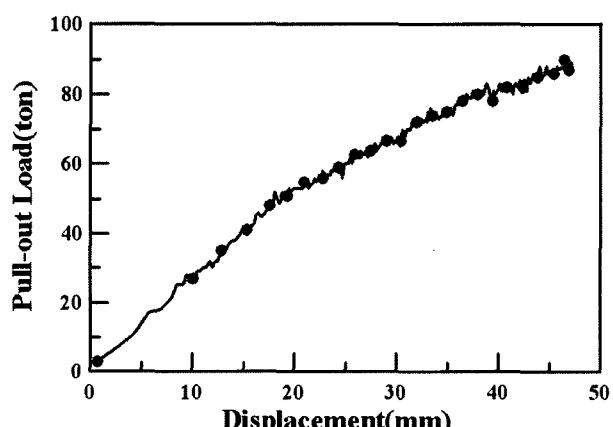
한편, 시험중 재하되는 하중의 축방향 전이 메카니즘을 확인하고 주변마찰의 제거여부를 확인하기 위해 1.3~1.5m 간격으로 말뚝외벽에 길이 60mm의 Tokyo Sokki사의 YFLA-5 스트레인케이지를 부착하였으며 CN접착제, 스트레인케이지, N-I 코팅제 순으로 부착한 후 VM 테이프와 마감테이프로 최종 마감을 하였다. 본 재하시험 중 사용된 투입장비가 표 4에 정리되어 있다.

3.4.3 시험방법

정재하시험은 말뚝을 시공 완료 후 20일 경과 후에 KS F-2445 규정에 의거한 완속시험법에 근거하여 수행하였으며 구체적인 시험 방법은 표 5에 정리되어 있다. 한편, KS F-2445 규정에서 단말뚝의 경우 설계하중의 2배 이상을 가하도록 규정하고 있는데 착안하여 직경 D=400mm A종 Ext-PHC 파일의 설계하중 120ton을 고



