

매입말뚝의 선단지지력을 40% 이상 증대시키는 강관 부착 PHC파일 개발 최종보고서

주 의 사 항

1. 이 보고서는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술 연구개발사업의 최종보고서입니다
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원이 위탁 시행한 국토교통기술연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다

Infrastructure
R&D Report

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 "매입말뚝의 선단지지력을 40% 이상 증대시키는 강관 부착 PHC파일 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2014 . 7 . 31

주관연구기관명 : 동부건설(주)

주관연구책임자 : 이선복

연구원 : 한범석

" : 서경범

협동연구기관명 : 롯데건설(주)

협동연구책임자 : 양희정

협동연구기관명 : (주)파일웍스

협동연구책임자 : 백규호

보고서 요약서

과제고유번호	13기축-사업화-02	해당 단계 연구기간	1단계 13.7.-14.7.	단계 구분	(1)/ (총 1 단 1 계)
연 구 사 업 명	국토교통기술사업화지원사업				
연 구 과 제 명	최 상 위 과 제 명	매입말뚝의 선단지지력을 40% 이상 향상시키는 강관 부착 PHC파일의 개발			
	단위과제명	-			
연 구 책 임 자	이선복	총연구기간 참 여 연구원수	총:11명 내부:11명 외부:0명	총연구비	정부:144,000천원 기업:200,000천원 계:344,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	동부건설(주)		참여기업명	롯데건설(주), (주)파일웍스	
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약				보고서면수	89
매입말뚝은 시공과정에서 굴착공 저면에 형성되는 슬라임과 응력이완에 따른 지지층의 조밀도 이완으로 인해 PHC파일 하부지반의 강도가 원지반 강도보다 매우 작아진다. 그 결과 PHC파일을 사용한 매입말뚝은 원지반의 지지층 강도에 비해 훨씬 작은 수준의 선단지지력을 발현하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 PHC파일의 경타 관입성을 극대화한 강관 부착 PHC파일을 개발하였다. 강관 부착 PHC파일은 기존 PHC파일의 선단에 짧은 길이의 강관을 부착해서 경타 시 파일 선단에 작용하는 관입저항을 최소화함으로써 매입말뚝 시공 시 경타에 의해 강관 부착 PHC파일의 선단이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층을 관통해서 원지반 지지층에 관입되도록 함으로써 매입말뚝의 선단지지력을 대폭 향상시키는 것으로 나타났다. 그러나 강관 부착 PHC파일이 실용화되기 위해서는 설계단계에서 매입말뚝의 선단지지력을 산정할 수 있는 설계기준이 필요할 뿐만 아니라 강관 부착에 따른 파일 재료비의 상승을 최대한 억제하기 위해 파일 선단에 부착되는 강관의 길이를 최소화하는 것 등이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 지반조건과 말뚝조건하에서 시험말뚝을 시공하고 말뚝재하시험을 수행함으로써 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 증대효과를 극대화할 수 있는 최소 강관 길이를 결정하였고, 동시에 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 산정할 수 있는 설계기준의 타당성을 검증하였다.					
색 인 어 (각5개 이상)	한 글	강관 부착 PHC파일, 매입말뚝, 선단지지력, 말뚝재하시험, 설계기준			
	영 어	Steel pipe attached PHC pile, Bored pre-cast pile, Base load capacity, Field pile load test, Design criteria			

요 약 문

I. 제목

매입말뚝의 선단지지력을 40% 이상 향상시키는 강관 부착 PHC파일의 개발

II. 연구개발과제 개요

매입말뚝은 시공과정에서 굴착공 저면에 형성되는 슬라임과 응력이완에 따른 지지층의 조밀도 이완으로 인해 PHC파일 하부지반의 강도가 원지반 강도보다 매우 작아진다. 그 결과 PHC파일을 사용한 매입말뚝은 원지반의 지지층 강도에 비해 훨씬 작은 수준의 선단지지력을 발현하게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 PHC파일의 경타 관입성을 극대화한 강관 부착 PHC파일을 개발하였다. 강관 부착 PHC파일은 기존 PHC파일의 선단에 짧은 길이의 강관을 부착해서 경타 시 파일 선단에 작용하는 관입저항을 최소화함으로써 매입말뚝 시공 시 경타에 의해 강관 부착 PHC파일의 선단이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층을 관통해서 원지반 지지층에 관입되도록 함으로써 매입말뚝의 선단지지력을 대폭 향상시키는 것으로 나타났다.

그러나 강관 부착 PHC파일이 실용화되기 위해서는 설계단계에서 매입말뚝의 선단지지력을 산정할 수 있는 설계기준이 필요할 뿐만 아니라 강관 부착에 따른 파일 재료비의 상승을 최대한 억제하기 위해 파일 선단에 부착되는 강관의 길이를 최소화하는 것 등이 필요하다. 본 연구에서는 다양한 지반조건과 말뚝조건하에서 시험말뚝을 시공하고 말뚝재하시험을 수행함으로써 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 증대효과를 극대화할 수 있는 최소 강관 길이를 결정하였고, 동시에 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 산정할 수 있는 설계기준의 타당성을 검증하였다.

III. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

연구개발을 효율적으로 진행하기 위해 본 연구에 참여하는 3개 기관이 1개씩의 요소기술을 전담하여 개발하도록 하였고, 연구비의 절감을 위해 요소개발에 필요한 모든 현장시험을 취합하여 수행함으로써 현장시험의 중복 수행을 최대한 억제하였다. 그리고 요소기술의 개발을 위해서는 다양한 조건에서 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 측정치가 필요하다. 이를 위해 연구목표 달성에 반드시 필요한 말뚝재하시험들을 취합하여 대규모 현장시험을 수행함과 동시에 이전에 수행하였거나 획득한 재하시험 결과들을 재분석함으로써 약 50여개의 말뚝재하시험 결과를 확보하였다.

이상의 방법으로 확보한 말뚝재하시험 결과를 이용해서 ① 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이 결정, ② 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 산정식에 대한 타당성 검증, ③ 초기 동재하시험을 통한 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 추정기법 개발과 같은 3가지 요소기술을 개발하였다. 그 결과 매입말뚝의 선단이 SPT-N치가 50/6~50/4인 지지층에 안착될 때 선단강관의 길이가 0.5D~0.7D인 강관 부착 PHC파일을 사용하면 설계 선단지지력을 발휘하는데 문제가 없는 것으로 나타났다. 그리고 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝 시공 시 시멘트밀크와 슬라임을 충분히 교반하고 적정 중량의 해머로 경타를 가하면 제안된 선단지지력 산정식은 매입말뚝의 선단지지력을 보수적으로 산정하는 것으로 밝혀졌다. 또한 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력은 초기 동재하시험에서 측정된 시멘트밀크 경화 이전의 말뚝 지지력에 Z_N 을 함수로 하는 변환인자를 곱하는 방법으로 산정이 가능하였다.

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

본 연구결과의 최종 성과품은 선단지지력을 40%이상 증대시키는 강관 부착 PHC파일이다. 주요 연구성과로는 국내특허 출원 2건과 등록 1건, 디자인 등록 2건이 있다. 학술적 성과로는 2013년과 2014년 한국지반공학회 가을학술발표회에서 논문을 발표하였다. 또한 건축구조 제20권 제5호에 기술내용이 기술기사로 소개되었으며, 국토교통과학기술진흥원이 주최한 2013 국토교통기술대전에 참가하여 전시회를 개최하였다.

기술사업화 지원과제 예산으로 김포풍무 센트레빌 현장에서 20일간에 걸쳐 대규모 말뚝재하시험을 실시하였으며, 외부인사들을 초청하여 기술소개 행사도 개최하였다. 재하시험 결과를 간단히 분석해보면 초기동재하시험 결과 직경 500mm 강관 부착 PHC파일은 설계지지력인 2,000kN 이상의 지지력을 발휘하였고, 직경 500mm 강관 부착 PHC파일의 평균 지지력이 직경 600mm PHC파일의 지지력과 유사하게 나타나 선단지지력이 큰 폭으로 향상됨을 확인할 수 있었다. 또한 Restrike시험을 통한 지지력 측정결과 직경 500mm 강관 부착 PHC파일의 지지력이 직경 600mm PHC파일 대비 1.8~7.5%정도 크게 나타나 개발된 기술의 우수성을 확인할 수 있었다.

본 개발된 기술의 실용화를 위해 3개 현장에서 기존기술과의 성능비교를 위한 시험시공을 수행하였다. 시험시공을 통해 모든 지반조건에서 PHC파일을 사용하는 기존기술보다 개발된 기술로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 본 기술개발과제를 시작한 이후로 현재까지 7개 현장에 적용을 완료해서 약 10,600공의 강관 부착 PHC파일을 시공하였다.

V. 연구목표 달성 및 효과

본 연구를 통해 강관 부착 PHC파일의 지지력 특성을 극대화하면서 제조원가를 낮출 수 있는 선단강관의 최적 길이를 결정하였고, 다양한 현장조건에서 다수의 말뚝재하시험을 수행함으로써 강관 부착 PHC파일의 실용화에 반드시 필요한 선단지지력 산정식에 대한 정확도를 검증하였다. 또한 시멘트밀크가 경화되지 이전과 이후에 말뚝에 대한 재하시험을 수행함으로써 선단강관 내부에 유입된 시멘트밀크가 경화되지 이전에 수행한 E.O.I.D시험 결과를 이용해서 시멘트밀크가 경화된 이후에 말뚝 선단에서 발현되는 선단지지력을 추정할 수 있는 경험식을 도출하는데 성공하였다. 이와 같이 본 연구과제를 제안할 당시 계획했던 강관 부착 PHC파일의 실용화에 필요한 3가지 요소기술이 모두 개발되었다.

본 사업화 대상 기술이 개발되면 매입말뚝 관련 기술의 일본 의존도를 낮춰서 국내 지반 조건에 적합한 원천기술 확보에 도움이 될 뿐 아니라 이를 바탕으로 기초공사비의 절감을 통해 동남아 국가에서 발주하는 해외공사의 수주에도 크게 기여할 수 있다. 또한 강관 부착 PHC파일에 의한 매입말뚝의 선단지지력 극대화를 위해서는 파일 본체를 초고강도 콘크리트로 대체해야 할 필요성이 있으므로 초고강도 콘크리트 파일의 대중화를 앞당길 수 있다.

또한, 강관 부착 PHC파일의 사용으로 매입말뚝의 선단지지력이 기존 대비 40% 이상 향상되므로 현장에서 매입말뚝의 시공 분수 감소를 통해 기초 공사비의 절감과 공사기간의 단축도 가능하다. 또한 현장에서 말뚝의 시공분수가 감소함에 따라 말뚝 시공 시 발생하는 경타에 의한 소음과 진동과 같은 건설공해의 총량이 감소하므로 건설공해로 인한 민원발생 가능성을 낮출 수 있다.

VI. 연구성과 활용계획

과거 10년간 국내 건축시장은 매년 약 3%씩 확장되어 왔으며, 건설공해로 인한 민원 발생의 억제를 위해 구조물 기초로 매입말뚝을 적용하는 사례가 급증하였다. 또한 최근 건설사들이 수익성 악화를 극복하기 위해 원가절감에 최선을 다하고 있다. 따라서 강관 부착 PHC파일이 실용화되어 제품화되면 매입말뚝의 지지력을 증대를 통한 공사비 절감 및 공사기간 단축이 가능해지므로 공사비 절감을 위해 대다수 건설사에서 강관 부착 PHC파일을 현장에 적용할 것으로 판단된다.

SUMMARY

It is known that the base load capacity of bored pre-cast piles is very low compared to the strength of bearing stratum. since slime is formed at the base of bore hole and the density of bearing stratum surrounding the base of bore hole is decreased due to stress relaxation in drilling process of bored pre-cast pile method. In order to resolve the weakness of bored pre-cast piles mentioned above, a new type of PHC pile, which a short steel pipe with the same diameter as the PHC pile is attached to the pile tip, is developed. Several field pile load test results show that bored pre-cast piles using the new PHC piles have significantly higher base load capacity than that using the existing PHC piles because the short steel pipe at the tip of new PHC piles is driven into the undisturbed bearing stratum by pile driving.

However, in order to apply the new PHC piles to the practice, several elemental technologies such as design criterion for estimating the base load capacity of bored pre-cast piles using the new PHC piles and optimum steel pipe length for obtaining designed base load capacity need to be developed. In this study, a series of bored pre-cast piles using the new PHC piles are installed under various soil and pile conditions, and dynamic and static pile load tests are performed on the test piles. Base on the results of pile load tests, an optimum steel pipe length of the new PHC piles is determined and accuracy of the design criterion for base load capacity of bored pre-cast piles is checked.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
1.1 Summary of research	3
1.2 Definition and range of research	5
1.3 Literature review	6
1.4 Status of research results in pile foundation ares	7
 Chapter 2. Contents and results of research	 13
2.1 Strategy and method for research	13
2.2 Contents of research	15
2.3 Research results for elemental technology	31
 Chapter 3. Final research and application results	 39
3.1 Achievement degree of research goal	39
 Chapter 4. Achievement and effect of research goal	 49
4.1 Achievement degree of research goal	49
4.2 Technical analysis for research results	51
4.3 Economical analysis for research results	51
4.4 Political analysis for research results	54
 Chapter 5. Application of research results	
and necessity of further research	57
5.1 Application plan for research results	57
5.2 Necessity of further research	59
 Chapter 6. Reference	 63

목 차

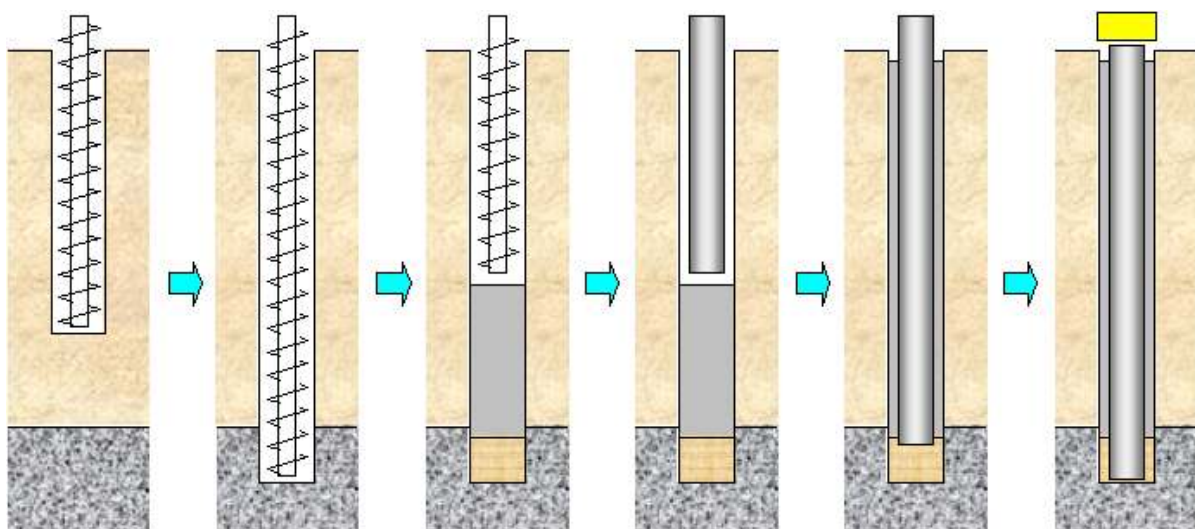
제1장 연구개발과제 개요	3
1.1절 연구개발 개요	3
1.2절 연구개발의 정의, 범위, 특징	5
1.3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황	6
1.4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치	7
 제2장 연구개발 수행 내용 및 결과	13
2.1절 연구수행 전략 및 방법론	13
2.2절 연구수행과정 및 내용	15
2.3절 요소기술 개발 결과	31
 제3장 최종 연구성과 및 적용실적	39
3.1절 최종 연구성과	39
 제4장 연구목표 달성 및 효과	49
4.1절 연구개발 최종목표 달성도	49
4.2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석	51
4.3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석	52
4.4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석	54
 제5장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	57
5.1절 연구성과 향후 활용방안	57
5.2절 추가연구 필요성	59
 제6장 참고문헌	63

제 1 장 연구개발과제 개요

제 1 장 연구개발과제 개요

1.1절 연구개발 목적 및 필요성

구조물의 기초로 사용되는 말뚝은 시공방법에 따라 항타말뚝과 매입말뚝, 현장타설말뚝으로 분류된다. 이중 항타말뚝은 지지력이 크고 시공비가 저렴해서 경제적이거나 시공 중 발생하는 소음·진동이 커서 도심지와 농가 주변에서는 사용이 제한된다. 그리고 현장타설말뚝은 시공으로 인한 소음과 진동이 작고 대구경화가 가능해 본당 지지력이 커서 장대교량이나 도심지 대형구조물의 기초로 많이 사용되지만 시공비가 비싸고 시공이 복잡하다는 단점을 갖고 있다. 따라서 도심지에 건설되는 대부분의 건축구조물에서는 기초 공사비를 절감하고 시공 중 발생하는 소음과 진동으로 인한 민원 발생을 최소화하기 위해 시공 중 발생하는 건설공해는 항타말뚝보다 작고 시공비는 현장타설말뚝보다 저렴한 매입말뚝을 기초로 사용하고 있다. 매입말뚝은 그림 1.1과 같이 스크류 오거나 에어해머(일명 T4)를 이용해서 천공한 굴착공에 시멘트밀크를 주입하고 기성말뚝(일반적으로 PHC말뚝을 사용)을 삽입한 후 항타로 인한 소음·진동을 고려해 중량이 크지 않은 해머로 말뚝의 두부를 5~10회 정도 가볍게 타격(경타)하는 것으로 시공을 완료한다. 그러나 굴착공을 천공하는 과정에서 오거나 T4에 의해 파쇄된 흙부스러기, 즉 슬라임이 많게는 굴착공 직경의 1~2배의 두께로 굴착공 저면에 쌓일 뿐만 아니라 토사의 제거에 따른 응력이완으로 인해 일정 범위내에 있는 굴착공 하부 지반이 원지반보



(a) 천공 (b) 암반천공 (c) 밀크주입 (d) 말뚝삽입 (e) 말뚝안착 (f) 경타

그림 1.1 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 시공방법

다 느슨해지는 현상이 발생한다(Jardin 1988). 이런 상황에서 굴착공에 삽입된 PHC파일에 경타를 가하더라도 타격에너지가 크지 않기 때문에 대부분의 경우 PHC파일은 굴착공 저면에 쌓인 슬라임과 그 하부에 위치하는 느슨해진 지반을 관통하지 못하고, 압축성이 크고 강도가 작은 슬라임 위에 놓임으로써 매입말뚝의 선단지지력이 큰 폭으로 감소하게 된다. 그 결과 현재 PHC파일을 사용해서 시공되는 매입말뚝의 대부분은 PHC파일이 갖고 있는 허용내력의 55~70%만을 설계지지력으로 사용하고 있으며, 그로 인해 구조물의 하중에 비해 많은 수의 매입말뚝을 시공하고 있는 것이 현실이다.

