

동재하시험결과 분석을 통한 송도지역 590MPa급 고강도 강관말뚝의 항타관입성 및 지지력 특성 분석

Driveability and Bearing Capacity Characteristics Analysis of 590 MPa Grade High Strength Steel Pipe Pile at Songdo Area through Dynamic Load Tests

나 승 민¹ La, Seung-Min

홍 봉 균² Hong, Bong-Kyun

유 한 규³ Yoo, Han-Kyu

Abstract

Domestic usage of high strength steel for pile has been limited to steel with yield strength (YS) of 490 MPa. However, design and construction cases abroad show beneficial usage of steel pipe with YS ranging in 500~700 MPa. In this study, YS 590 MPa steel pipe has been tested for driven pile foundation in Songdo area. Pile dynamic analysis (PDA) was carried out for 18 piles of which 16 piles have been reviewed for comparison of the PDA test results with those of GRLWeap analysis using SPT N value. Back analysis of PDA analysis was also carried out to narrow the deviation of standard SPT N value used in GRLWeap analysis. A regression equation is suggested for the shaft and toe resistance according to SPT N values for future GRLWeap analysis that can be used in the designing stage at Songdo area.

요 지

강관말뚝의 경쟁력 향상을 위해 개발되어 현장 적용되고 있는 590MPa급 고강도 강관말뚝의 항타관입성과 지지력 특성을 분석하기 위하여 인천 송도지역에 총 18본의 다양한 지름/두께 및 강도별로 강관말뚝을 시공하고 이에 대한 동재하시험을 수행하였다. 항타관입성은 일반강도와 고강도간의 타격횟수, 관입깊이, 건전도 등을 확인하여 비교하였으며, 파일 지지력은 동재하시험을 수행하고 대표 말뚝에 대해서는 정재하시험을 수행하여 동재하시험의 적절성을 평가하였다. 또한 동재하시험결과를 GRLWeap 해석결과와 비교하고 입력변수에 대한 역해석을 수행하여 향후 고강도 강관말뚝을 송도지역에 시공할 때 보다 적절한 항타장비 선정 및 지지력 예측이 가능하도록 표준관입시험의 N값을 이용한 지반반력계수에 대한 보정식을 제안하였다.

Keywords : Driveability, Dynamic load test, GRLWeap, High strength steel pipe pile

1. 서 론

국내에서 가장 보편적으로 사용되는 강관말뚝용 소

재는 STK400과 STK490으로 400MPa급은 40년 이상의 국내 적용실적을 갖고 있으며 490MPa급은 90년대 중반 강관말뚝의 경쟁력 향상을 위해서 기술개발 및 도입

1 정희원, RIST 강건재연구실 책임연구원, 한양대학교 박사과정 (Member, Senior Researcher, Construction Steel Materials Research Team, RIST., Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

2 정희원, 극동건설 토목기술영업팀 사원 (Member, Civil Engrg., Business Team. Kukdong Etc.)

3 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., hankyu@hanyang.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 수행하여 국내에 보급되었다. 강관말뚝은 품질, 시공성, 강성 등의 측면에서 경쟁제품들 보다 좋은 장점들을 갖고 있으나 재료비가 고가이어서 최근에는 그 사용량이 줄어들고 있는 추세에 있다. 강관말뚝의 가격경쟁력을 향상시키기 위해서는 단순 가격경쟁력을 벗어나 기존의 설계 및 시공방법 보다 경제성을 향상시킬 수 있는 다양한 방안들이 연구개발되어야 하는 시점에 도달했다고 할 수 있을 것이다(이명환, 2004).

국내와 같이 비교적 좋은 선단지지력을 얻을 수 있는 암반층이 얇은 심도에서 나타날 경우에는 보통 재료의 강도가 설계지지력을 결정하게 되는 변수가 될 수 있는데 이런 측면에서 강관 소재의 고강도화를 적용할 경우 보다 경제적인 말뚝기초 설계가 될 수 있다. 실제 북유럽 지역에서는 이러한 이유로 500~700MPa급까지의 고강도 강관을 일반적인 강관말뚝의 소재로 사용하고 있다(Finnish National Road Administration, 2004). 국내에서의 490MPa급 이상의 고강도 강관말뚝의 적용성을 분석하기 위해서 765kV 철탑의 주기동 부재에 사용되는 STKT590을 강관말뚝의 소재로 사용하여 고강도화가 미치는 영향을 살펴보기 위해 현장재하시험을 통한 적정 설계지지력을 분석하였다.

강관 소재의 고강도화로 얻을 수 있는 장점들 중에서

항타공법에서 가장 큰 특징은 높은 항복응력으로 인하여 허용항타응력이 커져서 보다 큰 항타에너지로 말뚝을 항타할 수 있다는 점이며 이는 지반의 허용지지력을 극대화하여 말뚝 본당 설계지지력을 향상시킬 수 있어 경쟁력 향상을 도모할 수 있다(포항종합제철, 1997). 본 논문에서는 STKT590 소재를 이용하여 13톤의 해머중량으로 항타할 경우 항타관입성을 분석하고 동재하시험 및 정재하시험을 통한 적정 설계지지력을 도출하였다. 또한 GRLWeap을 이용한 역해석을 통하여 동재하시험 결과에서 얻은 값들과의 비교분석을 수행하여 향후 송도 지역에 국한하여 설계단계에서 사용할 수 있는 파동이론에 근거한 WEAP 해석용 적정 지반반력계수를 회귀분석하여 표준관입시험의 N값을 이용한 지반반력계수에 대한 보정식을 제안하였으며 이때 항타장비 용량에 따른 항타관입성 및 허용지지력의 차이를 분석하였다.

