

제 출 문

건설교통부장관 귀하
이 보고서를 "지지력확인시스템이 장착된 지반보강형 helical pile의 설계 및 시공법 개발"과제의 보고서로 제출합니다.

2014. 08. 28

주관연구기관명 : 고려대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 최항석

연구원 : 김계수, 김정훈, 김현동,
김형남, 안병태, 정해수,
이효성, 임혜진, 이철호,
이동섭, 김병연, 최현준,
원종묵, 박상우, 이종원,
안재윤, 나경옥, 최은진,
오민택, 정진숙, 이석재

협동연구기관명 : (주) 삼보지반기술

협동연구책임자 : 김현동

보고서 요약서

과제고유번호	12기술혁신E02	해 당 단 계 연 구 기 간	2013년 03 월 29일부터 2014년 07월 28일까지	단 계 구 분	(해당단계 : 2)/ (총 단 계 : 2)
연구사업명	중 사업명	건설교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	건설교통기술촉진연구사업			
연구과제명	대 과 제 명	지지력확인시스템이 장착된 지반보강형 helical pile 의 설계 및 시공법 개발			
	세부과제 명	지지력확인시스템이 장착된 지반보강형 helical pile 의 설계 및 시공 법 개발			
연구책임자	최 항 석	해당단계 참 여 연구원수	총 : 19 명 내부: 8 명 외부 :11 명	해당단계 연 구 비	정부:349,000천원 기업:130,000천원 계:479,000천원
		총연구기 간 참 여 연구원수	총 : 22 명 내부 :14 명 외부 :4 명	총연구비	정부:449,000천원 기업:164,000천원 계:613,500천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	고려대학교 산학협력단		참여기업명	(주) 삼보지반기술	

국제공동연구		상대국명 :	상대국연구기관명 :
위탁연구		연구기관명 : (주)삼보지반기술	연구책임자 : 김 현 동
요약			보고서면수 201
	연구개발목표	연구개발결과	
1차년도	helical pile의 구조체 연구	• 나선형 원판 1개의 helical pile이 갖는 공학적 특성 연구 및 수치해석을 실시 • 1차 시험시공 및 재하시험 · 지반조사 • 강재 재료시험(인장,압축,비틀림,굽힘시험)을 통한 시공 특성 분석 • 지반 및 설계하중 크기 별 최적의 helical pile 규격 제시	
2차년도	지반조건 및 설계 지지력의 크기에 따른 helical pile 거동특성 연구	• 2차 시험시공 및 재하시험 · 수치해석 • 지반조사(공내재하시험포함) · 정역학적 지지력 공식 이용을 통한 설계지지력 예측식 제시 • 시공 중 발생할 수 있는 동공발생에 대한 대책공법 제시	
	지지력 확인 시스템이 내장된 표준 규격 helical pile의 제작 및 성능 평가	• 양방향재하시험이 가능한 유압장치의 개발(압력 및 변위 측정장치 포함) • 설계용 표준규격 helical pile의 제작 및 장치 결합 • 시험 시공 후 성능 확인	
	지반 보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능평가	• 지반 특성별 그라우팅 압력 및 강도 결정 • 지반조건 별 그라우팅의 압력 및 범위 결정 • 지반조건 및 설계하중의 크기에 따른 그라우트재 연구 • helical pile전용 그라우팅 장비 개발 • 시험 시공을 통해 개량효과 확인	
	helical pile 시공 장비 개발	• helical pile 시공에 적합한 장비 제작(고토크 측정장비)	
		• 설계 및 시공 관리를 위한 운영 • helical pile의 시공 및 운영관련 최적화 소프트웨어 개발 • 시공지침서 제시	
색인어 (각 5개 이상)	한글	헬리컬 파일, 재하 시험, 수치해석, 양방향재하시험, 지반보강, 고토크 측정장비, 최적화 소프트웨어, 시공지침서	
	영어	helical pile, pile load test, numerical analysis, osterberg cell test, high torque calibration device, optimizing software, engineering instructions	

요 약 문

I. 제 목

지지력확인시스템이 장착된 지반보강형 helical pile의 설계 및 시공법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

helical pile은 사각 또는 원형으로 되는 중심축 선단으로부터 상부로 한 개 또는 복수의 나선형 원판이 일정한 간격으로 용접 부착된 말뚝이다. 나선형 원판은 건설장비에 부착된 유압모터에 의하여 지반으로 회전관입 되도록 하는 추진체이자, 하중 재하시 각 나선형 원판에서 선단지지력이 발현되게 하는 재하 판 역할을 한다. 또한 압축 및 인발시 나선형 원판 사이에 있는 인접 지반에서 주면마찰력이 발휘되어 상부하중을 지지한다.

Helical pile은 소음 및 진동이 적으면서 천공 및 그라우팅 공정이 없는 유일한 말뚝공법임에도 불구하고 Helical pile의 거동 및 발현된 지지력에 대한 이해 부족으로 인하여 아직 국내에서는 사용 실적이 많지 않은 공법이다. 국내에서 사용되는 Helical pile은 통상 설계하중이 50ton 미만인 경우에 적용되고 있으며, 이는 마이크로파일의 설계하중 영역에 속한다. 마이크로 파일의 경우 항타 공법을 제외한 대부분의 말뚝시공에서와 마찬가지로 천공 및 시멘트 paste 주입이 필수적이지만 Helical pile은 파일을 회전시켜 관입하므로 천공이 불필요하고 소음 및 진동 없이 말뚝을 고속으로 시공할 수 있어, 마이크로 파일에 비하여 가격 경쟁력을 가지고 있는 공법으로 평가된다. Helical pile은 시공성 및 경제성, 친환경성을 동시에 갖는 우수한 공법으로, 미국 및 유럽 등에서는 다양한 적용 사례를 갖고 있는 말뚝 기초 공법이지만 현재 Helical pile은 비교적 작은 설계 지지력이 요구되는 조건에만 시공 가능하고 Helical pile 자체의 구조적 취약성을 가지고 있다는 점 등에서 국내에서는 사용이 제한되고 있는 실정이다.

또한 통상 말뚝 설계는 시공이 예정된 지반의 지반조사를 통하여 지반강도를 측정 후 정역학적 지지력공식에 지반정수를 대입하여 향후 시공될 말뚝의 지지력을 예측하며, 계산된 지지력의 크기에 따라 총 시공될 말뚝의 심도 및 수량을 결정한다. 즉, 지지력 예측의 정확도에 따라 말뚝시공비가 크게 좌우된다. 그럼에도 불구하고 재하시험을 통해 확인되는 지지력은 설계 시 계산된 지지력과는 상당한 차이를 보인다. 이와 같이 설계 시 계산된 지지력과 시공과정 중 재하시험을 통해 확인한 지지력이 큰 차이를 보이는 것은 지반조사 시 채취된 시료의 교란 및 응력 해방 등의 영향과 지반의 지지력 거동을 정확히 표현하지 못하는 정역학적 지지력 공식을 적용하기 때문인데, 현실적으로 정확한 지지력 예측은 불가능하므로 설계단계에서 재하시험을 통해 지지력을 측정한 후 이를 설계에 반영하는 것이 가장 확실한 방법이라 할 수 있다. 하지만 설계단계에서 말뚝의 시공과 병행하여 재하시험을 하는 것은 경제성, 시공성, 설계 일정 등의 이유로 크게 어려운

실정이다.

따라서 본 연구에서는 상기에 언급한 Helical pile의 문제점과 설계시의 제한점을 극복하여 Helical Pile의 국내보급을 촉진시킬 수 있도록, Helical pile이 지반에 설치된 구조체로서 공학적 요구조건(압축, 휨성, 좌굴)을 만족하면서 지반조건별 지지력을 극대화시킬 수 있는 Helical pile 시공법을 개발하기 위하여 helical pile에 지지력 확인 장치를 내장하여 설계 및 시공 중 간단히 지지력 평가를 가능하게 하는 것이 목적이다. 이는, 설계단계에서 helical pile의 실제 지지력을 미리 예측함으로써 경제적 시공을 가능하게 할 것이다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 Helical pile이 지반에 설치된 구조체로서 공학적 요구조건(압축, 휨성, 좌굴)을 만족하면서 지반조건별 지지력을 극대화시킬 수 있는 Helical pile 시공법을 개발하기 위하여 helical pile에 지지력 확인 장치를 내장하여 설계 및 시공 중 간단히 지지력 평가를 가능하게 하는 것에 목적이 있다. 1차년도 연구에서는 지지력 특성별 Helical pile 구조체를 연구하기 위하여 기존 연구자료 조사, 목표지지력 크기에 따른 최적의 Helical pile 형상 및 규격 제시, 예비 현장시공을 통한 Helical pile 형상별 지지력 변화를 분석하였으며, 2차년도 연구에서는 1차년도의 연구결과를 바탕으로 지반조건 및 설계지지력 크기에 따른 Helical pile의 거동 특성, 지지력 확인시스템이 내장된 표준규격 Helical pile의 제작 및 성능 평가, 지반보강이 가능한 Helical pile 시공법 개발 및 성능 평가, Helical pile 시공 장비 개발, 설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 및 시공관리 시방서 작성에 대한 연구를 진행 하였다

IV. 연구개발결과

지지력 특성별 helical pile의 구조체 연구를 통해 건물기초의 구조체로서 공학적 특성에 부합되는 helical pile의 설계 기준을 산정하였으며 거동특성을 파악하여 시공관리 지침서와 예측식을 제시하였다. 추가적으로 표준 규격 helical pile의 제작 및 평가를 위해 유사공법과의 경제성 분석과 설계 시 적용할 수 있는 유압장치가 내장된 helical pile의 제작을 수행하였으며 helical pile 내부에 장착된 그라우팅 장비개발과 지반조건별 그라우팅 압력 및 시멘트 배합비 결정을 통해 지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발하였다. 또한 국내에서 helical pile이 사용된 사례가 많지 않고 사용 조건도 제한되어 있었기 때문에 helical pile 시공장비를 개발하였고 이를 위한 설계 및 시공관리를 위한 운영 시스템 소프트웨어를 개발하였으며, 시공관리 지침서를 작성하였다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발 결과를 통하여 helical pile의 경제성, 시공성, 적용 가능한 최적 지

반조건 및 구조물의 다양성 등을 검증하여 helical pile 시장 확대를 모색하고, 이를 이용하여 사업화를 추진할 계획이다. 본 연구를 통해 개발된 helical pile용 그라우팅 공법을 바탕으로 기존의 오거 그라우팅장비, 연약지반 그라우팅장비, 사면안정에 이용되는 장비 등을 변형, 개조, 개선하여 일반 helical pile 시공장비에 그라우팅을 접목한 장비를 개발하고 공정의 단순화를 유도하여, 향후 시공성 및 경제성을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

Summary of Research Results

I. Title

Development of Design and Construction Method of Ground-Reinforcing Helical Pile Equiped with bearing capacity measuring system

II. Purpose and Needs of Research and development

The helical pile is a manufactured steel pile foundation consisting of one or more helix-shaped bearing plates affixed to a central shaft that is rotated into the ground to support structural loads. Although the helical pile does not need grouting, and there is little noise and vibration during construction, a lack of understanding of bearing capacity of helical pile makes the pile difficult to be popularly adopted in construction sites. In Korea, the helical pile is used only when the design loads are under 50 tons which is similar to micro-pile design loads. In the case of micro-pile, boring and injection of cement paste is generally necessary when the pile is constructed. However, because the helical pile which is installed into the ground by rotating the shaft needs no boring or grout process, and the pile can be constructed quickly with little noise and vibration. Consequently, this type of piles is taken into granted as a competitive pile structure compared to other micro-piles.

In general, design of pile structures is processed being followed by site investigation, measurement of strength of the ground, prediction of bearing capacity of the pile which will be constructed, and determination of the number and penetration depth of the piles according to the predicted bearing capacity, and construction cost of the pile structures is influenced by the accuracy of the predicted bearing capacity. However, there are many cases that a real bearing capacity measured through loading tests after construction is so much different from the predicted bearing capacity in the design steps. The reason for the difference is attributable to the disturbance and distressing of the sample during ground investigation and the use of bearing capacity prediction formula that is not appropriate to express the dynamic bearing capacity of the ground. Thus, after measuring bearing capacity through a loading test in the design step, the use of this bearing capacity in design of pile structures is the best way for design since an accurate prediction of bearing capacity is impossible in the current situation. However, when it comes to economic feasibility, constructability, and design schedule, performing loading tests during design steps are very

difficult.

Therefore, the purpose of this study is developing a design and construction method for a novel helical pile equipped with a bearing capacity measurement system. This design and construction method would overcome the practical difficulties observed in helical piles, meet the engineering requirement such as resistance to compression, bucking and bending, and maximize the bearing capacity of helical pile, and thus stimulate the market of helical piles.

III. Contents and Scope of Research and Development

The purpose of this study is developing a design and construction method of a novel helical pile equipped with a bearing capacity measurement system, which would overcome the practical difficulties observed in helical piles in design steps, meet the engineering requirement such as resistance to compression, bucking and bending, and maximize the bearing capacity of helical pile, and thus stimulate the market of helical piles. In the first research period, preliminary studies and determination of the optimum helical pile configuration were conducted. In addition, the variation in bearing capacity is analyzed by performing a trial construction test. In the second research period, With consideration of the results from the first research period, the mechanical behavior of helical piles along with various ground conditions and design loads was investigated. Along with manufacturing the new helical pile and evaluating its performance, development of the construction method and the specification of helical piles was made. Finally, the tailor-made construction equipment and operation system for design and maintenance of helical piles have been proposed.

IV. Results of Research and Development

The design and construction method for the novel helical pile, which meet the engineering requirements is developed through the current research. An operation system for helical piles are produced. In addition, economic feasibility is conducted by comparing the helical pile with similar construction methods to produce a prototype of helical piles, and evaluate its performance. A novel helical pile equipped with a bearing capacity measurement system is devised in this research. Furthermore, a design and construction method for reinforcing helical piles was developed by applying the grouting technology. Finally, the construction equipment and design/operation software system for helical piles were developed along

with a guideline for management.

V. Application of Research and development

According to the research results and development, the helical pile can be highly recommended with respect to economic feasibility, constructability, and versatility for various ground conditions and structural loads. Moreover, by adopting the developed process, commercialization for helical piles will be promoted. The results from the research are also used to similar helix-type reinforcing structures such as a helical anchor.

Contents

Chapter 1. Introduction

Paragraph 1. Overview of research	1
1. Overview of research and developments	1
2. Importance of research and developments	1

Paragraph 2. Trend of technology

1. Trend of domestic/international technology and industry	13
--	----

Chapter 2. Research contents and results

Paragraph 1. Final research objective and method	17
1. Research objectives	17
2. Research methods	19

Paragraph 2. Annual research goal and evaluation	20
1. Annual research objectives and contents	20
2. Annual quantitative objectives and evaluation	21
3. Promotion strategy of research and development	24

Paragraph 3. Annual development contents and activities	25
1. Theoretical background	25
2. 1st year	44
3. 2nd year	81

Chapter 3. Final research result & application

Paragraph 1. Key achievement	185
1. key achievement	185

Paragraph 2. key achievement with appliance	186
--	------------

Chapter 4. Evaluation of achievement and contribution

Paragraph 1. Annual evaluation of achievement	189
--	------------

1. Research promotion system	189
2. Annual evaluation of achievement	189

Paragraph 2. Expectation and influence	190
---	------------

1. SWOT analysis	190
2. Dissemination of technology	191
3. Economical effect	191

Chapter 5. Application plan for research results

Paragraph 1. Application method	192
--	------------

Paragraph 2. Connection & cooperation with related industry	192
--	------------

1. New application with the technology	192
2. Connection with related industry	193
3. High value addition	193

Chapter 6. International technologies and references collected from research

1. Helical pile international standards (2009 International Building Code)	194
2. Magnum’s helical pile product standard	195
3. Comparison of manufacturing regulations	195

Chapter 7. Reference	201
-----------------------------------	------------

목차

제 1장. 서론

제 1절. 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발 개요	1
2. 연구개발 중요성	1
제 2절. 국내외 기술개발 현황	13
1. 국내외 관련 기술 및 산업 동향	13

제 2장. 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절. 최종목표 및 목표별 접근 방법	17
1. 최종목표	17
2. 연구목표 도달을 위한 접근방법	19
제 2절. 단계 목표 및 평가 방법	20
1. 연차별 연구 목표 및 내용	20
2. 연차별 정량적 성과목표 및 평가방법	21
3. 연구개발 추진전략 및 방법	24
제 3절. 연차별 개발 내용 및 개발 범위	25
1. 이론적 배경	25
2. 1차년도	44
3. 2차년도	81

제 3장. 최종 연구 성과 및 적용실적

1절. 주요 연구 성과	185
1. 주요연구 성과	185
2절. 주요 연구별 핵심성과 실적	186

제 4장. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1절. 연차별 연구개발 목표달성도	189
1. 연구개발 추진체계	189
2. 연차별 목표달성도	189
2절. 기대성과 및 파급효과	190
1. SWOT분석	190
2. 기술의 확산	191
3. 경제적 효과	191

제 5장. 연구개발결과의 활용 및 추가연구의 필요성

제 1절. 연구결과의 활용방안	192
제 2절. 관련 산업과의 연계·협력 및 추가연구의 필요성 ..	192
1. 새로운 분야가 접목 된 연구 실행	192
2. 국가 상위계획과의 부합성	193
3. 기존산업의 고부가가치화	193

제 6장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 국제규격기준(2009 International Building Code)에 맞는 헬리컬 파 일의 시공	194
2. Magnum 사 helical pile products	195
3. 국외사례를 통한 helical pile의 제원규정	195

제 7장. 참고문헌	201
-------------------------	-----

제 1장. 서론

제 1절. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 개요

본 연구는 helical pile이 지반에 설치된 구조체로서 공학적 요구조건(압축, 휨성, 좌굴)을 만족하면서 지반조건별 지지력을 극대화 시킬 수 있는 helical pile 시공법을 개발하기 위하여 helical pile에 지지력 확인 장치를 내장하여 설계 및 시공 중 간단히 지지력 평가를 가능하게 하는 것에 목적이 있다. 또한 이를 통하여 설계단계에서 helical pile의 실제 지지력을 미리 예측함으로써 경제적 시공을 가능하게 하고자 한다.

helical pile이란 사각 또는 원형으로 되는 중심축 선단으로부터 상부로 한 개 또는 복수의 나선형 원판이 일정한 간격으로 용접 부착된 말뚝이다. helical pile은 건설장비에 부착된 유압모터에 의하여 지반으로 회전관입 되도록 하는 추진체인 나선형 원판에서 하중 재하시 발현되는 선단지지력과 시공 후 압축 및 인발시 나선형 원판 사이에 있는 인접 지반에서 발현되는 주변마찰력으로 지지력을 발현하게 한다.

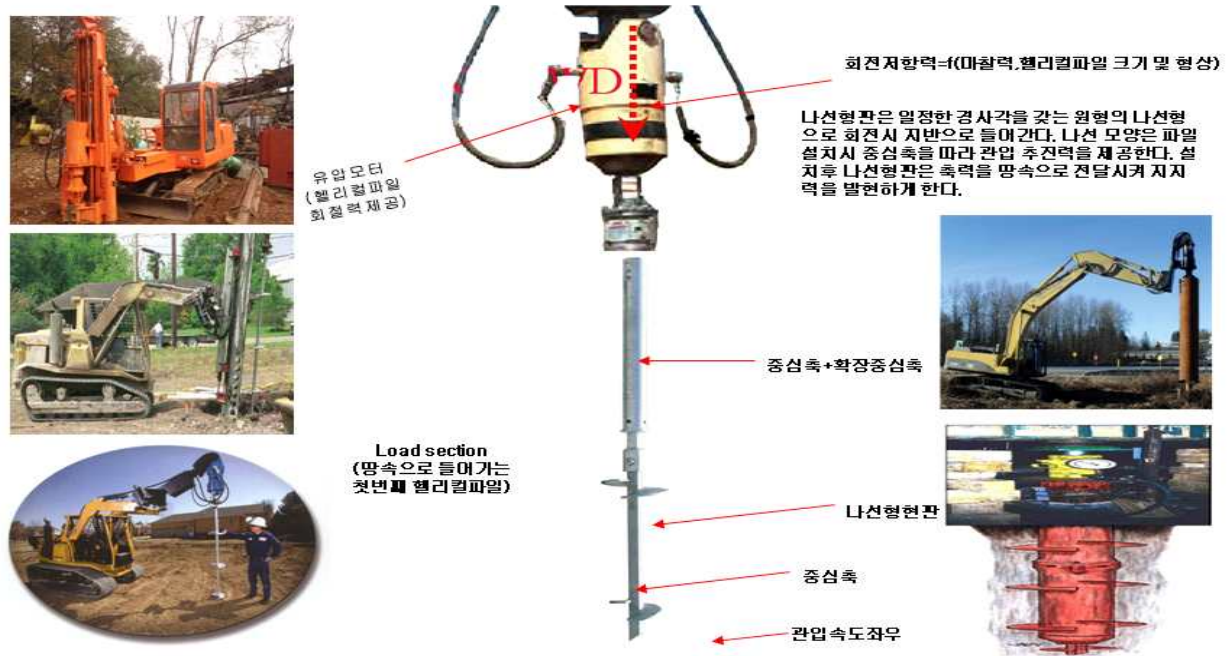


헬리컬 파일 시공 장비



다양한 형태의 헬리컬파일

helical pile은 건설장비에 부착된 유압모터의 회전력에 의해서 지반에 관입 되며, 각 주요 구성요소 및 역할은 다음과 같다.



helical pile 시공 시스템 구성도

나선형 원판(Helix Plate)은 일정한 경사각을 갖는 나선형 판으로 회전 시 중심축을 지반으로 관입 시킬 수 있는 추진체 역할을 하며 하중 재하 시 각각의 나선형 원판은 다수의 선단지지력을 유발 한다. 선단지지력 발현단면(Load Section)은 나선형 원판과 결합된 축의 최하단면으로 helical pile이 땅속으로 관입될 때 지지력을 발현하게 하는 단면이다. 파일 관입기(Torque motor)는 높은 토크를 갖는 유압모터를 사용하여 helical pile을 계획 심도까지 시공 시 사용되는 관입기이다. helical pile의 장점은 표 1.1.1.1에 제시되어 있다.

표 1.1.1.1 helical pile의 주요 장점

항 목	기 준
• 빠르고 간단한 일괄시공	• 5분~1시간/本
• 설치완료 후 즉시 재하 가능	• 설치 시 지반교란 적음
• 경제적 시공비	• 마이크로파일보다 적음
• helical pile시공과정에서 지지력 확인 가능	• 심도-굴진속도-토크를 연속 측정가능
• 다양한 구물물의 기초로 활용범위가 매우 큼	• 풍력 및 태양광발전, 통신탑, 고속도로 광고 및 교통정보 탑 등
• 어떠한 기상조건에서도 시공가능	• 공장제품으로 회전 장비만 있으면 시공 가능
• 시공 장비가 소형이므로 협소한 장소나 연약지반에서도 시공 가능	• 통상 시추장비, 백호를 이용
• 소음 및 진동이 없음	• 시공 장비의 엔진소음만 존재
• 콘크리트를 전혀 사용하지 않음	• 항타말뚝을 제외하고는 유일한 공법

• 말뚝의 제거가 가능	• 역회전
• 지반교란이 적기 때문에 지지력이 큼	• 비배토 파일
• 천공 및 그라우팅 주입 공정 등이 없음	• 공사비가 저렴한 사유
• 숙련된 기술이 필요치 않음	• 작업공정이 단순

helical pile은 소음 및 진동이 적으면서 천공 및 그라우팅 공정이 없는 유일한 공법임에도 불구하고 helical pile의 거동 및 발현된 지지력에 대한 이해 부족으로 인하여 50ton 미만의 비교적 낮은 설계지지력을 요구하는 구조물에 주로 적용하며 아직 국내에서는 사용실적이 많지 않은 공법이다.

국내에서 주로 시공되는 설계 하중별 말뚝 시공법은 표 1.1.1.2와 같다.

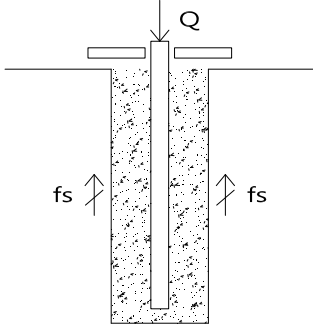
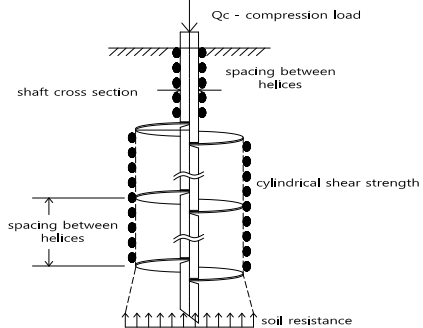
표 1.1.1.2 설계하중 별 말뚝시공법

시공법	설계하중 (ton)	사용재료	시 공 법	문 제 점
마이크로 파일	< 30~50	steel bar	• 천공 → 강봉삽입 → 그라우팅	• 설계하중이 적음
항타 말뚝	50~100	PHC,강관	• 항타 • 천공 → 파일삽입 → 밀크주입 → 경타	• 소음, 진동발생 • 항타, 천공을 병행시행 시 공사비 상승
매입 말뚝	100~300	철근망,H형강	• 굴착 → 시멘트풀 주입 → 철근망 또는 보강재 삽입	• 선단지지력 불량에 의한 직경 대비 지지력 저조
현장타설 말뚝	300 <	철근망, 콘크리트	• RCD, PRD천공 → 철근망 또는 H 형강삽입 → 콘크 리트 타설	• 대형장비 투입 • 고가의 공사비

국내에서 사용되는 helical pile은 통상 설계하중이 50ton 미만인 경우에 적용되고 있으며, 이는 마이크로파일의 설계하중 영역에 속한다. 따라서 helical pile과 마이크로파일의 공법특성을 비교분석함으로써 helical pile의 특성을 명확히 하고자 한다. 표 1.1.1.3은 마이크로파일과 helical pile의 특성을 비교 분석한 표이다.

표 1.1.1.3 helical pile 과 마이크로파일의 특성 분석

구 분	마 이 크 로 파 일	helical pile
공 법 개 요	• 소구경 천공 실시 • 마이크로파일 설치(steel bar) • 시멘트 paste 주입	• 유압 모터의 토크 힘으로 파일 회전 삽입

지지력 발현 메커니즘	설계하중의 대부분을 주변마찰력이 지지 	설계하중의 대부분을 나선형 원판 수량 만큼의 선단지지력과 주변마찰력에 의하여 지지 
장 점	- 소형의 굴착장비를 이용하므로 협소한 장소에서 시공가능 - 시공사례가 많음	- 천공 및 그라우팅공정 없음 - 소형의 시공 장비로 파일 설치 가능 - 동일 가격대비 마이크로파일 보다 큰 지지력 발현 - 경사 시공가능
단 점	- 설계하중이 적음 - 설계하중이 적어, 적용현장이 제한됨 - 호박돌이나 전석층에는 시공 불가능	- 설계하중이 적음 - 국내 시공사례 빈약 - 체계화된 국내 설계 및 시공시방 부재 - 지지력발현의 정확한 메커니즘 이해 부족
공 사 비	100%	70%
공 기	100%	25%

상기의 표 1.1.1.3과 같이 항타 공법을 제외한 대부분의 말뚝시공은 천공 및 밀크 주입이 필수적인 반면, helical pile은 파일은 회전시켜 관입하므로 천공이 불필요하고 소음 및 진동 없이 말뚝을 고속으로 시공할 수 있는 공법이며, 마이크로 파일에 대해 가격 경쟁력을 가지고 있는 공법으로 평가되고 있다. 이와 같은 많은 장점으로 인해 미국 및 유럽에서는 다양한 형태의 helical pile이 사용되고 있으나 국내에서는 보급이 극히 저조한 실정이다. 이와 같은 문제의 원인은 표 1.1.1.4에 나타냈다.

표 1.1.1.4 helical pile관련 문제점 현황 분석

구 분	문 제 점
기술적 측면	- 비교적 작은 설계 지지력 - helical pile의 구조적 취약성(뒤틀림, 좌굴)

	• 나선형 원판 회전 시 밀도가 낮은 지표면 흙을 지반 속으로 평균 1~2m(연구자료 인용) 관입시킴으로써 지표면 천공홀 발생에 따른 수평력의 저하
사회적 측면	• helical pile의 거동특성 및 지지력발현 메커니즘의 이해 부족 • helical pile의 설계 및 시공 등에 관한 국내 지침서의 부재 • helical pile의 국내 연구 사례 취약

앞에서 언급한 바와 같이 helical pile은 시공성 및 경제성, 친환경성(소음 및 진동 억제) 등을 동시에 갖는 우수한 공법으로 미국 및 유럽 등에서는 다양한 적용사례를 갖고 있는 말뚝 기초 공법이다. 따라서 국내에서도 helical pile의 급속한 보급이 예상된다. 다양한 적용 형태 별 helical pile의 적용사례는 아래 그림 1.1.1.1에 나타냈다.



그림 1.1.1.1 helical pile의 적용사례

통상 말뚝 설계는 시공이 예정된 지반의 지반조사를 통하여 지반강도를 측정 후 정역학적 지지력공식에 지반정수를 대입하여 향후 시공될 말뚝의 지지력을 예측하며, 계산된 지지력의 크기에 따라 총 시공될 말뚝의 심도 및 수량을 결정한다. 즉, 지지력 예측의 정확도에 따라 말뚝시공비가 크게 좌우되게 된다. 그러나, 재하시험(그림 1.1.1.2.)을 통해 확인되는 지지력은 설계 시 계산된 지지력과는 상당한 차이를 보이며 일반적으로 과다 시공되고 있는 실정이다.

신규건물의 기초



기초보강(기존건물)



신재생에너지 태양광발전



교량기초



그림 1.1.1.2. 말뚝 정재하 시험

이와 같이 설계 시 계산된 지지력과 시공과정 중 재하시험을 통해 확인한 지지력이 큰 차이를 보이는 것은, 지반 조사 시 채취된 시료의 교란 및 응력 해방 등의 영향과 지반의 지지력 거동을 정확히 표현하지 못하는 정역학적 지지력 공식을 적용하기 때문이다. 현실적으로 정확한 지지력 예측은 불가능한 실정이므로 설계단계에서 재하시험을 통해 지지력을 측정 후 이를 설계에 반영해야 하지만, 설계단계에서 말뚝의 시공과 병행하여 그림 1.1.1.2와 같은 방법으로 재하시험을 하는 것은 경제성, 시공성, 설계 일정 등의 이유로 사실상 불가능하다. 현재 실무적으로는 설계자가 부정확한 지지력 예측문제를 과도한 안전율을 적용함으로써 해결하고 있으며, 필연적으로 말뚝은 과다 설계되어 국가적으로 과도한 기초 공사비를 지출하고 있다. 따라서 경제적인 시공을 위한 말뚝시공법 개선을 위해서는, 말뚝시공

법 개선보다 근본적으로 말뚝설계단계에서 비교적 손쉽고 합리적인 방법으로 재하시험을 수행하여 그 결과를 설계에 반영하여 지지력예측의 정확성을 향상시켜야한다. 통상 말뚝 설계 및 시공과정은 그림 1.1.1.3.에 나타냈다.

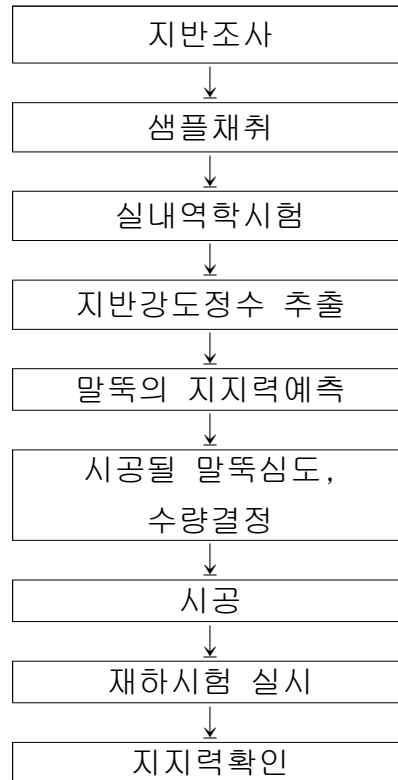


그림 1.1.1.3. 말뚝설계 및 시공과정

따라서 본 연구에서는 helical pile 설계를 위하여 표준화된 helical pile 내 재하 장치를 장착하여 helical pile 관입 후 즉시 지상반력 시스템 없이 지지력 확인을 가능 하게 하여 정확한 지지력 예측에 따른 경제적 설계를 도모하고자 한다. 지지력 측정결과 지지력 부족이 예상될 경우, 부족한 지지력을 효율적으로 증가시킬 수 있도록 지반보강 및 재하시험장치가 장착된 helical pile의 제작 및 시공법 개선을 위한 기술개발을 목표로 하였다.

일반적으로 helical pile은 파일을 지반으로 회전 삽입시킬 수 있는 유압 모터만 있으면 어디서나 연직 및 경사시공이 가능하므로, 적용성이 매우 탁월하다고 평가된다. 또한 helical pile은 시공이 간편하므로 미국 및 유럽에서는 설계하중이 100ton미만인 토목, 건축구조물의 신축 및 증축 등에 기초파일로써 많이 사용되고 있으며, 기 시공된 구조물의 기초보강등에 많이 사용하는 기성파일의 일종이다. 그러나, 경제성 및 적용의 범용성을 확보하기 위한 설계 가능 하중은 50ton 미만이므로 그 적용에 한계를 가지고 있어, helical pile의 지지력 향상에 의한 말뚝의 안정성 증대와 적용 가능한 대상 지반 확대가 요구되고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 그라우팅재를 별도로 주입시켜 설계지지력을 70~100ton까지 적용할 수 있게 하여 기성말뚝(PHC 또는 강관말뚝)을 대체하는 helical pile의 적용분야를 확대하고자 한다. 또한 지반조건 별 helical pile의 거동특성을 면밀히 분석하여 최적의 helical pile의 구조적 특성에 관한 연구를 수행하였다. 시공된 helical pile의 지지력은 그림

1.1.1.4와 같이 발현된다.

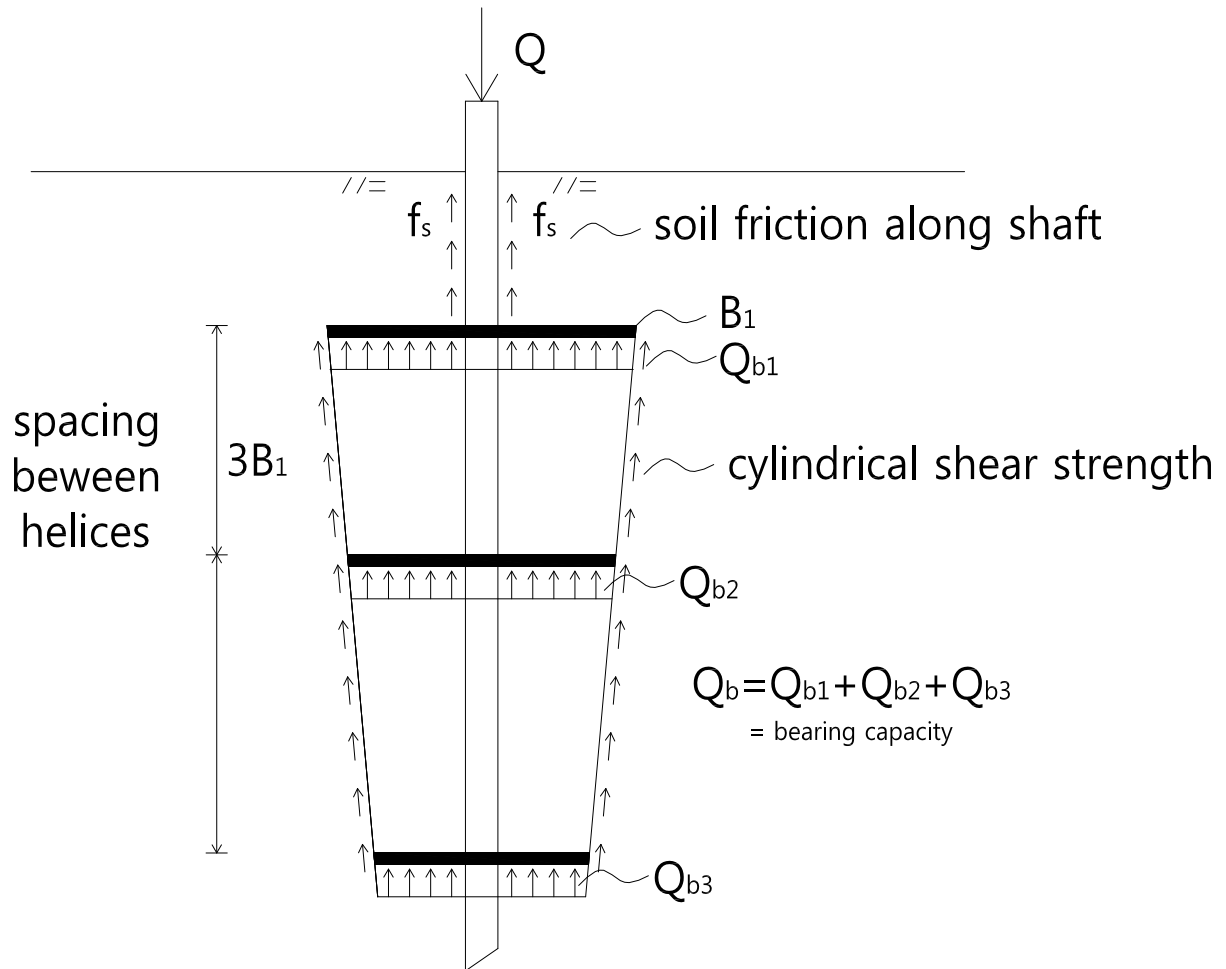


그림 1.1.1.4. helical pile의 지지력 발현 메커니즘

총 지지력 Q_c 는 다음과 같다.

$$Q_c = Q_{\text{helix}} + Q_{\text{bearing}} + Q_{\text{shaft}}$$

$$Q_{\text{helix}} = \frac{1}{2} \times Da \times \pi \times \gamma (H_3^2 - H_1^2) K_s \tan \Phi$$

여기서

Da = 나선형 원판의 평균 직경

H_1 = 지표면으로부터 최상부 나선형 원판까지 깊이

H_2 = 지표면으로부터 최하부 나선형 원판까지 깊이

K_s = 수동토압계수

$$Q_{\text{bearing}} = A(CN_c + q' N_q)$$

여기서

A = 나선형 원판의 면적

N_c, N_q = 지지력 계수

q' = 흙의 수중단위중량 $\times$ 나선형 원판까지 깊이

$$Q = \frac{1}{2} \times P_s \times H_{eff}^2 \times \gamma \times K_s \times \tan \Phi$$

여기서

P_s = helical pile의 축의 주면장, $\pi \times D_1$ (D_1 = helical pile 축의 직경)

H_{eff} = 파일의 유효길이

각 나선형 원판은 최소 원판 직경(D)의 3D이상의 간격으로 배치되며, helical pile 두부에 하중 재하가 이루어지면 땅속에 근입된 나선형 원판(helix plat)이 지지판(bearing plate) 역할을 하여 각각의 원판은 그림 1.1.1.5 와 같은 응력분포를 보인다.

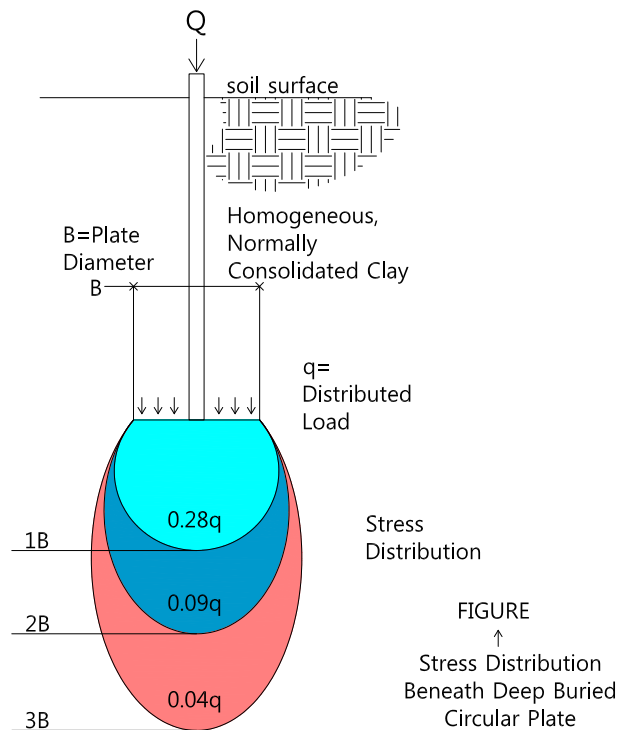


그림 1.1.1.5. 나선형 원판에 작용하는 응력분포

복수의 나선형 원판을 설치하는 경우의 지지력 발현 메커니즘은 그림 1.1.1.6과 같다.

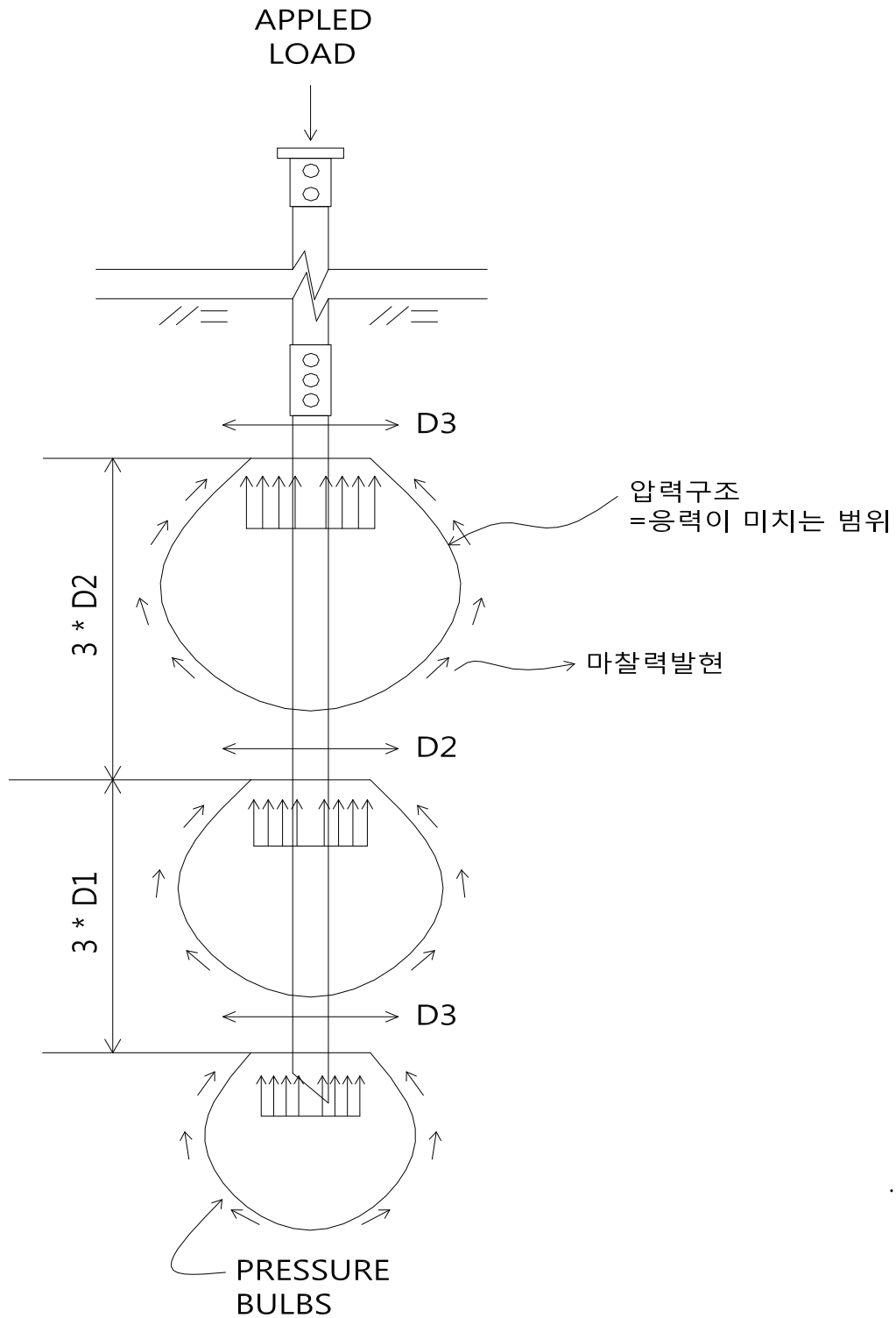


그림 1.1.1.6. 하중 작용 시 선단지지력 및 주면마찰력 분포 현황도

본 연구에서는 나선형 원판의 하부 지반 내 응력이 미치는 영향반경 범위를 압력 그라우팅 하여 지지력 향상을 도모하고자 한다. 압력구근(pressure bulb) 내부 및 인접지반의 강도를 증가시키기 위하여 그라우팅재를 고압으로 분사할 예정이다. 각 나선형 원판하부에 적용하는 그라우팅공법은 그림 1.1.1.7과 같다.

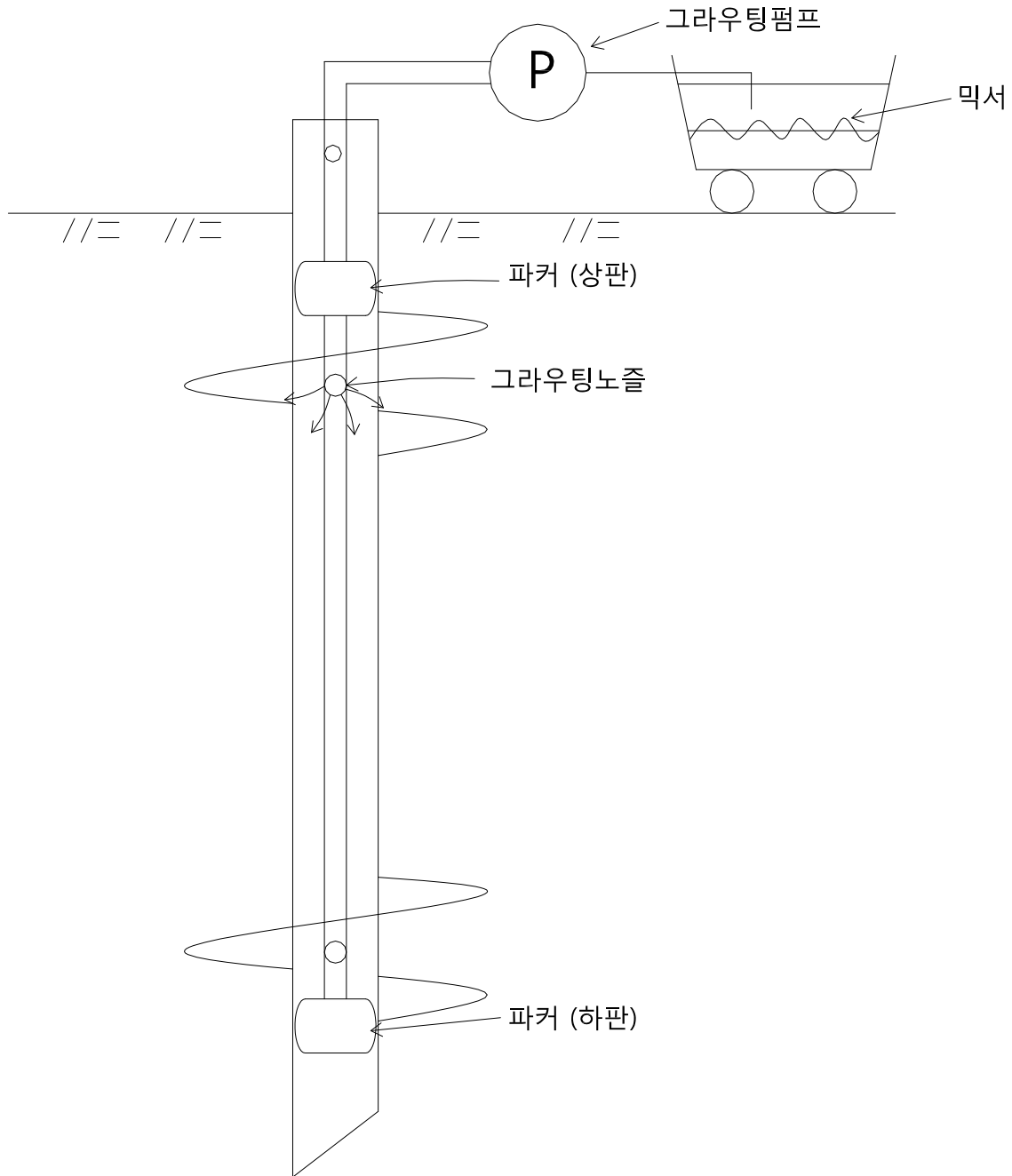


그림 1.1.1.7. helical pile내 나선형 원판하부 지반보강 방법

각 나선형 원판 하부 지반에 원판 직경의 3D까지 고압 그라우팅을 실시하면 앞에서 제시한 지지력공식에서 $Q_{bearing}$, Q_{helix} 의 항이 크게 증가할 것으로 기대된다.

시공의 간편성 및 경제성으로 인하여 다양한 형태를 갖는 helical pile이 토목 및 건축, 신재생에너지 분야 등에서 다양한 목적으로 사용되고 있으나, 아직 국내에서는 helical pile의 기본적 거동에 대한 기초적인 연구도 이루어지지 않은 실정이다. 국내 현장에서는 경제성의 이유로 마이크로파일을 helical pile로 대체하는 정도이며, 이 또한 설계 및 시공, 품질 관리 등에 대한 어떠한 시방도 준비되지 않은 채 시공되고 있으므로, 기존의 말뚝 시공법의 보급 과정과 같이 필연적인 부설 및 과다 시공이 예상된다. helical pile은 다양한 장점을 가지는 기초공법으로써 향후 급속한 보급이 예상되므로 이에 대한 기초적인 연구가 이루어져야 하

며, 필히 설계 및 시공·관리 등에 대한 시방 및 설계지침 등이 보급에 앞서서 정립되어야 한다. 본 연구에서는 helical pile의 지지력을 극대화시켜 기성말뚝을 helical pile로 대체하여 파일 시공비를 절감시키는 효과를 거두고자 하며, 이를 위해서는 helical pile이 구조물 기초 하부구조체로서 충분한 역할을 하기 위한 공학적 특성 평가가 선행되어야 한다.

2. 연구개발 중요성

가. 사회적 측면

토목 및 건축물의 대형화와 말뚝 시공 시에는 소음 및 진동발생으로 민원발생에 따른 공사 장애가 초래 될 수 있다. 더욱이 다양한 시공환경 변화에 따른 대형 파일을 위한 시공 장비의 진입 불가능한 현상이 속출하고 있기 때문에 이를 위한 시공 장비의 경량화가 요구 되는 실정이다. 더불어 풍력발전기의 기초, 태양광발전기 하부기초, 철탐기초, 이동통신장비 거치탑, 광고판 기초, 고속도로 교통정보 전광판기초, 파이프라인 기초와 같은 소형말뚝이 필요한 다양한 구조물 등이 존재하므로 지속적으로 요구되는 경제성이 담보된 말뚝시공법이 요구되고 있다.

나. 기술적 측면

helical pile 에 관한 기초적인 연구가 요구된다. 따라서 지반에 따른 helical pile 의 거동특성 확인이 필요하며 helical pile의 지지력의 향상, 설계, 시공, 품질관리 등에 대한 일괄기술을 개발하여 경제성 및 고품질 확보가 요구된다. 더불어 설계 및 시공에 대한 시방서가 수립되어야 한다. 이를 통해 helical pile이 갖는 간편성, 시공의 편의성 등의 장점을 최대 활용하여 지지력 증가를 통해 helical pile의 적용 범위 확대를 기대할 수 있으며 지반조건별 경제성 및 기능성을 갖는 최적의 helical pile설계를 통해 시공비 절감 또한 유도할 수 있다.

다. 경제적 측면

helical pile의 지지력을 극대화 시키는 경우 마이크로파일 및 기성말뚝($\Phi < 500$)의 대체 말뚝으로 사용 가능하여 공사비가 최소 30% 이상 절감될 것으로 기대된다.

제 2절. 국내외 기술개발 현황

1. 국내외 관련 기술 및 산업 동향

가. 국내 기술 및 산업 동향

지금까지의 helical pile 관련 연구로는 모래와 풍화토에서 나선형 강관파일의 지지력에 관한 실험적 연구(대한건축학회논문집), 연약점토내의 helical 앵커의 인발 특성(충북대학교 대학원 석사학위 논문), 나선형 강관파일의 날개 유효면적산정을 위한 지지력 시험(대한건축학회 춘계논문집, 2009) 등이 있으나 국내 helical pile과 관련한 체계적인 연구는 전무한 것으로 나타났다.

현재의 기술 수준은 아직 초보적 기술단계로 helical pile의 거동특성 등에 관한 기초연구도 수행되지 못한 실정이며 helical pile의 설계 및 시공 기준이 정립되지 않았고, 지반 조건별 helical pile 에서 발견되는 지지력 현상이 정확히 파악되지 않고 있다. 또한 국내 현장제작말뚝을 시공하기 위한 면허는, 보링 및 그라우팅 면허로 2009년 통계청자료에 따르면 총 매출규모가 1조 700억원으로 제시되었다. 이 중 현장타설말뚝 및 매입말뚝시장 규모는 분류되지 않아 제시가 불가능하지만 2000년대 들어 말뚝시장이 기성말뚝시장에서 현장제작말뚝시장이 급속히 증가되고 있는 실정이다.

표 1.2.1.1 국내 말뚝 관련 특허 동향

특허명	등록·출원번호	관계유무
비대칭 회전날개를 구비한 강관파일	10-2008-0134677	X
공개주입 및 그라우팅검용 내부관을 가지는 강관파일 및 PHC파일	10-2008-0126613	X
스크류파일 제조장치	10-2010-0031002	X
직천공 그라우팅용 나선형 강관파일을 이용한 구조물보강방법	10-0894988	O

현재 말뚝과 관련된 특허는 대부분 helical pile과 관계없는 특허이며, helical pile과 관련성이 있는 특허도 본 연구에서 개발하려는 helical pile과는 다음과 같은 차이점이 존재한다.

- 상기특허는 helical pile에 그라우팅을 하지만 그라우팅을 통해서 기존건물을 인상하는데 사용되는 파일이다.
- 특허 청구사항에는 그라우팅을 하는 방법과 장치에 대한 기술적 언급이 전혀 없다.
- 본 연구의 기술개발은 재하시험장치가 포함된 helical pile이며, 시험결과를 통해서 지반보강을 실시하는 구체적인 장치의 개발 및 지반보강의 방법을 결정하기 위한 장치 및 방법을 개발하고자 하는 연구이다.

표 1.2.1.2 국내전문가 및 연구기관 현황

항 목	전 문 가	소속 기관	기술개발 현황	수 준 (국외대비)
구근의 확공 해석	최항석	고려대학교	○ 구근형성시 주변지반의 능력-변위해석	90%
	임종철	부산대학교	○ JSP로 지반개량한 앵커공법	90%
유압장비 제조및설계	정영호	부철중공업	○ RCD, SCW, SIP 및 각종 굴착 장비 제조및 설계	70%
	이종일	R&S	○ 유압회로설계	70%
지반변형 해석	이승래	KAIST	○ 지반변위해석	90%
	김홍택	홍익대학교	○ 지반변위해석	90%
helical pile시공	이광신	반석기초이엔씨	○ 공법개발 및 시공 자문	50%
	전왕구	중앙개발	○ 공법개발 및 시공 자문 및 평가	50%

표 1.2.1.3 국내 주요 관련 업체

업 체 명	업 체 별 능 력	비 고
(주)삼보지질	○ 지하연속벽, 현장타설말뚝, 매입말뚝 ○ 공법시공 전문업체 ○ www.sambotf.co.kr	중견기업
동아지질	○ 지하연속벽, 대구경현타말뚝, DCM, 세미실드공법 시공전문업체 ○ www.dage.co.kr	중견기업
중앙개발	○ 토공, 상하수도, 보링그라우팅사업 전문기업 ○ 대구경현타말뚝시공 (R.C.D, BG) ○ 흙막이 차수 (SCW,SIP, 슬러리월) ○ 기초처리 (RJP, SIP, JSP) ○ www.joong-ang.co.kr	중소기업
특수건설	○ 프론트잭킹 공법, 지중연속벽, 교량 및 건물 기초 (R.C.D, P.R.D, L.W, JSP, BG공법) ○ 실드터널 (세미실드포함) www.tuksu.co.kr	중소기업
반석기초 이 엔 씨	○ 팽이기초 ○ 마이크로파일, 로터리파일시공 ○ www.bs-base.co.kr	중소기업
범양이엔씨	○ 지하연속벽(CIP, JSP, SCW) ○ 파일기초(R.C.D,P.R.D,P.H.C) ○ 지보공(스트리스, Earth Anchor, 소일네일링 PPS공법, 탐다운공법) ○ www.pumyangenc.co.kr	중소기업

표 1.2.1.4 국내 연구 인프라 수준

기술분야	인프라항목	선진국대비 인프라 수준				
		부족	다소부 족	동등	우월	보다우월
지지력확인시스템 이 장착된 맞춤형 지반보강형 helical pile 설계 및 시공법 개발	○ 연구시설 및 설비	◎				
	○ 기초인력		◎			
	○ 산업기술인력			◎		
	○ 정보화		◎			
	○ 표준화기반	◎				
	○ 기술이전 및 거래	◎				
	○ 국제기술협력기반	◎				

나. 국외 기술 및 산업 동향

연구개발하려는 helical pile 관련 기술의 세계적 수준은 현재 기술발전주기(Technology Life Cycle) 중 기업화 단계에 해당한다. 미국 및 유럽등지에서는 Design of helical piles for heavily loaded structures(Pack, J S, 2000), Numerical modelling of time dependent pore pressure response induced by helical pile installation(Vyazmensky, Alexander M, 2004)와 같은 helical pile 관련 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다양한 형태의 helical pile을 제작하여 다양한 현장에 적용하고 있다. 특히, 설계하중이 적은 경우 helical pile을 적극적으로 사용하고 있으며 국내 기술과 비교하여 비교적 다양한 형태의 helical pile이 개발되고 있고 설계 및 시공 메뉴얼도 정착되어 있다. 신재생에너지 시설물의 기초파일에 많이 적용되고 있으며 주요 업체 다수가 세계시장을 선도하고 있다.

제 2장. 연구개발수행 내용 및 결과

제 1절. 최종목표 및 목표별 접근 방법

1. 최종목표

가. 연구개발 최종목표

모든 말뚝기초의 설계는 지반조사에 의하여 해당되는 이론적 또는 경험적 공식에 따라 지지력 및 변위 등이 예측된다. 그러나 장기간의 계측을 통해 확인된 지지력은 설계 시 예측된 지지력과 상당한 차이를 보이고 있는 실정이다. 현재 미국 및 유럽 등에서 건축구조물의 기초공법으로 많이 채택되고는 있는 helical pile은 향후 국내에 많이 보급될 것으로 예상되나, 아직은 국내는 helical pile의 연직 및 수평거동에 대한 충분한 연구가 되고 있지 않다. 본 연구의 최종목표 및 성과물의 범위는 아래와 같이 요약된다.

(1) 지지력 특성별 최적의 helical pile 구조체 연구

- 건물 기초구조체로서 helical pile이 갖추어야 할 공학적 특성에 부합하는 helical pile의 설계.
- 목표 지지력의 크기에 따른 최적의 helical pile의 형상 제시(경제성 및 시공성 확보)
- 지반조건 별 목표 지지력 도달을 위한 유압모터의 모멘트 크기 제시.
- 지반조건 별 목표 지지력 확보에 필요한 helical pile 파일 중심축의 허용뒤틀림 저항모멘트 확인에 따른 경제성이 보장된 helical pile 제시.
- 지지력의 크기 별 나선형 원판의 크기 및 두께 제시.
- 시공 중 지반교란을 극소화 시킬 수 있는 나선형 원판의 설계.
- 강재 사용량을 억제하기 위해 작은 직경의 중심축 사용에 따른 좌굴방지를 위한 helical pile 설계범위 제시.

2) 지반 조건 및 설계지지력의 크기에 따른 helical pile의 거동특성 연구

- 사전 수치해석 및 시험시공을 통해 확인된 helical pile의 거동특성(침하 및 지지력의 크기)을 분석하여 최적의 helical pile 설계.
- 지반 조건 및 지지력의 크기에 따른 나선형원판의 크기 및 설치 수량, 위치를 결정.
- helical pile 시공 시 발생하는 지표면 및 나선형원판 상단부 공동의 크기 및 발생 메커니즘을 규명하여 대책방법 개발.

(3) 지지력 확인 시스템이 내장된 표준규격 helical pile의 개발

- 시공 대상지반에서 설계를 위해 지반조사 단계에서 재하 장치가 내장된 표준 규격 helical pile을 시추장비를 이용해 계획 심도까지 시공 후 양방향재하시험(지상에 반력 장치가 없음)을 실시함.
- 따라서 설계단계에서 재하시험(연직, 인발)을 실시 한 자료를 이용하기 때문에 최적의 파일 설계가 가능하고, 이에 따른 과도한 안전율 사용을 억제하여 공사비를 줄일 수 있음.

(4) 지반보강장치를 갖는 helical pile 시공법 개발

- 나선형 원판이 거치될 지반(풍화토 또는 풍화암)의 심도가 깊을 때 시공비 상승이 우려됨.
- 따라서 $N \leq 50$ 의 지층을 선단 고정 층으로 할 수 있도록 나선형 원판이 거치된 하부지반을 지반 개량을 통해 목표지지력에 도달 되도록 지반보강 장치 및 운영방법을 제시.

(5) 원활한 helical pile 시공을 위한 유압장비의 개발

- 지지층의 출현심도가 깊을 경우 시공 장비의 시공능력이 중요.
- 따라서 지지력과 토크와의 상관관계를 측정하여 목표지지력별 시공 장비의 최대출력 토크 제시.
- helical pile 현장운영시스템(심도-토크, 경사도, 위치)을 개발하여 시공되는 모든 말뚝에 대해 전수관리 시스템 개발.

(6) 설계 및 시공 관리 등에 관한 시방서 제시

- Helical pile 설계 및 시공을 위한 기본조건 제시.
- 설계 지침 제시.
- 지반조건별 helical pile 거동 특성 제시.
- 시공 관리 및 시공 완료 후 관리 시스템 제시.

2. 연구목표 도달을 위한 접근방법

본 연구개발의 주요목적을 달성하기 위하여 1차년도에서는 문헌조사 등을 통해 helical pile의 거동특성을 파악하였고, 예비 시험시공으로 이를 확인하였다. 1차년도에는 2차년도 연구의 원활한 진행을 위한 연구기반을 마련하였다고 할 수 있으며, 1차년도에 수집한 연구자료와 경험을 바탕으로 2차년도에는 다양한 조건에서 현장시험을 실시하였다. 최종적으로 최적화 설계가 가능한 재하장치가 내장된 설계용 helical pile을 개발하여 최적화 설계를 가능하도록 하였으며, 필요시 지반보강이 가능한 helical pile 시공법을 개발 하였다. 연구목적 달성을 위한 연구 접근방법을 요약하면 다음 표와 같다.

표 2.1.1.1 수행절차 및 각 단계별 접근방법

구 분	내 용	
최종목표 설정	Helical pile 내부에 장착된 재하 장치를 통해 재하시험을 실시하여 최적의 helical pile 설계를 가능하도록 하고, 이로부터 공사비의 절감을 도모할 수 있게 한다. 현장 시험시공을 통해 helical pile의 거동특성을 분석하여 파일 설계 및 시공관리 지침을 제공한다. 또한 필요시 helical pile 내부에 지반보강장치를 두어 helix plate 하부를 보강함으로써 지지력을 증대시키고 시공심도를 줄여 공사비를 절감 할 수 있도록 한다.	
	연구목표	접근방법
1차년도	Helical pile의 구조체 연구	- 문헌조사 및 1차 시험시공 - 거동 특성 이해 - 1차 시험시공을 통해 2차년도 연구과제 세부수행전략 수립
2차년도	지반조건별 지지력의 크기에 따른 helical pile 거동 특성 분석	- 1차시험 시공결과를 바탕으로 2차 시험시공 실시 - 재하시험 및 수치해석(이론식 포함) - 지반조사(공내재하시험 포함)
	지지력 확인 시스템이 내장된 표준화된 helical pile의 제작 및 성능평가	- 2차 시험시공 실시 - 정재하 시험 - 유압 Cell 및 측정 장비의 개발 - 시험시공을 통해 성능 확인
	지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능파악	- Helical pile 내 그라우팅 장비 개발 - 그라우팅 실시에 따른 지지력 개선 효과 확인
	Helical pile 시공 장비 개발	- 1차년도의 예비 현장시공을 통한 시공장비 개선 - 2차년도 현장시공으로 검증
	설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 및 시공관리 시방서 작성	- 1,2차년도의 시험결과등의 분석을 통한 Helical pile 설계법 제시 - 각종 문헌조사와 시험결과를 통한 시공관리

	지침 및 시공시방서 작성
연구내용 및 범위	• 시험시공 및 해석을 통해 helical pile의 역학적 거동 분석 • 재하 장치가 내장된 helical pile 제작에 따른 최적의 helical pile 설계 • 지반개량이 가능한 helical pile 시공법을 개발에 따른 파일 시공심도 감소로, 경제적 시공 도모 • helical pile 설계 및 시공관련 매뉴얼(시방서)작성

제 2절. 단계 목표 및 평가 방법

1. 연차별 연구 목표 및 내용

연차	연구 목표	주요 연구 내용
1차 년도	지지력특성별 helical pile 구조체 연구	• 국외의 시공시방서 및 시공 관리 지침 등 시공시방서 작성을 위한 기존의 자료 조사 • 건물기초 구조체로서 공학적 특성에 부합되는 helical pile설계 • 목표지지력크기에 따른 최적의 helical pile 형상 및 규격제시 • 지지력의 크기별 나선형 원판의 크기 및 두께 제시 • 목표지지력 도달에 필요한 파일중심축 허용 비틀림 모멘트결정 • 지반교란을 극소화 시킬 수 있는 나선형 원판 설계 • 작은 직경의 중심축으로 좌굴 억제를 위한 helical pile설계 • 목표지지력 도달을 위한 유압모터의 토크치 제시
2차 년도	지반조건 및 설계지지력크기에 따른 helical pile의 거동특성 연구	• 1차연구 결과를 활용하여 2차 시험시공을 실시하여 최적의 Helical pile 설계 • 2차 시험시공시 수직도 관리에 대하여 정밀 검토 후, 그 결과를 시방서에 반영 • 국내 지반조건에 맞는 허용 비틀림 모멘트 제시 • Helical pile의 좌굴검토(국부 좌굴 포함) • 지반조건 및 지지력의 크기에 따른 helix plate의 크기 및 설치 수량, 위치 선정 및 효과 확인 • 좌굴 억제 및 수평 지지력 증가를 위한 파일 설계 및 확인 • 시공시 발생하는 지표면 부근 지반 동공발생 대책 공법제시 • 재하시험 결과를 이용 하여 설계지지력 예측식 제시

지지력 확인시스템이 내장된 표준규격 helical pile의 제작 및 성능 평가	- 설계시 적용되는 Helical pile 설계 - 유압장치가 내장된 Helical pile의 제작 및 성능 평가 - 유사공법과의 경제성 분석
지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개 발 및 성능 평가	- 지반조건별 그라우팅 압력 및 시멘트 배합비 결정 - Helical pile내 그라우팅 장비개발 - 그라우팅 실시에 따른 지지력 개선 효과 확인 - Helical pile과 기존의 소구경 현장타설 말뚝과의 적 용 타당성 검토
helical pile 시공 장비 개발	- 지지력과 토크를 측정하여 목표지지력별 시공장비 최대 출력토크제시 - helical pile 현장 관리시스템 개발
설계 및 시공관리를 위 한 운영시스템 및 시공 관리 시방서 작성	- 모든 시험결과 등을 분석하여 helical pile 설계법 제 시 - 시공관리 지침서 작성 - 시공시방서 작성 - 말뚝 시공관리 시스템 개발

2. 연차별 정량적 성과목표 및 평가방법

가. 1차년도 성과목표 및 평가방법

1년차 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중 치
지지력 특성별 helical pile의 구조체 연구 - 건물기초의 구조체로서 공학적 특성에 부합되는 helical pile설계 - 목표 지지력 크기에 따른 최적의 helical pile 형상 및 규격 제시 - 지지력의 크기별 helix plate의 크기 및 두께 제시 - 목표 지지력 도달에 필요한 파일중심축 허용 비틀림 모멘트결정 - 지반교란을 극소화 시킬 수 있는 helix plate 설계 - 작은 직경의 Shaft으로 좌굴 억제를 위한 helical pile설계 - 목표지지력 도달을 위한 유압 모터의 토크치 제시	- 수치해석에 따른 1단계 helical pile설계 - 수치해석 결과를 적용하여 helical pile의 제작 및 재료시험 실시 1차년도 1단계 시험시공(1차확인) / 6개시공	- 지반에 설치된 helical pile의 수치해석 결과 - 재료시험 성적서 - 시험시공 결과물	10건	60%
	Helical pile 구조와 관련된 특허	특허출원	2건	40%

	출원	● 실용신안	2건	
소 계				100%

나. 2차년도 정량적 성과목표 및 평가방법

[illegible]

시공장비 최대 출력토크제시 • helical pile 현장 관리시스템 개발	• 동재하시험 가능토 록 개발 • 모든 시공된 말뚝은 심도-토크,경사도를 측정	시스템 개발		
<u>설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 및 시 공시방서 작성</u> • 모든 시험결과 등을 분석하여helical pile 설계법 제시 • 시공관리 지침서 작성 • 말뚝 시공관리 시스템 개발	• 시공 시방서 • 설계 지침서 • 현장관리운영 (소프트웨어, 하드웨어개발)	• 제품개발 • 소프트웨어 등 록	1건 1건	25%
소 계				100%

3. 연구개발 추진전략 및 방법

가. 연차별 세부 추진계획 및 접근방법

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법	해당기관
1차년도	■ 2차년도 시공시방서 작성을 위한 문헌 조사 ■ 지지력특성별 helical pile 파일 구조체 연구	■ 국외의 시공시방서 및 시공 관리 지침 등 시공시방서 작성을 위한 기존의 자료 조사	고려대학교 삼보지반
		■ 문헌 및 시공 사례 등을 분석하여 지지력별 helical pile의 규격 및 공학적 구성요소 및 수치의 결정	고려대학교 삼보지반
		■ 지반조건별 다양한 수치해석 모델의 결정	고려대학교
		■ 수치해석 결과에 따라 helical pile의 1단계 시험시공 부지 결정 및 지반조사(3회 실시)	삼보지반
		■ 지반조건을 고려한 helical pile 설계 및 투입 자재 재료시험(인장,압축,뒤틀림)을 실시	삼보지반
		■ helical pile시험 시공(2회, 6개시공예정).나선형원판의 형상 및 크기, 두께 등을 변화시켜 6개 파일을 이용 12회 시공	삼보지반
		■ 시공된 6개 파일에 대해 두부압축 정재하 12회 실시	삼보지반
		■ 시공자료 및 재하 시험결과 등을 분석하여 helical pile 구조체등 연구 1단계 결과제시	고려대학교
2차년도	■ 지반조건 및 설계 지지력크기에 따른 helical pile의 거동특성 연구	■ 1차년도 연구결과를 이용하여 지반조건 및 설계 하중의 크기 등을 고려하여 시험시공 계획 수립	고려대학교 삼보지반
		■ 시험시공 실시 - 3개의 시험시공 부지는 3개 - Helical pile 형상별 시험시공 실시 - 지반조사 = 6개소	삼보지반
		■ 정재하시험 실시	삼보지반
		■ 결과 분석	고려대학교
	■ 지지력 확인 시스템이 내장된 표준 규격 helical pile의 제작 및 성능 평가	■ helical pile 설계용 파일 규격 결정	고려대학교
		■ 유압 장치의 제작	고려대학교 삼보지반
		■ 성능확인 시험실시 -2개소 실시	삼보지반

	■ 지반 보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능 평가	■ 나선형원판 선단 그라우팅 장치개발	고려대학교
		■ 그라우팅 장비제작	고려대학교 삼보지반
		■ 시험시공 -2개소 실시 -지반조사 2개소	고려대학교 삼보지반
		■ 재하 시험 -2개소	삼보지반
	■ helical pile 시공 장비 개발	■ 국내외 시공 장비 분석	고려대학교
		■ helical pile 시공에 적합한 장비의 설계 및 제작	삼보지반
		■ 2차년도 시험시공에 투입 및 보완	삼보지반
		■ helical pile 운영 시스템 개발	고려대학교 삼보지반
	■ 설계 및 시공 관리를 위한 운영	■ 모든 시험 결과 등을 이용하여 설계 및 시공 관리 지침 제작	고려대학교 삼보지반

제 3절. 연차별 개발 내용 및 개발 범위

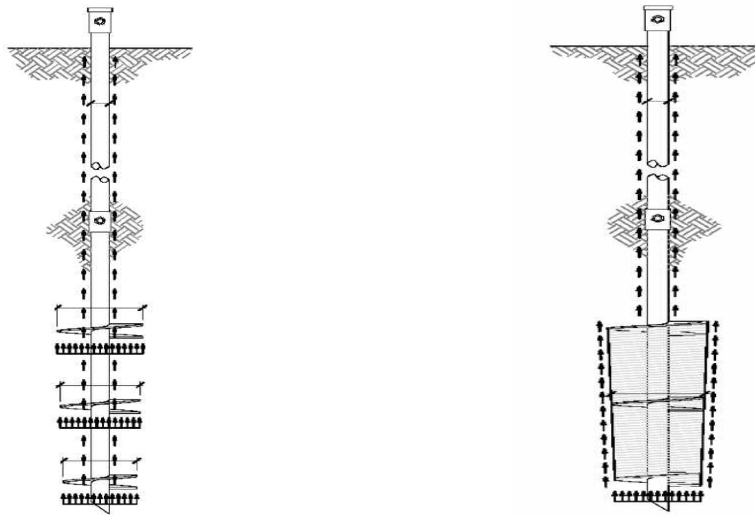
1. 이론적 배경

Helical pile은 기존의 모든 형태의 파일과는 달리 복수의 선단지지력과 그 성분으로 구분되는 주면마찰력을 갖는다. 또한, 기초의 안정성 검토에 있어서도 기존의 기초용 파일은 좌굴검토가 불필요하지만 Helical pile은 Shaft의 직경이 대략 120mm이하를 사용하기 때문에 좌굴검토가 필수적 항목이 된다. 따라서, Helical pile의 관입특성과 지지력과의 관계 및 이론적 지지력 공식을 모두 고려하여야 한다.

