

타입 강관말뚝의 향타관입성 분석

Driveability Analysis of Driven Steel Tublar Piles

조 천 환* Cho, Chun-Whan

Abstract

The final purpose of driveability analysis is to confirm whether a selected hammer drives a pile to a desired penetration depth and/or capacity without damage. The capacities from static analysis methods are meaningless if the pile cannot be driven to the required design depth and the ultimate capacity without damage. It often occurs that there are big differences between the capacities from measurements and calculations. It may be because the driveability is not evaluated due to the lack of engineers' understanding of the driveability of pile driving. The engineers in the field sometimes assume simply the penetration depth with standard penetration value only. In this study some test pilings with dynamic pile loading tests were performed to give an understanding about the driveability. The influence factors(driving resistance, impedance, material strength, hammer) on the driveability of steel piles were analysed with the monitoring data obtained from the dynamic load tests. It was shown that more cost-effective design can be made in case the driveability analysis and high strength steel pile are appropriately adopted in the design.

요 지

말뚝의 향타관입성 분석의 최종 목표는 선택된 해머시스템으로 말뚝이 파괴되지 않고 지반의 관입저항을 극복하여 예측된 관입저항치를 얻을 수 있는지를 확인하거나, 주어진 조건에서 예측된 관입저항치를 얻을 수 있는 적절한 해머를 선택하는데 있다. 만약 말뚝의 향타관입성이 확보되지 못한다면 정적공식으로 구한 지지력은 의미가 없게 될 것이다. 그럼에도 실무기술자들은 향타관입성의 중요성을 인식하지 못하여 설계시 향타관입성 분석없이 지반조사자료를 근거로 단편적으로 향타관입깊이에 대해 가정함으로써 예측된 지지력은 실제의 값과 차이를 줄 수가 있는 경우가 자주 있다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안의 하나로 국내에서 향타분석기를 이용하여 시험말뚝에 대해 향타시 관입성과 지지력을 측정하였다. 또한 이러한 자료를 이용하여 강관말뚝의 향타관입성에 영향을 주는 요인(관입저항력, 임피던스, 재료강도, 해머 등)을 분석, 제시하였다. 본 실험연구로부터 설계시 향타관입성 분석의 적용 및 고강도 재료의 이용이 적절히 이루어진다면 보다 경제적인 설계가 가능함을 알 수 있었다.

Keywords : Driveability, Driven pile, Driving hammer, Dynamic load test, Impedence, Steel pile

1. 서 론

말뚝의 재질강도를 기준할 때 우리나라의 강관말뚝의 설계는 말뚝재료의 허용하중의 51.0%만을, 콘크리트말뚝의 설계는 말뚝재료의 허용하중의 64.0%를 활용하는

것으로 조사되었다(조천환, 1998). 말뚝의 재료능력을 충분히 활용하지 못하는 이러한 문제점은 합리적인 장비 선정기준이 지켜지지 못하고 또한 최적설계(지반의 허용 지지력=말뚝재료의 허용하중)를 위한 말뚝지력의 특성을 제대로 반영하지 못한데 기인하는 것으

* 정회원, 삼성건설, T.A. 팀, 전문위원 (Member, Samsung Corporation, Technical Advisory Team, Technical Advisor, chunwhan.cho@samsung.com)

로 판단된다(이명환 등, 1994; 이명환 등, 1996; 한국지반공학회 등, 1997).

타입말뚝의 지지력 특성은 크게 지반조건, 말뚝조건, 해머(hammer)조건에 의해 영향을 받으며 이들 조건이 최적으로 조합되어야 만 말뚝의 재료허용하중을 충분히 활용할 수 있는 최적설계가 가능하다. 타입말뚝에 있어 최적설계의 개념을 도입하기 위해서는 현재까지의 말뚝기초공학 수준으로 판단해 볼 때 시험을 제외하면 파동이론분석(wave equation analysis of pile driving ; WEAP)을 이용하여 항타관입성을 분석, 설계시 적용하는 것이 가장 바람직 한 것으로 평가되었다(한국지반공학회 등, 1997). 그러나 파동이론분석이나 재하시험으로 더욱 신뢰성이 있는 결과를 얻기 위해서는 지지력의 시간경과효과를 반영할 수 있는 정량적 자료가 필요함에도 불구하고 이에 대한 실증적 연구는 국내외적으로 아직 미흡한 실정이다(조천환, 1998).