2. 고강도 강관말뚝의 재하시험결과

2.1 시험조건

2.1.1 지반조건

시험대상지인 포스코건설의 송도 A1~A2 BL 복합단

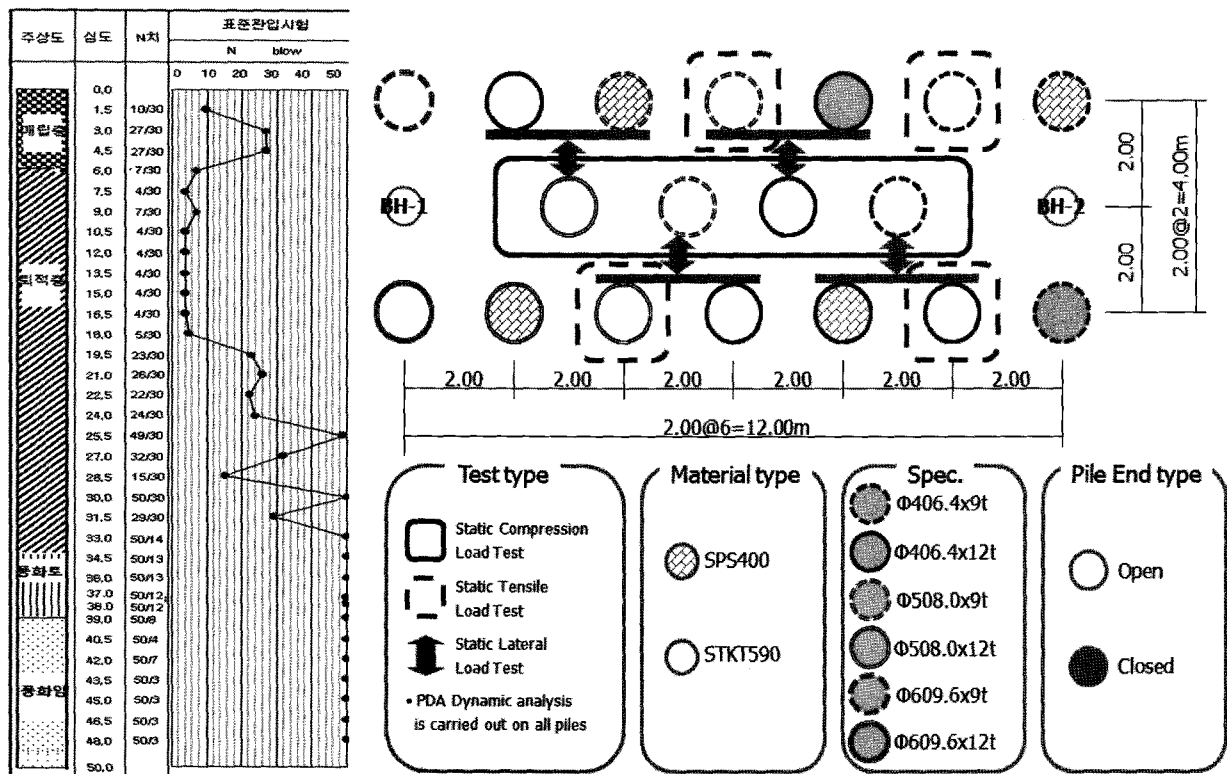


그림 1. 현장 지질주상도(BH-2) 및 재하시험 배치도

지의 지층은 상부로부터 매립층(6m), 퇴적층(28.0~28.3m), 풍화토층(4.7~5.0m), 풍화암층(12~14m이상)으로 나타났으며, 시추작업시 병행하여 실시한 표준관입시험결과 매립층은 10/30~27/30, 퇴적층은 4/30~50/30까지 다양한 N치가 조사되었다(그림 1). 풍화토층은 50/14~50/8, 풍화암층은 50/8~50/3으로 나타났다. 퇴적층의 하부에서는 N치 50을 넘는 비교적 단단한 층이 중간부에 일부 출현하기도 하므로 초기 N치 50이 나오는 깊이를 최종 지지층으로 간주하고 시공할 경우에는 향후 지지력이 부족할 수 있으므로 특히 조심할 필요가 있다.

2.1.2 시험개요

재하시험에는 총 18본의 강관말뚝이 사용되었으며 파 일 배치도 및 재하시험 계획도는 다음 그림 1과 같다. 말뚝의 종류는 소재의 강도, 지름 및 두께, 선단부 개폐 여부에 따라 다양하게 적용되었으며 본 논문에서 살펴볼 지름 406.4mm와 508.0mm에 대해서는 총 16본에 대한 실험이 진행되었다. 모든 말뚝에 대해서 말뚝 항타과정을 포함한 EOID 및 항타후 경과시간을 고려한 3번의 restrike를 포함하여 총 4차례의 동재하시험이 이루어졌다.

항타장비로는 동광중공업에서 제작한 DHK-13 유압해머(13ton)를 사용하였고, 해머의 이론적 타격에너지는 14.3t-m이고 최대 에너지 전달효율은 90%이다. 관입종료 기준은 BPM500과 허용항타응력(0.9x0.9xoy=356MPa)을 기준으로 실시하였다. 항타시 전석과 암층을 충분히 관통하기 위하여 9의 두께를 가지는 링플레이트를 부착하였다.