(a) 앵커 인발시험 전경



(b) 앵커 인발시험 결과

그림 7. 앵커 인발시험 및 결과

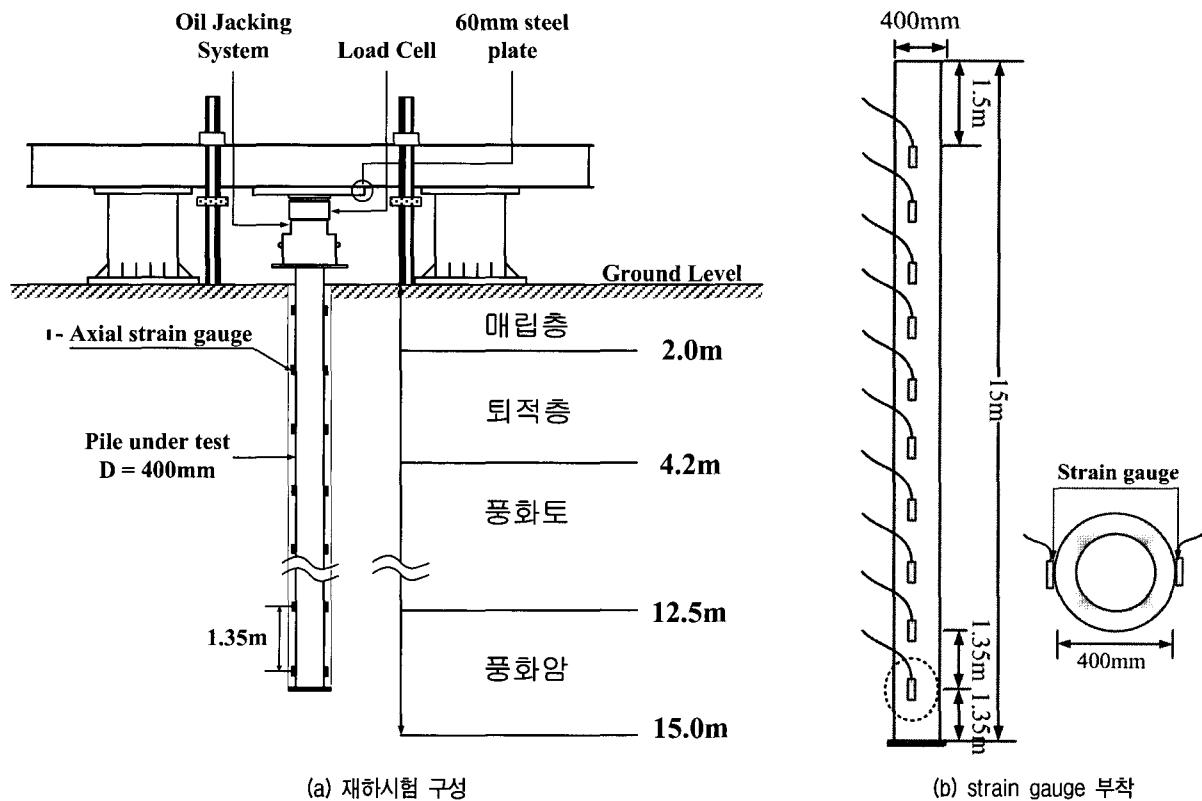


그림 8. 재하시험 장치구성

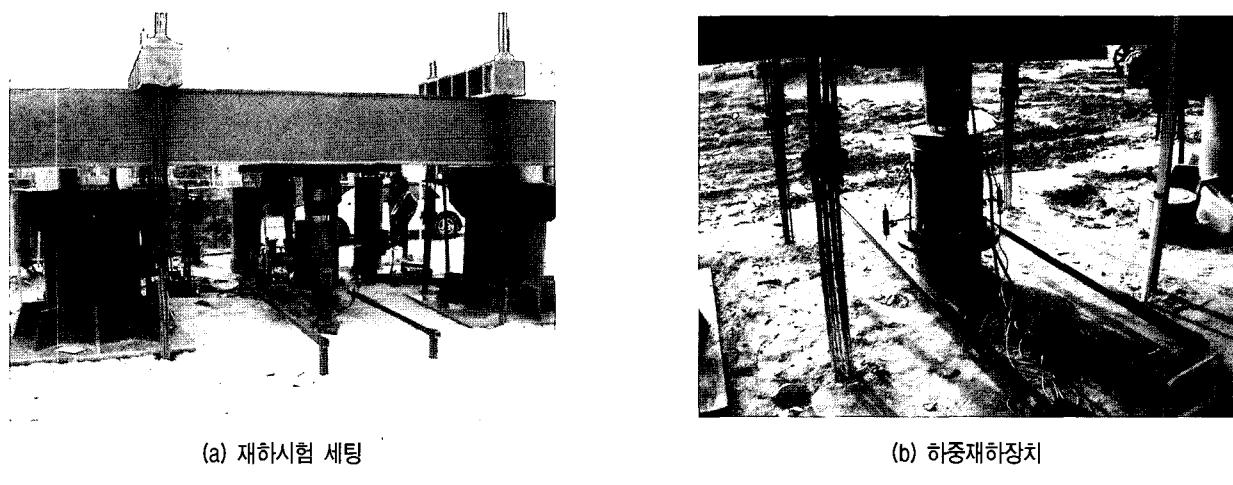


그림 9. 재하시험 장치 사진

표 4. 투입장비 현황

장비명		용량(규격)	수량
가압장치	유압 JACK	500ton	2
	유압 PUMP	500ton	2
재하장치	재하 FRAME	Beam Weight : 약 8ton	2
계측장치	Load Cell	약 490.3ton	2
	LVDT	50.0mm	4
	strain gauge	Gauge 길이(60mm), 폭(1mm)	60
	Magnetic Holder	자석식	4
	데이터로거(TDS-303)	30채널, 10채널	2
	노트북		2

표 5. 재하시험 방법

순서	시험방법
①	총 시험하중을 240 ton까지 8단계로 나누어 30ton씩 증가시켜 재하
②	각 하중단계에서 말뚝 두부의 침하율이 시간당 0.25mm 이하가 될 때까지 재하하중을 유지
③	재하하중 단계가 설계하중의 50%, 100% 및 150%에 도달하였을 때 재하하중을 각각 1시간 지속한 후 하중을 완전히 제하
④	하중을 완전히 제하한 후 설계하중의 50%씩 단계적으로 다시 재하하여 ②번의 과정을 따라 다음 단계로 재하
⑤	재하하중이 목표하중인 240ton까지 도달한 경우에도 파괴가 발생하지 않을 시 말뚝의 침하량이 분당 0.25mm 정도를 유지하도록 재하하중을 조절
⑥	재하중 말뚝이 파괴되거나 지반이 극한상태를 초과한 경우 시험을 종료

려하여 이의 두 배에 해당하는 하중(240ton)을 1차 목표 하중으로 책정하였으며 그 이후 극한하중 하에서의 하중-변위 특성을 파악하기 위해 300ton 이상의 하중을 가하여 말뚝 혹은 지반이 극한상태에 도달하여 파괴에 이를 때까지 재하 하도록 계획하였다.

4. 결과분석

4.1 하중-변위 특성

그림 10은 시험말뚝의 말뚝 두부에서의 하중-변위 (P-S) 곡선을 보여주고 있다. 시험 중에 말뚝에 작용시킬

수 있는 최대 재하하중은 지반의 파괴보다는 말뚝의 재료 파괴로 결정되었으며 말뚝의 종류(PHC 또는 Ext-PHC)에 관계없이 전반적인 경향을 살펴보면 재하/loading)-제하(unloading) 과정에서 말뚝 자체의 탄성변형이 회복되는 경향을 관찰할 수 있다.

한편, 그림 11은 각각 각 재하단계에서 말뚝두부 최대 변위를 토대로 작성된 PHC 말뚝과 Ext-PHC 말뚝의 P-S 곡선을 비교하고 있으며, 파일 P3 및 E3는 정상적으로 실험이 진행되지 않은 것으로 판단되어 비교대상에서 제외하였다.

그림 11에서 관찰할 수 있는 바와 같이 먼저 첫 번째 와 두 번째 시험에서는 종류별 P-S 곡선이 거의 일치하

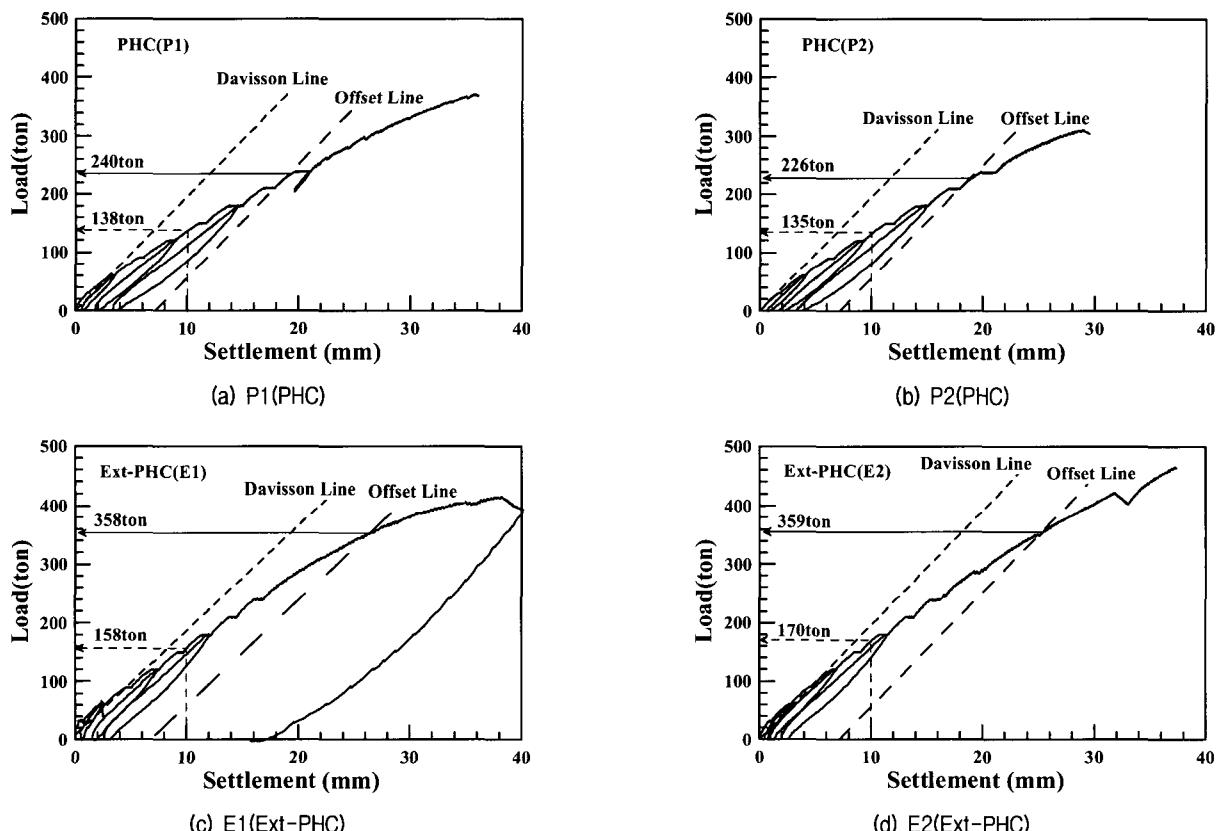


그림 10. 정재하시험 결과(하중-침하곡선)