현재까지 수행된 연구결과에 따르면 그림 1.2와 같이 PHC파일의 선단에 짧은 길이의 강관을 부착한 강관 부착 PHC파일을 매입말뚝에 사용하면 경타과정에서 파일 선단에 부착된 강관이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 천공으로 인해 이완된 지지층 영역을 관통해서 강도가 큰 원지반의 지지층에 관입됨으로써 매입말뚝의 선단지지력이 대폭 향상되는 것으로 나타났다. 그러나 Carranza-Torres와 Fairhurst(1999)의 연구결과에 따르면 풍화암에 굴착공을 천공할 때 응력이완으로 인해 발생하는 이완영역의 범위가 지반강도에 따라 달라지므로 매입말뚝의 선단지지력을 향상시키기 위해 필요한 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이도 달라질 수 있다. 또한 현재 동일 직경을 기준으로 강관의 가격이 PHC파일 대비 3배에 달하므로 강관 부착 PHC파일의 사용에 따른 매입말뚝의 시공비 상승을 억제하기 위해서는 파일에 부착되는 강관의 길이를 최대한 짧게 하는 것이 유리하다. 따라서 경제성 확보를 통한 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 실용화를 위해서는 경타에 의해 파일의 선단에 부착된 강관이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층 영역을 관통해서 원지반 지지층에 관입될 수 있도록 지지층의 강도별로 필요한 최적의 강관 길이를 파악하는 것이 필요하다.

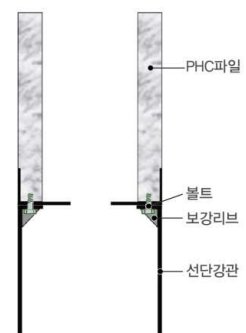
또한 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝을 현장에 적용하기 위해서는 설계단계에서 현장의 지반조건을 고려한 말뚝의 설계지지력이 결정되어야 하고, 현장에 본시공이 들어가기 직전에 동재하시험이나 정재하시험을 통해서 말뚝의 설계지지력을 확인하는 작업이 뒤따른다.



(a) 선단부 형상



(b) 선단강관 부착 방법



(c) 파일의 구성

그림 1.2 강관 부착 PHC파일의 선단부 형상 및 구성

특히 말뚝의 설계지지력 확인을 위해 많은 현장에서 정재하시험보다는 시험이 간단하고 비용이 저렴한 동재하시험의 수행을 선호하며, 동재하시험 중에서도 말뚝 시공후 1주일 뒤에 수행할 수 있는 Restrike 시험보다 말뚝 시공직후 수행할 수 있는 E.O.I.D 시험을 통해서 말뚝의 설계지지력 만족여부를 결정하고 있다. 그러나 경타과정에서부터 파일 전체 선단면적에 선단지지력이 발현되는 PHC파일과 달리 강관 부착 PHC파일은 시공 직후에는 강관 단면부에만 선단지지력이 발현되고 시멘트밀크가 경화된 후에는 강관 전체면적에 선단지지력이 발현되므로 PHC파일을 사용하는 경우에는 E.O.I.D. 시험을 통해서도 매입말뚝의 선단지지력 예측이 가능하지만 강관 부착 PHC파일을 사용하는 경우에는 Restrike 시험을 통해서만 매입말뚝의 선단지지력 측정이 가능하다. 따라서 사업화 대상 기술의 실용화를 위해서는 먼저 다수의 동재하 및 정재하시험 결과를 이용해서 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 추정할 수 있는 지지력 산정식에 대한 정확도를 검증하는 작업이 필요하고, 동시에 동일 매입말뚝에 대해 수행된 E.O.I.D 시험과 Restrike 시험의 결과를 통해서 E.O.I.D 시험으로부터 시멘트밀크가 경화된 이후에 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 추정할 수 있는 방법이 개발되어야 한다.

1.2절 연구개발의 정의, 범위, 특징

매입말뚝의 선단지지력을 기존 대비 40% 이상 향상시킬 수 있는 강관 부착 PHC파일의 실용화와 연구개발의 궁극적인 정의이며, 이를 달성하기 위해 연구범위는 크게 1) 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이 결정 2) 설계기준에 대한 타당성 검증 3) 초기 동재하시험을 통한 선단지지력 추정기법의 3개 분야로 세분화하였다. 세분화한 연구범위의 특징을 파악하기 위해 우선적으로 자료수집 및 이를 이용한 예비연구 수행하게 되며, 예비연구단계에서는 기존 연구결과와 수치해석 등을 통해 풍화암의 강도에 따른 응력이완 영역의 변화 등에 대한 이론적인 연구를 수행함과 동시에 다양한 형태의 말뚝에 대한 설계기준을 조사함으로써 강관 부착 PHC파일의 설계기준 등에 대한 사전조사가 이루어질 것이다. 각 연구범위의 특징은 다음과 같다.

1. 지반조건별 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이 결정

Carranza-Torres와 Fairhurst(1999)의 연구결과에 따르면 지반 천공시 발생하는 응력이완 영역의 범위가 지반의 강도에 따라 달라지므로 지지층의 강도에 따라 매입말뚝의 선단지지력을 극대화하기 위해 필요한 강관 부착 PHC파일의 강관의 길이도 달라지게 된다. 따라서 동일 조건하에서 강관의 길이를 달리한 강관 부착 PHC파일을 사용해서 매입말뚝을 시공하고 재하시험을 수행함으로써 강관 길이에 따른 매입말뚝의 선단지지력 변화를 측정하고, 이 결과로부터 강관 부착 PHC파일의 허용내력을 고려해서 파일에 부착되는 최적 강관

길이를 결정한다.

2. 강관부착 PHC 파일 설계기준에 대한 타당성 검증

기존 연구결과에 근거해서 개발된 강관 부착 PHC파일에 대한 선단지지력 설계기준이 타당성을 확보하기 위해서는 보다 많은 재하시험 결과를 이용해서 측정치와 계산결과를 비교하는 검증 작업이 수행되어야 한다. 이를 위해 보다 다양한 지반조건에서 강관 부착 PHC 파일을 사용한 매입말뚝에 대해 동재하시험이나 정재하시험을 수행함으로써 다양한 방법으로 측정된 매입말뚝의 선단지지력을 이용해서 강관 부착 PHC파일의 선단지지력에 대한 설계기준의 타당성을 검증하고자 한다.

3. 초기 동재하시험을 통한 매입말뚝의 선단지지력 추정기법 개발

강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝은 선단지지력 메카니즘상 굴착공에 충전되는 시멘트밀크의 경화여부에 따라 선단지지력의 크기가 매우 큰 폭으로 달라진다. 따라서 현장에 시공되는 다수의 강관 부착 PHC파일에 대해 E.O.I.D 시험과 Restrike 시험을 수행해서 시멘트밀크의 경화에 따른 매입말뚝의 선단지지력 변화를 조사하고, 이를 이용해서 지지층의 지반특성별로 E.O.I.D 시험결과로부터 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 추정할 수 있는 방법을 도출하고자 한다. 이 방법이 개발되면 E.O.I.D 시험을 통해서 시멘트밀크가 경화된 이후에 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 추정할 수 있게 되므로 강관 부착 PHC파일의 현장적용성 향상에 크게 도움이 될 것이다.

1.3절 관련분야의 국내외 기술개발 현황

국내의 경우 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키기 위해 선단확장파일이 개발되었다. 선단확장파일은 그림 1.3과 같이 PHC파일의 선단에 파일 본체보다 직경이 50mm 큰 원형 철판을 부착한 EXT파일과 PHC파일의 선단부 벽두께를 본체보다 50mm 두껍게 해서 말뚝의 선단부 직경을 본체보다 100mm 크게 한 SPHC파일로 구분된다. 특히 SPHC파일은 일본에서 개발되어 일본 표준규격인 JIS에 등록된 것으로, 일본에서 상당한 사용실적을 갖고 있다. 그러나 본 개발 대상 기술과 같이 직경을 확대하지 않고 지지층의 원지반 강도를 이용해서 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 공법은 국내외에서 개발되고 있는 것이 없는 것으로 파악되었다.



(a) EXT파일



(b) SPHC파일

그림 1.3 매입말뚝의 선단지지력 증대를 위해 개발된 선단확장파일

1.4절 연구개발결과가 관련분야에서 차지하는 위치

매입말뚝의 선단지지력(Q_p)은 식 (1.1)과 같이 말뚝 선단에 작용하는 단위 면적당 선단지지력(q_p)과 말뚝 선단의 폐쇄면적(A_p)의 곱으로 계산된다.

$$Q_p = q_p \times A_p \quad (1.1)$$

그러므로 매입말뚝의 선단지지력은 말뚝의 선단면적을 키우거나 단위 면적당 선단지지력을 키움으로써 향상시킬 수 있다. 이중 EXT파일이나 SPHC파일과 같은 선단확장파일은 말뚝의 선단면적을 증대시켜서 매입말뚝의 선단지지력 향상시키는 경우에 해당한다. 그러나 매입말뚝에 사용하는 파일의 선단면적을 확대시키면 경타 시 파일 선단에 작용하는 관입저항이 커지게 되므로 경타에 의한 파일의 관입성이 저하되고, 그로 인해 파일이 굴착공 저면의 슬라임을 관통하지 못할 뿐만 아니라 경타에 의한 슬라임의 압축량도 감소한다. 그 결과 매입말뚝의 선단면적은 선단확장파일의 종류에 따라 21~44% 증가하지만 식 (1)에서 파일이 관입되는 지지층의 강도와 관련된 N_q 값이 작아져서 매입말뚝의 단위 면적당 선단지지력이 감소하게 되므로 매입말뚝의 선단지지력은 PHC파일의 선단면적 증가율 만큼 증가하지 않거나 경우에 따라 오히려 감소할 수도 있게 된다. 그리고 선단확장파일을 사용하면 PHC파일을 사용할 때보다 매입말뚝의 시공을 위한 굴착공의 직경도 커져야 하기 때문에 굴착공의 천공비가 비싸지고 굴착공에 충전되는 시멘트밀크의 양이 2배 이상 많아지므로 공사비가 대폭 상승하게 된다. 또한 선단확장파일 본체와 굴착공벽간의 틈새가 커서 파일의 연직도 관리가 쉽지 않을 뿐만 아니라 파일 선단의 직경이 커진 만큼 군효과(group effect)로 인한 선단지지력의 저하를 방지하기 위해 말뚝간에 유지해야 하는 이격거리도 커지므로 말뚝 두부에 시공되는 기초의 크기도 커지게 되는 문제점이 있다. 이상에서 언급한 바와 같이 매입말뚝의 지지력 향상을 통한 공사비 절감과 공기단축을 위해 PHC파일의 선단 면적을 확대한 선단확장파일이 개발되었으나 매입말뚝의 선단지지력 증대효과 뿐만 아니라 시공비 절감 측면에서 많은 논란이 일고 있다. 본

개발 기술은 매입말뚝 관련 신기술에 대한 수요를 충족시키기 위해 기존 PHC파일이나 선단 확장파일을 사용한 매입말뚝 공법이 갖고 있는 문제점들을 해결함으로써 지지력이나 경제성 측면에서 진일보한 새로운 개념의 매입말뚝 공법으로 타 공법과 차별화되며 우수한 성능을 발현하는 기술이라고 할 수 있다. 이러한 우수성은 중국과 베트남에 출원이 완료되었으며, 국제 특허 등록이 진행 중이라는 사실을 통해서도 입증될 수 있다. 또한 현재 건설신기술 1차심사를 통과하여 9월 23일 2차 심사를 앞두고 있는 상태인데, 건설신기술 인증까지 취득하게 된다면 다시 한 번 그 우수성을 확인받는 계기가 될 것으로 판단된다.

결론적으로 본 기술의 우수성 및 차별성을 정리하면 다음과 같다. 본 기술은 기존 PHC파일의 선단에 짧은 길이의 강관을 부착해서 파일의 경타 관입성을 극대화한 강관 부착 PHC파일과 이를 이용한 매입말뚝 공법에 대한 것으로, 경타에 의해 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착된 선단강관이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층을 관통해서 강도가 큰 원지반 지지층에 관입되도록 함으로써 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 특징을 갖고 있다. 반면, 기존기술은 시공에 사용되는 PHC파일과 선단확장파일의 선단면적이 커서 경타에도 불구하고 파일 선단이 슬라임에 안착된 상태에서 시공이 종료되어 매입말뚝의 선단지지력이 상대적으로 작게 될 뿐만 아니라 선단확장파일을 사용하는 경우에는 굴착공의 직경을 크게 해야 하므로 파일의 경사도 관리가 어렵고 굴착공의 직경 차이로 인해 PHC파일과의 교차 시공도 불가능하다. 이에 반해 본 기술은 PHC파일이나 선단확장파일을 사용하는 기존기술에 비해 다음과 같은 차별성과 우수성을 가지고 있다.

1. 시공성이 우수해서 매입말뚝의 선단지지력 증대효과가 탁월하다.

기존의 PHC파일이나 선단확장파일은 선단면적이 커서 매입말뚝 시공 시 경타에도 불구하고 파일 선단이 굴착공 저면의 슬라임을 관통하지 못하고 다져진 슬라임 위에 놓이게 되고, 그로 인해 매입말뚝의 선단지지력은 다져진 슬라임의 강도에 의해 크게 좌우된다. 반면, 개발된 기술은 PHC파일의 선단 슈판에 천공하는 부력방지공의 직경을 파일 직경의 1/3이상으로 확대해서 시멘트밀크가 충전된 굴착공에 강관 부착 PHC파일을 삽입할 때 선단강관 내부로 유입되는 슬라임이 PHC파일의 중공부로 원활히 배출되도록 하여 경타에 의한 파일의 관입성을 극대화 하였고, 동시에 경타에 의해 파일 선단에 부착된 선단강관이 원지반 지지층에 관입되도록 하며 슬라임의 강도특성이 매입말뚝의 선단지지력에 미치는 영향을 최소화하였다. 따라서 기존기술은 굴착공 천공방식과 경타 시 가하는 타격에너지의 수준에 따라 매입말뚝의 선단지지력이 큰 차이를 보이지만, 개발된 기술은 일반적인 수준으로 시공관리를 유지해도 매입말뚝이 매우 높은 수준의 선단지지력을 안정적으로 발현하기 때문에 기존 기술에 비해 시공성이 우수하다.

2. 시공품질이 우수하다.

매입말뚝 시공 시 PHC파일에 경타를 가하면 여러 가지 원인으로 인해 연직이 아닌 경사진 상태로 시공되는 경우가 많으며, 파일의 경사도가 커지면 상부하중에 의해 파일에 발생하는 휨하중이 커져서 PHC파일에 인장균열이 발생하는 등의 구조적인 문제가 발생할 가능성이 높다. 그래서 경사말뚝을 제외한 대부분의 경우에 파일의 경사도는 1/50 이하로 관리하도록 하고 있다.

PHC파일을 사용해서 매입말뚝을 시공하는 경우 굴착공의 직경은 시공에 사용되는 PHC파일 직경보다 60mm 정도 크게 하는 것이 일반적이며, 경타 과정에서 PHC파일이 경사진 상태로 시공되더라도 파일의 경사도는 ‘60mm/파일 근입길이’로 제한된다. 그리고 선단확장파일의 경우에는 선단부 직경이 두부보다 60mm 크기 때문에 매입말뚝 시공을 위한 굴착공 직경이 파일 두부 직경보다 110mm 커지게 되고, 그로 인해 경타 과정에서 발생할 수 있는 파일의 경사도가 ‘110/파일 근입길이’로 커지게 된다. 반면 개발된 기술은 매입말뚝 시공을 위한 굴착공 직경이 PHC파일을 사용할 때와 동일하므로 선단확장파일을 사용할 때보다 경타 과정에서 발생할 수 있는 파일의 경사도가 절반 수준으로 작아진다. 따라서 개발된 기술은 선단확장파일을 사용하는 기존기술에 비해 파일의 경사도 관리가 용이하기 때문에 매입말뚝의 시공품질 개선에 효과적이다.

3. 한 대의 시공장비로 PHC파일과 교차 시공이 가능하다.

개발된 기술에 사용하는 강관 부착 PHC파일은 파일 두부와 선단에 부착되는 선단강관의 직경이 동일하기 때문에 PHC파일을 사용해서 매입말뚝을 시공할 때와 굴착공의 직경이 동일하게 된다. 반면 선단확장파일은 파일 두부와 선단부의 직경이 다르기 때문에 PHC파일을 사용한 매입말뚝을 시공할 때보다 굴착공의 직경을 크게 해야 한다. 그 결과 한개 현장에 지지력이 다른 두 개의 매입말뚝을 시공해야 하는 경우 PHC파일과 선단확장파일을 동시에 사용하기 위해서는 두 대의 시공장비가 필요하지만 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용하면 파일의 직경이 동일하므로 한 대의 시공장비로 지지력이 다른 두 가지 매입말뚝의 시공이 가능하다. 따라서 개발된 기술은 한 대의 시공장비로 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 교차 시공해서 지지력이 다른 두 종류의 매입말뚝을 시공하는 것이 가능하기 때문에 말뚝에 작용하는 하중 크기에 따라 매입말뚝의 종류를 선택해서 적용할 수 있어 공사비 절감과 시공성 측면에서 기존기술보다 매우 우수하다.

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과

2.1절 연구수행 전략 및 방법론

1. 연구수행 전략

본 연구에서는 기존보다 매입말뚝의 선단지지력을 40%이상 향상시키는 강관 부착 PHC 파일을 실용화하는 것이 최종 목표이며, 이를 위해서는 말뚝기초 분야에 대한 연구경험이 풍부한 전문가 집단과 이를 현장에 시험 적용할 수 있는 능력을 갖춘 건설회사의 협력이 필요하다. 따라서 주관 및 공동연구 기관인 동부건설 및 롯데건설(주)에서는 각각 본 사업화 대상 기술의 현장적용성 증대를 위해 필요한 지지력 설계기준에 대한 검증과 초기 동재하시험 결과를 통한 말뚝의 선단지지력 추정기법에 대한 연구를 수행함과 동시에 이들 요소기술 개발에 필요한 현장시험용 시험부지를 제공할 계획이다. 그리고 본 사업화 대상 기술의 원천기술을 개발한 (주)파일웍스에서는 가톨릭관동대학교 토목공학과에서 기초공학 분야의 강의를 16년 수행하고 말뚝기초 분야에서 23년의 연구경력을 갖춘 연구자가 참여하여 동부 및 롯데건설(주)과 공동연구를 수행함과 동시에 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착되는 강관의 최적길이 결정을 위한 연구를 수행할 계획이다. 또한 각 기관에서 담당할 요소기술의 개발을 위해서는 반드시 다양한 조건의 현장에 시공된 시험말뚝에 대한 재하시험이 필요하며, 이 과정에 투입되는 현장시험비용을 최소화하기 위해 각 요소기술 개발에 필요한 재하시험 형태를 종합해서 소수의 현장에서 일괄 수행하였다. 표 2.1은 연구에 참여한 기관별 연구내용 및 목표를 정리한 것이다.