2.1.3 STKT590 고강도 강관 소재특성

KS 기준을 토대로 국내에서 사용되고 있는 구조용 강관의 규격은 다음 표 1과 같다. KS D 3566에서는 구조용 강관 소재의 기호를 STK로 사용하며, 철탐용 고장력강 강관(KS D 3780)에 대해서는 Tower를 의미하는 차원에서 STKT로 맨 끝의 'T(tower)' 한 글자가 추가되었다. 한편 KS F 4602에서는 강관말뚝용 소재의 기호를

SKK로 사용하나, 이는 KS D 3566에 해당되는 STK와 동일한 소재이다. STKT590은 90년대 중반부터 한국전력에서 765kV 철탐용으로 사용하였으며 기존의 STK400 및 STK490과는 저온 인성 확보를 위한 샤르피 흡수 에너지 규정과 용접성 확보를 위한 탄소 당량 규정이 추가되어 있는 것이 특징이다. 이는 기존 제품보다 엄격한 품질 관리를 요구하는 것이어서 현장용접작업이 있고 항복응력의 90% 수준까지 항타를 하는 말뚝 소재로는 보다 좋은 품질의 재료라고 할 수 있다.

2.2 동재하시험 결과

본 현장에서는 고강도 강관말뚝의 항타관입성을 분석하기 위하여 EOID 단계에서 항타 전과정에 대하여 동재하시험을 수행하여 각 지층에서의 지지력과 BPM을 측정하였다. 또한 송도지역의 set-up 효과를 분석하기 위해서는 총 3차례에 걸쳐 restrike를 수행하였다. CAPWAP 분석을 통해 얻은 동재하시험 분석결과는 다음 표 2 및 그림 2와 같으며 편리상 restrike는 최종 3차에 대해서만 표시하였다.

본 시험말뚝의 허용지지력은 PDA 측정자료중 적정 blow를 선정하여 CAPWAP 방법을 사용하여 분석하고, CAPWAP 분석결과로 구해진 하중-침하량 곡선에 Davisson 판정법을 적용하여 항복하중을 안전율 2.0을 적용하여 결정하였다(그림 2).

본 현장은 상당한 set-up 효과가 나타나는 것으로 분석되었으며, 이는 강관 또는 지름/두께와 상관없이 시간 경과 효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 동재하시험 결과의 주면마찰력을 살펴보면 시간이 지나면서 상당한 증가가 뚜렷이 나타나며 EOID 대비 restrike에서의 선단지지력은 상당히 작게 나타났으며 이는 13톤 해머의 타격에너지로써는 최종 restrike에서 극한 선단지지력을 확인할 수 없는 것을 의미한다(그림 3).

동재하시험결과를 토대로 분석한 각 말뚝의 지반 허용지지력과 재료강도간의 비교는 다음 표 3과 같다. 허

표 1. 국내 구조용 강관 KS 기준

표준번호	표준명	대상강종	적용범위
KS D 3566	일반 구조용 탄소 강관	STK290, STK400, STK490, STK500, STK540, STK590	토목, 건축, 철탐, 발판, 지주, 지면 미끄럼 방지 말뚝과 그 밖의 구조물에 사용하는 탄소강관
KS D 3780	철탐용 고장력강 강관	STKT540, STKT590	주로 송전 철탐용에 쓰이는 고장력강 강관
KS F 4602	강관 말뚝	SKK400, SKK490	토목, 건축 등의 구조물의 기초에 사용하는 용접 강관 말뚝

표 2. CAPWAP분석에 의한 동재하시험 결과 분석

규격	시험구분	종류	CAPWAP분석결과(ton)			Davisson방법에 의한 항복하중(ton)	허용 지지력 (ton)	항타 응력 (MPa)
			주면마찰력	선단지지력	전체지지력			
D406.4x9t	E OID	SKK400	47.4	124.9	172.3	157.0	187	205.5
	Restrike(19)		313.6	61.4	375.0	375.0		
	E OID	STKT590	68.6	207.0	275.6	275.6	219	290.3
	Restrike(17)		373.5	65.3	438.9	438.9		
D406.4x12t	E OID	SKK400	102.2	175.7	277.9	277.9	224	219.4
	Restrike(12)		358.7	89.6	448.4	448.4		
	E OID	STKT590	121.8	230.3	352.1	352.1	256	270
	Restrike(19)		393.6	120.1	513.7	513.7		
D508.0x9t	E OID	SKK400	94.3	163.6	275.9	257.9	213	224.6
	Restrike(16)		334.7	92.2	426.9	426.9		
	E OID	STKT590	104.5	229.7	334.2	334.2	267	278.5
	Restrike(17)		479.6	55.6	535.2	535.2		
D508.0x12t	E OID	SKK400	112.2	185.1	297.3	297.3	268	192.4
	Restrike(14)		427.5	108.5	536.0	536.0		
	E OID	STKT590	111.1	224.9	336.0	336.0	317	251.8
	Restrike(17)		550.2	84.6	634.8	634.8		

※ EOID(End Of Initial Driving): 시공중료시 또는 말뚝시공 중 항타시공관입성 분석을 시행하는 시험.
Restrike : 재항타 시험을 뜻하며 ()안은 3차 시험의 초기 항타후 경과 일수를 의미함.