표 6. 재하하중 단계별 말뚝 및 선단지반의 침하 관계(P1, E1)

구분	하중단계 (ton)	전체침하량 (mm)	잔류침하량 (mm)	회복된 침하량 (mm)	말뚝의 탄성침하량 (mm)	선단지반의 침하량 (mm)
P1	60	3.5	0.5	3.0	3.0	0.0
	120	8.9	1.8	7.1	5.9	3.0
	180	14.6	3.4	11.2	8.9	5.7
E1	60	2.8	0.4	2.4	2.9	-
	120	6.8	0.9	5.9	5.8	1.0
	180	11.4	2.0	9.4	8.8	2.6

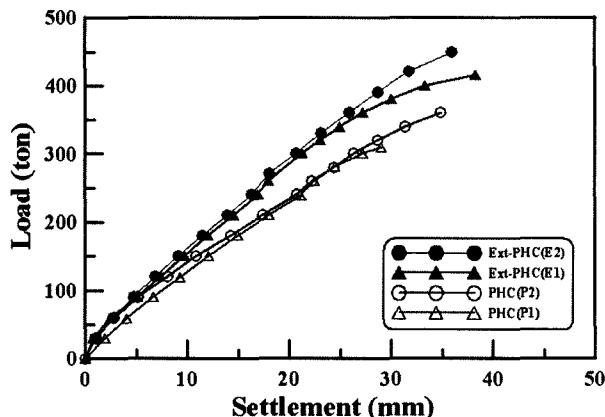


그림 11. 정재하시험 결과 종합 비교

는 것으로 분석되어 실험과정과 결과가 충분한 반복성을 확보한 것으로 분석되었다. 전반적인 하중지지 특성에 있어 이 그림에서 관찰할 수 있는 바와 같이 Ext-PHC 말뚝의 P-S 곡선이 PHC 말뚝 보다 위에 위치하여 임의 하중에서의 변위가 현저히 감소됨을 알 수 있어 Ext-PHC 말뚝의 선단 하중 지지력이 향상되는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 말뚝두부에서의 재하하중 단계별 말뚝 및 순침하량을 정리하고 있는 표 6에서 관찰할 수 있다. 즉, 표 6은 말뚝 P1 과 E1에 대해 정리하고 있는데 PHC 말뚝과 Ext-PHC 말뚝의 임의 재하하중에서의 선단에서의 말뚝 두부 전체침하량에서 말뚝의 탄성변위를 제거한 순침하량으로 비교하면 180ton의 재하하중에서 선단지반의 침하량이 각각 5.7mm, 2.6mm로서 Ext-PHC 말뚝이 PHC 말뚝에 비해 50% 정도인 것으로 나타났다. 이러한 경향은 Ext-PHC 말뚝의 선단 확장으로 인한 선단부 접지압 감소에 기인한 것으로 판단되며, 이는 P-S 곡선에서 관찰한 경향과 잘 일치하고 있다. 한편, 전반적으로 말뚝 선단에서의 침하가 재하하중 180ton에서 6mm 이내로 나타나고 있다. 한편, Ext-PHC 파일이 적용된 현장에서 수행된 정재하 시험결과(탑기초엔지니어링주식회사 2005a,b; 태안특수건설 2004)에 근거할

때 Ext-PHC 파일 공법이 적용된 현장에서 수행된 정재하시험 결과에 근거할 때 재하하중 약 200 ton에서 N치 50/8 정도의 암반에서는 약 6~8mm 정도의 순침하량이 50/3~6 정도의 암반에서는 2~3mm의 순침하량이 발생하는 것으로 보고된바 있어 당 현장의 선단지지층은 풍화암 이상의 연암에 가까운 암반층이 자리 잡고 있는 것으로 판단된다.

4.2 선단지지력 평가

건설교통부제정 구조물기초설계기준(2003)에 기술된 바와 같이 재하시험으로부터 수집된 하중-변위 곡선으로부터 말뚝의 극한지지력을 산정하는 방법은 많은 연구자들이 다양한 방법을 제시한 바 있으며(Chin 1970, Davisson 1973) 각 방법들로부터 얻어진 극한지지력은 다소의 편차를 보이는 것이 일반적이다(조천환 등 1997). 일반적으로 하중-변위 곡선이 뚜렷한 파괴점을 보일 경우에는 극한지지력을 산정하는데 큰 무리가 없으나 암반에 관입된 말뚝의 재하시험 결과는 뚜렷한 파괴점을 보이지 않으므로 이러한 문제점을 극복하고자 다양한 기준들이 제시되었다. 본 재하시험 결과도 뚜렷한 항복점을 보이지 않기 때문에 가장 신뢰도 높은 결과를 주는 Davisson 방법(Davisson 1973)과 말뚝직경의 2.5%에 해당하는 순침하량을 극한지지력으로 간주하는 DIN 4026(1975) 기준을 사용하여 극한지지력을 평가하였다.

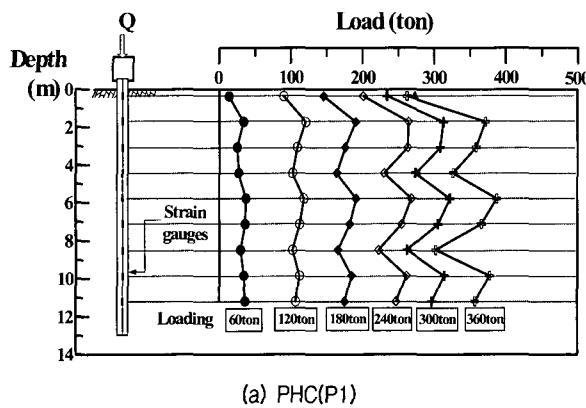
재하시험으로부터 얻어진 시험말뚝의 P-S 곡선을 이용하여 선단지지력을 산정하기에 앞서 P-S 곡선이 선단에서의 하중-변위 관계를 반영하는지에 대한 검토를 위해 말뚝에 설치된 스트레인게이지 측정결과를 토대로 산정한 각 재하하중 단계에서의 말뚝의 축하중 분포를 도시한 그림 12를 검토하였다. 보이는 바와 같이 각 재하하중 단계에서 측정된 축하중 분포가 말뚝 두부로부터 선단에 이르기 까지 깊이별로 거의 일정하게 나타나

고 있는데 이는 주면 마찰이 거의 배제된 상태에서 재하하중이 선단부에 전달되고 있다는 점을 의미하며 따라서 그림 10에서 제시된 P-S 곡선으로부터 얻어진 지지력은 선단지지력으로 간주할 수 있는 것으로 나타났다.