표 2.1 연구 참여기관별 연구내용

구 분	주관연구기관 (동부건설(주))	공동연구기관 (롯데건설(주))	공동연구기관 ((주)파일웍스)
연구내용	• 현장시험용 부지 제공 • 시험말뚝에 대한 재하시험 수행(공동) • 강관부착 PHC파일에 대한 설계기준 검증	• 현장시험용 부지 제공 • 시험말뚝에 대한 재하시험 수행(공동) • 초기 동재하시험을 통한 매입말뚝의 선단지지력 추정기법 개발	• 시험파일 제작 및 현장 시공 관리 • 시험말뚝에 대한 재하시험 수행(공동) • 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이 결정

2. 세부 추진계획 및 방법

본 연구개발을 효율적으로 수행하기 위해 연구에 참여한 3개 기관이 회의를 통해 각자가 담당한 요소기술의 개발을 위해 필요한 시험파일과 재하시험 종류 등을 협의하였다. 그 결과 표 2.2에서 보듯이 각각의 연구개발 내용별 연구방법이 도출되었고, 각 요소기술의 개발에 필요한 재하시험 수행 및 시험결과 분석은 공동으로 수행하였다.

표 2.2 연구개발 추진 계획 및 방법

일련 번호	연구개발내용	추진 계획 및 방법	수행 기간	해당 기관
1	- 자료수집 및 예비연구 - 이완영역의 산정 - 파일 강관의 수치해석	- 기존 이론을 통한 지지층 조건별 천공시 이완영역 계산 - 강관 부착 PHC파일의 구조적 안정성 검증을 위한 수치해석	4개월	공동
2	시험용 강관 부착 PHC파일 제작	강관 길이를 달리한 시험용 강관 부착 PHC파일 제작	1개월	파일 웍스
3	- 시험시공 및 재하시험 - 시험 파일 시공 - 동·정재하시험	- 시험용 강관 부착 PHC파일의 시공 - 시험 파일을 사용한 매입말뚝에 대한 동재하 및 정재하시험 수행	3개월	공동
4	강관의 최적 길이 결정	- 강관 길이에 따른 강관 부착 PHC 파일의 선단지지력 변화 조사 - 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입 말뚝의 선단지지력을 극대화하는 최소 강관 길이 결정	1개월	파일 웍스
5	- 설계기준 검증 - 측정치와 계산치 비교 - 안전측 여부 판단	동재하 및 정재하시험 결과를 이용한 설계기준의 타당성 검증	2개월	동부 건설
6	- EOID시험을 통한 선단지지력 추정기법 개발 - EOID결과와 Restrike 또는 정재하시험 결과 비교 - 추정방법 도출	- EOID와 Restrike시험 결과를 통해 시멘트밀크 경화 전후의 선단지지력 변화 조사 - EOID 시험 결과와 말뚝의 선단지 지력간 관계식 도출	1개월	롯데 건설
7	종합보고서 작성	연구결과 취합 및 종합보고서 작성	1개월	공동

2.2절 연구수행과정 및 내용

1. 연구수행 과정

본 연구에서는 강관 부착 PHC파일의 실용화를 위해 ① 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이 결정, ② 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 산정식에 대한 타당성 검증, ③ 초기 동재하시험을 통한 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 추정기법 개발과 같은 3가지 요소기술의 개발을 목표로 하고 있다. 이러한 요소기술의 개발을 위해서는 다양한 조건에서 시공된 시험말뚝에 말뚝재하시험을 수행해서 지반조건 및 말뚝조건에 따라 매입말뚝의 선단지지력 변화를 측정하는 작업이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 다음과 같은 순서와 방법으로 연구를 진행하였다.

(1) 자료수집 및 이를 이용한 예비연구 수행

기존 연구결과를 이용해서 지지층의 강도에 따른 굴착공 하부에서 발생하는 응력이완 영역의 변화를 추정함과 동시에 국내외 여러 기관에서 사용하고 있는 매입말뚝의 선단지지력 산정식을 참조해서 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 산정식에 대한 타당성을 검증하였다. 그리고 기존에 3개 현장에서 수행하였던 시험말뚝에 대한 동재하 및 정재하시험 결과와 다수의 현장에서 본 말뚝을 시공하면서 수행한 동재하시험 결과를 재분석함으로써 다양한 조건에서 시공된 매입말뚝의 선단지지력을 결정하였다. 이렇게 결정된 매입말뚝의 선단지지력은 추후 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 산정식에 대한 정확도를 검증하고, 초기 동재하시험을 통해 매입말뚝의 선단지지력을 추정하는 기법을 개발하는데 필요한 데이터베이스로 활용되었다.

(2) 시험말뚝용 강관 부착 PHC파일 제작 및 시험시공

본 연구에서 목표로 하는 3가지 요소기술을 개발하기 위해서는 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착되는 강관의 길이와 파일이 관입되는 지지층의 강도에 따른 매입말뚝의 선단지지력 변화는 물론 동일 매입말뚝에 대한 초기 동재하 및 정재하시험에서 측정된 매입말뚝의 선단지지력간 관계를 파악할 수 있는 말뚝재하시험 결과가 필요하다. 이를 위해 기존에 3개 현장에서 수행한 동재하 및 정재하시험 결과를 분석해서 다양한 강도의 지지층에 관입된 매입말뚝의 선단지지력을 결정하였고, 보다 많은 재하시험 결과를 얻기 위해 김포시 풍무동에 위치한 아파트 건설현장에서 대규모 현장 말뚝재하시험을 수행하였다. 현장시험에서는 지지층의 SPT-N치가 50/8, 50/6, 50/4일 때 매입말뚝의 선단지지력 변화를 조사하기 위해 그림 2.1과 같이 선단

에 1D(D는 파일 직경) 길이의 강관을 부착하고 파일의 길이를 달리한 직경 500mm 파일 3본과 직경 600mm 파일 2본을 시공하였다. 그리고 강관 부착 PHC파일에 부착된 강관의 길이에 따른 매입말뚝의 선단지지력 변화를 조사하기 위해 강관 길이가 0.6D와 0.8D, 1.0D인 직경 500mm 파일 3본과 강관 길이가 0.67D와 1.0D인 직경 600mm 파일 2본을 동일한 깊이로 시공하였다. 또한 PHC파일을 사용한 매입말뚝과의 지지력 비교와 함께 정재하시험을 통해 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 측정을 위해 길이가 다른 직경 500mm PHC파일 2본과 직경이 600mm인 PHC파일 1본을 시험부지에 함께 시공하였다. 그 결과 총 11본의 시험말뚝이 SDA공법으로 시공되었고, 시공에는 물-시멘트비(W/C)가 67%이고 초기에 강도가 발현될 수 있도록 조강제가 일부 혼합된 시멘트밀크가 사용되었다.



그림 2.1 시험말뚝에 사용된 PHC 및 강관 부착 PHC파일

(3) 시험말뚝에 대한 동재하 및 정재하시험

직경이 500mm와 600mm인 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용해서 2m 간격으로 시공된 총 11본의 시험용 매입말뚝의 시공을 완료한 직후 해머의 낙하고를 1m, 2m, 3m로 높여가면서 초기 동재하시험(E.O.I.D시험)을 실시하였다.(그림 2.2) 그리고 시험말뚝이 시공된 후 5일이 경과했을 때 해머의 낙하고를 최대 5m까지 높이면서 Re-strike시험을 실시하였다. Re-strike시험 결과 해머의 낙하고가 2~3m로 높아지면서 매입말뚝의 주변마찰력과 선단지지력 모두가 서서히 증가하였으나 해머 낙하고가 그 이상 높아지면서 주변마찰력은 급격히 작아지고 선단지지력이 급증하는 경향을 보였다. 이것은 타격에너지가 일정 수준을 넘어가면서 재하시험 초기에 하중을 지지하는 주변마찰력이 파괴되고, 대부분의 타격에너지가 매입말뚝의 선단부로 전달됨으로써 선단지지력이 완전히 발현되기 때문으로 밝혀졌다. 동재하시험이 종료된 후 1주일이 경과한 시점에 지지층에 관입된 깊이를 달리한 3본의 직경 500mm 강관 부착 PHC파일과 1본의 직경 600mm 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝에 대해 선단지지력과 주변마찰력의 합인 전체지지력을 측정하기 위해 압축재하시험을 실시하였다. 그리고 직경 500mm PHC파일 2본과 직경이 600mm인 PHC파일 1본으로 시공된 매입말뚝에 대해서는 주

면마찰력을 측정하기 위해 인발재하시험을 실시하였다. 압축재하시험은 반력앵커를 이용해서 수행하였고, 하중을 500kN씩 증가해서 반력앵커가 극한상태에 도달하는 6,500~7,000kN의 하중단계까지 진행되었다.



(a) 동재하시험



(b) 정재하시험

그림 2.2 시험말뚝에 대한 동재하 및 정재하시험

(4) 지반조건별 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이 결정

Carranza-Torres와 Fairhurst(1999)의 해석적인 방법을 통해 지반에 구 형태의 공동(spherical cavity)을 천공할 때 공동 주변에 발생하는 응력이완으로 인한 소성영역의 범위를 산정할 수 있는 산정식을 지반 강도의 함수로 제안하였다. 그들의 연구결과에 따르면 풍화암에 굴착공을 천공할 때 굴착공 저면으로부터 굴착공 직경의 15~20%에 이르는 깊이까지 응력이완에 의한 강도저하가 발행한다. 따라서 이론적으로는 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착된 강관이 경타에 의해 굴착공 저면으로부터 굴착공 직경의 20% 이상만 관입되면 매입말뚝의 선단지지력은 최대치에 도달한다고 할 수 있다. 이러한 Carranza-Torres와 Fairhurst(1999)의 연구결과를 이용한 추론을 검증하기 위해 김포시 풍무동에서 수행한 현장 말뚝재하시험 결과를 이용해서 강관 부착 PHC파일에 부착된 강관의 길이에 따른 매입말뚝의 선단지지력 변화를 조사하였고, 이를 통해 파일에 부착된 강관의 길이에 따른 매입말뚝의 선단지지력 변화가 아주 작거나 매입말뚝의 선단지지력이 파일 허용내력의 80%에 도달했을 때의 강관 길이를 도출하였다.

(5) 강관부착 PHC 파일 설계기준에 대한 타당성 검증

기존 매입말뚝에서 사용하던 PHC파일은 선단에서 발생하는 관입저항이 커기 때문에 그림 2.3과 같이 경타에도 불구하고 파일이 굴착공 저면에 형성된 슬라임을 다진 상태로 시공이 완료되므로 매입말뚝의 선단지지력이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 응력이완 영역 지층의 강도에 의해 결정된다. 그 결과 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 산정하기 위한

제안식의 대부분은 원지반 지지층의 강도를 고려하지 않고 파일 선단이 풍화암에 관입된 매입 말뚝에 대해 일정 크기의 선단지지력을 적용하는 형태를 취하였다(한국지반공학회 2009). 반면 강관 부착 PHC파일은 경타에 의해 파일 선단에 부착된 강관이 굴착공 저면에 형성된 슬라임과 그 하부에서 발생한 응력이완 영역을 통과해서 전혀 교란되지 않은 원지반 지지층에 관입되므로 매입말뚝의 선단지지력이 슬라임과 응력이완 영역 지층의 강도가 아닌 원지반 지지층의 강도에 의해 결정된다. 그래서 강관 부착 PHC파일이 매입말뚝의 선단지지력에 미치는 영향을 고려하기 위해 다음과 같이 원지반 지지층의 강도 특성을 반영한 매입말뚝 선단지지력 산정식을 제안하였다.

$$Q_p(kN) = 250 N \left(\frac{14}{Z_N + 2} \right)^{0.7} A_p \quad (\text{단, } N \leq 60, Z_N \geq 4) \quad \text{식 (2.1)}$$

여기서 N 은 굴착공 저면 위치에서 측정된 SPT-N치이고, Z_N 은 굴착공 저면에서 수행한 SPT에서 해머로 50회 타격 시 샘플러의 관입깊이(cm)를 나타낸다.

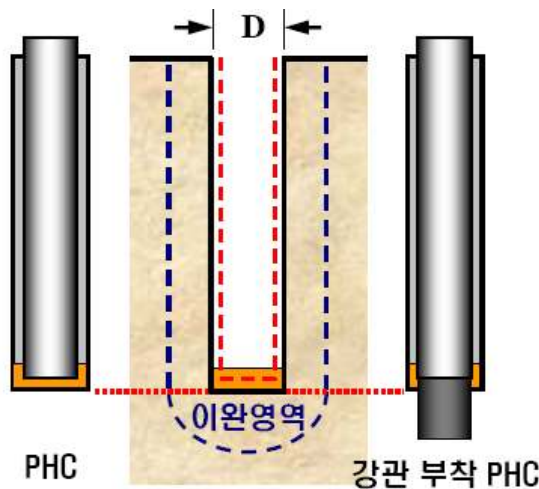


그림 2.3 PHC파일과 강관 부착 PHC파일의 선단부 시공상태 비교

강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력을 산정할 수 있는 식 (2.1)의 타당성과 정확성을 검증하기 위해서는 다양한 지지층 강도와 파일 직경으로 시공된 매입말뚝에 대해 재하시험에서 측정된 값과 식 (2.1)에서 계산된 값을 비교하는 작업이 필요하다. 이를 위해 본 연구 이전에 현장시험을 수행한 4개 현장과 김포시 풍무동 현장에서 얻어진 10여개의 정재하시험 결과와 여러 현장에서 강관 부착 PHC파일을 시공하면서 수행한 약 40여개의 동재하시험 결과를 이용해서 식 (2.1)의 정확도를 검증하였다. 또한 PHC파일 대비 강관 부착 PHC파일을 사용했을 때 매입말뚝의 선단지지력 증대 효과를 조사하기 위해 PHC파일과 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력을 비교함과 동시에 구조물기초설계기준(한국지반공

학회 2009)에서 제시하고 있는 매입말뚝의 선단지지력 산정식의 결과와 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 측정치를 비교하였다.

(6) 초기 동재하시험을 통한 매입말뚝의 선단지지력 추정기법 개발

강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝은 선단지지력 메카니즘상 굴착공에 충전되는 시멘트밀크의 경화여부에 따라 선단지지력의 크기가 매우 큰 폭으로 달라진다. 즉 그림 2.4와 같이 시멘트밀크가 경화되기 전에는 파일 선단에 부착된 강관이 완전폐색 상태에 도달하지 않기 때문에 선단지지력이 완전히 발현되지 않는다. 그러나 시멘트밀크가 경화되면 슬라임과 혼합된 시멘트밀크에 의해 선단강관이 완전히 막혀서 매입말뚝의 선단지지력이 최대로 발현되기 때문에 시멘트밀크 경화 이전보다 선단지지력이 증가한다.

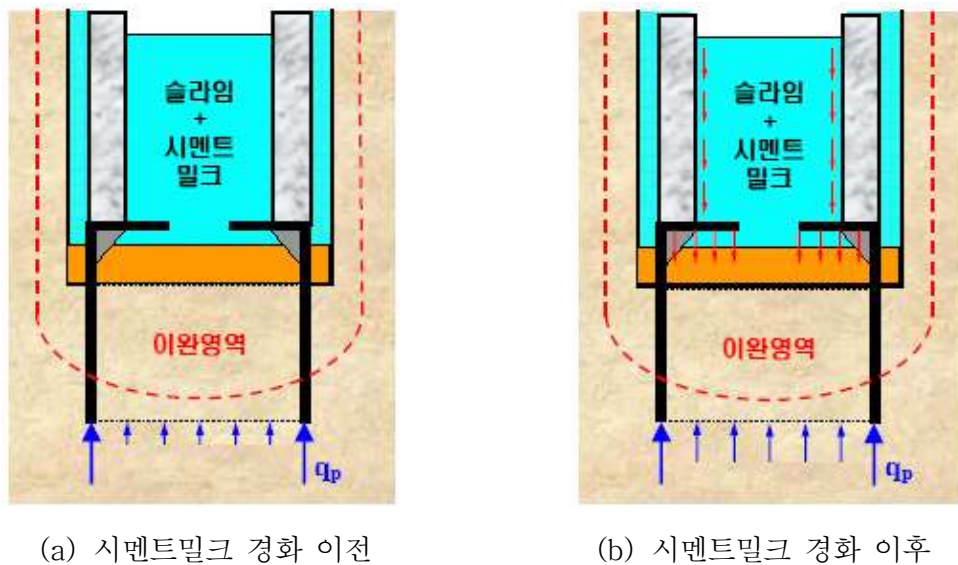


그림 2.4 시멘트밀크 경화 이전과 이후의 선단지지력 발현 메카니즘

한편 현장에서 매입말뚝을 시공할 때 시향타와 본 시공 과정에서 말뚝의 설계지지력 발현 여부를 동재하 및 정재하시험을 통해 조사하지만, 대부분의 경우 말뚝의 원활한 시공을 위해서 E.O.I.D 시험의 결과를 이용해서 매입말뚝의 설계지지력 발현 여부를 판단한다. 따라서 강관 부착 PHC파일의 지지력 특성을 고려할 때 선단강관이 완전히 폐색되지 않은 상태에서 측정된 선단지지력에 근거해서 시멘트밀크가 경화되어 선단강관이 완전폐색 상태에 도달했을 때 매입 말뚝의 선단지지력을 추정하기 위해서는 동일 말뚝에 대해 E.O.I.D 시험과 Re-strike 시험 또는 정재하시험에서 측정된 선단지지력간의 관계를 도출하는 것이 필요하다. 이를 위해 대규모 현장시험이 수행된 김포시 풍무동 현장을 포함해서 총 5개 현장에서 수행된 동재하시험과 정재하시험의 결과와 함께 일부 본 시공 수행 현장에서 실시한 E.O.I.D 및 Re-strike 시험의 결과를 이용해서 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝에 대해 초기 동재하시험과 시멘트밀

크가 경화된 이후에 발현되는 선단지지력의 관계를 도출하였다.

2. 연구수행 내용

다양한 조건에서 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력에 대한 데이터를 확보하기 위하여 사전에 현장시험이 수행된 4개 현장에 대규모 시험시공이 수행된 김포시 풍무동 현장을 더해서 총 5개 현장에서 시험말뚝에 대한 동재하 및 정재하시험이 수행되었다. 각 현장별로 시험시공에 사용된 강관 부착 PHC파일의 직경과 함께 파일 선단이 관입되는 지지층의 강도 특성도 달리하였다.