가. 지지력 산정의 이론적 배경

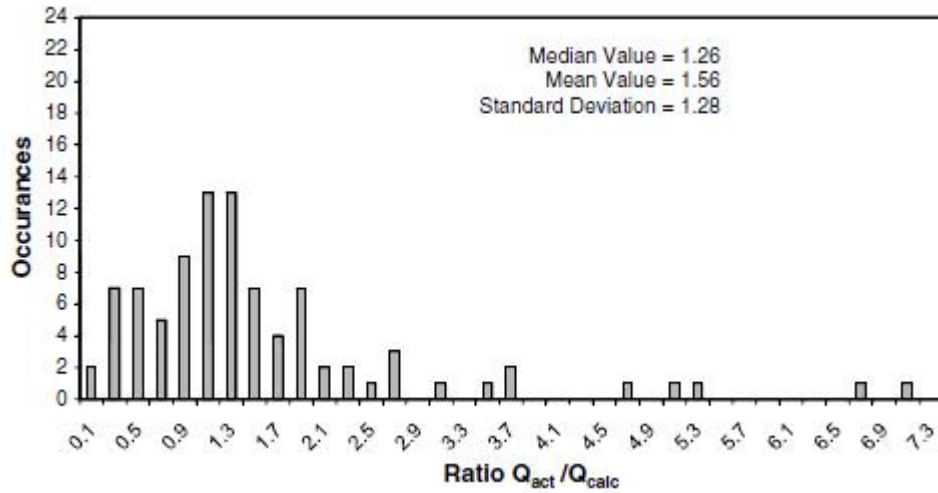
헬리컬 파일(Helical Pile)은 중공형 축에 축보다 큰 직경을 갖는 나선형 원판이 부착되어 있는 형상으로, 지지력을 발현하는데 있어 축의 주면마찰력 이외에 각기의 나선형 원판이 선단지지력을 발휘할 수 있다. 현재 헬리컬 파일의 지지력 산정법으로는 Individual bearing method, Cylindrical shear method, Torque correlation method가 널리 사용되고 있다. Individual bearing method는 축에 부착된 나선형 원판 각각이 선단지지력을 발현하여 헬리컬 파일의 지지력을 각 원판의 선단지지력과 축의 주면마찰력의 합으로 산정하는 방법이며, Terzaghi(1943)의 제안식이나 Meyerhof(1951)의 제안식을 사용하고 있다. Hansen(1970)과 Vesic(1974)은 기존의 제안식에서 사용되었던 형상 및 깊이 계수를 수정하여 측정된 지지력

과 예측한 지지력의 오차의 폭을 감소시켰으며, 현재 널리 사용되고 있다. Cylindrical shear method는 나선형 원판 사이의 지반 전체가 동일하게 저항하여, 원판 사이의 지반에 원통형으로 전단력이 발생하는 것을 가정하여 지지력을 산정하는 방법이다(Mooney et al., 1985). 따라서 Cylindrical shear method에서는 헬리컬 파일의 지지력을 최하단 원판의 선단지지력과 원통형 지반의 전단력, 그리고 원통 상부 축의 주면마찰력의 합으로 산정하고 있다.

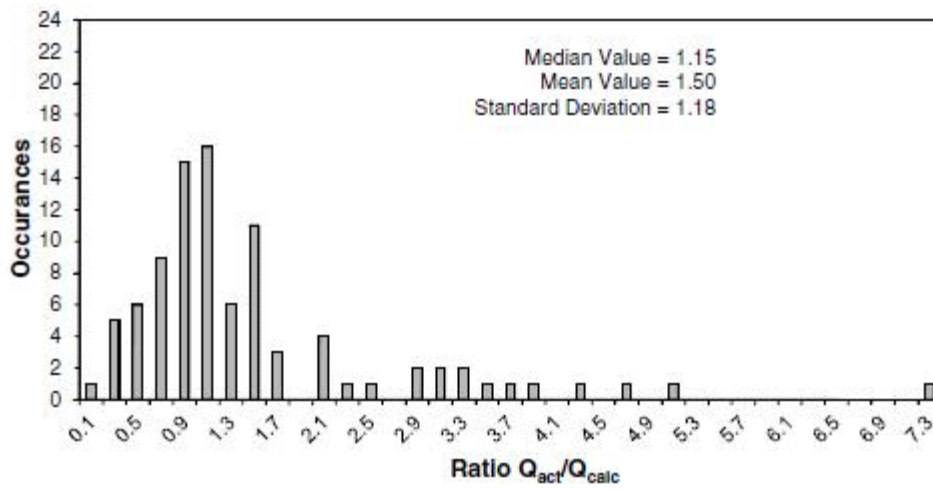


(a) Individual bearing method (b) Cylindrical shear method
그림 2.3.1.1 헬리컬 파일의 지지력 메카니즘

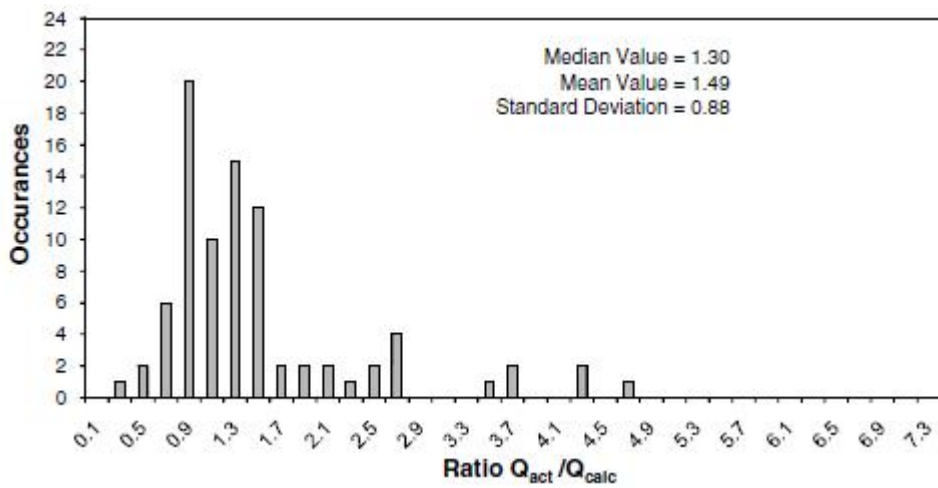
Torque correlation method는 현장에서 측정되는 토크값을 지지력 예측에 사용하는 경험적인 방법으로, Hoyt and Clemence(1989)에 의해 시공시의 최종토크와 지지력의 상관관계가 정립되었다. Hoyt and Clemence(1989)는 다양한 시공 사례를 Individual bearing method, Cylindrical shear method, Torque correlation method으로 예측한 지지력의 측정된 지지력에 대한 비율(Q_{act}/Q_{calc})을 통계적으로 분석하였다. 시공 사례 중, Individual bearing method를 적용한 경우에는 실측 지지력과 예측 지지력의 비율의 중앙값은 1.26, 평균값은 1.56, 표준편차는 1.28로 분석하였다. Cylindrical shear method를 적용한 경우는 중앙값 1.15, 평균값 1.50, 표준편차 1.18임을 보여주었으며, Torque correlation method의 경우 중앙값 1.30, 평균값 1.49, 표준편차 0.88임을 분석하였다. Hoyt and Clemence(1989)의 통계분석 결과를 그림 2.3.1.2에 나타내었으며, 지지력 예측 방법에 대한 세부사항은 식 (3.1~3.11)에 기술하였다.



(a) Individual bearing method



(b) Cylindrical shear method



(c) Torque correlation method

그림 2.3.1.2 Hoyt and Clemence(1989)의 통계분석

나. 나선모델을 적용한 헬리컬 파일 관입 형상 고찰

헬리컬 파일의 관입모델은 나사를 삽입할 때와 유사한 형상이므로, 나사의 관입모델을 분석하여 헬리컬 파일의 관입에 대하여 고찰하였다. 먼저, 밑변 $2\pi r$ 과 높이 l 인 $\triangle ABC$ 를 반경 r 의 원통에 감으면 빗변 AB 는 나선(helix)을 그린다. 이 나선을 따라 삼각형 또는 사각형 모양의 띠를 감으면 나사산(screw thread)이 생긴다. 이 때 λ 를 리드각(lead angle)이라 하고 이 각으로 원통을 1회전 할 때 축 방향으로 진행한 거리를 리드(lead) l 이라 하며, 리드각과 리드의 관계는 식 (2.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tan \lambda = \frac{l}{2\pi r} \quad \text{식 (2.1)}$$

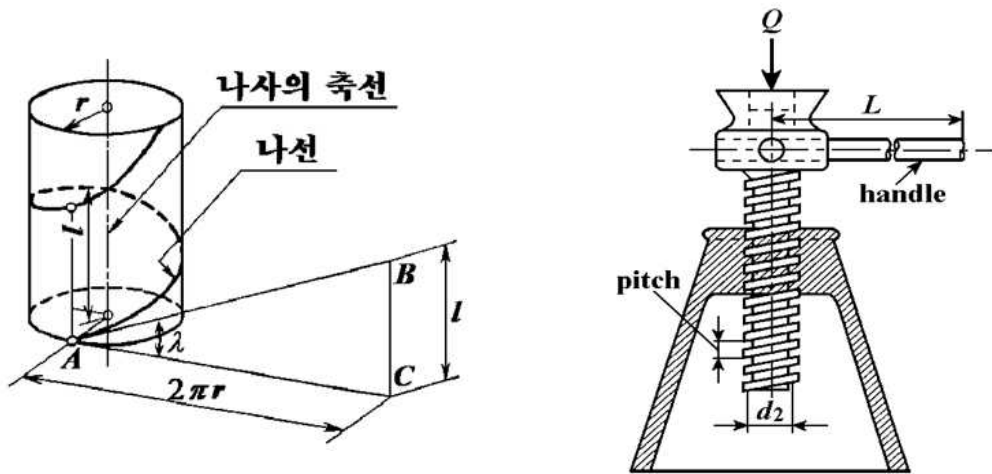


그림 2.3.1.3 나사와 나사잭의 형상

하중 Q 를 들어올리기 위하여 핸들을 돌려 나사의 회전에 의해 상향운동을 하는 것을 나사잭(screw jack)이라 한다. 핸들을 돌려 나사를 감아올리는 것을 경사각 λ 인 비탈진 사면을 자중을 포함하여 상부로부터 힘 Q 를 받고 있는 어떠한 물체가 상향으로 움직이도록 물체에 힘 P 를 가하는 것으로 생각할 수가 있다. 물체와 경사면 사이의 마찰계수를 μ 라하면 마찰력은 $F = \mu N$ 이 되어 힘의 평형을 취하면 식 (2.2)와 같다.

$$\Sigma F_x = P - N \sin \lambda - \mu N \cos \lambda = 0 \quad \text{식 (2.2.a)}$$

$$P = N(\sin \lambda + \mu \cos \lambda) \quad \text{식 (2.2.b)}$$

$$\Sigma F_y = Q - N \cos \lambda + \mu N \sin \lambda = 0 \quad \text{식 (2.2.c)}$$

$$Q = N(\cos \lambda - \mu \sin \lambda), \quad N = Q/(\cos \lambda - \mu \sin \lambda) \quad \text{식 (2.2.d)}$$

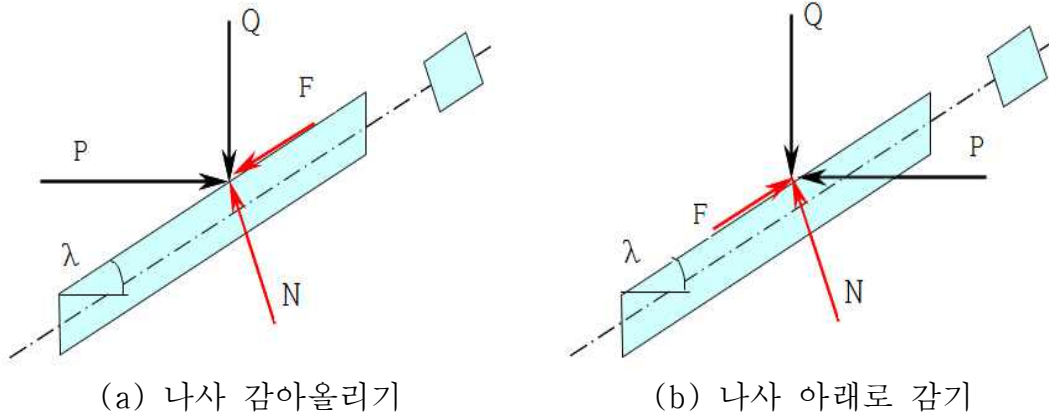


그림 2.3.1.4 나사와 힘의 관계

식 (2.2.d)를 식 (2.2.b)에 대입하고 마찰각을 ρ , 마찰계수를 μ 를 $\mu = \tan \rho$ 로 나타내면 식 (2.3)의 관계를 얻을 수 있다. 식 (2.3)을 간단히 표현하면 식 (2.4)과 같다.

$$P = Q \frac{\sin \lambda + \mu \cos \lambda}{\cos \lambda - \mu \sin \lambda} = Q \frac{\tan \lambda + \mu}{1 - \mu \tan \lambda} = Q \frac{\tan \lambda + \tan \rho}{1 - \tan \rho \cdot \tan \lambda} \quad \text{식 (2.3)}$$

$$P = Q \tan(\lambda + \rho) = Q \frac{l + \mu \pi d_2}{\pi d_2 - \mu l} \quad \text{식 (2.4)}$$

나사를 아래 방향으로 감는 경우는 힘 P 의 방향이 반대로 되며 동일한 방법으로 식 (2.5)와 같이 정리할 수 있다.

$$P = Q \tan(\rho - \lambda) \quad \text{식 (2.5)}$$

식 (2.4)와 식 (2.5)으로부터 나사를 감아올리는데 필요한 토크 T_u 와 나사를 아랫방향으로 감는 경우에 필요한 토크 T_d 를 식 (2.6)와 식 (2.7)으로 나타내었다.

$$T_u = P \frac{d_2}{2} = Q \frac{d_2}{2} \tan(\lambda + \rho) \quad \text{식 (2.6)}$$

$$T_d = P \frac{d_2}{2} = Q \frac{d_2}{2} \tan(\rho - \lambda) \quad \text{식 (2.7)}$$

여기서, d_2 는 나사의 유효직경(나사의 바깥직경과 안쪽직경의 평균값)이다.

토크에 의한 회전으로 시공되는 헬리컬 파일의 관입 모델은 나사를 아래로 감는 형상과 유사하며, 헬리컬 파일의 원판은 4각 나사와 같은 형상을 가지고 있다. 이에 따라 관입 시 필요한 토크와 원판의 관계를 나선 모델에 적용할 수 있다. 원판을 돌리는 힘을 P , 축방향 힘을 Q 라고 할 때, 나선형 원판에 작용하는 토크 T_1 은 식(2.5)과 식(2.7)을 적용하여 식(2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_1 = P \frac{d_2}{2} = Q \frac{d_2}{2} \tan(\rho - \alpha) = Q \frac{d_2}{2} \frac{\pi d_2 \mu - l}{\pi d_2 + \mu l} \quad \text{식 (2.8)}$$

헬리컬 파일의 초기 관입 시 추가적인 하중을 가하지 않아도 유압모터의 자중과 헬리컬 파일의 자중에 의해 일정량 이상의 축방향 하중 Q 가 발생하게 된다. 이에 따라 헬리컬 파일 관입시 필요한 P 를 알 수 있으며, 실제 시공현장에서는 헬리컬 파일이 관입되지 않고 헛도는 것을 방지하기 위해 추가적인 축방향 하중을 가하고, 이에 따라 필요한 T_1 을 산출하여 시공에 적용할 수 있다. 헬리컬 파일이 어느 정도 관입이 된 후에는 유압모터의 상대적으로 높은 토크로 인해 Q 에 관계없이 파일이 관입하게 된다.

실제 현장 시공에서 파일의 관입이 지속하여 추가적인 축방향 하중 없이 관입을 계속하면 N치가 큰 단단한 지반에서 관입이 지속되지 않고 유압모터와 헬리컬 파일이 공회전하는 경우가 발생한다. 이는 충분한 토크에 비해 상대적으로 부족한 축방향 하중에 의해 발생한다. (식 (2.9))

$$P \sin \alpha > Q \cos \alpha \quad \text{식 (2.9)}$$

이는 토크에 의해 나선형 원판 상부 지반에 작용하는 수직항력이 축방향 힘에 의한 하중보다 상대적으로 큰 값을 가져 헬리컬 파일이 관입되지 못하고 공회전 하는 것을 의미한다. 공회전하는 경우에는 추가적인 축방향 하중으로 관입을 지속할 수 있음을 나선모델을 통해 확인할 수 있다.

다. Helical pile의 지지력 예측

(1) Individual bearing method

Individual bearing method는 헬리컬 파일의 각각의 원판에 하중이 분포하여 선단지지력을 발현, 헬리컬 파일의 지지력을 각 원판의 선단지지력과 축의 주면마찰력의 합으로 산정

하는 방법으로 식 (3.1)과 같다.

$$P_u = \sum_n q_{ult} A_n + \alpha H(\pi D) \quad \text{식 (3.1)}$$

여기서, q_{ult} : 극한지지능력

A_n : n번째 나선형 원판의 면적

α : 지반과 축 사이의 부착력

H : 최상부 나선형 원판까지의 축 길이

D : 축의 직경

일반적으로 선단의 극한지지능력은 Terzaghi(1943)의 제안식이나 Meyerhof(1951)의 제안을 사용하며, Terzaghi의 제안식을 수정한 Meyerhof의 제안식이 보편적으로 사용되고 있다. Meyerhof의 제안식을 사용하여 각 원판의 선단 지지력을 산정하기 위한 개별 극한지지능력의 산정방법은 식 (3.2)와 같다.

$$q_{ult} = cN_c s_c d_c + q' N_q s_q d_q + 0.5\gamma B N_r s_r d_r \quad \text{식 (3.2)}$$

여기서, c : 점착력

q' : 유효응력

B, L : 기초의 길이와 폭(원판 직경으로 동일)

γ : 지반의 단위중량

N_c, N_q, N_r : 지지력계수

s_c, s_q, s_r : 형상계수

d_c, d_q, d_r : 심도계수

Hansen(1970)과 Vesic(1974)은 기존의 제안식에서 사용되었던 형상 및 깊이 계수를 수정하여 측정된 지지력과 예측한 지지력의 오차의 폭을 감소시켰으며, 현재 널리 사용되고 있다. 식 (3.2)에 사용된 지지력계수와 형상계수, 심도계수는 각각 식 (3.3)에 나타내었고, 수정된 계수와 기존 계수의 차이를 그림 2.3.1.5에 나타냈다.

$$N_q = e^{\pi \tan \Phi} \tan^2(45 + \frac{\Phi}{2}), N_c = (N_q - 1) \cot \Phi, N_r = (N_q - 1) \tan(1.4\Phi) \quad \text{식 (3.3.a)}$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \frac{B}{L}, s_q = 1 + \frac{B}{L} \tan \Phi, s_r = 1 - 0.4 \frac{B}{L} \quad \text{식 (3.3.b)}$$

$$d_c = 1 + 0.4K, d_q = 1 + 2K \tan \Phi (1 - \sin \Phi)^2, d_r = 1, K = \arctan\left(\frac{H}{B}\right) \quad \text{식 (3.3.c)}$$

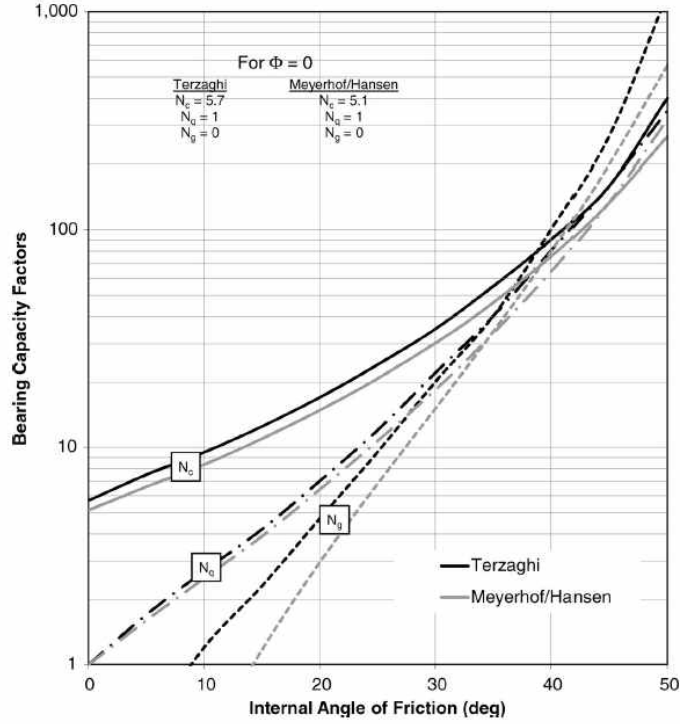


그림 2.3.1.5 지지력 계수

여기서, Φ : 지반의 내부마찰각

식 (3.2)에서 q_{ult} 를 산정하는데 있어, Terzaghi(1943)의 제안식이나 Meyerhof(1951)의 제안식 이외에도 현장 시공에서 표준관입시험(SPT)에서 예측하는 경험식이 다양하게 제시되었다(Perko, 2009). 점토지반에서 q_{ult} 를 예측하는 경험식은 식 (3.4)와 같으며, 현장 시공 사례에서 에너지 효율 70%에서의 SPT 타격 횟수와 q_{ult} 의 관계를 그림 2.3.1.6에 나타냈다.

$$q_{ult} = 11 \lambda_{SPT} N_{70} \quad \text{식 (3.4)}$$

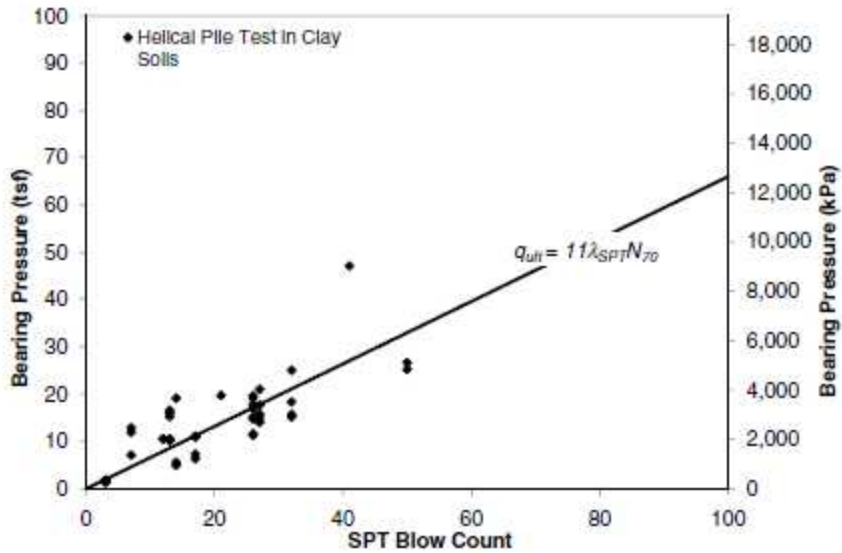


그림 2.3.1.6 점토지반에서 SPT 타격 횟수와 q_{ult} 의 관계 (Perko, 2009)

모래지반에서 q_{ult} 를 예측하는데 적용되는 경험식은 Parry(1977)이 제안한 경험식이 있으나, 헬리컬 파일에 적용하기에 적절하지 않기 때문에, Perko(2009)에 의해 수정된 경험식이 제안되었고, 이를 식 (3.5)에 나타내었다. 모래지반에서의 시공 사례에서 SPT 타격 횟수와 q_{ult} 의 관계는 그림 2.3.1.7에 나타내었다.

$$q_{ult} = 12\lambda_{SPT}N_{70} \quad \text{식 (3.5)}$$

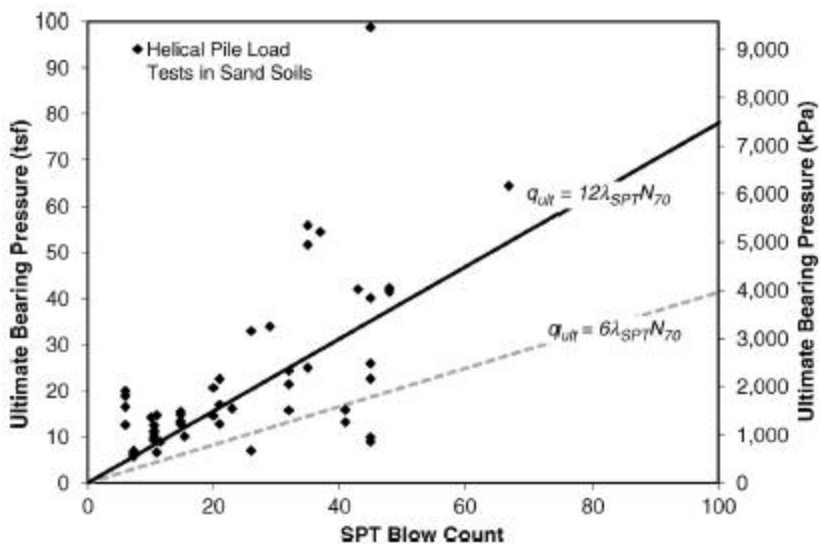


그림 2.3.1.7 모래지반에서 SPT 타격 횟수와 q_{ult} 의 관계 (Perko, 2009)

또한 풍화암에 설치된 헬리컬 파일의 지지력에 대한 경험식 또한 Perko(2009)에 의해 제

안되었다. 제안식은 식 (3.6)과 같으며, SPT 타격 횟수와 q_{ult} 의 관계는 그림 2.3.1.8에 나타냈다.

$$q_{ult} = 13\lambda_{SPT}N_{70} \quad \text{식 (3.6)}$$

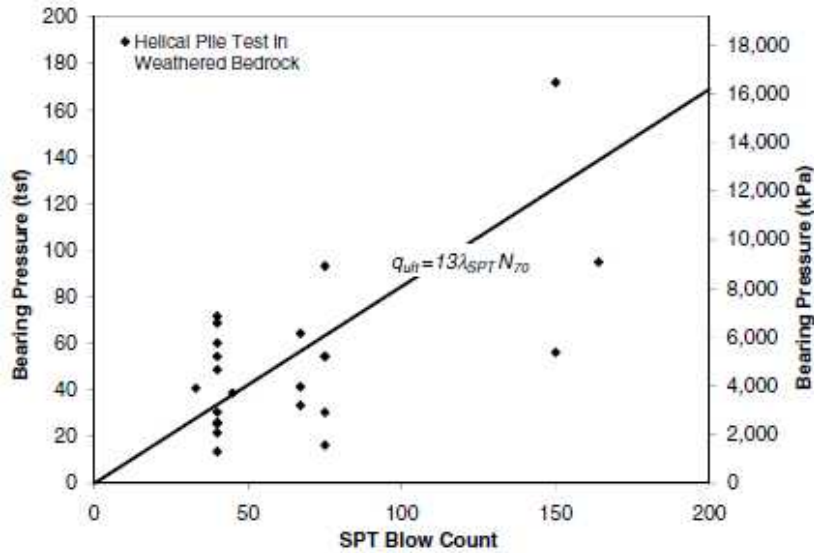
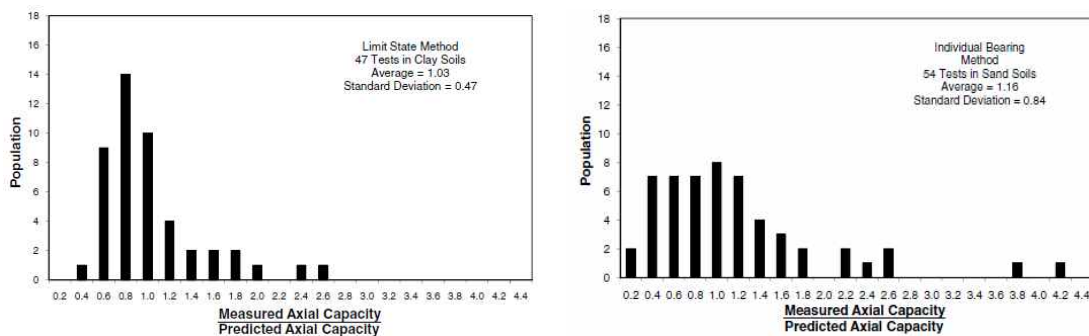


그림 2.3.1.8 풍화암에서 SPT 타격 횟수와 q_{ult} 의 관계 (Perko, 2009)

Individual bearing method의 적용가능성을 확인하기 위해 Perko(2009)는 점토지반에서의 47개의 시공사례에서 실측 지지력과 Individual bearing method를 사용하여 예측한 지지력의 비율은 평균적으로 1.03이며(표준편차 0.47), 모래지반에서의 54개의 시공사례에서는 1.16(표준편차 0.84)임을 기술하였다(그림 2.3.1.9 참조).



(a) 지지력 예측비교(점토지반)

(b) 지지력 예측비교(모래지반)

그림 2.3.1.9 예측 지지력과 실측 지지력 비교

(2) Cylindrical shear method

Cylindrical shear method는 원판 사이의 지반 전체가 동일하게 저항한다고 가정하여 지지력을 산정하는 방법이다. 따라서 지지력은 최하단 원판의 선단지지력, 원통형 지반의 전단력, 그리고 축의 주변마찰력의 합으로 식 (3.7)와 같이 산정할 수 있다.

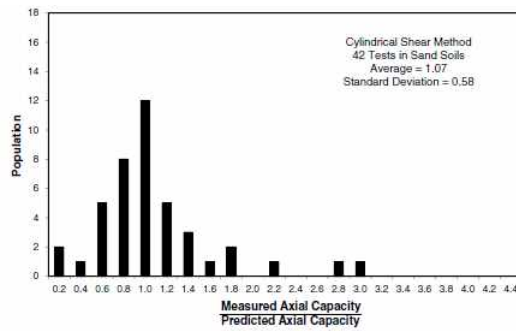
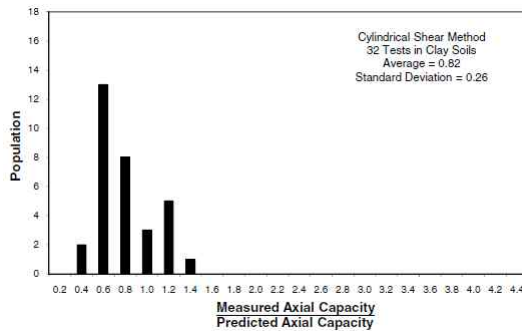
$$P_u = q_{ult}A_1 + T(n-1)s\pi D_{ave} + \alpha H(\pi D) \quad \text{식 (3.7)}$$

여기서, A_1 : 최하부 나선형 원판의 면적

T : 원통형 지반의 전단강도

$(n-1)s$: 나선형 원판 사이에 형성된 원통형 지반의 높이

Perko(2009)는 점토지반에서의 32개의 시공사례에서 실측 지지력과 Cylindrical shear method로 예측한 지지력의 비율의 평균을 0.82(표준편차 0.26), 모래지반에서 42개의 시험 결과를 바탕으로 산정된 평균값은 1.07(표준편차 0.58)임을 기술하였으며(그림 2.3.1.10 참조), 일반적으로 Individual bearing method와 Cylindrical shear method를 통해 산정한 지지력 예측값 중에서 작은 값을 사용하는 것이 적절하다고 제시하였다.



(a) 지지력 예측비교(점토지반)

(b) 지지력 예측비교(모래지반)

그림 2.3.1.10 예측 지지력과 실측 지지력 비교

(3) Torque correlation method

Torque correlation method은 현장에서 측정할 수 있는 시공장비의 최종토크를 측정하고 지지력-토크 계수를 이용하여 간편하게 지지력을 예측하는 경험적인 방법이다. Hoyt and Clemence(1989)는 Individual bearing method과 Cylindrical shear method, 그리고 기존

에 경험적으로 사용되던 토크와 지지력의 관계에 대해 실측지지력과 예측지지력을 비교 분석하였다. Torque correlation method은 시공 시의 최종토크로부터 지지력을 예측하는 방법으로 관계식은 식 (3.8)와 같다.

$$P_u = K_t T \quad \text{식 (3.8)}$$

여기서, K_t : 지지력-토크 상수 (m^{-1})

Hoyt and Clemence(1989)는 세 가지 방법 중에서 상대적으로 Torque correlation method가 실측 지지력과 예측 지지력의 차이가 적다고 언급하였다. Perko(2009)는 141개의 현장시험을 바탕으로 축의 직경과 지지력-토크 상수의 관계를 나타냈으며(그림 2.3.1.11 참조), 국내에서도 Torque correlation method가 상대적으로 타당하다고 분석한 사례가 있다(하태성 등, 2013). Perko(2009)가 제안한 축의 직경에 따른 K_t 는 표 2.3.1.1에 나타났다.

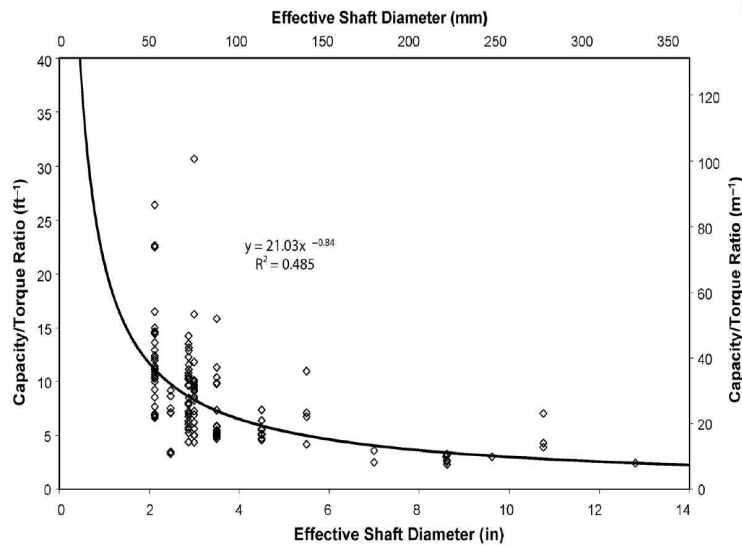


그림 2.3.1.11 축의 직경과 지지력-토크 상수의 관계

표 2.3.1.1 축의 직경에 따른 K_t (Perko, 2009)

축 직경(mm)	$K_t(m^{-1})$
54	37
63	32
73	28
76	27
89	24
114	19
152	15
203	12
254	10

현장에서 측정된 시공 시 최종토크는 이론적으로 식 (3.9)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 그림 2.3.1.12에 나타내었다.

$$T = T_{shaft} + T_{plate} + T_B \quad \text{식 (3.9)}$$

여기서, T 는 관입에 필요한 토크

T_{shaft} 는 축을 관입하는데 필요한 토크

T_{plate} 는 원판을 관입하는데 필요한 토크

T_B 는 나선형 원판의 전단면이 지반을 전단하는데 필요한 토크

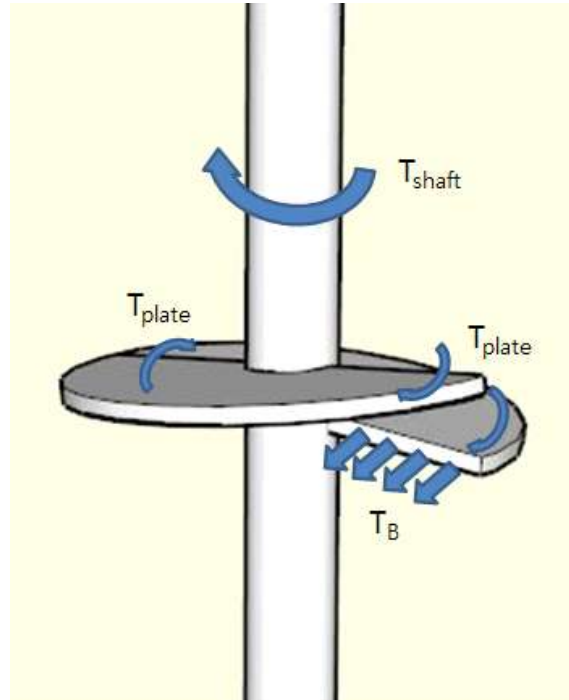


그림 2.3.1.12 헬리컬 파일 관입에 필요한 토크

T_{plate} 를 그림 2.3.1.13와 같이 원판의 미소면적에 대한 적분식으로 나타내고, T_{shaft} 를 축과 원판의 양면에 작용하는 마찰력과 관계식으로 나타내면 식 (3.10)과 같으며, 식 (3.10)에서 T_B 는 앞서 언급한 식(3.2)를 적용하여 산정할 수 있으며, 이를 정리하면 식 (3.11)과 같다.

$$T = T_{shaft} + T_{plate} + T_B = \int_0^l 2\pi r_{shaft}^2 f dl + \sum_n 2 \int_0^{r_{plate}} \int_0^{2\pi} (r^2 f) d\theta dr + T_B \quad \text{식 (3.10)}$$

$$T = \pi \frac{r_{shaft}^2}{2} f l + \sum_n 2 \left[\frac{4}{3} \pi \frac{r_{plate}^3}{2} \right] f + \sum_n q_{ult} A_B \frac{r_{plate}}{2} \quad \text{식 (3.11)}$$

여기서, r_{shaft} 는 축의 직경

l 은 축의 길이

r_{plate} 는 원판의 직경

n 은 원판의 개수

f 는 마찰응력이며, 사질토에서 $f = \sigma'_{v0} \tan \phi$

A_B 는 원판이 지반을 전단하는 면적

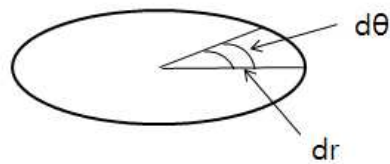


그림 2.3.1.13 원판의 미소면적

모래지반에서 표준관입시험에 의한 N 값에 따른 내부마찰각과 단위중량은 표 2.3.1.2와 같다. 식 (3.11)를 통하여 헬리컬 파일 형상에 따라 현장 시공 시 필요한 최소 관입 토크를 산정할 수 있다.

표 2.3.1.2 모래지반의 지반정수

흙의 상태	N 값	내부마찰각 (°)	단위중량 (t/m ³)
매우 느슨	<4	<30	1.3~1.4
느슨	4~10	30~35	1.4~1.6
중간	10~30	35~40	1.6~1.8
조밀	30~50	40~45	1.8~2.3
매우 조밀	>50	>45	2.3

라. Helical pile의 좌굴

Helical pile은 대부분의 하중을 helix plate이 받도록 설계하므로 Shaft의 직경이 helix plate보다 매우 작다. 따라서 Helical pile은 시공완료 후 실제 하중이 재하될 때 기존의 파일공법보다 좌굴의 가능성이 매우 높으므로, Helical pile 설계시에는 좌굴 안정성 검토가 필수적 사항이다.

(1) 기둥의 좌굴 이론

하중을 받는 편-편 지지의 기둥은 그림 2.3.1.14에서 볼 수 있다. 그림 2.4의 윗부분은 굽힘 모멘트가 나타나며 하중 P에 의해 변위 y가 발생한다.

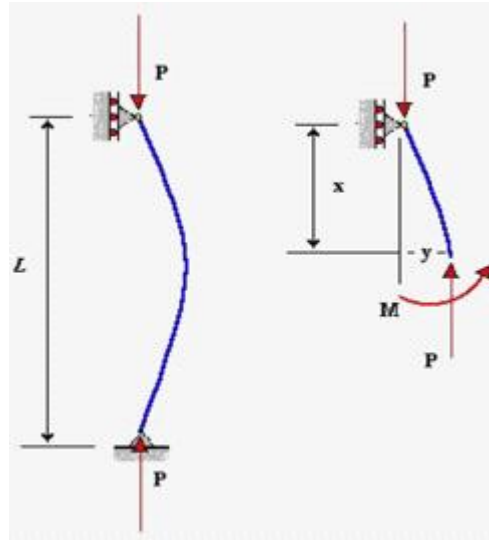


그림 2.3.1.14. 기둥의 자유물체도

그림 2.3.1.14 에서 핀으로부터 거리가 x만큼 떨어진 곳의 굽힘 모멘트는 식 9와 같다.

$$M = -P \times y \quad \text{식 (9)}$$

보/기둥의 굽힘 모멘트는 작은 처짐에 대하여 식 10과 같이 보의 곡률에 비례하며, 식 9를 식 10에 대입하면 식 11을 얻을 수 있다.

$$(M/EI) = (d^2y/dx^2) \quad \text{식 (10)}$$

$$(d^2y/dx^2) = -(P/EI)y \quad \text{or} \quad (d^2y/dx^2) + (P/EI)y = 0 \quad \text{식 (11)}$$

여기서, E는 탄성계수, I는 관성 모멘트

이 때, 식 11의 일반해는 다음과 같다.

$$y = A \sin \sqrt{\frac{P}{EI}} x + B \cos \sqrt{\frac{P}{EI}} x \quad \text{식 (12)}$$

기둥 끝단이 편 지지 되어 있는 경계조건을 적용하면 처짐이 0 이어야 하므로 $y=0$ at $x=0$ and $y=0$ at $x=L$ 이다. 이를 이용하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\sin \sqrt{\frac{P}{EI}} L = 0, \quad \sqrt{\frac{P}{EI}} L = \pi \quad \text{식 (13)}$$

식 13을 하중 P에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad \text{식 (14)}$$

여기서, P_{cr} 은 좌굴이 시작되기 직전까지 가해질 수 있는 임계하중을 나타낸다. 식 14는 양단이 pin과 roller로 지지되어 있는 좌굴의 경우에 한하여 적용할 수 있는 식으로, 중간에 pin으로 지지가 되어있는 보의 경우에는 그림 2.3.1.15와 같이 pin 지지점의 수에 따라 좌굴강도가 증가하게 된다.

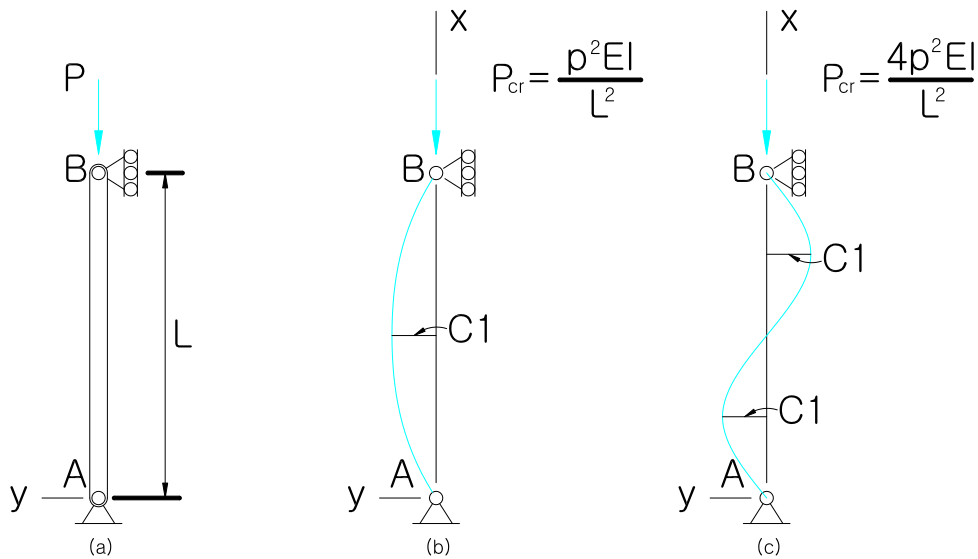


그림 2.3.1.15. Pin 지지점에 따른 보의 좌굴강도

이를 일반식으로 나타내면 다음의 식과 같다.

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (n = 1, 2, 3, 4) \quad \text{식 (15)}$$

식 15에서 pin 지지점의 수에 따라 좌굴강도가 증가하는 것은 좌굴이 발생하는 보의 유효 길이가 감소하기 때문이며, 이를 감안하여 유효길이에 따른 좌굴식을 유도하면 식 16과 같다.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \quad \text{식 (16)}$$

여기서,

k : 유효길이 계수

L : 기둥의 길이

E : 탄성계수

I : 단면 2차 모멘트

앞서 밝힌 식 16은 Euler 공식으로 유도한, 이상적인 보의 좌굴강도로, 실제로는 LRFD 설계의 좌굴강도를 사용하는 것이 권장된다. LRFD 설계의 좌굴강도는 다음과 같이 규정하고 있다.

$$P_n = A \times f_{cr} \quad \text{식 (17)}$$

여기서,

$$f_{cr} = 0.658\lambda_c^2 \times f_y, \quad \lambda_c \leq 1.5$$

$$f_{cr} = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] \times f_y, \quad \lambda_c > 1.5$$

$$\lambda_c = \frac{kl}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}} \quad (\text{세장비})$$

$$r = \sqrt{\frac{d^2 - d_1^2}{2}}, \quad d : \text{외경}, d_1 : \text{내경}$$

(2) 지중에 설치된 Helcial pile의 좌굴

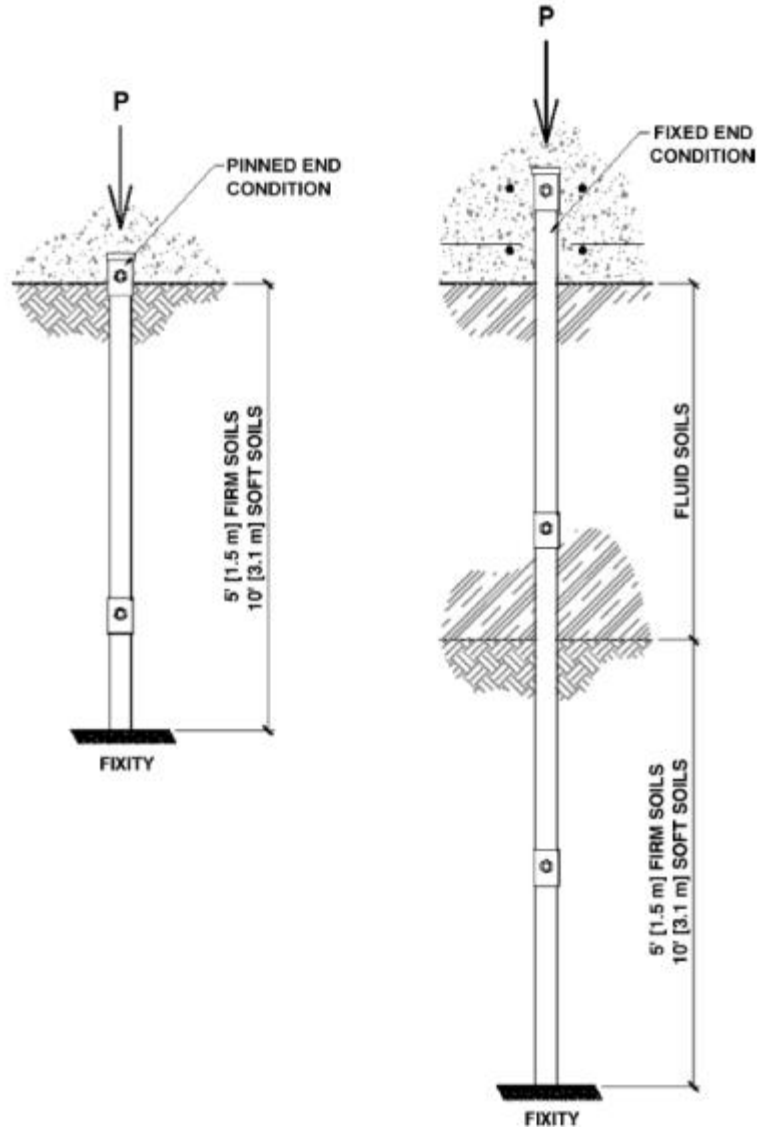


그림 2.3.1.16 지반에 관입된 Helical pile의 좌굴영향 범위

Helical pile이 지반에 시공되었을 경우, 지반 조건이 단단한 지반(Firm soil) 인가, 약한 지반(Soft soil) 인가에 따라 좌굴강도가 달라진다. 이는, 주변 지반이 Helical pile의 횡방향 변위를 어느정도 구속하기 때문이며, 주변지반의 강도가 증가할수록 Helical pile의 좌굴강도는 증가한다. 문헌조사에 따르면, Helical pile이 단단한 지반(Firm soil)에 시공되었을 경우 1.5m 이하의 지반에서는 고정(Fixed)으로 간주하고 약한지반(Soft soil)에 시공되었을 경우 3.1m 이하의 지반에서 고정(Fixed)으로 간주한다. 따라서 Helical pile의 좌굴은 그림 2.3.1.16과 같이 각 지반조건에 따라 고정(Fixed) 된 깊이 이상의 부분에서만 영향 받는다고 할 수 있다.

마. Helical pile의 허용 압축 강도

Helical pile의 허용압축강도는 재료의 항복강도의 60%를 적용하고 ($\sigma_a = 0.6\sigma_y$) 통상

Helical pile에 적용되는 Shaft의 항복강도는 640MPa이상의 재료가 사용된다. 따라서 Shaft 재료의 허용압축강도는 σ_a 는 384MPa이상의 재료를 사용하여야 한다.

바. helix plate의 용접 강도 및 접힘 강도

Helical pile은 중공형의 shaft에 helix plate을 용접하여 제작되므로 Helical pile과 helix plate의 용접 강도를 확인하여야 한다. 또한 Helical pile 시공 후 하중이 재하 될 시, Helix plate의 두께가 충분히 두껍지 못하다면 helix plate에서 접힘 현상이 발생하여 과도한 침하가 유발될 수 있다. helix plate의 용접 강도와 접힘 강도는 helix plate를 완전 원형 plate로 가정 할 시, 다음과 같이 검토 할 수 있다.



그림 2.3.1.17. Helix plate의 용접 및 접힘

(1) 용접강도의 검토방법

본 연구에서 개발하고자 하는 Helical pile은 중공형 shaft를 사용하므로 용접부분의 단면적과 용접 강재의 최소전단강도를 사용하여 다음과 같은 식 18로 용접강도를 검토 할 수 있다.

$$P_w = \pi d t_w \sigma_s \quad \text{식 (18)}$$

여기서

d = Shaft의 직경

t_w = 최소 용접 두께 = 0.25 inch $\times$ 2 (양면)

σ_s = 강재의 최소전단강도 = $0.7 \times \sigma_y$

(2) helix plate의 접힘 검토

helix plate의 접힘은 다음과 같은 식 19로 검토가 가능하다.

$$Q = 2AP \quad \text{식 (19)}$$

여기서

Q = 최대접힘강도

$$P = \frac{\sigma_y(0.5t_p)}{IA\lambda}$$

I = helix plate의 단면이차모멘트

$$= \frac{1}{2}Lt_p$$

t_p = helix plate의 최소두께

$$L = 0.5D + 0.5d$$

D = helix plate의 직경

d = Shaft의 직경

λ = 반원의 도심에서 접힘점까지 거리

$$= \frac{2D}{3\pi} - 0.5d$$

$$A = \text{반원의 단면적} = \frac{1}{8}\pi d^2$$

σ_y = helix plate의 항복강도

2. 1차년도

가. 연구개발 목표

1차년도의 연구개발목표는 2차년도 연구의 원활한 진행을 위하여 지지력 특성별 Helical pile 구조체를 연구하는 것이며 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 국외의 시공시방서 및 시공 관리 지침 등 시공시방서 작성을 위한 기존의 자료 조사
- 건물기초 구조체로서 공학적 특성에 부합되는 helical pile설계
- 목표지지력크기에 따른 최적의 helical pile 형상 및 규격제시
- 지지력의 크기별 helix plate의 크기 및 두께 제시
- 목표지지력 도달에 필요한 Shaft 허용 비틀림 모멘트결정
- 지반교란을 극소화 시킬 수 있는 helix plate 설계
- 작은 직경의 Shaft으로 좌굴 억제를 위한 helical pile설계
- 목표지지력 도달을 위한 유압모터의 토크치 제시

나. 개발 내용 및 개발 범위

1차년도는 지지력크기별 helical pile 구조체 연구가 주요 목표이며, 문헌 연구 및 그 결과를 통한 1차 시험시공을 통해 연구가 진행되었다. 1차년도에서 수행한 연구는 문헌조사를 바탕으로 현장시험시공 수행이 가장 중요하며, 이를 통하여 2차년도 연구 수행의 방향을 확립하

게 하는데 그 목적이 있다.

(1) 시험 시공 위치 및 지반조건

현장 시험시공은 김포시 통진읍 일대에서 수행되었으며 지반조건 파악을 위한 시추조사를 2공 실시하고, 시추공 전단시험을 BST로 실시하였다. 시추시험 결과 지반은 매립층, 붕적층, 풍화토, 풍화암의 순으로 구성되어 있었다.



그림 2.3.2.1 시험시공 위치 (김포시 통진읍)

시추주상도

DRILL LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공 사 명 PROJECT	국토해양부 상시연구과제 지반조사(Site I)	공번 HOLE No.	SI-1	(주) 시료채취방법의 기호 REMARKS
위 치 LOCATION	헬리콥터파일시공 SI-1	지반표고 ELEVATION	0.00 M	○ 자연시료 U.D. SAMPLE
날 짜 DATE	2012. 11. 13 ~ 2012. 11. 13	지하수위 GROUND WATER	(GL-) 6.00 M	◎ 표준관입시험에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE
		감독자 INSPECTOR	안병태	● 코어시료 CORE SAMPLE
				⊗ 흐트러진 시료 DISTURBED SAMPLE

표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	층후 Thic- kness M	주상도 Columnar Section	지층명	지 층 설 명 Description	통 일 분 류 S	시 료 Sample		표준관입시험 Standard Penetration Test						
								시료 번호	채취 방법	채취 심도	N치 (회/cm)	N blow				
											10	20	30	40	50	
-3.60		3.60	3.60		매립층	*매립층 잔자갈, 실트 약간혼재 실트질 모래 갈색 습윤	SM	S-1	◎	1.0	25/30					
								S-2	◎	2.0	17/30					
								S-3	◎	3.0	8/30					
-13.60		13.60	10.00		풍화토	*풍화토 실트질 모래 갈색~매우조밀 건조	SM	S-4	◎	4.0	9/30					
								S-5	◎	5.0	10/30					
								S-6	◎	6.0	12/30					
								S-7	◎	7.0	14/30					
								S-8	◎	8.0	16/30					
								S-9	◎	9.0	18/30					
								S-10	◎	10.0	20/30					
								S-11	◎	11.0	21/30					
								S-12	◎	12.0	24/30					
								S-13	◎	13.0	30/30					
-16.00		16.00	2.40		풍화암	*풍화암 화강암의 풍화대 실트질 모래로 분해 매우조밀 갈색 건조	SM	S-14	◎	14.0	50/9					
								S-15	◎	15.0	50/7					
						* 심도 16.00 M 에서 시추종료		S-16	◎	16.0	50/6					

그림 2.3.2.2. 시추주상도 SI - 1

DRILL LOG

(주) 시료채취방법의 기호

공 사 명 PROJECT		국토해양부 상시연구과제 지반조사(Site I)		공번 HOLE No.		SI-2		(주) 시료채취방법의 기호									
위 치 LOCATION		헬리컬파일시공 SI-2		지반표고 ELEVATION		0.00 M		REMARKS									
날 짜 DATE		2012. 11. 14 ~ 2012. 11. 14		지하수위 GROUND WATER		(GL-) 6.40 M		 자연시료 U.D. SAMPLE 표준관입시험에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE 코어시료 CORE SAMPLE 혼트러진 시료 DISTURBED SAMPLE									
표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	층후 Thic-kness M	주상도 Columnar Section	지층명	지 층 설 명 Description	통 U 일 S 분 C 류 S	시 료 Sample			표준관입시험 Standard Penetration Test						
								시료 번호	채취 방법	채취 심도	N치 (회/cm)	N blow					
												10	20	30	40	50	
-3.30		3.30	3.30		매립층	*매립층 잔 자갈, 실트 모래 실트 스흙 황갈색 점성토	SM	S-1		1.0	24/30						
								S-2		2.0	14/30						
								S-3		3.0	5/30						
								S-4		4.0	6/30						
								S-5		5.0	8/30						
								S-6		6.0	11/30						
								S-7		7.0	18/30						
								S-8		8.0	20/30						
								S-9		9.0	28/30						
								S-10		10.0	29/30						
								S-11		11.0	30/30						
								S-12		12.0	32/30						
								S-13		13.0	50/20						
-14.50		14.50	11.20		풍화토	*풍화토 실트질 모래 스흙~매우조밀 갈색 건조	SM	S-14		14.0	50/14						
								S-15		15.0	50/10						
								S-16		16.0	50/7						
-17.00		17.00	2.50		풍화암	*풍화암 화강암의 풍화대 실트질모래로 분해 매우조밀 갈색 건조	SM	S-17		17.0	50/5						
						* 심도 17.00 M 에서 시추종료											

- 47 -

Borehole Shear Test

Project Name	국토해양부 상시연구과제 1차년도 지반조사			
Location	경기 김포 통진 도사리		Test by	안 병 태
Borehole No.	SI-1		Depth(m)	(GL.-m) 12.0~13.0
Test Date	20012-11-13		Water level	(GL.-m) 6.0
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	24

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	145
2	300	240
3	400	305
4	500	360
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	14.00
Friction Angle	Degree	35.37

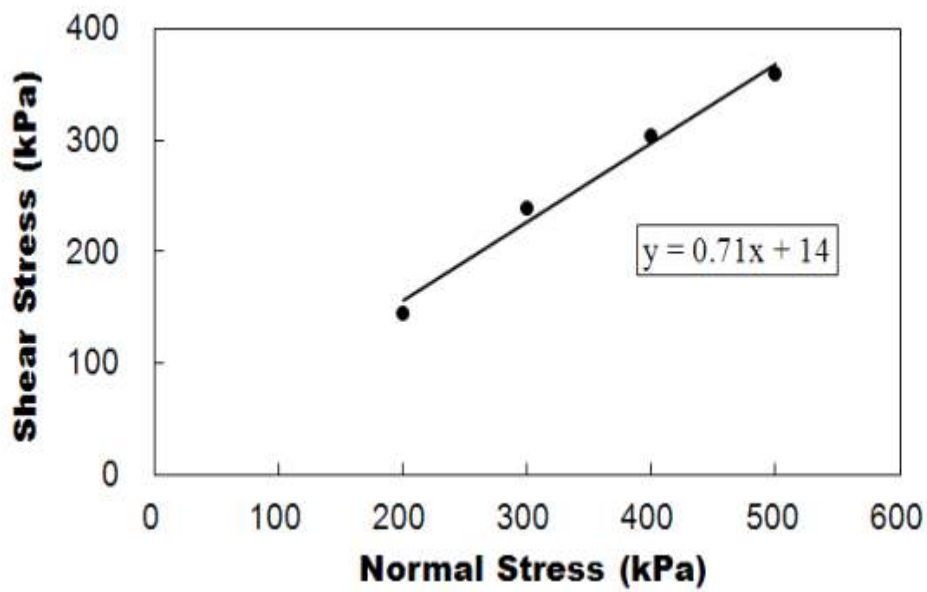


그림 2.3.2.4. 시추공 SI - 1에 대한 BST

Borehole Shear Test

Project Name	국토해양부 상시연구과제 1차년도 지반조사			
Location	경기 김포 통진 도사리		Test by	안 병 태
Borehole No.	SI-2		Depth(m)	(GL.-m) 12.0~13.0
Test Date	20012-11-13		Water level	(GL.-m) 6.4
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	32

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	160
2	300	225
3	400	295
4	500	380
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	0.00
Friction Angle	Degree	36.13

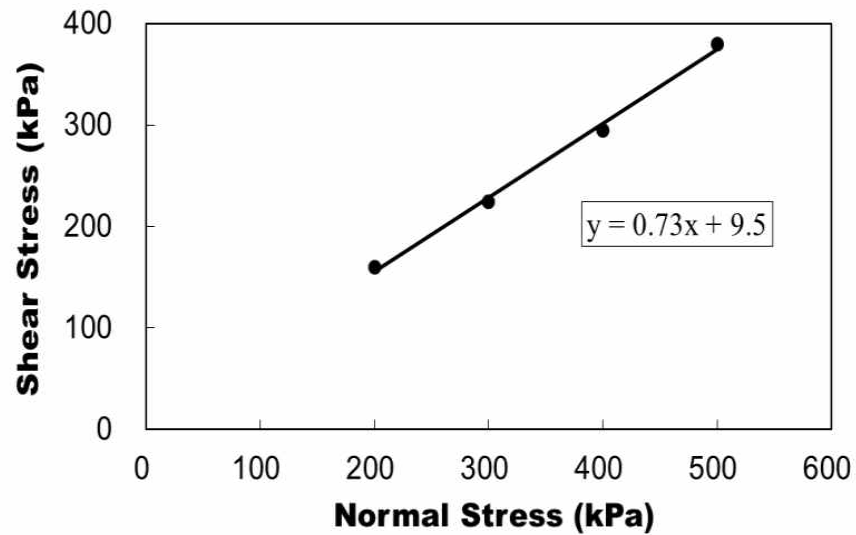


그림 2.3.2.5 시추공 SI - 2에 대한 BST

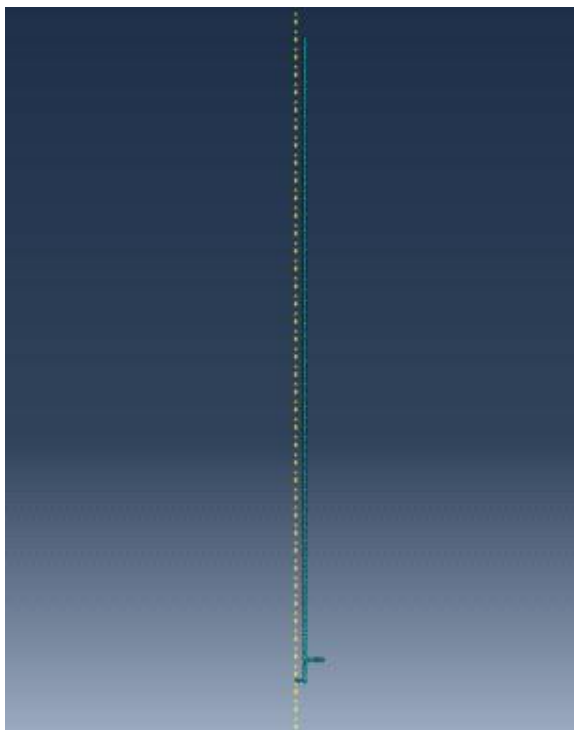
표 2.3.2.1 공내재하시험 결과 요약

공번	심도	N value	C (t/m ²)	Φ	비 고
SI-1	3.0~4.0	8	0.0	28.2	BST
	6.0~7.0	12	0.0	29.9	BST
	9.0~10.0	18	0.0	32.0	BST
	12.0~13.0	24	0.0	35.4	BST
SI-2	3.0~4.0	5	0.0	27.7	BST
	6.0~7.0	11	0.0	30.3	BST
	9.0~10.0	28	0.0	36.6	BST
	12.0~13.0	32	0.0	36.1	BST

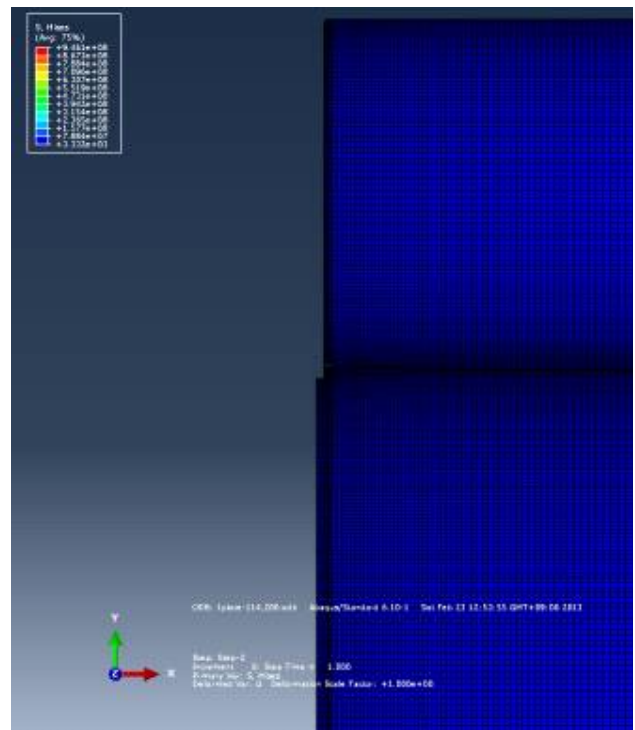
공번	심도	N value	D (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	K (kg/cm ²)	비 고
SI-2	16.0~17.0	50/5~7	97.16	139.69	170.31	PMT

(2) 수치해석 예비 모델

Helical pile의 거동 특성을 현장시공 전에 평가하여 현장시험 시공계획에 반영하기 위하여, 수치해석 예비 모델 분석을 수행하였다. 1차년도 시험시공은 시험횟수가 한정되어 있기 때문에 수치해석을 통하여 현장 시공 시 helical pile의 특성을 파악하기 적합한 shaft 단면과 helix plate 직경을 결정하였다. 수치해석은 지반-구조 해석에 많이 사용되는 FEM 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 수행하였으며, shaft 직경을 73mm, 90mm, 114mm로, helix plate의 직경을 200mm와 250mm로, 단일 helix plate를 가진 helical pile을 총 6본 모델링하였다. 지반은 탄성체로 가정하였으며 시추조사를 통한 지반의 물성치를 적용하고, helical pile의 시공 깊이는 2.35m로 모델링 하였다. 현장 지반은 geostatic option을 이용하여 현장 응력 조건을 모사하였다.