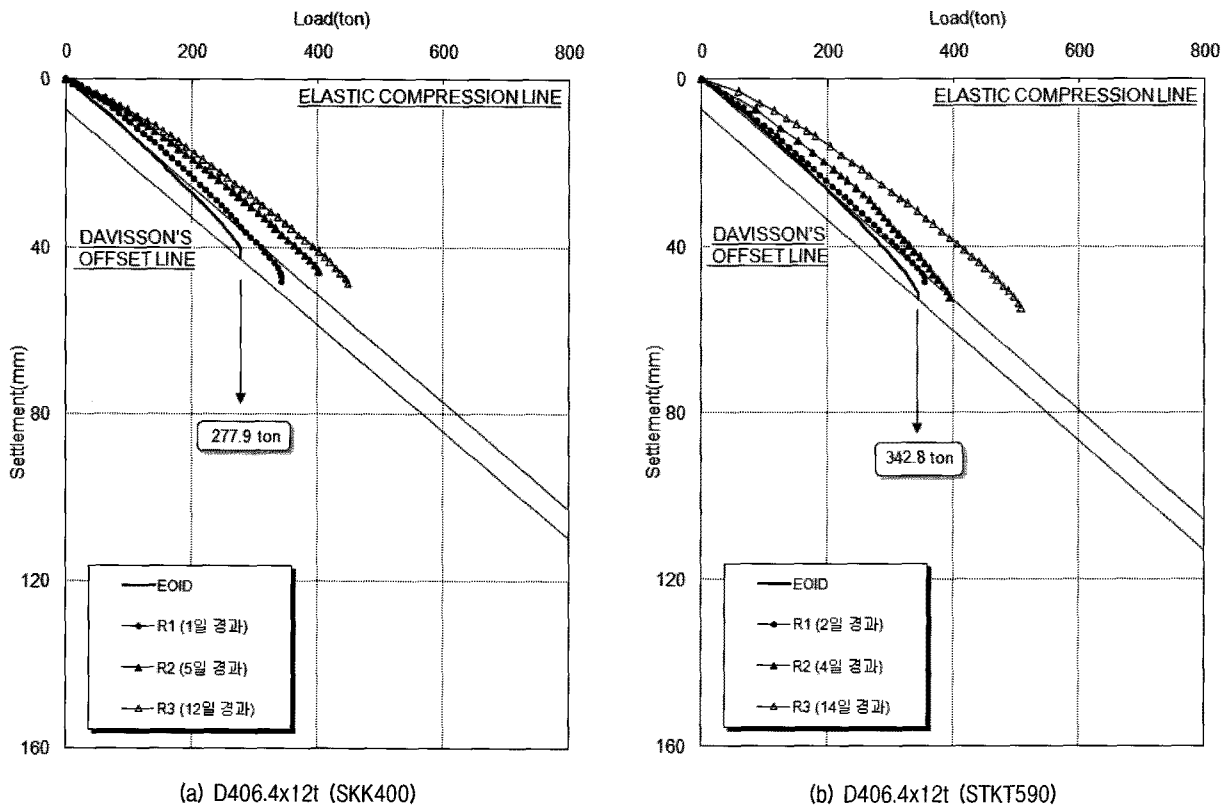


그림 2. 하중-침하량 곡선

용설계지지력은 이중 작은 값을 갖고 선정하게 되는데, 일반 강관말뚝은 허용설계지지력이 재료강도에 의해 결정되는 반면에 고강도 강관말뚝은 지반의 허용지지

력에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 지반조건에서는 재료강도의 증가가 말뚝의 설계 지지력의 증가로 이어져 보다 경제적인 설계가 가능하