(1) 현장 A

본 현장은 그림 2.5와 같이 지표면으로부터 각각 4.5m 두께의 매립층과 풍화토층과 그 아래 위치하는 SPT-N치가 50/10 이상인 풍화암층으로 구성되어 있다. PHC파일과 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 지지력을 비교하기 위해 직경이 500mm인 PHC파일과 동일 직경의 PHC파일에 1D길이의 강관을 부착한 강관 부착 PHC파일을 사용해서 SDA공법으로 매입말뚝을 시공하였다. 굴착공은 10m깊이까지 천공하였고, 굴착공 저면 깊이에서 SPT-N치는 50/8로 측정되었다. 두 본의 시험말뚝은 시멘트밀크를 주입하지 않은 상태에서 굴착공에 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 삽입한 후 해머로 경타를 가하는 방법으로 시공되었고, 시험말뚝을 시공한 직후와 시공된 지 5일이 경과했을 때 E.O.I.D 시험과 반력앵커를 이용한 정재하시험을 실시하였다. 이때 굴착공에 삽입된 PHC파일과 강관 부착 PHC파일의 주변에는 시멘트밀크가 충전되지 않아 주변마찰력이 발현되지 않는 상태였으므로 동재하시험과 정재하시험에서 측정된 전체하중을 시험말뚝의 선단하중으로 간주하였다.

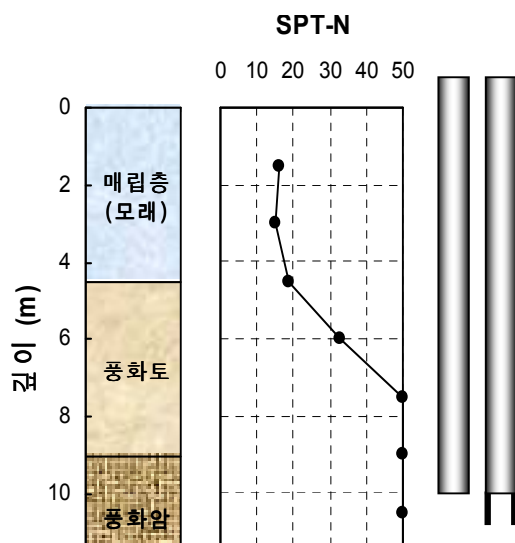


그림 2.5 현장 A의 지질주상도

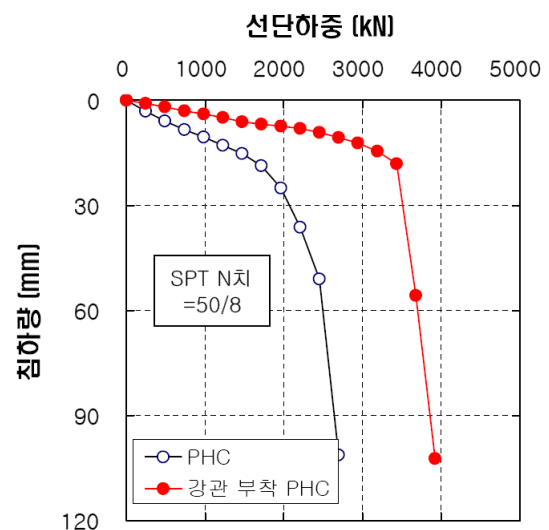


그림 2.6 시험말뚝의 선단하중-침하량 곡선

초기 동재하시험 결과를 CAPWAP으로 분석한 결과 PHC파일과 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 초기 허용지지력은 각각 782.8kN과 809.9kN으로 산정되었다. 그리고 시험말뚝에 대해 압축재하시험을 수행한 결과 그림 2.6에서 보듯이 재하시험 초기부터 강관 부착 PHC파일은 기존 PHC파일에 비해 상당히 우수한 선단하중 지지능력을 발휘하였다. 말뚝 두부의 침하량이 말뚝 직경의 10%에 도달했을 때 말뚝에 가해진 하중을 극한지지력으로 정의하는 Eurocode 7(CEN 2004)의 파괴기준을 재하시험 결과에 적용한 결과 표 2.3과 같이 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 허용선단지지력은 각각 811.9kN과 1,213.7kN으로 측정되어, PHC파일 대비 강관 부착 PHC파일을 사용할 때 매입말뚝의 선단지지력이 약 50% 증가하는 것으로 나타났다.

표 2.3 파일 종류별 매입말뚝의 허용 선단지지력(현장 A)

파일 형태	허용 선단지지력(kN)	
	E.O.I.D 시험	압축재하시험
PHC파일	782.8	812.0
강관 부착 PHC파일	810.0	1,213.7

(2) 현장 B

본 현장은 서울시 불광동에 위치한 아파트 건설현장으로, 지반은 그림 2.7과 같이 지표면으로부터 풍화토, 풍화암, 연암으로 구성되어 있다. PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 차이를 조사하기 위해 직경이 400mm인 PHC파일과 선단에 1D 길이의 선단강관을 부착한 직경 400mm 강관 부착 PHC파일을 사용해서 총 2분의 매입말뚝을 SDA 공법으로 시공하였다. 시험말뚝은 SPT-N치가 50/3으로 측정되는 7m 깊이까지 굴착공을 천공하고, 굴착공에 시멘트밀크를 충전한 후 PHC파일 및 강관 부착 PHC파일을 삽입하고 중량이 40kN인 해머를 이용해서 경타를 가하는 방법으로 시공되었다. 시험말뚝이 시공된 직후 초기 동재하시험을 수행하였고, 시험말뚝 시공이 완료되고 10일이 경과했을 때 반력앵커를 이용해서 시험말뚝에 압축재하시험을 수행하였다.

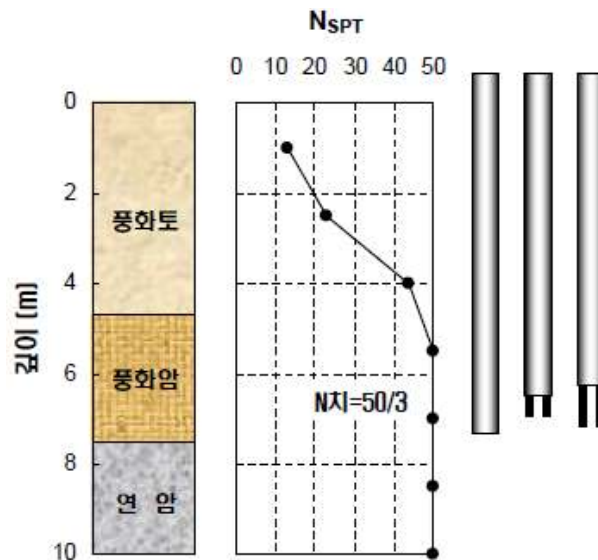


그림 2.7. 현장 B의 지질주상도와 말뚝 근입깊이

초기 동재하시험 결과를 CAPWAP으로 분석한 결과 PHC파일과 강관 부착 PHC파일의 전체지지력은 각각 770.3kN과 894.7kN으로 추정되었다. 그리고 시험말뚝에 대한 압축 재하시험 결과 전체하중-침하량 곡선을 나타낸 그림 2.8에서 보듯이 2개 시험말뚝 모두 반력앵커의 용량에 비해 지지력이 너무 커서 시험말뚝이 극한상태에 도달하기 훨씬 이전에 재하시험이 종료되었다. 그림에서 보듯이 말뚝 두부가 10mm 침하했을 때 말뚝의 하중 지지능력을 비교한 결과 PHC파일보다 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 하중 지지능력이 60% 컸으며, 시험결과에 Davisson 파괴기준(1972)을 적용한 얻어진 PHC파일과 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 허용 전체지지력은 각각 1,334.7kN과 2,148.4kN이었다. 또한 각 시험말뚝의 허용 전체지지력에서 구조물기초설계기준(2009)의 주변마찰력 산정식인 식 (2.2)에 의해 계산된 주변마찰력을 차감하는 방법으로 시험말뚝의 선단지지력을 계산한 결과 표 2.4에 정리된 바와 같이 PHC파일과 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝은 각각 1,166.4kN과 2,000.3kN의 허용 선단지지력을 발휘하였다.

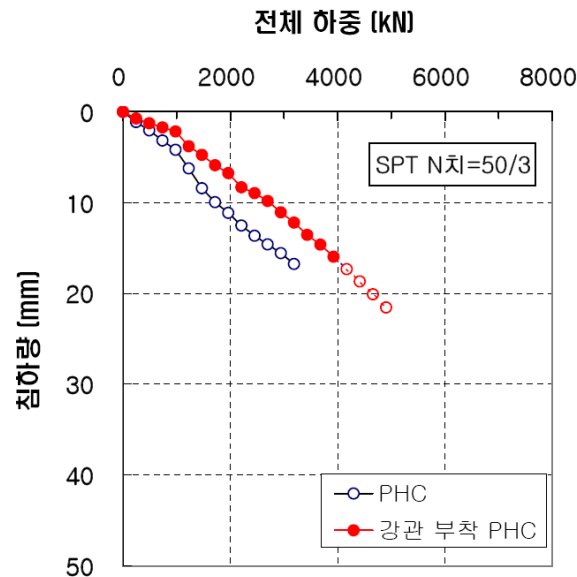


그림 2.8 현장 B에서 측정된 시험말뚝의 전체하중-침하량 곡선

$$Q_s(kN) = 2 \bar{N} A_s \quad (\text{단 } N \leq 50) \quad \text{식 (2.2)}$$

여기서 $\bar{N}$ 는 매입말뚝이 관입된 각 지층의 평균 N치이고 A_s 는 각 지층에 관입된 매입말뚝의 주면 면적이다. 따라서 파일 선단이 안착되는 지지층의 SPT-N치가 50/3일 때 강관 부착 PHC파일을 사용하면 PHC파일을 사용할 때보다 매입말뚝의 선단지지력이 한 매입말뚝의 선단 부 하중지지 능력은 PHC파일을 사용할 때보다 약 71% 증가하는 것으로 나타났다.

표 2.4 파일 종류별 매입말뚝의 허용 선단지지력(현장 B)

파일 형태	허용 선단지지력(kN)	
	E.O.I.D 시험	압축재하시험
PHC파일	782.8	812.0
강관 부착 PHC파일	810.0	1,213.7

(3) 현장 C

본 현장은 그림 2.9(a)와 같이 지표면으로부터 1.5m 두께의 매립층과 3.1m 두께의 실트질 모래층, 4.4m 두께의 풍화토층과 그 아래 위치하는 풍화암층으로 구성되어 있다. PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 지지력 비교를 위해 그림 2.9(b)와 같이 직경이 600mm인 PHC파일과 선단에 1D 길이의 선단강관을 부착한 직경 600mm 강관 부착 파일을 사용해서 근입길이가 9.0m와 13.0m인 매입말뚝을 각각 3본씩 시공하였다. 참고로 강관 부착

PHC파일에 부착된 선단강관의 길이는 매입말뚝의 근입길이에 포함시키지 않았다. 9.0m 길이의 매입말뚝은 SPT-N치가 50/8인 풍화암 상단에 선단이 위치하였고, 13.0m 길이의 매입말뚝은 SPT-N치가 50/4인 풍화암에 선단을 근입시켰다. 현장 A의 경우와 달리 굴착공에 시멘트밀크를 주입하고 PHC파일 및 강관 부착 PHC파일을 삽입한 후 경타를 가하는 방법으로 시험말뚝을 시공하였고, 시공 직후 초기 동재하시험이 수행되었다. 그리고 시험말뚝의 시공이 종료되고 10일 후에 동일 깊이에 근입된 3본의 시험말뚝 중 PHC파일과 강관 부착 PHC파일로 시공된 말뚝 1본씩에 대하여 압축 재하시험을 수행해서 전체지지력을 측정했고, 나머지 1본의 PHC파일로 시공된 매입말뚝에 대해서는 인발 재하시험을 통해 주변마찰력을 측정했다. 그리고 압축 및 인발 재하시험에서 측정된 지지력 차이를 선단지지력으로 간주하였다.

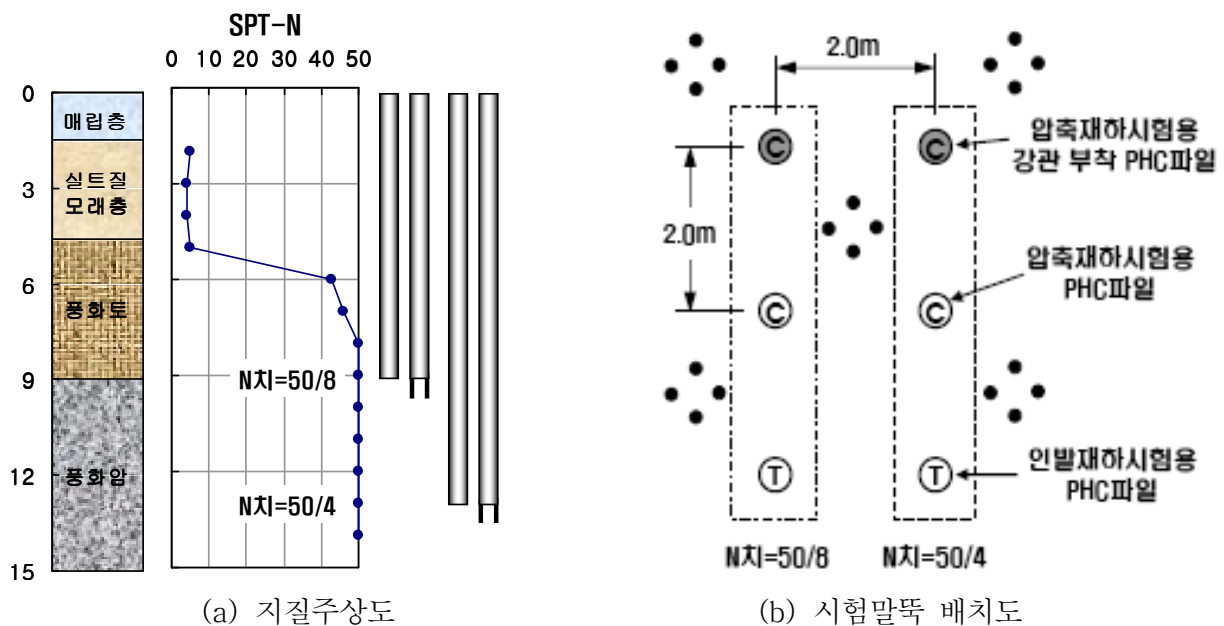
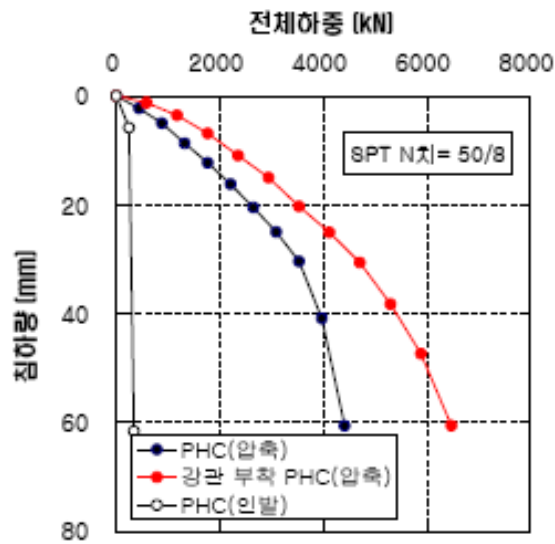
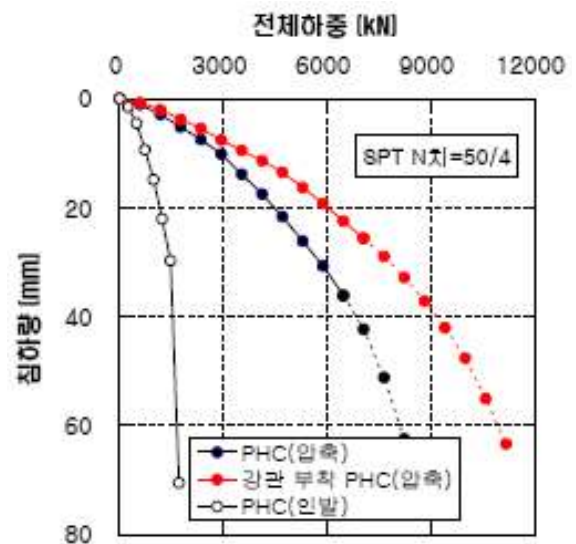


그림 2.9 현장 C의 지질주상도와 시험말뚝 배치도

시험말뚝 시공 직후 수행한 초기 동재하시험의 결과를 CAPWAP으로 분석하고, 그림 2.10에 보이는 압축 및 인발재하시험에서 측정된 하중-침하량 곡선에 Davisson(1972)의 파괴기준을 적용해서 시험말뚝의 허용지지력을 결정하였다. 그 결과 표 2.5에 정리된 바와 같이 SPT-N치가 50/8인 지지층에 선단이 관입된 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 허용 선단지지력은 각각 1,403kN과 2,017kN이었고, SPT-N치가 50/4인 지지층에 선단이 관입된 PHC파일과 스마트파일을 사용한 매입말뚝의 허용선단지지력은 2,508kN과 4,003kN으로 결정되었다. 결국 굴착공 저면의 SPT-N치가 50/8과 50/4일 때 PHC파일을 스마트파일로 대체하면 매입말뚝의 선단지지력이 각각 43.8%와 59.6% 증가하는 것으로 나타났다.



(a) 지지층 N치=50/8인 경우



(b) 지지층 N치=50/4인 경우

그림 2.10 지지층 조건별 시험말뚝의 전체하중-침하량 곡선

표 2.5 파일 종류별 매입말뚝의 허용 선단지지력(현장 C)

파일 형태	지지층 SPT-N치	허용 선단지지력(kN)	
		E.O.I.D 시험	압축재하시험
PHC파일	50/8	1,035.2	1,403.3
강관 부착 PHC파일	50/8	1,524.1	2,016.9
PHC파일	50/4	1,604.6	2,507.9
강관 부착 PHC파일	50/4	1,672.4	4,003.0

(4) 현장 D

본 현장은 김포시 풍무동에 위치하는 아파트 현장으로, 본 연구에서 세부목표로 설정한 3가지 요소기술의 개발에 필요한 다양한 조건하에서 시공된 매입말뚝의 선단지지력 측정치를 얻기 위하여 대규모 현장시험이 수행된 곳이다. 시험말뚝이 시공된 부지는 지표면으로부터 약 5m 절토된 곳으로, 그림 2.11에서 보듯이 절토 후 지표면으로부터 8m 깊이까지 풍화토로 구성되었고 그 아래로는 풍화암이 존재하였다. 그리고 현장이 안양천과 인접해 있는 관계로 지하수위가 절토 후 지표면보다 위에 위치하였다.