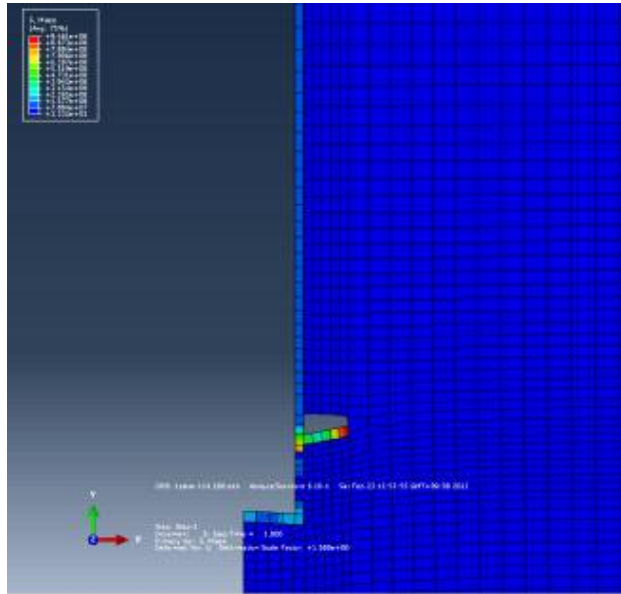
a. helical pile 모델링



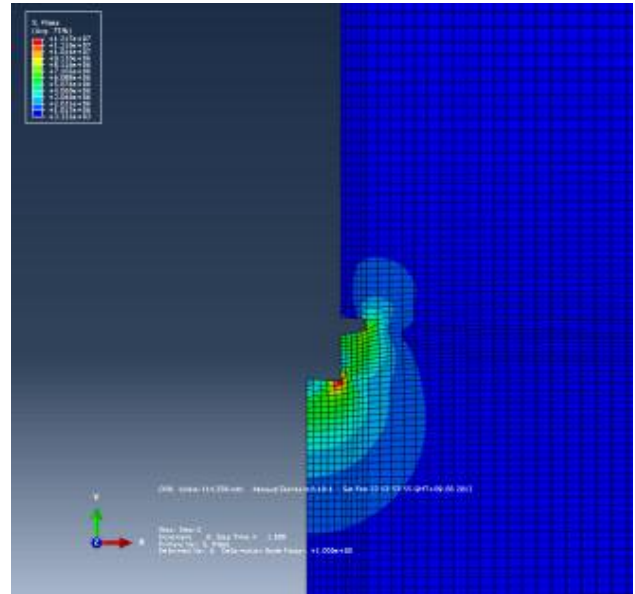
b. 지반 모델링

그림 2.3.2.6 ABAQUS를 이용한 helical pile 및 지반 모델링

각기 다른 제원을 가진 helical pile을 2D axisymmetric으로 모델링한 후 30 ton과 40 ton의 하중을 helical pile 두부에 재하 하였을 때의 응력분포를 그림 2.3.2.7에, 침하량을 표 2.3.2.2에 나타내었다. helical pile에 하중을 재하 하였을 때의 응력분포는 helical pile자체에서는 helix plate 끝단에서 응력이 집중되는 것을 확인할 수 있으며, 지반에서는 일반 말뚝과 비슷한 경향으로 응력이 분포되지만 helix plate에 의해서 일부분의 응력분포가 일반 말뚝과는 상이하게 나타나는 모습을 확인할 수 있다.



a. helical pile 응력분포



b. 지반 응력분포

그림 2.3.2.7. helical pile에 하중 재하시의 응력분포

표 2.3.2.2 모델링한 helical pile에 하중을 재하 하였을 경우의 침하량

Shaft Dia (mm)	Helix plate Dia (mm)	하중	침하량
73	200	30	27.32
73	250	30	25.79
90	200	30	25.57
90	250	30	24.25
114	200	30	23.39
114	250	30	22.39
73	200	40	35.16
73	250	40	32.78
90	200	40	33.05
90	250	40	30.96
114	200	40	30.43
114	250	40	28.75

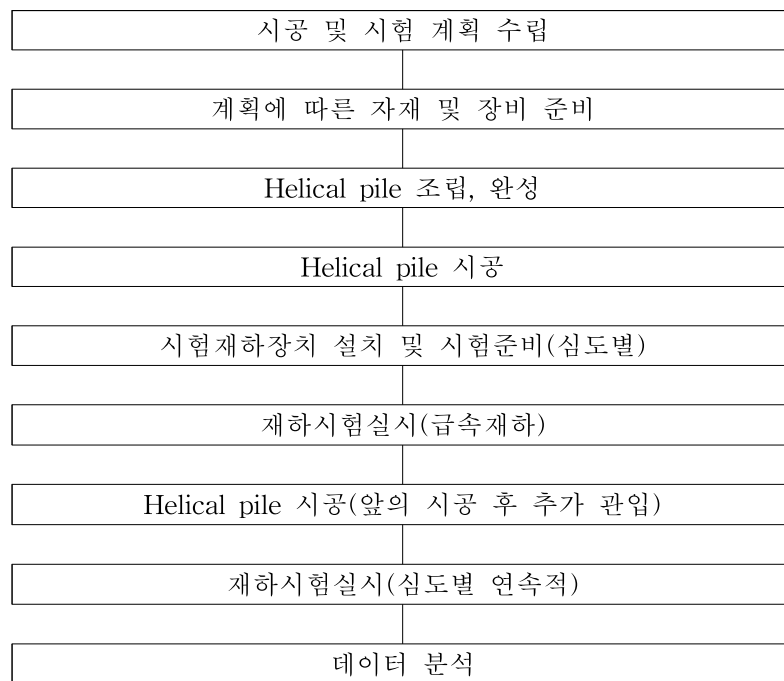
Helical pile의 두부에 30ton과 40ton의 하중을 재하 하였을 때의 helical pile의 제원에 따른 침하량을 비교해 보면, shaft의 직경이 증가하는 경우와 helix plate의 직경이 증가하는 경우 모두 침하량이 감소한 것을 확인할 수 있다. 두가지 경우의 침하량 감소는 비슷하게 나타났는데, shaft 직경을 증가시키는 것에 비하여 helix plate의 직경을 증가시키는 것이

경제적인 측면에서 더 유리하므로 실제 시공 시에는 좌굴의 위험이 없다면 helix plate의 직경을 증가시켜 지지력을 키우는 것이 경제적인 시공이 될 것이라 판단하였다.

본 분석을 통하여 helical pile의 지지력 특성을 간략히 살펴보았으며, Helix plate의 직경을 증가시키는 것과 shaft의 직경을 증가시키는 것 모두가 침하량 감소에 도움이 된다는 것을 확인하였다. 따라서 helical pile의 지지력 특성을 분석하기 위한 현장시험 시공 시에 본 수치해석에 사용된 helical pile의 제원을 사용하는 것이 타당하다고 판단되어, 본 수치해석 결과를 토대로 현장시공을 계획하였다.

(3) 시험 시공 절차 및 결과

(가) Helical pile 시험시공 계획



Helical pile 시험시공 절차는 상기 표 와 같으며, helical pile은 3종류의 shaft와 2종류의 helix plate로 계획되었다. 계획된 시험시공 helical pile의 Shaft의 직경별 helix plate의 크기를 표 2.3.2.3에 정리하였다.

표 2.3.2.3 계획된 helical pile Shaft의 직경별 helix plate의 크기 및 현장 N치

시험번호	Shaft구경 (mm)	심도 GL(-)m	helix plate 구경(mm)	N치
HT-1	73.0	5.0	200	10/30
HT-2		8.0		16/30
HT-3		12.0		24/30
HT-4		14.5		50/9
HT-5	73.0	5.0	250	10/30
HT-6		8.0		16/30
HT-7		12.0		24/30
HT-8		14.5		50/9
HT-9	89.1	5.0	200	10/30
HT-10		8.0		16/30
HT-11		12.0		24/30
HT-12		14.5		50/9
HT-13	89.1	5.0	250	10/30
HT-14		8.0		16/30
HT-15		12.0		24/30
HT-16		14.5		50/9
HT-17	114.0	5.0	200	10/30
HT-18		8.0		16/30
HT-19		12.0		24/30
HT-20		14.5		50/9
HT-21	114.0	5.0	250	10/30
HT-22		8.0		16/30
HT-23		12.0		24/30
HT-24		14.5		50/9

(나) Helical pile 시험시공 준비

Helical pile의 시험 시공을 위하여 계획된 구경에 적합한 중공형 파일을 구입 후, Helix plate를 제작하였다. Helix plate는 중공형 원판을 소정의 각도로 구부린 후 준비한 중공형 파일에 용접하는 순으로 제작하였으며, 각 공정을 표 2.3.2.4로 요약하였다.

표 2.3.2.4 Helical pile 시험시공 준비

중공형 파일 및 시험장비 입고	
	
helical pile 의 Helix plate 제작	
	
Helix plate를 중공형 파일에 용접하여 helical pile 제작	
	
제작 완료된 helical pile	
	

(다) Helical pile의 시험시공

시험시공은 helical pile을 목표 심도까지 회전 관입 시킨 후 재하시험을 수행하고, 재하시험이 완료된 후에 동일한 helical pile을 다음 목표 심도까지 회전 관입한 후 다시 재하시험을 반복 수행하는 방법으로 진행되었다. 이와 같은 방법으로 심도에 따른 Helical pile의 깊이 에 따른 지지력을 분석 할 수 있었다. helical pile의 시공 및 정재하 시험 전경을 표 2.3.2.5에 나타내었다.

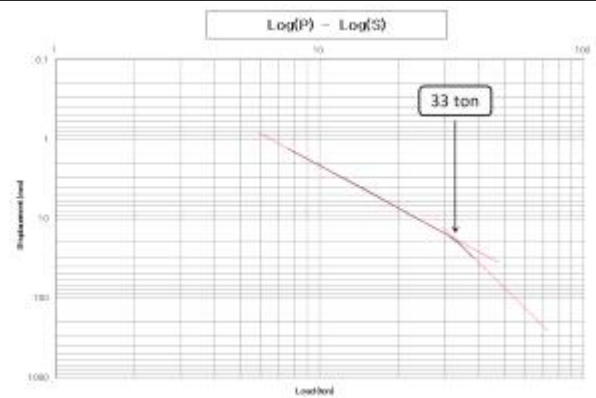
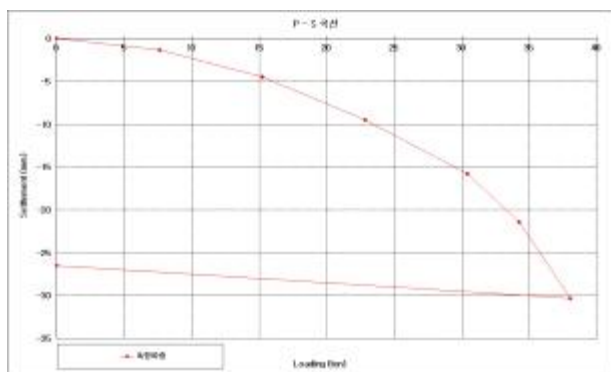
표 2.3.2.5 Helical pile 시공 전경

Helical pile 시공	
	
	
Helical pile 정재하 시험	
	

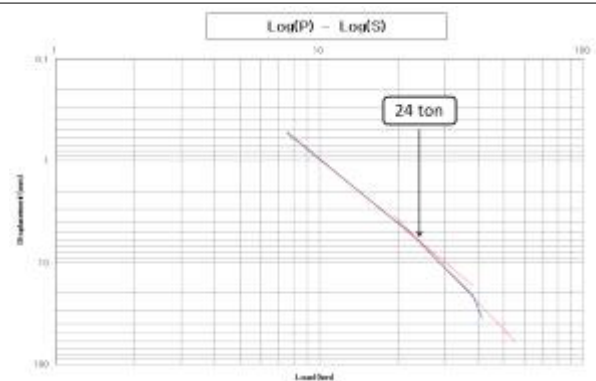
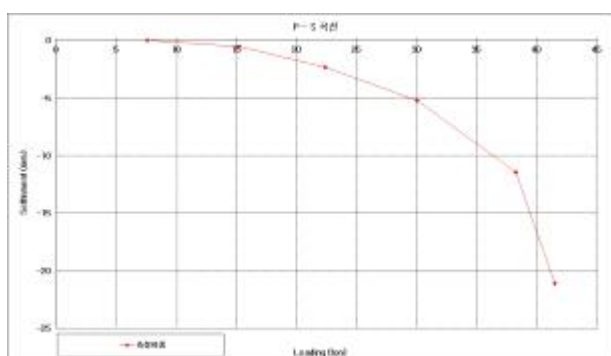


(라) Helical pile 시험 결과

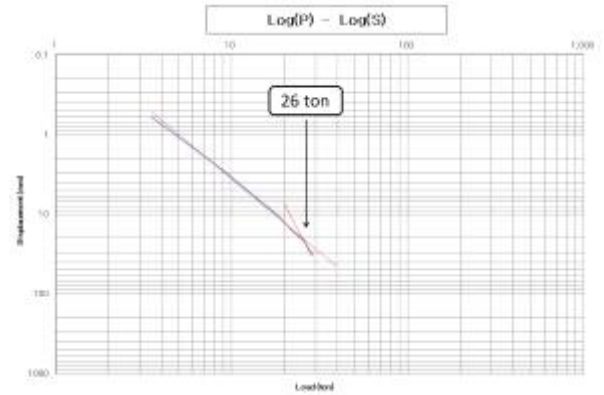
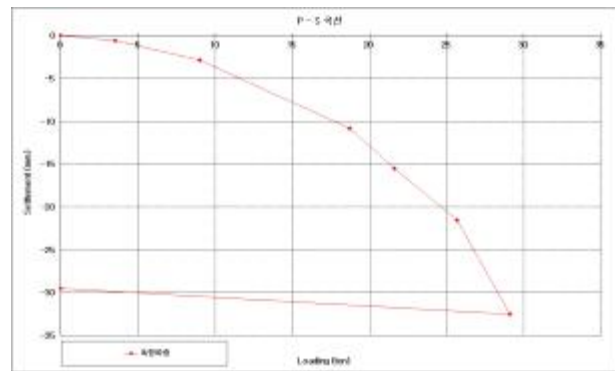
Shaft(73mm) - Blade(200mm) - Depth(1.5m)



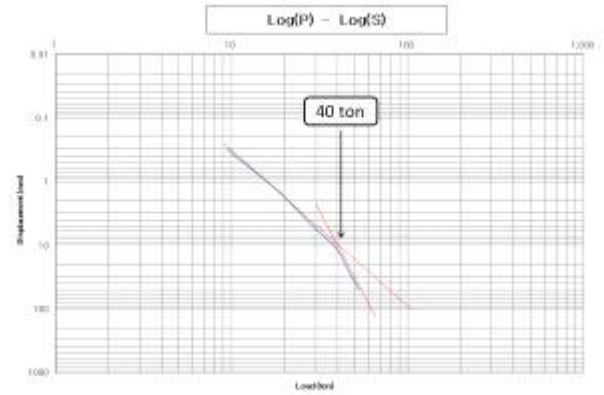
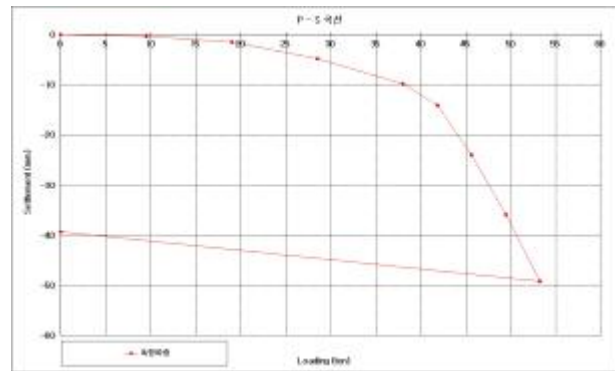
Shaft(73mm) - Blade(200mm) - Depth(4.0m)



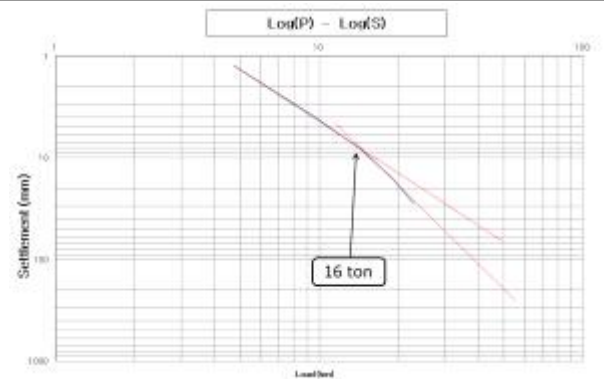
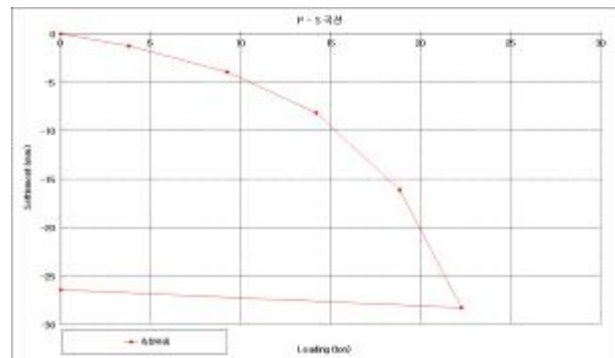
Shaft(73mm) - Blade(200mm) - Depth(6.3m)



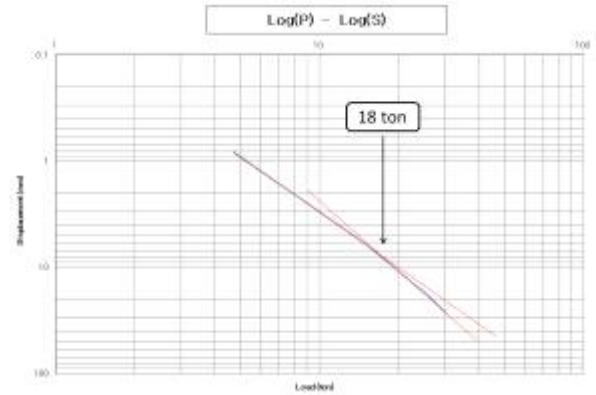
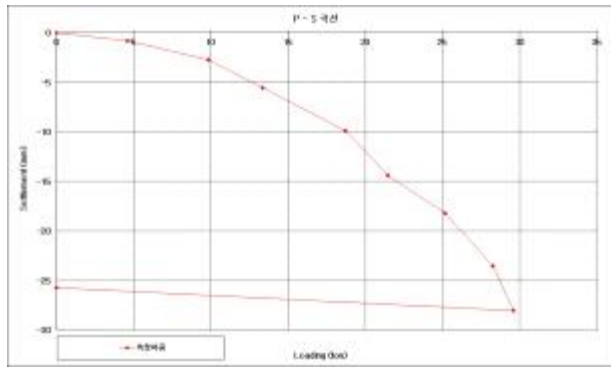
Shaft(73mm) - Blade(200mm) - Depth(8.7m)



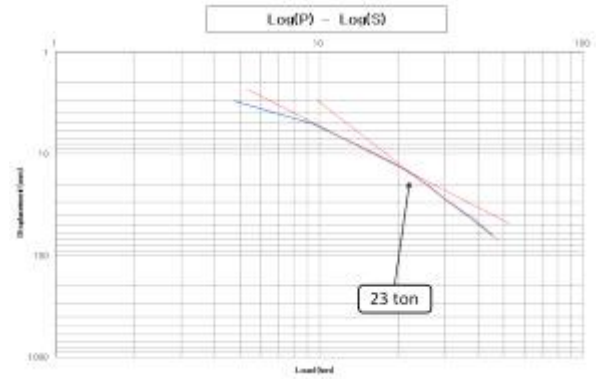
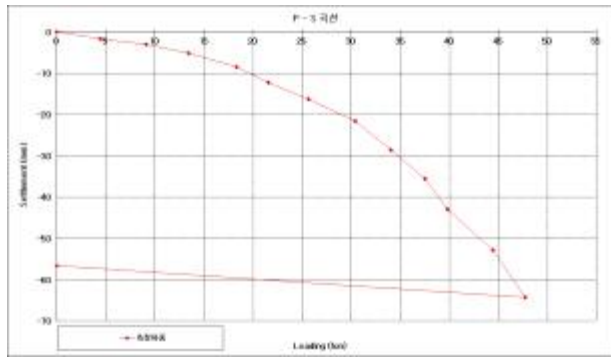
Shaft(73mm) - Blade(250mm) - Depth(1.5m)



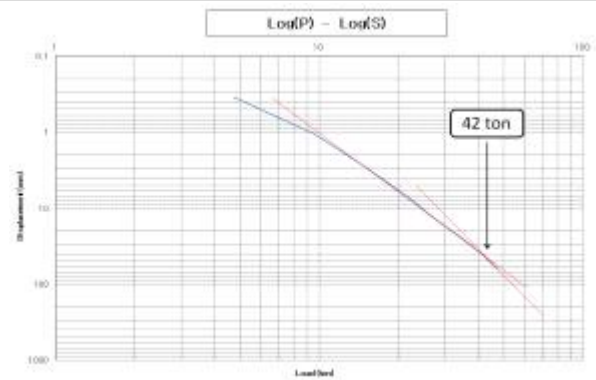
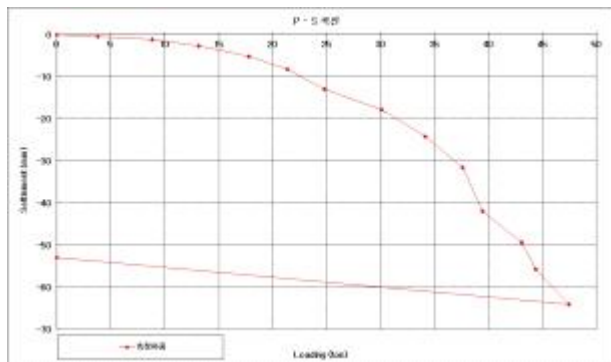
Shaft(73mm) - Blade(250mm) - Depth(4.0m)



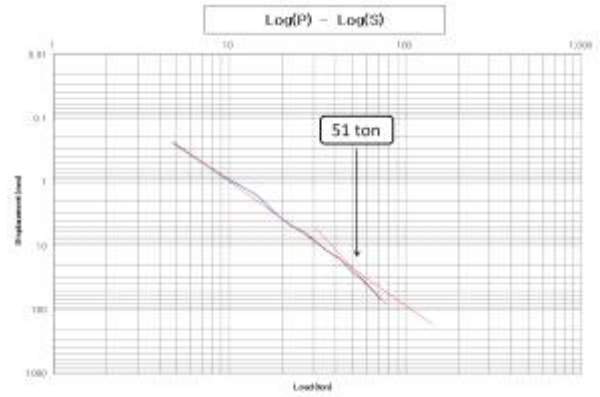
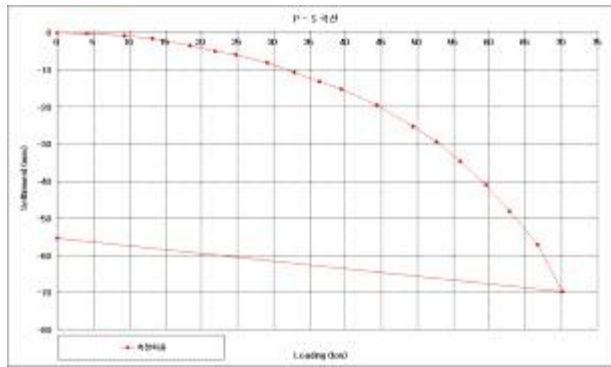
Shaft(73mm) - Blade(250mm) - Depth(6.3m)



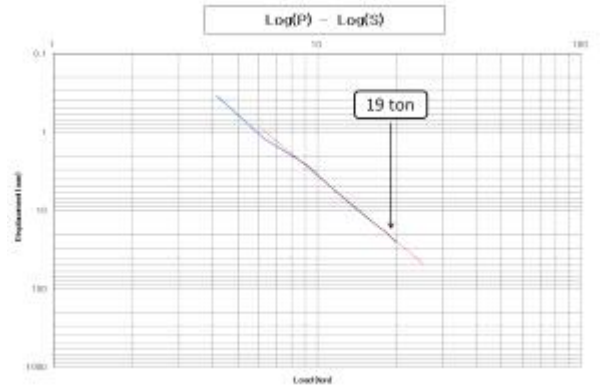
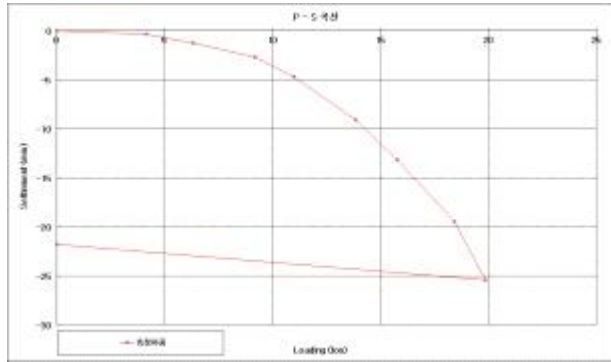
Shaft(73mm) - Blade(250mm) - Depth(8.7m)



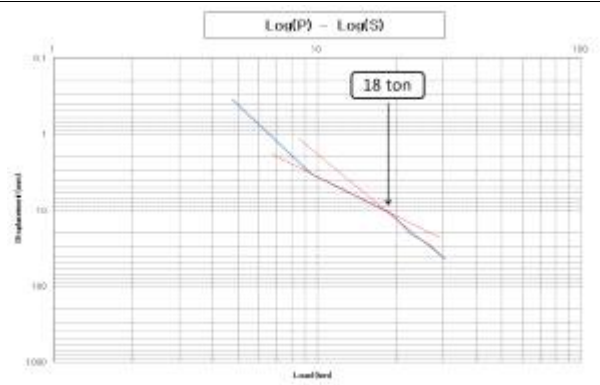
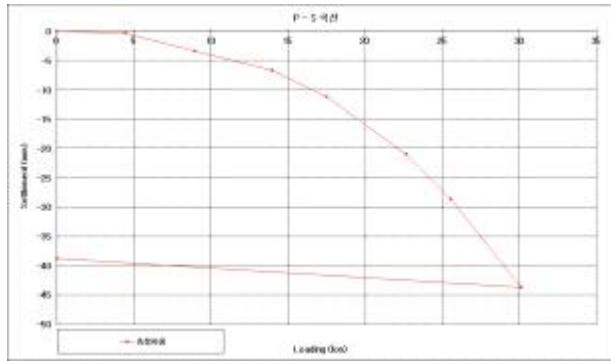
Shaft(73mm) - Blade(250mm) - Depth(11.1m)



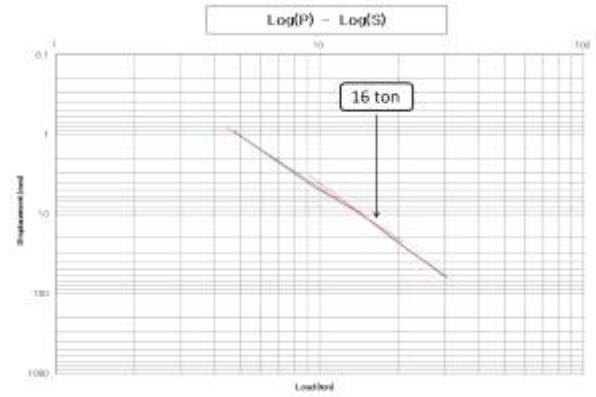
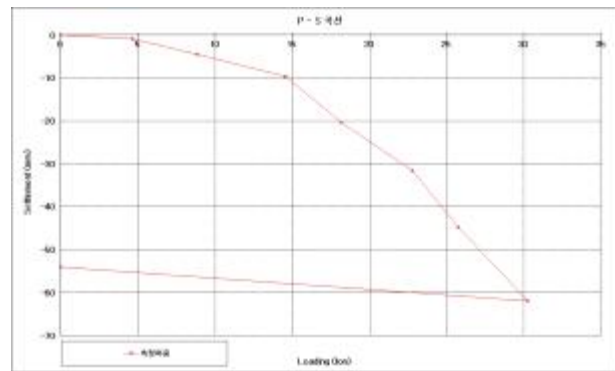
Shaft(89mm) - Blade(200mm) - Depth(1.5m)



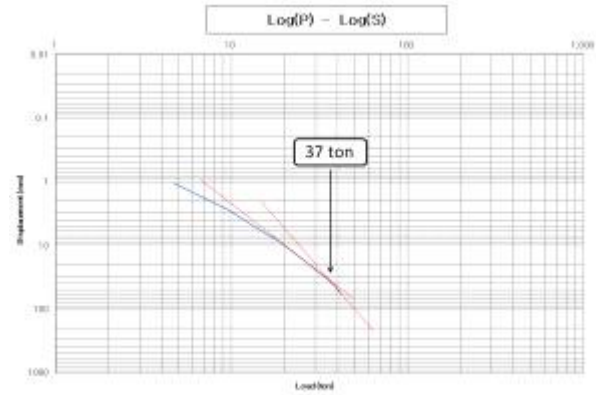
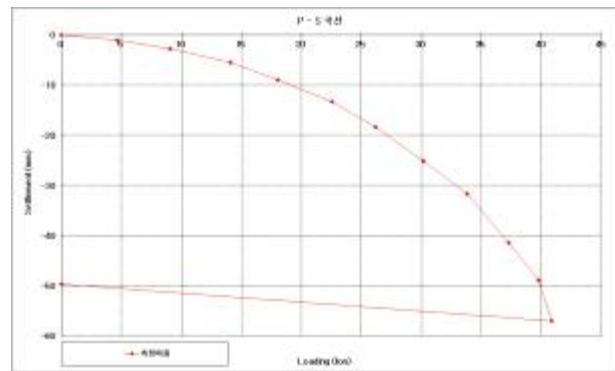
Shaft(89mm) - Blade(200mm) - Depth(4.0m)



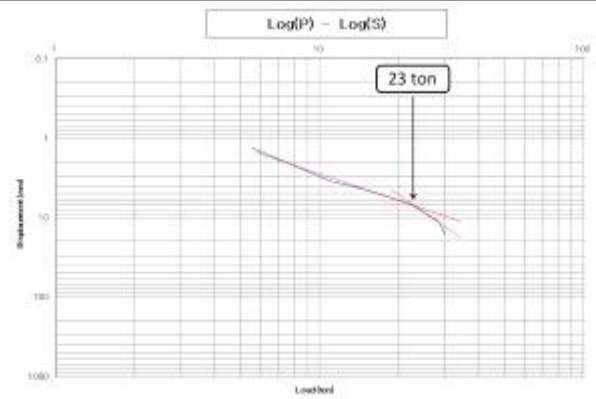
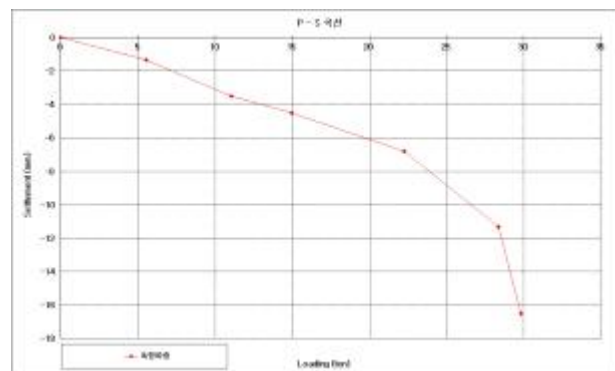
Shaft(89mm) - Blade(200mm) - Depth(6.3m)



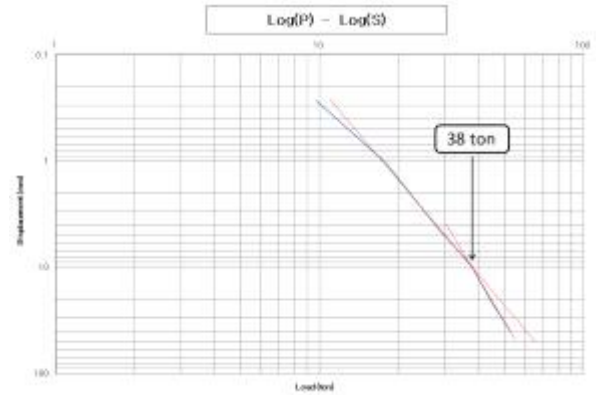
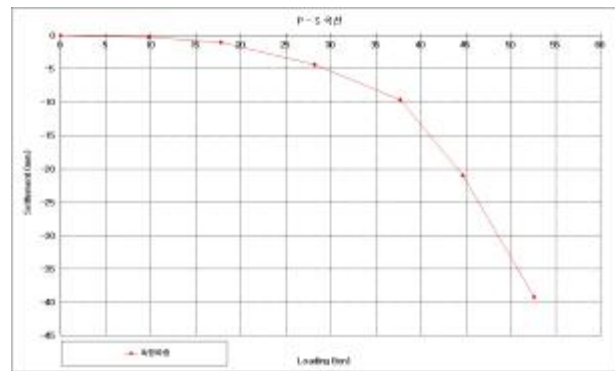
Shaft(89mm) - Blade(200mm) - Depth(8.7m)



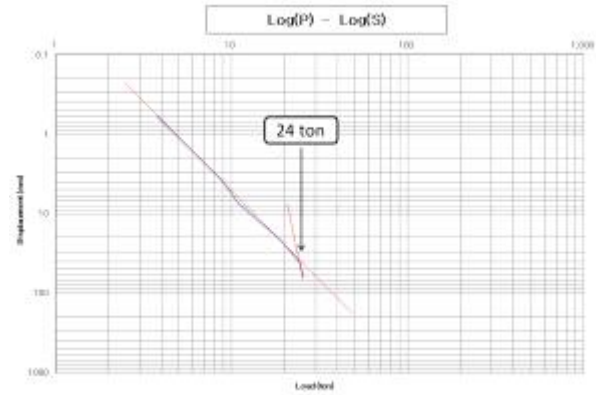
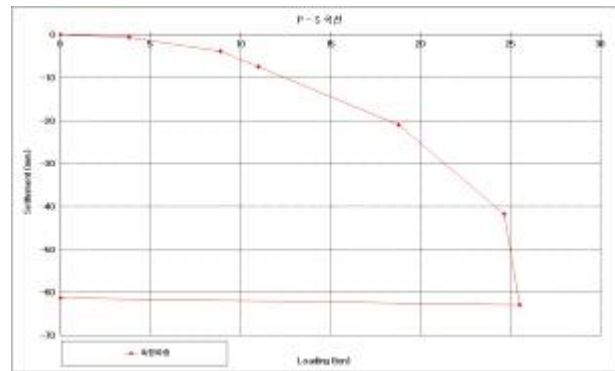
Shaft(89mm) - Blade(250mm) - Depth(1.5m)



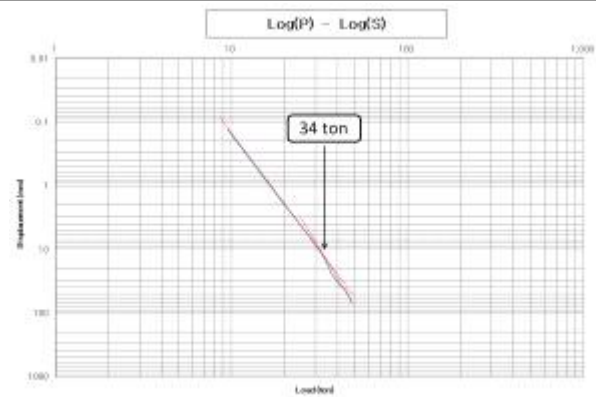
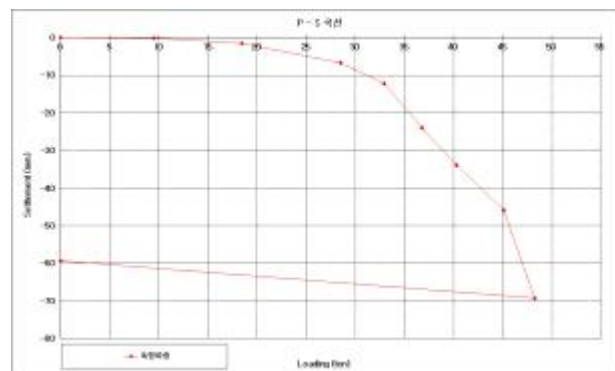
Shaft(89mm) - Blade(250mm) - Depth(4.0m)



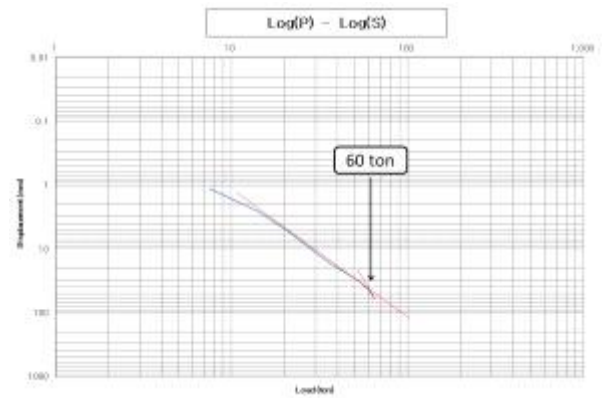
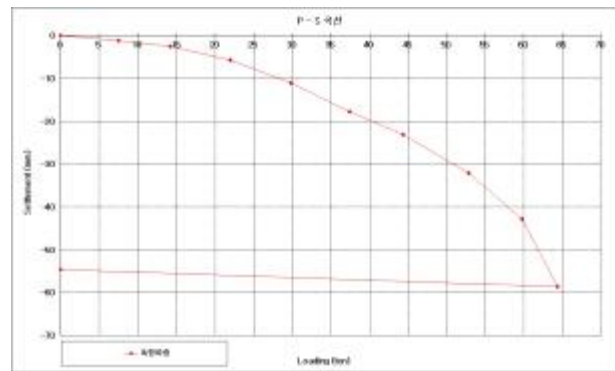
Shaft(89mm) - Blade(250mm) - Depth(6.3m)



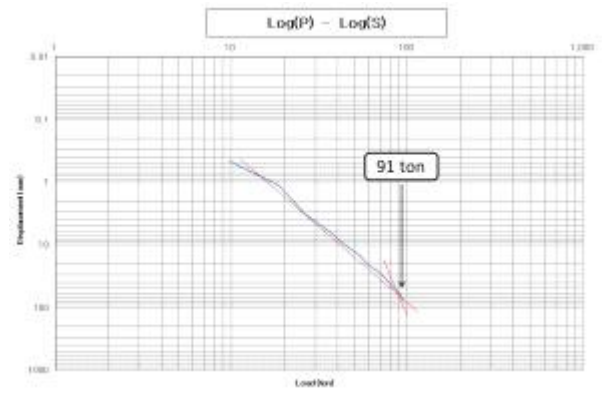
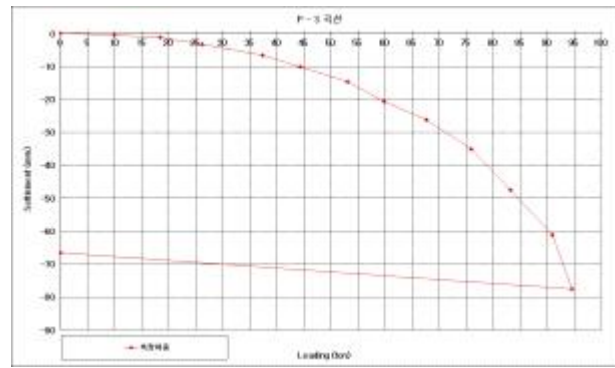
Shaft(89mm) - Blade(250mm) - Depth(8.7m)



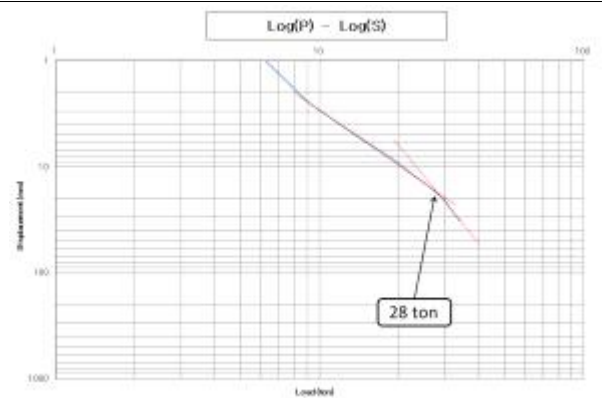
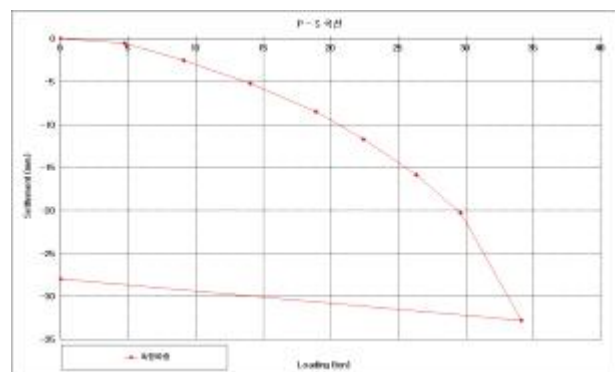
Shaft(89mm) - Blade(250mm) - Depth(11.1m)



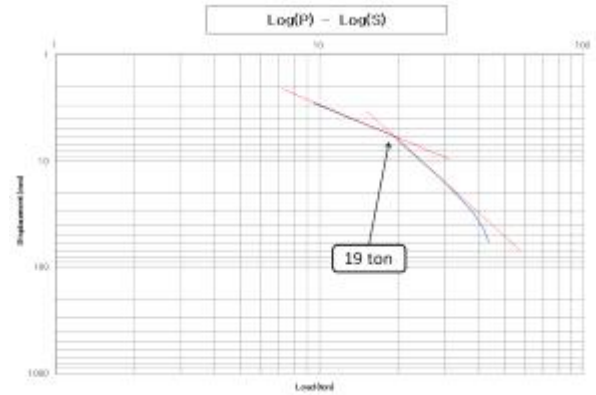
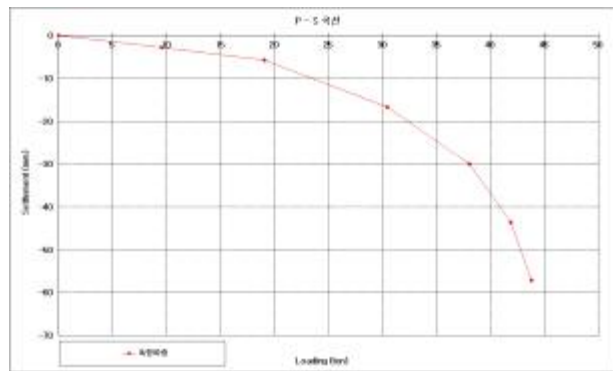
Shaft(89mm) - Blade(250mm) - Depth(13.4m)



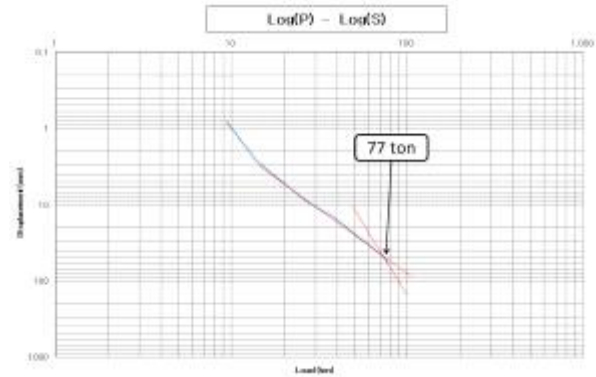
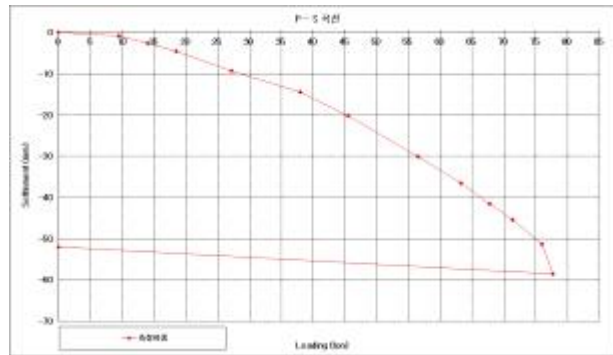
Shaft(114mm) - Blade(200mm) - Depth(1.5m)



Shaft(114mm) - Blade(200mm) - Depth(4.0m)



Shaft(89mm) - Blade(250, 300, 300mm) - Depth (5.6, 4.7, 3.3m)



(마) Helical pile 시험 결과 분석

Shaft 3 종류, helix plate 2 종류를 구성하여 총 22개의 시험을 실시한 결과 예상되는 지지력대비 측정된 항복지지력을 비교 검토하여 표 2.3.2.6에 정리하였다.

현장에서 측정된 항복지지력이 설계 시 예측한 항복지지력보다 평균적으로 1.27배 크게 측정되었다. 침하량이 크게 발생한 것은 helix plate이 설치된 지층의 N치가 30 이하이기 때문인 것으로 판단되며, 실제 시공 시에는 지지력과 침하량을 만족하는 층에 설치하도록 하여야 할 것이다.

표 2.3.2.6 설계지지력과 확인지지력의 비교

Shaft (mm)	Blade (mm)	Depth (m)	N value	예상항복 지지력(ton)	측정항복 지지력(ton)	종료하중 (ton)	종료침하량 (mm)	측정,예상 지지력대비
73	200	1.5	17/30		33	37.9	30.30	
		4.0	9/30	11.2	24	41.5	35.21	2.14
		6.3	12/30	17.5	26	29.1	32.54	1.49
		8.7	18/30	27.1	40	52.4	49.25	1.48
73	250	1.5	17/30		16	22.3	28.27	
		4.0	9/30	17.2	18	29.6	28.03	1.05
		6.3	12/30	26.9	23	47.7	64.36	0.85
		8.7	18/30	40.9	42	47.4	63.92	1.03
		11.1	21/30	57	51	70.1	69.77	0.89
89	200	1.5	17/30		19	19.8	25.40	
		4.0	9/30	11.3	18	30.1	43.79	1.59
		6.3	12/30	17.8	16	30.2	62.00	0.90
		8.7	18/30	27.7	37	40.8	57.04	1.34
89	250	1.5	17/30		23	29.8	16.5	
		4.0	9/30	17.3	38	52.6	39.2	2.20
		6.3	12/30	27.1	24	25.5	62.85	0.89
		8.7	18/30	41.5	34	48.3	69.25	0.82
		11.1	21/30	57.7	60	64.4	58.64	1.04
		13.4	30/30	98.5	91	94.5	77.51	0.92
114	200	1.5	17/30		28	34.1	32.80	
		4.0	9/30	11.5	19	41.2	43.59	1.65
89	250	5.65	12/30	27.1	77	77.7	55.54	평균대비 1.27
	300	4.75	10/30	26.8				
	300	3.35	8/30	20.5				
	합계			74.4				

또한, 표 2.3.2.7에서 보는 바와 같이 helix plate을 1m간격으로 3개 부착한 helical pile의 항복하중은 77ton이고, helix plate을 1개 부착한 helical pile의 해당되는 깊이별 지지력의 합은 74.4ton으로 서로 근접한 결과를 보여주었다. 따라서 helix plate의 간격을 일정이상으로 하였을 시, 복수 helix plate의 선단지지력은 helix plate 수량에 비례한다는 Individual Bearing method 해석이 타당한 것으로 판단된다.

표 2.3.2.7 Helix plate가 1개 부착된 helical pile의 3개 심도 지지력 합과 Helix plate가 3개 부착된 helical pile의 지지력 비교

Shaft (mm)	Blade (mm)	Depth (m)	N value	helix plate 개별 지지력 (ton)	예상항복 지지력 (ton)	측정항복 지지력 (ton)	종료하중 (ton)	종료 침하량 (mm)	비 고
89	250	1.5	17/30			23	29.8	16.5	helix plate 1개 부착 후 심도별 재하시험측정 자료
		4.0	9/30		17.3	38	52.6	39.2	
		6.3	12/30		27.1	24	25.5	62.85	
		8.7	18/30		41.5	34	48.3	69.25	
		11.1	21/30		57.7	60	64.4	58.64	
		13.4	30/30		98.5	91	94.5	77.51	
89	250	5.65	12/30	27.1		77	77.7	55.54	helix plate 3개 부착 후 동일 심도에서 측정된 재하자료
	300	4.75	10/30	26.8					
	300	3.35	8/30	20.5					
	합계			74.4					

(바) 2차년도 시험시공을 위한 helical pile 내장형 재하장치 개발

2차년도의 연구를 진행하기 위하여 그림 2.3.2.8a와 같은 helical pile 내장형 재하장치를 개발하였다. 본 장치는 그림 2.3.2.8b와 같은 helical pile 선단부, 또는 Shaft 사이에 삽입할 수 있도록 제작되었으며 이 재하 장치에 유압장치를 연결하여 양방향으로 하중을 재하 할 수 있게 하였다. 하지만 개발한 helical pile 내장형 재하장치를 이용하여 시험시공을 해 본 결과, 그림 2.3.2.9와 같이 시험 중 피스톤이 돌출되어 재하하기 힘든 상황이 발생하였다.



a. 내장형 재하장치



b. helical pile 선단부

그림 2.3.2.8. helical pile 양방향 재하시험을 위한 내장형 재하장치 및 helical pile 선단부

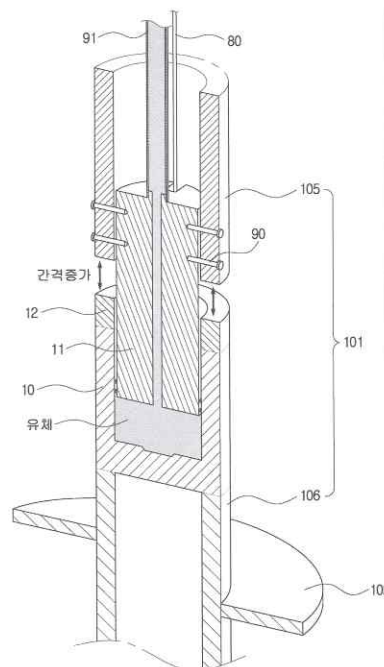


그림 2.3.2.9. 시험중 내장형 재하장치 피스톤 돌출 형태

따라서 2차년도 시험시공 시행 시, 이를 보완 할 수 있도록 복동식 유압셀로 변경하여 시험시공을 실시할 예정이며, 해당 설계 도면작성을 그림 2.3.2.10과 같이 완료한 상태이다.

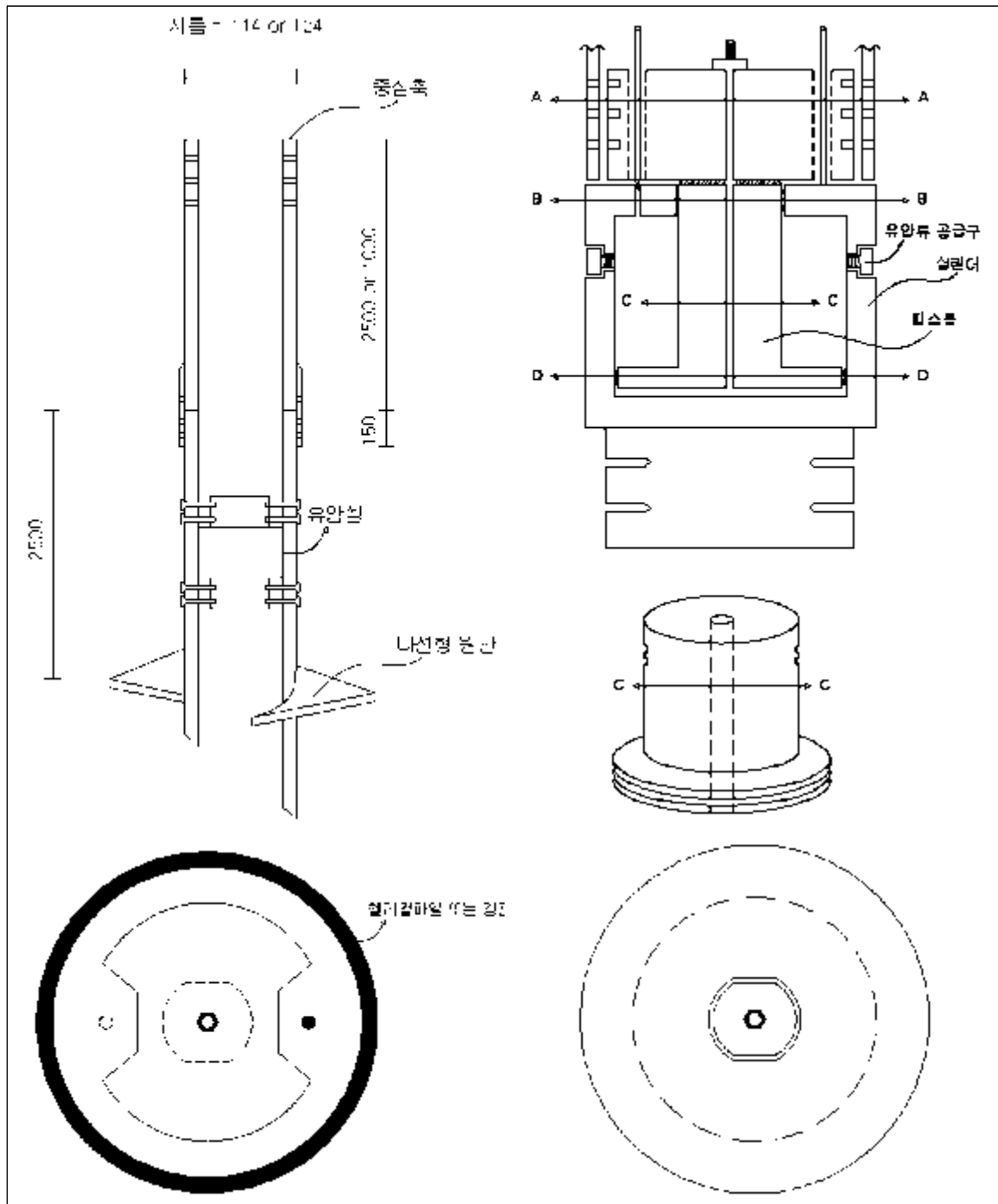


그림 2.3.2.10. 복동식 유압셀 설계도면

다. 1차년도 주요 연구목표별 연구결과 분석

1차년도에서 수행된 주요 연구목표별 연구결과를 다음에 요약하였다.

목표 1	건물기초의 구조체로써 공학적 특성에 부합되는 helical pile의 설계
------	---

Helical pile은 지지력 발현 측면에서 기존 파일과는 달리 복수의 선단지지력을 발현하는 단면(helix plate)이 있으며 복수의 helix plate가 원통형 전단 저항력을 발휘하는 하는 말뚝 기초이다. 또한 Shaft의 직경은 선단지지력이 발현되는 helix plate보다 작아, 좌굴의 가능성이 존재하는 파일로 구분된다. 따라서 건물의 구조체로써 요구되는 helical pile의 공학적 특성 및 최적화 설계의 과정은 다음과 같다.

1 단계 : 지반조사와 병행하여 재하 장치가 내장된 helical pile을 이용하여 지지력 측정

2 단계 : helical pile의 설계

Helical pile의 설계 시 주요검토 항목 및 내용은 다음 표 2.3.2.8과 같다.

표 2.3.2.8 helical pile 설계 시 주요검토 항목 및 내용

구분	검토항목	검토내용																																					
지지력	연직 지지력	- 지반조사 시 수행된 재하시험 결과를 이용할 경우 1단계 : 시험결과를 분석하여 지지력 계산 모델의 결정 (Cylindrical Shear 모델 또는 Individual Bearing 모델 중 선택) 2단계 : 재하시험에서 측정된 지층별 하중-침하 곡선을 역해석하여 C, Φ 값의 측정 또는 각 지지력 성분별 단위면적 당 선단 및 주면마찰력을 이용하여 총 연직지지력 예측 - 재하시험 측정자료가 없을 경우 본 연구결과를 활용하여 해석모델을 결정한 후 각 성분별 지지력 계산 Case 1) Individual Bearing Model <table border="1"> <thead> <tr> <th>구분</th><th>세분</th><th>계산식</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">선단지지력 (극한지지력)</td><td>Terzaghi 식</td><td>$Q_u = 1.3CN_c + 0.3\gamma'BN_\gamma + q'N_q$</td></tr> <tr> <td>Meyerhof식</td><td>$Q_u = CN_cS_c d_c + q'N_qS_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$</td></tr> <tr> <td rowspan="2">Shaft 마찰력</td><td>점성토</td><td>$Q_{shaft} = \pi d H_{eff} a C_u$</td></tr> <tr> <td>사질토</td><td>$Q_{shaft} = \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi$</td></tr> <tr> <td>고려사항</td><td colspan="2">helix plate 수량만큼 선단지지력 합산</td></tr> </tbody> </table> Case 2) Cylindrical Shear Model <table border="1"> <thead> <tr> <th>구분</th><th>세분</th><th>계산식</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">선단지지력 (극한지지력)</td><td>Terzaghi 식</td><td>$Q_u = 1.3CN_c + 0.3\gamma'BN_\gamma + q'N_q$</td></tr> <tr> <td>Meyerhof식</td><td>$Q_u = CN_cS_c d_c + q'N_qS_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$</td></tr> <tr> <td rowspan="2">Shaft 마찰력</td><td>점성토</td><td>$Q_{shaft} = \pi d H_{eff} a C_u$</td></tr> <tr> <td>사질토</td><td>$Q_{shaft} = \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi$</td></tr> <tr> <td rowspan="2">원통형 마찰력</td><td>점성토</td><td>$Q_{helix} = S_f \times (\pi DL_c) \times C_u$</td></tr> <tr> <td>사질토</td><td>$Q_{helix} = \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_3^2 - H_1^2) K_s \tan \phi$</td></tr> <tr> <td>고려사항</td><td colspan="2">선단지지력은 최하단부 helix plate의 지지력만 계산됨</td></tr> </tbody> </table>	구분	세분	계산식	선단지지력 (극한지지력)	Terzaghi 식	$Q_u = 1.3CN_c + 0.3\gamma'BN_\gamma + q'N_q$	Meyerhof식	$Q_u = CN_cS_c d_c + q'N_qS_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$	Shaft 마찰력	점성토	$Q_{shaft} = \pi d H_{eff} a C_u$	사질토	$Q_{shaft} = \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi$	고려사항	helix plate 수량만큼 선단지지력 합산		구분	세분	계산식	선단지지력 (극한지지력)	Terzaghi 식	$Q_u = 1.3CN_c + 0.3\gamma'BN_\gamma + q'N_q$	Meyerhof식	$Q_u = CN_cS_c d_c + q'N_qS_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$	Shaft 마찰력	점성토	$Q_{shaft} = \pi d H_{eff} a C_u$	사질토	$Q_{shaft} = \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi$	원통형 마찰력	점성토	$Q_{helix} = S_f \times (\pi DL_c) \times C_u$	사질토	$Q_{helix} = \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_3^2 - H_1^2) K_s \tan \phi$	고려사항	선단지지력은 최하단부 helix plate의 지지력만 계산됨	
구분	세분	계산식																																					
선단지지력 (극한지지력)	Terzaghi 식	$Q_u = 1.3CN_c + 0.3\gamma'BN_\gamma + q'N_q$																																					
	Meyerhof식	$Q_u = CN_cS_c d_c + q'N_qS_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$																																					
Shaft 마찰력	점성토	$Q_{shaft} = \pi d H_{eff} a C_u$																																					
	사질토	$Q_{shaft} = \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi$																																					
고려사항	helix plate 수량만큼 선단지지력 합산																																						
구분	세분	계산식																																					
선단지지력 (극한지지력)	Terzaghi 식	$Q_u = 1.3CN_c + 0.3\gamma'BN_\gamma + q'N_q$																																					
	Meyerhof식	$Q_u = CN_cS_c d_c + q'N_qS_q d_q + 0.5\gamma BN_\gamma S_\gamma d_\gamma$																																					
Shaft 마찰력	점성토	$Q_{shaft} = \pi d H_{eff} a C_u$																																					
	사질토	$Q_{shaft} = \frac{1}{2} P_s H_{eff}^2 \gamma' K_s \tan \phi$																																					
원통형 마찰력	점성토	$Q_{helix} = S_f \times (\pi DL_c) \times C_u$																																					
	사질토	$Q_{helix} = \frac{\pi}{2} D_a \gamma' (H_3^2 - H_1^2) K_s \tan \phi$																																					
고려사항	선단지지력은 최하단부 helix plate의 지지력만 계산됨																																						

구분	검토항목	검토내용																																																																																																																																						
Helical pile의 안정성 검토	허용 압축 하중	허용압축 응력검토 강재의 허용압축응력은 다음 식으로 계산함 $\sigma_a = 0.6F_y \leq 0.5F_u$ 여기서 F_y = 항복강도 F_u = 인장강도, 통상 $F_u > F_y$ 따라서 구경별 예상되는 허용하중은 아래와 같음																																																																																																																																						
		<table><tr><th>외경 (mm)</th><th>두께 (mm)</th><th>면적 (cm²)</th><th>허용축 하중 (ton)</th><th>무게 (kg/m)</th><th>외경 (mm)</th><th>두께 (mm)</th><th>면적 (cm²)</th><th>허용축 하중 (ton)</th><th>무게 (kg/m)</th></tr><tr><td rowspan="4">48.6</td><td>3.50</td><td>4.96</td><td>12.76</td><td>3.89</td><td rowspan="4">76.3</td><td>4.20</td><td>9.51</td><td>24.49</td><td>7.47</td></tr><tr><td>3.68</td><td>5.19</td><td>13.37</td><td>4.08</td><td>5.16</td><td>11.53</td><td>29.68</td><td>9.05</td></tr><tr><td>4.50</td><td>6.23</td><td>16.05</td><td>4.89</td><td>6.00</td><td>13.25</td><td>34.11</td><td>10.4</td></tr><tr><td>7.14</td><td>9.30</td><td>23.94</td><td>7.30</td><td>9.52</td><td>19.97</td><td>51.41</td><td>15.68</td></tr><tr><td rowspan="4">89.1</td><td>4.20</td><td>11.20</td><td>28.83</td><td>8.79</td><td rowspan="4">114.3</td><td>4.50</td><td>15.52</td><td>39.96</td><td>12.18</td></tr><tr><td>5.49</td><td>14.42</td><td>37.12</td><td>11.32</td><td>6.02</td><td>20.48</td><td>52.71</td><td>16.07</td></tr><tr><td>6.60</td><td>17.11</td><td>44.03</td><td>13.43</td><td>8.10</td><td>27.02</td><td>69.56</td><td>21.21</td></tr><tr><td>11.12</td><td>27.24</td><td>70.12</td><td>21.38</td><td>13.49</td><td>42.72</td><td>110.0</td><td>33.54</td></tr><tr><td rowspan="4">139.8</td><td>4.50</td><td>19.13</td><td>49.23</td><td>15.01</td><td rowspan="4">165.2</td><td>5.00</td><td>25.16</td><td>64.77</td><td>19.75</td></tr><tr><td>6.55</td><td>27.42</td><td>70.58</td><td>21.52</td><td>7.11</td><td>35.31</td><td>90.89</td><td>27.72</td></tr><tr><td>9.30</td><td>38.13</td><td>98.14</td><td>29.93</td><td>10.31</td><td>50.17</td><td>129.13</td><td>39.38</td></tr><tr><td>15.90</td><td>61.82</td><td>159.1</td><td>48.53</td><td>18.26</td><td>84.29</td><td>216.97</td><td>66.17</td></tr><tr><td rowspan="4">216.3</td><td>5.80</td><td>38.36</td><td>98.73</td><td>30.11</td><td colspan="5" rowspan="4"> - 강재의 허용압축강도 = 항복강도의 60% - 관의 무게 : w=0.02466t(D-t) - 강재의 항복강도 = σ_y = 4,400kg/cm² </td></tr><tr><td>8.18</td><td>53.48</td><td>137.69</td><td>41.98</td></tr><tr><td>10.3</td><td>66.72</td><td>171.74</td><td>52.37</td></tr><tr><td>23.0</td><td>139.7</td><td>359.65</td><td>109.68</td></tr></table>	외경 (mm)	두께 (mm)	면적 (cm ²)	허용축 하중 (ton)	무게 (kg/m)	외경 (mm)	두께 (mm)	면적 (cm ²)	허용축 하중 (ton)	무게 (kg/m)	48.6	3.50	4.96	12.76	3.89	76.3	4.20	9.51	24.49	7.47	3.68	5.19	13.37	4.08	5.16	11.53	29.68	9.05	4.50	6.23	16.05	4.89	6.00	13.25	34.11	10.4	7.14	9.30	23.94	7.30	9.52	19.97	51.41	15.68	89.1	4.20	11.20	28.83	8.79	114.3	4.50	15.52	39.96	12.18	5.49	14.42	37.12	11.32	6.02	20.48	52.71	16.07	6.60	17.11	44.03	13.43	8.10	27.02	69.56	21.21	11.12	27.24	70.12	21.38	13.49	42.72	110.0	33.54	139.8	4.50	19.13	49.23	15.01	165.2	5.00	25.16	64.77	19.75	6.55	27.42	70.58	21.52	7.11	35.31	90.89	27.72	9.30	38.13	98.14	29.93	10.31	50.17	129.13	39.38	15.90	61.82	159.1	48.53	18.26	84.29	216.97	66.17	216.3	5.80	38.36	98.73	30.11	- 강재의 허용압축강도 = 항복강도의 60% - 관의 무게 : w=0.02466t(D-t) - 강재의 항복강도 = σ_y = 4,400kg/cm²					8.18	53.48	137.69	41.98	10.3	66.72	171.74	52.37	23.0	139.7	359.65	109.68
		외경 (mm)	두께 (mm)	면적 (cm ²)	허용축 하중 (ton)	무게 (kg/m)	외경 (mm)	두께 (mm)	면적 (cm ²)	허용축 하중 (ton)	무게 (kg/m)																																																																																																																													
		48.6	3.50	4.96	12.76	3.89	76.3	4.20	9.51	24.49	7.47																																																																																																																													
			3.68	5.19	13.37	4.08		5.16	11.53	29.68	9.05																																																																																																																													
			4.50	6.23	16.05	4.89		6.00	13.25	34.11	10.4																																																																																																																													
			7.14	9.30	23.94	7.30		9.52	19.97	51.41	15.68																																																																																																																													
		89.1	4.20	11.20	28.83	8.79	114.3	4.50	15.52	39.96	12.18																																																																																																																													
			5.49	14.42	37.12	11.32		6.02	20.48	52.71	16.07																																																																																																																													
			6.60	17.11	44.03	13.43		8.10	27.02	69.56	21.21																																																																																																																													
11.12	27.24		70.12	21.38	13.49	42.72		110.0	33.54																																																																																																																															
139.8	4.50	19.13	49.23	15.01	165.2	5.00	25.16	64.77	19.75																																																																																																																															
	6.55	27.42	70.58	21.52		7.11	35.31	90.89	27.72																																																																																																																															
	9.30	38.13	98.14	29.93		10.31	50.17	129.13	39.38																																																																																																																															
	15.90	61.82	159.1	48.53		18.26	84.29	216.97	66.17																																																																																																																															
216.3	5.80	38.36	98.73	30.11	- 강재의 허용압축강도 = 항복강도의 60% - 관의 무게 : w=0.02466t(D-t) - 강재의 항복강도 = σ_y = 4,400kg/cm²																																																																																																																																			
	8.18	53.48	137.69	41.98																																																																																																																																				
	10.3	66.72	171.74	52.37																																																																																																																																				
	23.0	139.7	359.65	109.68																																																																																																																																				

구분	검토항목	검토내용
Helical pile의 안정성 검토	좌굴 안정성 검토	- 아래의 수식을 이용하여 좌굴하중을 계산. Helical pile이 지반에 삽입되었을 시, 좌굴강도는 주변 지반의 강도에 따라 달라지므로 Firm soil 인 경우와 Soft soil 인 경우를 잘 구분하여 계산. $P_n = A \times f_{cr}$ 여기서, $f_{cr} = 0.658 \lambda_c^2 \times f_y, \quad \lambda_c \leq 1.5$ $f_{cr} = \left[\frac{0.877}{\lambda_c^2} \right] \times f_y, \quad \lambda_c > 1.5$ $\lambda_c = \frac{kl}{r\pi} \sqrt{\frac{F_y}{E}}$ $r = \sqrt{\frac{d^2 - d_1^2}{2}}, \quad d : \text{외경}, d_1 : \text{내경}$ - Helical pile의 좌굴강도는 helical pile 두부 처리방법에 대해서도 달라지므로 두부 처리방법을 고려하여 다음과 같은 유효길이 계수를 적용 ■ Effective length factor

구분	검토항목	검토내용																								
Helical pile의 안정성 검토	접합 및 용접강도	- 용접 강도$P_w = \pi d t_w \sigma_s$$\sigma_s = 0.7 \sigma_y$$P_w = \text{용접 접합 강도}$$\sigma_s = \text{강재의 최소 전단강도}$ - 굽힘 강도$Q = 2AP$$P = \frac{\sigma_y (0.5 t_p)}{IA \lambda}$$Q = \text{굽힘 강도}$$A = \text{반원의 단면적}$$I = \text{helix plate의 단면이차모멘트}$$\lambda = \frac{2D}{3\pi} - 0.5d$																								
	관입성 검토	1단계 : 재하시험 또는 극한지지력을 예측 2단계 : 사용될 helical pile의 구경 선택 3단계 : 구경별 토크계수 K_t의 결정 <table><tr><td>Shaft 직경(mm)</td><td>60</td><td>73</td><td>89</td><td>114</td></tr><tr><td>토크계수(ft-l)</td><td>10</td><td>9</td><td>8</td><td>7</td></tr></table> 4단계 : 다음의 식을 이용하여 관입에 필요한 토크 T를 계산$Q_u = TK_t$ 5단계 : 사용 Shaft 재료의 항복모멘트의 확인(재료시험 성적서 적용) 구경별 Shaft 재료의 항복모멘트 <table><tr><td>Shaft 직경(mm)</td><td>60</td><td>73</td><td>89</td><td>114</td></tr><tr><td>항복모멘트(ft · lb)</td><td>4,130</td><td>7,800</td><td>12,100</td><td>23,000</td></tr><tr><td>조건</td><td colspan="4"> - 항복강도 = 65 ksi - 인장강도 = 80 ksi </td></tr></table> (관입에 소요되는 토크 T가 재료의 항복모멘트보다 작아야 함)	Shaft 직경(mm)	60	73	89	114	토크계수(ft-l)	10	9	8	7	Shaft 직경(mm)	60	73	89	114	항복모멘트(ft · lb)	4,130	7,800	12,100	23,000	조건	- 항복강도 = 65 ksi - 인장강도 = 80 ksi		
Shaft 직경(mm)	60	73	89	114																						
토크계수(ft-l)	10	9	8	7																						
Shaft 직경(mm)	60	73	89	114																						
항복모멘트(ft · lb)	4,130	7,800	12,100	23,000																						
조건	- 항복강도 = 65 ksi - 인장강도 = 80 ksi																									
Helical pile 설계 시 중요 기술적 검토사항 및 방법을 상기와 같이 제시함. 1차년도에서 수행된 공학적 특성에 부합되는 helical pile 설계는 2차년도 시험시공결과를 적용하여 상기 검토사항에 대한 검증 및 구체적인 수치를 제공토록 함.																										