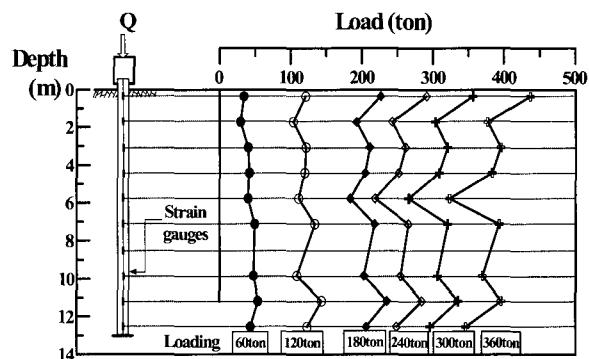
표 7과 8은 P-S 곡선을 이용하여 Davisson 방법과 DIN 4026 방법으로 산정한 극한지지력과 안전율 2.0을 적용하여 결정한 허용지지력을 비교하고 있다. 이 표에서 관찰할 수 있는 바와 같이 Davisson 방법에 근거할 때 PHC 말뚝은 110~240ton 정도의 극한지지력을, Ext-PHC 말뚝은 280~360ton 정도의 극한지지력을 보이는 것으로 분석되었으며, DIN 4026에 근거할 때 PHC 말뚝은 276~280ton 정도로, 그리고 Ext-PHC 말뚝은 389~416ton 정도의 범위를 보이는 것으로 나타났다. 실험 결과에서

반복성이 떨어지는 P3 및 E3 결과를 제외하고 평균적인 수치에 있어서 Davisson 방법의 PHC의 극한 및 허용지지력은 233ton과 117ton으로 분석되었으며, Ext-PHC에 있어서는 각각 358ton과 179ton으로 나타났다.

본 시험말뚝이 풍화암 이상 연암에 가까운 암반에 안착된 관계로 산정된 극한/허용지지력은 일반적으로 $\phi 400\text{ mm}$ PHC 말뚝의 설계하중인 80ton을 훨씬 웃돌 뿐만 아니라 말뚝재료의 허용응력에 근거한 허용하중 110ton을 초과하는 것으로서 설계에 적용하는 설계지지력은 같다고 볼 수는 있으나 직접적인 비교에 있어 당 시험말뚝의 시공조건에서 Ext-PHC 말뚝의 극한/항복지지력은 PHC 말뚝대비 약 50% 정도 증가되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 극한지지력 산정 이론식에 근거



(a) PHC(P1)



(b) Ext-PHC(E1)

그림 12. 재하하중에 따른 말뚝의 깊이별 하중전이분포

표 7. 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	153
	P2	226.0		113.0	
	P3	110.0	—	55.0	
Ext-PHC	E1	358.0	358	179.0	153
	E2	359.0		179.5	
	E3	280.0	—	140.0	

표 8. DIN 4026 기준을 이용한 허용하중 결과 비교

말뚝종류	극한지지력(ton)		허용지지력 (ton)		증가비 (%)
	본당 지지력	평균	본당 지지력	평균	
PHC	P1	280.4	278.2	140.2	145
	P2	276.0		138.0	
	P3	—	—	—	
Ext-PHC	E1	416.3	402.7	208.2	145
	E2	389.0		194.5	
	E3	—	—	—	

할 때 선단지지력은 선단면적(A_p)에 비례하므로 Ext-PHC 말뚝이 PHC 말뚝 대비 1.27배의 A_p 를 가지는 점을 감안 할 때 다소 크게 평가된 것으로는 판단된다. 이에 대한 원인 파악을 위해서는 구체적인 연구가 필요하나 극한 지지력을 평가하기 위해 사용한 Davisson 방법이나 DIN 4026 방법으로부터 얻어진 지지력이 실제 지반의 파괴를 반영하지 않음에서 비롯된 것으로 판단된다.

5. 유한요소해석을 이용한 매개변수 연구

5.1 개요

4장에는 정재하시험 결과를 분석을 통해 Ext-PHC 말뚝의 선단확장을 통한 지지력 증가경향을 확인 한 바 있다. 많은 비용과 시간이 소요되는 현장재하시험의 특성상 다양한 지반 조건에 대해 재하시험을 수행하는 데는 많은 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 현장재하시험 결과를 토대로 검증된 유한요소해석 모델을 이용하여 지반 조건 및 말뚝 길이 등 다양한 시공조건에서 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력 거동 특성을 추가적으로 검토하였다. 본 장에서는 이에 대한 내용을 상세히 다루었다.

5.2 해석조건 및 유한요소해석 모델링

5.2.1 해석조건

본 연구에서는 표 9에서 보이는 바와 같이 선단 지지층의 탄성계수(E_r)와 전단강도(c, ϕ), 그리고 말뚝이 길이(L)를 주 변수로 채택하고 이러한 변수들에 따른 Ext-PHC 말뚝의 지지력 변화 경향을 검토하였다. 선단 지지층의 탄성계수와 전단강도의 범위는 국내에서 조사된 풍화암 및 연암 정도의 물성을 선정하으며 앞서 언급한 바와 같이 본 매개변수 연구의 목적을 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력 변화 경향 파악에 두었으므로 주면 마찰이 배제된 단말뚝 조건에 대한 해석을 수행하였다.

표 9. 해석조건

항목	범위
탄성계수(E_r , MPa)	500 ~ 1,000
점착력(c , kPa)	300 ~ 800
내부마찰각(ϕ , °)	35 ~ 40
말뚝길이(L , m)	10 ~ 25

5.2.2 유한요소해석 모델링

유한요소해석은 토목 및 기계 등 다양한 분야에 적용되며 특히 지반공학 분야에서 다양한 흙의구성모델을 제공하고 소성거동 모사에 대한 알고리즘이 효율적인 범용 유한요소 해석 패키지 ABAQUS 6.4-2(Hibbit et al. 2004)를 사용하였다.