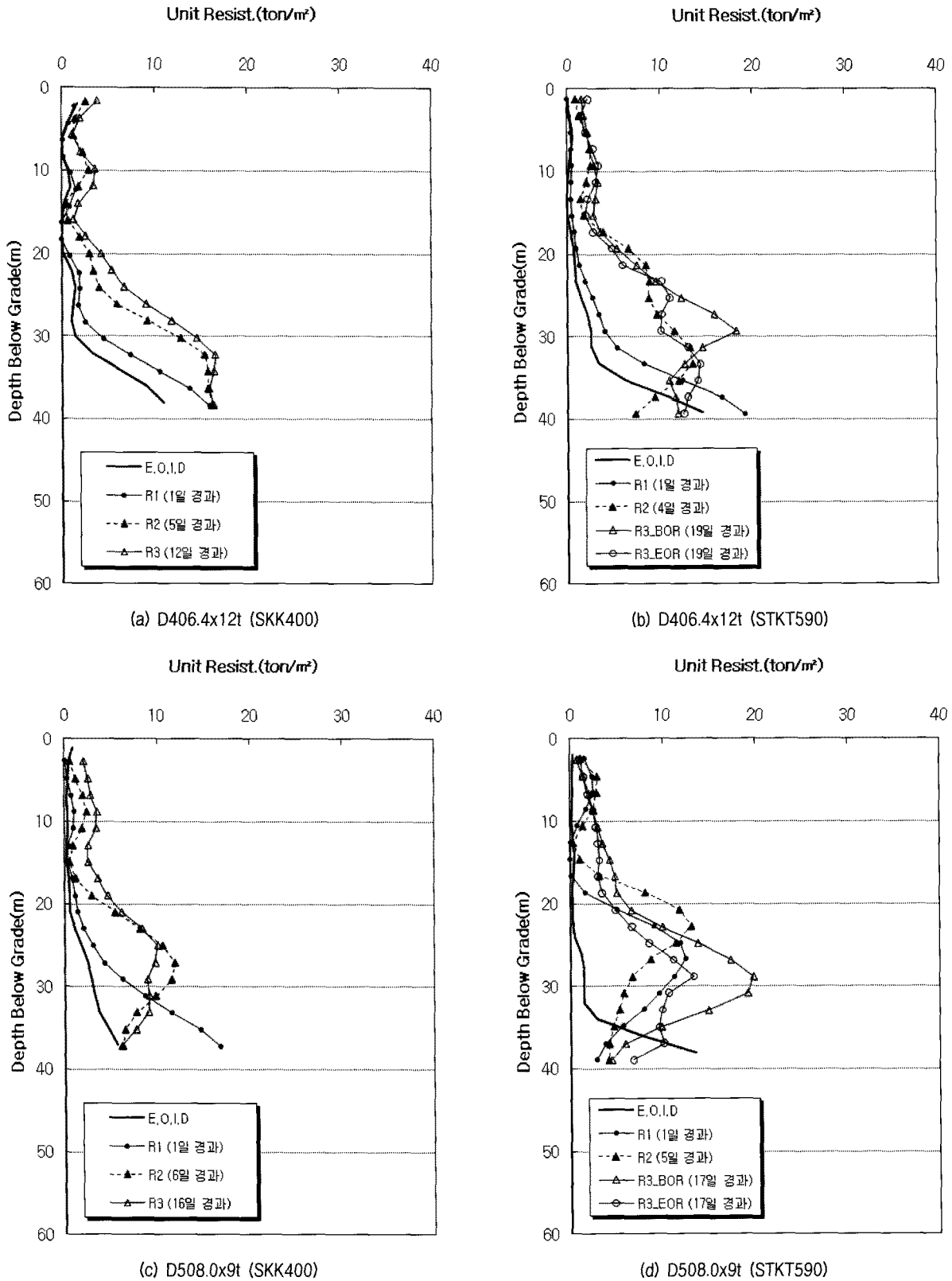


그림 3. EOID와 1차/2차/3차 restrike 간의 주면마찰력 분포

다. 또한 동일 지반에서 큰 항타에너지로 말뚝을 관입하여 평균 약 18%의 지반 허용지지력 증가를 얻을 수 있었으며 허용설계지지력에 대해서 비교하면 약 145~178%

수준으로 나타나 고강도 강관을 적용할 경우 말뚝 분당 설계지지력의 향상되어 보다 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

표 3. 강관말뚝 규격별 일반강도와 고강도의 허용지지력 비교

종류 규격	SKK400			STKT590		
	허용 지지력 (ton)	재료의 허용 축하중 (ton)	비고	허용 지지력 (ton)	재료의 허용 축하중 (ton)	비고
D406.4x9t	187	123*	재료강도	219	228*	지반지지력
D406.4x12t	224	174*		256	323*	
D508.0x9t	213	154*		267	286*	
D508.0x12t	268	219*		317	406*	

*으로 표시된 재료의 허용 축하중 결과는 적용가능한 허용설계지지력을 의미함.

동재하시험에서 13톤 해머의 경우 일반 강관말뚝에서 항타시 허용 항타응력을 상회할 수 있는 것으로 측정되었고, 고강도 강관말뚝의 경우 항타시 허용 항타응력 396.0MPa(0.9σ_y = 0.9×440.0=396.0MPa)이 충분한 여유가 있어 램 증량의 부족을 확인하였다. 시험말뚝들의 전전도를 분석한 결과, 모든 시험말뚝의 전전도지수(BTA)는 100으로 나타났고, 또한 CAPWAP 프로그램을 통한 정밀분석에서도 말뚝재료의 임피던스(Z) 감소는 나타나지 않았다. 결론적으로 동재하시험으로부터 말뚝재료 또는 용접이음부의 결함은 발견되지 않았다.

2.3 항타관입성 분석

각 규격별 일반강도와 고강도 간의 관입깊이를 분석한 결과, 일반강도 대비 고강도의 추가 관입깊이가 약 2~3.7m를 나타내었다. 이는 고강도화에 따른 최대 항타에너지가 커지는 만큼 말뚝의 관입깊이가 늘어난 것을 의미한다. 이를 지반조사결과와 비교하면 일반강도는 풍화토와 풍화암 경계부근에 근입되는 반면에 고강도는 풍화암에 근입되는 것을 확인할 수 있었다(표 4).

말뚝의 최종 항타관리 기준은 강관말뚝 기준인 500BPM 또는 0.9x0.9x항복응력의 90%를 초과 하지 않는 기준을 사용하였으며, 타격횟수를 분석한 결과 D406.4x9t에서는 일반강도 대비 188%의 타격횟수가 소요되었으며 D406.4x12t에서는 136%, D508.0x9t/12t에서는 113%와

116%의 타격횟수 증가를 나타내었다. 즉, 보다 깊은 관입깊이를 얻어 높은 허용설계지지력을 얻을 수 있는 반면에 항타횟수 증가에 따른 말뚝 본당 시공기간은 늘어나므로 적정 공사단가 산출시에는 이를 충분히 감안하여 단가를 보정해야 하며 더불어 시공비의 증가를 고려하여 가장 경제적인 단면을 선정할 필요가 있다. 본 경우에는 D406.4x9t이 가장 적은 단위중량에서 높은 설계지지력을 확보할 수 있어서 경제적으로 보일 수 있으나 타격횟수가 거의 2배까지 되어 시공단가에 이를 고려할 경우에는 D406.4x12t가 보다 경제적인 대안임을 알 수 있다(나승민 외, 2009).