목표 2	목표지지력 크기에 따른 최적의 helical pile 형상 및 규격 제시
------	--

1차년도에서는 국외사례연구를 통하여 설계하중별 helical pile의 규격을 결정하였으며, 1차년도 시험시공을 통하여 1차 검증을 실시하였다.

표 2.3.2.9. 설계하중별 helical pile의 규격

N 치	Shaft(mm)		helix plate(mm) 직경 및 두께				helix plate Pitch (mm)	최대설 치토크 (t - m)	토크 비 (m ⁻¹)	무게 (kg/m)	structural capacity (ton)		capacity by torque (ton)	
	외경	두께	①	②	③	두께					항복	허용	항복	허용
27	73.0	5.08	203	254	305	9.53	76.2	0.69	29.7	8.51	30	15	23	11
50	76.2	6.35	203	254	305	9.53	76.2	1.1	26.4	11.0	55	28	32	16
45	89.9	5.33	203	254	356	9.53	76.2	1.4	23.1	11.0	45	23	35	18
45	(R) 88.9	5.33	203	254	356	9.53	76.2	1.8	23.1	11.0	45	23	46	23
19	114.3	6.35	203	254	356	15.9	92.2	3.04	18.8	16.9	96	48	63	31
23	(R) 114.3	6.35	203	254	406	15.9	92.2	3.73	18.8	16.9	96	48	77	38
25	114.3	7.87	254	305	356	15.9	92.2	3.9	18.8	20.7	122	61	80	40
27	(R) 114.3	7.87	254	305	356	15.9	92.2	4.4	18.8	20.7	122	61	91	46
15	139.7	7.62	305	406	508	22.2	98.6	7.3	15.5	24.9	273	137	125	62
23	139.7	9.14	305	406	609	22.2	98.6	11.45	15.5	29.4	270	135	195	98
12	145.2	6.35	305	406	508	22.2	98.6	5.5	15.2	21.7	128	64	92	46
13	(R) 145.2	6.35	305	406	508	22.2	98.6	6.22	15.2	21.7	128	64	104	52
15	145.2	9.39	305	406	508	22.2	98.6	7.5	15.2	31.4	199	100	124	62
17	(R) 145.2	9.39	305	406	508	22.2	76.2	9.0	15.2	31.4	199	100	150	75
22	(R) 145.2	11.7	305	406	508	22.2	76.2	11.0	15.2	38.5	250	125	184	92
비고	- (R) : 두부 보강파일 - N 치는 최소치 - 설계하중은 Capacity by Torque로 적용됨 - Shaft의 항복강도 = 460MPa 적용													

표 2.3.2.9.에서 보는 바와 같이 구경별 helical pile의 허용설계하중은 재료의 압축강도보다

는 설치 시 발생하는 비틀림 모멘트에 대한 Shaft의 강도에 좌우된다. 따라서 같은 구경 및 두께를 갖는 Shaft의 경우, 설치 시에 발생하는 Shaft의 비틀림 모멘트를 감소시키면 Structural Capacity를 적용 가능하므로 설계하중을 평균 30% 가량 증가시킬 수 있다. helix plate는 Shaft 직경의 2.6배 이상 되도록 하여 원활한 회전관입이 되도록 한다.

목표 3	지지력의 크기별 helix plate의 크기 및 두께 제시
------	----------------------------------

문헌조사에 따르면 설계하중의 크기가 증가함에 따라 Shaft의 직경도 증가하며, helix plate의 수량 및 두께도 증가하여야 한다. 설계하중의 크기에 따른 helix plate의 크기 및 두께는 다음과 같다.

표 2.3.2.10. 설계하중의 크기에 따른 helix plate의 크기 및 두께

helix plate 직경 (in)	Shaft 직경 (in)	유효 면 적 (ft ²)	helix plate 의 두께 (in)	최 대 허 용 하 중 (lbs)
8	2.375	0.318	0.38	47,500
10		0.515		43,500
12		0.755		37,500
8	2.875	0.304	0.375	73,000
10		0.500		64,000
12		0.740		47,400
12		0.740	0.50	70,500
14		1.020		58,500
16		1.350		50,000
8	3.500	0.283	0.38	65,000
10		0.479		51,000
12		0.719		44,500
12		0.719	0.50	80,500
14		1.000		67,000
16		1.330		64,500
10		0.435	0.50	117,000
12	4.500	0.675		94,500
14		0.959		83,000
16		1.290		76,000

그러나 상기에서 검토된 최대 허용압축하중의 크기에 따른 helix plate의 두께는 helix plate 하부지반의 강도의 크기를 고려하지 않은 상태에서 제시된 허용 연직지지력으로써 실제 최대 허용압축하중은 helix plate 하부지반의 강성에 따라 크게 좌우됨을 인식할 필요가 있다. 따라서 상기에서 제시된 최대 허용 하중에 따른 helix plate의 직경은 최소의 가이드 라인이다. 시공 중 발생하는 지반교란을 극소화시키기 위해서는 helix plate의 두께가 가능한 얇아야 하지만, 설계하중에 의해 helix plate의 굽힘 현상이 발생하지 않도록 설계되어야

한다. 1차년도에서 helix plate의 실제 굽힘 저항강도를 확인하고자 하였으나, 1차년도 시험 시공에서는 설계하중의 크기별 helix plate의 두께를 변화시키지는 못하였으며 추후 2차년도 시험시공에서 설계하중의 크기 증가에 따른 helix plate의 최대 굽힘 저항강도까지 재하 시험을 수행하여 설계하중별 최적의 helix plate의 두께를 제시하고자 한다.

본 1단계 시험시공에서는 helix plate의 두께를 모두 20mm로 하였으며, 재하 종료 후 Helcial pile을 회수하여 helix plate의 상태를 점검한 결과 helix plate의 굽힘 현상은 발생하지 않았다. 이는, 최대 재하하중 40ton에서 helix plate의 두께 20mm가 충분한 굽힘 강도를 가지고 있었기 때문으로 판단된다. 따라서 2차년도 시험시공에서는 설계하중의 크기에 따라 helix plate의 두께를 차등 적용하여 설계하중 및 지반조건에 따른 최적의 helix plate 두께를 결정하는 식을 제안하고자 한다.

목표. 4	목표지지력 도달에 필요한 Shaft 허용 비틀림 모멘트의 결정
-------	------------------------------------

Helical pile은 지상에서 기 제작된 후 회전관입하여 지중에 삽입되는 말뚝이므로 Shaft은 타공법의 파일과는 달리 지나치게 큰 비틀림 모멘트를 받게 된다. helical pile은 지지력의 크기를 증가시킬수록 시공 중 더욱 큰 비틀림 모멘트를 받아야 하므로 비틀림 모멘트에 대해 충분한 강성을 갖도록 최소 640MPa 이상의 항복강도를 갖는 강재를 사용해야 한다. 따라서 helical pile의 재료강도 선정 시 가장 중요한 점은 목표 지지력 도달에 필요한 토크를 견딜 수 있는 재료의 형상 및 저항 비틀림 모멘트를 갖는 재료를 선택하는 일이다. 문헌 조사에 따르면 항복하중별 helical pile 규격별 항복 토크는 표 2.3.2.11와 같다.

표. 2.3.2.11 허용지지력의 크기 및 Shaft의 크기별 최대토크

Shaft Specifications					Structural Capacity (Tension & Comp)		Maximum Torque (t-m)	Capacity to Torque Ratio (m ⁻¹)	Geotechnical Capacity (Tension & Comp)	
Design wall Gauge (cm)	Outside Diameter (cm)	Approx Weight (kg)	Min. Yield Strength (kg/cm ²)	Min. Tensile Strength (kg/cm ²)	Ultimate (tons)	Allowable (tons)			Ultimate (tons)	Allowable (tons)
0.508	7.315	8.5209	3234.12	4359.03	30	15	0.678	29.52	23	11
0.330	7.620	5.979	4569.95	5624.55	22	11	0.542	26.24	16	8
0.330	7.620	5.979	4569.95	5624.55	22	11	0.813	26.24	24	12
0.635	7.620	11.06	4569.95	5624.55	55	28	1.085	26.24	32	16
0.635	7.620	11.06	4569.95	5624.55	55	28	1.695	26.24	50	25
0.533	8.890	11.06	4569.95	5624.55	45	23	1.356	22.96	35	18
0.533	8.890	11.06	4569.95	5624.55	45	23	1.763	22.96	46	23
0.635	11.430	17.04	4569.95	5624.55	96	48	2.983	18.696	63	31
0.635	11.430	17.04	4569.95	5624.55	96	48	3.661	18.696	77	38
0.787	11.430	20.78	4569.95	5624.55	122	61	3.796	18.696	80	40
0.787	11.430	20.78	4569.95	5624.55	122	61	4.339	18.696	91	46
0.762	13.970	25.0	8788.36	9491.43	273	137	7.186	15.416	125	62
0.914	13.970	29.60	7030.69	10546.04	270	135	11.253	15.416	195	98
0.635	14.529	21.80	4569.95	5624.55	128	64	5.423	15.088	92	46
0.635	14.529	21.80	4569.95	5624.55	128	64	6.101	15.088	104	52
0.940	14.529	31.70	4569.95	5624.55	199	100	7.321	15.088	124	62
0.940	14.529	31.70	4569.95	5624.55	199	100	8.813	15.088	150	75
1.168	14.529	38.72	4569.95	5624.55	250	125	8.948	15.088	152	76
1.168	14.529	38.72	4569.95	5624.55	250	125	10.847	15.088	184	92
0.813	21.920	42.6	2952.89	4077.80	175	88	11.524	10.168	132	66

목표. 5	지반교란을 극소화시킬 수 있는 helix plate의 설계
-------	----------------------------------

(1) helix plate의 기능

Helical pile에 부착된 helix plate은 지반으로 일정한 경사각을 가지고 있어, 유압 모터의 회전력을 통해 Shaft을 지반으로 삽입 시킨다. 나선 모양은 파일 설치 시 Shaft을 따라 관입 추진력을 제공한다. 또한, helical pile 설치 후 helix plate은 Shaft을 통해 축력을 helix plate으로 전달시켜 복수의 선단지지력을 유발하게 한다.

(2) helix plate의 설치간격

helix plate은 최소 90cm 이상의 간격을 두고 다단으로 설치가 가능하다. 또한 복수의 helix plate을 Shaft에 부착할 경우에는 하부로 갈수록 직경을 축소 부착하여 관입력이 증가하도록 한다.

(3) helix plate의 각도

helix plate의 지중에 삽입 각도는 최소 3°이상으로 하며 helix plate의 모든 측정 위치에서도 지중에 삽입되는 각도가 일정하도록 helix plate을 제작 한다.

(4) helix plate의 직경과 수량

지지력의 크기를 증가시키기 위해서는 helix plate의 직경과 수량을 증가시키는 것이 가장 경제적이다. 이때 helix plate의 위치별 직경 및 간격, 두께, helix plate의 휨 가능성에 충분한 검토가 필요하다. 문헌조사에 따르면 helix plate의 직경은 대략 200 ~ 600mm 범위에 있으며 설계지지력이 클수록 직경과 두께가 증가하여야 한다.

목표. 6	작은 직경의 Shaft으로 좌굴 억제를 위한 helical pile 설계
-------	--

전술한 바와 같이 helical pile은 선단지지력을 유발시키는 helix plate에 비하여 Shaft의 구경이 매우 작기 때문에, 설치 심도가 깊을 경우 helical pile의 좌굴 가능성이 높아진다.

좌굴에 대한 안정성을 높이기 위해서는 Shaft의 직경을 증가시켜야 하지만, Shaft의 직경 증가는 재료비의 상승을 초래하여 helical pile의 장점을 크게 훼손한다. 따라서 작은 직경의 Shaft을 사용하는 helical pile의 장점을 훼손하지 않으면서도 Shaft의 단면을 저렴한 재료로 보강하거나 helical pile의 설계하중 및 직경의 크기, 시공심도에 따라 지중에 최대 전단력이 유발될 위치에 별도의 helix plate을 추가 배치하여 좌굴을 억제하는 방안에 대하여 특허를 출원하였다.

목표. 7	목표지지력 도달을 위한 유압 모터의 토크치 제시
-------	----------------------------

Helical pile은 지상에 설치된 유압 모터의 회전력으로 천공 및 항타 공정없이 지지층까지 삽입된다. 따라서 시공 중 심도별 회전모멘트를 연속 측정하면 시공 도중에도 개략적 극한 지지력을 비교적 정확히 예측할 수 있다. 통상 유압 모터의 회전력과 지지력과의 관계는 아래식과 같이 표현된다.

$$Q_u = K_t T$$

여기서

Q_u = helical pile의 극한지지력 (ton)

K_t = helical pile의 토크계수 (m^{-1})

T = 시공 중 측정된 회전 모멘트 (ton·m)

K_t 크기에 주는 영향인자는 helix plate의 직경, helix plate의 두께, 흙의 종류, Shaft의 직경, helix plate의 pitch등이 있으나, 많은 현장경험으로 확인된 K_t 의 가장 주요한 영향인자는 Shaft의 직경이다. 다른 영향인자들은 지지력-토크 관계에 거의 영향을 미치지 못한다고 알려져 있다.

통상 Shaft의 직경이 커질수록 K_t 는 작아지는 경향을 가지며, 사례연구를 통해 확인된 Shaft의 직경 및 그에 따른 항목하중별 토크계수 K_t 현황은 표 2.3.2.12와 같다.

표 2.3.2.12 토크계수 K_t 와 Shaft 직경과의 관계

항복하중 (ton)	발현지반 N치	Shaft 직경 (mm)	Shaft 두께	helix plate 직경	토크계수 K_t (m ⁻¹)
23	27	73.0	5.08	254	29.7
32	47	76.0	6.35	254	26.3
35	45	88.9	5.33	254	23.1
46*	45	88.9	5.33	254	23.1
63	19	114.3	6.35	254	18.8
77*	23	114.3	6.35	288	18.8
80	25	114.3	7.87	305	18.8
91*	27	114.3	7.87	305	18.8
125	15	139.7	7.62	406	15.5
150	15	145.2	9.39	406	15.2
184*	22	145.2	11.7	406	15.2
비 고	• helix plate의 직경의 평균직경 • *는 helical pile 두부를 보강한 파일임				

따라서 시공될 Shaft만 결정되면 토크계수 K_t 가 결정되기 때문에 목표지지력 도달에 필요한 현장시공관리를 위한 토크치가 결정됨으로써 모든 시공파일의 지지력 확인을 할 수 있다.

3. 2차년도

가. 개발 목표

연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
지반조건 및 설계지지력 크기에 따른 helical pile의 거동특성 연구 • 1차연구 결과를 활용하여 2차 시험시공을 실시하여 최적의 helical pile 설계 • 2차 시험시공시 수직도 관리에 대하여 정밀 검토 후, 그 결과를 지방서에 반영 • 국내 지반조건에 맞는 허용 비틀림 모멘트 제시 • helical pile의 좌굴검토(국부 좌굴 포함) • 지반조건 및 지지력의 크기에 따른 helix plate의 크기 및 설치 수량, 위치 선정 및 효과 확인 • 좌굴 억제 및 수평 지지력 증가를 위한 파일 설계 및 확인 • 시공시 발생하는 지표면 부근 지반 동공발생 대책 공법제시 • 재하시험 결과를 이용 하여 설계지지력 예측 식 제시	• 시험시공실시 (3개소 현장) 36개파일 • 지반조사실시 (12개소) • 정재하시험 (36개소) • 수치해석 (36단면) • 지지력예측	• 국내외 논문 발표 - 지반공학회 - 대한토목학회 논문집 - SCI(E)급 • 특허출원	4건 1건	20%
지지력 확인시스템이 내장된 표준 규격 helical pile의 제작 및 평가 • 설계시 적용되는 helical pile 설계 • 유압장치 가 내장된 helical pile의 제작 및 성능 평가 • 유사공법과의 경제성 분석	• 시험 시공시 효능 평가(2개소) • 두부압축 정재하시험과 비교 분석(2개소)	• 특허출원	1건	20%
지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능평가 • 지반조건 별 그라우팅 압력 및 시멘트 배합비 결정 • helical pile내 그라우팅 장비개발 • 그라우팅 실시에 따른 지지력 개선 효과 확인 • helical pile와 기존의 소구경 현장타설 말뚝과의 적용 타당성 검토	• 시험시공실시 및 지반개량 효과확인 (4개소) • 지반개량효과를 지반조사를 통해 확인 • 정재하시험 (4개소)	• 특허출원 • 국내외 논문 발표	1건 2건	20%
Helical pile 시공장비 개발 • 지지력과 토크를 측정하여 목표지지력별 시공장비 최대 출력토크제시 • helical pile 현장 관리시스템 개발	• 시험시공시 심도별 토크측정 • 동재하시험 가능토록 개발 • 모든 시공된 말뚝은 심도-토크, 경사	• 특허출원 • 시공 관리 시스템 개발	1건 1건	15%

	도를 측정			
설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 및 시공 시방서 작성	• 시공 시방서 • 설계 지침서 • 현장관리운영 (소프트웨어, 하드웨어개발)	• 제품개발 • 소프트웨어 등록	1건 1건	25%
소 계				100%

2차년도 연구개발은 본 연구개발의 최종 목표 달성을 위한 연구내용으로 구성되어 있으며 각 연구목표에 대한 연구내용은 다음과 같다,

(1) 지반조건 및 설계지지력크기에 따른 helical pile의 거동특성 연구

- 1차연구 결과를 활용하여 2차 시험시공을 실시하여 최적의 helical pile 설계
- 2차 시험시공 시 수직도 관리에 대하여 정밀 검토 후, 그 결과를 시방서에 반영
- 국내 지반조건에 맞는 허용 비틀림 모멘트 제시
- 지반조건 및 지지력의 크기에 따른 helix plate의 크기 및 설치 수량, 위치 선정 및 효과 확인
- Helical pile의 좌굴검토(국부 좌굴 포함)
- 좌굴 억제 및 수평 지지력 증가를 위한 파일 설계 및 확인
- 시공 시 발생하는 지표면 부근 지반 동공발생 대책 공법제시
- 재하시험 결과를 이용 하여 설계지지력 예측식 제시

(2) 지지력 확인시스템이 내장된 표준규격 helical pile의 제작 및 성능 평가

- 설계시 적용되는 helical pile 설계
- 유압장치가 내장된 helical pile의 제작 및 성능 평가
- 유사공법과의 경제성 분석

(3) 지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능 평가

- 지반조건별 그라우팅 압력 및 시멘트 배합비 결정
- Helical pile내 그라우팅 장비개발
- 그라우팅 실시에 따른 지지력 개선 효과 확인
- Helical pile과 기존의 소구경 현장타설 말뚝과의 적용 타당성 검토

(4) Helical pile 시공 장비 개발

- 지지력과 토크를 측정하여 목표지지력별 시공장비 최대 출력토크제시

- Helical pile 현장 관리시스템 개발

(5) 설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 개발

- Harmony search algorithm을 이용한 재료비최적화 소프트웨어 개발

(6) 설계 및 시공관리를 위한 시공관리 지침서 작성

- 모든 시험결과 등을 분석하여 helical pile 설계법 제시
- 시공관리 지침서 작성
- 시공 시방서 작성
- 말뚝 시공관리 시스템 개발

나. 개발 내용 및 개발 범위

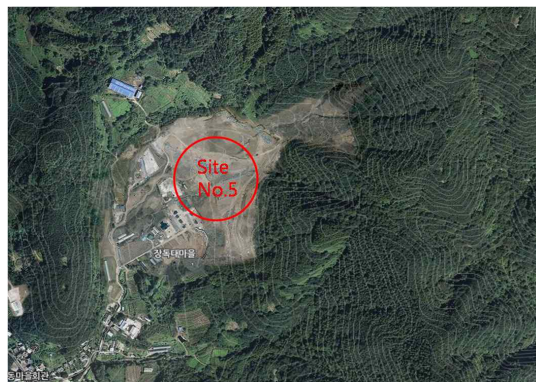
2차년도는 ‘지반조건 및 설계지지력 크기에 따른 helical pile의 거동특성 연구’, ‘지지력 확인시스템이내장된 표준규격 helical pile의 제작 및 성능 평가’, ‘지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능 평가’, ‘helical pile 시공 장비 개발’, ‘설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 및 시공관리 시방서 작성’에 대한 연구가 주요 목표이며, 주로 현장시험시공과 수치해석을 바탕으로 연구를 수행하였다.

(1) 시험 시공 위치 및 지반조건

2차년도의 현장 시험시공을 위하여 5개의 부지에서 시추조사와 BST(Borehole Shear Test)를 실시하였으나, 2,3번 부지에서는 암반층이 저심도에서 확인되어 헬리컬 파일의 현장시공에 부적합하였다. 헬리컬 파일의 현장시공은 1,4,5 부지에서 수행되었으며, 시공부지를 그림 2.3.3.1.에, 각 부지의 시추조사 결과를 아래에 나타냈다.



(a) 김포시 통진읍 도사리 일대
시공부지 (Site No. 1 & 4)



(b) 포천군 관인면 중리 일대
시공부지 (Site No. 5)

그림 2.3.3.1. 시공부지 선정

① 시공부지 1 (S1)

시 추 주 상 도 DRILL LOG

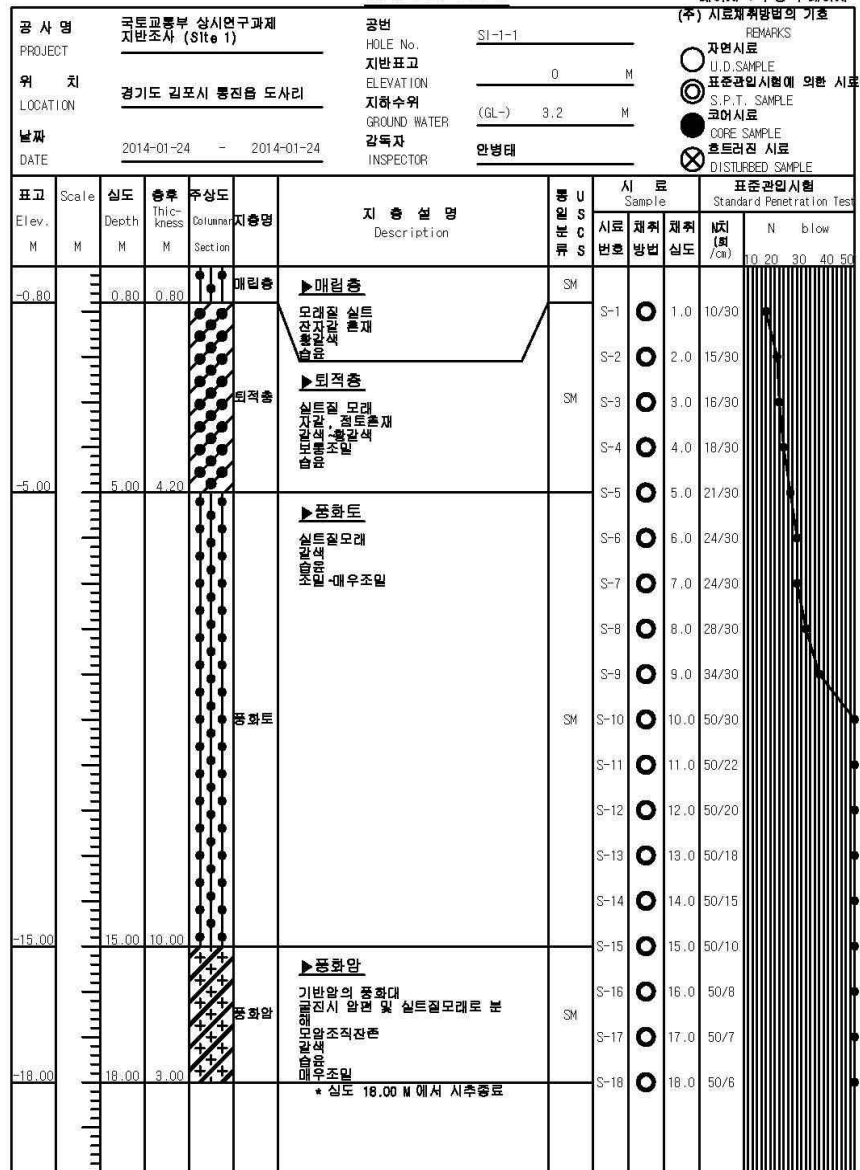


그림 2.3.3.2 시추주상도 S1-1

시 추 주 상 도

DRILL LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공 사 명 PROJECT		국토교통부 상시연구과제 지반조사 (Site 1)		공번 HOLE No.		S1-1-2		(주) 시료채취방법의 기준 REMARKS	
위 치 LOCATION		경기도 김포시 통진읍 도사리		지반표고 ELEVATION		0 M		○ 자연시료 U.D. SAMPLE	
날짜 DATE		2014-01-24 - 2014-01-24		지하수위 GROUND WATER		(GL-) 3.4 M		● 표준관입시험에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE	
				감독자 INSPECTOR		안병태		● 코어시료 CORE SAMPLE	
								⊗ 혼트러진 시료 DISTURBED SAMPLE	

표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	층두 Thick- ness M	주상도 Column Section	지층명 Description	통 입 부 류 U S C S	시 료 Sample		표준관입시험 Standard Penetration Test				
							시료 번호	채취 방법	채취 심도	N치 (회 /cm)	N blow		
-1.20		1.20	1.20	매립층	▶매립층 모래질 점토 점토질 모래	SM	S-1	○	1.0	7/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-2	○	2.0	12/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-3	○	3.0	12/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-4	○	4.0	11/30			
-4.80		4.80	3.60	점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-5	○	5.0	15/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-6	○	6.0	20/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-7	○	7.0	24/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-8	○	8.0	30/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-9	○	9.0	36/30			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-10	○	10.0	50/30			
-10.50		10.50	5.70	점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-11	○	11.0	50/9			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-12	○	12.0	50/8			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-13	○	13.0	50/8			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-14	○	14.0	50/6			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-15	○	15.0	50/5			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-16	○	16.0	50/8			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-17	○	17.0	50/7			
				점토층	▶점토층 점토질 모래 점토질 점토	SM	S-18	○	18.0	50/6			

그림 2.3.3.3 시추주상도 S1-2

Borehole Shear Test

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 1)			
Location	경기 김포시 통진읍 도사리		Test by	안 병 태
Borehole No.	SI-1-2		Depth(m)	(GL.-m) 9.0~10.0
Test Date	20014-1-24		Water level	(GL.-m) 3.4
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	36~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	160
2	400	322
3	600	434
4	800	584
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	29.00
Friction Angle	Degree	34.68

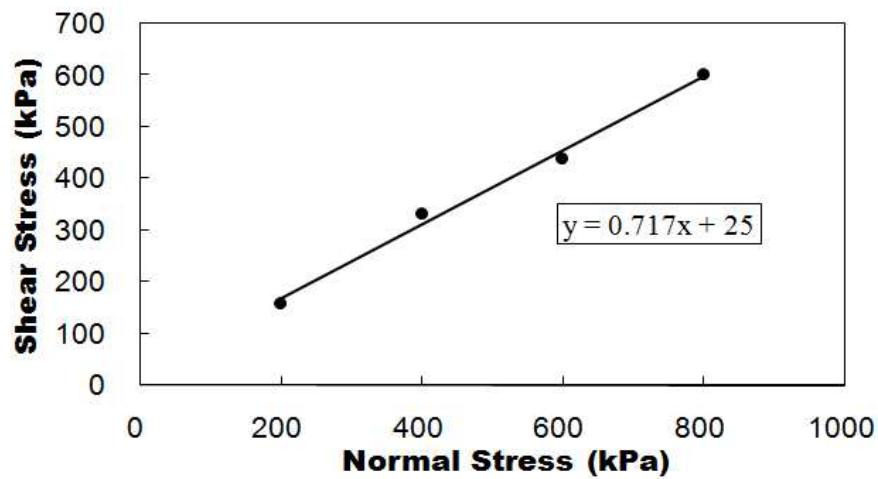


그림 2.3.3.4 시추공 S1-1에 대한 BST

Borehole Shear Test

Project Name	국토해양부 상시연구과제 2차년도 지반조사			
Location	경기 김포 통진 도사리		Test by	안 병 태
Borehole No.	SBH-2		Depth(m)	(GL.-m) 9.0~10.0
Test Date	20014-1-24		Water level	(GL.-m) 3.4
Soil Class	퇴적(SM)		N Value	36~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	181
2	400	374
3	600	545
4	800	721
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	7.50
Friction Angle	Degree	41.84

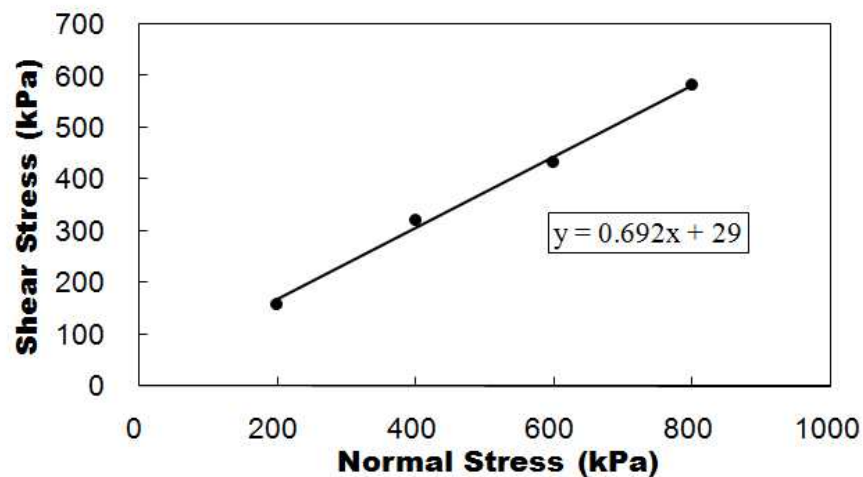


그림 2.3.3.5. 시추공 SI - 2에 대한 BST

표 2.3.3.1. 공내재하시험 결과 요약

공 번	심 도	N value	C (t/m ²)	Φ	비 고
SBH-1	3.0~4.0	16~18	27.00	27.92	
	9.0~10.0	34~50	25.00	35.64	
SBH-2	3.0~4.0	11~12	20.50	30.50	
	9.0~10.0	36~50	29.00	34.68	

② 시공부지 2 (S2)

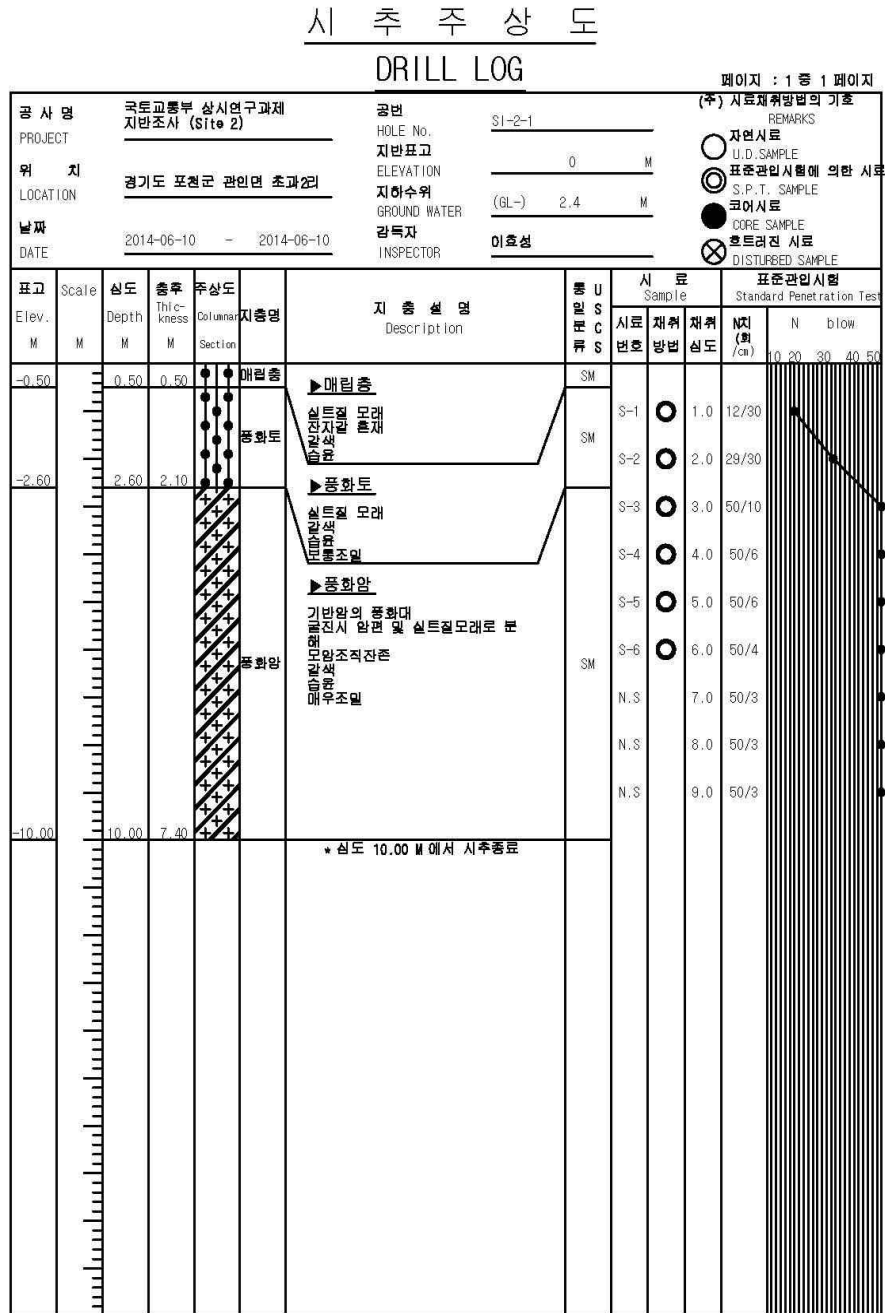


그림 2.3.3.6. 시추주상도 S2 - 1

시추주상도

DRILL LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공 사 명 PROJECT		국토교통부 상시연구과제 지반조사 (Site 2)		공번 HOLE No.		SI-2-2		(주) 시료채취방법의 기호 REMARKS			
위 치 LOCATION		경기도 포천시 관인면 초과리		지반표고 ELEVATION		0 M		○ 자연시료 U.D. SAMPLE			
날짜 DATE		2014-06-10 ~ 2014-06-10		지하수위 GROUND WATER		(GL-) 1.9 M		◎ 표준관입시험에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE			
				감독자 INSPECTOR		이효성		● 코어시료 CORE SAMPLE			
								⊗ 교란된 시료 DISTURBED SAMPLE			

표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	총주 Thic- kness M	주상도 Columnar Section	지층명 Description	통 일 분 류 U S C S	시 료 Sample		표준관입시험 Standard Penetration Test		
							시료 번호	채취 방법	재취 심도	N 치 (cm)	N blow
-0.70		0.70	0.70	매립층	▶매립층 실트질 모래 간헐적 습윤	SM	S-1	○	1.0	18/30	
				중화토	▶중화토 실트질 모래 간헐적 습윤 토양조밀-조밀	SM	S-2	○	2.0	37/30	
-2.80		2.80	2.10				S-3	○	3.0	50/10	
							S-4	○	4.0	50/8	
							S-5	○	5.0	50/7	
							S-6	○	6.0	50/5	
							N.S		7.0	50/4	
							N.S		8.0	50/3	
-9.00		9.00	6.20	중화암	▶중화암 기반암의 풍화대 굴절시 앞면 및 실트질모래로 분 해 모암조적잔존 간헐적 습윤 매우조밀	SM					
* 심도 9.00 M 에서 시추종료											

그림 2.3.3.7. 시추주상도 S2 - 2

Borehole Shear Test

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 2)			
Location	경기 포천시 관인면 초과2리		Test by	이 효 성
Borehole No.	SI-2-1		Depth(m)	(GL.-m) 2.0~3.0
Test Date	20014-6-10		Water level	(GL.-m) 2.4
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	29~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	100	82
2	200	134
3	300	185
4	400	255
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	21.50
Friction Angle	Degree	29.68

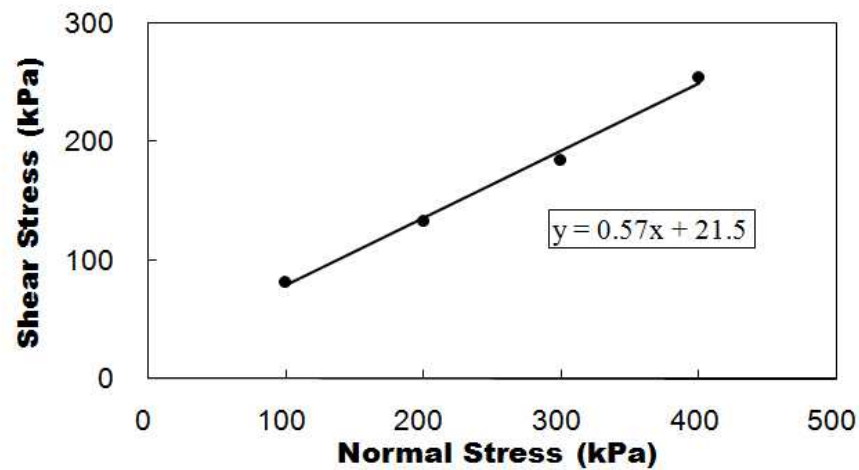


그림 2.3.3.8. 시추공 S2 - 1에 대한 BST

Borehole Shear Test (6m)

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 2)			
Location	경기 포천군 관인면 초과2리		Test by	이 효 성
Borehole No.	SI-2-2		Depth(m)	(GL.-m) 2.0~3.0
Test Date	20014-6-10		Water level	(GL.-m) 1.9
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	37~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	100	87
2	200	138
3	300	186
4	400	257
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	27.50
Friction Angle	Degree	29.16

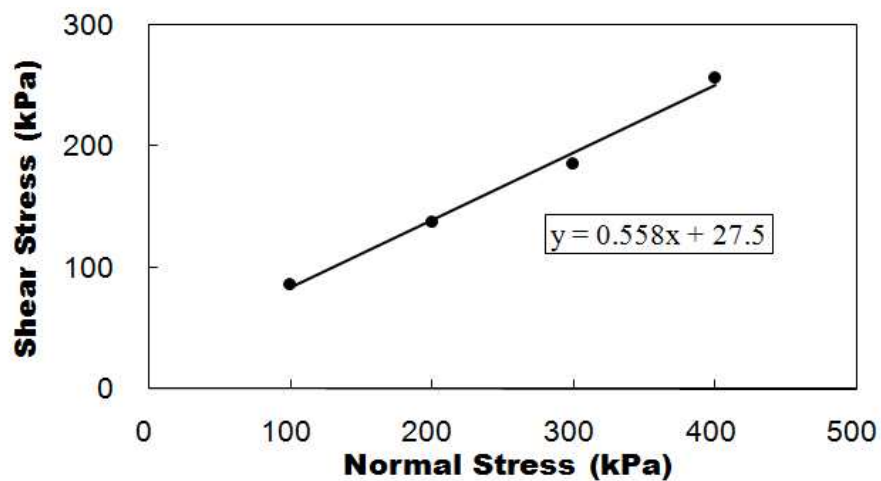


그림 2.3.3.9. 시추공 S2 - 2에 대한 BST

표 2.3.3.2. S2 공내재하시험 결과 요약

공번	심도	N value	C (t/m ²)	Φ	비 고
SBH-1	2.0~3.0	29~50	21.50	29.68	
SBH-2	2.0~3.0	37~50	27.50	29.16	

③ 시공부지 3 (S3)

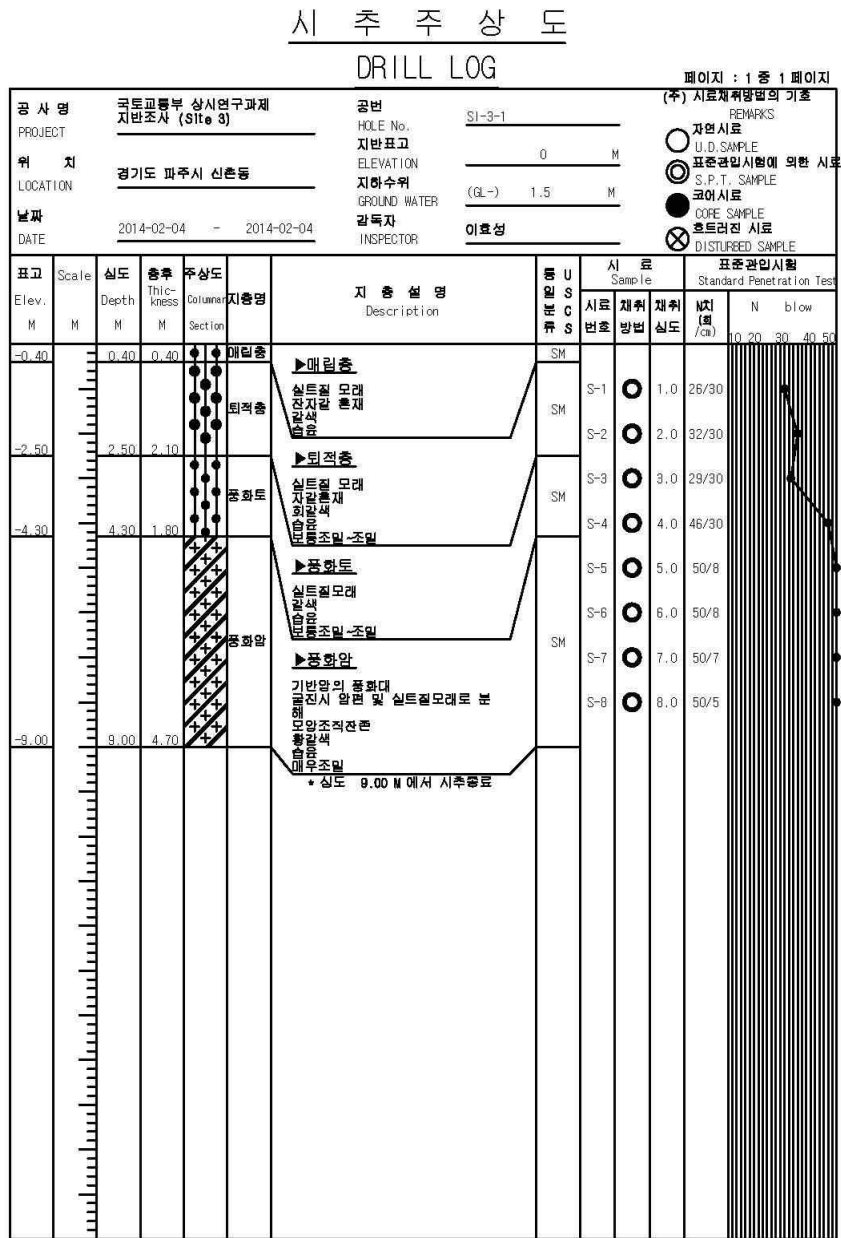


그림 2.3.3.10. 시추주상도 S3 - 1

시추주상도

DRILL LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공 사 명 PROJECT		국토교통부 상시연구과제 지반조사 (Site 3)		공번 HOLE No.		SI-3-2		(주) 시료채취방법의 기초			
위 치 LOCATION		경기도 파주시 신촌동		지반표고 ELEVATION		0 M		REMARKS			
날짜 DATE		2014-02-04 - 2014-02-04		지하수위 GROUND WATER		(GL-) 1.4 M		○ 자연시료 U.D. SAMPLE			
				감독자 INSPECTOR		이효성		◎ 표준관입시험에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE			
								● 코어시료 CORE SAMPLE			
								⊗ 혼트러진 시료 DISTURBED SAMPLE			

표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	총후 Thic- kness M	주상도 Columnar Section	지층명 Layer Name	지층 설명 Description	통 U S 일 분 C 류 S	시 료 Sample		표준관입시험 Standard Penetration Test						
								시료 번호	채취 방법	채취 심도	N치 (회/30cm)	N blow				
-0.40		0.40	0.40		매립층	▶매립층 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM									
					퇴적층		SM	S-1	○	1.0	15/30					
								S-2	○	2.0	31/30					
-2.80		2.80	2.40		점토층	▶점토층 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM	S-3	○	3.0	42/30					
					중화토	▶중화토 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM	S-4	○	4.0	50/14					
-4.70		4.70	1.90		중화암	▶중화암 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM	S-5	○	5.0	50/9					
					중화암	▶중화암 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM	S-6	○	6.0	50/8					
					중화암	▶중화암 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM	S-7	○	7.0	50/6					
					중화암	▶중화암 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM	S-8	○	8.0	50/5					
-9.00		9.00	4.30		중화암	▶중화암 실태조사 결과 점토질 모래 층상	SM									

* 심도 9.00 M 에서 시추종료

그림 2.3.3.11. 시추주상도 S3 - 2

Borehole Shear Test

Project Name	국토교통부 상시연구과제 기반조사(Site 3)			
Location	경기 파주시 신촌동		Test by	이 효 성
Borehole No.	SI-3-1		Depth(m)	(GL.-m) 3.0~4.0
Test Date	20014-2-4		Water level	(GL.-m) 1.5
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	29~46

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	100	98
2	200	170
3	300	212
4	400	320
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	23.00
Friction Angle	Degree	35.30

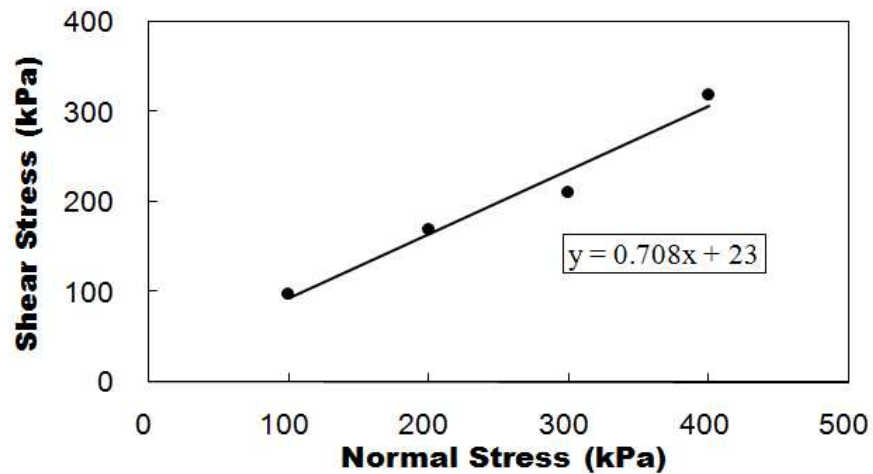


그림 2.3.3.12 시추공 S3-1에 대한 BST

Borehole Shear Test (6m)

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 3)			
Location	경기 파주시 신촌동		Test by	이 효 성
Borehole No.	SI-3-2		Depth(m)	(GL.-m) 3.0~4.0
Test Date	20014-2-4		Water level	(GL.-m) 1.4
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	42~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	100	88
2	200	184
3	300	234
4	400	302
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	29.00
Friction Angle	Degree	34.68

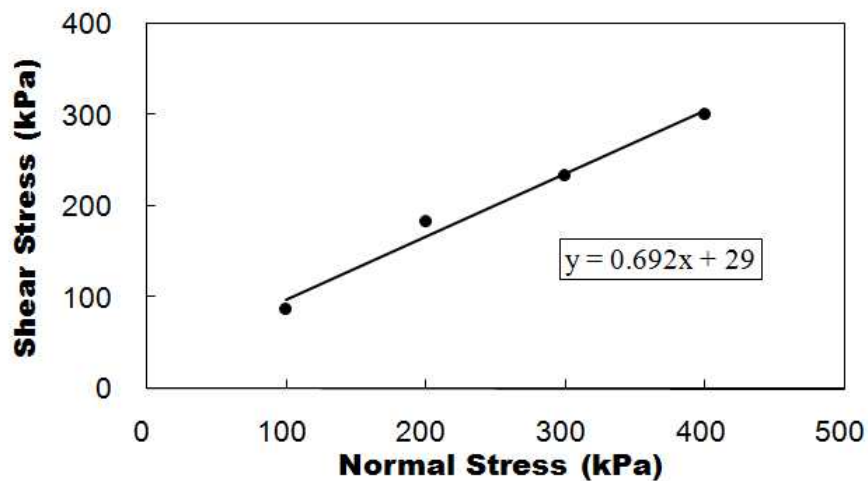


그림 2.3.3.13 시추공 S3 - 2에 대한 BST

표 2.3.3.3. 공내재하시험 결과 요약

공번	심도	N value	C (t/m ²)	Φ	비 고
SBH-1	3.0~4.0	29~46	23.00	35.30	
SBH-2	3.0~4.0	42~50	29.00	34.68	

④ 시공부지 4 (S4)

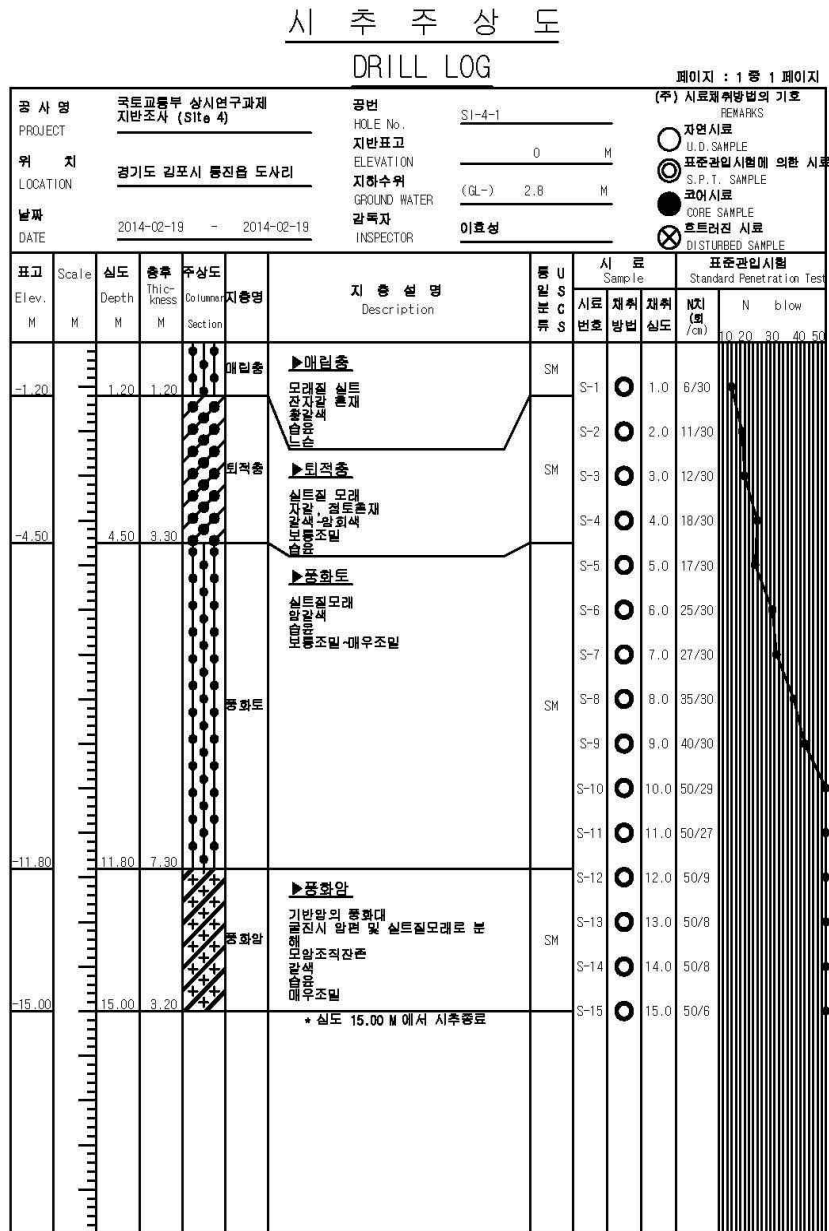


그림 2.3.3.14. 시추주상도 S4 - 1

시 추 주 상 도

DRILL LOG

공 사 명
PROJECT: 국토교통부 산시연구과제
지반조사 (Site 4)

위 치
LOCATION: 경기도 김포시 통진읍 도사리

날 짜
DATE: 2014-02-19 - 2014-02-19

공 번
HOLE No.: S1-4-2

지반표고
ELEVATION: 0 M

지하수위
GROUND WATER: (GL-) 3.2 M

감독자
INSPECTOR: 이효성

페이지 : 1 중 1 페이지

(주) 시료채취방법의 기호

REMARKS

○ 자연시료
U.D. SAMPLE

◎ 표준관입시험에 의한 시료
S.P.T. SAMPLE

● 코어시료
CORE SAMPLE

⊗ 흐트러진 시료
DISTURBED SAMPLE

표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	층후 Thic- kness M	주상도 Columnar Section	지층명 Description	통 U S C S 분 류	시 료 Sample		표준관입시험 Standard Penetration Test		
							시료 번호	채취 방법	채취 심도	N치 (회) /cm	N blow
-1.00		1.00	1.00	매립층	▶매립층 모래질 실트 잔사질, 쓰레기 소량 혼재 갈색-황갈색 습윤	SM	S-1	○	1.0	8/30	
				퇴적층	▶퇴적층 실트질 모래 잔사, 점토혼재 갈색-황갈색 보통조밀 습윤	SM	S-2	○	2.0	11/30	
						SM	S-3	○	3.0	14/30	
						SM	S-4	○	4.0	16/30	
-4.80		4.80	3.80			SM	S-5	○	5.0	13/30	
						SM	S-6	○	6.0	18/30	
						SM	S-7	○	7.0	20/30	
						SM	S-8	○	8.0	30/30	
						SM	S-9	○	9.0	42/30	
						SM	S-10	○	10.0	50/30	
						SM	S-11	○	11.0	50/27	
						SM	S-12	○	12.0	50/17	
-13.00		13.00	8.20			SM	S-13	○	13.0	50/10	
						SM	S-14	○	14.0	50/8	
						SM	S-15	○	15.0	50/6	
-16.00		16.00	3.00			SM	S-16	○	16.0	50/6	

그림 2.3.3.15. 시추주상도 S4 - 2

Borehole Shear Test

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 4)			
Location	경기 김포시 통진읍 도사리		Test by	이 효 성
Borehole No.	SI-4-1		Depth(m)	(GL.-m) 9.0~10.0
Test Date	20014-2-19		Water level	(GL.-m) 2.8
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	40~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	182
2	400	344
3	600	422
4	800	646
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	31.00
Friction Angle	Degree	36.32

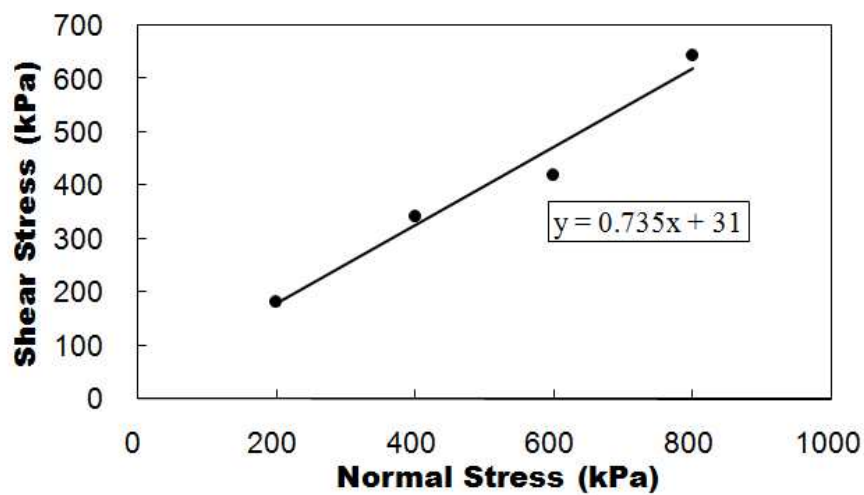


그림 2.3.3.16. 시추공 S4-1에 대한 BST

Borehole Shear Test

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 4)			
Location	경기 김포시 통진읍 도사리		Test by	이 효 성
Borehole No.	SI-4-2		Depth(m)	(GL.-m) 9.0~10.0
Test Date	20014-2-19		Water level	(GL.-m) 3.2
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	42~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	133
2	400	314
3	600	402
4	800	528
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	26.00
Friction Angle	Degree	32.48

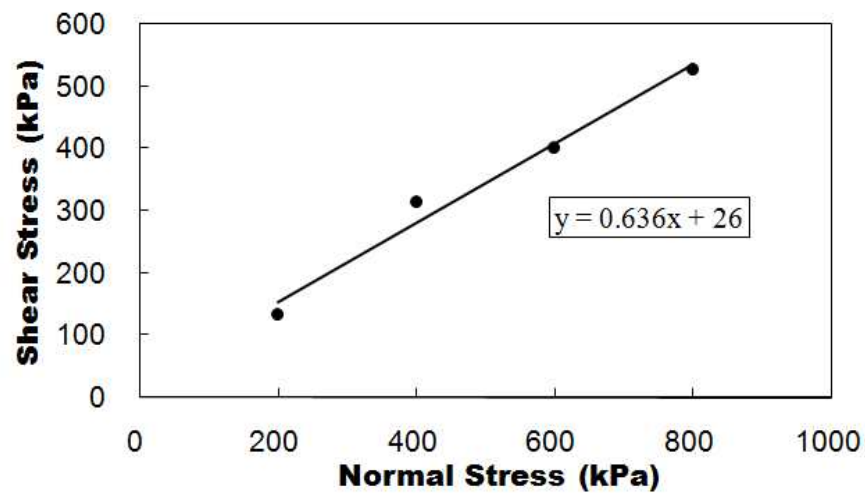


그림 2.3.3.17. 시추공 S4-2에 대한 BST

표 2.3.3.4. 공내재하시험 결과 요약

공번	심도	N value	C (t/m ²)	Φ	비 고
SBH-1	5.0~6.0	17~25	25.00	24.84	
	9.0~10.0	40~50	31.00	36.32	
SBH-2	5.0~6.0	13~18	22.0	25.64	
	9.0~10.0	42~50	26.0	32.48	

⑤ 시공부지 5 (S5)

시 추 주 상 도

DRILL LOG

공 사 명 PROJECT		국토교통부 상시연구과제 지반조사 (Site 5)		공번 HOLE No.		SI-5-1		페이지 : 1 중 1 페이지	
위 치 LOCATION		경기도 포천군 관인면 중리		지반표고 ELEVATION		0 M		(주) 시료채취방법의 기호 REMARKS	
날짜 DATE		2014-03-20 - 2014-03-20		지하수위 GROUND WATER		(GL-) 2.6 M		☐ 자연시료 U.D. SAMPLE ☐ 표준관입시험에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE ☐ 코어시료 CORE SAMPLE ☐ 혼트러진 시료 DISTURBED SAMPLE	
				감독자 INSPECTOR		안병태			

표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	층후 Thick- ness M	주상도 Columnar Section	지층명 Description	종 U 입 S 분 C 류 S	시 료 Sample		표준관입시험 Standard Penetration Test					
							시료 번호	채취 방법	채취 심도	N치 (회/cm)	N blow			
									10	20	30	40	50	
-1.40		1.40	1.40	매립층	▶매립층 모래질 실트 모래-점토혼재 점토-암회석 층	SM	S-1	○	1.0	7/30				
				퇴적층	▶퇴적층 실트질 모래 자갈-점토혼재 점토-암회석 층	SM	S-2	○	2.0	12/30				
						SM	S-3	○	3.0	14/30				
-4.20		4.20	2.80			SM	S-4	○	4.0	14/30				
						SM	S-5	○	5.0	10/30				
				풍화토	▶풍화토 실트질모래 자갈-점토혼재 점토-암회석 층	SM	S-6	○	6.0	12/30				
						SM	S-7	○	7.0	24/30				
						SM	S-8	○	8.0	26/30				
						SM	S-9	○	9.0	41/30				
						SM	S-10	○	10.0	50/28				
-10.00		10.00	5.80											
					* 심도 10.00 M 에서 시추종료									

그림 2.3.3.18. 시추주상도 S5 - 1

시 추 주 상 도

DRILL LOG

페이지 : 1 중 1 페이지

공 사 명 PROJECT	국토교통부 삼시연구과제 지반조사 (Site 5)		공번 HOLE No.	SI-5-2		(주) 시료채취방법의 기호 REMARKS	
위 치 LOCATION	경기도 포천군 관인면 중리		지반표고 ELEVATION	0 M		○ 자연시료 U.D. SAMPLE	
날짜 DATE	2014-03-20 - 2014-03-20		지하수위 GROUND WATER	(GL-) 3 M		◎ 표준관입시험에 의한 시료 S.P.T. SAMPLE	
			감독자 INSPECTOR	안병태		● 코어시료 CORE SAMPLE	
						⊗ 호트러진 시료 DISTURBED SAMPLE	

표고 Elev. M	Scale M	심도 Depth M	층후 Thic- kness M	주상도 Columnar Section	지층명 Description	종 U S C 류 S	시 료 Sample		표준관입시험 Standard Penetration Test					
							시료 번호	채취 방법	채취 심도	N치 (회/cm)	N blow			
									10	20	30	40	50	
-1.60		1.60	1.60	매립층	▶매립층 모래질 실트 잔사질 층재 갈색~홍갈색 습윤~습	SM	S-1	◎	1.0	5/30				
				퇴적층	▶퇴적층 실트질 모래 자갈, 점토층재 갈색~안회색 습윤~보통조밀	SM	S-2	◎	2.0	6/30				
							S-3	◎	3.0	10/30				
-4.90		4.90	3.30				S-4	◎	4.0	15/30				
				풍화토	▶풍화토 실트질모래 갈색 습윤 보통조밀~매우조밀	SM	S-5	◎	5.0	11/30				
							S-6	◎	6.0	12/30				
							S-7	◎	7.0	18/30				
							S-8	◎	8.0	30/30				
							S-9	◎	9.0	43/30				
-10.00		10.00	5.10		* 심도 10.00 M 에서 시추종료		S-10	◎	10.0	50/30				

그림 2.3.3.19. 시추주상도 S5 - 2

Borehole Shear Test

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 5)			
Location	경기 포천군 관인면 중리		Test by	안 병 태
Borehole No.	SI-5-1		Depth(m)	(GL.-m) 9.0~10.0
Test Date	20014-1-24		Water level	(GL.-m) 2.6
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	41~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	154
2	400	334
3	600	368
4	800	586
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	28.00
Friction Angle	Degree	33.62

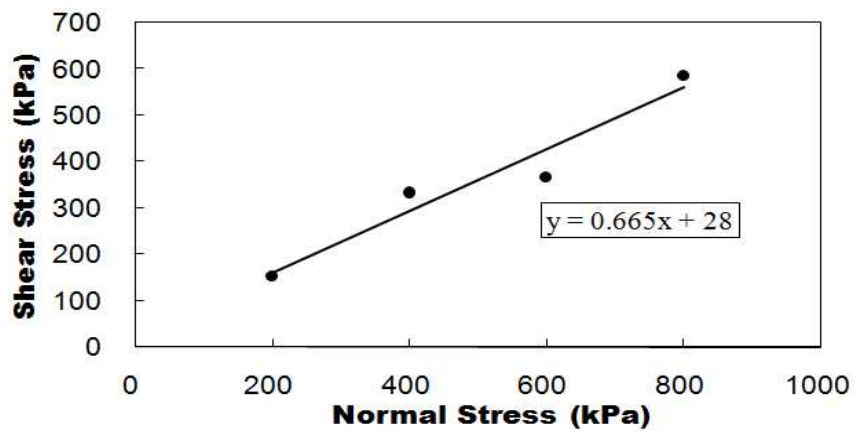


그림 2.3.3.20. 시추공 S5-1에 대한 BST

Borehole Shear Test

Project Name	국토교통부 상시연구과제 지반조사(Site 5)			
Location	경기 김포시 통진읍 도사리		Test by	안 병 태
Borehole No.	SI-5-2		Depth(m)	(GL.-m) 9.0~10.0
Test Date	20014-3-20		Water level	(GL.-m) 3.0
Soil Class	풍화토(SM)		N Value	43~50

Test Data		
No.	Normal Stress (kPa)	Shear Stress (kPa)
1	200	130
2	400	334
3	600	388
4	800	534
5		

Test Result		
Classification	Unit	Value
Cohesion	kPa	30.00
Friction Angle	Degree	32.33

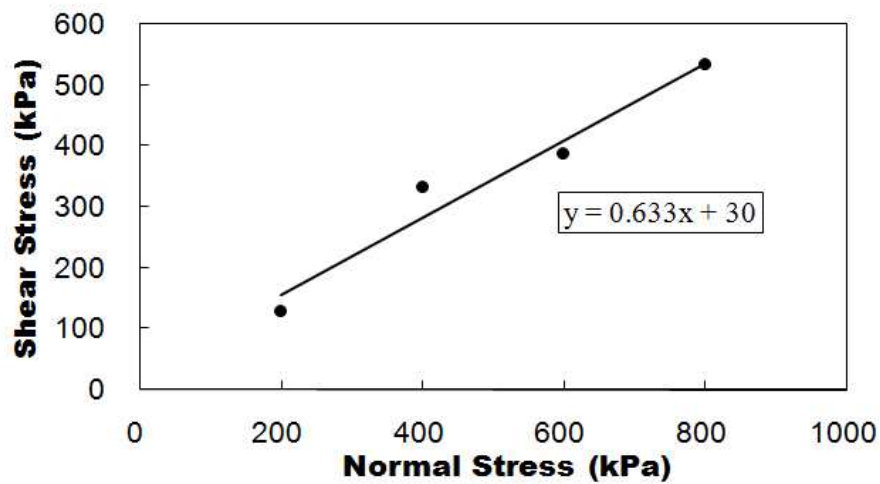


그림 2.3.3.21. 시추공 S5-2에 대한 BST

표 2.3.3.5. 공내재하시험 결과 요약

공 변	심도	N value	C (t/m ²)	Φ	비 고
SBH-1	5.0~6.0	10~12	22.0	25.36	
	9.0~10.0	41~50	28.0	33.62	
SBH-2	5.0~6.0	11~12	24.0	25.08	
	9.0~10.0	43~50	30.0	32.33	

시공 부지 선정과정에서 부지 2와 3은 얕은 심도에서 암반지반이 분포하여 현장시험시공 부지로 사용하지 못하였다. 본 연구에서는 부지 1,4 에서 현장시험시공과 수치해석을 바탕으로 연구를 수행하였으며, 부지 5는 지반보강효과의 확인에 사용하였다.

(2) 시험파일의 형상 및 시공장비

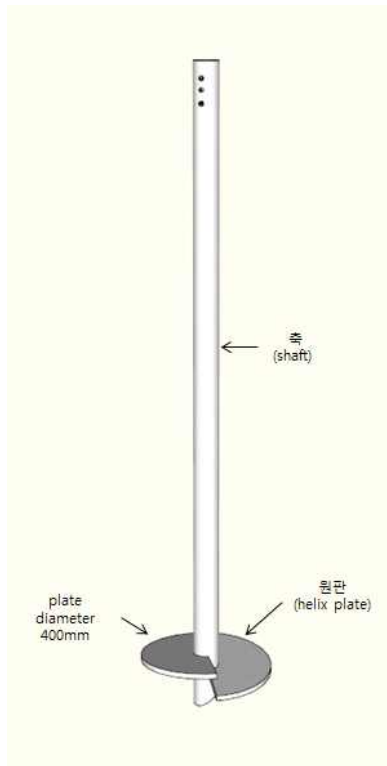
시공된 helical pile의 재하시험은 1차년도 시험과 같이 유압실린더를 이용하여 수평반력을 연직하중으로 변환하는 간략화된 재하시험장치를 이용하였다.