현장시험은 지지층의 강도 특성과 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착되는 선단강관의 길이에 따른 매입말뚝 선단지지력 변화를 조사하고, 동시에 시멘트밀크 경화 전, 후에 측정된 매입말뚝의 선단지지력간 관계를 조사하기 위하여 그림 2.11과 같이 총 12본의 시험말뚝이 설치되었다. 먼저 선단에 1D 길이의 강관을 부착한 직경 500mm 강관 부착 PHC파일 3본을 SPT-N

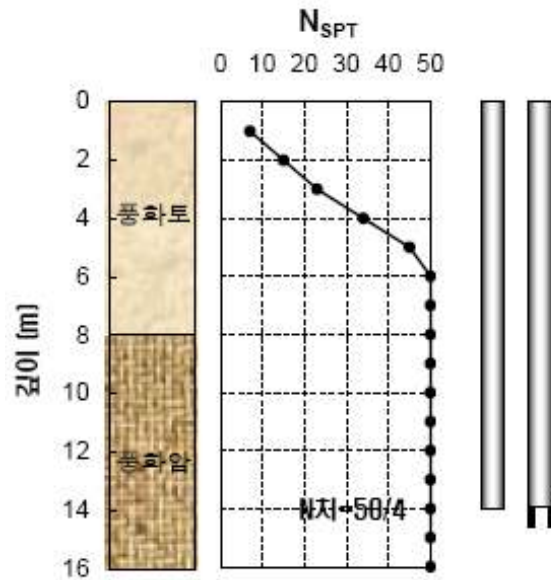


그림 2.11 현장 D의 지질주상도

치가 50/8, 50/6, 50/4인 풍화암층에, 그리고 선단강관의 길이를 0.8D와 0.6D로 줄인 직경 500mm 강관 부착 PHC파일 2본을 SPT-N치가 50/6인 풍화암층에 관입시켜서 매입말뚝을 시공하였다. 또한 강관 부착 PHC파일의 직경에 따른 매입말뚝의 선단지지력 특성 변화를 조사하기 위하여 파일 선단이 관입되는 풍화암의 강도와 파일에 부착되는 선단강관의 길이를 변화시키면서 직경 600mm 강관 부착 PHC파일을 매입공법으로 시공하였다. 이와 함께 압축 및 인발 재하시험에서 측정된 전체지지력과 주변마찰력의 차이를 통해 매입말뚝의 선단지지력을 추정하기 위하여 직경 500mm와 600mm PHC파일 각각 2본과 1본을 사용해서 인발 재하시험용 매입말뚝 3본을 시공하였다. 시험말뚝이 시공된 직후 모든 시험말뚝에 대해 중량이 50kN인 해머의 낙하고를 최대 3m까지 높이면서 E.O.I.D 시험을 수행하였고, 그로부터 5일이

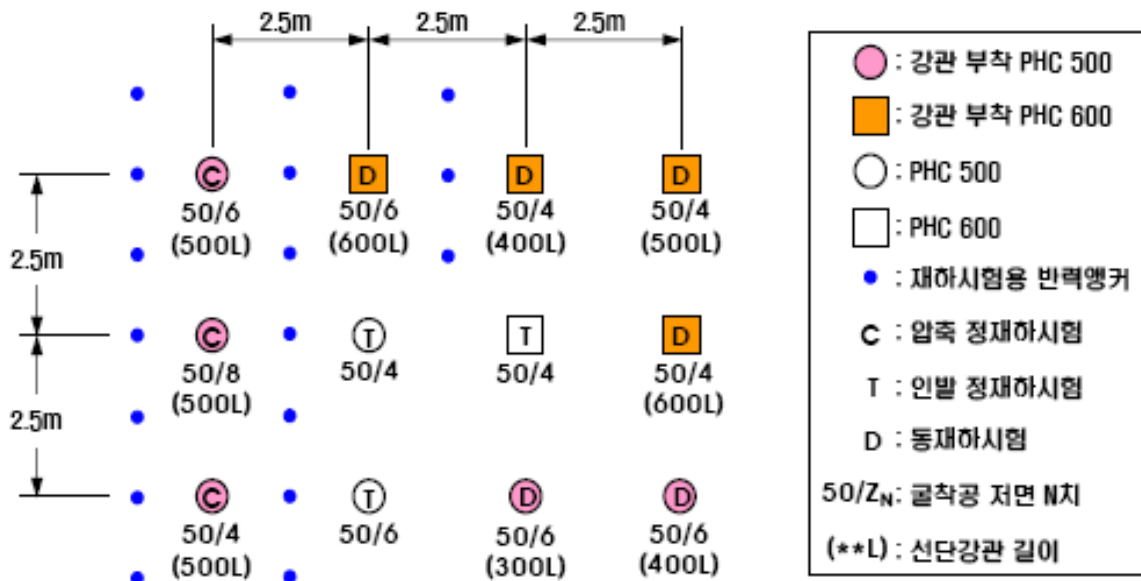


그림 2.12 현장 D에 시공된 시험말뚝 배치도

경과했을 때 해머의 낙하고를 5m까지 높이면서 Re-strike 시험을 수행하였다.

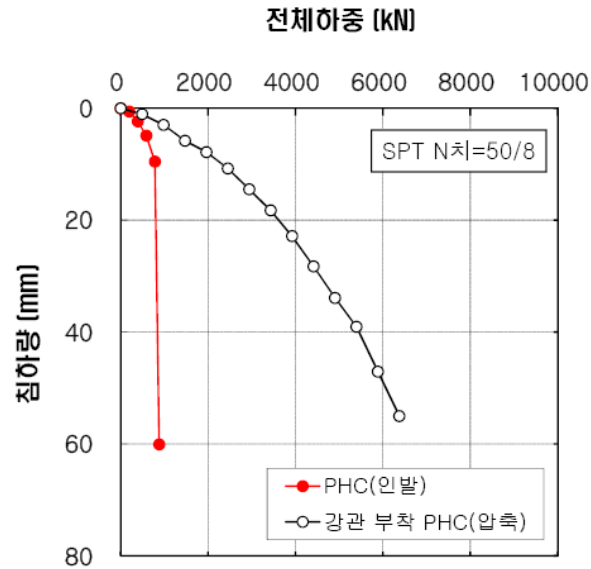
그리고 Re-strike 시험이 종료되고 약 7~10일이 경과했을 때 1D 길이의 선단강관이 부착된 직경 500mm와 600mm 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝 4본에 대해 압축 재하 시험, 그리고 PHC파일로 시공된 매입말뚝 3본에 대해 인발 재하시험이 수행되었다. 시험말뚝에 사용된 파일의 종류와 선단강관 특성, 파일이 안착된 지지층의 강도 특성, 시험말뚝에 적용된 재하시험 종류 등이 표 2.6에 정리되었다.

표 2.6 시험말뚝의 특성 및 재하시험 종류

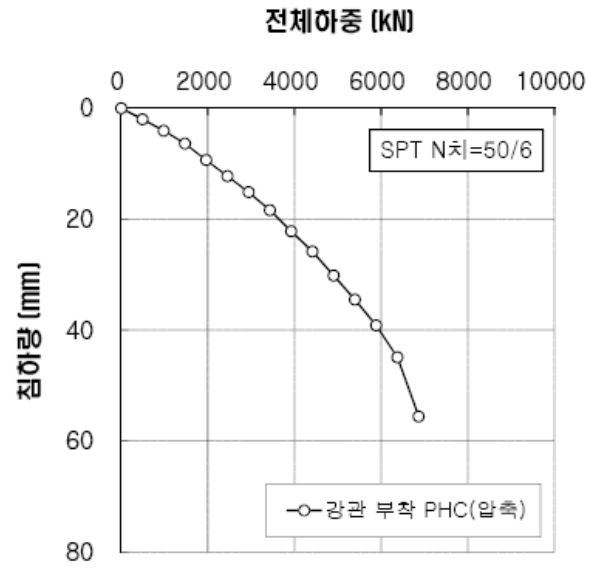
파일 종류	파일 직경 (mm)	선단 강관 길이	파일 선단부 N치	적용된 재하시험			
				E.O.I.D	Restrike	압축재하	인발재하
강관 부착 PHC파일	500	1D	50/8	○	○	○	
	500	1D	50/6	○	○	○	
	500	1D	50/4	○	○	○	
	500	0.8D	50/6	○	○		
	500	0.6D	50/6	○	○		
	600	1D	50/6	○	○		
	600	1D	50/4	○	○	○	
	600	0.83D	50/4	○	○		
	600	0.67D	50/4	○	○		
PHC파일	500	—	50/6	○	○		○
	500	—	50/4	○	○		○
	600	—	50/4	○	○		○

E.O.I.D 및 Re-strike 시험에서 측정된 동재하시험 결과를 CAPWAP으로 분석해서 모든 시험말뚝의 선단지지력을 산정하였다. 그중 해머의 낙하고를 3m로 했을 때 E.O.I.D 시험과 해머 낙하고를 5m로 했을 때 Re-strike 시험에서 측정된 매입말뚝의 선단지지력이 표 2.7에 정리되었다. 그리고 직경이 500mm와 600mm인 강관 부착 PHC파일을 강도 특성이 다른 풍화암에 안착시켰을 때 매입말뚝의 압축 및 인발 재하시험 결과를 보인 그림 2.13에 Davisson의 파괴 기준(1972)을 적용해서 매입말뚝의 허용 전체지지력과 주변마찰력을 구하고, 이들 두 값의 차이로 계산된 선단지지력도 표 2.7에 함께 표기되었다. 표에서 보듯이 파일 선단이 안착된 풍화암의 강도가 클수록 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 지지력이 증가하였으며, 동일 조건하

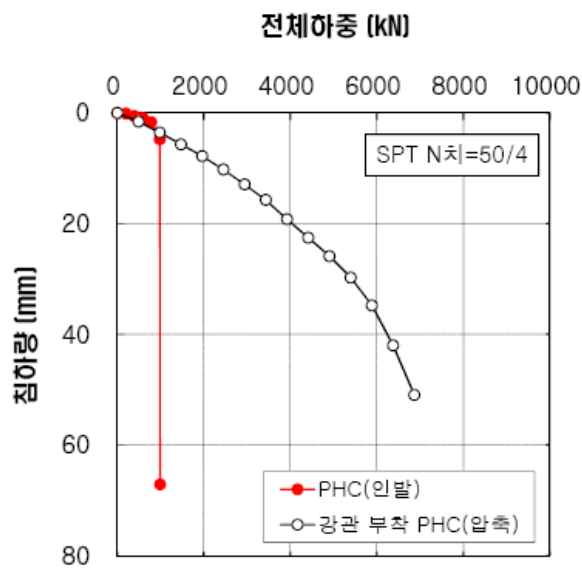
에서도 PHC파일보다 강관 부착 PHC파일을 사용하면 매입말뚝의 선단지지력이 21~31%까지 커지는 것으로 나타났다. 또한 지지층의 강도 특성이 일정하더라도 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착되는 강관의 길이가 짧아질수록 매입말뚝의 선단지지력이 감소하는 경향을 보였다.



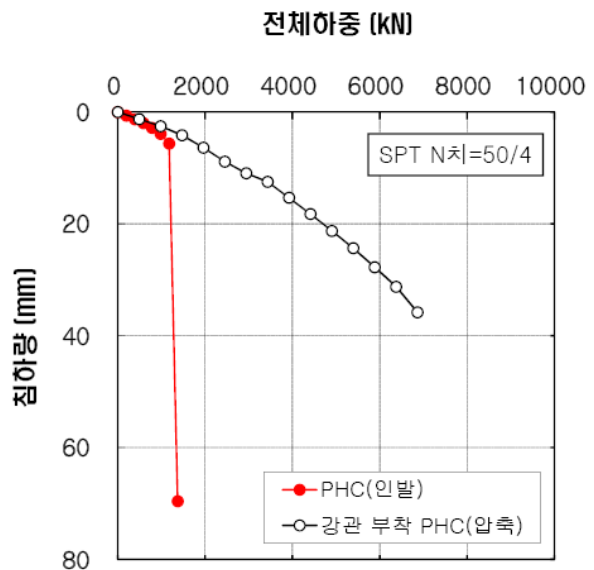
(a) 직경 500mm, SPT-N치=50/8



(b) 직경 500mm, SPT-N치=50/6



(c) 직경 500mm, SPT-N치=50/8



(d) 직경 600mm, SPT-N치=50/6

그림 2.13 지지층의 SPT-N치와 파일 직경별 매입말뚝의 하중-침하량 곡선

표 2.7 동재하 및 정재하시험에서 측정된 시험말뚝의 허용 선단지지력

파일 종류	파일직경 (mm)	선단강관 길이	파일선단부 N치	허용 선단지지력(kN)		
				E.O.I.D	Restrike	정재하시험
강관 부착 PHC파일	500	1D	50/8	1816.8	2003.2	1734.8
	500	1D	50/6	1937.3	1866.6	1894.7
	500	1D	50/4	2058.1	1927.5	1942.1
	500	0.8D	50/6	1860.4	2058.1	—
	500	0.6D	50/6	1750.1	2128.4	—
	600	1D	50/6	1901.6	2231.2	—
	600	1D	50/4	2574.1	2336.7	3058.5
	600	0.83D	50/4	2245.3	2259.8	—
	600	0.67D	50/4	1909.0	1780.3	—
PHC파일	500	—	50/6	1391.5	—	—
	500	—	50/4	1704.6	—	—
	600	—	50/4	1865.9	—	—

(5) 기타 현장

앞에서 언급한 현장시험이 수행된 4개 현장 이외에 강관 부착 PHC파일을 구조물의 기초로 사용하는 몇몇 현장에서 시험타와 본 말뚝 시공 중 실시하는 시공관리용 동재하시험 결과를 수집해서 말뚝의 지반조건과 선단지지력간의 관계를 분석하였다. 그 결과 표 2.8에서 보듯이 2개 현장에서 총 34개의 매입말뚝에 대해 E.O.I.D시험에서 측정된 선단지지력이 얻어졌다.

그리고 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 산정하기 위해 제안된 식 (2.1)의 정확도 검증을 위해 표 2.8에 언급된 34개의 말뚝이 시공된 지반조건을 고려해서 식 (2.1)로부터 계산된 선단지지력 값도 표에 함께 표기되었다.

표 2.8 현장별 매입말뚝의 시공조건과 동재하시험에서 측정된 허용 선단지지력

현장명	말뚝 제원 및 시공조건				허용 선단지지력(kN)	
	직경(mm)	선단 N치	선단강관 길이(mm)	동재하시험 종류	측정치	계산치
현장 E	500	50/4	500	E.O.I.D	1,817	1,777
	500	50/6	500	E.O.I.D	2,058	1,453
	500	50/4	500	E.O.I.D	1,937	1,777
	600	50/4	600	E.O.I.D	2,574	2,558
	500	50/6	300	E.O.I.D	1,918	1,453
	500	50/6	400	E.O.I.D	1,860	1,453
	500	50/6	300	E.O.I.D	1,750	1,453
	500	50/4	500	Restrike	2,003	1,777
	600	50/4	400	Restrike	2,690	2,558
	500	50/6	400	Restrike	2,058	1,453
	500	50/6	300	Restrike	2,128	1,453
	500	50/4	400	E.O.I.D	1,946	1,777
	500	50/5	400	E.O.I.D	1,804	1,595
	500	50/4	400	E.O.I.D	1,875	1,777
	500	50/7	400	E.O.I.D	1,822	1,338
	500	50/5	400	E.O.I.D	1,863	1,595
	500	50/6	400	E.O.I.D	1,945	1,453
	500	50/4	400	E.O.I.D	1,900	1,777
	500	50/6	400	E.O.I.D	1,849	1,453
	500	50/7	400	E.O.I.D	1,830	1,338
	500	50/6	400	E.O.I.D	1,856	1,453
	500	50/7	400	E.O.I.D	1,921	1,338
	500	50/5	400	E.O.I.D	1,945	1,595
	500	50/4	400	E.O.I.D	1,893	1,777
	500	50/8	400	E.O.I.D	1,815	1,242
	500	50/6	400	E.O.I.D	1,894	1,453
	500	50/4	400	E.O.I.D	1,888	1,777
	500	50/6	400	E.O.I.D	1,899	1,453
	500	50/4	400	E.O.I.D	1,955	1,777
	500	50/5	400	E.O.I.D	1,834	1,595
	500	50/5	400	E.O.I.D	1820	1,595
	500	50/4	500	Restrike	1,898	1,777
현장 F	450	50/4	375	E.O.I.D	1,579	1,439

2.3절 요소기술 개발 결과

본 연구에서 세부 개발목표로 설정한 3가지 요소기술은 2.2절에서 언급된 매입말뚝에 대한 많은 수의 동재하 및 정재하시험 결과를 이용해서 개발되었다.

1. 강관 부착 PHC파일의 최적 강관 길이

표 2.7에 따르면 길이가 길이가 0.6D, 0.8D, 1.0D인 선단강관이 부착된 직경 500mm 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝에 E.O.I.D 시험을 수행한 결과 선단지지력이 각각 1750.1kN과 1860.4kN, 1937.3kN으로 측정되었고, 선단강관 길이가 1.0D인 매입말뚝에 대해 정재하시험을 수행한 결과 선단지지력이 1894.7kN으로 측정되었다. 이들 시험결과에서 보듯이 E.O.I.D시험은 정재하시험보다 동일 매입말뚝에 대해 선단지지력을 2.2% 과대평가 하였다. 따라서 E.O.I.D 시험으로부터 결정된 선단지지력에 대해 오차를 수정하면 선단강관 길이가 0.6D, 0.8D, 1.0D인 매입말뚝의 선단지지력이 각각 1711.6kN, 1819.5kN, 1894.7kN으로 수정된다.

그림 2.14는 매입말뚝의 수정된 선단지지력과 선단강관 길이간의 관계를 나타낸 것이다. 그림은 물론 표 2.7에서도 볼 수 있듯이 선단강관의 길이가 0.6D에서 1.0D로 길어짐에 따라 매입말뚝의 선단지지력은 1711.6kN에서 1894.7kN으로 10.7% 증가하였고, 이들 선단지지력은 모두 해당 시험말뚝의 지반조건을 고려해서 강관 부착 PHC파일에 대한 선단지지력 산정식인 식 (2.1)로부터 계산된 선단지지력인 1500kN을 상회하였다. 이처럼 매입말뚝이 설계지지력을 초과해서 지지력을 발현하면 구조물의 안정성 측면에서는 유리하지만 설계지지력을 초과하는 지지력의 발현을 위해 과다하게 파일 재료비가 투입되었다는 점을 고려하면 경제성 측면에서는 불리한 상황이 벌어진다. 결국 매입말뚝의 경제성 향상을 위해서는 매입말뚝이 설계지지력에 상응하는 만큼의 지지력을 발현하는 것이 필요하며, 이러한 개념을 그림 2.14에 적용하면 약 0.5D 길이의 선단강관을 사용하더라도 매입말뚝은 설계 선단지지력을 충족시키게 된다. 그리고 선단강관 길이를 0.7D로 하면 직경 500mm 매입말뚝에 대해 적용할 수 있는 최대 설계 선단지지력인 1777kN의 선단지지력을 발현하게 된다. 따라서 지지층의 SPT-N치가 50/6~50/4인 경우 직경이 500mm인 강관 부착 PHC파일이 식 (2.1)로부터 계산된 설계 선단지지력을 발현하기 위해서는 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착되는 선단강관의 길이를 0.5D~0.7D로 하는 것이 적당하다.