3. 파동이론 분석

3.1 GRLWeap의 개요(이우진, 1998)

파동방정식에 의한 해석에서는 말뚝이 타격되었을 때 말뚝을 따라 전달되는 종방향 응력파의 전달이론을 이용한다. 만일 충격파가 말뚝의 선단으로 전달되게 되면 이 충격파는 반사파로 작용하게 될 것이며 형성된 최대 충격력이 말뚝선단에서의 극한저항력을 초과할 때 말뚝은 지반속으로 관입되게 된다. 이러한 일련의 과정을 파동이론에 근거한 수치해석적 방법으로 모델링한 것이 GRLWeap 프로그램이다.

파동방정식을 사용한 수치해석에 필요한 입력자료들

표 4. 항타시공관입성 분석결과

종류 규격	SKK400				STKT590			
	관입깊이 (m)	총타격횟수 (EA)	항타응력 (MPa)	낙하고 (m)	관입깊이 (m)	총타격횟수 (EA)	항타응력 (MPa)	낙하고 (m)
D406.4x9t	35.0	946	205.5	0.6	40.2	1778	275.8	1.1
D406.4x12t	38.3	1116	219.4	0.8	40.3	1518	276.3	1.1
D508.0x9t	37.2	1524	224.6	0.6	40.2	1725	281.2	1.1
D508.0x12t	38.2	1805	192.4	0.7	41.9	2093	256.8	1.1

은 항타장비, 지반조건, 말뚝에 따라 구분할 수 있고, 입력자료들 중 많은 부분은 프로그램내에 여러 가지 조건에 대하여 그 값을 선택할 수 있다는 장점이 있다.

해석결과는 크게 2가지로 분류하여 얻을 수 있고, 이는 극한지지력과 단위극입에 필요한 항타수의 관계, 말뚝에 작용하는 항타응력 및 전달 에너지이다.

3.2 GRLWeap에서 SPT N치

송도 컨벤션 센터 옆에 위치한 본 현장의 지반은 그림 1에 나타난 지질주상도와 같이 상부의 매립층과 퇴적층 그리고 풍화토, 풍화암 순으로 구성되어 있다. 처음 GRLWeap 해석에서는 지질주상도에서 구해진 SPT N치 값을 이용하여 해석을 실시하였다.

GRLWeap 해석시 입력사항에서 해머(DHK-13), 항타효율 95%, 쿠션은 동재하시험에 사용한 재원(면적 5245cm², 탄성계수 707MPa, 두께 174mm, C.o.R 0.65, 강도 0, 커버 무게 25kN)을 입력하였다. 나머지 Quake값과 Damping값은 기본값을 사용하였고, Resistance Gain/Loss Factors 값은 주면마찰력 40% 작용으로 입력하였다. 최종 항타종료는 BPM500 기준을 하였다.

상기 표 5를 분석하면 관입깊이는 일반강관의 경우 34m에서 최종 관입이루어 졌고, 고강도 강관말뚝의 경우 12t 경우 4m정도 깊게 관입됨을 확인할 수 있었다. 해석결과에서는 SPT N치 50에서 지지층에 관입된 것으로

로 판단하였으나 동재하시험에서 고강도 강관말뚝의 경우 모든 말뚝이 약 40m까지 관입되어 SPT N치 50이상인 풍화암층까지도 관입이 이루어지는 것을 확인하였다. 또한, 지지력과 타격횟수 또한 동재하시험과 결과가 크게 차이가 나타나는 것을 확인되었다. 이는 일반적으로 국내 지반의 특성상 N치 50 이상의 양호한 지반이 비교적 얇은 깊이에서 출현하며 그 이후에 지속적으로 보다 높은 강도의 암이 출현하므로 GRLWeap 해석상 N치 50 이상이 되는 위치에서 말뚝이 암반에 지지되는 것으로 분석하기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 GRLWeap에서 역해석

보다 정밀한 해석을 위해서 송도지역 동재하시험의 결과값과 같은 지반의 입력값을 찾기 위하여 역해석을 실시하였다. 해석과정은 항타효율을 90%, 쿠션, Quake값, Damping값은 동일하게 입력하였고, Unit Shaft Resist와 Toe Resist의 값을 조절하여 고강도 강관말뚝의 동재하시험결과와 일치하도록 역해석을 실시하였다.

GRLWeap 해석의 한계로 인하여 실제 수행한 동재하시험과의 비교에서 일반강관의 경우 타격횟수에서는 큰 차이를 보이고, 지지력에서는 D406.4x9t 말뚝에서 20% 정도 높게 나타났다. 고강도 강관말뚝의 경우 지지력에서 D508.0x12t 말뚝에서 26% 정도 높게 나타났다. 그 외 항목에서는 동재하시험과 10% 정도 차이가 있는 것

표 5. N치 입력에 따른 GRLWeap 결과

구분	SKK400				STKT590			
	φ406.4 x9t	φ406.4 x12t	φ508.0 x9t	φ508.0 x12t	φ406.4 x9t	φ406.4 x12t	φ508.0 x9t	φ508.0 x12t
관입깊이 (m)	34	34	34	35	34	38	34.5	39
항타응력 (MPa)	197.4	199.9	201.3	201.8	251	240.6	242.5	230.4
지지력 (ton)	161.4	161.4	192.4	323.9	161.4	319.1	258.2	371.5
낙하고 (m)	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.2	1.2	1.2
타격횟수 (EA)	1357	1189	1369	1213	998	2054	1074	2314

표 6. 역해석 GRLWeap 결과

구분	SKK400				STKT590			
	φ406.4 x9t	φ406.4 x12t	φ508.0 x9t	φ508.0 x12t	φ406.4 x9t	φ406.4 x12t	φ508.0 x9t	φ508.0 x12t
관입깊이 (m)	36.5	39.5	37.5	39	40	41	41	42.5
항타응력 (MPa)	206.2	208.3	203.4	187.6	271.9	250.8	272.9	258.8
지지력 (ton)	227.9	299.9	289.2	316.6	318.6	355.7	356.5	424.2
낙하고 (m)	0.6	0.8	0.7	0.7	1.2	1.2	1.2	1.2
타격횟수 (EA)	2073	2013	2279	2349	1986	1924	2015	2690

으로 확인되어 일부를 제외한 대부분에서는 실제 실험 결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 지지력이 높게 나타난 항목의 경우 높은 타격횟수로 인한 지지층의 추가 관입으로 판단된다.