말뚝의 항타관입성(driveability)은 말뚝이 파손없이 요구되는 깊이 까지 또는 요구되는 지지력을 얻을 수 있는 깊이까지 관입할 수 있는 능력을 의미한다. 말뚝이 요구되는 관입깊이 또는 지지력까지 항타되지 못할 경우 가정된 관입깊이를 바탕으로 지지력을 예측하는 모든 정적방법들은 의미가 없게 된다. 즉, 말뚝은 항타중에 말뚝에 걸리는 지반의 저항을 극복하여 소정의 깊이 까지 도달할 수 있는 충분한 항타관입성을 가져야 한다. 말뚝의 항타관입성에 영향을 줄 수 있는 요인으로는 지반의 저항, 말뚝의 임피던스(impedence), 말뚝의 강도, 해머시스템 등을 들 수가 있다.

말뚝의 항타관입성 분석의 최종 목표는 선택된 해머 시스템으로 말뚝이 파손되지 않고 지반의 관입저항을 극복하여 예측된 관입저항치를 얻을 수 있는지의 확인 또는 주어진 조건에서 예측된 관입저항치를 얻을 수 있

는 적절한 해머 또는 재료의 선택에 있다. 그러나 실무 설계시에는 항타관입성 분석없이 지반조사자료를 근거로 단편적으로 항타관입 깊이에 대해 가정함으로써 예측된 지지력은 실제의 값과 차이를 주는 경우가 자주 있다. 따라서 실무 설계자들이 최적설계에 접근하기 위해서는 항타관입성의 중요성을 인식하고 항타관입성에 미치는 영향요인을 정량적으로 이해하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 항타분석기를 이용하여 시험 말뚝에 대해 항타시 관입성과 지지력을 측정 한 후 항타 관입성에 영향을 주는 요인에 대해 분석하였다.

2. 현장 및 시험 개요

2.1 시험 내용 및 방법

본 연구의 목적은 강관말뚝의 항타관입성을 분석, 제 시험으로써 신뢰성이 있는 말뚝설계에 도움을 주기 위한 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 4개 지역에서 총 56본의 말뚝을 타입 시공하여 시험을 수행하였다. 표 1은 현장별 시험내용을 요약한 것이다. 현장에 따라 다양한 말뚝이 이용되었으며 포항 및 광양 현장에서는 선 단 형상에 따른 관입성을 비교하기 위해 개단말뚝과 폐 단말뚝(평면 폐단 적용)을 항타하였다. 특히 광양현장에서는 강관의 강도에 따른 항타관입성을 분석하기 위해 일반강도말뚝(SPS 400)과 고강도 강관말뚝(SPS 490)을 이용하여 시험하였다. 4개 현장 모두 유압해머로 직타 하여 말뚝을 설치하였다.

시험시 적용된 지지력 시험방법은 ASTM D 4945에 따라 항타분석기를 이용한 동재하시험(high strain dynamic load test)을 실시하였다. 사용된 항타분석기는 미국 PDI사의 MODEL PAK이다(PDI, 1995).