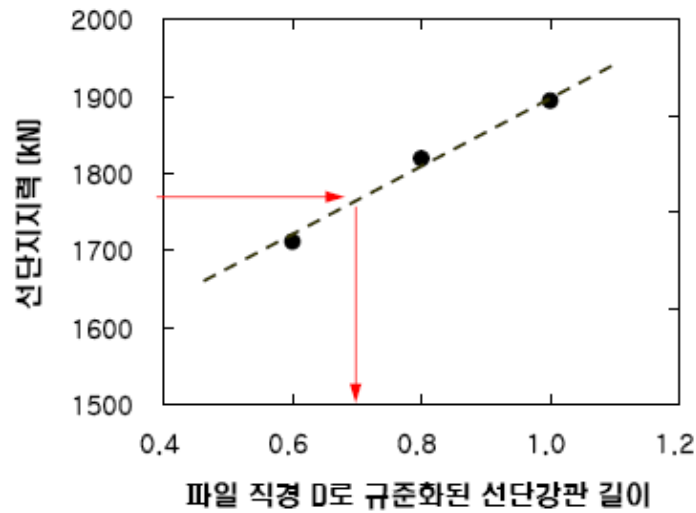


그림 2.14 선단강관의 길이에 따른 매입말뚝의 선단지지력 변화

2. 강관부착 PHC 파일을 사용한 매입말뚝에 대한 설계기준의 타당성

강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 산정을 위해 제안된 식 (2.1)의 타당성과 정확도를 검증하기 위해 총 4개 현장에서 직경과 지지층내 관입깊이가 다르게 시공된 시험말뚝에 대해 동재하시험과 정재하시험을 수행하였고, 현장에서 측정된 허용 선단지지력을 식 (2.1)에서 계산된 값을 비교하였다. 4개 현장에 시공된 매입말뚝의 시공조건과 정재하시험으로부터 측정된 허용 선단지지력, 그리고 식 (2.1)로부터 계산된 선단지지력이 표 2.9에 정리되었다. 표에서 보듯이 말뚝재하시험이 수행된 시험말뚝의 직경은 400~600mm이고, 파일 선단이 관입된 지지층의 SPT-N치는 50/8~50/3으로 일반적인 매입말뚝의 시공조건과 동일하게 하였다. 그리고 일부 작업자의 경우 굴착공 저면의 슬라임과 시멘트밀크를 교반한 후에 PHC파일을 삽입하고 경타를 수행하는 방법으로 매입말뚝을 시공하지 않고, 굴착공에 먼저 PHC파일을 삽입한 다음 파일 주변에 시멘트밀크를 충전하고 경타를 가하는 비정상적인 방법으로 매입말뚝을 시공하기도 한다. 따라서 슬라임과 시멘트밀크를 교반하지 않은 상태에서 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝에 대해 식 (2.1)의 적용성을 검증하기 위해 현장 A에서는 슬라임과 시멘트밀크를 교반하지 않고 시험용 매입말뚝을 시공하였다.

표 2.9 현장별 매입말뚝의 허용 선단지지력 측정치와 계산치

현장명	말뚝 제원 및 시공조건				허용 선단지지력(kN)	
	직경(mm)	선단 N치	선단강관 길이(mm)	슬라임 교반 여부	측정치	계산치
현장 A	500	50/7	500	비교반	1,214	1,242
현장 B	600	50/8	600	교반	2,017	1,789
	600	50/4	600	교반	4,003	2,558
현장 C	400	50/3	400	교반	>2,148	1,294
현장 D	500	50/4	500	교반	1,942	1,777
	500	50/6	500	교반	1,895	1,453
	500	50/8	500	교반	1,735	1,242
	600	50/4	500	교반	3,059	2,558

그림 2.15는 현장 말뚝재하시험을 통해서 측정된 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력과 제안식으로부터 계산된 선단지지력 계산치를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 매입말뚝의 시공과정에서 굴착공 저면의 슬라임과 시멘트밀크를 교반하지 않은 경우에 제안식은 측정치에 매우 근접한 수준의 계산치를 예측하였고, 슬라임과 시멘트밀크를 교반한 경우에 제안식은 매입말뚝의 선단지지력을 측정치의 60~91% 수준에서 매우 안전측으로 예측하였다. 따라서 SPT-N치가 50/10~50/3인 풍화암까지 굴착공을 천공하고 굴착공 저면의 슬라임과 시멘트밀크를 교반한 다음 강관 부착 PHC파일을 삽입한 후 경타를 가하는 방법으로 시공된 매입말뚝에 대해 제안식은 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력을 상당히 보수적으로 예측하였다.

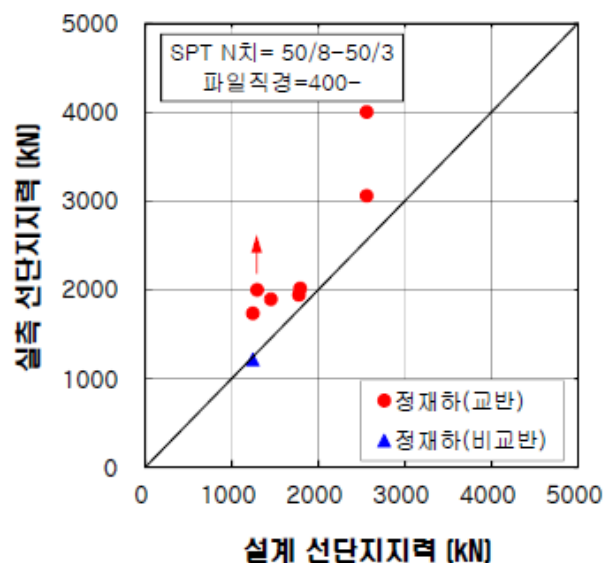


그림 2.15 매입말뚝의 선단지지력에 대한 정재하시험 측정치와 계산치의 비교

또한 그림 2.16은 표 2.8에 열거한 E.O.I.D 시험에서 측정된 매입말뚝의 선단지지력과 식 (2.1)로부터 얻어진 계산값을 비교한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 동일한 지반조건에서도 E.O.I.D보다 Restrike시험 시 매입말뚝의 선단지지력이 더 크게 측정되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 매입말뚝 시공 중에 선단강관 내부로 유입된 시멘트밀크가 경화되면서 선단강관이 완전 개방에서 완전 폐색상태로 전환됨에 따라 선단강관 단면부 뿐만 아니라 관내토 부분에서도 선단지지력을 발휘하기 때문이다. 이처럼 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝에 대해 정재하시험 뿐만 아니라 동재하시험(E.O.I.D 및 Restrike시험)에서 측정된 선단지지력을 식(2.1)로부터 얻어진 계산치를 비교한 결과 제안식은 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력을 안전측으로 예측하는 것으로 나타났다.

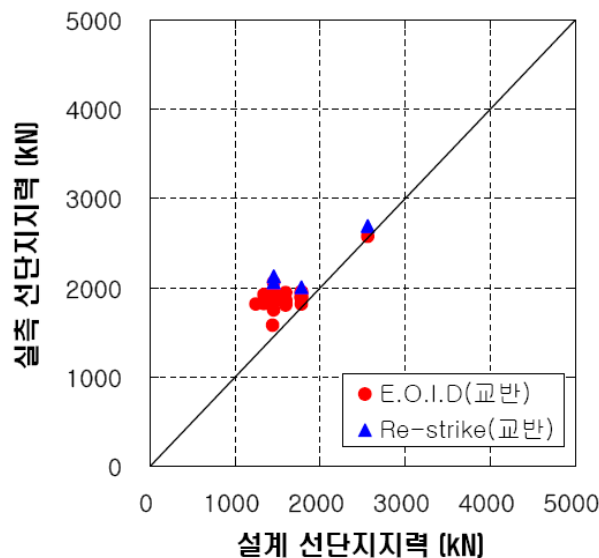


그림 2.16 매입말뚝의 선단지지력에 대한 동재하시험 측정치와 계산치의 비교

제안식에 대한 정확도 검증과 이를 통한 신뢰성 확보는 강관 부착 PHC파일의 실용화를 위해 매우 중요한 사항이다. 따라서 강관 부착 PHC파일을 현장에 적용하면서 수행되는 많은 재하시험 결과를 지속적으로 수집해서 데이터베이스를 구축하고, 향후 이를 이용해서 보다 다양한 말뚝 시공조건에 대해 제안식의 정확도를 조사함으로써 제안식에 대한 공신력을 확보할 계획이다. 또한 국토부 건설신기술 인증과 LH공사 현장 적용을 통해 기술의 대중화를 이룩하고 최종적으로는 구조물기초설계기준에 설계기준으로 등재하고자 한다.

3. 초기 동재하시험을 통한 매입말뚝의 선단지지력 추정기법

강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝은 시멘트밀크의 경화 유무에 따라 선단강관의 폐색상태가 급격히 변하기 때문에 선단지지력도 크게 달라지는 특징이 있다. 그림 2.17은

현장에 시공된 동일 매입말뚝에 대해 초기 동재하시험과 압축 재하시험에서 측정된 선단지지력을 비교한 결과이다. 그림에서 보듯이 초기 동재하시험에서 측정된 선단지지력 대비 압축 재하시험에서 측정된 선단지지력의 비로 정의되는 선단지지력 비, F_q 는 파일이 안착된 지지층의 강도가 커질수록 증가하는 경향을 보였으며, 선단지지력 비와 지반강도계수 Z_N 간에는 다음과 같은 관계가 성립하였다.

$$F_q = 3.22 - 0.23 Z_N \quad (2.3)$$

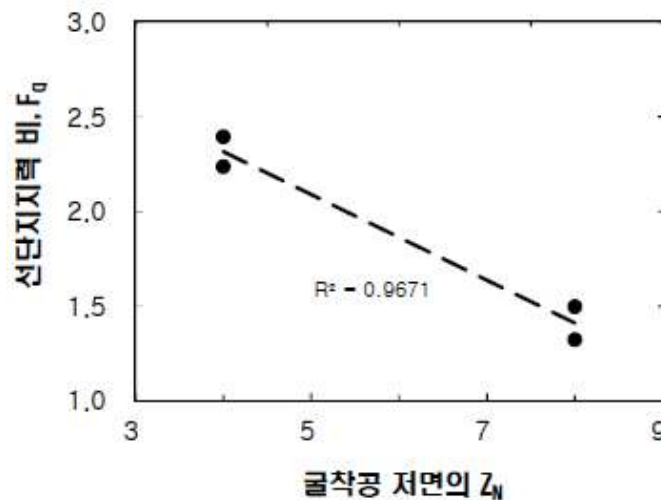


그림 2.17 굴착공 저면의 지반강도계수와 선단지지력 비의 관계

이처럼 굴착공 저면의 지반강도가 커질수록 선단지지력 비도 커지는 것은 지지층의 강도에 따라 선단강관의 관입량이 달라지기 때문이다. 즉, 지지층의 강도가 작은 경우에는 경타에 의해 선단강관의 전 길이가 지지층에 관입되므로 시멘트밀크가 경화되지 이전부터 선단강관의 단면부 뿐만 아니라 관내토에도 일정 크기의 선단지지력이 발생되어 시멘트밀크의 경화에 따른 선단지지력 증가가 크지 않게 된다. 그러나 지지층의 강도가 커지면 경타에 의해 선단강관의 일부 길이만 지지층에 관입되므로 시멘트밀크가 경화되기 이전에는 선단강관의 단면부에만 선단지지력이 발생되다가 시멘트밀크가 경화되면서 선단강관의 단면부 뿐만 아니라 관내토 부분에도 큰 크기의 선단지지력이 발생되어 시멘트밀크의 경화에 따른 선단지지력 증가가 크게 된다. 따라서 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 Q_p 는 초기 동재하시험에서 측정된 지지력 Q_{EOID} 를 이용해서 다음과 같은 식으로 계산될 수 있다.

$$Q_p = F_p Q_{EOID} = (3.22 - 0.23 Z_N) Q_{EOID} \quad \text{식 (2.4)}$$

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

3.1절 최종 연구성과

본 연구를 통해 개발목표로 세웠던 3가지 요소기술이 개발되었고, 이를 통해 강관 부착 PHC파일의 실용화 가능성이 크게 높아 졌다. 즉 표 3.1에서 보듯이 선단강관의 최적길이 도출을 통해 기존보다 선단강관 길이를 약 30% 이상 줄임으로써 강관 부착 PHC파일의 재료비를 절감할 수 있게 되었다. 그리고 다양한 조건에서 다수의 말뚝재하시험을 수행해서 기존 보다 확대된 데이터베이스를 구축했고, 이를 이용해서 선단지지력 산정식에 대한 정확도를 검증함으로써 강관 부착 PHC파일로 시공된 매입말뚝의 합리적인 설계가 가능해졌다. 또한 시멘트 밀크 경화 이전에 측정된 동재하시험 결과를 통해 시멘트밀크가 경화된 이후에 매입말뚝의 선단지지력을 추정하는 경험식을 제안함으로써 향후 강관 부착 PHC파일로 시공되는 매입말뚝의 시공관리가 다소 편리해질 것으로 판단된다.

표 3.1 요소기술에 대한 연구성과

요소기술	연구 이전	연구 이후	효과
선단강관 최적길이	파일 직경의 1~1.5배	파일 직경의 0.7~0.8배	파일 재료비 절감
선단지지력 산정식의 정확도	신뢰도 낮음	신뢰도 높음	기술의 신뢰도 향상
EOD시험을 통한 선단지지력 추정기법	추정방법 없음	추정식 개발	시공관리 편의성 향상

그 외 지적재산권 관련 연구성과로는 국내특허 제10-1438013호(선단지지력이 강화된 복합말뚝 및 이의 시공방법) 등록, 국내특허 제10-2014-003684호(콘크리트말뚝 연결장치 및 방법) 출원, 중국특허 제201280040276.1호(선단지지력이 강화된 복합말뚝 및 이를 이용한 복합말뚝 매입공법) 출원, 베트남 특허 제1-2014-00517호(선단지지력이 강화된 복합말뚝 및 이를 이용한 복합말뚝 매입공법) 출원, 국내 디자인 제30-0759522호(기초공사용 말뚝 지지구) 등록이 있다. 이완 관련한 내용을 정리하여 표 3.2와 그림 3.1에 나타내었다.

표 3.2 지적재산권 관련 연구성과

번호	항목	출원 등록	출원일/등록일	특허명
1	국내 특허 제10-1438013호	등록	2013.12.05/ 2014.08.29	선단지지력이 강화된 복합말뚝 및 이의 시공방법
2	국내 특허 제10-2014-003684호	출원	2013.03.21	콘크리트말뚝 연결장치 및 방법
3	중국특허 제201280040276.1호	출원	2014.02.18	선단지지력이 강화된 복합말뚝 및 이를 이용한 복합말뚝 매입공법
4	베트남 특허 제1-2014-00517호	출원	2014.02.19	선단지지력이 강화된 복합말뚝 및 이를 이용한 복합말뚝 매입공법
5	국내 디자인 제30-0759522호	등록	2013.12.03/ 2013.08.27	기초공사용 말뚝 지지구



(a) 특허 제10-1438013호 (b) 디자인 제30-0759522호 (c) 중국 제201280040276.1호
그림 3.1 주요 지적재산권 출원 및 등록 내역

학술적 연구성과로 2013년과 2014년에 한국지반공학회 가을학술발표회에서 논문을 발표하였다. 또한 한국건축구조기술사회에서 발간하는 건축구조 제 20권 제 5호에 본 기술을 소개하는 기술기사를 게재하였고, 국토교통과학기술진흥원이 주최한 2013국토교통기술대전에 참가하여 기술전시회를 개최하였다. 이와 관련된 주요 사항을 표 3.3에 정리하였고, 관련 논문과 전시회 사진을 그림 3.2와 3.3에 나타내었다.

표 3.3 학술적 연구성과

번호	게재지/개최장소 및 일시	논문명/행사명
1	2013 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집	강관 부착 PHC 파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 특성
2	2014 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집	강관 부착 PHC파일로 시공된 풍화암 근입 매입말뚝의 선단지지력 산정
3	건축구조(제20권 제5호)	스마트파일을 이용한 매입말뚝의 선단지지력 증대 기술
4	COEX (5/21~5/23)	국토교통기술대전

<i>KSCE 2014 National Conference 2013 / October 19, 2013 / Seoul / Korea</i> 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력 특성 Characteristics of Base Load Capacity of Bored Pre-cast Piles Using Steel Pipe Attached PHC Piles 백규호¹⁾, Kyu-Ho Park, 양희경²⁾, Hee-Jeong Yang, 서경범³⁾, Kyung-Bum Seo ¹⁾ 한동대학교 토목공학과 교수(재임직스 대표), Professor, Dept. of Civil Engineering, Kwandong Univ. (CEO, Pleowork). ²⁾ 롯데건설 기술연구원 책임연구원, Senior Researcher, R & D Institute, Lotte Eng. & Const. ³⁾ 동부건설 기술지원팀 팀장, Manager, Technical Assistance Team, Dongbu Corporation. SYNOPSIS : The base load capacity of bored pre-cast piles is very low compared to the strength of bearing stratum, since slime is formed at the base of borehole and the density of bearing stratum surrounding the base of borehole is decreased due to stress relaxation during drilling of borehole. In this study, a new type of PHC pile, which short steel pipe with the same diameter as the PHC pile is attached to the pile tip, is developed to increase the base load capacity of bored pre-cast piles. In order to check the effect of the use of new PHC pile on the base load capacity of bored pre-cast piles, field pile load tests are performed for bored pre-cast piles using the new and existing PHC piles. Results of the pile load tests show that the new PHC pile gives higher base load capacity to bored pre-cast piles than the existing PHC pile, since the tip of new PHC pile is penetrated to undisturbed bearing stratum passing through the slime at the base of borehole and the loosened bearing stratum under the slime by pile driving using light hammer. Based on the pile load test results, equation for estimating the base load capacity of bored pre-cast piles is proposed. Key words : new PHC pile, bored pre-cast pile, base load capacity, design criterion 1. 서 론 매입말뚝은 그림 1과 같이 스크를 통과한 후 T4 경비를 이용해서 콘크리트로 연결까지 불완전 굴착공에 시멘트 모르타르를 주입하고 PHC파일을 삽입한 후 배치를 이용해서 PHC파일을 가압해 타격을 가하여 시공하는 것으로 시공을 완료한다. 이때 지반을 통과하는 과정에서 굴착공 주변에 굴착공의 슬라임이 쌓일 뿐만 아니라 굴착공에서 토사를 배제함에 따른 공극이화으로 인해 굴착공 내부 주변이 원지반보다 느슨해지는데 원인이 발생한다(Jardine 1988). 이런 상황에서 굴착공에 삽입된 PHC파일에 경타를 가하더라도 타격 에너지가 거의 없이 대부분 PHC파일은 굴착공 주변의 슬라임과 그 하부의 느슨해진 지지층을 관통하지 못하고, 잔류성이 크고 강도가 작은 슬라임 위에 놓이므로 매입말뚝은 원지반 지지층이 강도에 비해 작은 수준의 선단지지력을 발휘하게 된다. 그 결과 기존에 사용하던 매입말뚝의 대부분은 PHC파일의 갖고 있는 최종타격의 35~70%만을 설계지지력으로 사용함으로써 구조물의 안전에 비해 많은 수량의 매입말뚝을 시공하고 있다.
--