시공된 헬리컬 파일은 73mm와 89mm, 그리고 114mm 직경을 갖는 3종류의 축과 400, 350, 300, 250, 200mm 직경의 원판 조합(1개 또는 3개)으로 구성하였다. 3개의 원판으로 구성된 헬리컬 파일의 원판 간 간격은 1m로 고정하였다. 각 헬리컬 파일의 축 직경, 원판의 크기 및 개수를 표 2.3.3.6에 정리하였으며, 원판의 개수 및 형상에 따라 4가지 구분된 헬리컬 파일을 종류별(Type I, II, III, IV)로 그림 2.3.3.22에 나타냈다.

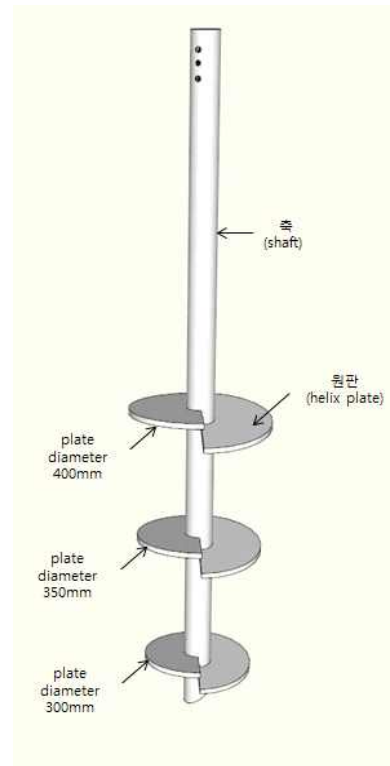
표 2.3.3.6. Type에 따른 헬리컬 파일 세부사항

축 직경	원판 직경 (mm)	
	Type I	Type II, III, IV
73mm	Type I	400
	Type II	400,350,300
	Type III	350,300,250
	Type IV	300,250,200
89mm	Type I	400
	Type II	400,350,300
	Type III	350,300,250
	Type IV	300,250,200
114mm	Type I	400
	Type II	400,350,300
	Type III	350,300,250
	Type IV	300,250,200

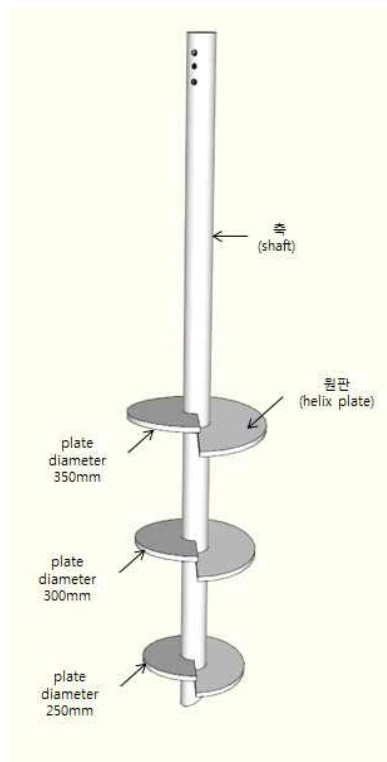
헬리컬 파일의 관입은 유압모터를 장착한 백호(back hoe)를 이용하여 수행하였으며, 시공 중 파일이 지반에 수직으로 관입되는지 확인하기 위하여 경사계(tiltmeter)를 설치하여 수직도를 관리하였다. 사용한 백호와 유압 모터를 그림 2.3.3.23에 나타내었다.



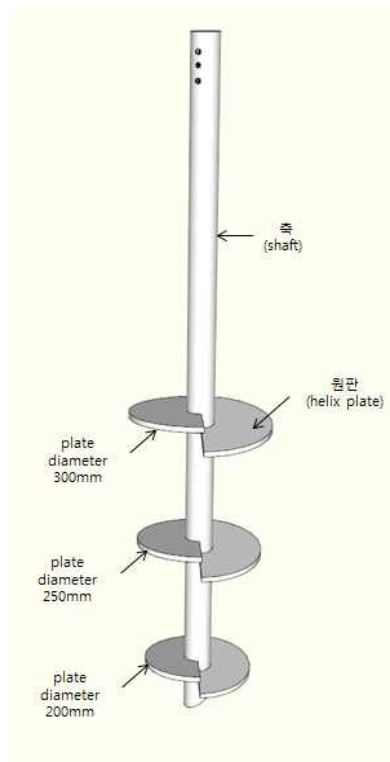
(a) Type I: 원판직경
400 mm



(b) Type II: 원판직경
400, 350, 300 mm



(c) Type III: 원판직경
350, 300, 250 mm



(d) Type IV: 원판직경
300, 250, 200 mm

그림 2.3.3.22 헬리컬 파일의 형상



(a) 백호(back hoe)



(b) 유압모터

그림 2.3.3.23 헬리컬 파일 시공 장비

(가) 정재하시험의 개요

기존의 말뚝 정재하시험의 경우 시험하중 이상의 하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등을 이용한 반력이 필요하다. 이러한 기존의 재하시험의 단점을 보완하고자 본 연구에서는 삼각대의 원리를 이용하여 간소화된 정재하시험을 고안하였다(그림 2.3.3.24 참조). 간소화된 정재하시험은 ①시험 대상 헬리컬 파일 주변에 4개의 반력말뚝을 시공. ②헬리컬 파일과 반력말뚝 사이에 유압실린더를 설치한 후, 헬리컬 파일 상부에 중심축을 추가로 연결(그림 2.3.3.25(a) 참조). ③중심축 상단과 반력말뚝 상부를 연결하여 전체적인 형상이 피라미드를 이루게 조성(그림 2.3.3.25(b) 참조). ④유압실린더를 이용해 각 반력말뚝이 헬리컬 파일 바깥쪽으로 하중을 받게 하여, 중심축 상단과 반력말뚝 상부가 연결된 강재축이 헬리컬 파일에 수직 하중을 유발하도록 구성. ⑤ 헬리컬 파일의 하중-침하 데이터를 측정(그림 2.3.3.25(c) 참조)하는 과정으로 수행되었으며, 현장 정재하시험 과정을그림 2.3.3.25에 나타냈다. 삼각대의 원리를 이용한 정재하시험 방법은 반력말뚝을 이용한다는 점에서는 기존의 정재하시험과 동일하지만 반력을 가하기 위한 대형 H beam이 필요하지 않다는 점에서 기존의 정재하시험 보다 다소 간편한 방법으로 사료된다.

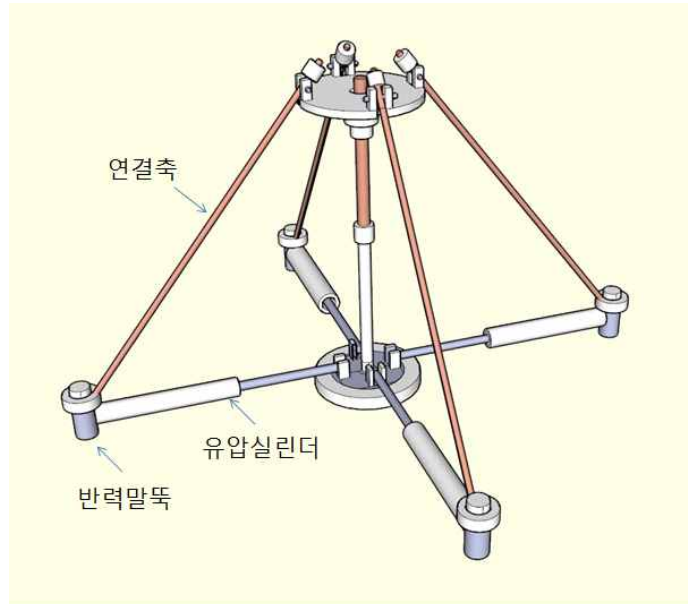


그림 2.3.3.24. Shape of helical piles



(a) Installation of hydraulic cylinder and central shaft



(b) Additional shaft



(c) Load test

그림 2.3.3.25. Load test process

(나) 양방향 재하시험의 개요

정재하시험의 경우 시험하중만큼의 사하중, 반력 말뚝, 반력 앵커 등의 반력이 필요하고, 이런 반력하중이 확보되지 않으면 정재하시험을 할 수 없다. 그러나 양방향 말뚝재하시험에서는 특수하게 제작된 유압식 잭(Jack)이나 셀(Cell)을 일반적으로 말뚝선단 부근에 설치하여 선단지지력과 주변마찰력에 의해 하중재하에 필요한 반력을 상호간에 마련해주므로 하중재하를 위한 별도의 대형반력장치가 필요 없고, 좁은 시험공간이나 경사진 곳에서도 적용이 가능하다. 이러한 장점으로 인해 최근 미국에서는 현장타설말뚝에 대한 재하시험의 90% 이상이 이 방법으로 이루어지고 있으며 10여개국 이상에서 양방향 재하시험의 사용이 증가하는 추세이다(Osterberg, 1998). 일반적인 양방향 재하시험의 모식도를 그림 2.3.3.26에 나타냈다.

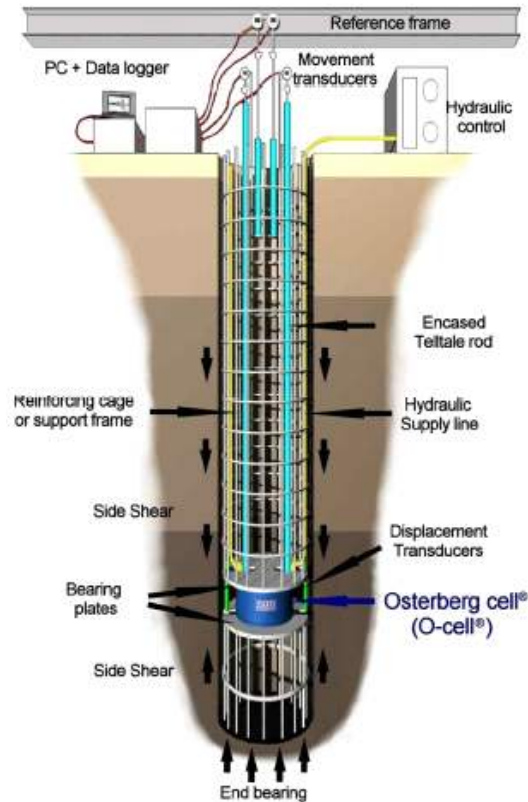


그림 2.3.3.26 양방향 재하시험 개념도

헬리컬 파일은 별도의 향타 및 천공의 공정이 필요하지 않고, 비교적 소형의 장비를 사용하여 시공이 가능한 장점을 극대화하고자, 본 연구에서는 양방향 재하 셀을 헬리컬 파일에 적용하여 정재하시험보다 상대적으로 간편하게 지지력을 측정하고자 하였다. 양방향 셀의 상세도는 그림 2.3.3.27에 나타났다. 양방향 재하시험은 89mm, 114mm 두 가지 축 직경을 갖는 헬리컬 파일에 대해 수행하였으며, 450, 350, 200mm 원판이 부착된 헬리컬 파일을 시험 시공하였다. 시험은 크게 두 가지로 구성하였으며, 첫 번째 시험 1은 그림 2.3.3.28.(a)와 같이 최하단 원판 상부에 양방향 셀을 부착하고 하중을 재하하여 최하단 원판의 선단지지력을 측정하였다. 두 번째 시험 2는 그림 2.3.3.28.(b)와 같이 최상단 원판 상부에 양방향 셀을 부착하고, 두부를 고정한 후에 셀에 인발 하중을 적용, 파일 전체의 상방향 거동으로부터, 최하단 원판상부의 지지력과 축의 주면 마찰력의 합을 측정하였다. 시공된 헬리컬 파일의 지지력은 시험 1과 시험 2에서 측정된 지지력의 합으로 산정할 수 있으며, 동일한 형상의 헬리컬 파일에 대하여 정재하시험을 수행, 양방향 셀을 적용한 헬리컬 파일의 지지력 산정을 검증하였다.

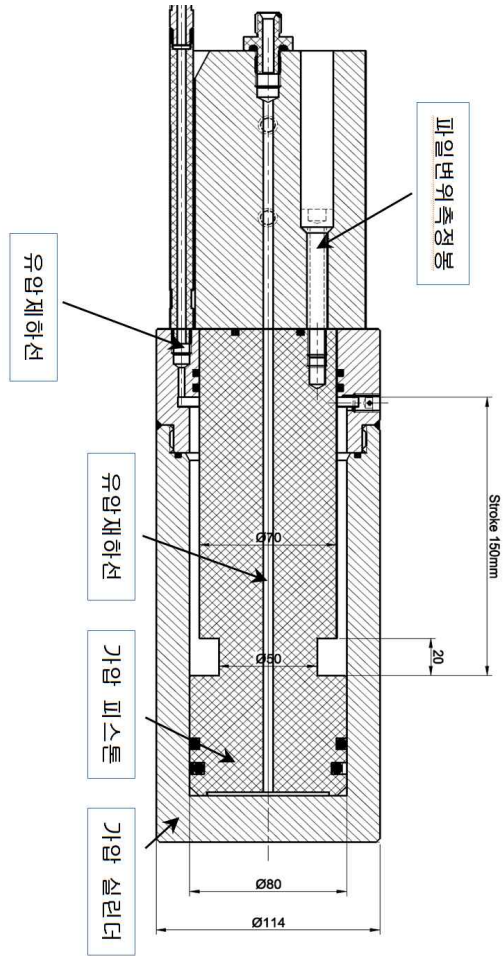
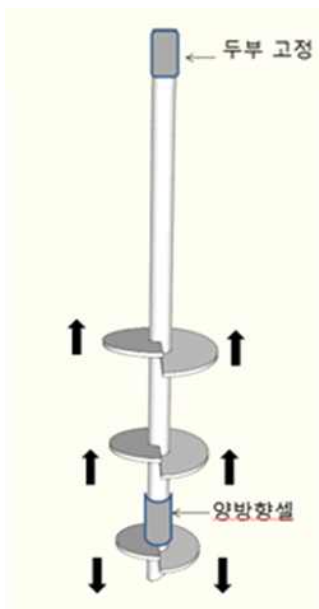
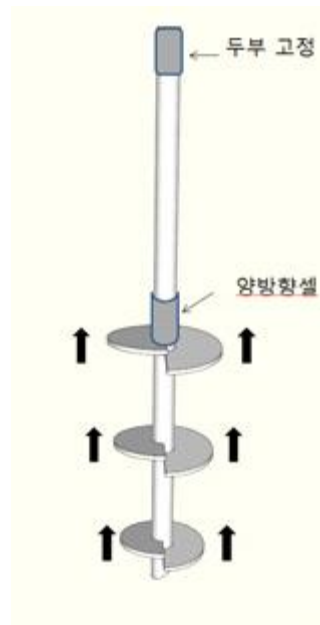


그림 2.3.3.27 양방향 재하 셀 상세도



(a) 양방향 시험 1



(b) 양방향 시험 2

그림 2.3.3.28. 헬리컬 파일 양방향 재하시험

(다) 지반보강 헬리컬파일 시공의 개요

헬리컬파일이 회전 관입될 시, 헬리컬 파일의 중심축 및 나선형 원판과 지반의 마찰로 인하여 상부 지반이 하부로 침하되는 현상이 발생한다. 이 현상으로 인하여 헬리컬 파일 시공 후 상부지반에 공동이 발생하고, 시공 후 헬리컬의 수평지지력이 저하될 수 있다. 이러한 공동발생에 대한 대책과, 선단지지력을 확보하기 어려운 연약한 지반에서의 헬리컬 파일 지지력을 확보하기 위한 방안으로 헬리컬 파일 시공 후 주변 지반을 고결하여 지반을 보강하였다.

일반적으로 기존에 사용되는 헬리컬 파일의 그라우팅은 주입압이 없는 상태에서 헬리컬 파일 중공형 축 내부로 주입호수 또는 주입파이프를 소정의 심도(3m)이내로 관입하여 그라우팅을 실시하는 방식으로 선단부 및 파일 중간부분에 대한 그라우팅의 충전효과는 전무하고, 상부 소정의 심도만 구근이 형성되어 양생으로 인한 전후좌우의 흔들림방지 및 상부의 마찰력만 발휘하는 방식으로 되어있다. 하지만 본 연구에서는 헬리컬 파일의 그라우팅을 통하여 지반을 보강하고자 그림 2.3.3.29와 같은 헬리컬 파일 그라우팅 장비를 개발하였으며, 73mm, 114mm 중심축에 400mm 나선형 원판을 부착한 헬리컬 파일을 대상으로 본 장비의 주입압으로 인한 구근형성 효과를 확인하였다.

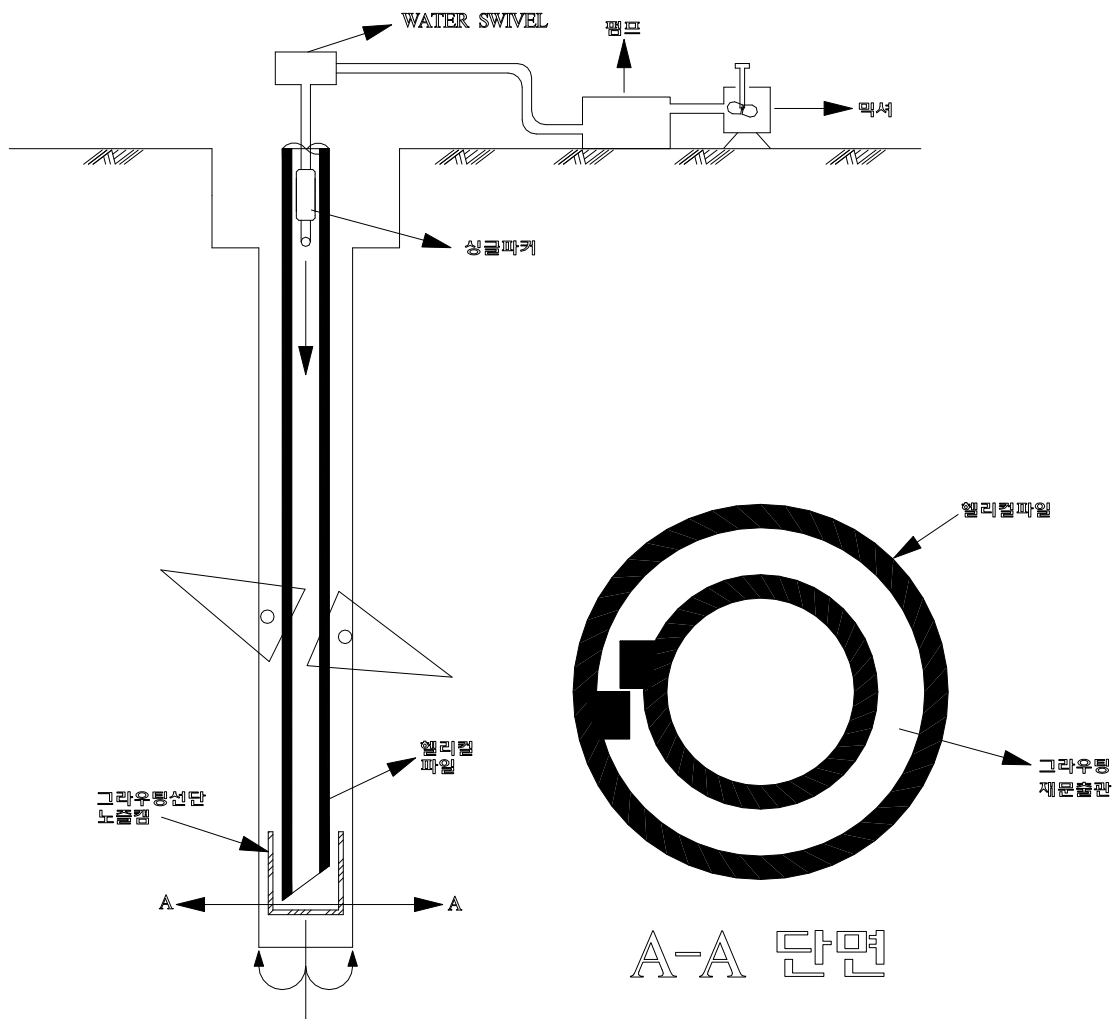
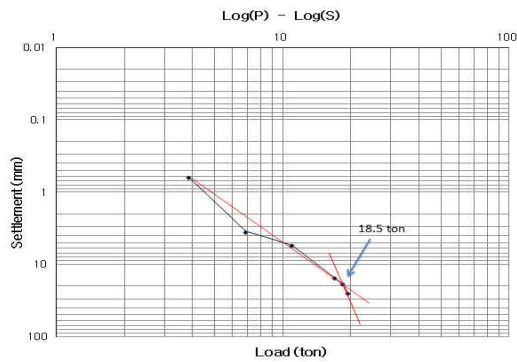


그림 2.3.3.29. 헬리컬파일 그라우팅 모식도

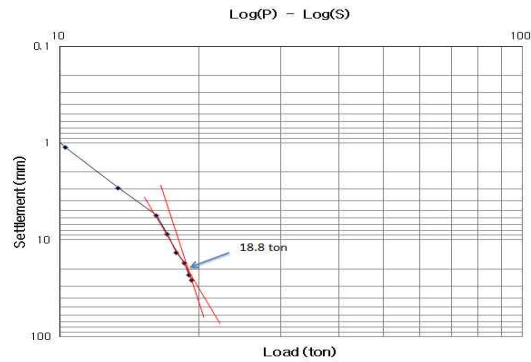
(3) 현장 시험 결과 분석

(가) 현장 정재하시험 결과

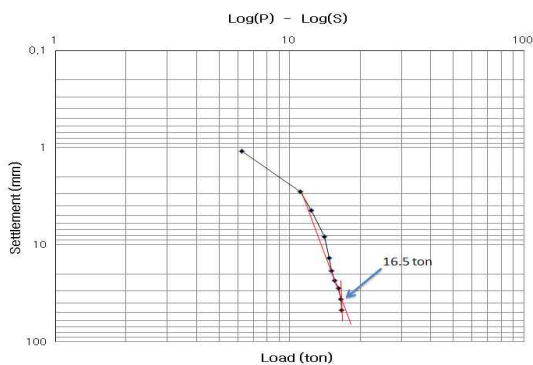
각 헬리컬 파일은 지표에서 3m, 4.5m, 6m, 그리고 7.5m 깊이 까지 관입하여 정재하시험을 수행하여 깊이별로 하중-침하곡선을 산정하였다. 산정한 하중-침하곡선을 바탕으로 $\log(P)$ - $\log(S)$ 방법을 적용하여 지지력을 산정하였으며, 3m까지 관입된 축 직경 73mm의 헬리컬 파일의 지지력 산정방법을 그림 2.3.3.30에 나타내었다. 또한 4.5m, 6m, 7.5m까지 관입된 축 직경 73mm의 헬리컬 파일을 각각 그림 2.3.3.31, 그림 2.3.3.32과 그림 2.3.3.33에 나타내었으며, 축 직경 89mm와 114mm 헬리컬 파일의 지지력 산정방법을 그림 2.3.3.34~그림 2.3.3.41에 도시하였다. 또한, 현장에서 측정된 헬리컬 파일의 형상과 깊이에 따라 측정된 헬리컬 파일의 지지력을 헬리컬 파일 축의 직경에 따라 각각 표 2.3.3.7 ~ 표 2.3.3.8에 나타냈다.



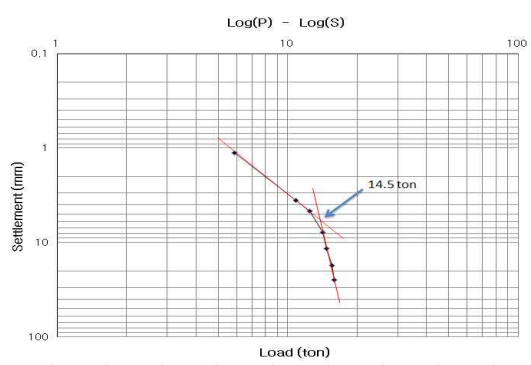
(a) Type I



(b) Type II

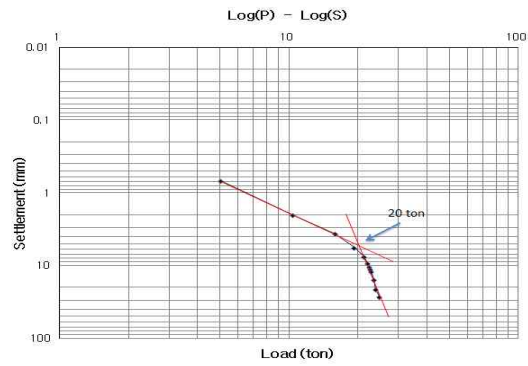


(c) Type III

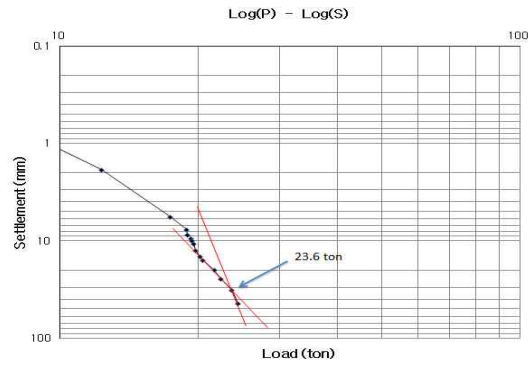


(d) Type IV

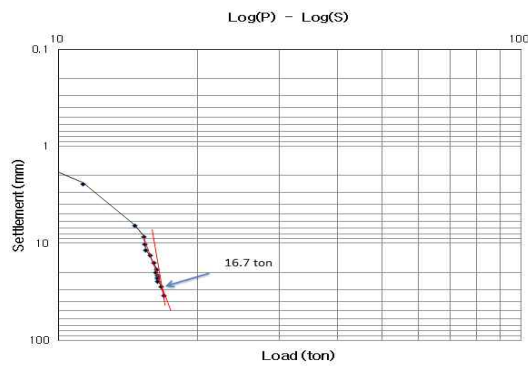
그림 2.3.3.30. 하중 침하 곡선 (축 직경 73mm, 깊이 3m)



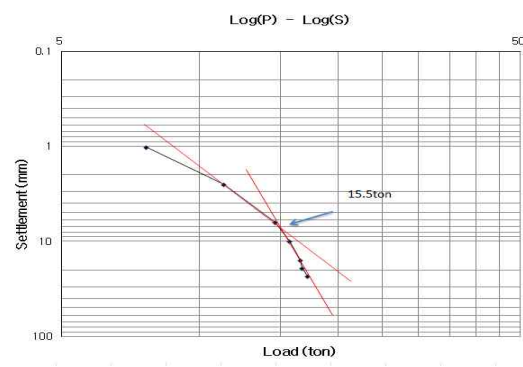
(a) Type I



(b) Type II

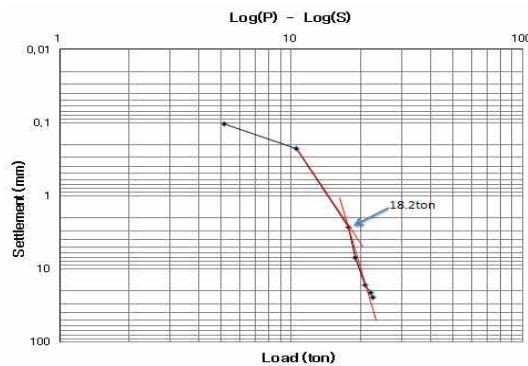


(c) Type III

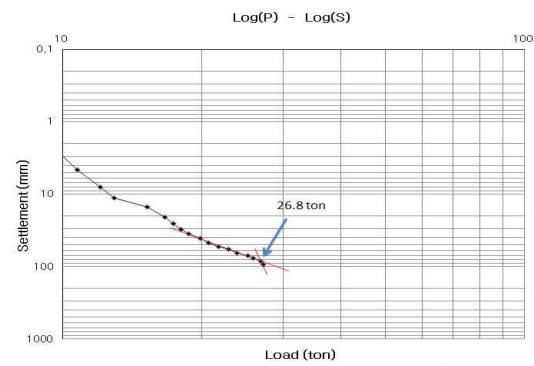


(d) Type IV

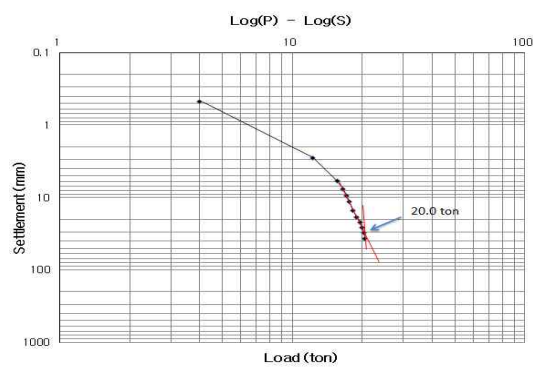
그림 2.3.3.31. 하중 침하 곡선 (축 직경 73mm, 깊이 4.5m)



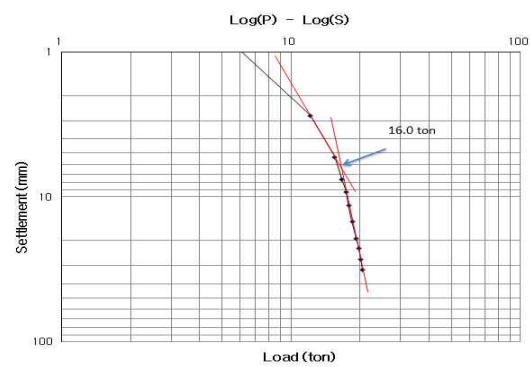
(a) Type I



(b) Type II

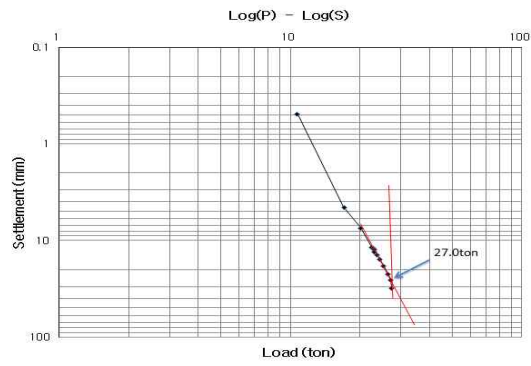


(c) Type III

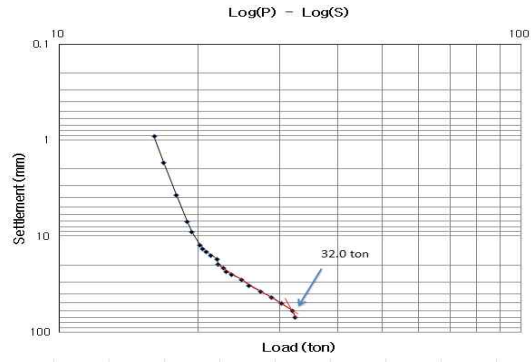


(d) Type IV

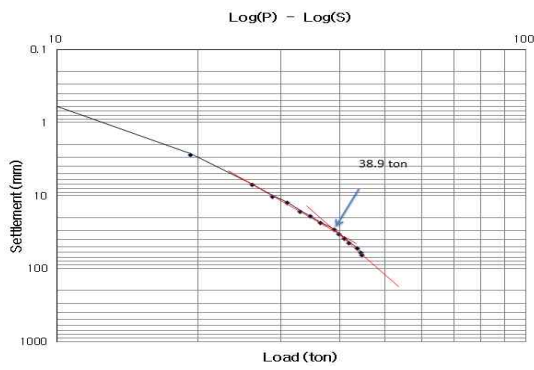
그림 2.3.3.32. 하중 침하 곡선 (축 직경 73mm, 깊이 6m)



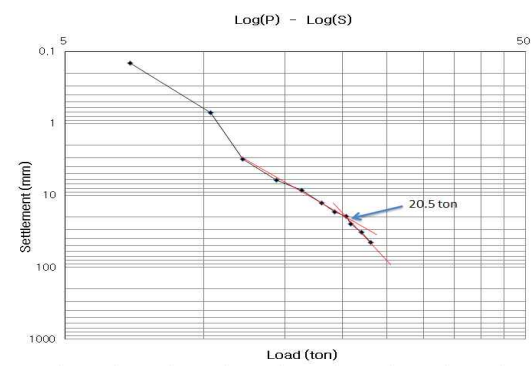
(a) Type I



(b) Type II

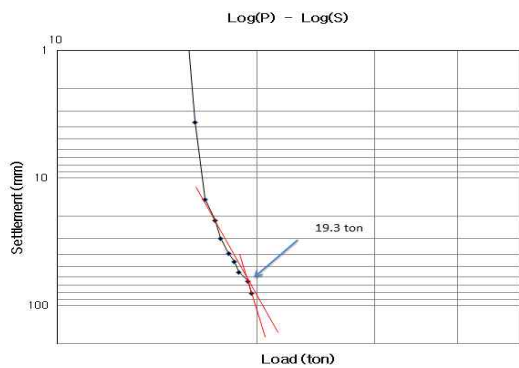


(c) Type III

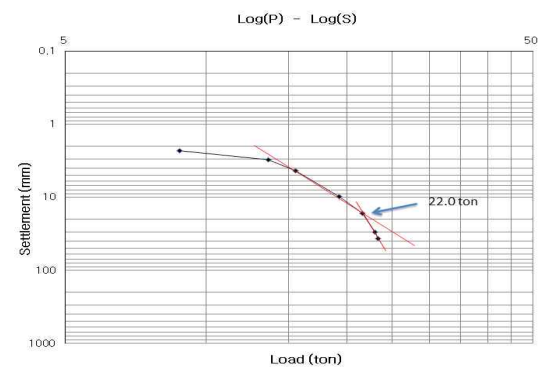


(d) Type IV

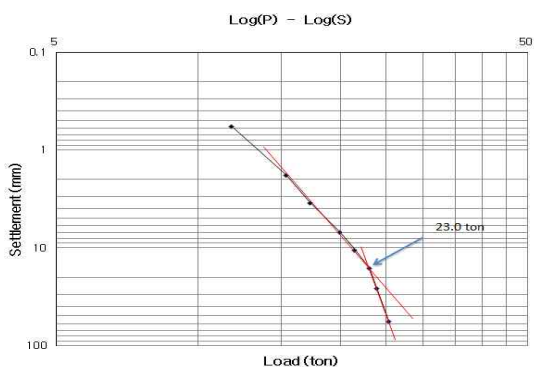
그림 2.3.3.33. 하중 침하 곡선 (축 직경 73mm, 깊이 7.5m)



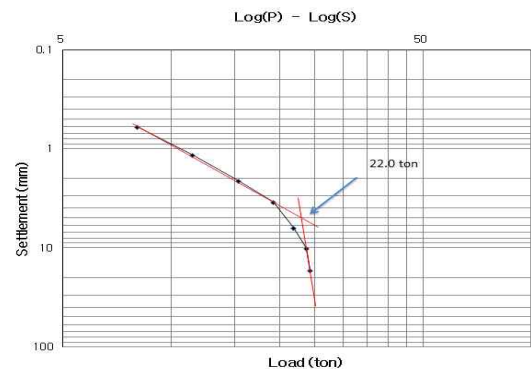
(a) Type I



(b) Type II

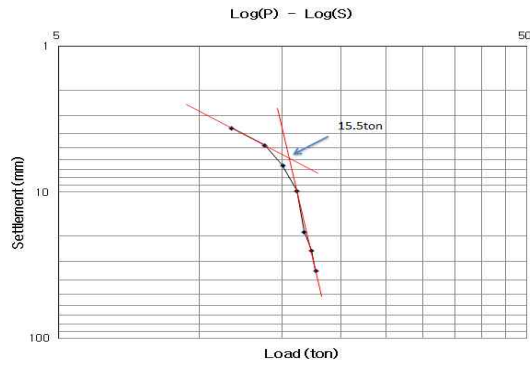


(c) Type III

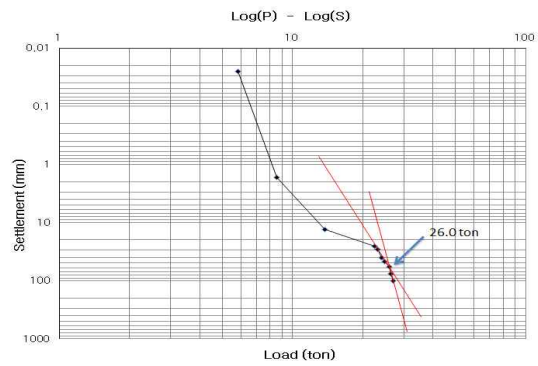


(d) Type IV

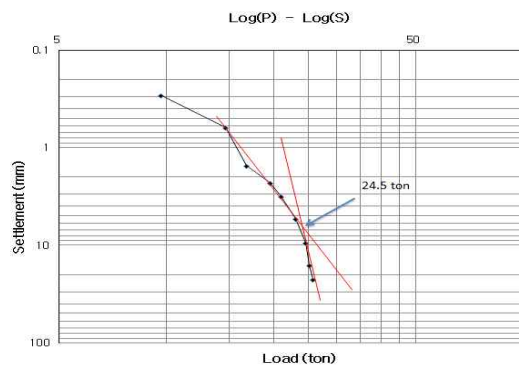
그림 2.3.3.34. 하중 침하 곡선 (축 직경 89mm, 깊이 3m)



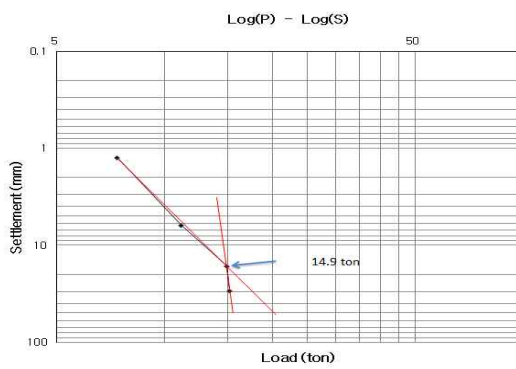
(a) Type I



(b) Type II

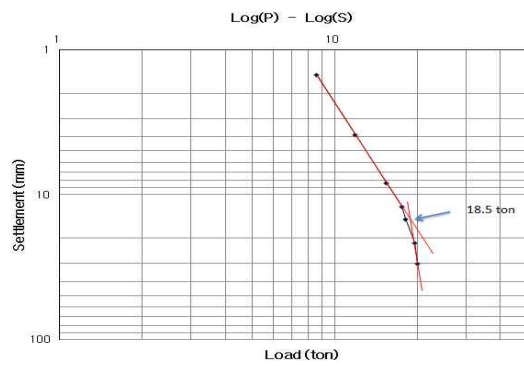


(c) Type III

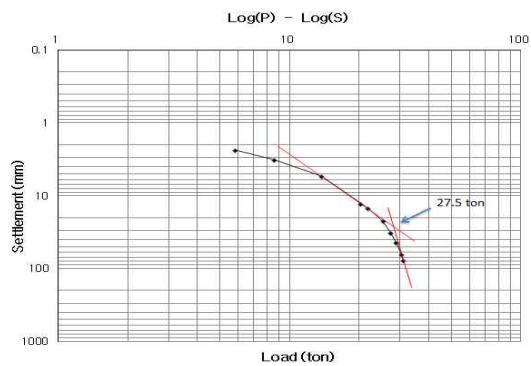


(d) Type IV

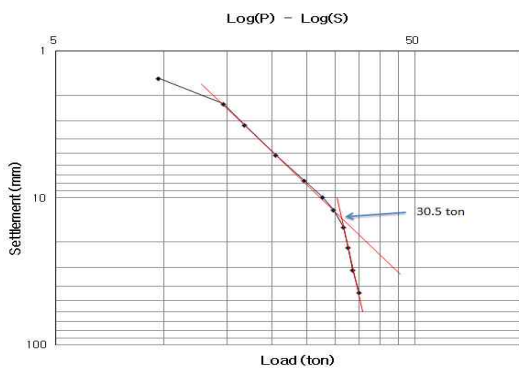
그림 2.3.3.35. 하중 침하 곡선 (축 직경 89mm, 깊이 4.5m)



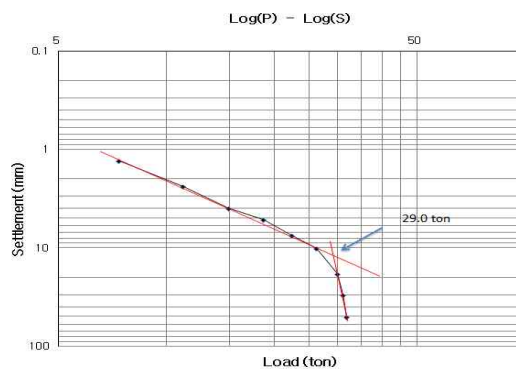
(a) Type I



(b) Type II

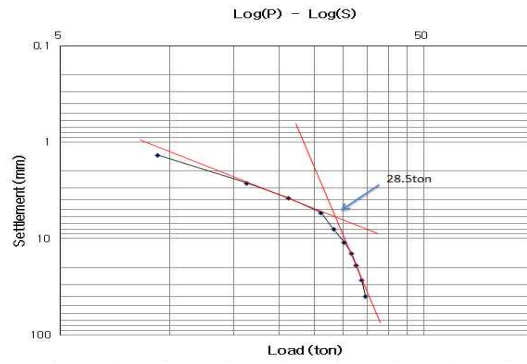


(c) Type III

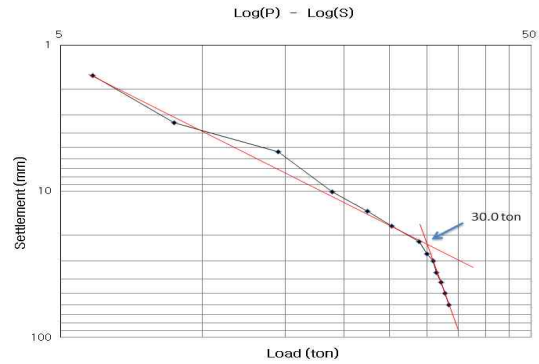


(d) Type IV

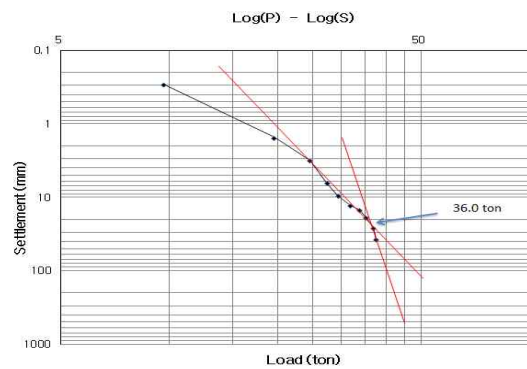
그림 2.3.3.36. 하중 침하 곡선 (축 직경 89mm, 깊이 6m)



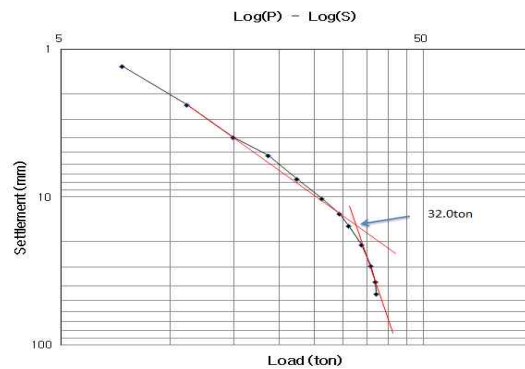
(a) Type I



(b) Type II

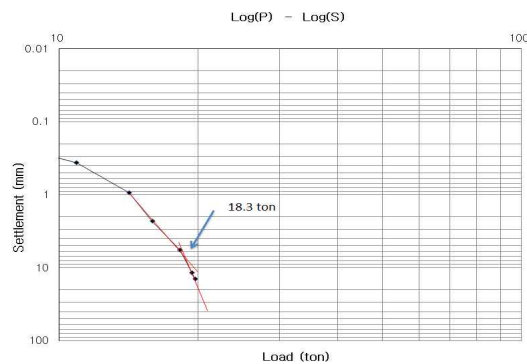


(c) Type III

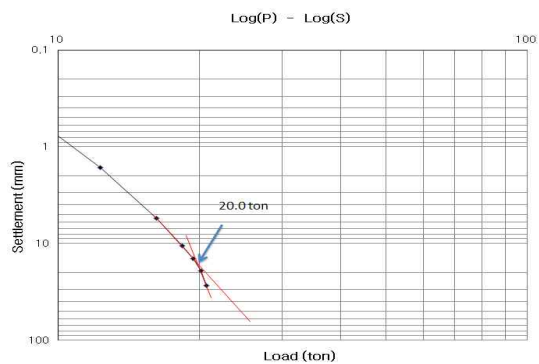


(d) Type IV

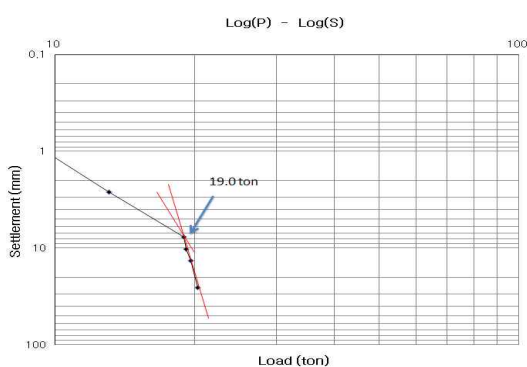
그림 2.3.3.37. 하중 침하 곡선 (축 직경 89mm, 깊이 7.5m)



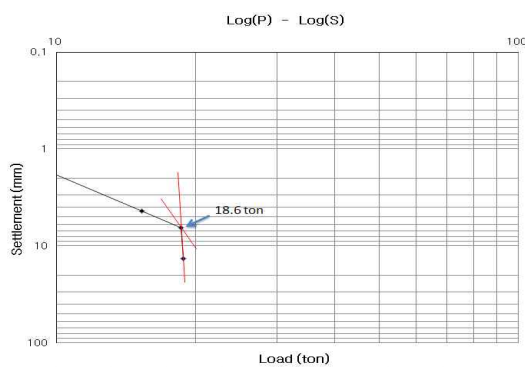
(a) Type I



(b) Type II

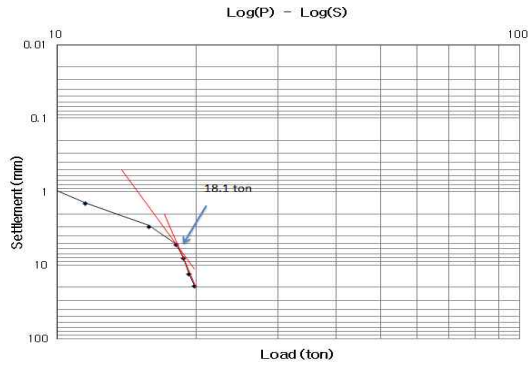


(c) Type III

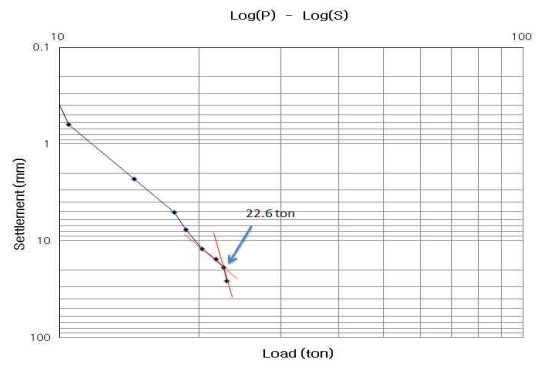


(d) Type IV

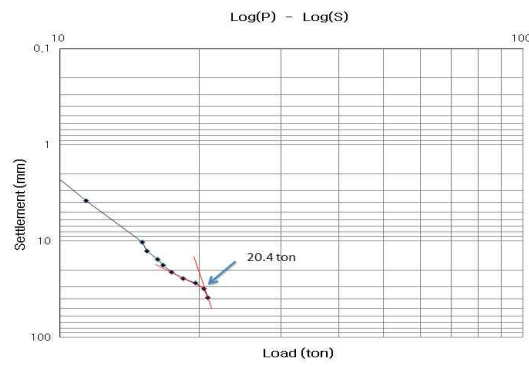
그림 2.3.3.38. 하중 침하 곡선 (축 직경 114mm, 깊이 3m)



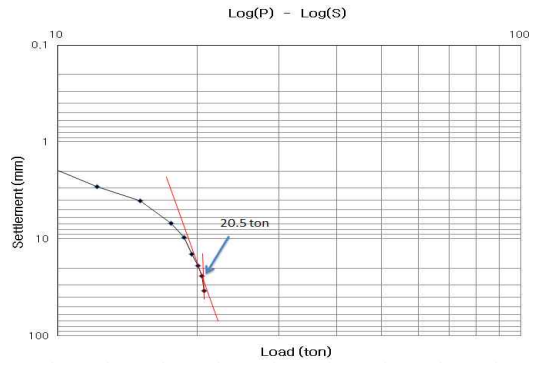
(a) Type I



(b) Type II

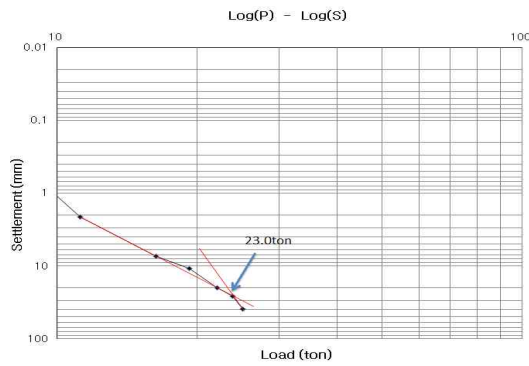


(c) Type III

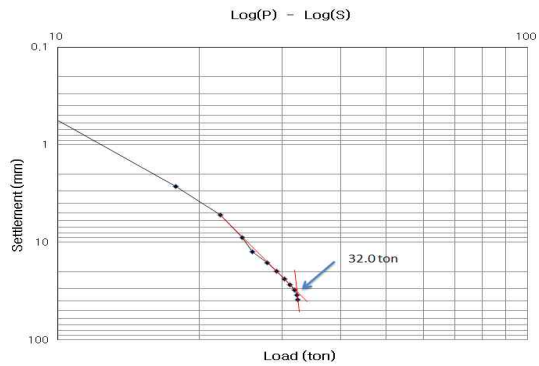


(d) Type IV

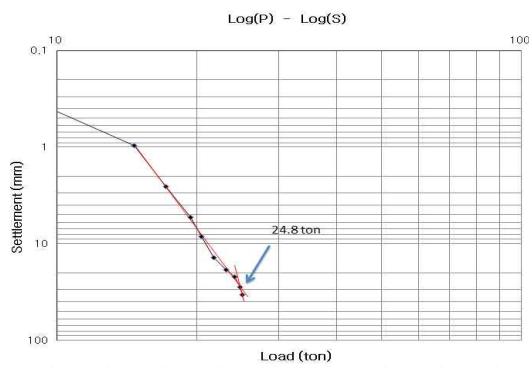
그림 2.3.3.39. 하중 침하 곡선 (축 직경 114mm, 깊이 4.5m)



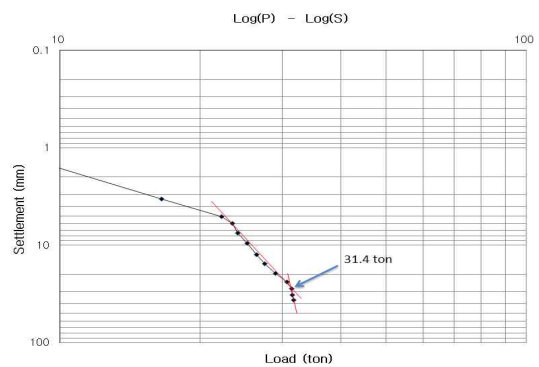
(a) Type I



(b) Type II

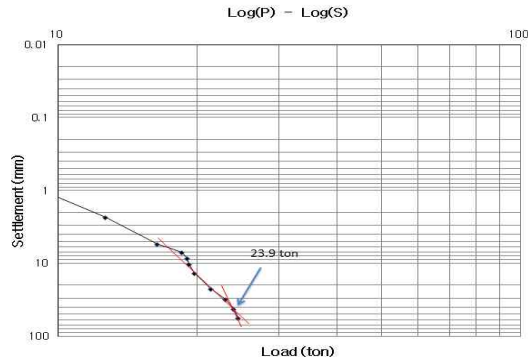


(c) Type III

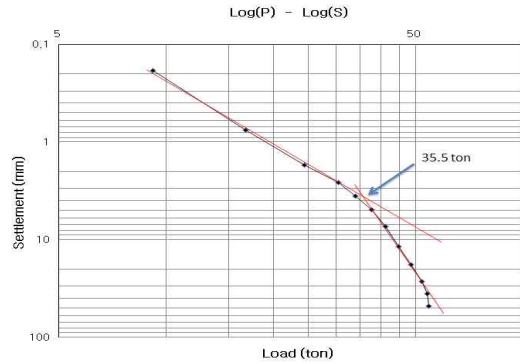


(d) Type IV

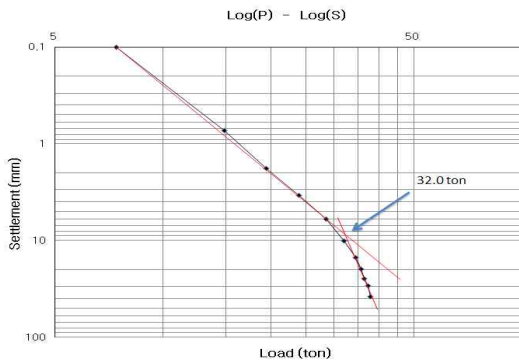
그림 2.3.3.40. 하중 침하 곡선 (축 직경 114mm, 깊이 6m)



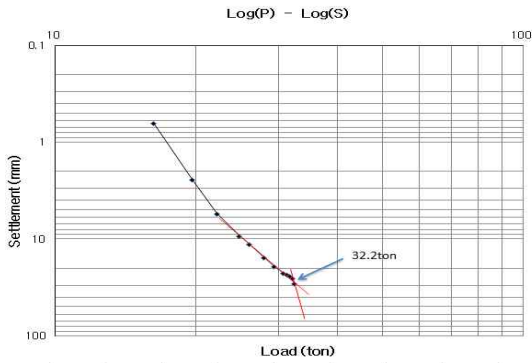
(a) Type I



(b) Type II



(c) Type III



(d) Type IV

그림 2.3.3.41. 하중 침하 곡선 (축 직경 114mm, 깊이 7.5m)

일반적으로 헬리컬 파일 시공 시 시공이 종료된 시점의 유압 모터의 최종토크는 헬리컬 파일의 지지력과 일련의 상관관계가 있으며, 헬리컬 파일 축의 직경에 따라 관입 최종토크로부터 지지력을 예측할 수 있다(Perko, 2009). 축의 직경에 따른 시공 시 유압모터의 최종토크와 지지력의 상관관계를 평가하기 위해 헬리컬 파일 관입 시 측정된 유압모터의 토크를 축의 직경에 따라 축 직경 73mm의 측정값을 그림 2.3.3.42에, 축 직경 114mm의 측정값을 그림 2.3.3.43에 나타내었으며, 이론적인 토크 예측값을 식(1)에 나타냈으며 그림 2.3.3.42과 2.3.3.43에 추가로 도시하였다.

$$T = \pi \frac{r_{shaft}^2}{2} f l + \sum_n 2 \left[\frac{4}{3} \pi \frac{r_{plate}^3}{2} \right] f + \sum_n q_{ult} A_B \frac{r_{plate}}{2} \quad \text{식 (1)}$$

여기서, r_{shaft} 는 축의 직경

l 은 축의 길이

r_{plate} 는 원판의 직경

n 은 원판의 개수

f 는 마찰응력이며, 사질토에서 $f = \sigma'_{v0} \tan \phi$

A_B 는 원판이 지반을 전단하는 면적

그림 2.3.3.42, 그림 2.3.3.43에서 지지력 측정 지점인 3m, 4.5m, 6m, 그리고 7.5m에서 측정된 최종토크값을 각각 표 2.3.3.7과 표 2.3.3.8에 삽입하였다. 정재하시험을 통해 측정된 헬리컬 파일 형상별 지지력과 최종토크의 관계를 헬리컬 파일 축 직경 73mm와 114mm 경우에 대해 각각 그림 2.3.3.44에 도시하였다. 측정된 지지력과 최종토크의 관계는 다소 분산성을 보이나, 대체로 선형관계를 보임을 알 수 있다. 그림 5.15에서 축 직경 73mm와 114mm인 경우의 결정계수는 각각 0.449와 0.8086이다.

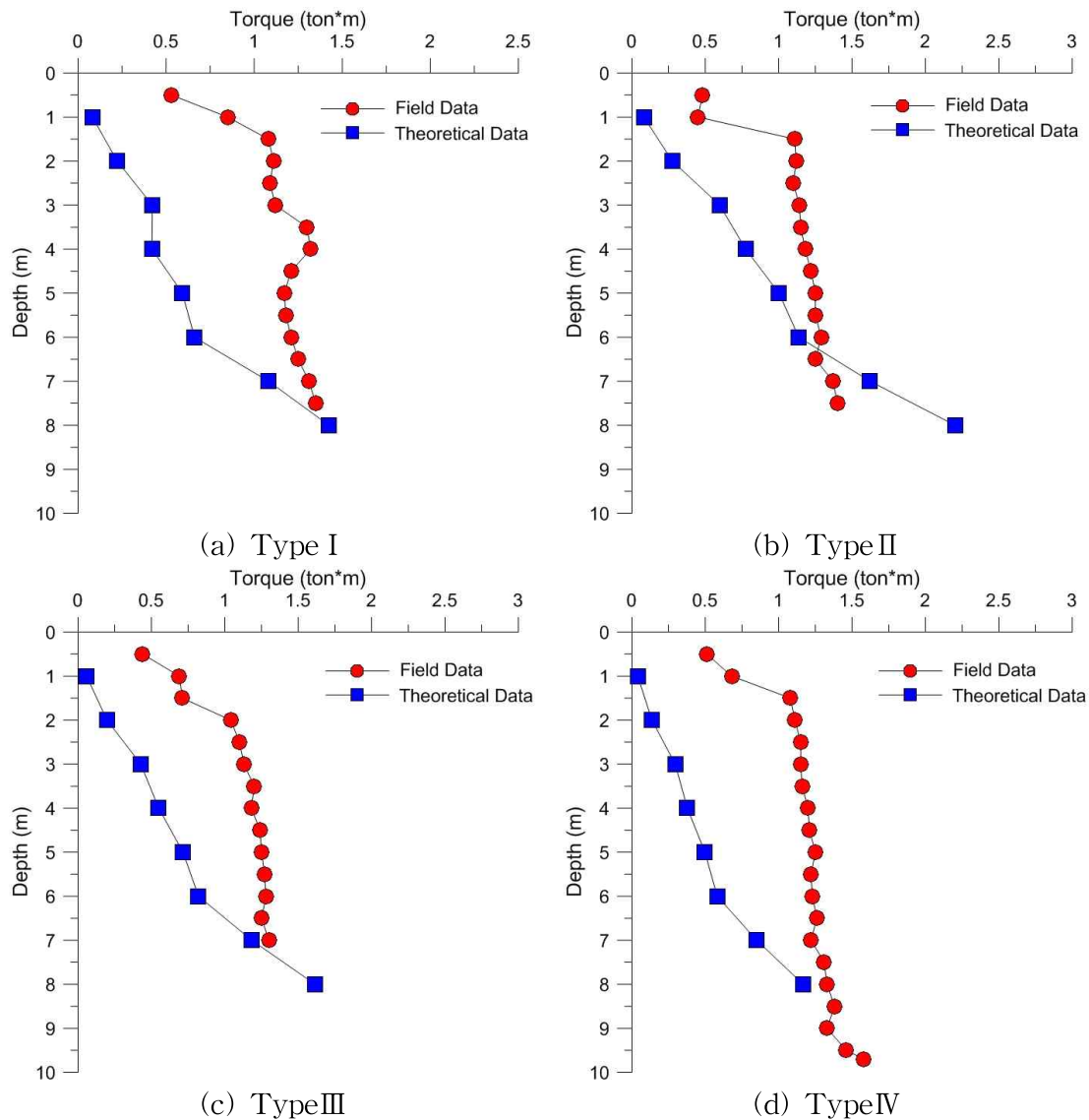
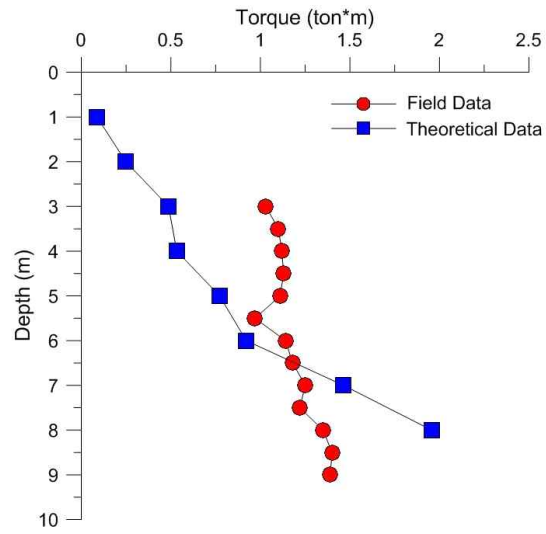
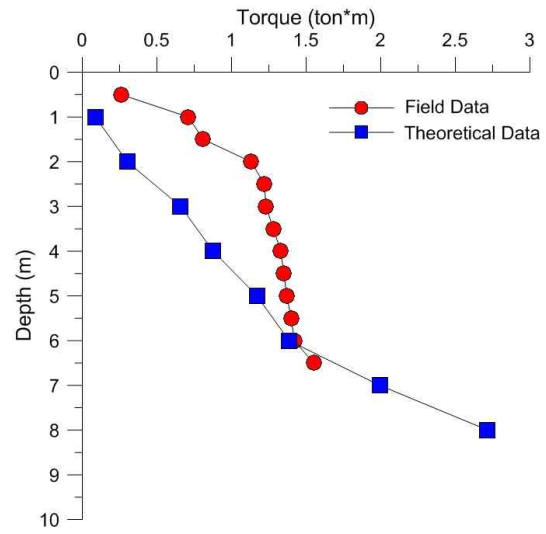


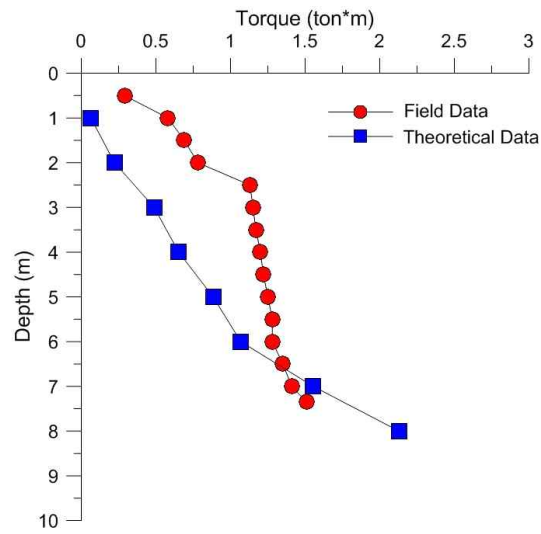
그림 2.3.3.42. 관입 깊이별 토크 값 (축 직경 73mm)



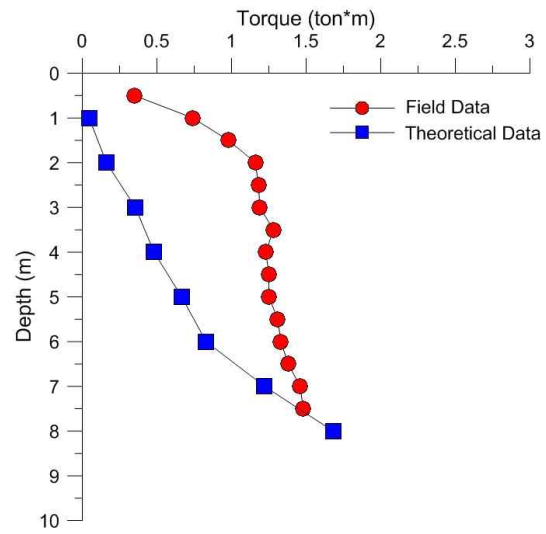
(a) Type I



(b) Type II



(c) Type III



(d) Type IV

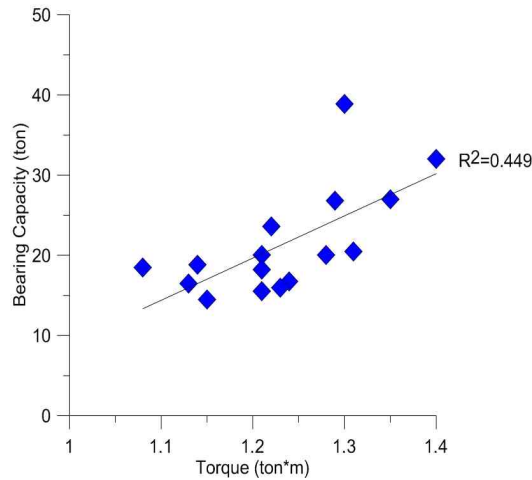
그림 2.3.3.43. 관입 깊이별 토크 값 (축 직경 114mm)

표 2.3.3.7 현장 재하시험 결과 및 최종토크 (축 직경 73mm)

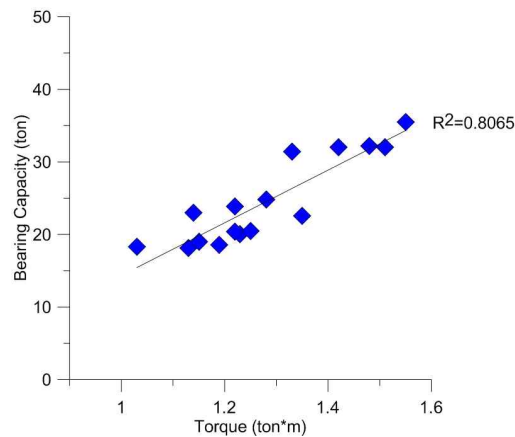
축 직경 (mm)	원판 직경 (mm)		관입 깊이 (m)	지지력 (ton)	최종토크 (ton·m)
73	Type I	400	3	18.5	1.08
			4.5	20	1.21
			6	18.2	1.21
			7.5	27	1.35
	Type II	400,350,300	3	18.8	1.14
			4.5	23.6	1.22
			6	26.8	1.29
			7.5	32	1.4
	Type III	350,300,250	3	16.5	1.13
			4.5	16.7	1.24
			6	20	1.28
			7.5	38.9	1.3
	Type IV	300,250,200	3	14.5	1.15
			4.5	15.56	1.21
			6	16	1.23
			7.5	20.5	1.31

표 2.3.3.8 현장 재하시험 결과 및 최종토크 (축 직경 114mm)

축 직경 (mm)	원판 직경 (mm)		관입 깊이 (m)	지지력 (ton)	최종토크 (ton·m)
114	Type I	400	3	18.3	1.03
			4.5	18.1	1.13
			6	23	1.14
			7.5	23.9	1.22
	Type II	400,350,300	3	20	1.23
			4.5	22.6	1.35
			6	32	1.42
			7.5	35.5	1.55
	Type III	350,300,250	3	19	1.15
			4.5	20.4	1.22
			6	24.8	1.28
			7.5	32	1.51
	Type IV	300,250,200	3	18.6	1.19
			4.5	20.5	1.25
			6	31.4	1.33
			7.5	32.2	1.48



(a) 축 직경 73mm



(c) 축 직경 114mm

그림 2.3.3.44. 지지력과 최종토크의 관계

(나) helical pile의 형상과 지지력과의 상관관계 분석

표 2.3.3.7에 정리된 축 직경 73mm 헬리컬 파일의 관입깊이에 따른 지지력의 변화를 그림 2.3.3.45(a)에, 표 2.3.3.8에 정리된 축 직경 114mm 헬리컬 파일의 관입깊이에 따른 지지력을 그림 2.3.3.45.(c)에 나타내었다. 그림 2.3.3.45.(a)에서 헬리컬 파일의 축 직경이 73mm로 동일할 때, 원판의 형상이 400, 350, 300mm인 경우(Type II)의 지지력이 원판의 형상이 350, 300, 250mm인 경우(Type III)와 원판의 형상이 300, 250, 200mm인 경우(Type IV)의 헬리컬 파일의 지지력보다 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 2.3.3.45.(c)에서 축 직경이 114mm인 경우에도 동일하게 원판의 형상이 Type II인 경우가 Type III 또는 Type IV인 경우보다 지지력이 큰 경향을 보이므로 현장 정재하시험 결과가 원판의 직경 증가에 따른 헬리컬 파일의 지지력 증가를 적절하게 반영함을 알 수 있다. 축 직경 73mm의 헬리컬 파일은 직경이 400 mm 원판의 개수가 1개인 경우(Type I)에는 3개의 원판이 부착된 Type II보다는 지지력이 적으며, Type III와 비교하면 심도가 3m, 4.5m일 때에는 더 큰 지지력을 갖지만, 6m와 7.5m에서는 오히려 작은 지지력을 보이는 것으로 측정되었다. 원판의 형상이 Type

IV인 경우에는 Type I 보다 지지력이 적게 측정되었다. 그림 2.3.3.45.(c)에서 축 직경이 114mm인 경우에는 축 직경이 73mm인 경우와 유사한 결과를 보이지만, 4가지 심도에서 모두 직경 400 mm 원판 1개인 헬리컬 파일(Type I)의 지지력이 원판이 3개인 헬리컬 파일(Type II와 III, IV)보다 적게 측정되었다. 직경이 400mm인 1개의 원판을 부착한 헬리컬 파일의 경우 최하단 원판의 직경이 300mm 또는 250mm인 경우보다 관입에 필요한 토크가 상대적으로 크다는 것을 고려하였을 때, 원판 1개를 부착한 헬리컬 파일보다 원판 3개를 부착한 헬리컬 파일이 지지력을 발현하는데 있어 상대적으로 효과적이라는 것을 판단할 수 있다.