3.4 역해석으로 구한 지반으로 해머중량별 변화시 비교

동재하시험에서 확인한바와 같이 13ton 해머의 경우 향타에너지의 부족으로 고강도 강관말뚝의 최적의 향타 관입성을 실시할 수 없었음을 알 수 있었다. 그러므로, 보다 적정한 향타장비 용량을 도출하기 위해서 역해석으로 구한 지반반력 조건에서 16톤과 20톤 해머로 GRLWeap 해석을 실시하였으며 순단면적이 비슷한 D406.4x12t, D508.0x9t 고강도 강관말뚝을 비교 검토하였다.

송도지반에서는 16톤과 20톤 해머의 최대낙하고로도 고강도 강관말뚝의 향타시 허용 향타응력을 초과하지 않는 것으로 확인되었다. 향타말뚝의 지지층으로 사용

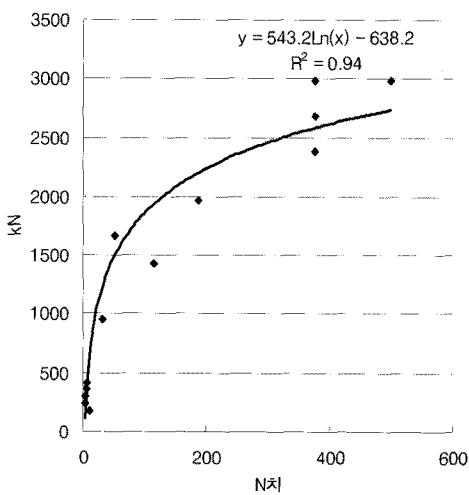
하는 풍화암에서 3~5m 추가 관입은 지지력의 21.9~49.2% 상승을 가져다 주는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 예측 결과는 13톤 해머로 시험한 결과 값을 바탕으로 지반을 구성하여 16톤과 20톤 해머에 대해서 예측한 것으로 일부 예측값의 변동성은 있을 수 있는 것으로 판단되나 그 정도가 크지 않을 것으로 예상된다.

3.5 역해석 지반반력값의 회귀분석

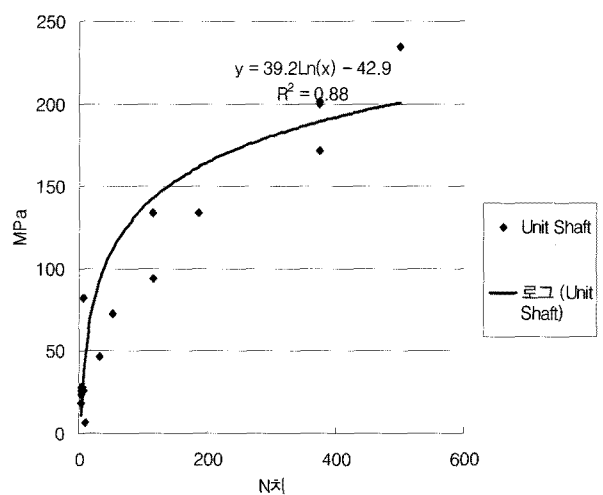
SPT N값과 실제 수행한 동재하시험의 결과값이 많이 상이하여 수행한 역해석 분석에서 지반반력 입력값을 동재하시험결과와 비교하여 도출하였다. 이와 같이 얻은 주면마찰력과 선단지지력의 저항치는 본 실험을 수행한 현장에 대해서만 사용이 가능한 것이다. 그러나 송도지역이 대부분 유사한 지질특성을 갖고 있으므로 주변의 타 현장에서도 설계검토 목적으로 이와 같은 반력값들을 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 반력값

표 7. 램 중량별 고강도 강관말뚝의 GRLWeap 해석 결과

구분	DHK-13		DHK-16		DHK-20	
	φ406.4x12t	φ508.0x9t	φ406.4x12t	φ508.0x9t	φ406.4x12t	φ508.0x9t
지지력 (ton)	355.7	356.5	433.8	453.4	500.3	531.8
지지력 (%)	-	-	21.9	27.2	40.6	49.2
관입깊이 (m)	41	41	44	43	46	45
향타응력 (MPa)	250.8	272.9	289	293	334	341
타격횟수 (EA)	1924	2015	2292	1954	1767	1942
타격횟수 (%)	-	-	19	-3	-9	-4



(a) $y = 444.7\text{Ln}(x) - 327.4, R^2 = 0.94$



(b) $y = 39.2\text{Ln}(x) - 42.9, R^2 = 0.88$

※ N치 50 이상에서는 이를 환산하여 적용(예 : 50/3 → 500/30 → 500적용)

그림. 4 역해석의 Shaft Resist와 Toe Resist 값의 회귀분석

표 8. 말뚝의 회귀분석, 역해석, 동재하시험 결과

구분	φ406.4x12t (STKT590)				φ508.0x9t (STKT590)			
	일반N치	회귀식	역해석	동재하시험	일반N치	회귀식	역해석	동재하시험
관입깊이 (m)	38	38	41	40.3	34.5	37.5	41	40.2
항타응력 (MPa)	240.6	254.8	250.8	270	242.5	259.6	272.9	278.5
타격횟수 (EA)	2054	1836	1621	1617	1074	1744	1733	1805
지지력 (ton)	319.1	355.2	355.7	358.4	258.2	348.9	356.5	345.1

의 사용자 편의성을 높이기 위해서는 N치와의 상관관계를 조사하기 위해 회귀분석을 수행하였으며 이로 인해 얻을 수 있는 회귀식은 다음 그림 4와 같다.