그림 13은 본 해석에서 적용한 해석 모델링 개요도를 보여주고 있다. 단말뚝 조건에서 해석영역과 하중조건이 축대칭조건에 부합되므로 그림 14에서 보이는 바와 같이 1/2 단면에 대한 축대칭(Axisymmetry) 2차원 모델링을 수행하였다. 해석영역은 말뚝의 하중-변위 특성에 영향을 미치지 않도록 말뚝중심축으로부터 15m의 떨어

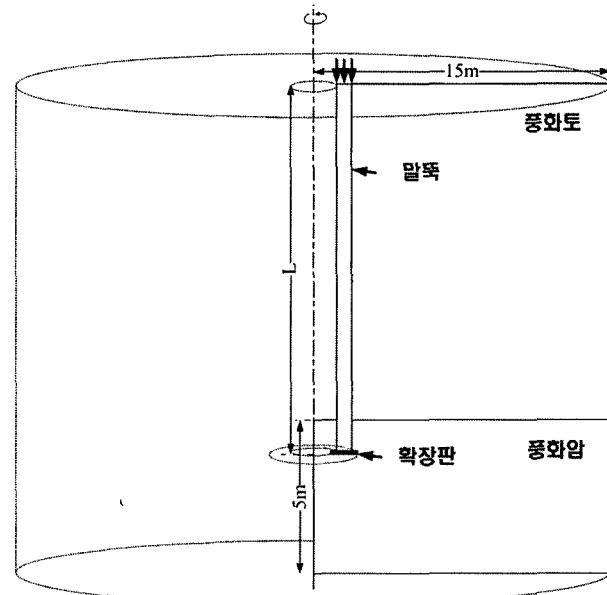


그림 13. 해석영역

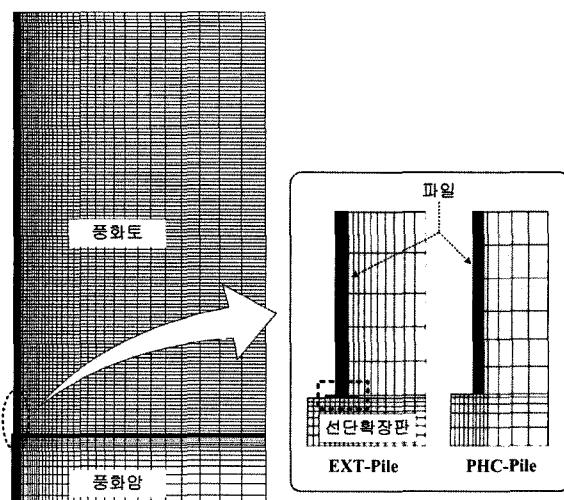


그림 14. 유한요소모델

진 지점에 측면경계를 설정하였으며 지지층은 약 5m를 해석영역에 포함하였다(그림 13).

모델링에서 지반과 말뚝은 축대칭 4절점 가감 적분 요소(CAX4R)를 적용하였다. 한편, 경계조건으로 측면 경계는 수평방향 변위를 그리고 바닥경계는 수직 방향 변위를 구속시켰으며 초기 지중응력 구현 후 작용하중을 단계별로 적용시키는 방법으로 해석을 수행하였다.

말뚝에 대한 모델링에 있어서 주면마찰의 정도에 따라 상당부분의 지지력이 주면마찰력으로 발현되므로 말뚝과 지반사이의 경계면에 대한 모델링 매우 중요하다. 본 해석 모델링에 있어서 말뚝 주면마찰이 제거된 상태에서의 하중지지 특성을 고찰하기 ABAQUS 6.4에서 지원하는 Contact pair를 말뚝 주면과 주면지반 사이에 설치하여 말뚝과 주면지반과의 상호작용을 제거하였다. Contact pair는 이질층간의 상호거동을 Coulomb Friction 모델을 이용하여 모사하는데 최대 허용 마찰응력과 Contact 접촉면사이의 접지압(contact pressure)을 이용하여 접촉면에서의 거동을 모사한다. 특히, Contact 모델링은 두 개체를 별도로 모델링하여 절점을 공유하지 않게 함으로써 접촉면에서의 미끄러

짐이 발생할 수 있도록 하는데 초점이 맞추어져 있다. 즉, 가장 기본적인 Coulomb Friction 모델에서는 접촉면의 전단응력 τ 가 접지압(p)의 일부로 표현되는 임계전단응력 $\tau_{crit} = \mu \cdot p$ (여기서 μ =마찰계수)을 초과할 경우 미끄러짐 현상이 발생하는 것으로 간주하며 한계전단응력(τ_{max})을 지정하여 모사할 수도 있다. 그림 15는 Coulomb Friction 모델에서 적용하는 파괴포락선 개념을 보여주고 있다.

한편, 해석영역의 재료 모델링에 있어서 말뚝 주면지반과 지지층은 비관련흐름법칙(non-associated flow rule)을 따르는 Mohr-Culomb 항복규준을 적용하였으며 말뚝과 선단화장판은 선형탄성 모델을 적용하여 모델링하였다. 표 10은 해석에 적용된 기본조건에 대한 지반 및 파일의 역학적 특성을 나열하고 있다.

위에 제시한 모델을 이용하여 매개변수 연구를 수행하기에 앞서 해석 모델링에 대한 검증 차원에서 본 연구에서 수행한 현장재하시험에 대한 모델링을 실시하고 그 결과로부터 얻어진 P-S 곡선을 과정을 통해 검증을 실시하였다.

현장재하시험의 해석 모델링에 있어 지지층의 탄성계수와 전단강도 정수는 캘리브레이션을 통해 재하시험에서 초기단계에서 P-S 곡선의 기울기와 항복 후 기울기를 반복 해석하는 과정을 통해 결정하였다. 이 과정에서 선단 지지층의 탄성계수는 $E_r = 1,800,000 kPa$, 그리고 강도정수 $c = 800 kPa$, $\phi = 35^\circ$ 정도로 분석되었다. 그림 16은 재하시험 결과와 해석 모델링에서 얻어진 결과를 선단 두부에서의 하중-침하 곡선과 축하중전이 곡선의 형태로 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 유한요소해석 모델링으로부터 얻어진 결과가 재하시험결과와 잘 일치하는 것으로 나타나 본 해석에서 채택한 Ext-PHC 말뚝의 모델링이 타당한 것으로 분석되었다.