헬리컬 파일의 중심축의 직경이 지지력에 미치는 영향을 평가하기 위하여 동일한 원판 형상에 대해, 축의 직경에 따른 지지력의 관계를 그림 2.3.3.46에 나타내었다. 원판 형상 Type II(그림 2.3.3.46.(b) 참조)과 Type IV(그림 2.3.3.46.d 참조)에서 축 직경이 증가하였을 때 측정 깊이에 따라 지지력이 다소 증가한다. 원판의 형상이 Type I 또는 Type III인 경우에도 축의 직경이 증가함에 따라 지지력이 증가하는 것을 확인할 수 있으나, 원판의 형상에 따른 지지력 변화를 나타낸 그림 2.3.3.45와 비교하였을 때, 상대적으로 원판의 직경이 축의 직경보다 헬리컬 파일의 지지력에 미치는 영향이 크다는 것을 확인할 수 있다.

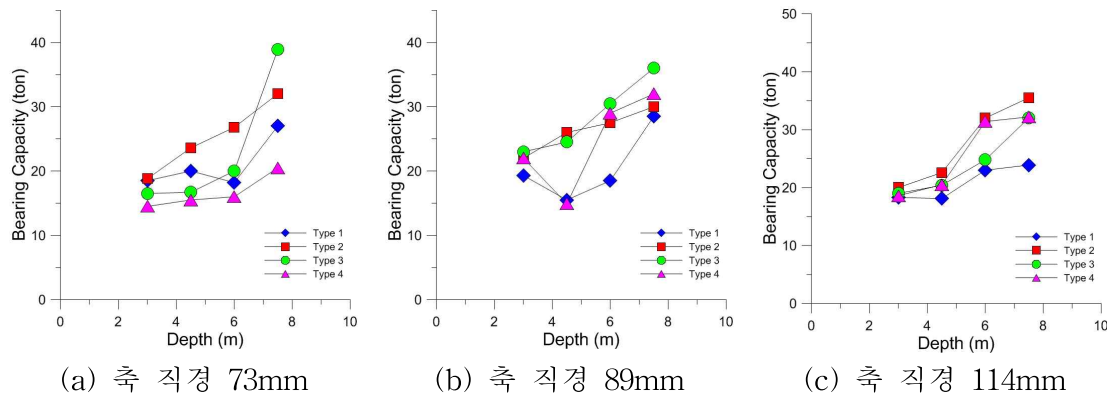


그림 2.3.3.45. 원판의 형상에 따른 지지력 변화

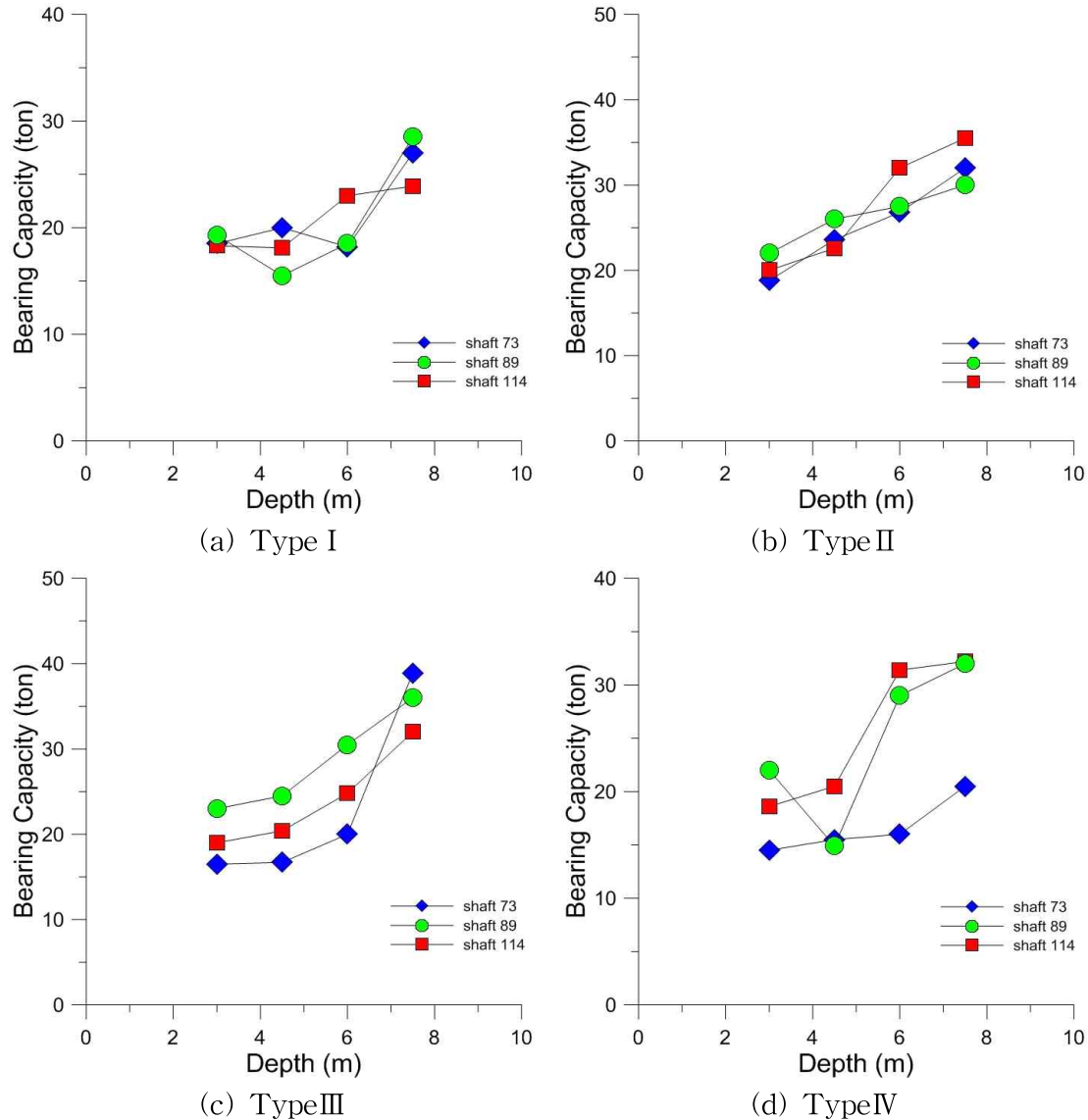


그림 2.3.3.46 축 직경에 따른 지지력 변화

(다) 예측 지지력과 시험 결과 비교

먼저, 현장 정재하시험을 통해 측정한 헬리컬 파일의 지지력을 Individual bearing method과 Cylindrical shear method을 통해 산정한 예측 지지력과 비교하였다. 일반적으로 헬리컬 파일의 지지력은 원판의 선단지지력이 차지하는 비중이 상대적으로 매우 크다. 특히 상대적으로 심도가 낮은 경우에는 지지력의 대부분이 원판의 선단지지력으로 발현된다. 이러한 이유로 원판의 개수, 크기에 따라 산정되는 지지력을 비교하기 위하여 세 가지 축의 직경(73mm, 89mm, 114mm) 중에서 먼저 축의 직경이 73mm이고 직경이 400 mm 원판 1개가 부착된 헬리컬 파일(Type I)의 실측 및 예측 지지력을 그림 2.3.3.47(a)에, 직경이 각각 400, 350, 300mm인 3개의 원판이 부착된 헬리컬 파일(Type II)를 그림 2.3.3.47(b)에, 직경이 각각 350, 300, 250mm인 3개의 원판이 부착된 헬리컬 파일(Type III)를 그림 2.3.3.47(c)에, 그리고 마지막으로 직경이 각각 300, 250, 200mm인 3개의 원판이 부착된 헬리컬 파일(Type IV)를 그림 2.3.3.47d에 비교하였다. 1개의 원판이 부착된 헬리컬 파일

(Type I)의 지지력 예측은 Individual bearing method과 Cylindrical shear method에서 동일한 결과를 얻는다. 그림 2.3.3.47(a)에서 Individual bearing method (또는 Cylindrical shear method)으로 예측한 지지력이 3m와 4.5m, 그리고 7.5m 심도에서는 실측 지지력에 비해 다소 작게 산정되었으나, 6m 지점에서는 실측보다 크게 산정되었다. 이는 6m지점에서 실측 지지력의 측정오차로 사료된다. 그림 2.3.3.47(b)와 그림 2.3.3.47(c)에서 원관이 3개 부착된 헬리컬 파일(Type II와 III)은 Individual bearing method으로 예측한 지지력의 경우 실측지지력보다 큰 값을 보여주었고, Cylindrical shear method의 경우 상대적으로 작은 값을 보인다. 원관의 형상이 Type IV인 경우에도 심도 3m를 제외하면 동일한 경향을 보여준다.

축의 직경이 89mm인 헬리컬 파일의 예측 및 실측 지지력의 비교는 그림 2.3.3.48에 나타내었다. 그림 2.3.3.48(b)와 그림 2.3.3.48(c)에서 헬리컬 파일의 축 직경이 89mm인 경우에도 그림 2.3.3.47에 도시된 축 직경 73mm의 헬리컬 파일과 동일하게 Individual bearing method으로 예측한 지지력의 경우 실측지지력보다 큰 값을 보여주고, Cylindrical shear method의 경우 상대적으로 작은 값을 보인다.

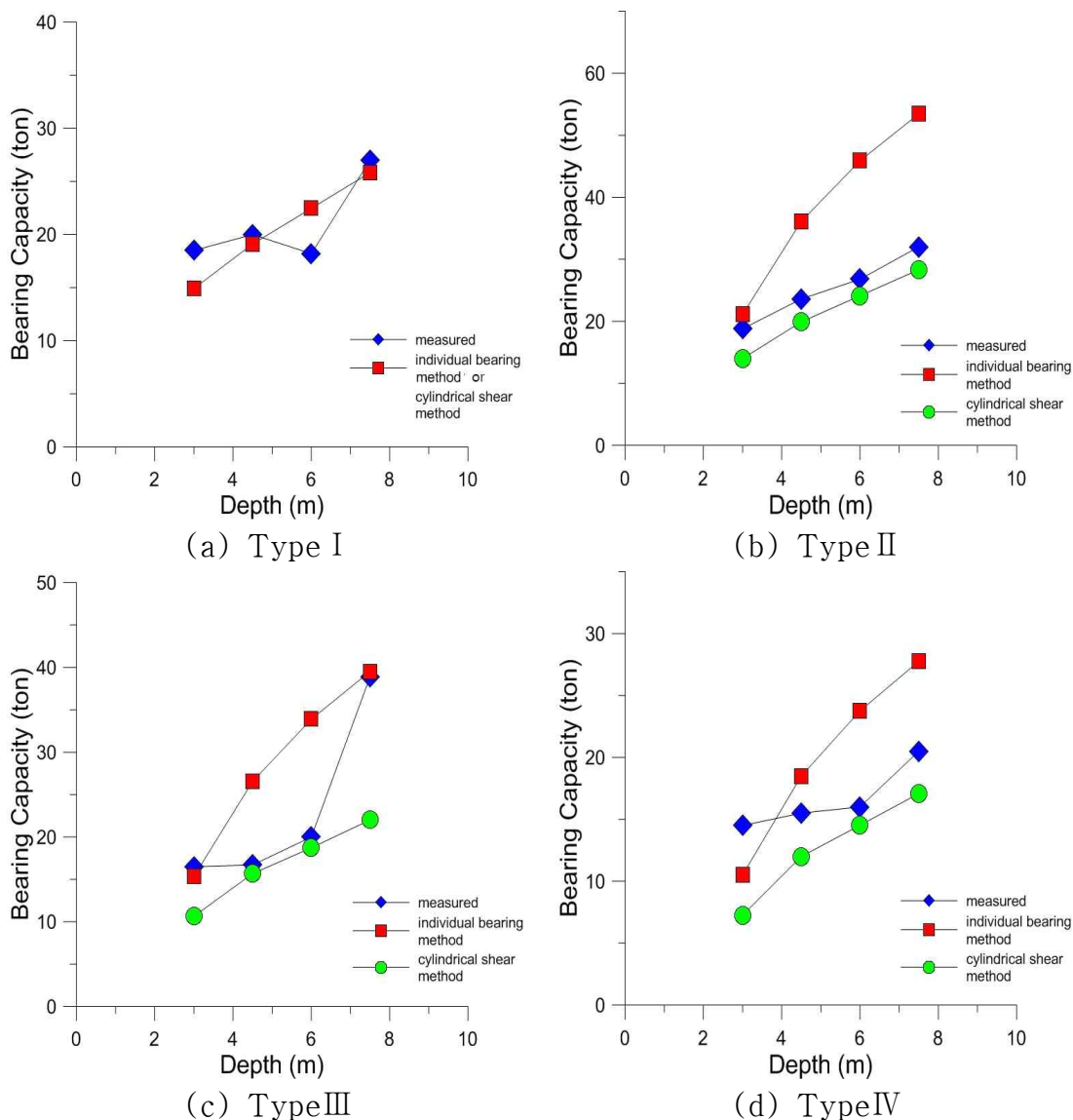


그림 2.3.3.47 측정지지력과 예측지지력의 비교 (축 직경 73mm)

또한 축의 직경이 114mm인 헬리컬 파일의 예측 및 실측 지지력의 비교를 그림 2.3.3.49에 나타내었다. 그림 2.3.3.49.(a)에서 원판이 1개 부착된 헬리컬 파일(Type I)은 심도가 낮을 경우는 예측 지지력이 다소 과소평가 되고, 원판이 3개 부착된 헬리컬 파일(Type II, III와 IV)은 축의 직경이 73mm인 경우와 유사하게, Individual bearing method는 실측 지지력보다 큰 값을, Cylindrical shear method은 실측 지지력보다 작게 헬리컬 파일의 지지력을 예측한다. 즉, 실측된 헬리컬 파일의 지지력은 일반적으로 Individual bearing method로 산정한 상한값과 Cylindrical shear method로 예측한 하한값 사이에 위치함을 알 수 있다. 헬리컬 파일의 축의 직경, 원판의 형상에 따라 두 가지 방법으로 예측한 지지력과 실측 지지력 값을 축의 직경에 따라 표 2.3.3.9~표 2.3.3.11에 나타냈다.

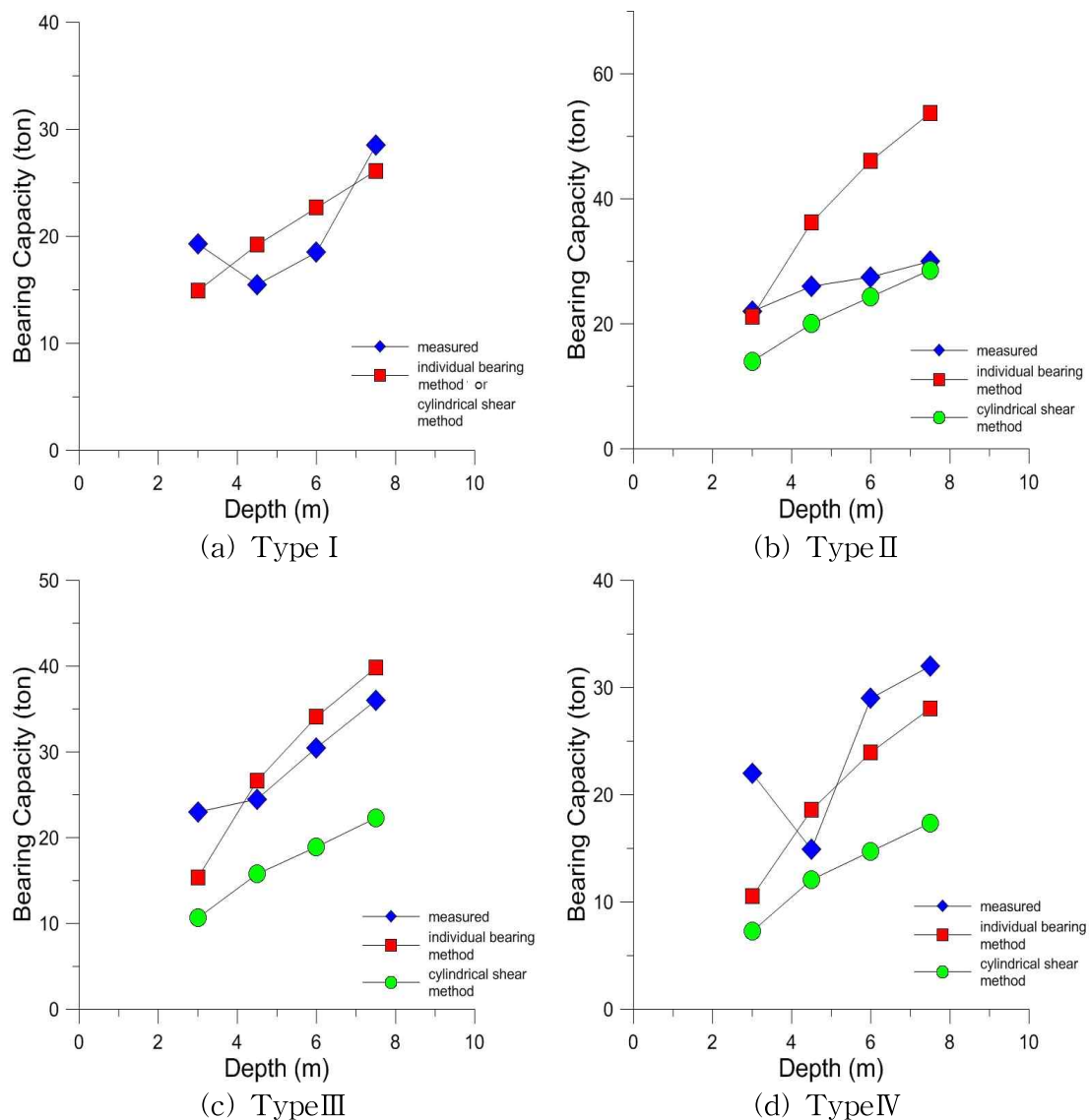
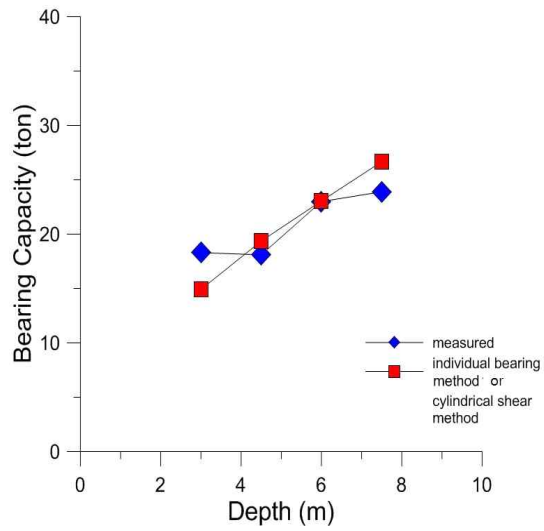
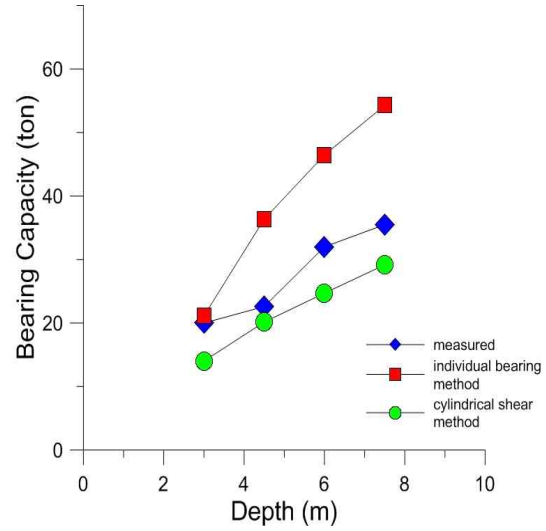


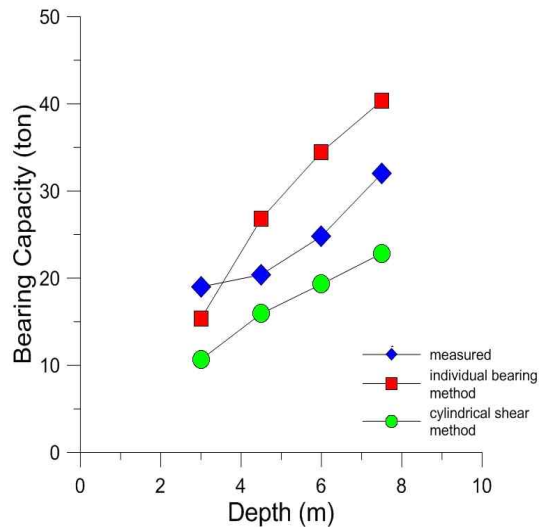
그림 2.3.3.48. 측정지지력과 예측지지력의 비교 (축 직경 89mm)



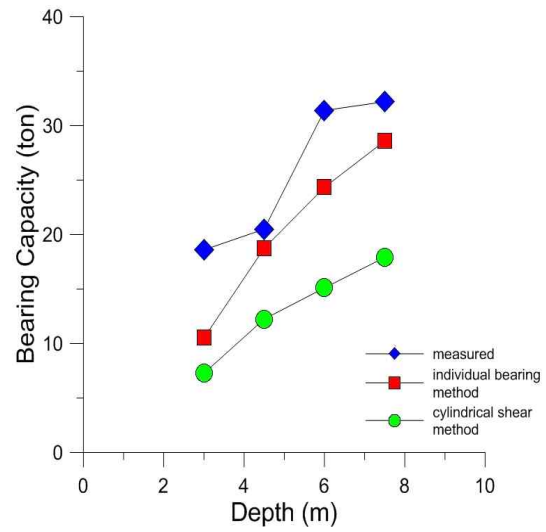
(a) Type I



(b) Type II



(c) Type III



(d) Type IV

그림 2.3.3.49. 측정지지력과 예측지지력의 비교 (축 직경 114mm)

표 2.3.3.9. 측정지지력과 예측지지력의 비교 (축 직경 73mm)

축 직경 (mm)	원판 직경 (mm)		관입깊이 (m)	지지력 (ton)		
				측정값	Individual bearing method	Cylindrical shear method
73	Type I	400	3	18.5	14.91	14.91
			4.5	20	19.11	19.11
			6	18.2	22.47	22.47
			7.5	27	25.83	25.83
	Type II	400,350,300	3	18.8	21.12	14.00
			4.5	23.6	36.11	19.91
			6	26.8	45.89	24.12
			7.5	32	53.44	28.33
	Type III	350,300,250	3	16.5	15.34	10.65
			4.5	16.7	26.55	15.68
			6	20	33.89	18.73
			7.5	38.9	39.52	22.01
	Type IV	300,250,200	3	14.5	10.51	7.26
			4.5	15.5	18.50	11.99
			6	16	23.76	14.52
			7.5	20.5	27.76	17.08

표 2.3.3.10. 측정지지력과 예측지지력의 비교 (축 직경 89mm)

축 직경 (mm)	원판 직경 (mm)		관입깊이 (m)	지지력 (ton)		
				측정값	Individual bearing method	Cylindrical shear method
89	Type I	400	3	19.3	14.92	14.92
			4.5	15.5	19.20	19.20
			6	18.5	22.67	22.67
			7.5	28.5	26.12	26.12
	Type II	400,350,300	3	22	21.12	14.01
			4.5	26	36.20	20.00
			6	27.5	46.09	24.32
			7.5	30	53.73	28.62
	Type III	350,300,250	3	23	15.35	10.65
			4.5	24.5	26.64	15.77
			6	30.5	34.09	18.93
			7.5	36	39.81	22.30
	Type IV	300,250,200	3	22	10.51	7.26
			4.5	14.9	18.59	12.08
			6	29	23.96	14.72
			7.5	32	28.05	17.37

표 2.3.3.11. 측정지지력과 예측지지력의 비교 (축 직경 114mm)

축 직경 (mm)	원관 직경 (mm)		관입깊이 (m)	지지력 (ton)		
				측정값	Individual bearing method	Cylindrical shear method
114	Type I	400	3	18.3	14.92	14.92
			4.5	18.1	19.36	19.36
			6	23	23.06	23.06
			7.5	23.9	26.66	26.66
	Type II	400,350,300	3	20	21.13	14.01
			4.5	22.6	36.36	20.16
			6	32	46.48	24.71
			7.5	35.5	54.27	29.16
	Type III	350,300,250	3	19	15.35	10.66
			4.5	20.4	26.80	15.93
			6	24.8	34.48	19.32
			7.5	32	40.35	22.84
	Type IV	300,250,200	3	18.6	10.52	7.27
			4.5	20.5	18.75	12.24
			6	31.4	24.35	15.11
			7.5	32.2	28.59	17.91

헬리컬 파일의 지지력 예측을 위한 세 번째 방법인 Torque correlation method에 적용되는 지지력-토크 계수(K_t)는 축의 직경에 영향을 받으며, Perko(2009)는 축 직경 73mm의 경우 28m-1, 114mm의 경우 19m-1을 제안하였다. 본 연구에서는 현장 측정을 통해 제시한 최종 관입토크를 Perko(2009)가 제안한 K_t 값을 이용하여 지지력을 예측하였다. 현장 정재하 시험으로 측정된 헬리컬 파일의 지지력을 Torque correlation method로 예측한 지지력으로 정규한 값을 축 직경 73mm의 경우를 표 2.3.3.12에, 축 직경 114mm의 경우를 표 2.3.3.13에 나타냈다. 표 2.3.3.13에서 축 직경이 114mm인 헬리컬 파일은 Perko(2009)가 제시한 $K_t=19m-1$ 를 적용한 예측 지지력이 실측값과 유사하나, 축 직경이 73mm인 헬리컬 파일은 Perko(2009)가 제시한 $K_t=28m-1$ 를 적용 시, Torque correlation method이 지지력을 대략 2배 정도 과대평가 한다. 따라서, 축 직경이 73mm인 헬리컬 파일에 대해서도 축 직경 114mm에 적용한 $K_t=19m-1$ 를 적용하여 예측한 지지력을 실측 지지력과 비교하여 표 2.3.3.12과 표 2.3.3.13에 “Recommended”에 비교하였다. 최종토크와 지지력의 상관도를 선형 회귀를 통해 분석한 결과, 다소 분산성을 보이나 전반적으로 선형비례 하므로(그림 2.3.3.44 참조), Torque correlation method를 통하여 헬리컬 파일의 지지력을 예측할 때 지지력-토크 계수를 축의 직경에 관계없이 19m-1을 사용하는 것이 적합하다고 사료된다. 표 2.3.3.12과 표 2.3.3.13에서 비교한 Perko(2009)의 제안값과 “Recommended”의 비교 결과를 그림 2.3.3.50에 나타내었다.

표 2.3.3.12. Torque correlation method 에 의한 지지력 산정 (축 직경 73mm)

축 직경 (mm)	원판 직경 (mm)		관입깊이 (m)	지지력 (ton)		
				measured	$\frac{measured}{predicted}$ (Perko, 2009))	$\frac{measured}{predicted}$ (Recommended)
73	Type I	400	3	18.5	0.612	0.902
			4.5	20	0.590	0.870
			6	18.2	0.537	0.792
			7.5	27	0.714	1.053
	Type II	400,350,300	3	18.8	0.589	0.868
			4.5	23.6	0.691	1.018
			6	26.8	0.742	1.093
			7.5	32	0.816	1.203
	Type III	350,300,250	3	16.5	0.521	0.769
			4.5	16.7	0.481	0.709
			6	20	0.558	0.822
			7.5	38.9	1.069	1.575
	Type IV	300,250,200	3	14.5	0.450	0.664
			4.5	15.5	0.457	0.674
			6	16	0.465	0.685
			7.5	20.5	0.559	0.824

표 2.3.3.13. Torque correlation method 에 의한 지지력 산정 (축 직경 114mm)

축 직경 (mm)	원판 직경 (mm)		관입깊이 (m)	지지력 (ton)		
				measured	$\frac{measured}{predicted}$ (Perko, 2009))	$\frac{measured}{predicted}$ (Recommended)
114	Type I	400	3	18.3	0.935	0.935
			4.5	18.1	0.843	0.843
			6	23	1.062	1.062
			7.5	23.9	1.031	1.031
	Type II	400,350,300	3	20	0.856	0.856
			4.5	22.6	0.881	0.881
			6	32	1.186	1.186
			7.5	35.5	1.205	1.205
	Type III	350,300,250	3	19	0.870	0.870
			4.5	20.4	0.880	0.880
			6	24.8	1.020	1.020
			7.5	32	1.115	1.115
	Type IV	300,250,200	3	18.6	0.823	0.823
			4.5	20.5	0.863	0.863
			6	31.4	1.243	1.243
			7.5	32.2	1.145	1.145

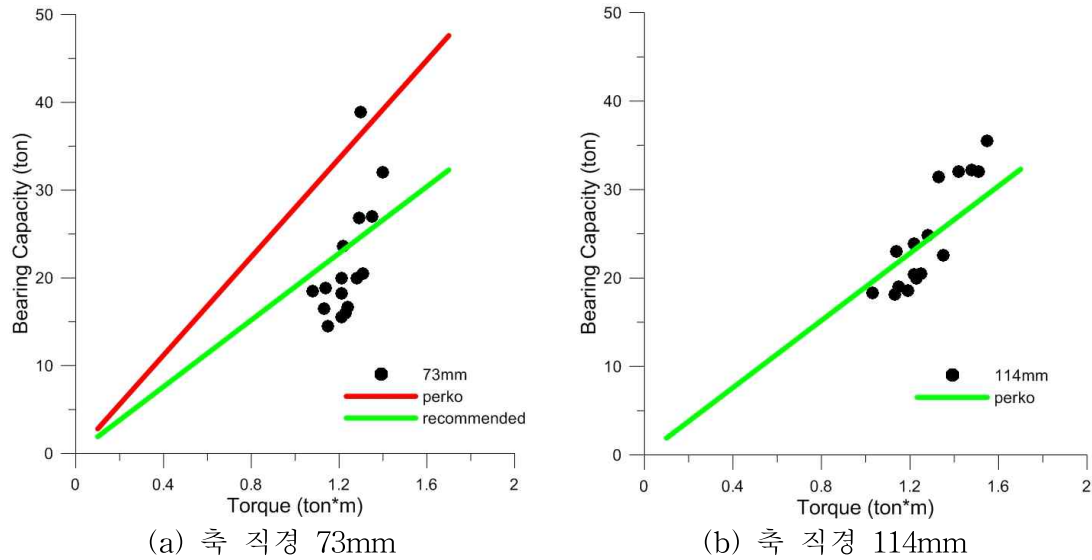


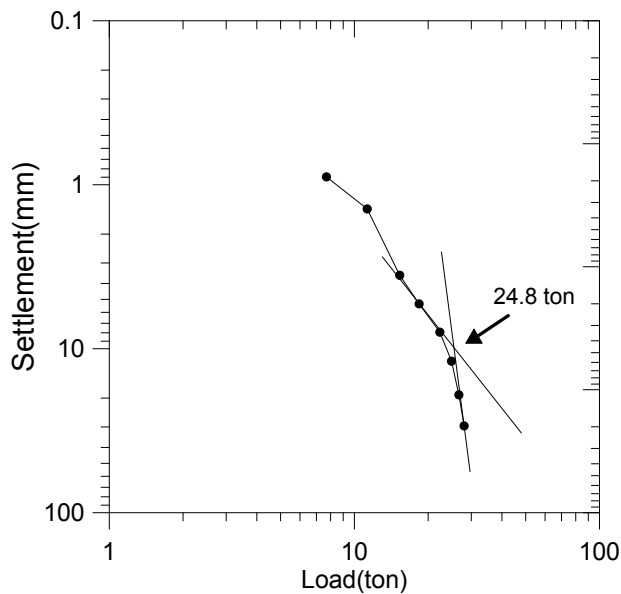
그림 2.3.3.50 지지력-토크 계수와 시험 결과 비교

(라) 양방향 재하시험의 결과 분석

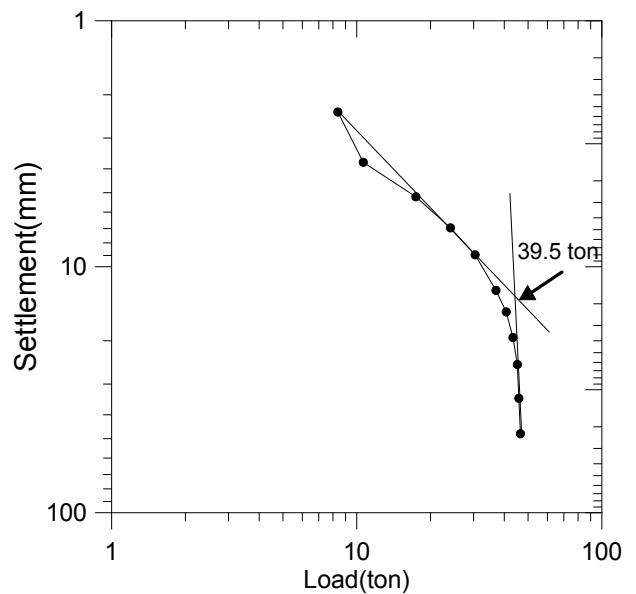
양방향 재하시험은 축 직경 89mm와 114mm 두 가지 축 직경에 대해 현장 시공을 수행하였으며, 각각 4.5m와 6m까지 관입하여 하중-침하 곡선을 산정하였다. 정재하시험의 분석 방법과 동일하게 Log(P)-Log(S) 방법으로 지지력을 산정하였으며, 시험결과는 크게 두 가지로 세분할 수 있다. 첫 번째는 일반적인 양방향 재하시험과 동일하게 셀에 하중을 주어 양방향 변위와 하중을 측정하고, 두 번째로 시험하중을 반대 방향(인발)으로 적용하여 셀이 압축되는 형상을 갖는 것이다. 그림 2.3.3.51에서 양방향 재하시험 결과 헬리컬 파일의 선단 부에서 침하가 발생한다. 양방향 셀의 위치를 고려하면, 최하단 원판의 선단지지력을 산정할 수 있으나, 상부 원판, 중간 원판과 축의 주면 마찰력은 산정이 불가능하다. 이에 두 번째로 수행한 시험은 최상부 원판 상부에 양방향 셀을 설치하고 파일 두부를 고정, 헬리컬 파일에 가해지는 하중이 인발이 되도록 반대 방향으로 하중을 가하면, 최상부 원판부터 하단까지의 헬리컬 파일이 지표면 방향으로 끌려오는 형상이 된다. 두 번째 시험의 결과는 그림 2.3.3.52에 나타냈으며, 이로부터 첫 번째 실험에서 산정할 수 있는 최하단 원판의 선단 지지력을 제외한 헬리컬 파일의 주면마찰력과 원판의 저항력을 산정할 수 있다. 결과적으로 헬리컬 파일의 지지력은 첫 번째 시험과 두 번째 시험에서 산정된 지지력의 합으로 표현할 수 있으며, 동일한 헬리컬 파일에 대하여 정재하시험을 수행, 결과를 그림 2.3.3.53에 도시하였으며, 이를 표 2.3.3.14에 정리하였다. 축 직경 89mm의 시험결과, 관입깊이가 4.5m인 경우에는 양방향 재하시험으로 예측한 지지력과 정재하시험으로 측정된 지지력이 다소 차이를 보였으나, 관입깊이가 6m인 경우에는 양방향 재하시험 결과와 정재하시험 결과가 유사함을 알 수 있다. 축 직경이 114mm인 경우에는, 관입깊이 4.5m와 6m 모두 두 가지 시험 결과가 유사하여, 양방향 재하시험의 신뢰성을 판단할 수 있다.

① 정재하시험 결과

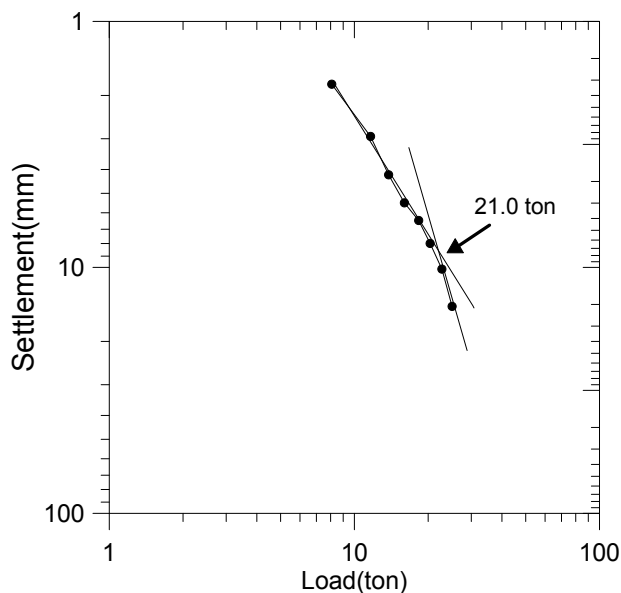
89mm, 114mm의 중심축 각각에 450mm, 350mm, 200mm의 나선형 원판을 부착하여 두 가지 종류의 헬리컬 파일을 구성하였으며, 관입심도 4.5m와 6m에서 정재하시험을 통해 하중-침하 곡선을 산정하였다. 헬리컬 파일의 지지력은 $\text{Log}(P)\text{-Log}(S)$ 방법을 이용하여 산정하였으며, 시험 결과 헬리컬 파일의 지지력은 중심축 직경 89mm의 헬리컬 파일의 경우 관입깊이 4.5m에서 24.8ton, 6m에서 39.5ton으로 산정되었다. 축 직경 114mm의 헬리컬 파일은 관입깊이 4.5m에서 21.0ton, 6m에서 41.0ton으로 산정되었으며, 시험 결과의 하중-변위 관계를 그림 2.3.3.51에 도시하였다.



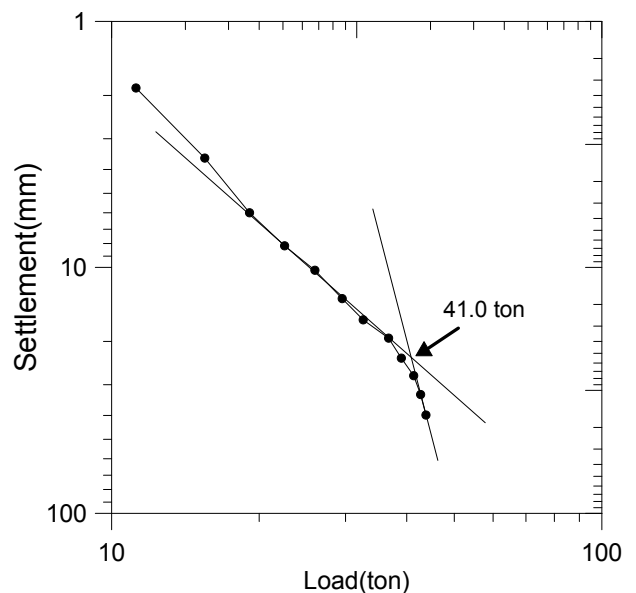
(a) Shaft diameter 89mm, penetration depth 4.5m



(b) Shaft diameter 89mm, penetration depth 6m



(c) Shaft diameter 114mm, penetration depth 4.5m



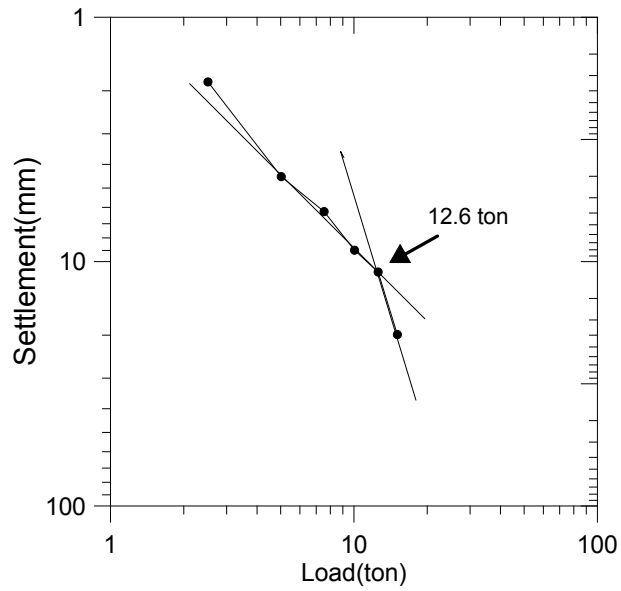
(d) Shaft diameter 114mm, penetration depth 6m

그림 2.3.3.51. load-settlement curve obtained from static pile load test (log-log scale)

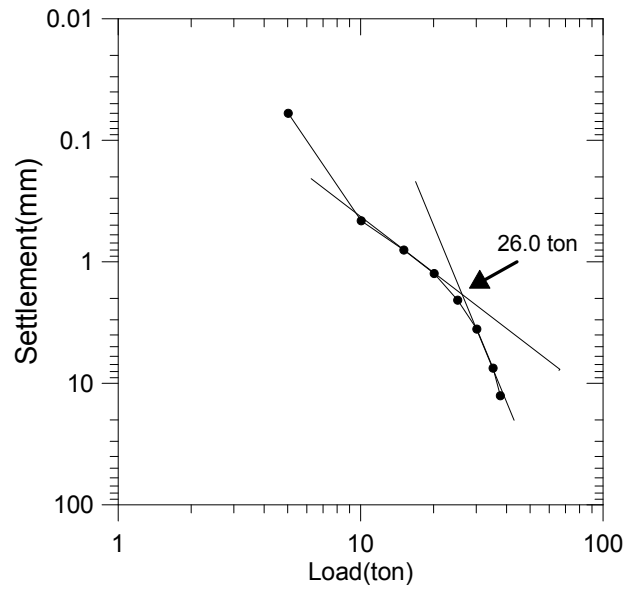
② 양방향 재하시험 결과

양방향 재하시험은 양방향 셀을 삽입하는 위치를 다르게 하여 두가지 종류의 시험으로 수행하였다. 첫 번째 시험 1은 그림 2.3.3.52(a)와 같이 최하단 원판 상부에 양방향 셀을 부착하고 내부 유압재하 선으로 유압을 재하(유압셀 팽창)하여 최하단 나선형 원판의 압축 거동으로부터 최하단 나선형 원판의 선단지지력을 측정하였으며, 두 번째 시험 2는 그림 2.3.3.52(b)와 같이 최상단 원판 상부에 양방향 셀을 부착하고 외부 유압재하 선으로 유압을 재하(유압셀 압축)하여 나선형 원판 전체의 인발 거동으로부터 나선형 원판으로 인한 헬리컬 파일의 주변마찰력을 측정하였다. 시험 1과 시험 2를 수행할 시, 선단지지력과 주변마찰력을 명확하게 측정하기 위하여 헬리컬 파일 두부를 고정한 후 시험하였다.

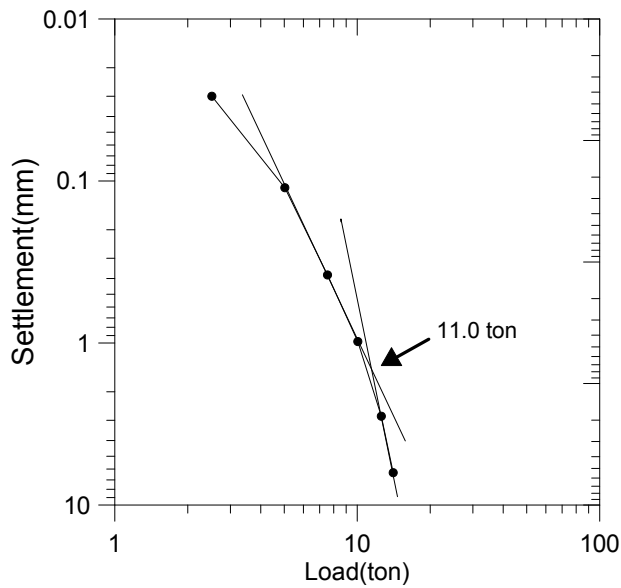
양방향 재하시험 또한 정재하시험의 분석법과 동일하게 $\text{Log}(P)\text{-Log}(S)$ 방법으로 지지력을 산정하였다. 그림 2.3.3.53에 나타나듯, 최하단 나선형 원판의 선단지지력 측정 시험(시험 1)을 통해 헬리컬 파일의 선단지지력을 산정할 수 있었으며, 헬리컬 파일의 선단지지력은 중심축 직경 89mm의 경우 관입깊이 4.5m에서 12.6ton, 6m에서 26.0ton으로 산정되었다. 중심축 직경 114mm의 헬리컬 파일의 선단지지력은 관입깊이 4.5m에서 11.0ton, 6m에서 20.5ton으로 산정되었다. 최하단 나선형 원판의 선단지지력 측정 시험(시험 1)에서 측정하지 못한 헬리컬 파일의 나선형 원판에 의한 주변마찰력은 나선형 원판 전체의 주변마찰력 측정 시험(시험 2)으로 측정 하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 헬리컬 파일의 나선형 원판으로 인한 주변마찰력은 중심축 직경 89mm의 헬리컬 파일의 경우 관입깊이 4.5m에서 4.5ton, 6m에서 16.0ton으로 산정되었고, 축 직경 114mm의 헬리컬 파일의 경우 관입깊이 4.5m에서 11.0ton, 6m에서 20.0ton으로 산정되었다.



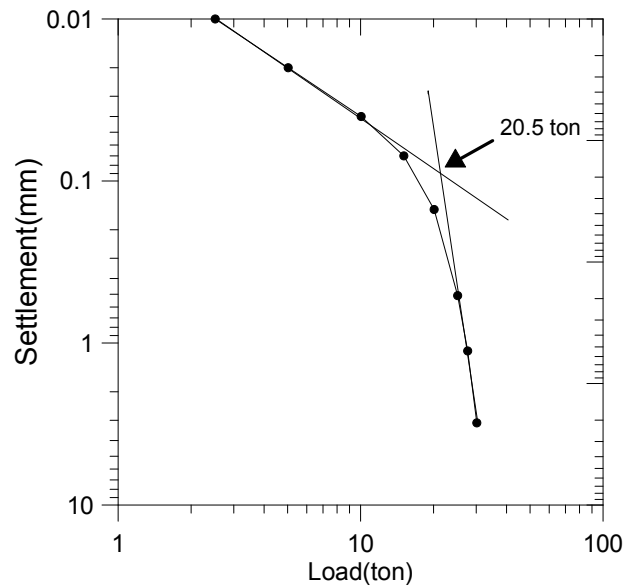
(a) 축 직경 89mm, 관입깊이 4.5m



(b) 축 직경 89mm, 관입깊이 6m

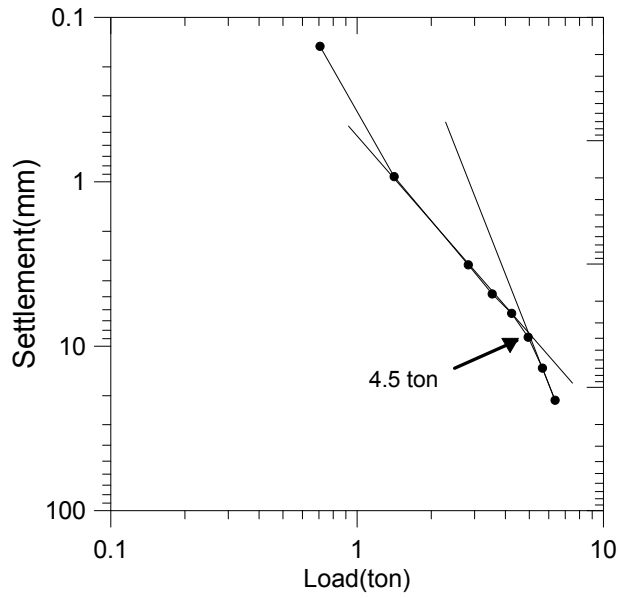


(c) 축 직경 114mm, 관입깊이 4.5m

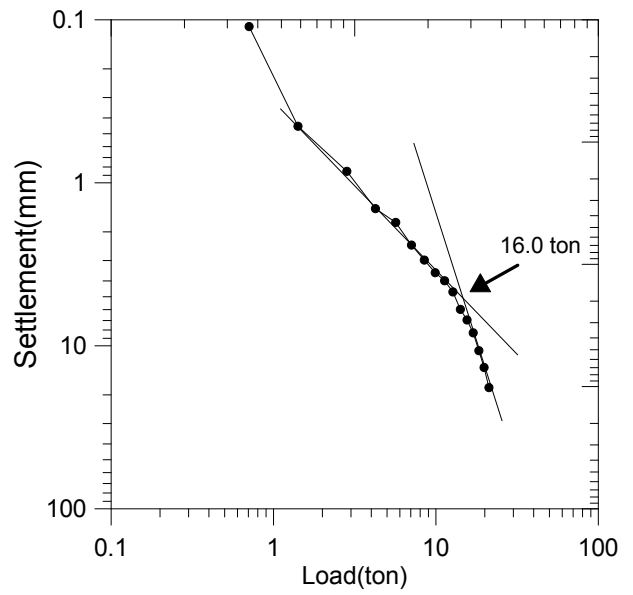


(d) 축 직경 114mm, 관입깊이 6m

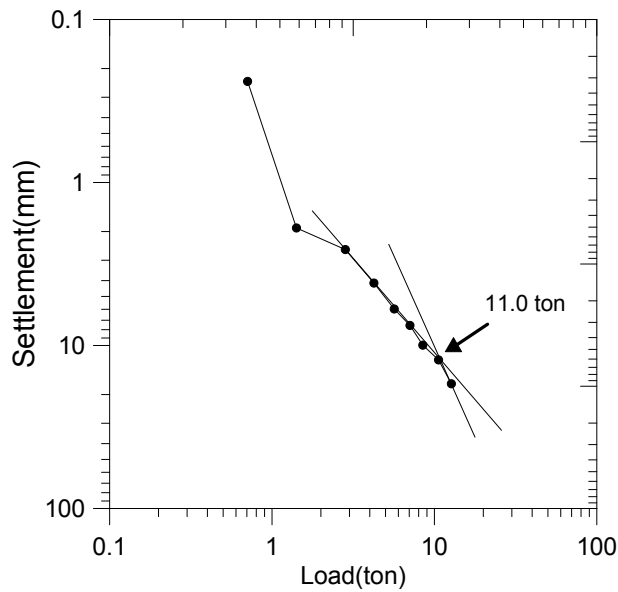
그림 2.3.2.51. 양방향재하시험을 통해 얻은 하중-침하 곡선 (log-log scale, test 1)



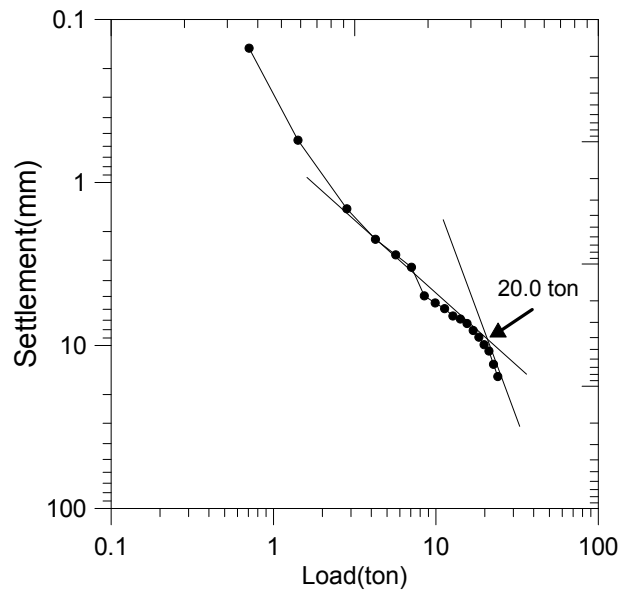
(a) 축 직경 89mm, 관입깊이 4.5m



(b) 축 직경 89mm, 관입깊이 6m



(c) 축 직경 114mm, 관입깊이 4.5m



(d) 축 직경 114mm, 관입깊이 6m

그림 2.3.2.52 양방향재하시험을 통해 얻은 하중-침하 곡선 (log-log scale, test 2)

표 2.3.3.14. 양방향 재하시험 결과

축 직경	관입깊이 (m)	양방향 시험			정재하시험
		선단 (ton)	인발시험 (ton)	예측지지력 (ton)	측정지지력 (ton)
89mm	4.5	12.6	4.5	17.1	24.8
	6	26.0	16.0	42	39.5
114mm	4.5	11.0	11.0	22.0	21.0
	6	20.5	20.0	40.5	41.0

본 연구에서는 헬리컬 파일의 지지력을 양방향 재하의 방법으로 산정하는 방안을 제시하였다. 본 시험을 위하여 중심축 직경이 89mm, 114mm 인 두가지 종류의 헬리컬 파일에 대해 정재하 시험과 양방향 재하시험을 수행하였으며, 양방향 재하시험의 경우 선단지지력과 주면마찰력을 각각 측정하기 위하여 최하단 나선형 원판 상부와 최상단 나선형 원판 상부에 유압식 셀을 각각 삽입하여 시험을 수행하였다. 또한 정재하 시험과 양방향 재하시험의 결과를 비교 분석하여 양방향 재하시험을 통한 헬리컬 파일의 지지력 산정의 적합성을 판단하였다. 양방향 재하시험의 결과를 다음에 요약하였다.

- 현장 정재하시험은 삼각대의 원리를 이용하여 간편화된 정재하시험으로 수행되었으며, 시험 결과의 하중-변위 곡선으로부터 지지력을 산정하였다.
- 현장 양방향 재하시험은 두 가지 종류의 시험을 수행하였다. 시험 1은 일반적인 양방향 재하시험과 동일하게 유압셀에 하중을 주어 양방향 변위와 하중을 측정하는 시험이며, 시험 2는 시험하중을 반대 방향(인발)으로 재하하여 유압향 셀이 압축되는 방법으로 수행한 시험이다. 시험 1을 통해 최하단 원판의 선단지지력을 산정하였으며, 시험 2를 통해 나선형 원판으로 인한 주면마찰력을 산정하였다. 헬리컬 파일의 지지력은 첫 번째 시험에서 산정된 선단지지력과 두 번째 시험에서 산정된 주면마찰력의 합으로 산정하였다.
- 동일한 형상의 헬리컬 파일에 대한 정재하시험과 양방향 재하시험을 비교 분석한 결과, 관입깊이에 따른 지지력은 유사한 경향을 나타냈으며, 이로부터 비교적 간편한 양방향 재하시험으로 정재하시험을 대체할 수 있다고 판단된다.
- 중심축 직경 114mm 시험에서 최대 120ton 까지의 유압장치의 재하능력이 유효함을 확인 하였다. 양방향 시험법은 2가지 시험(시험1, 시험2)의 병합이므로 최대 240ton 까지 측정이 유효함을 판단하였다.

(마) 지반보강 헬리컬 파일의 지지력 개선효과

73mm, 114mm 중심축에 400mm 나선형 원판을 부착한 헬리컬 파일을 대상으로 그라우팅에 따른 지지력 개선효과 및 공동발생 대책효과를 확인하였다. 그라우팅을 통한 지반보강

은 낮은 강성의 지반에서 헬리컬 파일을 시공해야 하는 경우와 같이, 충분한 선단 지지력을 확보하기 어려운 지반에 이용하는 방법이므로 다른 영향의 효과를 최소화 하고 지반보강으로 인한 헬리컬 파일의 지지력 개선 효과를 명확히 파악하고자 시험 헬리컬 파일을 3m 까지만 관입하여 낮은 N치의 지반에서 헬리컬 파일 그라우팅 시험을 수행하였다. 개발한 헬리컬 파일 그라우팅 장비를 이용하여 그라우팅을 실시한 결과, 일정양의 시멘트 주입 후 시멘트가 헬리컬 파일과 지반사이의 경계면을 타고 상부로 유출되어 그림 2.3.3.54와 같이 상부 지반의 공동을 메우는 현상이 관찰되었다. 또한 그라우팅 완료 후 헬리컬 파일 주변 지반을 굴착 하여 그림 2.3.3.55와 같이 헬리컬 파일 주변으로 형성된 구근으로 인한 지반 보강 효과를 육안으로 확인 할 수 있었다.



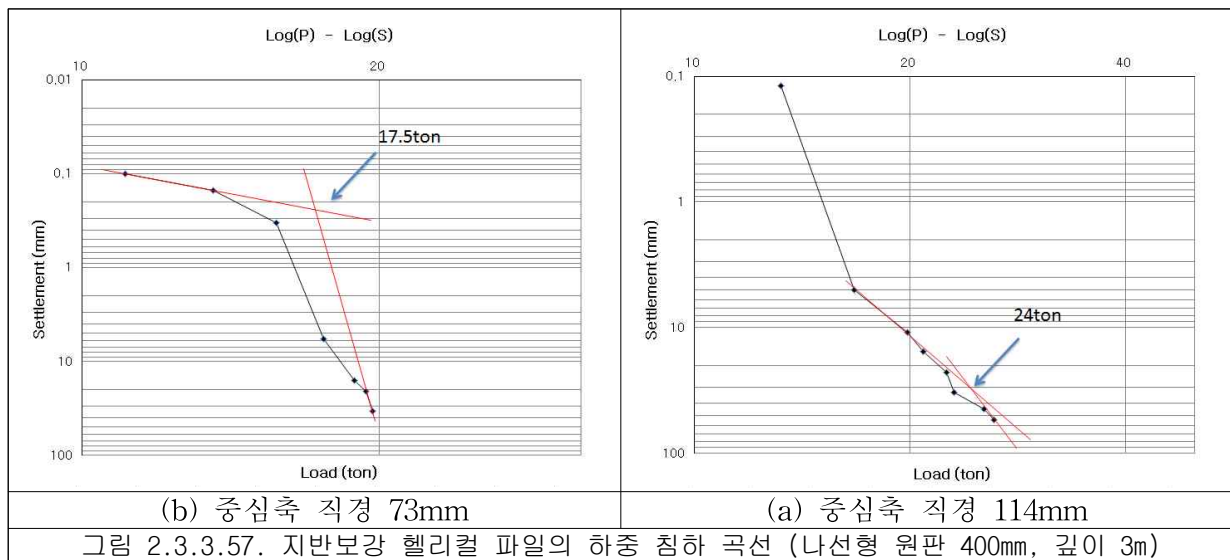
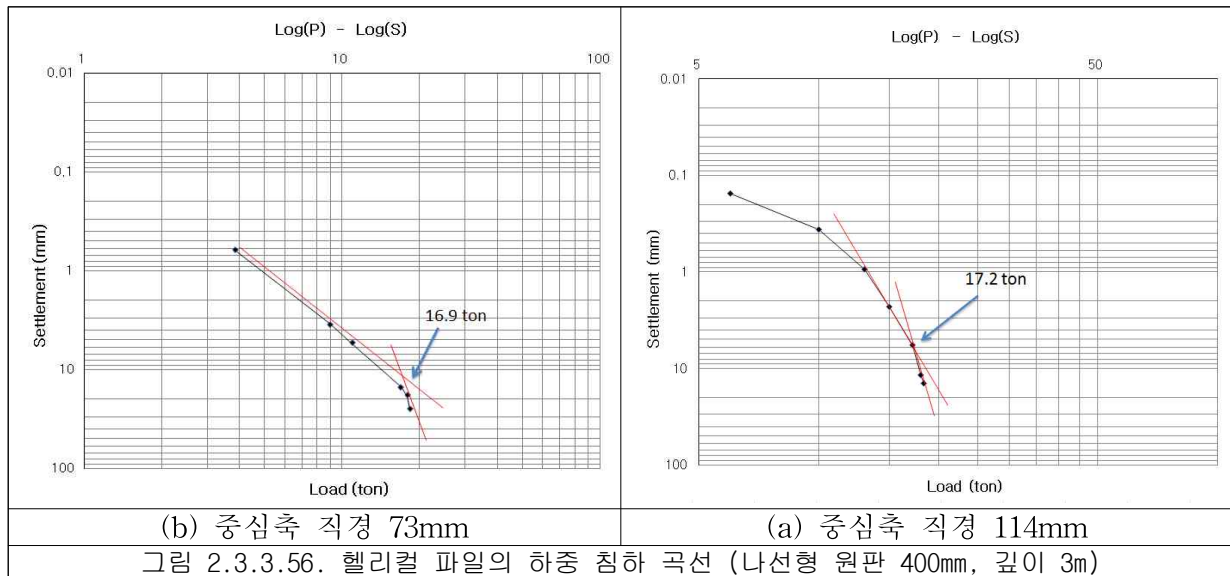
그림 2.3.3.54. 그라우팅 주입으로 인한 상부 지반 공동 메움 효과



그림 2.3.3.55. 그라우팅 주입으로 인한 지반 보강 효과

그라우팅으로 인한 지반보강 효과를 파악하기 위하여 그라우팅을 수행한 지반보강 헬리컬 파일과 동일한 형상의 일반 헬리컬 파일을 동일 지반에 추가로 시공하였으며, 정재하시험을 통해 그라우팅을 수행한 헬리컬 파일 및 일반 헬리컬 파일의 하중-침하곡선을 산정하였다. 산정한 하중-침하곡선을 바탕으로 $\log(P)$ - $\log(S)$ 방법을 적용하여 지지력을 산정하였

으며, 그 결과를 그림 2.3.3.56와 그림 2.3.3.57에 도시하였다.



중심축 직경이 73mm, 114mm인 헬리컬 파일 모두에 대하여, 그라우팅을 실시한 이후 헬리컬 파일의 강도가 증가하였다. 그라우팅으로 인한 헬리컬 파일의 지지력 개선 정도는 표 2.3.3.15에 나타난 바와 같이 중심축 직경이 73mm인 경우 3.55%, 중심축 직경이 114mm인 경우 39.53%로, 지지력 개선 정도가 중심축 직경에 크게 영향 받았으나, 그림 2.3.3.57에서 확인할 수 있듯이 동일 하중에서의 침하는 크게 감소하였다.

지지력 개선효과에 의한 지지력 측정시험은 두 가지 축직경(73mm, 114mm)에 따른 실험만 진행되어 다양한 형상에 따른 구체적 분석에는 한계를 보이나, 축 직경이 73mm인 경우보다 114mm인 경우가 그라우팅재가 훨씬 효과적으로 도포되는 양상을 여러 차례의 실험을 통해 확인할 수 있었다. 이를 통해 그라우팅의 효과적인 적용이 축 직경 114mm에서 더 유효하였으며, 지지력 증가의 차이 또한 타당한 결과라고 할 수 있다.

표 2.3.3.15. 일반 헬리컬 파일과 지반보강 헬리컬 파일의 지지력 비교

중심축 직경	일반 헬리컬 파일	지반보강 헬리컬 파일	지지력 개선 정도
73mm	16.9 ton	17.5 ton	3.55 %
114mm	17.2 ton	24 ton	39.53 %

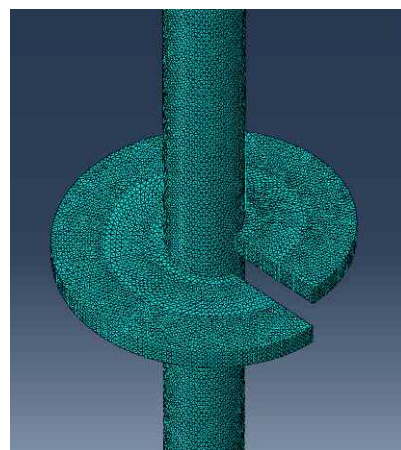
(4) Helical pile 수치모델링 및 매개변수 해석

(가) Helical pile 및 지반 정수 설정

헬리컬 파일 형상의 매개 변수 변화에 의한 파일의 지지력 메커니즘 변화를 분석하기 위한 유한 요소 해석은 소성 지반 해석에 타당하고 효과적인 상호면 모델링이 가능한 상용화된 유한 요소 해석 프로그램 ABAQUS 6.10으로 수행하였다. 헬리컬 파일의 지지력에 상대적으로 가장 큰 영향을 주는 나선형 원판의 피치(높이)는 일반적인 축의 길이와 비교하여 2% 가량이며, 이에 원판의 형상을 간략화하고자 하였다. 일차적으로 나선형 원판과 평편한 원판 두가지를 모델링하여 하중에 따른 변위를 통해 원판을 평편하게 모델링을 수행할 때의 원판 크기를 산정하였다. 나선형 원판은 3D 모델링을 통해 그림 2.3.3.58과 같이 모델링 하였으며, 평편한 원판은 2D axisymmetric 모델링으로 모사하였으며, 이를 그림 2.3.3.59에 나타내었다. 해석결과 10ton의 하중에 대하여 3D 모델은 0.054mm, 2D 모델은 0.048mm의 변위가 발생하여, 현장시험 결과 변위에 영향이 없을 것이라고 판단, 간략화된 2D 모델링을 적용할 수 있다고 결론지었다. 모델링에 사용된 헬리컬 파일의 물성치는 표 2.3.3.16에 나타내었다.

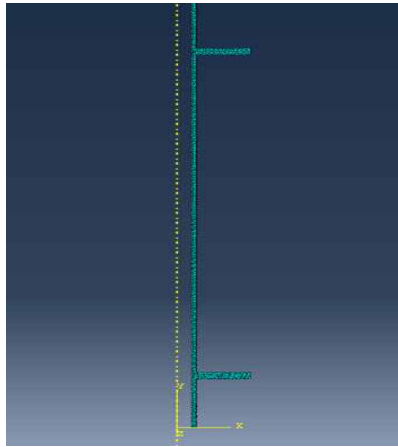


(a) 3D 모델링 mesh

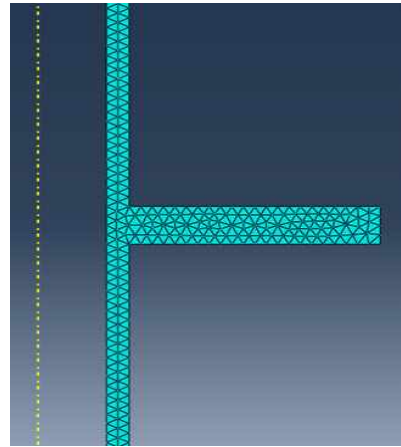


(b) 원판 확대도

그림 2.3.3.58. 헬리컬 파일의 3D 모델링



(a) 2D 모델링 mesh



(b) 원판 확대도

그림 2.3.3.59. 헬리컬 파일의 2D 모델링

표 2.3.3.16. 헬리컬 파일의 물성치

축	깊이 (m)	5
원판	직경 (mm)	300
	두께 (mm)	20
	개수	2
	간격 (m)	1

(나) 현장 시험 모델링

헬리컬 파일 유한요소해석을 검증하기 위하여 현장지반조건과 동일하게 2D axisymmetric 모델링을 수행하여 현장 시험결과와 비교하였다. 현장시험 결과 중, 축 직경 114mm, 원판 직경 400, 350, 300mm, 관입깊이 4.5m 데이터를 검증하였다. 주변지반에 의한 영향을 최소화하기 위하여 원통형 지반의 직경은 10m, 깊이 10m까지 모사하였으며, 파일과 지반 사이의 interface는 Coulomb friction 조건을 적용하였다. 해석모델의 모델링에 사용한 지반과 헬리컬 파일의 물성치는 표 2.3.3.17에 나타내었다.

표 2.3.3.17. 현장시험 모델링에 사용된 물성치

지반		깊이	10
		반경	5
		탄성계수 (kN/m ²)	50000
		내부마찰각 (°)	25
		점착력 (kpa)	0
파일	축	깊이 (m)	5
		직경 (mm)	114
	원판	직경 (mm)	400, 350, 300
		두께 (mm)	20
		개수	3
		간격 (m)	1

모델링 해석결과 지반의 하중-변위 곡선과 유사한 거동을 확인하였으며, 이를 그림 2.3.3.60에 나타내었다. 또한 하중에 따른 헬리컬 파일과 지반의 응력분포를 그림 2.3.3.61에 나타내었다. 해석결과 하중에 의한 파일의 침하와 이로 인해 원판 상부와 지반 사이에 공간이 생기는 것을 확인하였고, 지반의 응력 분포를 통해 각각의 원판이 지지력에 영향이 있는 것으로 사료된다.