<i>KSCE 2014 National Conference 2014 / October 17, 2014 / Seoul / Korea</i> 강관 부착 PHC파일로 시공된 풍화암 근입 매입말뚝의 선단지지력 산정 Estimation of Base Load Capacity of Bored Pre-cast Piles Using Steel Pipe Attached PHC Piles in Weathered Rock 백규호¹⁾, Kyu-Ho Park, 서경범²⁾, Kyung-Bum Seo, 양희경³⁾, Hee-Jeong Yang, 김수영⁴⁾, Soo-Young, Kim ¹⁾ 파일리스 대표 겸 가톨릭관동대학교 토목공학과 교수, President, FILEWORKS Co., and Professor, Dept. of Civil Engineering, Catholic Kwandong Univ. ²⁾ 동국건설 기술지원팀 과장, Manager, Technology Advisory Team, Dongbu Corporation ³⁾ 롯데건설 기술연구원 팀장, Team Manager, Research & Development Institute, Lotte Engineering & Construction. ⁴⁾ 롯데건설 디자인연구소 과장, Manager, Design Research Institute, Lotte Engineering & Construction. SYNOPSIS : Steel pipe attached PHC piles with high pile drivability are developed to increase the base load capacity of bored pre-cast piles embedded in weathered rock. An empirical equation for estimating the base load capacity of new bored pre-cast piles installed by the steel pipe attached PHC piles is also proposed. In this study, a series of full scale static and dynamic pile load tests is performed to investigate characteristics of the base load capacity of new bored pre-cast piles and to check an accuracy of the proposed equation. Results of pile load tests show that the new bored pre-cast piles have 1.41~1.97 times base load capacity than that using existing PHC piles. The base load capacity of new bored pre-cast piles is significantly greater than that calculated from the design criterion for existing bored pre-cast piles. In addition, a comparison between predicted and measured load capacities for the new bored pre-cast piles shows that the proposed empirical equation produces conservative predictions. Key words : new PHC pile, bored pre-cast pile, base load capacity, full scale pile load test, empirical equation 1. 서 론 일반적으로 매입말뚝은 풍화암층에서 침강이 더 느린층 지반에 도달하지만 선단지지력은 풍화암과 동등 또는 그 이하인 것으로 알려져 있으며, 이것은 매입말뚝의 시공을 위해 굴착공을 완공하는 과정에서 말뚝 내부 지지층의 강도저하에서 그 원인을 찾을 수 있다. 즉, 풍화암층은 PHC파일의 지반에 관입되면서 파일의 배치를 주변 흙을 파내어 주변지반을 다져지는 반면, 매입말뚝은 지반을 관통할 때 굴착공 주변의 강도가 매우 작은 슬라임이 형성되고, 토사의 배제에 따른 공극이화으로 인해 굴착공 내부 주변이 느슨해지는데 원인이 발생한다(Jardine 1988). 이런 상황에서 매입말뚝의 시공을 위해 굴착공에 PHC파일을 삽입하고 경타를 가하면 타격에너지에 비해 PHC파일 침강에 사용되는 관입타격이 매우 커서 PHC파일의 굴착공 주변의 슬라임과 그 하부의 조밀도 미완성층을 관통하지 못하고 슬라임 위에 놓인 상태로 시공이 종료되므로 매입말뚝은 원지반 지지층의 강도에 비해 상당의 작은 수준의 선단지지력을 발휘하게 된다.

그림 3.2 한국지반공학회 가을학술발표회 논문



그림 3.3 국토교통기술대전 제품 전시

또한 기술사업화 지원과제 예산으로 김포풍무 센트레빌 아파트 현장에서 20일간에 걸쳐 대규모 재하시험을 실시하였으며, 동시에 외부인사들을 초청하여 개발 대상 기술에 대한 소개 행사도 개최하였다(그림 3.4와 3.5)



그림 3.4 기술소개 행사



그림 3.5 기술개발 성능검증시험 외부 공개 행사

재하시험의 수량 및 내용은 다음과 같다. 재하시험은 스마트파일과 PHC 파일의 지지력 비교 검증, 스마트파일의 선단부착 강관의 길이별, 직경별, 강관의 형태 변화에 따른 선단지지력을 분석하기 위해서 수행되었다. 재하시험은 동재하시험 28회 (초기 동재하 14회, Restrike 14회)가 수행되었으며, 초기 동재하시험은 시험말뚝 시공 직후에, Restrike 시험은 말뚝 시공 7일 후에 수행되었다. 정재하시험은 압축 3회, 인발 3회 총 6회 수행되었으며, 압축정재하시험은 반력앵커를 사용해서 실시하였다. 선단지지력과 주변마찰력 구분을 위해 인발정재하시험

을 수행하여 개발된 파일의 선단지지력 증대 효과 부분만을 분리하여 분석할 수 있도록 하였다. 재하시험에 사용된 말뚝의 종류 및 배치도는 그림 2.12와 표 2.6과 같다.

재하시험 결과를 일부 요약하여 표 2.7에 나타내었고 그 결과를 간단히 분석해보면 초기동 재하시험 결과 직경 500mm 강관 부착 PHC파일은 설계지지력인 2,000kN 이상의 지지력을 발휘하였고, 직경 500mm 강관 부착 PHC파일의 평균 지지력이 직경 600mm PHC파일의 지지력과 유사하게 나타나 선단지지력이 큰 폭으로 향상됨을 확인할 수 있었다. 또한 Re-strike시험을 통한 지지력 측정결과 직경 500mm 강관 부착 PHC파일의 지지력이 직경 600mm PHC파일 대비 1.8~7.5%정도 크게 나타나 개발된 기술의 우수성을 확인할 수 있었다.

본 개발된 기술의 실용화를 위해 3개 현장에서 기존기술과의 성능비교를 위한 시험시공을 수행하였다. 시험시공을 통해 모든 지반조건에서 PHC파일을 사용하는 기존기술보다 개발된 기술로 시공된 매입말뚝의 선단지지력 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 본 기술개발과제를 시작한 이후로 현재까지 7개 현장에 적용을 완료해서 약 10,600공의 강관 부착 PHC파일을 시공하였다.

표 3.4 주요 현장별 적용실적

연번	공사명	발주자	시공자	공사기간	공사규모	비고
1	청정지식산업센터 신축공사	디에스 솔텍(주)	동아토건	2014.01 ~ 2014.04	597본	시공완료
2	국도화학 공장부속 건물 증축공사	국도화학	화엄토건	2014.02 ~ 2014.03	209본	시공완료
3	김포 풍무 푸르지오 센트레빌 아파트 신축공사	스카이랜드 PFV	동부건설	2013.12 ~ 2014.5	2,350본	시공완료
4	안성시 롯데캐슬 아파트 신축공사	신동해투자 AMC(주)	롯데건설	2014.02 ~ 2014.8	799본	시공완료
5	독산동 롯데캐슬 골드파크 아파트 신축공사	롯데건설	롯데건설	2014.04 ~ 2014.09	4,800본	시공완료
6	국제종합물류 동탄 창고시설 신축공사	국제종합물류	지젤이엔씨	2014.06 ~ 2014.07	420본	시공완료
7	김천혁신도시 한신희플러스 2차 신축공사	한신공영	한신공영	2014.06 ~ 2014.08	1,420본	시공완료

1. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

개발된 기술은 국내 대규모 현장에 적용을 완료한 상태이며, 향후 지속적으로 적용이 확대될 것으로 판단된다. 또한 해외 시장 진출을 위해 중국과 베트남에 국제특허출원을 완료하였으며, 현재 국제특허 등록이 진행 중이다. 본 기술의 시장전망을 국내건설공사에서의 시장 전망, 국내외 수급동향 및 중장기 수급 전망, 유사기술과의 경쟁상태 및 해외시장 수출 전망으로 나누어서 정리를 해보았다.

(1) 국내 건설공사에서의 활용 전망

본 개발된 기술은 PHC파일에 비해 경타에 의한 관입성이 대폭 향상된 강관 부착 PHC파일을 매입말뚝에 사용해서 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 것으로, 매입말뚝의 본당 설계지지력을 향상시켜 구조물에 시공되는 매입말뚝의 수량을 줄임으로써 기초공사에 투입되는 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시키는 효과를 얻을 수 있다. 이러한 기술적 특징을 갖고 있는 개발된 기술은 토목, 건축, 플랜트를 포함한 모든 분야에서 활용될 수 있으며, 특히 수평하중 대비 연직하중이 큰 구조물에 활용도가 뛰어나다.

최근 국내 건설경기가 급속히 악화되면서 많은 건설사들이 원가절감 기술의 사용을 통한 수익확보에 매진하고 있다. 그 결과 선행기술인 선단확장파일을 사용한 매입말뚝은 지지력 증대효과와 시공성 및 경제성 등에 대해 논란이 있음에도 불구하고 2012년에 매입말뚝 시장의 약 15%를 점유하였고, 현재 그 시장 점유율은 계속 높아지고 있는 것으로 알려져 있다. 그리고 많은 건설사들은 이론적으로나 실험적으로 매입말뚝의 지지력 증대효과가 검증된 새로운 말뚝공법이 개발되면 원가절감 측면에서 개발된 기술의 현장적용을 적극 검토하고 있다. 따라서 국내 건설시장에서 개발된 기술의 활용도는 상당히 높을 것으로 전망된다.

(2) 국내외 수급동향 및 중장기 수급 전망

국내에서 PHC파일을 생산하는 업체들의 모임인 한국원심력콘크리트공업협동조합에서 발표하는 ‘파일 조업 통계’에 따르면 PHC파일의 연간 판매량은 2001년에 3,128천톤이었지만 강관파일의 가격 상승에 따라 PHC파일의 가격 경쟁력이 강화되면서 13년 뒤인 2013년에는 5,341천톤으로 약 70.7% 상승하였다(그림 3.6 참조). 2013년에 사용된 연간 PHC파일 물량을 단위 길이당 무게가 0.274톤/m인 직경 500mm PHC파일로 환산하면 길이가 19,491km에 해당하고, PHC파일의 판매단가가 114,000원/톤이므로 가격으로는 약 6,088억원에 달한다. 그리고 직경 500mm PHC파일을 사용해서 매입말뚝을 시공할 경우 시공비가 약 20,000원/m이 투입되므로 2013년에 매입말뚝을 시공하는데 투입된 국내 총 공사비 규모는 약 3,898억원이었다. 따라서 PHC파일을 사용한 매입말뚝과 관련한 2013년 국내 시장규모는 약 9,986억원

으로 추정될 수 있으며, 향후 13년간 PHC파일 시장규모가 과거 13년과 마찬가지로 70% 성장한다고 가정하면 2026년에 매입말뚝의 국내 시장규모는 약 16,980억원에 달할 것으로 예상된다. 또한 2008년을 기준으로 대부분의 구조물에서 기초로 PHC파일을 사용하는 일본의 건축부문 시장규모는 약 400조원으로 국내 시장규모의 4배이며, 싱가포르를 포함한 일부 동남아 국가에서도 건축구조물의 기초로 매입말뚝을 사용하는 것을 고려하면 해외 매입말뚝 시장규모는 국내 시장규모의 약 6배로 추정된다. 따라서 2013년도 매입말뚝의 세계시장규모는 국내 시장규모의 약 6배인 59,920억원으로 추정된다. 이처럼 국내외적으로 강관파일 대비 가격경쟁력이 우수한 PHC파일 시장은 빠른 속도로 커지고 있으며, 말뚝공사 중 발생하는 소음, 진동으로 인한 민원을 방지하기 위해 대부분의 PHC파일이 매입말뚝으로 시공되는 점을 고려하면 매입말뚝과 관련한 국내외 시장규모도 현재까지 급격히 커져 왔고, 향후에도 그 확장세는 계속될 것으로 판단된다.

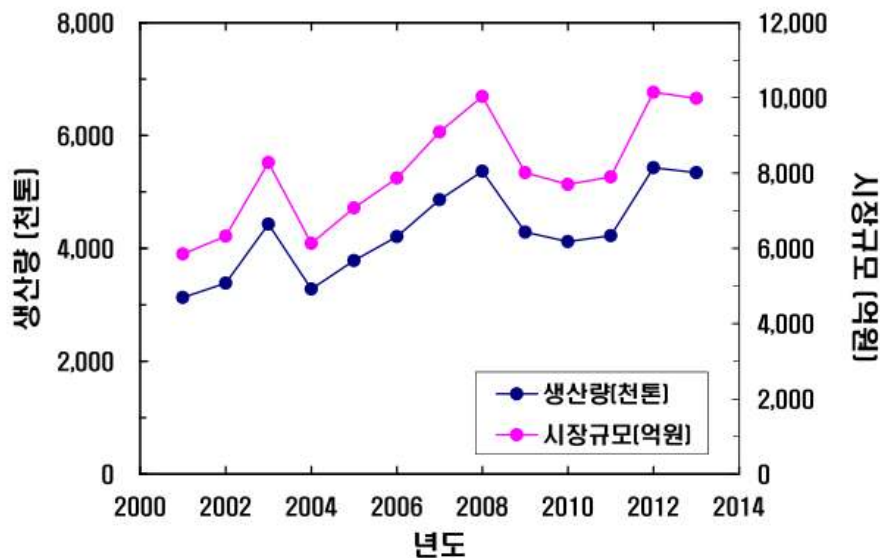


그림 3.6 연도별 PHC파일 시장규모 변화

(3) 유사기술과의 경쟁상태 및 해외시장 수출 전망

개발된 기술에 사용되는 강관 부착 PHC파일은 PHC파일의 선단에 직경은 동일하고 길이는 짧은 강관을 부착한 것으로 PHC파일의 선단부에 넓은 면적의 확장판을 부착한 선단확장파일 보다 제품 가격이 다소 비싸다. 그러나 강관 부착 PHC파일은 매입말뚝의 선단지지력을 지반 조건에 따라 10~80% 향상시키는 반면 선단확장파일은 매입말뚝의 선단지지력 증가율이 30% 미만으로 알려져 있다. 그 결과 동일 하중에 대해 현장에 시공되는 말뚝의 직경을 줄이거나 본수를 감소시켜 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시키는 것이 가능하다. 또한 선단확장파일은 매입말뚝의 시공을 위해 굴착공을 확대 천공해야 하므로 개발된 기술을 적용할 때보다 시공비가 많이 투입되고 파일의 경사도가 커져서 구조적인 문제점을 야기할 가능성도 높다.

이처럼 개발된 기술은 매입말뚝의 단위 지지력당 공사비와 시공성 및 파일의 구조적인 측면에서 기존기술보다 우수하기 때문에 건설시장에 먼저 진입한 선단확장파일과 비교해서 충분한 가격 및 기술 경쟁력을 갖추고 있다.

한편, 외국의 경우 일본을 포함한 일부 동남아 국가에서만 매입말뚝을 구조물 기초로 사용하고 있으며, 일본의 경우 매입말뚝의 지지력 향상을 위해 선단확장파일과 돌기파일을 포함한 다양한 종류의 PHC파일을 개발하고 있다. 그러나 현재까지 개발된 기술과 같이 경타에 의한 파일의 관입성을 높여서 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 종류의 기술은 개발되지 않고 있다. 따라서 본 개발된 기술의 기술적 우수성과 경제적인 효과 등을 적극 홍보함으로써 개발된 기술의 해외 기술이전이나 해외 건설현장 적용을 통한 외화획득이 가능하며, 외국에서 개발된 기술에 대한 권리를 확보하기 위해 현재 중국과 베트남에 국제특허를 출원하여 심사가 진행 중에 있다. 또한 최근 건축 및 토목구조물이 대형화되면서 말뚝의 본당 지지력 극대화를 위해 중굴말뚝이나 스크류말뚝과 같은 외국기술의 도입이 검토되고 있는데, 본 개발된 기술의 시장진입으로 이와 같은 기술도입을 방지함으로써 외화유출을 억제하는 효과도 있을 것으로 기대된다.

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

4.1절 연구개발 최종목표 달성도

1. 기술개발 목표 및 설정근거

가. 기술개발 목표

본 연구를 통해 강관 부착 PHC파일의 실용화에 필요한 요소기술을 개발함으로써 다음과 같은 목표를 달성하고자 한다.

- (1) 기존보다 매입말뚝의 선단지지력을 40% 이상 향상시킬 수 있는 강관 부착 PHC파일의 원가경쟁력 확보
- (2) 강관 부착 PHC파일에 대한 설계기준 및 지지력 측정법의 구축을 통한 제품의 신뢰도 및 현장 적용성 제고

나. 목표 성격 및 설정근거

현재까지 수행된 연구결과에 따르면 강관 부착 PHC파일의 선단에 파일 본체 직경의 1배에 해당되는 길이를 갖는 강관을 부착한 경우 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 선단지지력은 PHC파일을 사용했을 때보다 40% 이상 증가하였고, 굴착공 하부지반의 SPT-N치가 50/6 이상인 경우에는 파일에 부착된 강관 길이 중 일부만이 굴착공 저면에 관입된 것으로 나타났다. 따라서 강관의 길이를 달리한 강관 부착 PHC파일을 사용해서 매입말뚝을 시공하고 재하시험을 수행함으로써 매입말뚝의 선단지지력을 극대화할 수 있는 최단 강관 길이를 결정하고, 이 결과를 반영해서 경제성과 기능을 극대화한 강관 부착 PHC파일을 시작품으로 개발하였다. 그리고 다양한 조건에 시공된 매입말뚝에 대해 말뚝 재하시험을 수행함으로써 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 설계단계에서 필요한 선단지지력 산정식의 정확도를 검증하고, 본 시공 직전에 매입말뚝의 지지력 검증을 위해 필요한 E.O.I.D 시험을 통한 매입말뚝의 선단지지력 추정 기법을 개발 목표로 하였다.