표 1. 현장별 시험내용

현장명	시험말뚝종류(mm) (재료강도)	시험말뚝 본수(본)	동재하시험(회)		시공방법	비고
			EOID	Restrike		
포항	ø406, 7.9 t(SPS 400)	5	5	7	직항타 (유압7톤)	· 허용항타응력까지 항타 · 개단 및 폐단 말뚝
	ø508, 9.5 t(SPS 400)	6	6	9		
광양	ø406, 9.5 t(SPS 400)	8	8	9	직항타 (유압7톤)	· 허용타격응력까지 항타 · 개단 및 폐단 말뚝 · 일반 및 고강도 강관
	ø508, 9.5 t(SPS 400)	7	7	8		
	ø273~ø508(SPS490)	16	16	11		
시흥	ø406, 10 t(SPS 400)	9	9	9	직항타 (유압7톤)	· 허용타격응력 까지 항타 · 개단 및 폐단 말뚝
	PHC 400	9	9	9		
영종도	ø406, 12 t(SPS 400)	5	5	5	직항타 (유압7톤,10톤)	· 허용타격응력까지 항타 · 개단 말뚝
	ø609, 12 t(SPS 400)	2	2	2		
합 계		56	56	60		

항타관입성 분석 시에는 항타시공성과 관련된 주요 항목(항타에너지, 항타응력, 저항력 등)을 관입깊이 및 타격수에 따라 측정하였다. 항타종료기준은 현장의 시험목적에 따라 허용항타응력($0.9 \sigma_v$ 이내로 항타, 여기서 σ_v 는 강관의 항복응력)까지 타격하여 항타를 종료하였다(허용항타응력에 이르지 않는 경우는 BPM = 500에서 항타종료; 여기서 BPM은 blows per meter). 말뚝의 set-up효과를 측정하기 위해 항타시 시험(end of initial driving, EOID)을 실시한 후 일정한 시간이 경과한 후 재항타시험(Restrike)을 실시하여 항타시 데이터를 측정하였다. 본 논문에서는 항타관입성에 대해서만 분석하였다. 지지력의 시간경과 효과에 대해서는 조천환(2003)을 참고할 수 있다.

항타시 측정된 항타 시공성 관련 데이터는 PDAPLOT 프로그램(PDI, 1995: 항타시 측정된 항목을 관입깊이 또는 타격수에 따라 표시할 수 있는 프로그램)을 이용하여 분석하였으며, 또한 EOID와 Restrike에서 측정된 응력파는 CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program, GRL Associate Inc., 1996)을 이용하여 분석함으로써 지지력을 산출하였다. CAPWAP에 의한 지지력 결정은 우선, 하중-침하량곡선을 도출한 후 여기에 Davisson 판정법(Crowther, 1988)을 적용하여 항복하중을 결정하였다. 동재하시험에 관한 상세한 자료는 깊은기초(한국지반공학회, 2002)를 참고할 수 있다.

2.2 지반조사 내용

본 시험 현장의 지반조사 자료를 요약하면 다음과 같다.

(가) 포항현장

시험항타를 위한 포항현장 시험장소의 지층구성은 지표면으로부터 매립토층(지표로부터 1.5m), 퇴적토층(지표로부터 14.7m), 이하 기반암층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있다. 퇴적층은 상부의 모래층(지표로부터 11.0m)과 하부의 모래자갈층(지표로부터 14.0m)으로 이루어져 있다. 공내지하수위는 지표로부터 약 6.5m에서 형성되었다(그림 1 참조).

(나) 광양현장

광양현장 시험부지에 대한 시추조사 성과에 의하면 기초지반은 매립토층(지표로부터 약 5.0m), 퇴적토층(지표로부터 약 20.0m에서 21.6m), 잔류토층(지표로부터 약 22.0m) 이하 기반암층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있다. 기반암은 사암으로 이루어져 있다. 공내 지하수위는 지표로부터 약 2.0m에서 형성되었다. 대표적인 지질주상도는 그림 2와 같다.