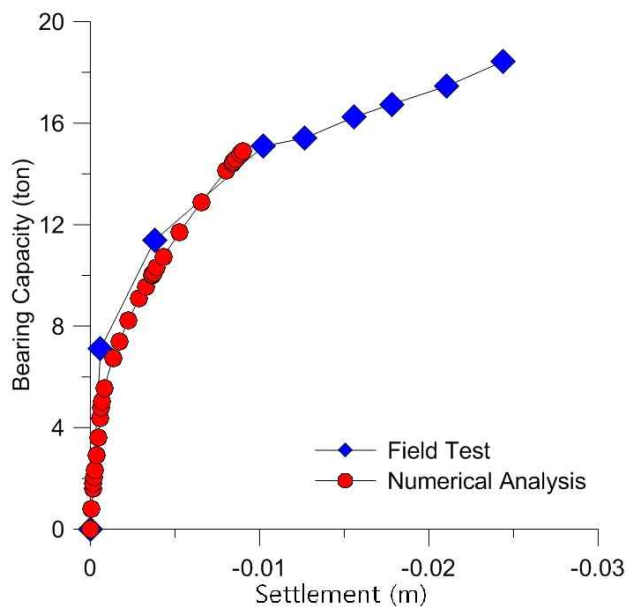
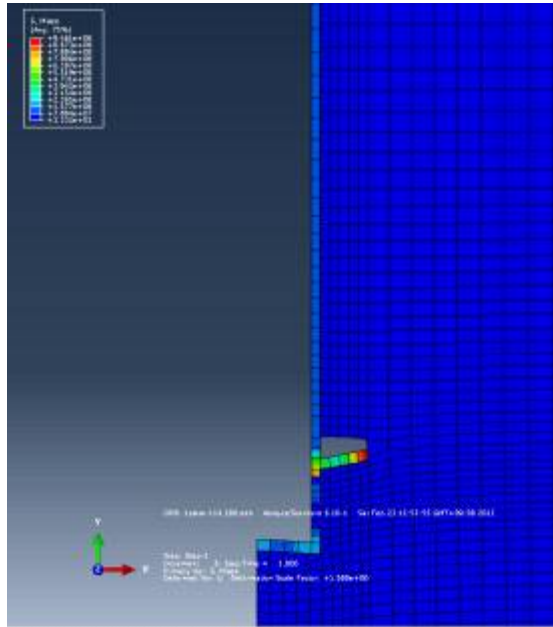
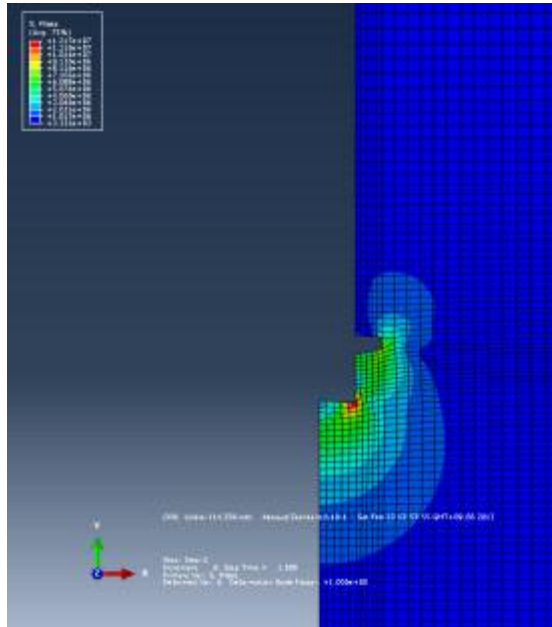


그림 2.3.3.60 현장시험결과와 수치해석 결과비교



(a) 해석결과 (파일침하)



(b) 지중응력분포

그림 2.3.3.61 헬리컬 파일의 2D 모델링

(다) 매개변수 해석

헬리컬 파일의 형상이 지지력에 미치는 영향을 평가하기 위해 가상의 파일과 지반을 모델링하여 관입 깊이, 지반 조건, 그리고 파일의 형상에 따른 지지력을 예측하였다. 헬리컬 파일의 관입 깊이는 얇은심도와 깊은심도 두가지 경우로 각각 8m, 16m로 설정하였으며, 지반은 B지반을 기준으로 상대적으로 연약한 C지반, 그리고 상대적으로 단단한 A지반으로 구성하였다. 모델링에 사용된 지반의 세부사항은 표 2.3.3.18에 정리하였다.

표 2.3.3.18 지반 물성치

	탄성계수 (kN/m ²)	내부마찰각 (°)	점착력 (kpa)
지반 A	150000	35	4
지반 B	100000	25	2
지반 C	50000	15	1

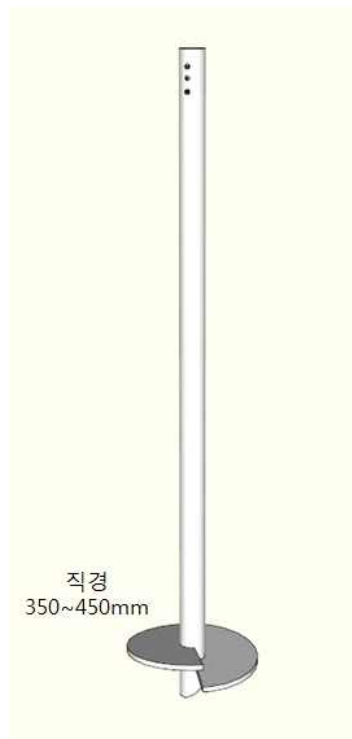
5장 2절에서 상대적으로 원관의 직경이 축의 직경보다 헬리컬 파일의 지지력에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하였고, 이에 따라 원관의 형상 변화에 따른 지지력 변화를 확인하기 위해 표 2.3.3.18와 같이 원관의 형상을 다양하게 설정하여 매개변수해석을 수행하였다.(2.3.3.61 참조) 일차적으로 동일한 형상의 헬리컬 파일에 관하여 각각 지반 A, 지반 B, 그리고 지반 C에서 해석을 수행하여 지반의 변화에 따른 지지력의 변화를 분석하였고, 두 번째로 동일한 지반에서 원관의 개수와 직경이 지지력에 미치는 영향을 살펴보았다. 마지막으로 원관의 간격을 세 가지로 모델링하여 동일한 원관 직경과 지반 조건에서 원관의 간격

이 지지력에 주는 영향을 분석하였다.

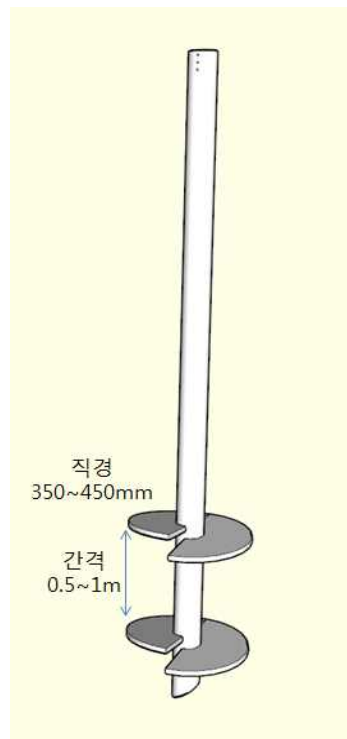
일반적으로 침하량을 기준으로 말뚝의 지지력을 산정하는 방법으로는 Terzaghi(1943)가 제안한 얕은기초의 침하량 $1\text{in}(2.54\text{cm})$ 를 이용하는 방법과 말뚝 직경의 10%를 극한지지력으로 산정하는 방법이 있다. 현장 시험을 수행한 헬리컬 파일의 경우 축의 직경이 73~114mm, 원판의 직경은 200~400mm로, 10% 침하량으로 지지력을 산정할 경우 최소 7.3~11.4mm, 최대 20.0~40.0mm로 산정할 수 있다. 현장 시험 결과, 극한지지력을 산정한 재하시험 결과의 침하량은 10.0~30.0mm사이에서 높은 분포를 형성하였다. 현장 재하시험 결과의 산정된 지지력에 대한 침하량은 그림 2.3.3.62에 나타내었으며, 이에 따라 수치해석 결과에서 지지력을 산정하는 기준으로 $1\text{in}(2.54\text{cm})$ 침하량을 적용하여 해석을 수행하였다.

표 2.3.3.19 매개변수해석에 적용한 원판의 형상

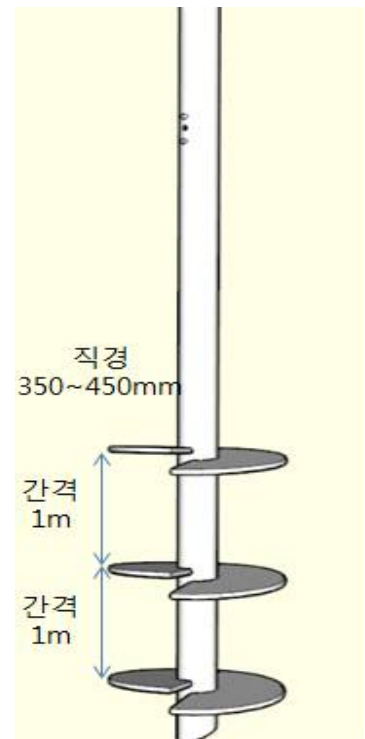
원판 개수	원판 직경	원판 간격
1	350	1
	400	1
	450	1
2	350, 350	1
		0.5
		1
	400, 400	1.5
		1
3	450, 450	1
	350, 350, 350	1
	400, 400, 400	1
	450, 450, 450	1



(a) 원판1개



(b) 원판2개



(c) 원판3개

그림 2.3.3.62 모사한 헬리컬 파일 형상

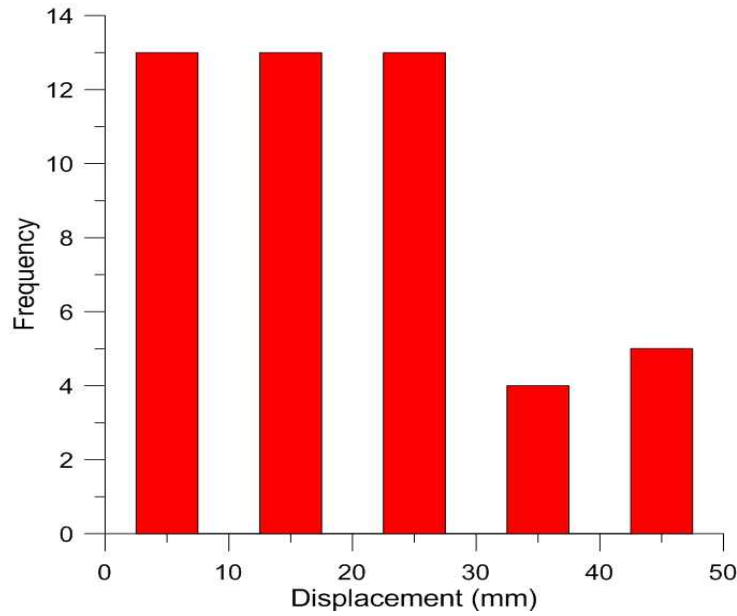


그림 2.3.3.63 침하량 빈도

먼저 상대적으로 얇은 심도(8m)에 설치된 헬리컬 파일의 매개변수해석을 수행하였다. 첫 번째로 지반 조건이 지지력에 미치는 영향을 판단하기 위하여 표 2.3.3.19의 세 가지 지반 조건에 관하여 원판의 개수를 1개, 2개, 3개, 그리고 원판의 직경을 350mm, 400mm, 450mm로 변화시키며 지지력의 변화에 대하여 매개변수해석을 수행하였다. 원판의 개수가 1개인 헬리컬 파일의 수치해석모델과 지반에 따른 지지력 변화를 그림 2.3.3.64.(a)에 나타냈으며, 원판의 개수가 2개인 헬리컬 파일의 수치해석모델과 3개인 경우의 수치해석모델은 각각 그림 2.3.3.64.(b)와 2.3.3.64.(c)에 나타냈다. 그림 2.3.3.64.(a)에서 원판이 1개인 헬리컬 파일의 경우 각 지반 조건에 따라 원판의 직경이 증가할수록 지지력이 증가하는 경향을 볼 수 있으며, 그림 2.3.3.64.(b)와 그림 2.3.3.64.(c)에서도 상대적으로 지반이 단단해질수록, 원판의 직경이 증가할수록 지지력이 증가하는 것으로 나타났다.

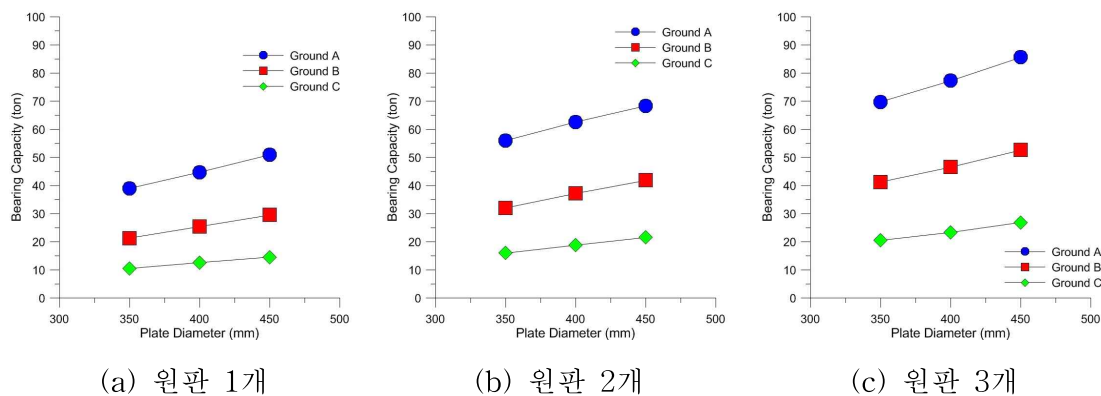


그림 2.3.3.64 지반 조건에 따른 지지력 변화

두 번째로 원판의 개수와 헬리컬 파일의 지지력의 관계를 분석하기 위해 동일한 지반 조건에서 원판의 개수와 직경에 따른 지지력의 관계를 그림 2.3.3.65에 나타냈다. 그림

2.3.3.65(a)는 지반 조건이 지반 A일 때, 원판의 개수와 직경에 따른 지지력을 보여주며, 그림 2.3.3.65(b)와 그림 2.3.3.65(c)는 각각 지반 B와 지반 C에서의 매개변수해석 결과를 나타낸다. 그림 2.3.3.65(a)에서 원판의 직경과 개수가 증가할수록 지지력이 증가하며, 원판의 개수가 한 개, 직경이 450mm인 경우보다 원판의 개수가 두 개, 직경 350mm인 경우보다 지지력이 적게 예측됨을 알 수 있다. 동일한 강재의 사용을 고려하면 직경 350mm 원판을 두 개 사용하는 것과 500mm 원판을 한 개 사용하는 것이 유사한 강재 사용량을 필요하다. 그림 2.3.3.65의 경향으로 판단할 때, 원판이 1개이며 직경이 500mm인 경우의 지지력은, 원판이 2개이며 직경이 350mm인 경우보다 지지력이 적거나 같을 것으로 예상된다. 원판의 직경이 증가할수록 시공효율이 감소하는 것을 고려하면, 직경이 상대적으로 큰 원판 1개로 제작된 헬리컬 파일보다 상대적으로 작은 직경의 원판 2개로 제작된 헬리컬 파일이 경제적이란 것을 유추할 수 있다. 원판이 2개인 경우와 3개인 경우에도 상대적으로 지지력 차이는 감소하지만, 원판이 1개인 경우와 2개인 경우를 비교한 결과와 유사한 경향을 보여준다.

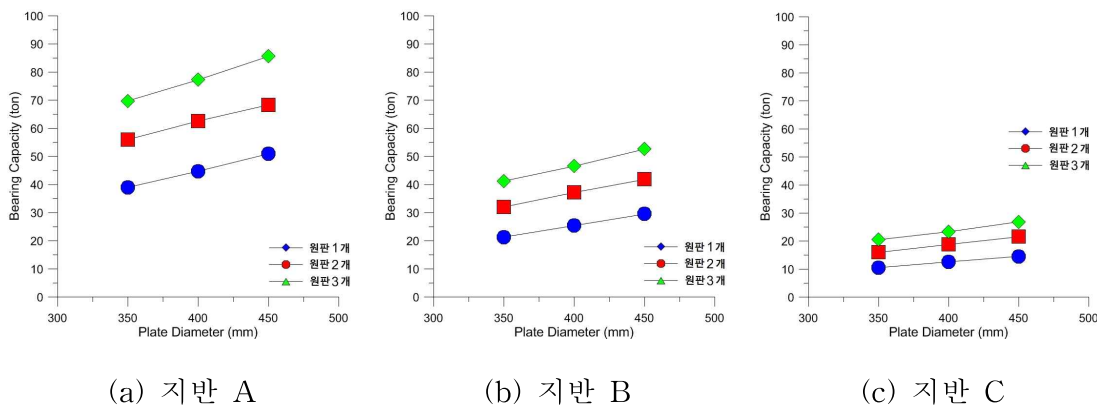


그림 2.3.3.65 원판의 형상에 따른 지지력 변화

세 번째로 원판의 간격이 지지력에 주는 영향을 판단하기 위해 동일한 지반 조건과 원판 크기에서 원판 간격을 0.5m, 1m, 1.5m를 적용하여 지지력의 변화에 대해 매개변수해석을 수행하였다. 원판의 크기는 400mm, 원판의 개수는 2개로 동일하게 모델링을 수행하고, 원판의 간격을 세 가지로 적용하였으며, 지지력과의 관계를 그림 2.3.3.66에 나타냈다. 원판의 간격을 매개변수로 설정하여 수치해석을 수행한 결과, 원판의 간격이 0.5m인 경우와 1m인 경우의 지중응력분포는 그림 2.3.3.66과 같이 나타났다. 그림 2.3.3.66에서 원판의 간격이 상대적으로 가까워지면 개별 원판이 지지력을 발현하지 못하며, 원판의 간격이 멀어지면 개별 원판이 지지력을 발현하는 것으로 보인다. 이를 앞서 언급한 지지력 예측 공식과 비교하면, 원판의 간격이 상대적으로 가까우면 Cylindrical shear method를 적용하고, 원판의 간격이 멀어지면 Individual bearing method를 적용하는 것이 적절하다고 사료된다. 지반 C에서의 수치해석 결과를 두 가지 방법으로 산정한 지지력과 비교한 그래프를 그림 2.3.3.68(a)에 나타내었다. 또한, 본 연구에서는 두 가지 방법과 수치해석으로 도출한 지지력을 바탕으로 그림 2.3.3.68(b)와 같이 원판의 간격에 따른 두 예측식의 지지력을 수치해석 결과와의 근사한 정도에 기반 하여 두 가지 방법을 모두 절충하는 새로운 지지력 예측 설계식을 제안하였다.

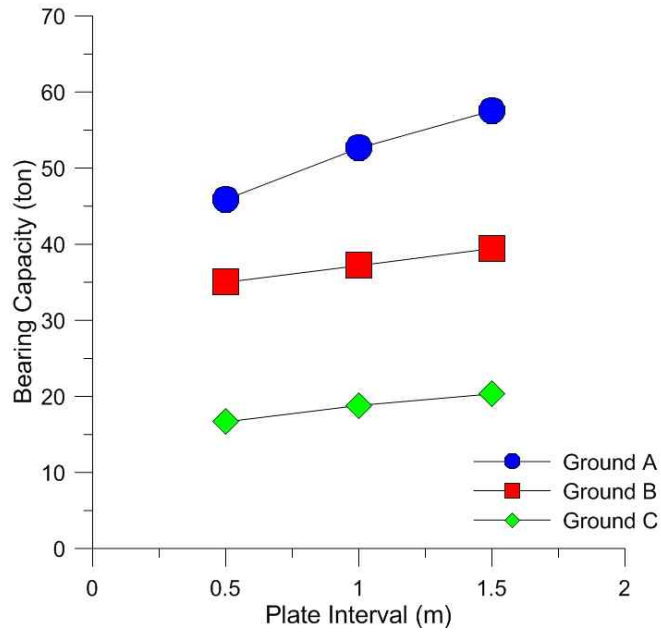
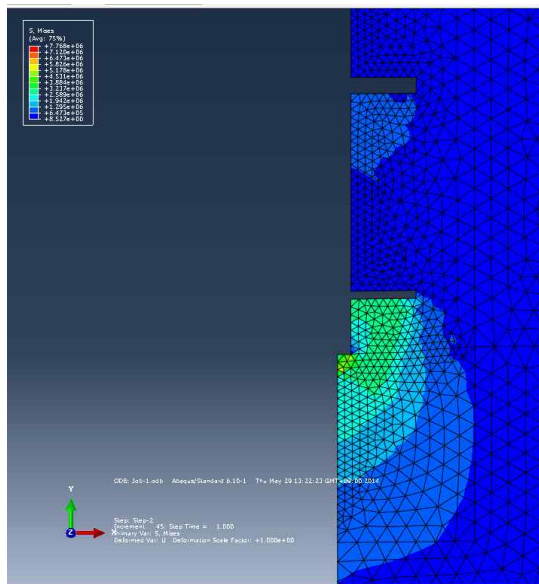
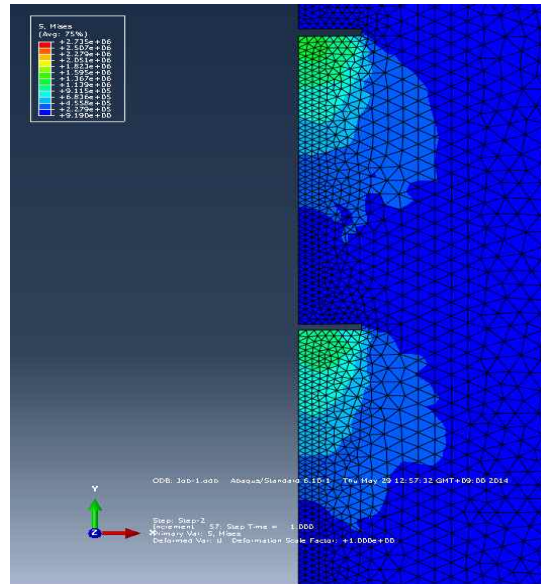


그림 2.3.3.66 원판의 간격에 따른 지지력 변화

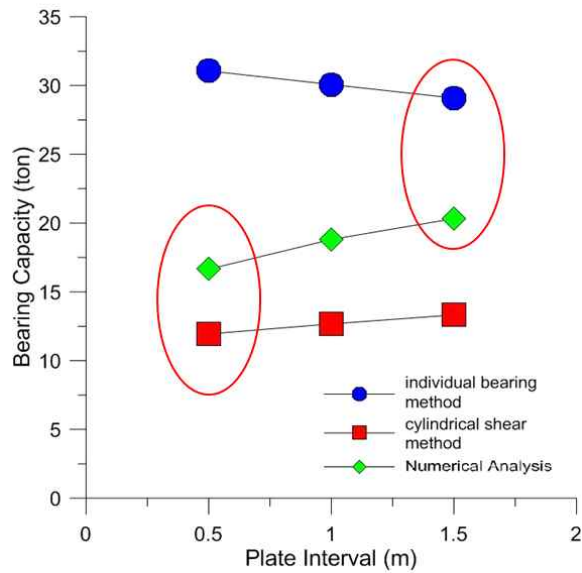


(a) 지중응력분포
(원판 간격 0.5m)

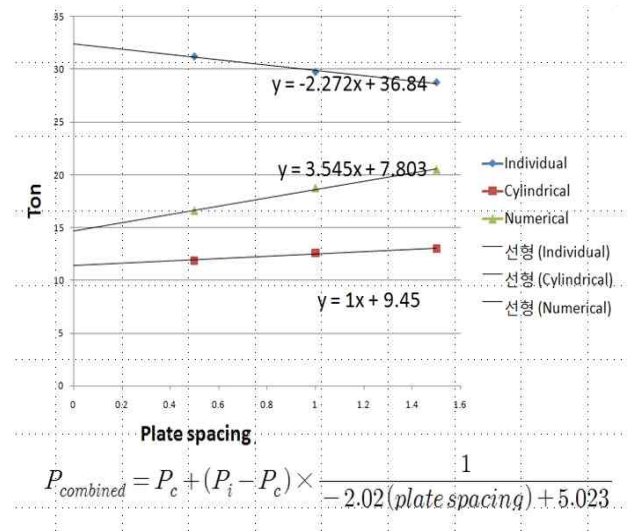


(b) 지중응력분포
(원판 간격 1m)

그림 2.3.3.67 원판 간격과 지중응력분포



(a) 이론값과 수치해석 결과 비교



(b) 원판 간격에 따른 새로운 예측 설계식

그림 2.2.3.68 이론값과 수치해석 결과

깊은 심도에서의 매개변수해석은 얇은 심도와 동일한 경향을 보여주었으며, 세부사항은 표 2.3.3.20에 나타내었다.

표 2.3.3.20 깊은 심도 헬리컬 파일의 매개변수해석 결과

원판 개수	원판 직경 9(mm)	원판 간격 (m)	지반조건	지지력 (ton)
1	350	1	A	44.34
			B	30.96
			C	21.98
	400	1	A	49.91
			B	35.84
			C	24.40
	450	1	A	54.88
			B	40.64
			C	27.62
2	350, 350	1	A	60.77
			B	44.32
			C	29.48
	400, 400	0.5	A	59.09
			B	43.87
			C	29.67
		1	A	65.12
			B	48.62
			C	32.41
		1.5	A	71.86
			B	53.19
			C	35.54
	450, 450	1	A	69.76
			B	53.96
			C	36.92
3	350, 350, 350	1	A	74.59
			B	55.61
			C	36.66
	400, 400, 400	1	A	78.56
			B	60.32
			C	40.66
	450, 450, 450	1	A	82.56
			B	65.44
			C	44.74

(5) 2차년도 주요 연구목표별 연구결과 분석

2차년도에서 수행된 주요 연구목표별 연구결과를 다음에 요약하였다.

목표 1	지반조건 및 설계지지력크기에 따른 helical pile의 거동특성 연구
------	--

(가) 2차년도 현장시험시공을 실시하여 최적의 helical pile 설계 및 지반 조건과 지지력 크기에 따른 Helix plate의 크기와 설치 수량, 위치선정 효과 확인

현장시험시공을 통하여 여타 말뚝과 마찬가지로 지반 N치가 증가할수록 helical pile의 지지력이 증가하는 것을 확인하였다.

일반적으로 사용되는 helical pile의 축 직경은 89mm이며, 본 연구에서는 이를 기준으로 하여 73mm, 89mm, 114mm, 127mm의 직경을 갖는 helical pile을 시공하였다. helical pile 시공은 최하단의 helix plate가 지반을 관입하면서 시작되는데, 중심축은 원통형 형상이므로 지반을 수직으로 관입하게 되어 축의 직경이 증가할수록 초기관입이 어렵게 된다. 이와 같은 현상을 시험시공을 통해 확인하였으며, 특히 축의 직경이 127mm인 helical pile의 경우에는 초기 매우 관입이 어렵고 시험장비의 필요 torque가 높아 관입성이 좋지 않았다. 따라서 helical pile의 축 직경은 73 ~ 114 mm 범위에서 선택하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서 수행한 현장시험시공의 경우, helical pile의 7.5m 관입시까지 재하하중에 의한 좌굴이나 관입 torque에 의한 helical pile의 파손이 발생하지 않았으나 상부지반이 매우 연약한 경우 안전측을 고려하여 축직경이 73mm 인 helical pile은 추천하지 않는다.

수치해석 결과 helical pile의 항복강도는 helix plate의 간격이 가까울 경우 Cylindrical shear method를 통한 예측값에 근접하고 helix plate의 간격이 멀어질수록 Individual bearing method를 통한 예측값에 근접한다. 보다 높은 지지력을 얻기 위해서는 Individual bearing method에 근접해야 하므로 helix plate의 간격을 1m 이상이 되도록 제작하는 것이 좋다. 하지만 helical pile의 필요 관입깊이가 얇을 경우, helix plate의 간격이 1m 보다 커질수록 상단 helix plate가 거치된 지반의 N치가 낮을 가능성이 높으므로 helical pile의 항복강도가 저평가 될 수 있다. 따라서 helix plate의 간격은 1m로 산정하는 것이 적절하다고 판단된다. 또한, 직경 400mm helix plate 1개를 부착한 helical pile에 비하여 직경이 작은 helix plate 3개를 부착한 helical pile이 지지력을 발휘하는데 있어 효과적인 것을 확인하였으며, 이를 통하여 같은 강재사용량(재료비)의 경우 helix plate의 개수를 증가시키는 것이 시공성과 지지력 모두의 측면을 만족시킬 수 있을 것으로 사료된다.

(나) 수직도 관리에 대하여 정밀 검토 후, 그 결과를 시방서에 반영

Helical pile의 현장시험 시공 시, helical pile을 지반에 수직으로 관입하기 위해 경사계(tiltmeter)를 설치하여 수직도를 관리하였다. 수직도 관리방안을 시방서에 제시하였다.

(다) 국내 지반조건에 맞는 허용 비틀림 모멘트 제시

중심축의 허용 비틀림 모멘트는 중심축으로 사용되는 강재의 강성과 중심축의 형상(직경)으로 결정된다. 지반의 강성은 강재의 강성에 비하여 훨씬 작은 값이므로 얕은 심도의 helical pile의 경우 강재의 허용 비틀림 모멘트는 고려하지 않아도 무방하며, 본 연구에서 수행한 현장시험시공에서도 helical pile을 7.5m 까지 관입하였으나 관입도중 helical pile의 파손을 발생하지 않았다. 그러나 관입심도가 깊어질수록 helical pile 중심축에 부하되는 비틀림 모멘트는 점차 증가하여 강재의 파손을 유발 할 수 있으므로 깊은 심도까지 helical pile을 시공할 경우 필요한 토크의 값을 결정할 필요가 있다. 중심축에 부하되는 토크의 값은 필요 지지력을 지지력-토크상수로 나누어 산정할 수 있으며, 본 연구개발 결과, 중심축 직경이 73mm, 114mm 인 경우의 지지력-토크상수는 19m^{-1} 로 산정되었다.

(라) Helical pile의 좌굴검토, 좌굴 억제 및 수평 지지력 증가를 위한 파일 설계 및 확인

Helical pile은 지지력을 발현하는 helix plate의 직경에 비해 중심축의 직경이 상대적으로 작으므로 Helical pile 시공 후 하중 재하 시 중심축의 좌굴이 예상되었으나, 관입깊이 7.5m 까지 helical pile의 좌굴 및 수평방향 변위는 관찰되지 않았다. 좌굴 및 수평변위는 직경이 가장 작은 73mm 중심축의 경우에도 관찰되지 않았으며, 7.5m 심도까지만 시험하였으나 문헌조사(European code of practice of foundations, IBC(2006) section 1808.2.9.2)에 따르면 3m 이상 관입된 부분은 지반의 구속압이 증가하여 좌굴의 영향을 무시할 수 있다고 언급하고 있다. 따라서 본 연구에서 수행한 관입깊이 7.5m 이상의 깊은 심도의 지반의 경우에도 좌굴 억제 및 수평지지력 증가를 위한 별도의 파일 설계는 필요하지 않을 것으로 판단된다.

(마) 시공시 발생하는 지표면 부근 지반 동공발생 대책공법 제시

Helical Pile 시공 시, 지반의 밀도 등에 따라 나선형 원판 직경 이내 및 최대깊이 100cm 이내의 공동이 지표면에 발생한다. 공동은 헬리컬 파일의 나선형원판이 지표면 부근의 흙을 하향으로 끌어 당겨 원판하부 지반으로 이송시킴에 따라 발생하게 된다. 지표에 발생하는 공동의 깊이가 100cm 이내로 제한적인 것은 지표면부근의 지반은 느슨하여 나선형 원판과 지반의 마찰로 인해 지표의 흙이 하부 지반으로 이송되지만, 심도가 깊어질수록 나선형원판 하부 지반의 밀도가 커지게 되어 흙과 나선형 원판과의 마찰에도 불구하고 흙이 하부지반으로 이송되는 것이 억제되기 때문이다.

헬리컬 파일 시공 중 지표에 발생하는 공동은 말뚝의 수평저항력을 급격히 저하시키고, 임계 좌굴 하중에도 영향을 미쳐 구조물의 연직 및 수평저항력을 저하시키는 원인이 된다. 지표 공동의 제거를 위하여 헬리컬 파일 시공 후 그라우팅을 수행하는 방안을 다음과 같이 제시하였으며, 현장 시험을 통해 효과를 확인하였다.

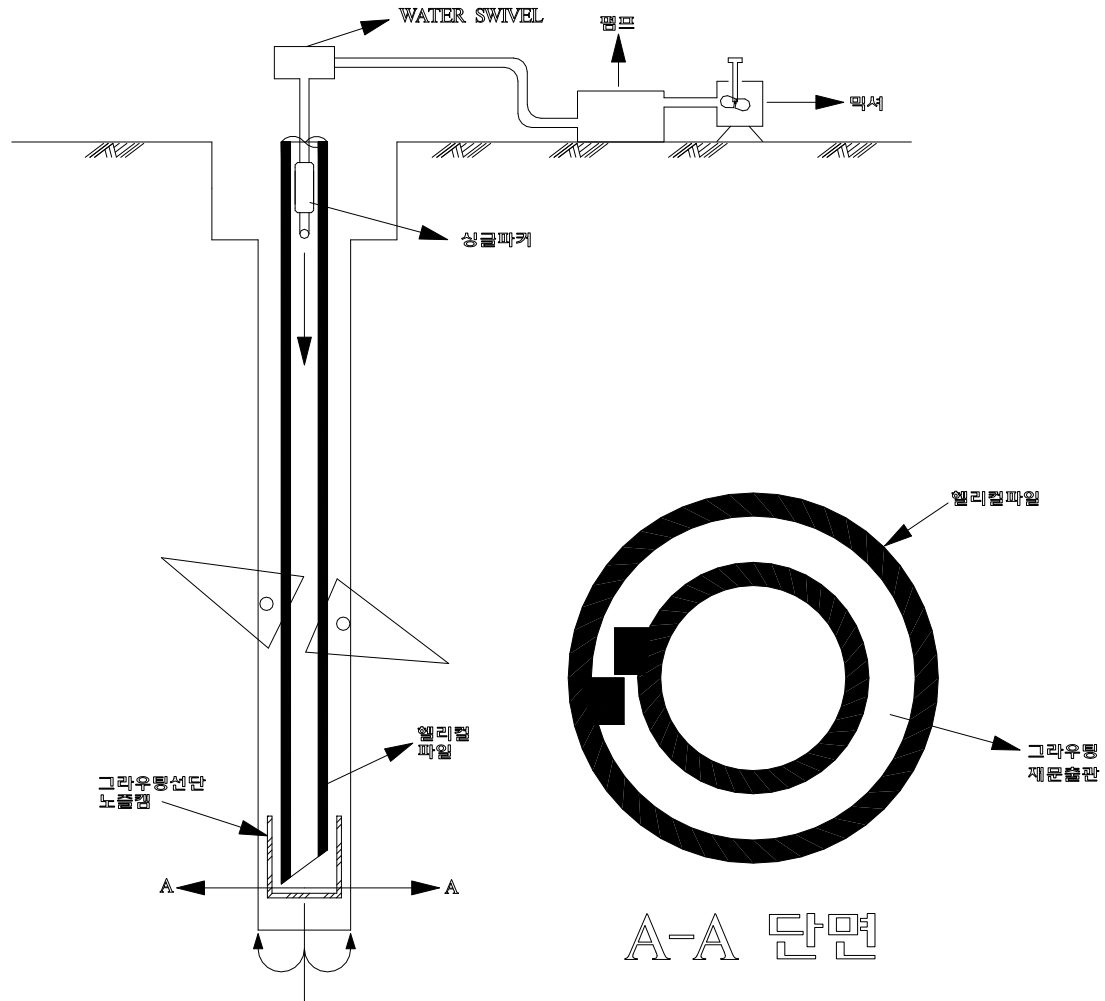


그림 2.3.3.69 helical pile 그라우팅 모식도

- 시공 전 그라우팅 노즐의 폐쇄를 방지하기 위해 노즐 보호캡을 중심축 최하단부에 삽입.
- 노즐 보호캡은 보호캡과 중심축과의 동시 회전을 위해 각 부위에 회전 방지 비트가 용접됨
- 시공이 완료되면, 중심축 상부에 에어파커를 관내 설치 후 공기 주입으로 에어 파커를 팽창
- 에어파커 연결관과 그라우팅 호스를 연결하여 20kg/cm² 압력으로 그라우팅재 주입
- 중심축과 노즐캡의 사이 공간으로 그라우팅재를 분출하여, 그라우팅재가 선단보강 및 중심축을 타고 지표면상부로 분출 되도록 함
- 압력을 조절하여 선단 그라우팅재 주입 및 중심축 보강을 수행하고 지표공동을 채움

노즐 보호캡으로부터 지표까지 그라우팅재를 채우는 공법은 단순히 지반보강이 필요한 상황에서만 요구되는 기법이 아닌, 헬리컬파일 시공시 불가피하게 발생하는 동공을 채우기 위한 필수 시공기법으로 사료된다. 또한 헬리컬파일을 감싸고 있는 그라우팅재는 강재 본체의 부식을 방지시키는 효과도 있으므로, 헬리컬파일에 적용되는 그라우팅 기법은 여러 측면에서 그 중요성이 부각된다고 할 수 있다. 이에 따라 현재 헬리컬파일의 시공과 동시에 그라우팅재의 주입을 연계시킬 수 있는 시공법에 대한 추가적인 연구가 진행 되고 있다.

(바) 재하시험 결과를 이용하여 설계지지력 예측식 제시

‘예측 지지력과 시험 결과의 비교’에서 전술한 바와 같이, 현장 정재하시험을 통해 측정한 헬리컬 파일의 지지력을 Individual bearing method와 Cylindrical shear method를 통해 산정한 예측 지지력과 비교하였다. 일반적으로 현장 정재하시험을 통한 실측 지지력은 Individual bearing method로 예측한 지지력보다는 다소 작은값을, Cylindrical shear method로 예측한 지지력보다는 다소 높은 값을 보인다. 따라서 Individual bearing method로 예측한 지지력을 상한값으로, Cylindrical shear method로 예측한 지지력을 하한값으로 간주하여 helical pile의 지지력을 산정할 수 있으며, 지지력-토크상수를 이용하여 실제 시공 시 helical pile의 지지력을 다시한번 예측하여 신뢰도를 높일 수 있다.

목표 2	지지력 확인시스템이 내장된 표준 규격 helical pile의 제작 및 평가
------	--

(가) 설계 시 적용할 수 있는 유압장치가 내장된 helical pile의 제작 및 성능 평가

중심축의 직경이 89mm, 114mm인 helical pile에 450mm, 350mm, 200mm Helix plate를 부착하여 양방향 재하시험과 정재하시험을 수행하였다. 시험은 크게 두 가지로 구성하여, 첫 번째 시험 1은 최하단 Helix plate 상부에 양방향 유압 셀을 부착하고 두 번째 시험 2는 최상단 원판 상부에 양방향 셀을 부착하여 각각 하중 재하시험과 인발시험을 수행하였다. 시험 1과 시험 2 모두 파일 두부의 변위를 제한하여 시험 1에서는 최하단 Helix plate의 선단 지지력을, 시험 2에서는 Helix plate 3개의 주면마찰력을 측정할 수 있게 고안하였으며, 시험 2의 경우 인발로 측정된 주면마찰력이 압축시험시의 주면마찰력과 동일하다고 가정하였다. 시험 1과 시험 2에서 각각 측정된 선단지지력과 주면마찰력의 합을 통해 helical pile의 지지력을 예측하였으며, 예측값이 정재하시험으로 측정한 파일의 지지력과 유사한 경향을 보였다.

(나) 유사공법과의 경제성 분석

Micro pile 과 helical pile(그라우팅 포함) 의 경제성을 분석하였다.

- Micro pile
 - Micro pile을 이용한 시공법은 인장과 압축을 동시에 받는 복합적 기능을 요구하는 구조물에 특화 되어있는 공법이다. 지지층의 심도가 깊지 않고 평탄한 사업부지에 적합하다. 하지만 세장비에 취약하며, 진동에 의한 영향이 있을 지역에 적용이 불가하다. 또한 소음 및 비산먼지로 인한 민원발생의 우려가 있다.
- Helical pile
 - Helical pile을 이용한 시공법은 공간제약이 없어서 근접시공 및 경사시공, 건축물 내부 시공이 가능한 공법이다. 자재 제작의 제약이 없고, Grouting 을 통한 지내력을 확보할 수 있다. 재하판 제작의 다양성 때문에 내진보강 구조물에도 적용이 가능하다. 또

한 소음, 진동, 배토, 비산먼지 발생이 없는 친환경적 공법이다.

목표 3	지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능 평가
------	---------------------------------------

나선형 원판이 거치 될 지반의 심도가 깊을 때 시공비의 상승이 우려된다. 따라서 나선형 원판이 거치된 하부지반의 개량을 통해 목표지지력에 도달 되도록 지반보강 장치(그라우팅) 및 운영방법을 제시하여 $N \leq 50$ 의 지층을 선단 고정 층으로 할 수 있도록 하고자 한다.

(가) 지반조건별 그라우팅 압력 및 시멘트 배합비 결정

① 그라우팅에 대한 전제조건

지반그라우팅은 시공 지반의 N치를 고려하여 진행하였으며, 관입심도는 지표면으로부터 GL. -3.0m 이내로 실시하였다. 관입심도를 3m 이내로 선정한 이유는 그라우팅 실시 후 그라우팅에 의한 헬리컬 파일 선단부의 구근형성과 중심축 주변의 그라우팅 주입 범위를 굴착을 통해 육안으로 확인하기 위함이다. Shaft $\varnothing$ 73 + Blade 400mm 1ea, Shaft $\varnothing$ 114 + Blade 400mm 1ea 의 헬리컬파일을 대상으로 각각 3m 심도까지 관입한 후 그라우팅을 주입하여 지반보강 효과를 확인하였다.

② 그라우팅의 시공 과정

- 재료
 - a) 시멘트 : 보통(1종)포틀랜드 시멘트
 - b) 유동화제 : 고성능감수제(유동성증대 효과목적)
 - c) 배합수 : 깨끗하며 점토, 이토, 알칼리, 유기물 등이 포함되지 않음
- 그라우팅 장비
 - a) 주입펌프
 - 주입펌프는 피스톤식 또는 플린저식으로써 토출압력 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 토출량 $10\ell/\text{min}$ 이상, 토출관경 20mm 이상인 것으로 시행
 - b) 교반장치
 - 그라우트 믹서는 회전수 150rpm이상 토출관경 25mm 이상 용량 200L이상으로 함
 - c) 압력계
 - $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 주입압력 측정이 가능한 압력계 사용
- 그라우팅 시공
 - a) 헬리컬파일 시공작업
 - Shaft $\varnothing$ 73 + Blade 400mm 1ea, Shaft $\varnothing$ 114 + Blade 400mm 1ea의 2개소
 - b) PACKER 설치
 - PACKER는 주입재의 역류이탈을 방지하기 위하여 중심축 내 고정압력이 주입압력의

1.5~2.5배 이상이 되도록 함

c) 그라우팅 페이스트 주입작업

- 주입재료는 시멘트, 배합수, 유동화제 사용
- 주입작업은 교반장치에서 주입재를 교반 후 교반장치에 연결된 흡입장치를 통해 주입 펌프에서 주입호스로 PACKER를 통해 지중으로 분사
- 소정의 최대심도에서부터 주입을 완료하고 상향으로 인발 하면서 주입하는 상승방식으로 주입
- 10~30 ℓ/min주입량 범위내에서 주입압 1~7kg/cm²로 주입
- 그라우팅 시행한 표준배합비

표 2.3.3.21 축직경에 따른 표준배합비

구 분	주 입 량	시 멘 트	배합수	유동화제
	(kg)	(kg)	(kg)	(%)
Shaft Ø 73 Shaft Ø 114	240	120	120	0.25

상기 배합비는 일반그라우팅작업의 W/C비를 적용하였으며 유동화제는 유동성증대의 목적으로 시멘트질량의 0.25%정도로 사용하였다.

(나) helical pile내 그라우팅 장비개발

기존 현장의 헬리컬 파일의 그라우팅은 아래의 예시처럼 재료, 배합비 등은 같으나, 주입 압력은 무 부하상태에서 주입하는 방식, 즉 상부에서 헬리컬파일 중심축 내로 주입호수 또는 주입파이프를 소정의 심도(3m)이내로 관입하여 그라우팅을 실시하는 방식으로 선단부 및 파일 중간부분에 대한 그라우팅의 충전효과는 전무하고, 상부 소정의 심도만 구근이 형성되어 양생으로 인한 전후좌우의 흔들림방지 및 상부의 마찰력만 발휘하는 방식으로 되어 있다. 또한 지하수에 의한 페이스트의 교란이 발생하여 지하수위 이하는 강도증가 및 구근 형성을 기대하기 어렵다.

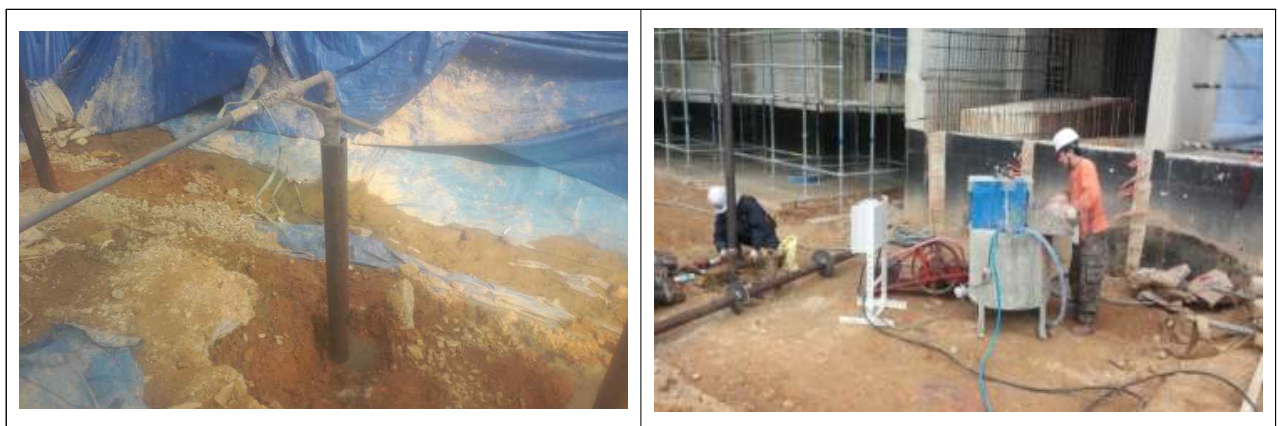


그림 2.3.3.70. 기존의 헬리컬 파일 그라우팅 적용사례

본 연구과제의 헬리컬 파일의 그라우팅은 기존의 재료, 배합비는 같으나 기존과 같이 상

부에서 헬리컬 파일 중심축 내로 주입호수 또는 주입파이프를 소정의 심도(3m)이내로 관입하여 무 부하상태로 그라우팅을 실시하는 방식에서 탈피하여 주입압력을 $1\sim7\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 정도로 하여 선단부의 그라우팅보강 및 구근형성을 가능하게하고, 파일의 중간부분에 차차로 충전되면서 상부까지 채워지는 방식으로 시행하였다. 본 방법은 헬리컬 파일 상부의 흔들림 방지하고 선단 및 주변마찰력을 증가시키며, 지하수에 의한 페이스트의 교란을 방지하였다.



그림 2.3.3.71. 개발한 지반보강 헬리컬 파일 시공

본 연구에서 개발한 헬리컬 파일의 그라우팅 장비에 기존의 오거 그라우팅장비, 연약지반 그라우팅장비, 사면안정에 이용되는 장비 등을 접목하면 공정의 단순화를 이루어 시공성 및 경제성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

(다) 그라우팅 실시에 따른 지지력 개선 효과 확인

본 연구에서는 그라우팅을 통한 헬리컬 파일 선단부의 구근형성과 중심축 주변의 그라우팅모양을 육안으로 확인하기 위해 지하수위 3.0m 이내로 실시하였다. 그라우팅은 심도 지하수위 3.0m 이내, 2개소를 실시하였으며, 시공은 Shaft $\varnothing 73 + \text{Blade } 400\text{mm } 1\text{ea}$, Shaft $\varnothing 114 + \text{Blade } 400\text{mm } 1\text{ea}$ 의 2개소를 시행하였다. 그라우팅 방법은 지반조건별 그라우팅 압력 및 시멘트 배합비 결정에서 기술했듯이 다음과 같다.

- 헬리컬 파일 시공 실시
- 페이스트 역류이탈 방지 PACKER 설치
- 주입작업은 교반장치에서 페이스트(시멘트, 배합수, 유동화제)를 교반 후 교반장치에 연

결된 흡입장치를 통해 주입펌프에서 주입호스로 PACKER를 통해 지중으로 분사

d) 소정의 최대심도에서부터 주입을 완료하고 상향으로 인발하면서 주입압 1~7kg/cm²의 압
으로 주입

전술한 바와 같이 그라우팅의 방법을 개선하여 헬리컬 파일 주변의 지반을 보강하여, 헬리
컬 파일의 흔들림 방지효과와 발현 지지력증가 효과를 확인하였다.

목표 4	Helical pile 시공장비 개발
------	----------------------

지지층의 출현심도가 깊어질수록 시공 장비의 시공능력이 중요해지므로 지지력과 토크의
상관관계를 측정하여 목표지지력별 시공 장비의 최대출력 토크를 제시하였다. 본 연구에서
는 헬리컬파일 시공중 중심축이 받는 비틀림 모멘트가 중심축의 항복강도까지 도달하지 못
하였으며, 목표 심도까지 헬리컬 파일을 관입하며 관입중 필요한 최대 토크를 측정하여 다
음 표 2.3.3.22에 정리하였다..

표 2.3.3.22 지지층에 대한 헬리컬 파일 형상별 최대출력토크

외경 cm	두께 cm	단면적 cm ²	항복강도 kg/cm ²	극한지지력		최대토크 (t·m)	나선형원관	N치
				SC	GC		직경 cm	
7.32	0.508	10.9	3234.1	30	23	0.678	5개 X 35.6	7
							5개 X 30.0	11
7.62	0.33	7.58	4570.0	22	24	0.813	30,35,35	14
							25,30,35	16
7.62	0.635	13.93	4570	45	32	1.085	5개 X 35.6	11
							5개 X 30	14
							30,35,35	18
							25,30,35	24
8.89	0.533	13.99	4570	55	35	1.356	5개 X 35.6	12
							5개 X 30	16
							30,35,35	21
							25,30,35	25
8.89	0.533	13.99	4570	55	46	1.763	5개 X 35.6	16
							5개 X 30	20
							30,35,35	27
							25,30,35	34
7.62	0.635	13.93	4570	45	50	1.69	5개 X 35.6	17
							5개 X 30.0	22
							30,35,35	29
							25,30,35	37
14.5	0.635	27.5	4570	128	92	5.42	5개 X 610	11
							5개 X 510	15
							510,610,610	19
							406,510,610	25
14.5	0.635	27.7	4570.0	128	104	6.10	5개 X 610	13
							5개 X 510	17
							510,610,610	23
							406,510,610	28
13.97	0.762	40.13	8788.4	273	125	7.18	5개 X 610	15

14.53	0.94		4570.0	199	124	7.32	5개 X 510	21
							510,610,610	27
							406,510,610	34
14.53	1.168	49.0	4570	250	152	8.94	5개 X 610	19
14.53	0.94	40.13	4570	199	150	8.81	5개 X 510	25
							510,610,610	32
							406,510,610	42
14.53	1.168	49.0	4570	250	184	10.84	5개 X 610	23
							5개 X 510	31
							510,610,610	39
							406,510,610	50

SC : 단단한 지반에서 파일의 중심 커플링에서 좌굴강도

GC : 최대 비틀림모멘트로 회전 시 균질한 지반에서 압축 시 극한지지력

본 연구에서는 가격이 저렴하면서 고 토크 측정이 가능한(그림 2.3.3.72) 토크 측정 시스템 개발(보정(calibration) 장비 포함)로 지지력에 따른 출력토크의 체계적인 정립을 통해 목표 지지력별 시공비용 최소화를 가능하게 하였다.



그림 2.3.3.72. 고 토크측정기 및 보정(calibration)장비 개발

목표 5	설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 제시
------	------------------------

(가) Harmony search algorithm을 이용한 헬리컬 파일의 재료비의 최적화 설계법 제시

본 연구에서는 Cylindrical shear method로 산정된 헬리컬 파일의 지지력을 만족할 수 있는 헬리컬 파일의 형상을 최소한의 자재비용으로 설계하는 방법을 하모니서치 알고리즘(Harmony search algorithm)을 적용하여 최적화 하였다. 또한 헬리컬 파일의 최적 설계 결과를 2009 International building code(이하, 2009 IBC)를 참고하여 규격화시킨 설계 결과와 비교·검토하여 두 설계법의 경제성을 분석을 표 2.3.3.23~2.3.3.25에 나타냈다.

표 2.3.3.23. 단계하중 별 자유설계에 의한 재료비 최적화

Design Load (Kg)	Shaft dia (cm) [7.3 8.9]	Plate dia (cm) [20.3 35.56]	Plate space (cm) [48.72 236.16]	Depth (cm) [100 850]	Plate num [2~5]	Cost (won)
3000	7.3	20.6	65.54	223.02	2	51623
7000	7.3	29.11	77.46	299.56	2	76106
11000	7.3	32.47	110.29	472.67	3	126050
11000	7.3	29.7	106.93	678.39	2	147050
15000	7.3	33.63	120	694.72	2	156150
19000	7.3	20.3	73.1	832.21	2	164030
23000	7.3	22	79.2	840	2	167220
27000	7.3	24.99	89.98	840	2	170660
31000	7.3	27.66	99.56	840	2	174080
35000	7.3	30.08	108.28	840	2	177490
39000	7.3	32.31	116.32	840	2	180900
43000	7.3	34.4	123.83	840	2	184300
47000	7.3	31.81	114.5	840	3	192450
51000	7.3	33.4	120.25	840	3	196270
55000	7.3	31.5	113.39	840	4	203850
59000	7.3	32.79	118.06	840	4	207920
63000	7.3	34.04	122.54	840	4	211990
67000	7.3	35.24	126.86	840	4	216040
71000	7.3	33.74	117.93	840	5	224900

표 2.3.3.24. 단계하중 별 규격화설계(IBC 2009참조)에 의한 재료비 최적화

Design Load (Kg)	Shaft dia (cm) 2 cases	Plate dia (cm) 4 cases	Plate space (cm) interval : 5 cm	Depth (cm) interval : 10 cm	Plate num [2 5]	Cost (won)
3000	7.3	20.32	65	230	2	52633
7000	7.3	30.48	75	300	2	78185
11000	7.3	35.56	105	500	3	138810
11000	7.3	35.56	125	660	2	152980
15000	7.3	35.56	125	710	2	162230
19000	7.3	25.4	85	820	2	167460
23000	7.3	25.4	90	840	2	171160
27000	7.3	30.48	105	830	2	176240
31000	7.3	30.48	95	840	2	178090
35000	7.3	35.56	125	830	2	184430
39000	7.3	35.56	125	840	2	186280
43000	7.3	35.56	125	840	2	186280

47000	7.3	35.56	125	830	3	199870
51000	7.3	35.56	125	840	3	201720
55000	7.3	30.48	105	840	5	212110
59000	7.3	35.56	105	840	4	217150
63000	7.3	35.56	125	840	4	217150
67000	7.3	35.56	105	840	5	232590
71000	7.3	35.56	115	840	5	232590

표 2.3.3.25. 단계하중 별 자유설계 와 규격화설계(IBC 2009참조)값 비교

Design Load (Kg)	자유설계에 의한 재료비 (won)	규격화설계(IBC 2009참조)에 의한 재료비 (won)
3000	51623	52633
7000	76106	78185
11000	126050	138810
11000	147050	152980
15000	156150	162230
19000	164030	167460
23000	167220	171160
27000	170660	176240
31000	174080	178090
35000	177490	184430
39000	180900	186280
43000	184300	186280
47000	192450	199870
51000	196270	201720
55000	203850	212110
59000	207920	217150
63000	211990	217150
67000	216040	232590
71000	224900	232590

본 연구의 재료비 최적화를 위한 헬리컬 파일 형상의 최적화 설계 기법은 헬리컬 파일 기초 설계의 경제적 타당성 면에서 향상된 성과를 냈다는 점에서 주목할 필요가 있다. 본 연구 결과 설계 시 단계하중에 따른 분석은 다음과 같다.

- ① 단계하중에 따른 헬리컬 파일 영향인자들의 변화양상을 분석한 결과, 재료비 최적화 과정에서 지지력 발현에 영향을 주는 인자들의 영향력은 관입깊이, 나선형 원판의 직경, 원판의 개수, 원판 사이의 간격, 축의 직경 순으로 큰 것을 확인 할 수 있었다.
- ② 2009 IBC의 규정을 참고하여 규격화된 설계의 재료비는 과 설계로 인하여 규격화 시키지 않고 설계한 재료비 보다 상대적으로 높게 나왔다. 이는 주어진 하중에 대한 정밀한

설계의 한계성을 보여준다고 할 수 있으나, 실무자들의 이용에 대한 편의성과, 자재 수급의 보편성을 고려한다면, 규격화된 자재의 설계 역시 무시할 수 없다고 판단된다.

- ③ 최적화 설계한 값 중 일부구간은 변화양상에서 벗어난 의외의 값들이 도출 되었다. 이는 N치가 감소하는 구간(3~4m, 5~6m)이 헬리컬 파일의 설계 형상에 영향을 준 것으로 사료된다. 이를 통해 단계하중에 따른 재료비 최적화 과정에서 영향인자들의 변화양상은 규칙성을 갖지만, 이는 지반의 특성에 매우 의존적이고, 최적화 과정에서 예측할 수 없었던 결과 값이 도출 된다는 점에서 본 연구의 헬리컬 파일의 재료비 최적화 설계가 의의를 갖는다고 할 수 있다.

Harmony search algorithm를 이용한 최적화과정의 흐름도는 그림 2.3.3.73 과 같다.

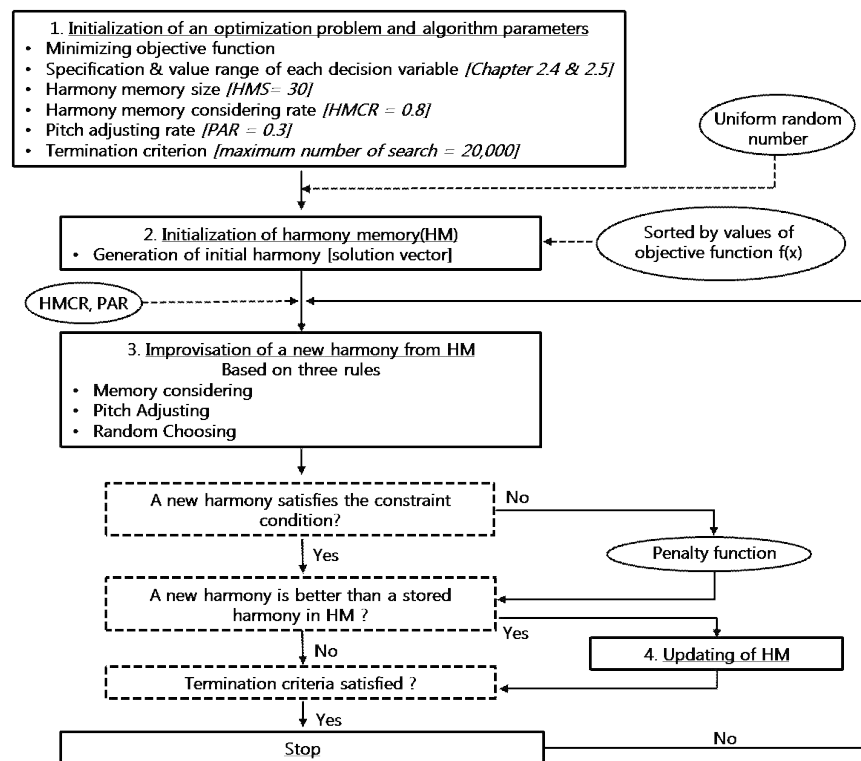


그림 2.3.3.73. 헬리컬 파일 최적화에 대한 하모니서치 알고리즘 순서도

목표 6	설계 및 시공관리를 위한 시공관리 지침서 작성
------	---------------------------

(가) 일반적 사항

- ① 본 지방서의 목적은 아래와 같이 규정한다.

구분	목적
----	----

설계단계	• 설계하중 크기별 경제적 가치를 도모한 최적화 파일 설계 • 연직, 수평, 지진하중 등에 충분히 견딜 수 있는 안정성을 갖는 파일설계 • 시공에 필요한 제반사항 제시
시공단계	• 말뚝품질 확보를 위한 품질관리 항목 및 수치제시 • 관리기준치 제시

② 시방서의 구성

- ㉠ 설계관련 시방서
- ㉡ 시공관련 시방서
- ㉢ 시공 재료관련 시방서
- ㉣ 시공재료 및 시공품질 관련 시방서
- ㉤ 안전 및 보건관련 시방서

(나) 설계 시방서

① 지반조사

- ㉠ 지반조사는 시추를 기본으로 하며 지표면으로부터 1.0m 간격으로 연속적으로 표준 관입시험을 실시한다.
- ㉡ 시추 종료심도는 최소 풍화암 선단, 조출현후 2.0m 까지 실시한다.
- ㉢ 헬리컬 파일 시공특성을 감안하여 지표면에서 반드시 표준관입시험을 실시한다.
- ㉣ 지반조사 수량 및 위치는 부지면적, 구조물의 크기 및 수량, 중요도 등을 감안하여 지반기술자의 판단에 따라 결정한다.
- ㉤ 지반조사, 수량의 최소규정은 구조물 기초 설계기준에 따른다.
- ㉥ 헬리컬 파일 지지력 예측 시 중요한 상수인 점착력과 내부마찰각임을 감안하여 아래의 규정에 따라 시추공 전단시험을 수행토록 한다.

표 2.3.3.26. 시추공 전단시험 규정

규정	목적
1) 표준관입시험 2회당 1회	• 심도증가에 따른 지지력의 예측
2) 지층별 1~2회	• 각 지층별 지지력의 예측
3) 선단지지층	• 최하단 나선형원판의 지지력 예측 침하 • 침하억제 및 선단보강 그라우팅 공법 적용 시 그라우팅 해 주입방법 및 압력결정

② 헬리컬 파일 설계 시 주요검토사항

- ㉠ 연직 설계하중 만족에 필요한 시공심도, 파일의 제원 및 시공심도 증가에 따른 연직

지지력 계산은 Individual Bearing method 와 Cylinder Bearing method 법을 비교하여 그 설계법에 따른 시공심도를 결정 후 시험시공을 통해 확정한다.

㉞ 헬리컬 파일체의 허용압축 및 인장응력은 아래를 초과하지 않도록 한다.

- 압축하중: $P_{allow} = 0.4 * f_{yshaft} * A_{shaft}$
 P_{allowc} = 압축 시 작용하는 허용하중(N)
 f_{yshaft} = 강철 중심축의 최소 항복응력 (MPa)
 A_{shaft} = 강철축의 중심 면적(mm^2)
- 인장하중: $P_{allowt} = S_{ut} / FS$
 P_{allowt} = 인장 시 작용하는 허용하중(N)
 S_{ut} = 강철 중심축부분의 최소 인장력(커플링 접합부분에서)(N)
 FS = 적용에 적합한 안전요소, 일시적 또는 영구적 구조들

㉞ 극한 구조력은 아래와 같이 결정되어야 한다.

- 압축하중: $P_{ultc} = f_{yshaft} * A_{shaft}$
 P_{ultc} = 압축 시 극한 구조력
 f_{yshaft} = 강철 중심축의 최소 항복응력(N)
 A_{shaft} = 강철축의 중심 면적(mm^2)
- 인장하중: $P_{allowt} = S_{ut} / FS$
 P_{allowt} = 인장 시 작용하는 허용하중(N)
 S_{ut} = 강철 중심축부분의 극한 인장력(커플링 접합부분에서)(N)
 FS = 적용에 적합한 안전요소, 일시적 또는 영구적 구조들

㉞ 헬리컬 파일의 허용지지력은 아래 사항 중 가장 작은 값을 적용하도록 한다.

$$P_a = 0.5P_u$$

여기서 P_u 는 아래의 사항에 대해서 최소값을 적용한다.

- 하중시험에서 결정되는 극한지지력
- 파일 중심축의 극한 축력
- 파일 중심축 커플링의 극한력
- 파일에 부착된 나선형 원판의 극한 축용량의 합

③ 시공도급자의 중점 검토사항

㉞ 시공평면도 및 지질주상도를 통해 아래사항을 중점 검토하도록 한다.

- 시공자는 헬리컬 파일 시공부지에 대한 지상장애 요인을 제거하도록 한다. (전선, 전신주, 인접가설 구조물, 차량, 지표면 콘크리트 바닥 등)
- 시공자는 헬리컬 파일 시공부지에 대한 지하매설물 현황을 파악하며, 필요시 GPR 과 같은 지장물 탐사를 실시한다.
- 시공자는 설계 시 적용된 지반조사결과와 현장에서 확인된 지반조사 결과 아래와

같은 상황 발생이 예상될 경우 별도의 대책을 수립하도록 한다.

- 계획심도까지 관입 불능 지반 출현이 발생한다.
- 목표지지력 도달을 위한 시공심도의 변화가 발생하기 때문에 시공 전 반드시 지반조사 및 시험시공을 실시하여 별도의 대책을 수립한다.
- 지반조사 및 시험 시공의 수량은 시공 파일의 수량, 지지력의 크기, 구조물 등의 형식에 따라 최소 각 2회 정도 실시한다.
- 시공 전 사전확인 지반조사는 설계 시 수행된 위치에서 수행하여 상호 비교하도록 한다.

④ 도급자는 시험시공을 실시하여 그 결과를 시공계획에 반영하도록 한다. 시험시공관련 사항은 아래와 같이 규정하도록 한다.

㉠ 시험시공 위치 및 수량

- 시험시공 위치는 실제 시공될 위치에서 수행한다.
- 시험시공 위치는 대표 심도 1개소, 지지력의 크기별로 각 1개소씩 수행하도록 한다.

㉡ 시험시공의 목적 및 측정항목

- 시험시공의 목적 및 측정항목은 표 2.3.3.27와 같다..

표 2.3.3.27. 시험시공의 목적 및 측정항목

목적	방법
• 목표지지력의 확인	• 정재하시험실시
• 계획심도 또는 목표지지력 도달 시 토크 측정	• 심도별-N치-토크측정
• 예상지지층 관입 유 무 체크	• 시공심도를 측정하여 목표 지지층과 비교
• 시공 중 중심축 및 연결 볼트 및 용접 이음부 파손 유무 체크	• 비틀림 각도를 측정하여 허용치와 비교 • 육안관찰

- 계획 시공심도에서 측정된 토크와 지지력을 비교하여 설계하중별 허용지지력 도달에 필요한 토크를 제시하고, 이를 시공관리 기준치로 활용하여 시공되는 모든 파일에 대해 설계 지지력 만족유무를 간접 확인하도록 한다.

㉢ 시공 중 및 시공 후 재료의 안정성 검토

시공자는 설계 시 제시된 파일의 제원에 대해 시공 중 및 시공 후 파일의 품질에 문제가 발생하지 않도록 아래사항을 검토하며, 각 분야별 시험 성적서를 제출하도록 한다.

- 허용지지력도달을 위한 예상되는 토크를 제시하며, 이에 충분히 견딜 수 있는 중심축제원 제시
- 나선형 원판의 용접강도 및 원판 휨강도 구조계산 및 시험성적서 제시

- 연결커플링재료의 비틀림 모멘트 작용 시 전단력 검토 및 관련시험성적서 제출
- 설계하중 작용 시 압축 및 인장응력을 받는 중심축 허용압축 및 인장력 구조검토 및 시험성적서 제출

㉔ 현장반입 말뚝재료의 국제기준(참고)

헬리컬 파일은 말뚝 머리부에서 유압모터의 회전력을 가해 지중에 회전시켜 말뚝을 목표지층까지 근입 시키기 때문에 심도가 깊어질수록 회전력이 증가하여 중심축은 상당한 비틀림 저항 모멘트를 받는다. 따라서 아래와 같은 등급이상의 재료를 추천 하도록 한다.

- 중심축
 - 규격은 3인치 이상의 고강도 구조용 탄소강을 사용한다. (ASTM A 500 Grade c 이상의 재료사용)

표 2.3.3.28. 둥근구조

	Grad A	Grad B	Grade C
인장력, 최소, psi(MPa)	45000(310)	58000(400)	62000(427)
항복응력, 최소, psi(MPa)	33000(228)	42000(290)	46000(317)
2in 증가 (50.8mm), 최소 %	25 ^a	23 ^b	21 ^c

- 배관
 - 파이프의 두께는 0.125~0.25 in 이상을 사용토록 한다.
- 나선형 원판
 - 원판의 직경은 8, 10, 12, 14 in를 적용한다.
 - 두께는 3/8 in를 적용한다.
 - 재료규정은 ASTM A36적용한다.
 - 피치의 간격은 3 in를 적용하며 허용오차는 1.4 in를 적용한다.
- 중심축 연결재
 - 연결 커플링은 중심축의 직진성을 유지하도록 한다.
 - 커플링 내경과 중심축 외경과의 차이는 최대 1/16 in 이내로 한다.
 - 커플링의 강도는 중심축의 강도보다 크게 한다.
 - 연결되는 커플링은 강재, 볼트, 용접에 의해 구성되므로 말뚝 연결부의 강도는 중심축의 압축 및 비틀림 강도보다 최소 1.5배 이상이 되도록 한다.

⑤ 도급자의 자격조건

- 헬리컬 파일이 국내에 도입된 지 3년 내외로써 아직 기술적 완성도가 높지 않으므로, 경제성 및 시공성을 확보한 공법으로 정착하기 위해서는 시공관련 기술 인력을 타공법의 시공보다 엄격히 관리하여야 한다.

㉔ 해당분야 전문건설 면허취득법인

- 헬리컬 파일 시공도급자는 헬리컬 파일의 시공 및 설계경험을 동시 갖춘 법인으로 한다.
- 도급자는 헬리컬 파일 설계 및 시공 등에 있어 토질 및 기초 엔지니어링 활동주체 신고등록 및 보링 및 그라우팅 면허취득업체로 한다.