2. 최종 성과목표/성과지표

성과목표	성과지표		측정방법	최종목표치	가중치 (0~1)	달성도	실적
실용화	1-1	국내 및 해외 학술지에 게재된 논문 건수	국내외 학술지 논문 1건 이상 게재	국내 학술지 1건이상 게재	0.1	0.1	논문집 1건 게재
	1-2	특허출원 건수	해당 사업을 통해 산출된 특허 출원 실적	특허 출원 1건	0.25	0.25	특허 출원 1건 이상
	1-3	기술개발에 의한 비용절감 효과	해당 연구개발사업의 결과물로 인한 실질적인 비용절감 효과 산정	기술개발에 의한 비용 절감효과 10% 목표	0.25	0.25	비용절감 10% 이상 효과
	1-4	건설 신기술 신청 인증	해당 연구개발 사업의 결과물로 인한 신기술 신청 실적	건설신기술 1건 신청	0.4	0.4	건설 신기술 신청완료
	합계				1.0	1.0	—

3. 연구추진계획 수행 실적

연구수행 기관	연구내용 (연구책임자)	계획	연구추진수행실적												기타
			2013년					2014년							
		실적	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	
주관 - 동부건설(주)	최적강관 길이산정 (이선복)	계획	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-
		실적	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
공동- 롯데건설(주)	RESTRIKE 지지력 산정 (양희정)	계획	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		실적	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
공동- (주)파일웍스	설계기준제시 (백규호)	계획	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
		실적	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
사업진도(%)			10%			40%			30%			20%			100%

4.2절 연구개발 성과의 기술적 효과분석

본 사업화 대상 기술이 성공적으로 개발되면 지난 20여년간 변화되지 않은 매입말뚝 분야에서 처음으로 이론적으로나 실험적으로 선단지지력 증대효과가 검증된 기술이 개발되는 것으로, 건축 및 토목분야의 건설현장에 적용 시 공사비 절감과 공사기간 단축에 크게 기여할 수 있다. 그리고 본 사업화 대상기술의 실용화를 위해 대형 건설사와 함께 국토부 건설신기술 인증을 추진함으로써 현장적용과 기술의 타당성 검증을 동시에 추진하고, 주요 말뚝 시공사들과 기술제휴를 체결해서 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 정밀시공을 발전시켜 나갈 수 있다. 또한, 본 연구를 통하여 PHC파일 선단에 파일과 직경이 동일하고 길이가 짧은 강관을 부착한 강관 부착 PHC파일을 시멘트밀크가 주입된 굴착공에 삽입하고 경타를 가해 파일 선단에 부착된 선단강관이 천공과정에서 굴착공 저면에 형성된 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층을 관통해서 교란되지 않아 강도가 큰 원지반 지지층에 관입되도록 함으로써 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 것을 핵심으로 기술적 효과를 충분히 발현할 수 있다.

본 연구성과를 통해 매입말뚝의 지지력 증대를 통한 구조물 기초에 시공해야 하는 말뚝 본수를 줄일 수 있는 결과를 도출하였다. 매입말뚝 시공 시 PHC파일이나 선단확장파일을 사용하는 기존기술 대신 강관 부착 PHC파일을 사용하는 기술을 적용하면 매입말뚝의 시공본수를 감소시킬 수 있고, 그로 인해 시멘트 사용량이 감소하게 되므로 시멘트 생산 시 발생하는 온실가스를 상당량 감축할 수 있게 된다. 매입말뚝은 일본에서 최초로 개발되어 국내를 포함해 동남아 국가에서 많이 시공되고 있으며, 매입말뚝의 지지력 향상을 위한 연구의 대부분도 일본을 중심으로 이루어지고 있다. 따라서 본 사업화 대상 기술인 강관 부착 PHC파일의 개발을 통해 매입말뚝 관련 기술의 일본 의존도를 낮춰서 국내 지반조건에 적합한 원천기술 확보에 도움이 될 뿐만 아니라 이를 바탕으로 기초공사비의 절감을 통해 동남아 국가에서 발주하는 해외공사의 수주에도 크게 기여할 것으로 판단된다.

4.3절 연구개발 성과의 경제적 효과분석

본 연구 수행 중 기술에 대한 공사비 비교를 위해 기술이 적용된 화성 동탄 2신도시 아파트 건설 현장과 김포시 풍무동 아파트 건설 현장에 강관 부착 PHC파일을 사용하는 기술과 PHC파일 및 선단확장파일을 사용하는 기존기술을 적용했을 때 각 공종별 투입 공사비를 산출할 수 있었다. 먼저 매입말뚝을 시공하기 위해서는 ‘파일 제작 및 현장반입 → 굴착공 천공 → 시멘트밀크 주입 및 교반 → 파일 삽입 → 경타 → 두부정리’의 순으로 작업이 진행되며, 이들 공종 중 PHC파일의 선단에 짧은 길이의 강관과 도넛 형태의 플랜지, 보강리브로 구성되는 선단강관을 부착해서 강관 부착 PHC파일을 제작하는 공정과 경타에 의해 파일 선단에 부착된 선단강관이 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지력을 관통해서 강도가 큰 원지반 지지층에 관입하도록 하는 공정이 이루어진다.

각 현장별로 강관부착 PHC 파일과 기존 PHC 파일 사용해서 1,000본의 매입말뚝을 시공하는데 투입되는 공사비를 산정을 위해 먼저 현장조건을 고려한 건설자재 투입물량을 비교하고, 그 후 건설자재에 대한 적정단가를 적용해서 작업공종별로 말뚝공사에 투입되는 공사원가를 비교하였다.

화성 동탄 2신도시 아파트 현장의 경우 직경 500mm PHC파일을 지반에 12.0m 근입시킨 매입말뚝의 설계지지력이 1,200kN이었고, 두부와 선단부 직경이 각각 500mm와 560mm인 선단확장파일을 14.5m 근입시킨 매입말뚝과 직경 500mm인 강관 부착 PHC파일을 10.5m 근입시킨 매입말뚝의 설계지지력이 1,600kN으로 계산되었다. 따라서 1,200MN의 연직하중이 작용하는 구조물의 기초에 기존 공법으로 매입말뚝을 적용할 경우 PHC파일과 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝이 각각 1,000본과 750본이 시공되어야 한다. 산정된 건설자재 투입물량에 근거해서 매입말뚝 형식별로 기초공사에 투입되는 공사원가를 산정한 결과, PHC파일 매입말뚝 대신 강관부착 PHC 파일을 적용하면 말뚝 길이 및 본수가 감소해서 13.4%의 공사비 절감이 가능하다.

김포시 풍무동 아파트 현장의 경우 매입말뚝이 2,000kN의 본당 설계지지력을 확보하기 위해서는 직경 600mm PHC파일(압축강도 80MPa)과 직경이 500mm인 초고강도 PHC파일(압축강도 110MPa)을 각각 13.1m와 9.6m 근입하여야 한다. 따라서 매입말뚝을 연직하중이 2,000MN인 구조물의 기초에 적용할 경우 말뚝의 형식에 상관없이 모두 1,000본의 매입말뚝 시공되어야 하고, 각 매입말뚝 형식별로 시공에 필요한 건설자재 투입물량에 근거해서 기초 공사원가를 산정한 결과 PHC파일을 사용한 매입말뚝 대신 강관부착 PHC 파일을 적용하면 말뚝 길이 및 직경이 감소해서 12.4%의 공사비 절감이 가능하여 경제적인 효과를 볼 수 있었다.

이상에서 보듯이 강관부착 PHC 파일의 기술은 기존기술에 비해 매입말뚝의 본당 지지력을 증대시켜서 말뚝의 시공본수를 감소시키거나 말뚝의 지지층 근입길이를 줄여서 전체적으로 말뚝의 길이를 단축시키고, 경우에 따라 말뚝의 직경을 줄이는 방법으로 기초 공사비를 절감할 수 있었다. 또한 강관부착 PHC를 이용한 기술은 선단에 가격이 고가인 강관을 부착한 파일을 사용하기 때문에 지지층 심도가 깊지 않은 곳에서는 말뚝의 단위 길이당 강관 사용에 따른 가격 상승분이 커서 공사비 절감효과가 그다지 크지 않은 반면 지지층 심도가 깊은 곳에서는 말뚝의 단위 길이당 강관 사용에 따른 가격 상승분이 작아서 공사비 절감효과가 큰 것으로 나타났다.

강관부착 PHC 파일의 경우 말뚝의 본당 설계지지력을 향상시켜 구조물에 시공되는 매입 말뚝의 수량을 줄임으로써 기초공사에 투입되는 공사비를 절감하고 공사기간을 단축시키는 효과를 얻을 수 있다. 이러한 기술적 특징을 갖고 있는 신청기술은 토목, 건축, 플랜트를 포함한 모든 분야에서 활용될 수 있으며, 특히 수평하중 대비 연직하중이 큰 구조물에 활용도가 뛰어나다.

최근 국내 건설경기가 급속히 악화되면서 많은 건설사들이 원가절감 기술의 사용을 통한 수익확보에 매진하고 있다. 그 결과 선행기술인 선단확장파일을 사용한 매입말뚝은 지지력 증대효과와 시공성 및 경제성 등에 대해 논란이 있음한 문제점을 갖고 있음에도 불구하고 2012년에 매입말뚝 시장의 약 15%를 점유하였고, 현재 그 시장 점유율은 계속 높아지고 있는 것으로 알려져 있다. 그리고 많은 건설사들은 이론적으로나 실험적으로 매입말뚝의 지지력 증대효과가 검증된 새로운 말뚝공법이 개발되면 원가절감 측면에서 개발된 기술의 현장적용을 적극 검토하고 있다. 따라서 국내 건설시장에서 신청기술의 활용도는 상당히 높을 것으로 전망된다.

4.4절 연구개발 성과의 정책적 효과분석

본 사업화 대상 기술의 개발로 인하여 매입말뚝 관련 기술의 일본 의존도를 낮춰서 국내 지반조건에 적합한 원천기술 확보에 도움이 될 뿐 아니라 이를 바탕으로 기초공사비의 절감을 통해 동남아 국가에서 발주하는 해외공사의 수주에도 크게 기여할 수 있다. 또한 매입말뚝의 선단지지력이 기존 대비 40% 이상 향상되므로 현장에서 매입말뚝의 시공 본수 감소를 통해 기초 공사비의 절감과 공사기간의 단축도 가능하다. 또한 현장에서 말뚝의 시공본수가 감소함에 따라 말뚝 시공 시 발생하는 경타에 의한 소음과 진동과 같은 건설공해의 총량이 감소하므로 건설공해로 인한 민원발생 가능성을 낮출 수 있다. 과거 10년간 국내 건축시장은 매년 약 3%씩 확장되어 왔으며, 건설공해로 인한 민원발생의 억제를 위해 구조물 기초로 매입말뚝을 적용하는 사례가 급증하였다. 또한 최근 건설사들이 수익성 악화를 극복하기 위해 원가절감에 최선을 다하고 있다. 따라서 강관 부착 PHC파일이 실용화되어 제품화되면 매입말뚝의 지지력을 증대를 통한 공사비 절감 및 공사기간 단축이 가능해지므로 공사비 절감을 위해 대다수 건설사에서 강관 부착 PHC파일을 현장에 적용할 것으로 판단된다.

또한, 외국의 경우 일본을 포함한 일부 동남아 국가에서만 매입말뚝을 구조물 기초로 사용하고 있으며, 일본의 경우 매입말뚝의 지지력 향상을 위해 선단확장파일과 돌기파일을 포함한 다양한 종류의 PHC파일을 개발하고 있다. 그러나 현재까지 사업화 기술과 같이 경타에 의한 파일의 관입성을 높여서 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 종류의 기술은 개발되지 않고 있다. 따라서 본 공법의 기술적 우수성과 경제적인 효과 등을 적극 홍보함으로써 신청기술의 해외 기술이전이나 해외 건설현장 적용을 통한 외화획득이 가능하며, 외국에서 신청기술에 대한 권리를 확보하기 위해 현재 중국과 베트남에 국제특허를 출원하여 심사가 진행 중에 있다. 또한 최근 건축 및 토목구조물이 대형화되면서 말뚝의 본당 지지력 극대화를 위해 중굴말뚝이나 스크류말뚝과 같은 외국기술의 도입이 검토되고 있는데, 본 신청기술의 시장진입으로 이와 같은 기술도입을 방지함으로써 외화유출을 억제하는 효과도 있을 것으로 기대된다.

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

5.1절 연구성과 활용 및 추가 연구 필요성

1. 기술실시계획

본 연구를 통해 사업화 대상 기술이 실용화될 경우 주관 및 공동연구기관은 대상 기술을 현장에 바로 적용할 계획이므로, 본 과제가 종료되고 3년 이내에 상당한 규모의 매출 발생이 예상된다. 따라서 본 과제의 수행결과가 ‘성공’으로 판정되면 성공 판정일로부터 3년 이내에 기술료를 완납하는 것이 가능하다.

2. 판매계획

본 연구기간 동안 동부건설(주)의 김포 풍무지구 현장, 롯데건설(주)의 금천-독산 롯데캐슬 현장 및 안성시 롯데캐슬 현장 등에 적용하였으며, 타 건설사 홍보 및 시공을 목표로 하여 판매전략을 수립한 상태로 이후에는 각 시공사별로 전체 PHC말뚝 물량의 최소 10% 이상을 판매할 계획이다. 이를 위해 현재 현대건설, 대우건설, 포스코 건설, 한신공영 등 국내 대형 건설사뿐만 아니라 중소기업에도 기술 홍보를 한 상태이며, 2014년 국토교통기술대전 홍보 전시를 통하여 홍보를 진행하였다. 따라서, 기 시공실적 및 활발한 사업화를 위한 적극적인 홍보 활동을 바탕으로 판매를 할 계획이다.

3. 사업화 추진방안

가. 1단계(완료) : 강관 부착 PHC파일의 실용화에 필요한 요소기술 개발을 통한 제품의 표준 제원 결정 및 설계기준에 대한 타당성 확보

나. 2단계(완료) : PHC파일 제조사 및 가공업체와 연계한 강관 부착 PHC파일의 최적 생산 시스템 구축(강관의 가공 및 부착 방법 포함)

다. 3단계(진행중) : 매입말뚝의 선단지지력을 향상시키는 강관 부착 PHC파일에 대한 각종 기술인증 획득

본 사업화 대상 기술이 성공적으로 개발되면 지난 20여년간 변화되지 않은 매입말뚝 분야에서 처음으로 이론적으로나 실험적으로 선단지지력 증대효과가 검증된 기술이 개발되는 것으로, 건축 및 토목분야의 건설현장에 적용 시 공사비 절감과 공사기간 단축에 크게 기여할 수 있다. 그리고 본 사업화 대상기술의 실용화를 위해 국토교통부 건설신기술 인증을 추진함으로써 현장적용과 기술의 타당성 검증을 동시에 추진하고, 주요 말뚝을 시공하는 현장의 시공사들과 기술제휴를 체결해서 강관 부착 PHC파일을 사용한 매입말뚝의 정밀시공을 유도할 계획이다. 또한 강관 부착 PHC파일의 원활한 현장공급을 위해 국내 주요 PHC파일 제조사들과 기술제휴를 통해 파일을 생산, 공급할 계획이다.

4. 신기술 신청

본 기술사업화 지원사업 연구를 진행하면서 성과지표 중 건설신기술 인증 신청이 1건 반영되어 있다. 2014년 8월 현재 신기술 1차 심사 및 현장 실사가 완료된 상태이며, 신기술 2차 심사가 예정되어 있다.

건설신기술 신청 범위	선단에 짧은 길이의 강관을 부착한 강관 부착 PHC파일을 시멘트밀크가 주입된 굴착공에 삽입하고 경타를 가해 파일에 부착된 선단강관이 천공과정에서 굴착공 저면에 형성된 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층을 관통해서 교란되지 않은 원지반 지지층에 관입되도록 함으로써 매입말뚝의 선단지지력을 증대시키는 공법
----------------	---

5. 정책반영 계획

강관부착 PHC파일 공법은 2011년 중소기업청에서 지원하는 산학연 공동기술 개발사업을 통해 원천기술이 개발되었고, 그 후 1년간 신기술 신청자인 4개사가 신청기술의 성능검증 및 현장적용성 평가를 위한 공동연구를 수행하였다. 본 연구과제를 통하여 설계기준 정립과 경제성 향상 방안 도출을 위한 연구를 수행하였으며, 사업화 기술에 대한 선단지지력 산정식은 ‘한국건축구조기술사회’로부터 2013년 4월에 기술인증을 받았으며, 공인성의 추가 확보를 위해 향후 각종 학술잡지와 기술지에 논문을 게재하고 현재 LH공사에서 진행하는 신청기술의 적용성 조사를 통과해서 LH공사 현장에 적용함은 물론 최종적으로는 구조물 기초설계기준에 설계기준으로 등재할 계획이다.

6. 기존 연구 및 타연구와의 연계 등

기술사업화 연구과제를 통한 강관부착 PHC파일 공법의 경우 기존 PHC파일의 선단에 짧은 길이의 강관을 부착해서 파일의 경타 관입성을 극대화한 강관 부착 PHC파일과 이를 이용한 매입말뚝 공법에 대한 것으로 선단지지력 증대를 위해 고강도 PHC 파일 사용이 확대되고 있다. 따라서 기존 연구와 고강도 PHC 파일에 대한 연구 연계가 필요하다.

5.2절 추가연구 필요성

기존의 PHC파일을 사용한 매입말뚝과 달리 강관 부착 PHC파일의 선단에 부착된 선단강관을 굴착공 하부의 슬라임과 이완영역 지지층을 관통해서 원지반 지지층에 관입시키므로 매입말뚝의 선단지지력이 원지반 지지층의 강도에 의해 결정되는 특징을 갖고 있으며, 이러한 지지력 특성을 고려해서 새로운 선단지지력 산정식을 제안하였다. 현장 말뚝재하시험에서 측정된 매입말뚝의 선단지지력을 사용해서 새로운 선단지지력 산정식의 정확도를 조사한 결과 제안된 선단지지력 산정식은 본 과제에서 연구한 강관부착 PHC 파일로 시공된 매입말뚝의 선단지지력을 안전측에서 예측하는 것으로 나타났다. 신청기술에 대한 선단지지력 산정식의 정확도를 광범위한 조건하에서 검증하기 위해 현재 다양한 조건하에서 시공 중이거나 향후 시공 예정인 매입말뚝에 대해 정재하 및 동재하시험을 수행해서 선단지지력을 측정함으로써 보다 광범위한 데이터베이스를 구축할 계획이다.

제 6 장 참고문헌

제 6 장 참고문헌

1. 한국지반공학회(2009), 국토해양부 제정 구조물기초설계기준 해설.
2. Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C. (1999), “The Elasto-Plastic Response of Under-ground Excavations in Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion” , International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, pp. 777-809.
3. Davisson, M. T. (1972), “High Capacity Piles” , Proceeding of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, ASCE, Illinois Section, Chicago, pp. 81-112.
4. Jardin, F. M. (1988), “Introduction to Papers 1-9” , Proceedings of Penetration Testing in the UK, ICE, Birmingham, pp. 23-49.
5. Paik, K. H. and Lee, S. R. (1993), “Behavior of Soil Plugs in Open-Ended Model Piles Driven into Sands” , Marine Georesources and Geotechnology, Vol. 11, pp. 353-373.
6. Paik, K. H. and Salgado, R. (2003), “Determination of Bearing Capacity of Open-Ended Piles in Sand” , Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 1, pp. 46-57.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술사업화지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.