도출된 회귀식의 적절성 검증을 위하여 이 값을 이용한 GRLWeap 해석을 실시하였으며 이를 역해석 결과 및 동재하시험결과와 비교하여 관입깊이, 항타응력, 항타 횟수, 지지력에서 모두 약 10% 내외의 편차를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 이는 실제 실험값과 차이가 있는 것으로 판단되나 기존의 N치를 그대로 적용한 값과 비교하면 보다 정밀하게 적정 지지력을 도출하는 것으로 분석되었다. 특히 반력값을 적용한 회귀식에서는 지지력이 실험결과와 유사하게 도출되었으며, 일반 N치 입력값을 이용한 지지력이 동재하시험결과와 89% 및 75% 수준을 나타내었으나 회귀식을 이용할 경우에는 99% 및 101%를 나타내어 지지력 측면에서 상당히 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 타격횟수의 경우에는 일반 N치의 값이 두께에 대한 민감도가 크게 나타나며 실제 실험결과와 크게는 60% 수준으로 많이 다른 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 시험을 수행한 송도지역내의 유사한 지반조건에서 제안하는 회귀식을 이용할 경우 고강도 강관말뚝의 적정 허용지지력에 대해 보다 정확한 값을 얻을 수 있으므로 설계단계에서 유익하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 송도지역 동재하시험 및 GRLWeap 해석결과를 이용하여 고강도 강관말뚝의 특성을 반영한 설계 단계에서 지반의 적정 허용지지력을 도출하는데 목적을 두고 수행하였다. 이를 위해 현장에서 4종류의 말뚝 규격에 대해 수행한 동적재하시험을 분석하였다. 추가적으로 단면적이 유사한 두 종류의 강관규격에 대하여

반력계수를 이용한 회귀식을 토대로 대상지반에서 고강도 강관말뚝의 항타관입성과 지지력 특성을 분석하였으며 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 일반 강관말뚝과 고강도 강관말뚝의 경우에는 항복 응력 수준의 차이로 인하여 가할 수 있는 최대 항타 응력이 상이하므로 실제 현장에서의 최종 관입깊이가 약 2~5m 차이를 나타내었다. 즉, 일반 강관말뚝에서는 풍화토와 풍화암의 경계에 근입되는 반면 고강도 강관말뚝은 풍화암에 근입되는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 근입장의 차이는 지반의 허용지지력 차이로 나타났으며 말뚝 규격에 상관없이 일반 강관말뚝에서는 재료의 강도가 설계지지력을 결정하는 반면에 고강도 강관말뚝에서는 지반의 지지력이 설계지지력을 결정하였다. 설계지지력의 차이는 145~178% 수준으로 나타나 고강도 강관말뚝을 적용할 경우 말뚝 본당 설계지지력의 증가로 인한 경제성 향상이 가능할 것으로 판단된다.
- (3) 동재하시험결과에 대한 역해석을 수행하여 해머용량의 변화에 따른 항타관입성 및 허용지지력의 특성을 분석한 결과, 590MPa급 고강도 강관에서는 20톤의 해머중량으로도 허용항타응력을 초과하지 않는 것을 확인하였으며 해머중량의 증가로 인하여 풍화암에서 3~5m 추가 관입을 확보할 수 있으며 이는 지지력의 21.9~49.2% 상승을 가져다 주는 것을 확인할 수 있었다.
- (4) 설계 단계에서의 고강도 강관말뚝의 허용 설계지지력을 도출하기 위하여 동재하시험결과에 대한 역해석을 수행하여 파동이론해석에 근거한 GRLWeap용 반력계수를 SPT의 N치를 이용한 회귀식을 도출하였다. 회귀식을 이용하여 도출한 관입깊이, 항타응

력, 타격횟수, 지지력은 동재하시험결과와 10%내외의 편차를 나타냈으며 허용지지력의 경우에는 99~101%의 정밀도를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 나승민, 유한규, 이장덕, 조천환 (2009), “송도지역 재하시험결과 분석을 통한 고강도 강관말뚝의 적용성 분석”, 2009 한국지반공학 학회 기초기술위원회 워크샵, pp.80-88.
2. 이명환 (2004), “국내 말뚝 기초의 현황 및 향후 전망”, 2004 한국 지반공학회 기초기술 위원회 워크샵, pp.165-177.
3. 이우진 (1998), “Weap을 이용한 강관말뚝의 항타시공성의 합리적 해석”, 한국강구조학회지, 제10권 1호, pp.123-136.
4. 포항종합제철 (1997), “고강도강관 말뚝의 적용을 위한 연구”, PSC, pp.172.
5. Finnish National Road Administration(2004), Steel Pipe Piles.

(접수일자 2010. 11. 2, 심사완료일 2011. 2. 9)