㉕ 현장투입인력현황 및 자격

표 2.3.3.29. 현장투입인력현황 및 자격

투입인력	기술등급	역할
프로젝트 총괄 감독	고급(토질 및 기초분야)	계획, 평가, 현장운영
현장작업반장	중급(기능사)	시공총괄
현장작업자	초급(기능사)	시공

- 헬리컬 파일 허용 수직각도 및 수직을 유지하기 위한 대책 제시
- 파일 두부 적란 표고 기록
- 헬리컬 파일 시공 부속장치와 상부 구조물 접속에 필요한 세부 도면
- 연결 커플링 압축, 인장, 비틀림 안정성 구조 계산서
- 파일두부 연결 플레이트와 콘크리트 슬래브 기초바닥 편칭 안정성 검토

㉖ 제작도면 작성

- 복수의 나선형 원관이 장착된 최하단부 헬리컬 파일도면
- 연결커플링도면
- 말뚝두부 접합부 도면
- 연결부 중심축 파일도면

(다) 사용자제 제품성적서

- ① 사용재료 종류별 제조업자의 제품자료
- ② 자재승인 또는 신고제품은 “30110 건축공사 일반사항 2.2”에 따른다.
- ③ 시험의 합격기준은 해당 시방에 따르되 해당 시방에 명시되지 않은 경우에는 한국산업규격(KS) 등 시험방법에 명시된 규격에 따른다.
- ④ 시료의 채취는 별도의 언급이 없는 한 그 시료의 품질이 전체를 대표하도록 하고 시험기 중 명시된 시료의 양 및 크기가 시험방법에 명시된 한국산업규격(KS) 등과 다른 경우, 명시된 시료의 양 및 크기는 현장시험과 주공의 시험실에 시험을 의뢰하는 경우에만 적용한다.
- ⑤ 품질검사전문기관에서 시험할 수 없는 자재 또는 시험 종목은 감독자 입회하에 공장에서 시험 할 수 있다.
- ⑥ 자재의 형상 및 치수허용기준은 강관말뚝의 품질시험 기준인 KS F 4602 시험 종목을 따른다.

표 2.3.3.30. KS F 4602 형상 및 치수허용치

구분			KSF 4602		ASTM A 252
			허용차	측정방법	허용차
외경	관끝부분		± 0.5%	바깥둘레길이	± 1%
	몸통부		± 1%		
두께	두께 16m m 미만	외경 500mm미만	+규정치 없음, -0.6mm		+규정치 없음 12.5%
		외경 500mm이상 800mm미만	+규정치 없음, -0.7mm		
		외경 800mm 이상	+규정치 없음, -0.8mm		
	두께 16m m 이상	외경 800mm 미만	+규정치 없음, -0.8mm		
		외경 800mm이상	+규정치 없음, -1.0mm		
길이			+규정치 없음, -0mm		± 1in
휨			길이의 0.1%이하		실용적으로 끝나야 함
용접이음이 되는 단면의 평면도			2mm이하		규정치 없음
용접이음이 되는 단면의 직각도			바깥지름의 0.5%이하, 다만 최대 4mm		규정치 없음
무 게			규정치 없음		+15%, -5%
표면상태					흠 깊이가 두께의 25%이하

⑦ 헬리컬 파일의 기계적 성질

- 헬리컬 파일의 중심축의 화학 성분, 항복강도, 인장강도, 신장율 및 편평시험은 KS D 3566에 규정한 2종(STK 400), 또는 4종(STK 490) 에 따른다.

표 2.3.3.31 화학성분

종류의 기호	C	Si	Mn	P	S
STK 400	0.25이하	-	-	0.040이하	0.040이하
STK 490	0.18이하	0.55	0.15이하	0.04이하	

표 2.3.3.32 기계적 성질

기계적 성질	인장강도 N/mm^2	항복점 또는 내력 N/mm^2	연신율(%) 5호시험편 가로방향	용접부 인장강도 N/mm^2	편평성 평판사이의 거리 (D는 관 바깥지름)
제법구분	아크용접, 전기저항용접			아크용접	전기저항용접
STK 400	400이상	235이상	18이상	400이상	2/3D
STK 400	490이상	315이상	18이상	490이상	7/8D

표 2.3.3.33 허용응력

항목 (kg/cm^2)	헬리컬파일 (중심축)	
	STK 400	STK 490
압축응력	1400이상	1900이상
휨인장응력	1400이상	1900이상
전단응력	800이상	1900이상

⑧ 도급자는 현장에 투입될 시공파일의 화학성분 및 기계적 성질에 관한 국가공인기관의 시험 성적서를 발주처에 제출하도록 한다.

⑨ 사용될 중심축의 항복 비틀림 모멘트 시험 성적서를 제출하도록 하며 공인 기관의 시험 성적서가 없는 경우 자체 시험실에서 유경험자에 의한 표 2.3.3.34의 시험을 발주자가 요구할 경우 발주자의 입회하에 말뚝 제조공장에서 실시한다.

표 2.3.3.34. 헬리컬 파일 구조 시험 항목

구분	시험항목	비고
중심축	- 비틀림 시험 - 압축강도 시험	-
커플링	- 비틀림 시험 - 압축강도시험	- 연결물드 결합된 상태에서 시험 - 중심축과 결합된 상태에서 시험
나선형원관	원관점 휨강도 및 용접접합강도시험	

(라) 시공관련 시방서

① 적용범위

본 시방서는 시공 장비의 유압 모터의 회전력에 의해 땅속에 수직으로 관입되는 무소음, 무진, 비배토 파일인 헬리컬 파일 시공에 대한 규정이다.

② 설계변경

하부 지반이 급경사, 호박돌, 매립지 등 불규칙한 토층이어서 설계 및 시방서대로 시공 할 수 없거나, 시험시공 결과 말뚝의 길이, 재질, 직경, 시공방법 등을 변경할 필요가 있는 경우에는 지반조사 결과, 토질조건, 상부구조물 영향, 환경문제, 공사기간, 공사비 등을 검토하여 작성한 구조검토 결과와 도면, 사진 등 관계증빙서류가 포함된 설계변경 승인 요청서를 제출하여 승인을 받아 시공한다. 다만, 시험시공 결과에 따라 감독자와 협의 하여 현장에 반입할 말뚝의 길이만을 변경하는 경우와 시공 중인 말뚝의 관입길이가 설계와 다른 경우는 설계변경에 대한 사전 승인절차를 요하지 않는다.

③ 제출서류

시공계획서 : 헬리컬 파일 시공 계획서에는 아래사항이 포함되어야 한다.

㉠ 말뚝시공계획서

- 파일 시공관련 평면 및 레벨관련사항
 - 헬리컬 파일간격 평면도 배치
 - 위치별 파일 시공길이 및 최소시공물량 집계표
 - 각 구조물 위치별 설계하중 표기 및 위치별 현황표
 - 파일 위치별 고유 파일번호, 좌표, 시공예정심도, 레벨 현황표 작성 및 도면표기
 - 중심축의 제원 제시(직경, 두께, 항복강도, 인장강도 비틀림 강도, 파이프형식)
 - 나선형원판의 제원 및 도면제시(직경, 두께, 피치간격, 수량, 설치거리)
 - 시공장비 제원 (시공장비 형식, 출력, 무게, 폭, 길이, 높이, 견광 등, 후방카메라 설치유무)
 - 유압 모터의 제원 (Max-RPM, 압력-토크 제원표 제시)
 - 설계지지력 도달에 필요한 예상되는 유압 모터의 압력 및 토크 제시
 - 설계 지지력도달에 필요한 토크 및 중심축 비틀림 강성 검토

㉡ 헬리컬 파일의 설치관련사항

- 시공방법기술
- 시공 시 방해요소
- 장비운영계획
- 말뚝시공순서 및 좌표값
- 헬리컬 파일 시공 중 모니터링 절차
- 말뚝재하시험 방법 및 수량
- 말뚝재하시험 결과 평가방법

㉢ 시공 시 기록사항

헬리컬 파일 시공 중 기록될 사항은 아래와 같고 시공이 종료되면 24시간 이내에 기록사항을 발주처에 제출하도록 한다.

- 프로젝트와 압축기의 이름
- 설치동안 압축 감독관의 이름
- 설치한 날짜와 시간
- 설치 장비의 이름과 모델
- 사용된 토크 지시기의 유형
- 그리드 위치, 다이어그램 또는 지정된 신원 수에 의한 헬리컬 파일 또는 헬리컬 앵커의 위치
- 헬리컬 파일의 크기, 도입부부분의 유형과 배열, 그 부분의 축의 길이, 수
- 설치기간과 관찰
- 총 설치된길이

- 중심축 두부와 잘려진 길이의 최종고도
- 최종 중심축의 수직도
- 방해, 장애물들에 관련된, 또한 다른 연관된 정보들에 대한 언급
- 허용력 디자인
- 시공종료 심도의 지층명 및 N치
- 그라우팅 실시 유무 및 주입압력

㉔ 시공 시 기록될 사항 및 표준양식

HELIX FOUNDATION™

Helix pier Installation Observation Record

PROJECT NAME:

PROJECT NUMBER:

DATE OF INSTALLATION:

CONTRACTOR NAME

PIER NUMBER						
GRID LOCATION						
ELEVATION	GROUND SURFACE					
	TOP OF PIER					
	PLANNED BOTTOM OF PIER					
	ACTUAL BOTTOM OF PIER					
REQUIRED MINIMUM LENGTH						
TOTAL LENGTH INSTALLED						
PIER LENGTH ABOVE GROUND						
PLANNED SUPPORTING STRATUM						
STRATUM PENETRATION						
NUMBER OF HELICS						
HELIX DIAMETER						
SHAFT DIMENSIONS						
LEAD BAR LENGTH						
NUMBER OF EXTENSION	3.5FEET					
	5.0FEET					
	7.0FEET					
	10.0FEET					
TOP EXTENSION LENGTH ALTERED						
TORQUE	REQUIRED					
	MEASURED					

INSTALLATION EQUIPMENT:

METHOD OF TORQUE MEASUREMENT:

FIELD REPRESENTATIVE:

REVIEWER:

④ 시공 전 사전 준비사항

㉠ 자재의 보관 및 현장운영

- 운반 또는 보관도중에 변형되거나 손상되지 않아야 하며 특히 말뚝에 흠이 생기지 않아야 한다.
- 말뚝은 지면에 닿지 않게 하고, 60일 이상 저장 시 부식방지책을 강구하되, 특히 현장용접을 하는 부분은 비, 바람을 맞지 않도록 한다.
- 말뚝 반입 시 자재 제작사의 품질보증서, 모양 및 치수의 허용차, 겉모양을 확인하고 재성능이 규격에 미달하면 즉시 교체하도록 한다.

㉡ 용접환경조건

- 주위의 기온이 0℃ 이하일 경우에는 용접을 해서는 안되며, 부득이한 경우 모재부분의 접합부로부터 100mm범위 내에서 36℃ 이상으로 예열시킨 후 용접을 실시한다.
- 눈이나 비가 오거나 습도가 높은 경우 또는 초속 10m 이상의 바람이 부는 경우에는 용접을 할 수 없다. 부득이 할 경우, 눈, 비, 바람으로부터 완전히 차단하고 용접부를 충분히 건조시킨 후 용접할 수 있다.

⑤ 현장준비사항

- 말뚝의 시공에 앞서 지하매설물 및 지상의 장애물에 대한 상황을 조사하여 말뚝시공에 차질이 없도록 한다.
- 말뚝기초공사에 앞서 터파기한 지면을 평탄하게 한다. 연약한 실트층이 깊게 분포된 지반으로 항타장비 진입이 어려운 경우에는 두께 60cm의 혼합골재나 두께 80cm의 사질양질토로 치환하여 다진다. 비가 올 경우에는 배수 작업을 하여 지표면의 다짐상태가 훼손되지 않도록 한다.
- 말뚝 위치는 형짚과 못 등으로 정확하게 표시하고 건물 또는 구조물의 배치상태와 말뚝위치, 바닥레벨을 점검한다.
- 말뚝은 길이 방향으로 10cm마다 눈금을 표시하고 숫자를 말뚝 선단에서부터 100cm 마다 기입하여 말뚝길이를 식별할 수 있도록 한다.

⑥ 헬리컬 파일의 시공

㉔ 그라우팅 시공법

- 재료
 - a) 시멘트 : 보통(1종)포틀랜드 시멘트
 - b) 유동화제 : 고성능감수제(유동성증대 효과목적)
 - c) 배합수 : 깨끗하며 점토, 이토, 알칼리, 유기물 등이 포함되지 않음
- 그라우팅 장비
 - a) 주입펌프
 - 주입펌프는 피스톤식 또는 플린저식으로써 토출압력 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상 토출량 $10\ell/\text{min}$ 이상, 토출관경 20mm 이상인 것으로 시행
 - b) 교반장치
 - 그라우트 믹서는 회전수 150rpm이상 토출관경 25mm 이상 용량 200L이상으로 함
 - c) 압력계
 - $3\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상의 주입압력 측정이 가능한 압력계 사용
- 그라우팅 시공
 - a) 헬리컬파일 시공작업
 - Shaft $\varnothing$ 73 + Blade 400mm 1ea, Shaft $\varnothing$ 114 + Blade 400mm 1ea의 2개소
 - b) PACKER 설치
 - PACKER는 주입재의 역류이탈을 방지하기 위하여 중심축 내 고정압력이 주입압력의 1.5~2.5배 이상이 되도록 함
 - 시공 전 그라우팅 노즐의 폐쇄를 방지하기 위해 노즐 보호캡을 중심축 최하단부에 삽입, 노즐 보호캡은 보호캡과 중심축과의 동시 회전을 위해 각 부위에 회전 방지 비트 용접
 - 시공 완료 후, 중심축 상부에 에어파커를 관내 설치 후 공기 주입으로 에어 파커를 팽창
 - 에어파커 연결관과 그라우팅 호스를 연결하여 $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 압력으로 그라우팅재 주입
 - 중심축과 노즐캡의 사이 공간으로 그라우팅재를 분출하여, 그라우팅재가 선단보강 및 중심축을 타고 지표면상부로 분출 되도록 함
 - 압력을 조절하여 선단 그라우팅재 주입 및 중심축 보강을 수행하고 지표공동을 채움
 - c) 그라우팅 페이스트 주입작업
 - 주입재료는 시멘트, 배합수, 유동화제 사용
 - 주입작업은 교반장치에서 주입재를 교반 후 교반장치에 연결된 흡입장치를 통해 주입펌프에서 주입호스로 PACKER를 통해 지중으로 분사
 - 소정의 최대심도에서부터 주입을 완료하고 상향으로 인발 하면서 주입하는 상승 방식으로 주입

- 10~30 ℓ/min주입량 범위내에서 주입압 1~7kg/cm²로 주입

• 그라우팅 시행 표준배합비

- 그라우팅 시행 배합비는 일반 그라우팅작업의 W/C비를 적용하였으며 유동화제는 유동성증대의 목적으로 시멘트질량의 0.25%정도로 사용

㉞ 수직도 유지

- 헬리컬 파일 시공 중 수직도를 말뚝길이의 1/50 이내가 되도록 시공 관리한다.
- 따라서 도급자는 수직도 유지를 위한 세부대책을 수립하여 발주처의 승인을 득하도록 한다.
- 시공 장비에는 수직도를 측정할 수 있는 측정 장비를 부착하도록 하며, 말뚝 연결 시 배회 측정한다.
- 헬리컬 파일 시공 중 유압 모터와 결합된 파일 두부가 움직이지 않도록 유압 모터를 고정시킨다.
- 수직도를 유지하기 위해 유압 모터에 연직하중 재하 장치가 부착되도록 한다.

㉞ 유압 모터

- 지반조건 및 설계하중의 크기, 시공심도 등을 고려하여 출력토크를 선택한다.
- 유압 모터의 출력 토크의 크기는 목표지지력 도달에 필요한 토크보다 크게 설정한다. 이때 예상되는 토크는 아래식을 통해서 예측한다.
 - $Q_u = K_t \times T$
 - 여기서, Q_u = 극한지지력 (ton) = 설계하중×3
 - K_t = 토크계수
 - T = 유압 모터 토크 ($t \cdot m$)
- 헬리컬 파일 시공 장비에 부착된 유압 모터는 목표지지력을 발현하기에 충분한 토크를 유발시키기 위해 저속의 고토크 유압 모터를 사용하여 시공 중 지반 교란을 최소화 시킬 수 있도록 한다.
- 유압 모터는 시계방향 및 반시계방향으로 회전이 가능한 장비를 사용한다. 또한 유압 모터는 시공 중 RPM의 조정이 가능한 장비를 사용하며 햄머링은 허용되지 않는다.
- 적절한 RPM은 최대 15RPM 이내이다.

㉞ 시공 장비의 자중

- 헬리컬 파일은 시공 장비에 부착된 유압 모터의 회전력과 시공 장비 자중을 이용한 연직재하하중에 의해서 관입된다.
- 지반조건, 시공심도, 설계 하중 등을 감안하여 계획심도까지 시공이 가능한 장비선택이 중요하다.
- 백호우에 장착된 유압 모터의 연직재하하중은 장비자중의 50%이내임을 감안하여

장비를 선택한다.

- 현장에 투입된 장비는 시공 전 아래의 표 2.3.3.35 사항을 체크하여 그 결과를 시공에 반영한다.

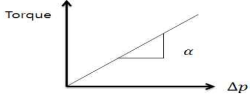
표 2.3.3.35. 헬리컬 파일 시공장비 선택시 고려사항

관입상황	원인	대책
회전은 되면서 관입불능	수직력 부족 나선원관피치 사이에 자갈이 박힘	장비자중증가 피치간격증가
유압 모터 정지	유압 모터 출력토크부족	장비교체

㉞ 토크측정

- 헬리컬 파일 시공 시에는 반드시 토크 측정기를 사용토록 한다.
- 토크 측정기는 시공 장비에 부착되어 사용된다.
- 시험 시공 시에는 전심도에 걸쳐 연속적인 토크 측정이 가능한 토크 측정시스템을 장착하도록 한다.
- 각 시공 단계별 토크측정방법 및 검 교정 방법은 표 2.3.3.36의 방법에 따른다.

표 2.3.3.36. 토크 측정 및 검교정 방법

시공단계	토크측정방법	검교정방법
시험시공	• 유압모터에 검 교정이 완료된 토크측정기를 부착하여 직접 토크 측정 • 전심도 연속측정	• 도급자 토크측정기 자체검수
시공중	• 토크 측정기 사용 • 유압 모터의 차동압력과 토크와의 관계이용 • 계획심도도달위치에서 1회 토크측정	 여기서 Δp = 유압 모터 차동압력 Torque = 검 교정 완료된 토크 측정기 출력 토크 값

- 시공 시 측정된 토크치는 절대적으로 중심축의 항목토크를 넘어서는 안된다.
- 정확한 토크를 측정하기 위해서는 토크측정위치에서 반드시 엔진출력(RPM)을 최소로한 상태에서 유압 모터의 회전속도를 최소화시킨 상태에서 토크 또는 유압 모터의 차동압력을 기록한다.

㉟ 시험시공

본 시험 착수전에 지반조사 보고서와 파일설계자료를 토대로 아래의 목적으로 시험 시공을 실시하며 그 결과를 본 시공에 반영토록 한다.

표 2.3.3.37. 시험시공 고려사항

구분	목적 및 활용
시공장비의 적정성	• 계획심도까지 파일 구입 가능성 체크 • 유압 모터의 회전력 및 시공장비 중량의 적절성 확인 • 투입장비의 최대 회전력 (토크) 체크
설계지지력 도달심도확인	• N치별 토크를 측정하여 예상지지력 확인 • 설계지지력 도달가능 심도에서 정재하 시험실시 • 재하시험결과로부터 아래식을 이용하여 토크계수 K_T를 확인 $Q_u = K_T \times T$ • 현장에 투입된 유압 모터의 차종압력과 토크와의 관계식 체크 • 설계지지력 도달에 필요한 토크 또는 차동압력 확인 • 설계지지력 도달심도 및 지층 결정 • 최대토크와 중심축 허용비틀림 모멘트값과 비교하여 중심축의 안정성 및 사용강재의 과다사용 유무의 체크

㉠ 시험말뚝은 실제 시공될 말뚝과 동일한 제원의 말뚝을 사용한다.

㉡ 시험말뚝은 설계하중의 크기별, 지층의 다양성, 구조물의 수량 및 형식 등을 고려하여 최소 3개소이상 실시한다.

-시험 시공 시 확인될 사항은 표 2.3.3.38 와 같다.

표 2.3.3.38. 시험시공시 확인사항

항목	체크사항
유압모터의 최대 출력토크	토크 측정기로 측정 차동 압력측정
근입가능 최대심도 및 지층	심도확인 시추 주상도를 통해 근입물 가능심도에서의 지층 명 및 N치 체크
중심축 및 연결커플링의 비틀림 파 손	육안관찰 최대 토크 발생 시 중심축의 비틀림 각도 체크 파일을 회수하여 연결 커플링 무파손유무 직접확 인
좌굴가능성 확인	설계하중의 2배 재하를 통해 파일의 순 좌굴량 체 크
지지력의 확인	정재하 시험을 통해 극한 또는 항복 지지력 확인 설계지지력을 만족하는 지층 및 N치 설정

⑧ 본 시공

- ㉠ 시공위치는 사전에 나무말뚝을 지반에 박아두며, 나무 말뚝상단부에 칠을하여 멀리서도 식별이 가능하도록 한다. 위치 표시용 나무말뚝은 시공 시 중심축을 나무 말뚝에 삽입토록 한다.
- ㉡ 시공 중에는 반드시 수직도를 유지토록 하며, 시공 장비의 운영자는 수직도를 확인하면서 작업을 실시한다.
- ㉢ 시공 종료 심도는 시험 시공 시 확인된 지지력과 토크와의 관계에서 결정된 수치를 사용하여 시공토록 한다. 또한 시공된 말뚝의 10%정도 재하시험을 통해 지지력을 확인 한다.
- ㉣ 시험시공을 통해서 측정된 극한지지력을 이용하여 토크계수 및 출력 토크를 측정하여 계획 지지력 도달을 위한 목표 토크치를 설정하여, 이를 시공에 반영토록 한다.
- ㉤ 헬리컬파일의 최소 근입 깊이는 최상단 나선형 원판 직경의 5배 이상 근입 되도록 시공한다. 헬리컬 파일의 목표 토크값에 도달될 때까지 회전관입한다.
- ㉥ 경사시공파일을 제외한 모든 연직시공파일은 지면과 파일과의 각도가 90 ± 2 도 이내로 시공되도록 한다.
- ㉦ 시공이 완료되면 지표면 부근에 생긴 공동에 시멘트 그라우팅을 실시한다. 필요시

선단지지력 및 침하억제를 위해 그라우팅을 실시한다.

㉠ 시험이 종료되면 48시간 이내에 아래의 사항을 발주처 또는 감독자의 서면으로 보고 하도록 한다.

- 프로젝트 및 발주처 이름
- 시공 중 현장에서 감독한 감독관의 이름
- 파일 번호 별 설치일자 및 시간
- 시공 장비 명 및 모델번호 기입
- 사용된 토크 측정기의 형식
- 말뚝 번호별 시공위치
- 최선단 헬리컬 파일의 제원(중심축 직경, 두께, 나선형원판의 수량 및 직경, 나선형원판의 수량 및 직경, 나선형 원판의 부착 위치 등)
- 총 시공심도
- 각 말뚝 별 최종 절단 높이
- 각 말뚝 별 최종토크
- 1m 간격 및 지층별 측정토크 기록지
- 각 말뚝 별 허용지지력
- 커플링 연결도면

⑨ 파일의 연결

㉡ 현장용접

- 용접부 단면 상태는 단면부 요철이 2mm이하이어야 한다.
- 현장이음은 이음철구를 이용한 전둘레, 전두께, 전기용접 또는 CO_2 용접으로 한다.
- 하부말뚝은 두부손상이 없는 상태에서 이음 시공한다.
- 가조임 도구 때문에 용접이 불가능한 부분은 남겨두고 긴 구간을 충분히 용접한 후, 가조임 도구를 제거한 다음 나머지 부분을 용접한다.
- 덧살 붙임은 3mm이하로 하고 지나친 덧살 붙임은 하지 아니한다.

㉢ 볼트조임

- 천공한 구멍에 F10T규격의 볼트 조임을 한다.
- 볼트의 직경 및 수량은 커플링 재와 결합된 상태에서 출력 및 비틀림 모우멘트에 충분히 저항하기 위한 강성을 갖도록 한다.

㉣ 현장 용접 이음부 검사

- 외관 및 품질검사

전체 이음부에 대하여 다음사항을 검사한다.

- 용접부 형상 비드표면 요철, 비드폭, 용접치수, 보강살, 용접길이
- 용접결함 균열, 언더컷, 오버랩, 피트

- 마무리 정도 스프래그, Spatter의 제거, 그라인더 마감상태, 용접누락
- 용접보수 및 재검사
 - 외관검사 및 비파괴검사 결과 불합격 판정을 받은 용접 결함부는 감독자에게 통보하여 그 보수방법에 대하여 승인을 얻어야 한다.
 - 승인을 받은 보수방법에 따라 보수를 실시하고, 재검사를 하여 합격판정기준에 따라 조치한다.
 - 용접결함이 많이 발생한 경우에는 보수 전에 결함 발생 원인을 규명하여 재발 방지대책을 세우도록 한다,

⑩ 말뚝 박기 허용오차 및 보강

말뚝의 시공 상태가 잘못된 경우 다음과 같이 보강조치를 해야 한다.

㉔ 설계위치에서 벗어난 경우

설계위치에서 벗어난 거리가 150mm를 초과한 경우에는 구조검토를 하여 추가 근입 및 기초를 보강한다.

㉕ 수직으로 시공되지 않은 경우

근입 완료 후 각도기 등으로 측정하여 수직에 대한 기울기가 말뚝길이의 1/50 이상 일 경우에는 보강말뚝을 시공한다.

⑪ 두부정리

파일근입을 완료한 후에는 감독관의 입회하에 소정의 높이로 평활하게 절단하여야 한다.

⑫ 재하시험

말뚝기초는 다음 시험방법으로 말뚝재하 시험을 실시하여 말뚝의 지지력을 확인한다.

㉔ 시험 종류 및 횟수

시험의 수량은 아래규정을 따른다.

표 2.3.3.39. 재하시험 빈도

구분	시험빈도	시험말뚝 위치
pile 본수 1~100본	2개소	감독자 지정위치
pile 본수 100~200본	4개소	
pile 본수 200본 이상	5개소 이상	

㉕ 정재하 시험의 규정

- 정 재하 시험은 ASTM D 1143규정에 따라 실시한다.
- 재하방법은 급속재하시험법을 사용한다.
- 재하하중은 설계하중의 200%을 적용한다.
- 최종 재하시험의 위치 및 수량은 감독관과 협의 후 실시토록 한다.
- 재하시험이 수행되는 헬리컬 파일은 시공 중 반드시 심도 별 토크를 측정하며, 인접에서 수행된 지반조사 자료가 없는 경우 별도의 지반조사를 수행토록 한다.

(마) 말뚝 시공관리 시스템 개발

본 연구과제에서 개발된 헬리컬파일을 설계에서부터 시공까지 경제적이면서 시공성이 용이하도록 하기 위한 각 공종별 개발 시스템은 아래 표 2.3.3.40, 2.3.3.41, 2.3.3.42 와 같이 요약된다.

표 2.3.3.40. 설계단계 시 적용기술

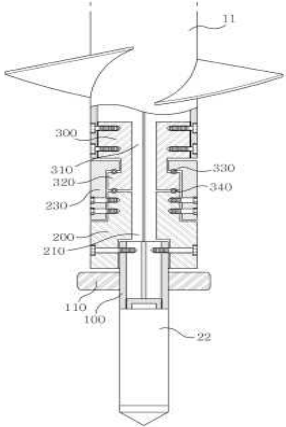
개발기술	목적 및 현장적용 시 효용성
 그림 2.3.3.74 헬리컬파일에 장착된 피조콘 시험장치 (특허 출원)	• helical pile 설계 및 기초설계 시 풍화토까지 피조콘 조사 가능에 따른 정밀지반조사 및 경제적 지반 조사 가능 • 최적화 헬리컬 파일 설계가능 • 피조콘시험의 관입문제 해결 • 피조콘 활성화 기대
 그림 2.3.3.75. 재하장치가 내장된 표준규격의 헬리컬 파일 (특허 출원/등록)	• 헬리컬 파일에 재하장치가 내장되어 있기 때문에 헬리컬 파일 설계단계에서도 말뚝시공과 더불어 간단하고 경제적으로 재하시험가능 • 설계단계에서 지층별 토크, 지지력, 침하량 등에 대한 연속측정이 가능하여 설계단계에서 최적의 말뚝 설계가능, 경제적 시공 도모

표 2.3.3.41. 시공단계 시 적용기술

개발기술	목적 및 현장적용 시 효용성
	• 헬리컬파일 시공 완료시 재하시험을 통해 지지력 및 침하등에 대한 확인 필요 • 시공 중 사용되는 헬리컬파일을 이용하여 간단한 정재하시험으로 경제적 시험가능

그림 2.3.3.76. 헬리컬파일의 인발저항력을 이용한 정재하시험법 (특허 출원/등록)	
 그림 2.3.3.77. 파일 연직도 관리 장치	• 유압보터에 tiltmeter를 부착하여 백호 조정석에서의 모니터링으로 시공 수직도 유지
 그림 2.3.3.78. 고토크측정기 및 캘리브레이션 장비 개발	• 헬리컬 파일의 시공관리에서는 토크측정이 필수적임 • 헬리컬 파일 시공 시 발생하는 토크는 통상 최대 10t·m 정도로써 구매가 용이치 않으며, 주문제작시 상당히 고가임 • helical pile 시공이 일반화될 경우 헬리컬 파일 시공에 적합한 고토크측정기의 국내 개발이 필수적임 • 본 연구개발에 사용된 토크측정을 본 연구팀에서 직접개발
 그림 2.3.3.79. 차동압력 및 시공심도 연속측정	• 시공 중 현장에서 측정되는 Depth-ΔP-Torque에 대한 연속측정가능으로 인한 객관적 자료 추출가능 • 지속적 자료 축적 시스템으로 인한 보다 진보된 최적화 설계시스템 구축 가능

표 2.3.3.42. 운영관리 단계 시 적용기술

개발기술	목적 및 현장적용 시 효용성
------	-----------------

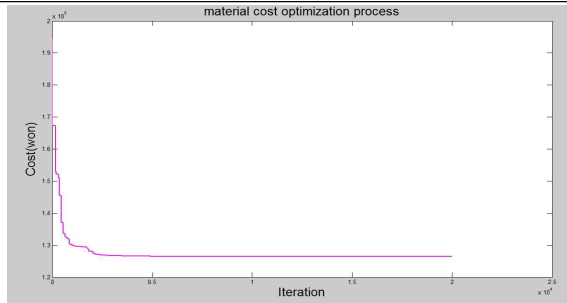


그림 2.3.3.80 운영관리 시스템 구축(재료비 최적화)

- 현장운영 프로그램
- 헬리컬파일의 최적화 설계프로그램 개발 완료

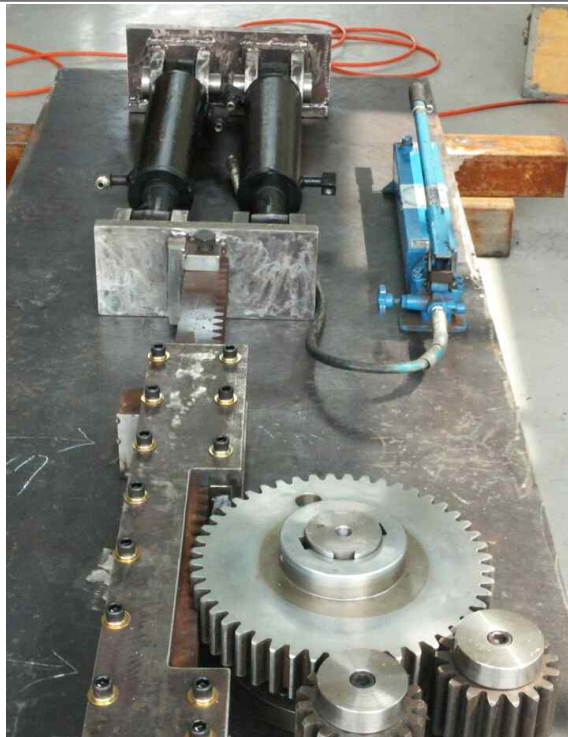


그림 2.3.3.81 헬리컬 파일 비틀림 시험기 제작

- 시공될 다양한 중심축에 대한 극한 비틀림 모멘트 측정가능
- 지지력의 크기에 따른 예상되는 토크별 최적의 중심축 선정이 가능토록 함

제 3장. 최종 연구 성과 및 적용실적

제 1절. 주요 연구 성과

1. 주요연구 성과

주요 연구 성과명	세부 성과물
helical pile 형상별 공학적 거동 파악 및 수치해석을 통한 예측 설계지지력 제시	• helical pile(나선형 원판 2개)의 시험시공을 통한 공학적 거동 파악 • 수직도 관리 시공법 • 시공시 발생하는 지표면 부근 동공발생 대책 공법 제시
현장재하시험 결과와 수치해석을 통한 예측 설계지지력 제시	• 새로운 helical pile 의 예측 설계지지력 제시
지지력 확인시스템이 내장된 표준 규격 helical pile의 제작 및 평가	• 양방향 재하 셀 을 통한 helical pile의 양방향 말뚝재하시험 도입
지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능평가	• 지반 조건별 최적의 그라우팅 압력 및 시멘트 배합비 제시 • Helical pile 내부에 장착된 그라우팅 장비개발 • 그라우팅 실시에 따른 지지력 개선 효과 확인
helical pile 시공 측정 장비 개발	• 지지력별 시공 장비의 최대 출력토크 제시
설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 개발	• 최적화 알고리즘 기법을 도입한 helical pile의 설계법 개발

제 2절. 주요 연구별 핵심성과 실적

세부 핵심성과	기존 기술과의 차별성	성과물의 형태	활용실적 및 활용방안
helical pile 형상별 공학적 거동 파악을 통한 시공법 제시	-국외사례 연구를 참고한 helical pile의 거동특성에 대한 분석이 아닌 다양한 국내 현장 시험시공을 통한 helical pile의 실험적 거동특성 파악 -수직도 관리를 고려한 시공 -지반 동공 발생에 대한 원인 분석 -지반 보강그라우팅 공법 적용에 따른 현상 분석 및 대책공법의 제시	-학술발표 1건 -논문발표 2건 -특허출원 4건 -특허등록 1건	-많은 시공사례 도출에 따른 지속적인 개량연구 -연구결과를 학회지나 논문집에 발표하여 helical pile의 우수성을 적극 홍보
현장재하시험 결과와 수치해석을 통한 예측 설계지지력 제시	-시험시공과 수치해석 결과를 바탕으로 Individual bearing method와 Cylindrical shear method의 상한값과 하한값 결정 및 새로운 설계 예측 지지력 제시 -Torque correlation method를 이용한 지지력 예측법 개선 -helical pile 지지력 발현 메커니즘 규명	-논문발표 1건 -학술발표 1건	-연구결과를 학회지나 논문집에 발표하여 helical pile의 우수성을 적극 홍보
지지력 확인시스템이 내장된 표준 규격 helical pile의 제작 및 평가	-정재하시험의 단점을 보완하고자, helical pile에 양방향 재하시험법 접목 -재하장치가 내장된 표준 규격의 helical pile을 시추장비를 이용해 계획심도까지 관입 후 양방향재하시험(지상에 반력장치 필요 없음) 수행 가능 -지반조사나 설계단계에서의 신속히 재하시험이 가능하여 helical pile 설계의 최적화를 통해 시공비의 약 30% 이상 절감	-시공장비 개발 1건 -논문발표 1건 (심사중) -특허출원 1건 -특허등록 1건	-지반조사 및 설계단계부터 간단한 방법으로 재하시험을 수행할 수 있으므로 정확한 지지력 예측과 이에 따른 최적 helical pile 설계 가능 -과다시공 방지 및 시공비 절감 효과
지반보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능평가	-시공완료 후 패커를 장착하여 그라우팅을 helical pile 두부에 주입 시 주입압력 7.0 kg/cm^2 정도에서 지지력의 증가는 30%이상으로 확인됨 -그라우팅 보강공법 적용시 풍화암층까지의 시공이 불필요하므로 이에 따른 시공심도는 최소 40%이상 감소가능	-특허출원 1건 -시공장비 개발 1건	-실제 현장적용 시 helical pile 축 주변에 일정한 두께로 그라우트재를 주입하기 위해 높은 압력의 주입압력장치 제작 -helical pile 시공과 동시에 그라우팅을 주입할 수 있는 장치 제품화
helical pile 시공 측정 장비 개발	-지지력에 따른 출력토크의 체계적인 정립 -소형장비로 고 토크 출력이 가능한 유압장치 개발 -토크측정기 부착형 유압모터 개발 -수직도 유지가 가능한 관입장치 개발 -자체 개발한 유압모터를 일반 백호우에 장착하여 동력을 활용할 수 있도록 시스템 간 편화	-시공관리 시스템 1건 -학술발표 1건	-자체 개발된 helical pile 관입장치와 고 토크 측정기를 활용하여 현장시험시공 수행 -helical pile의 지지력과 최종 관입 토크와의 관계 규명
설계 및 시공관리를 위한 운영시스템 개발	-선진 최적화 기법인 harmony search algorithm기법을 이용한 재료비 최적화 -과다시공으로 인한 재료비 낭비 방지	-소프트웨어 등록 1건 -논문발표 1건 (심사중)	-향후 재료비 뿐 아니라 시공비(인건비, 작업 시간, 부대경비 등)까지 최적화 할 수 있는 helical pile 설계 전용 알고리즘 개발

제 4장. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1절. 연차별 연구개발 목표달성도

1. 연구개발 추진체계

- 연구 조직 구성의 단순화로 연구의 방향 설정 및 추진에 있어 효율성 증대
- 연구 성과에 대한 이해관계인의 억제 등의 원칙에 따라 연구조직의 구성

2. 연차별 목표달성도

연차	연구내용	세부추진 계획 및 방법	목표달성도(%)	해당기관
1차년도	■ 2차년도 시공시방서 작성을 위한 문헌조사 ■ 지지력 특성 별 helical pile 파일 구조체 연구	■ 국외의 시공시방서 및 시공 관리 지침 등 시공시방서 작성을 위한 기존의 자료조사	100	고려대학교 삼보지반
		■ 문헌 및 시공 사례 등을 분석하여 지지력별 helical pile의 규격 및 공학적 구성요소 및 수치의 결정	100	고려대학교 삼보지반
		■ 지반조건별 다양한 수치해석 모델의 결정	100	고려대학교 삼보지반
		■ 수치해석 결과에 따라 helical pile의 1단계시험시공 부지 결정 및 지반조사(3회 실시)	100	삼보지반
		■ 지반조건을 고려한 helical pile 설계 및 투입자재 재료시험(인장, 압축, 뒤틀림)을 실시	100	고려대학교
		■ helical pile시험 시공(2회, 6개시공예정). 나선형원판의 형상 및 크기, 두께 등을 변화시켜 6개 파일을 이용 12회 시공	100	고려대학교
		■ 시공된 6개 파일에 대해 두부압축 정재하 12회 실시	100	삼보지반
		■ 시공자료 및 재하 시험결과 등을 분석하여 helical pile 구조체등 연구 1단계 결과제시	100	고려대학교
2차년도	■ 지반조건 및 설계 지지력크기에 따른 helical pile의 거동 특성 연구	■ 1차년도 연구결과를 이용하여 지반조건 및 설계 하중의 크기 등을 고려하여 시험시공 계획 수립	100	고려대학교 삼보지반
		■ 시험시공 실시 -시험시공 부지는 3개 현장 실시 -지지층의 출현이 10m이내, 10~15m, 15m이상 등으로 구분 실시 -중심축의 직경별 실시	100	삼보지반

		-총 시험시공수량=36개 -지반조사 = 6개소		
		■ 정재하 시험 실시 -시험수량 = 36개	100	삼보지반
		■ 결과 분석	100	삼보지반
	■ 지지력 확인 시스템이 내장된 표준 규격 helical pile의 제작 및 성능 평가	■ helical pile 설계용 파일 규격 결정	100	고려대학교
		■ 유압 장치의 제작	100	삼보지반
		■ 성능확인 시험실시 -2개소 실시	100	삼보지반
	■ 지반 보강이 가능한 helical pile 시공법 개발 및 성능 평가	■ 나선형원판 선단 그라우팅 장치개발	100	고려대학교
		■ 그라우팅 장비제작	100	고려대
		■ 시험시공 -4개소 실시 -지반조사 2개소	100	고려대학교 삼보지반
		■ 재하 시험 -4개소	100	삼보지반
	■ helical pile 시공 장비 개발	■ 국내외 시공 장비 분석	100	고려대학교
		■ helical pile 시공에 적합한 장비의 설계 및 제작	100	삼보지반
		■ 2차년도 시험시공에 투입 및 보완	100	삼보지반
		■ helical pile 운영 시스템 개발	100	고려대학교 삼보지반
	■ 설계 및 시공 관리를 위한 운영	■ 모든 시험 결과 등을 이용하여 설계 및 시공 관리 지침 제작	100	고려대학교

제 2절. 기대성과 및 파급효과

1. SWOT분석

장점	○ 시공과 동시에 정밀 지지력시험가능 ○ 지지력시험결과를 이용하여 지지력 부족 시 지반보강형 helical pile시공에 따른 공사비 절감 ○ 지지력 증가에 의한 안전성 증대	약점	○ 지반보강이 필요시 추가공정발생에 따른 시공성 저하
기회요인	○ helical pile의 지지력 극대화, 기성말뚝의 대체 효과 ○ 마이크로파일의 대체가능 공법으로 신규시장 확대 가능	위험요인	○ 본 기술을 보유하지 못하는 업체에서는 매출 감소

2. 기술적 효과

- helical pile은 시공의 간편성, 신속성, 경제성 등을 갖추고 있는 공법으로, 그라우팅 주입과 같은 지반보강공법을 병행 실시할 경우 구조물 등의 깊은 기초 공법으로 그 활용이 방대하다. 시공 장비가 타 말뚝공법에 투입되는 장비에 비해 경량이므로 경사시공이 손쉽게 가능하여 연직 및 수평지지력을 받는 토류구조물 등에도 적용이 가능하다는 장점이 있다. 또한 신재생에너지 시설물 등의 기초파일등에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 경제적 효과

기대성과 및 파급효과	내 용
신규시장 창출 및 적용가능 현장 확대	• 마이크로파일 및 기성말뚝의 대체로 보다 경제적 시공법 제공 • 신재생에너지 시설물 기초파일 역할 • 설계지지력이 50ton미만인 구조물의 기초에는 시공성, 신속성, 적용의 다양성 등으로 인하여 신규시장 확대가 충분히 가능한 공법
참여기업 매출 증대	• 신규 공법개발로 타사와 차별화 전략이 가능하여 매출 증대
공사비 비용절감 효과	• 사전 helical pile 설계 시, 적용되는 시험말뚝을 이용한 말뚝설계의 최적화설계가 가능하여 과다말뚝사용을 억제함으로써 시공비 절감. • 타 적용가능한 공법과 비교해서 30%이상 시공비 절감 가능
시장성	• 기존 helical pile의 지지력 보완에 따른 적용대상 구조물의 확대 • 기초연구를 통해 helical pile의 가능성을 인식함에 따라 적용현장 증가 시 시장규모 확대

제 5장. 연구개발결과의 활용 및 추가연구의 필요성

제 1절. 연구결과의 활용방안

활용화 방안	세 부 내 용
현장 적용방안	• 마이크로파일을 대체 • 지반 보강형 helical pile 적용 시 지지력 증가효과에 따른 PHC, 강관말뚝을 대체 가능 • 설계단계부터 간단한 방법으로 재하시험이 가능하기 때문에 정확한 지지력 설계가 가능하여 과다시공을 방지하여 공사비의 절감 • 시공중 토크를 측정하기 때문에 시공과 동시에 지지력 확인이 가능하여 시공된 말뚝에 대하여 전수 시험이 가능
미래원천기술 확보	• helical pile의 설계, 시공, 품질관리를 일괄적으로 처리하는 시스템 기술 확보 • helical pile 지지력의 지지력 증가 기술 확보 • 재하시험이 가능한 설계용 helical pile을 활용한 최적화 설계기술 확보
신 산업창출	• 지반보강용 helical pile 적용 시 기존 공법 대비 말뚝시공에 사용되는 강재 또는 콘크리트 사용량의 감소가 가능한 친환경 공법 • 신규 공법 개발에 따른 기초공사 시장의 확대
사업화	• 본 연구결과를 통하여 helical pile의 경제성, 시공성, 적용 가능한 지반 및 구조물의 다양성 등을 입증하여 충분한 시장확대 가능성 입증
기술이전	• 참여기업을 중심으로 기술이전 • 연구결과를 학회지에 발표하여 개발기술을 폭넓게 기술 이전
후속연구	• 다양한 형태의 helical pile 설계 및 시공기술 지속적 개발 • 많은 시공사례 도출에 따른 지속적으로 개량연구 필요 • 사전 지지력예측기술의 개발

제 2절. 관련 산업과의 연계·협력 및 추가연구의 필요성

1. 새로운 분야가 접목 된 연구 실행

지반분야에서도 타 분야와의 융합을 통하여 신개념을 창출하는 하이브리드 기술 개발이 필수적인 사항이다. 본 개발기술은 기계공학(유압기술)과 지반공학이 접목되어 새롭게 창

출 된 기술이다.

2. 국가 상위계획과의 부합성

본 개발기술은 신성장동력 중점과제 중 녹색기술 6개분야의 첨단그린도시 개발에 관련된 기술로써, 첨단그린도시 개발사업에는 크게 신재생에너지적용을 통한 에너지절약기술, 일상 생활에서의 IT기술 활용 및 쾌적한 주거환경관련기술, 저탄소 배출관련기술 등이 포함되어 있다. 본 개발기술은 말뚝시공에 소요되는 철재 및 콘크리트와 같은 사용재료를 크게 절감시켜 탄소배출의 현격한 감소가 기대된다. 또한 현장제작말뚝 시공법 중 매입말뚝 시공 중에 발생하는 소음진동문제를 줄임으로써 시공과정의 민원문제 등을 감소시켜 쾌적한 주거환경에 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 기존산업의 고부가가치화

본 연구는 기존의 공법을 완전히 탈피하여 새로운 시공기법을 제시하는 것이 아닌, 기존의 공법을 그대로 유지하며 특정 기술을 삽입하는 연구이다. 본 연구를 통하여 말뚝의 지지력이 비약적으로 향상될 수 있으므로 기존산업의 고부가가치화가 기대된다. 말뚝의 지지력 향상을 통해 말뚝의 관입깊이가 감소되므로 전체 시공기간을 줄일 수 있음은 물론, 기존의 말뚝과 같이 항타 과정이 필요 없으므로 소음문제를 해결하여 민원발생을 줄이며, 국민 복지에 기여할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서 제안하는 기술은 helical pile 시공이 활성화됨에 따라 helical pile 제조업체의 매출증대에 크게 기여 할 것으로 기대된다. 또한 외국에서 보는바와 같이 helical pile은 신재생에너지(태양열, 태양광, 풍력 등의 시설물의 기초파일로 많이 사용) 및 통신산업(광고, 통신, 전광판, 첩탐등)분야에 많이 적용되고 있어 관련 상호 산업발전에 상생효과를 줄 것으로 판단된다.

제 6장. 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 국제규격기준(2009 International Building Code)에 맞는 헬리컬 파일의 시공

Ram jack foundation solutions에서 제시한 2009년도 International Building Code를 준수한 helical pile의 설계기준에 대한 발표자료.

가. 설계세부사항.

기초설계에 있어서 허용가능한 응력범위

표 5.1.1.1

재료의 유형과 상태	허용응력
압축상태의 구조를 이루는 철	$0.6F_y \leq 0.5F_u$
인장상태의 구조를 이루는 철	$0.6F_y \leq 0.5F_u$

Ram jack 의 shaft 는 ASTM-A500 Grade C 철로 제작되며, 최소 항복하중은 65ksi 이며 최소 인장하중은 80ksi 로 둔다. 또한 plate 는 ASTM-A36으로 제작이 되며 최소항복하중은 50ksi 이다.

나. 주어진 축하중에 대한 허용 설계하중

$$P_a = 0.5P_u$$

표 5.1.2.1. Allowable axial design load $P_a = 0.5P_u$

Pu value
1 Ultimate bearing capacity using Individual Bearing Method
2 Ultimate capacity using torque correlations Method
3 Ultimate capacity determined from load test
4 Ultimate axial capacity of pile shaft
5 Ultimate capacity of pile shaft couplings
6 Sum of the ultimate axial capacity of helical bearing plates affixed to pile

설계 하중은 표 1에서 명시된 6종류의 극한 하중 중 가장 작은 값에 0.5를 곱하여 적용한다.

다. Individual bearing method에서 규명한 helix plate 와 shaft 의 크기

표 5.1.3.1. Individual bearing method에서 규명한 helix plate 와 shaft 의 크기

Plate Diameter (cm)	Shaft outside diameter (cm)	Shaft inside diameter (cm)	Shaft Thickness (cm)	Shaft Area (cm ²)
20.32	3.06	5.07	0.97	8.41
25.4	7.3	6.20	1.10	11.69
30.48	8.89	7.60	1.29	16.71
35.56	11.43	9.20	2.23	36.06
40.64				

2009년도 International Building Code 에 따른 helix plate는 5종류, shaft 는 4종류이며, shaft 직경의 크기에 따라 두께도 달라진다.

라. Torque correlation method

$$P_u = K_t T$$

여기서 P_u 는 helical pile의 극한 지지력이며, K_t 는 Torque correlation factor, T 는 소요 Torque [ft-lb (m-KN)] 에 해당한다. 이 방법은 Individual bearing method 와 다르게 원판의 개수가 지지력에 영향을 주지 않음.

표 5.1.4.1. 중심축 직경에 따른 지지력-토크 계수 결정

shaft 직경	2 3/8"	2 7/8"	3 1/2"	4 1/2"
K_t (default)	10	9	8	7
T (ft-lb)	4,000	7,000	12,000	21,000
P_u (lb)	40,000	63,000	96,000	147,000

2. Magnum 사 helical pile products

Magnum 사의 헬리컬 파일 형상별 지지력 및 토크계수에 대한 정리 및 두부보강에 따른 지지력 증가율 분석

3. 국외사례분석을 통한 helical pile의 제원규정

사례분석을 통해 국외 4개사에서 통상 적용되는 설계하중별 파일의 제원은 아래와 같다.

I) Ram Jack Foundation 사

Weight(lb/ft)	4.430	7.00	8.67	19.0
---------------	-------	------	------	------

Outside Diameter(in)	2.375	2.875	3.500	4.500
Inside Diameter(in)	1.995	2.441	2.992	3.624
Wall Thickness, t(in)	0.190	0.217	0.254	0.438
Cross-Sectional Area, A(in ²)	1.304	1.812	2.590	5.589
Yield Strength, F _y (ksi)	65.0	65.0	65.0	65.0
Tensile Strength, F _u (ksi)	80.0	80.0	80.0	80.0
Moment of inertia, I(in ⁴)	0.784	1.611	3.432	11.66
Elastic Section Modulus, S(in ³)	0.660	1.121	1.961	5.183
Plastic Section Modulus, Z(in ³)	0.909	1.536	2.682	7.255
Radius of Gyration, r(in)	0.775	0.923	1.151	1.445
Torsional Constant, J(in ⁴)	1.568	3.222	6.865	23.320
Torsional Yield Moment(ft-lb)	4,130	7,800	12,100	23,000
Torsional Plastic Moment(ft-lb)	4,470	8,500	13,000	25,200
Default Torque Correlation Factor, K _t (ft ⁻¹)	10	9	8	7
Ram Jack Torque Rating(ft-lb)	4,000	7,000	12,000	21,000
극관성 모우멘트(cm ⁴)	82.5	174.6	353.7	917.8
전단응력(kg/cm ²)	2086.7	2254.0	2102.0	2107.0
허용축력(ton)	21	33	36	53
비고	1ksi=6.89MPa			

Ram Jack's 사의 중심축은 ASTM-A500 Grade C 중공형 강관을 사용하며, 최소항복강도는 65ksi(447Mpa), 최소인장강도는 80ksi(551Mpa)를 사용한다. 또한 모든 나선형원판은 ASTM-A36강판규정에 따라 생산된 철판으로 최소항복강도가 50KSI(344Mpa)를 사용하여 제작한다.

II) Magnum사의 설계하중별 헬리컬파일제원

System Ratings & Specifications										
Shaft Specifications					Structural Capacity (Tension & Comp)		Maximum Torque (t-m)	Capacity to Torque Ratio (m-1)	Geotechnical Capacity (Tension & Comp)	
					Ultimate (tons)	Allowable (tons)			Ultimate (tons)	Allowable (tons)
0.508	7.315	8.5209	3234.120	4359.031	30	15	0.678	29.52	23	11
0.330	7.620	5.979	4569.952	5624.556	22	11	0.542	26.24	16	8
0.330	7.620	5.979	4569.952	5624.556	22	11	0.813	26.24	24	12
0.635	7.620	11.06	4569.952	5624.556	55	28	1.085	26.24	32	16
0.635	7.620	11.06	4569.952	5624.556	55	28	1.695	26.24	50	25
0.533	8.890	11.06	4569.952	5624.556	45	23	1.356	22.96	35	18
0.533	8.890	11.06	4569.952	5624.556	45	23	1.763	22.96	46	23
0.635	11.430	17.04	4569.952	5624.556	96	48	2.983	18.696	63	31
0.635	11.430	17.04	4569.952	5624.556	96	48	3.661	18.696	77	38
0.787	11.430	20.78	4569.952	5624.556	122	61	3.796	18.696	80	40
0.787	11.430	20.78	4569.952	5624.556	122	61	4.339	18.696	91	46
0.762	13.970	25.0	8788.369	9491.438	273	137	7.186	15.416	125	62
0.914	13.970	29.60	7030.695	10546.043	270	135	11.253	15.416	195	98
0.635	14.529	21.80	4569.952	5624.556	128	64	5.423	15.088	92	46
0.635	14.529	21.80	4569.952	5624.556	128	64	6.101	15.088	104	52
0.940	14.529	31.70	4569.952	5624.556	199	100	7.321	15.088	124	62
0.940	14.529	31.70	4569.952	5624.556	199	100	8.813	15.088	150	75
1.168	14.529	38.72	4569.952	5624.556	250	125	8.948	15.088	152	76
1.168	14.529	38.72	4569.952	5624.556	250	125	10.847	15.088	184	92
0.813	21.920	42.6	2952.892	4077.803	175	88	11.524	10.168	132	66
- R=볼트홀보강된 중심축 - Structural Capacity : 단단한 지반에 설치된 헬리컬파일의 중심축과 커플링이 포함된 좌굴강도 - Geotechnical Capacity : 균질한 지반에 최대토크로 시공된 헬리컬파일의 인발 및 압축시 지반의 지지력 - 볼트홀이 보강된 중심축의 GC는 평균 30% 증가하며 최대 SC에 근접										

가) Magnum사 헬리컬파일의 제질

구 분	제 질
중 심 축	- ASTM A 513 - 항복강도 : 65 ksi
볼 트	SAE Grade 5 / ASTM A 325
나선형원판	ASTM A36

나) 나선형원판의 제작기준

- ① 최상부 나선형원판의 최대구경은 중심축직경의 3.5~4.2배를 사용한다.
- ② 복수의 나선형원판이 사용될 때 최상단부에서 하단부로 갈수록 50mm씩 직경을 줄여 용접한다.
- ③ 나선형 원판의 pitch는 76mm~100mm범위에 있음.

원 판 직 경 (mm)	중심 축 (mm)		원 판 두께 & 직 경 (mm)		원 판 이 지 지 할 수 있 는 최 대 허 용 하 중 (ton)
	외 경	두께	두께	직 경	
203	60.3	4.826	9.52	200	21.4
254				250	19.6
305				300	16.9
203	73.0	5.51	9.52	200	33.0
254				250	29.0
305				300	21.2
305			12.7	300	31.7
356				350	26.3
406				400	23.6
203	88.9	6.45	9.52	180	29.0
254				240	23.0
305				290	20.0
305			12.7	290	36.2
356				350	30.1
406				400	29.0
254	114.3	11.12	12.7	230	52.6
305				280	42.5
356				340	37.4
406				390	34.0
참 고	• 나선형 원판이 클수록 연직재하 최대 허용하중은 원판의 굽힘 모우멘트의 증가로 작아짐 • 사용토크는 실내에서 측정된 항복비틀림 모우멘트의 83% 적용				

III) chance 사 설계하중별 helical pile의 제원

모델	중심축의 제원						
	외경 (mm)	두께 (mm)	항복강도 (kg/cm^2)	단면적 (cm^2)	극한지지력 (ton)	항복토크 ($t \cdot m$)	kg/m
2875.165	73.0	4.2	4570.0	9.0	-	-	7.12
2875.203	73.0	5.2	4570.0	11.0	25.0	0.75	8.70
2875.276	73.0	7.0	4570.0	14.8	36.0	1.105	11.4
3500.300	89.0	7.6	4570.0	19.5	46.0	1.80	15.3
4500.337	114.0	8.6	4570.0	28.4	69.0	3.2	22.3
6625.280	168.0	7.0	4570.0	36.0	100.0	5.53	27.8
8625.250	219.0	6.0	4570.0	42.5	150.0	8.3	31.5

IV) MacLean Dixie Hfs사

모델 #	중심축의 제원						
	외경 (mm)	두께 (mm)	항복강도 (Mpa)	단면적 (cm^2)	극한지지력 (ton)	항복토크 ($t \cdot m$)	kg/m
	73.0	5.10	343	10.88	27.0	1.036	8.54
	73.0	7.01	343	14.51	32.4	1.244	11.41
	88.9	5.5	343	14.38	36.0	1.576	11.31
	88.9	7.62	343	19.43	47.3	2.073	15.27
	114.3	6.02	343	19.80	54.0	2.765	16.07
	114.3	8.56	343	28.4	70.2	3.59	22.32
	219.0	4.80	343	41.90	90.0	6.152	24.99

V) 각 회사 별 강재사용지수 비교분석

Magnum사				Ram Jack사				chance사				Mac Lean사			
Q_u	σ_y	A	ID	Q_u	σ_y	A	ID	Q_u	σ_y	A	ID	Q_u	σ_y	A	ID
				18	4570	8.41	2.135	25	4570	11.0	2.01	27	3440	10.88	1.38
	4570	7.55	1.437	28	4570	11.69	1.90	36	4570	14.8	1.879	33	3440	14.51	1.513
	4570	13.92	1.272	44	4570	16.7	1.734	46	4570	19.5	1.937	36	3440	14.38	1.37
	4570	13.92	1.390	67	4570	36.0	2.455	69	4570	28.4	1.881	47	3440	19.43	1.42
	4570	21.52	1.277					100	4570	36.0	1.645	54	3440	19.8	1.241
	4570	26.29	1.320					150	4570	42.5	1.295	70.2	3440	28.4	1.39
	4570	27.7	1.217									90	3440	41.9	1.602
	4570	40.1	1.222												
	4570	49.0	1.217												
평균	4570		1.294				2.056				1.775				1.42
참 고		Q_u=극한지지력 (kg/cm^2), (극한지지력은 GC에 따라 결정됨) σ_y= 최소항복강도 (kg/cm^2) - A = 중심축의 단면적 (cm^2) - ID = 강재사용지수													

상기표에 보는바와 같이 각 사별 강재사용지수의 평균지수는 1.294~2.056 범위의 다양한 분포를 하고 있다.

제 7장. 참고문헌

1. Bobbitt, B. E., S. P. Clemence. (1987) "Helical Anchors: Applications and Design Criteria." Proceedings of the 9th Southwest Asian Geotechnical Conference, Bangkok, Thailand, Vol. 2, pp. 105 - 120.
2. Bradka, T.D. (1997) Vertical Capacity of Helical Screw Anchor Piles, M.S. report, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Alberta.
3. Carville, C. A. and R. W. Walton. (1994) "Design Guidelines for Screw Anchors." In Proceedings of the International Conference on Design and Construction of Deep Foundations, Orlando, FL, Vol. 2, pp. 646 - 655.
4. Chapel, T. A. (1998) "Field Investigation of Helical and Concrete Piers in Expansive Soils." Masters thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
5. Cerato, A. B. and R. Victor. (2008) "Effects of Helical Anchor Geometry on Long-Term Performance for Small Wind Tower Foundations Subject to Dynamic Loads." Journal of Deep Foundations Institute, Vol 2, pp 30 - 41.
6. Chapel, T. A. (1998) "Field Investigation of Helical and Concrete Piers in Expansive Soils." Masters thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
7. Chapel, T. A. (1998) "Field Investigation of Helical and Concrete Piers in Expansive Soils." Masters thesis, Colorado State University, Fort Collins, CO.
8. Clemence, S. P. (1985) "Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil." In Proceedings of a Session Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of ASCE, Detroit, MI.
9. Clemence, S. P., L. K. Crouch, and R. W. Stephenson. (1994) "Uplift Capacity of Helical Anchors in Soils." Proceedings of the 2nd Geotechnical Engineering Conference, Cairo, Egypt, Vol. 1, pp. 332 - 343.
10. Clemence, S. P. and Y. Li. (2008) "Review of Helical Foundations over Twenty Years." Presented at the Proceedings of Helical Foundations and Tie-Backs Specialty Seminar, Deep Foundation Institute, Los Angeles, CA.
11. Deardorff, D. (2007) "Torque Correlation Factors for Round Shaft Helical Piles". In Proceedings of the 32nd Annual Conference of the Deep Foundation Institute, Colorado Springs, CO, pp.439-450.
12. Darin Willis, P.E., (2010). How to Design Helical Piles per the 2009 International Building Code., Availabel at : <http://www.foundationrepairnetwork.com/design-helical-piles.pdf> (Accessed: April 02, 2014)
13. O'Ghaly, A. M., Hanna, A., Ranjan, G. and Hanna, M. 1991. "Helical Anchors in Dry and Submerged Sand Subjected to Surcharge." Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 117, No. 10, pp. 1463 - 1470.
14. Ghaly, A.M. and Hanna, A.M. (1992), "Ultimate pullout resistance of single vertical anchors." J. of Canadian Geotechnical, Vol. 31, No.5, pp.661-672
15. Ghaly, A.M. and S.P. Clemence. (1998). "Pullout Performance of Inclined Helical Screw Anchors in Sand." J. of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 124, No.7 , pp. 617-627
16. Geem, Z. W., Kim, J. H. and Loganathan. G. V.(2001). "A new heuristic optimization algorithm: harmony search." J. of Simulation, Vol. 76, No.2, pp.60-68
17. O'Ha, T. S., Moon, H. R., Moon, H. M. (2013) "An analysis of correlation between predicted and measured bearing capacity in Rotary(Helical) pile method", Korean Geotechnical Society Conference.

18. Hoyt, R.M. and S.P. Clemence. (1989). "Uplift Capacity of Helical Anchors in Soil." Proc. of the 12th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, Vol. 2, pp. 1019-1022
19. Kishida, H., Tsubakihara, Y., and Ogura, T. (1992), "Pile Loading Tests at Osaka Amenity Park Project", preprint by Mitsubishi Co..
20. Livneh, B., Naggar, M. H. (2008) "Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, Issue 8, pp.1142-1155.
21. Lutenecker, A. J. (2003) "Helical Screw Piles and Screw Anchors—An Historical Prospective and Introduction." In Proceedings of the Helical Foundations and Tie-Backs Seminar, Deep Foundation Institute, Cincinnati, OH.
22. Lutenecker, A. J., B. L. Smith, and M. G. Kabir. (1988) "Use of In Situ Tests to Predict Uplift Performance of Multi-Helix Anchors." Special Topics in Foundations, ASCE, pp. 93 - 110.
23. Lee, J. W., Lee, D. S., Na, K. U., Choi, H. S. (2014), "Effect of configuration of shaft and helix plate on bearing capacity of moderate-size helical pile : I. Test-bed construction and field loading test", Journal of the Korean Geosynthetic Society, Vol. 13, No. 2, pp. 31~39
24. Lee, K. S. and Geem, Z. W. (2004). "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimization : harmony search theory and practice." J. of Computer methods in applied mechanics and engineering, Vol. 194, No. 36, pp. 3902-3933
25. Lee, S. K. and Ko, K. E. and Sim, K. B. (2011). "Study on Improvement of Convergence in Harmony Search Algorithm." J. of Korea intelligent information system society, Vol. 21, No.1, pp.31-34
26. Livneh, B., Naggar, M. H. (2008), "Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, Issue 8, pp.1142-1155.
27. Merifield, R. S. (2011) "Ultimate Uplift Capacity of Multiplate Helical Type Anchors in Clay", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE, July 2011, Vol. 137, no. 7, pp 704-716.
28. Merifield, R. S., Smith, C. C. (2010) "The ultimate uplift capacity of multi-plate strip anchors in undrained clay", Computers and Geotechnics 37 pp.504 - 514.
29. Mooney, J. S., Adamczak, S. Jr., and Clemence, S. P. (1985). "Uplift Capacity of Helix Anchors in Clay and Silt." Proc. of Conf, on Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, ASCE, Detroit, Michigan, pp. 48-72.
30. Meyerhof, G. G. (1951). "The Ultimate Bearing Capacity of Foundations." J. of Geotechnique, Vol. 2, No. 4, pp. 301-332.
31. Mitsch, M. P. and S. P. Clemence. (1985). "The Uplift Capacity of Helix Anchors in Sand." Proc. of Conf, on Uplift Behavior of Anchor Foundations in Soil, ASCE, Detroit, Michigan, pp. 26-47.
32. Magnum Piering, Inc. (2004) "Magnum helix foundation technical reference manual".
33. Ogura, T., Sumi, M., Kishida, H., and Yoshifuka, T. (1996), "Application of the Pile Toe Test to Cast-in-place and Precast Piles", translated by Mandan B. Karkee, Foundation Drilling Magazine, ADSC, December 1996/January 1997, pp.23-28.
34. Osterberg, J. O. (1998), "The Osterberg load test method for bored and driven piles - The first ten years", Presented at 7th International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, Deep Foundations Institute, Vienna, Austria, June 1998.
35. Pack, J.S. (2000) "Design of Helical Piles for Heavily Loaded Structures." In New

- Technological and Design Developments in Deep Foundations, Reston, VA: ASCE Press, pp. 353 - 367.
36. Parry, R. H. G. (1977) "Estimating Bearing Capacity of Sand from SPT Values." *Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, No. GT 9, pp. 1014 - 1019.
 37. Perko, H. A. and J. B. Boulden. (2008) "Lateral Earth Pressure on Lagging in Soldier Pile Wall Systems." *DFI Journal*, Vol. 2 (November), pp. 52 - 60.
 38. Perko, H. A., and R. A. Doner.(in press). "Full-Displacement, Augered Friction Piles and a Method for Estimating Capacity." *Proceedings of the 34th Annual Conference of the Deep Foundation Institute*, Kansas City, MO.
 39. Perko, H. A. and S. Rupiper. (2002) *Helical Pile Engineering Handbook*. Manufacturer technical Literature. Larkspur, CO: Precision Pier USA.
 40. Puri, V.K., R.W. Stephenson, E. Dziedzic, and L. Goen. (1984) "Helical Anchor Piles under Lateral Loading." *Laterally Loaded Deep Foundations: Analysis and Performance*, ASTM STP 835, Langer, Mosley, and Thompson, Eds. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials, pp. 194 - 213
 41. Perko, H. A. (2009). "Helical Piles : A Practical Guide to Design and Installation.", John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey
 42. Schmidt, R. (2004) "Screw Piles: Uses and Considerations." *Structure Magazine* (June), pp. 25 - 31..
 43. Slemons, P. E. (2008) "A Rational Approach to Calculating Torque to Capacity in Cohesive Soils." *Proceedings of the Helical Foundations and Tie-Backs Specialty Seminar*. Deep Foundation Institute, Los Angeles, CA, Hawthorne, NJ: Deep Foundation Institute.
 44. Tappenden, K.M. 2004. "Predicting the Axial Capacity of Screw Piles Installed in Western Canadian Soils." Master's thesis, University of Alberta, Edmonton, Alberta.
 45. Terzaghi, K. (1943) *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley and Sons.
 46. Terzaghi, K. and R. B. Peck. (1967) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. New York: John Wiley and Sons.
 47. Thompson, R.W., W. Rethamel, and H.A. Perko. (2006) "Comparison of Constant Volume and Oedometer Swell Pressures." In *Proceedings of Unsat 2006*, American Society of Civil Engineers, Phoenix, AZ.
 48. Yoo, C. S. (2012) "Effect of Screw Geometries on Pull-out Characteristics of Screw Anchor Piles Using Reduced Scale Model Tests", *Korean Geotechnical Society Vol. 28 No.1*, pp.5-15.
 49. Weech, C. N. (1996) "Installation and load testing of helical piles in a sensitive fine-grained soil", *The University of British Columbia*.
 50. Watson, T. B. "Fundamentals of helical anchors/piles", pp.5-7.
 51. Zhang, D.J.Y. (1999) "Predicting Capacity of Helical Screw Piles in Alberta Soils." Master's thesis, University of Alberta, Edmonton.
 52. 이재삼, 김홍재, 박홍재, 김대권 (2008), "신공법 오스터버그 셀 시험 적용 및 매스콘크리트 시공관리", *콘크리트학회지*, 제 20권, 2호, pp. 54~60
 53. 이충숙, 이민희, 김상일, 최용규 (2007), "양방향 고유압 말뚝재하시험(BDH PLT)의 개발 및 적용성에 관한 연구, *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 6호, pp. 23~36
 54. 정창규 (2004), *선단유압재하시험법의 현장적용성에 관한 연구*, 경성대학교 박사학위 논문.
 55. 권오성, 최용규, 권오균, 김명모 (2006), "양방향 재하시험을 이용한 말뚝의 하중-변위곡선 추정방법", *한국지반공학회논문집*, 제 22권, 4호, pp. 11~19

주 의

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