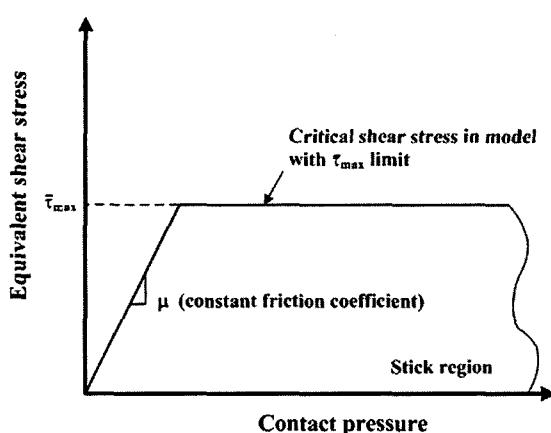
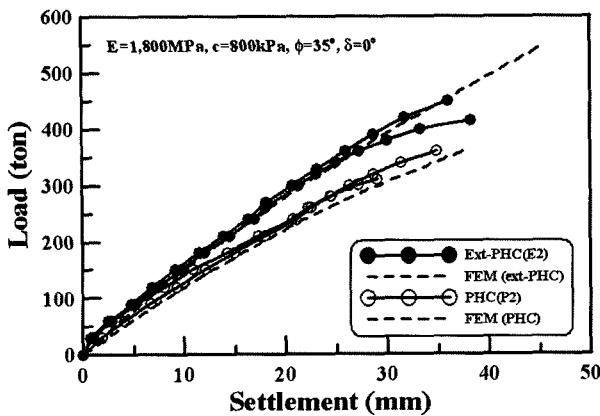


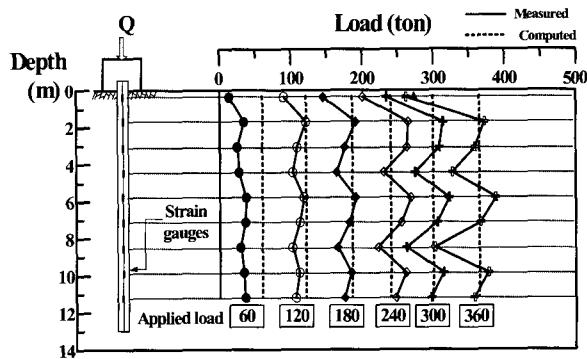
그림 15. Coulomb Friction 모델 개념도

표 10. 해석에 적용된 재료의 역학적 특성

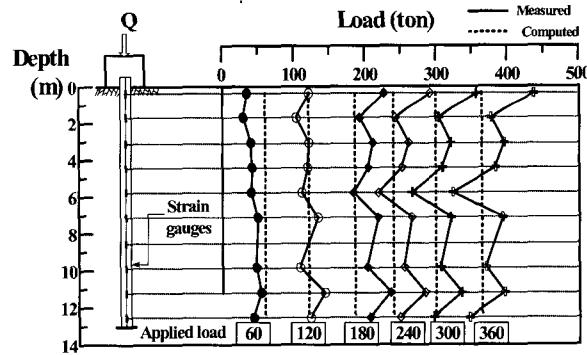
항목	역학적 특성					
	단위중량 (kN/m ³)	내부마찰각 (deg)	팽창각 (deg)	점착력 (kPa)	변형계수 (MPa)	프야송비
주면지반 (풍화토)	20	30	10	50	50	0.3
선단지지층	20	35/40	6	300/500/800	500~1000	0.3
말뚝	20	-	-	-	40000	0.3
선단화장판	20	-	-	-	200000	0.3



(a) 하중-침하 곡선 비교



(b) 하중전이곡선 비교-PHC(P1)



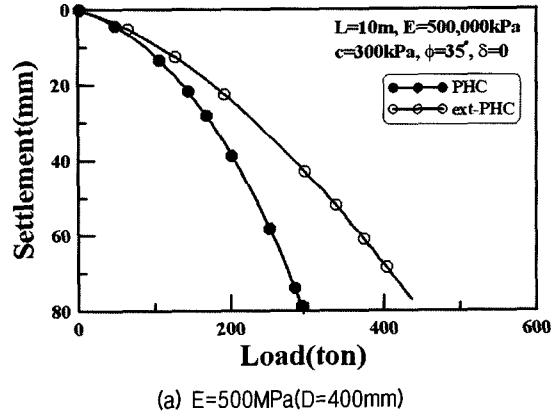
(c) 하중전이곡선 비교-Ext-PHC(E1)

그림 16. 해석 결과의 검증

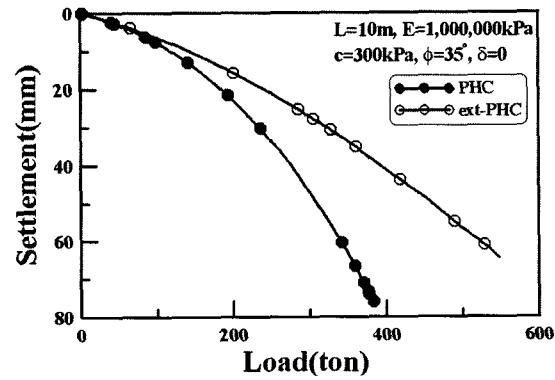
5.3 매개변수 결과

그림 17~20은 앞서 언급한 주 변수를 변화시킨 조건에 대한 PHC 말뚝과 Ext-PHC 말뚝의 P-S 곡선을 보여주고 있다. 모든 조건에 있어 Ext-PHC 말뚝의 P-S 곡선이 PHC 말뚝 위에 위치하여 전반적으로 하중-변위 특성이 크게 향상된 것으로 나타나고 있으나 Ext-PHC의 PHC 대비 지지력 증가 정도는 각 변수의 변화에 따라 그 정도가 달라지는 경향을 관찰할 수 있다.