(다) 시흥현장

시흥현장의 지층구성은 지표면을 이루고 있는 3m 내외의 매립층 하부에 연약층을 포함한 실트질 모래, 점

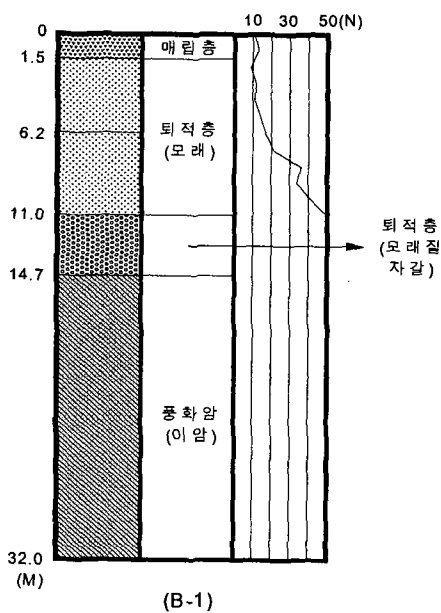


그림 1. 지질주상도(포항현장)

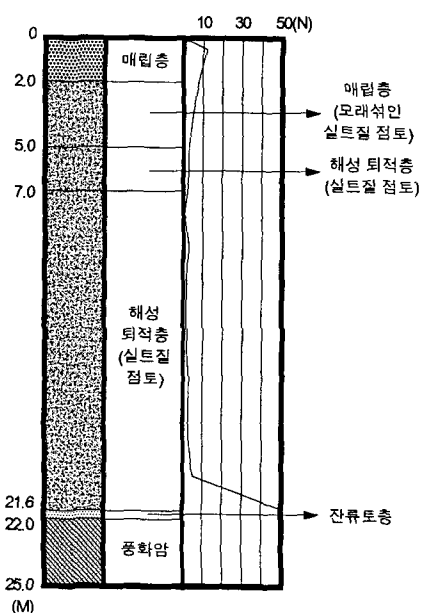


그림 2. 지질주상도(광양현장)

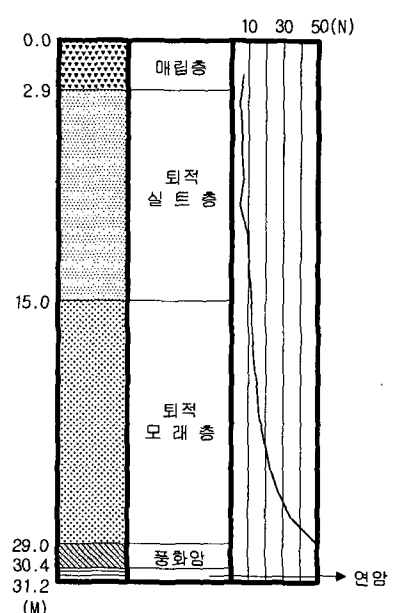


그림 3. 지질주상도(시흥현장)

토질 실트로 구성된 퇴적층이 평균 3.0~16.1 m까지 나타나고, 그 하부에 모래질 퇴적층이 위치에 따라 평균 16.1~28.7 m까지 존재한다. 퇴적층 아랫쪽의 일부 위치에서는 풍화토층이 나타나거나 풍화암층, 연암층이 바로 나타나기도 한다. 기반암은 편마암이며 공내 지하 수위는 지표하 2.2~2.6 m 정도로 조사되었다. 대표적인 지질주상도는 그림 3과 같다.

(라) 영종도현장

본 현장은 상당히 광범위하여 많은 양의 시추조사가 수행(표 2에 요약)되었는데 시추조사 성과에 의한 시험 지역의 지층은 생성기원 및 층서에 따라 준설 매립층, 해성 퇴적층, 잔류토층 및 기반암인 풍화암과 연암층으로 구성되어 있다. 해성 퇴적층은 연약한 점성토로 구성되어 있는 상부 해성층과 굳은 상태의 점토 또는 실트와 모래, 자갈로 구성되어 있는 하부 해성 퇴적층으로 구분할 수 있다.

2.3 항타 및 시험 결과

4개 지역에서 총 56개 말뚝을 타입하고 총 116회 시험한 시험결과를 정리하면 표 3과 같다.

3. 항타시공성 분석

3.1 항타시 저항력

말뚝의 주면 및 선단저항이 항타관입성에 미치는 영향을 파악하기 위해 허용항타응력까지 타입된 말뚝에 대해 항타시 지지력의 성분간의 관계를 분석하였다.