위에 언급한 경향에 대한 구체적 고찰을 위해 Davisson

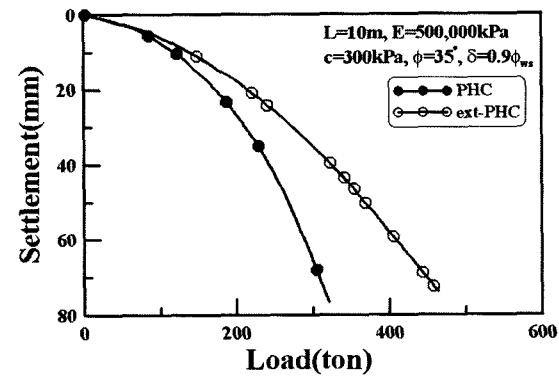


(a) E=500MPa(D=400mm)

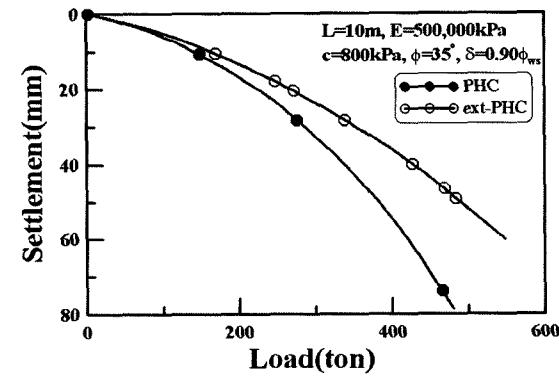


(b) E=1,000MPa(D=400mm)

그림 17. 선단지지층 강성에 따른 하중-침하곡선

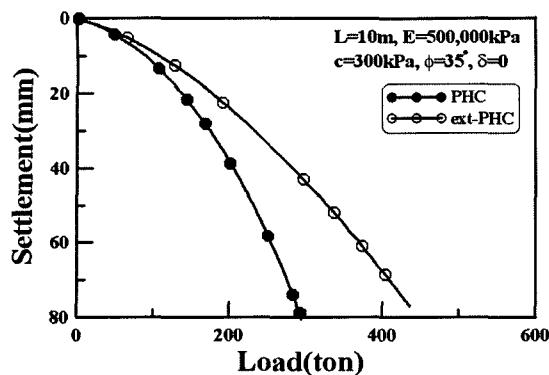


(a) c = 300kPa(D=400mm)

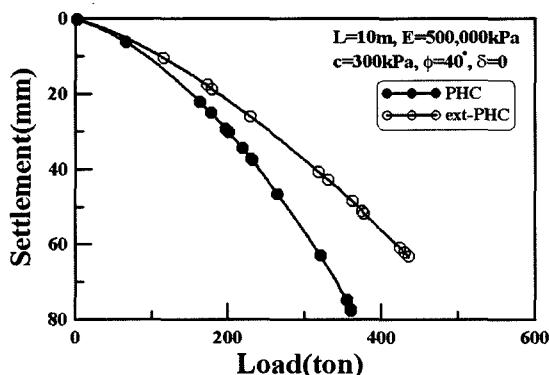


(b) c = 800kPa(D=400mm)

그림 18. 선단지지층 점착력에 따른 하중-침하곡선

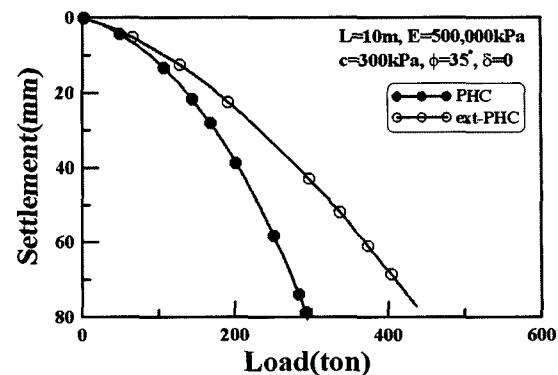


(a) $\phi = 35^\circ$ ($D=400\text{mm}$)

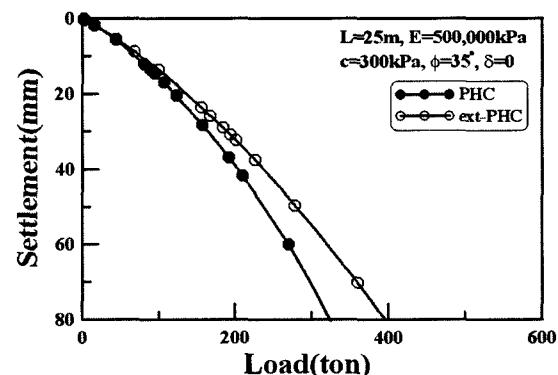


(b) $\phi = 40^\circ$ ($D=400\text{mm}$)

그림 19. 선단지지층 내부마찰각에 따른 하중-침하곡선

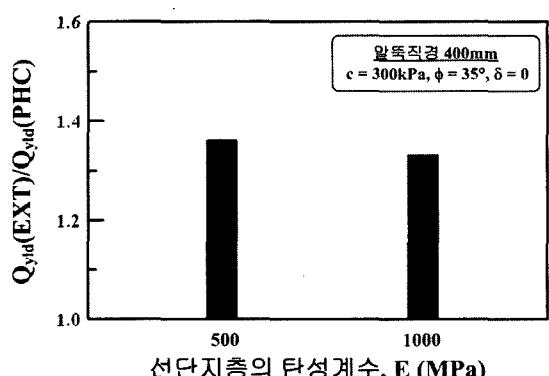


(a) $L = 10\text{m}$ ($D=400\text{mm}$)

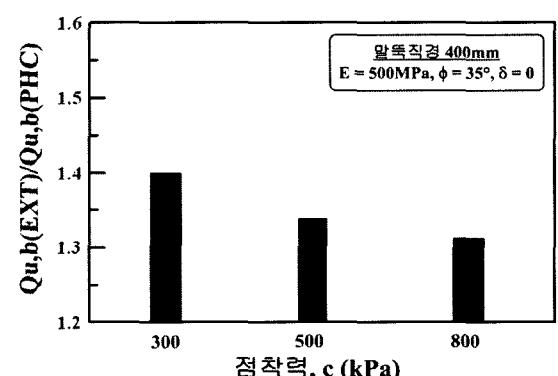


(b) $L = 25\text{m}$ ($D=400\text{mm}$)

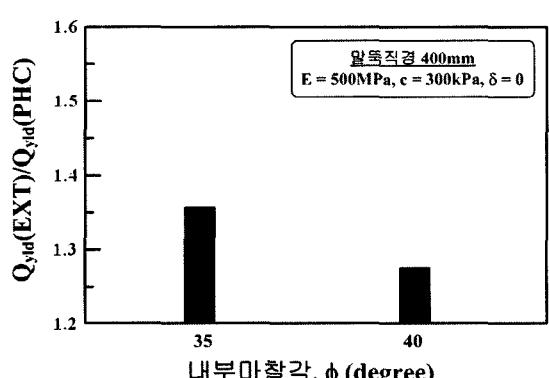
그림 20. 말뚝길이에 따른 하중-침하곡선



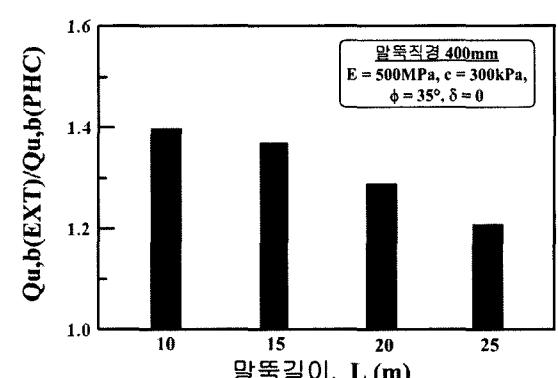
(a) 지지층 탄성계수



(b) 지지층 점착력



(a) 지지층 내부마찰각



(b) 말뚝 길이

그림 21. $Q_{u,ld}(\text{EXT})/Q_{u,ld}(\text{PHC})$ 변화 경향

방법을 이용하여 극한지지력을 산정하고 이를 토대로 산정한 극한지지력비($Q_{u(ext)}/Q_{u(PHC)}$)를 그림 21에서 검토하였다. 먼저 선단지지층의 강성에 따른 극한지지력비($Q_{u(ext)}/Q_{u(PHC)}$)를 보여주고 있는 그림 21(a)를 관찰하며 선단 지지층의 강성이 증가하면서 $Q_{u(ext)}/Q_{u(PHC)}$ 가 다소 감소하나 $Q_{u(ext)}/Q_{u(PHC)} = 1.4$ 정도의 값을 보이는 것으로 나타나 지반의 강성에 따른 극한지지력의 변화는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 그림 21(b)와 21(c)에서 보이는 지지층의 전단강도 정수에 따른 추이를 관찰하면 본 연구에서 고려한 범위내에서 그 차이는 그다지 크지 않으나 전반적으로 전단강도(c, ϕ)가 증가할수록 극한지지력비가 $Q_{u(ext)}/Q_{u(PHC)}$ 가 다소 감소하여 최대 1.4, 최소 1.3 정도의 수치를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 지지층의 탄성계수에 따른 변화 추이와도 잘 부합되는 것으로서 Ext-PHC 말뚝의 선단확장으로 인한 선단지지력 증가 효과는 다소 불리한 지지층 조건에서 극대화 될 수 있다는 점을 나타내 준다고 하겠다. 말뚝의 길이에 따른 변화추이를 보여주고 있는 그림 21(d)에서는 보이는 바와 같이 말뚝이 길어지면서 $Q_{u(ext)}/Q_{u(PHC)}$ 가 1.2까지 감소하여 경향을 보이고 있는데 이는 말뚝이 길어질수록 말뚝의 탄성변위가 증가함에 따른 영향으로 판단된다.

이러한 결과에 근거할 때 $D=400\text{ mm}$ Ext-PHC 말뚝의 선단확장 효과는 본 연구에서 검토한 지지층 조건과 말뚝의 길이 범위에서 Ext-PHC의 선단확장은 PHC 말뚝 대비 선단지지력을 20~40% 증가시키는 효과를 가져오는 것으로 나타났으며 그 구체적인 증가량은 말뚝 선단 지지층의 조건, 그리고 말뚝의 길이에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 매입공법으로 시공되는 PHC 말뚝의 선단지지력 증진 방안으로서 선단에 선단확장판을 설치하여 선단 확장을 통해 선단지지력을 증가시키는 개념을 적용하고 있는 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력 증가 효과를 확인하고 현장 적용성 검토의 일환으로 직경 400mm 말뚝에 대한 현장재하시험을 실시하였으며 검증된 유한요소해석 모델을 이용하여 다양한 조건에 대한 매개변수 연구를 실시하였다. 본 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 현장재하시험 결과를 분석한 결과 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력은 PHC 말뚝 대비 약 40~50% 증가되

는 것으로 나타났다.

- (2) 현장재하시험 결과를 토대로 검증된 유한요소해석 모델을 이용하여 다양한 변수에 대한 매개변수를 수행한 결과 해석에서 고려한 범위에 있어 Ext-PHC 말뚝의 선단지지력 증가 정도는 선단 지지층의 역학적 특성과 말뚝 길이에 따라 일반 PHC 말뚝 대비 1.2~1.4 정도를 보이는 것으로 분석되었으며, 이러한 증가율은 지지층의 경도와 강도가 작아질수록 다소 증가하는 경향을 나타냈으며 말뚝 길이가 짧아질수록 증가율이 증가하는 경향을 보였다.
- (3) 본 연구결과에 근거할 때 본 연구에서 고려한 시공 조건에 있어 Ext-PHC 말뚝을 적용함으로써 일반 PHC 말뚝의 선단지지력 증진 효과를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 (주)극동건설과 이엑스티(유)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 현장재하시험 부지 제공과 아울러 시험에 적극적으로 협조하여주신 성균관대학교 자연과학캠퍼스 관계자분들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2003), 구조물 기초설계기준.
2. 이명환, 홍현성, 조천환, 이장덕, 이원제, 전영석 (1995), 매입 말뚝공법의 지지력 특성, 95 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.I-1~I-10.
3. 조천환, 이명환, 홍현성, 엄재경 (1997), 매입말뚝의 하중-침하량곡선의 특성 및 분석기법 연구, 97 봄학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.39-46.
4. 탑기초엔지니어링주식회사 (2005a), 신창지구 A-5B/L, B-4B/L 남양휴튼 APT 신축공사현장 말뚝정재하시험 보고서.
5. 탑기초엔지니어링주식회사 (2005b), 아산 복수리 롯데 캐슬 신축공사 현장 말뚝 정재하시험 보고서.
6. 태안특수건설 (2004), 용인수지 8차 I'PARK 신축공사 현장 말뚝 정재하시험 보고서.
7. Chin, F.K. (1970), "Estimation of the Ultimate Load of Pile not Carried to Failure", Proceedings of 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, pp.81-90.
8. Comodromos, E.M., Anagnostopoulos, C.T., and Georgiadis, M.K. (2003), Numerical assessment of axial pile group response based on load test, *Computers and Geotechnics*, Vol.30, pp.505-515.
9. Davisson, M. T. (1973), High Capacity Piles, Department of civil Engineering, Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois.
10. DIN 4026. (1975), "Driven piles: construction procedure and permissible loads".
11. Hibbit, Karlsson, and Sorensen Inc. (2004), *ABAQUS users manual*, Version 6.4, Providence, R.I.

(접수일자 2006. 7. 10, 심사완료일 2007. 1. 2)