분석에 이용된 지지력성분은 선단지지력 (Q_b), 주면마찰력 (Q_s), 단위면적당 선단지지력 (q_b), 단위면적당 주면마찰력 (f_s)이다. 여기서 q_b 와 f_s 는 각각 Q_b 와 Q_s 를 해당면적으로 나눈 것으로 특히 개단강관인 경우 이들 값은 폐색된 경우로 가정하여 도출된 것이다. 이들 지

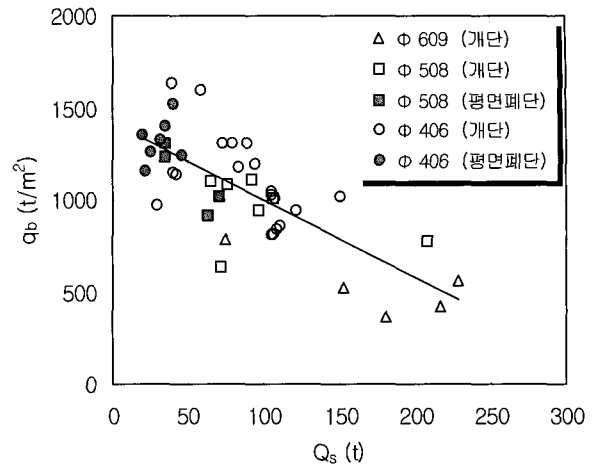


그림 4. 항타시 q_b-Q_s 의 관계

지력 성분을 그림 4와 같은 형식으로 상호 분석한 결과 일정한 경향이 있는 것은 q_b-Q_s 관계로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 q_b-Q_s 관계만 토의 하였다.

그림 4는 상기에서 언급한 것처럼 여러 분석내용 중 일정한 경향이 나타난 단위면적당 선단지지력과 주면마찰력의 관계 (q_b-Q_s)를 도시한 것으로 말뚝의 임피던스와 강도, 해머의 영향은 고려되지 않은 것이다. 그림 4에서는 데이터의 일관성을 유지하기 위해 표 3의 시험결과 중 항타응력이 기준이 되어 항타된 시험결과만(BPM 이 기준이 된 경우는 제외)을 적용하였다. 그림 4에서와 같이 단위면적당 선단지지력과 주면마찰력의 관계는 전반적으로 반비례하고 있음을 알 수 있는데, 이것은 항타시 말뚝의 관입정도는 선단저항력과 주면마찰저항 모두에 좌우된다는 것을 의미하는 것이다. 즉, 그림 4에서와 같이 주면마찰력이 큰 지반에서는 낮은 극한 선단지지력이 얻어지고 주면마찰력이 작은 지반에서는 비교적 큰 선단지지력이 나타난 것처럼 결국, 말뚝을 항타하여 기대할 수 있는 관입깊이는 선단부 지반 조건뿐만 아니라 선단부 윗쪽의 지반조건까지 고려하여 추정하여야 한다고 볼 수 있다.

이러한 사실은 실무에서의 일반적인 설계방법, 즉 표

표 2. 지층개요(영종도현장)

지 층	통일 분류법	두께(m)	N치	비 고
준설매립	SM,SP/SM,SP	1.0~5.3	0~32/30	
상부 해성 퇴적층	ML,CL,SM	2.1~14.8	0~12/30	전지역
하부 해성 퇴적층	CL,ML,SM,SP GP,GM,CH	19.2~38.0	4~50/4	전지역
잔류토층	SM	0.6~5.1	27~50/16	
기반암층		대보 화강암		전지역

표 3. 재하시험결과 요약

단정 위치	시험 장소 번호	말뚝직경×두께(mm) (강재 종류)	선단 종류	관입 깊이 (m)	시험방법	CAPWAP분석 및 Davisson 판정법에 의한 항복하중 판정결과(ton)				EMX (t/m)	경과 일수 (원)
						주 연 지저력	선 단 지저력	CAPWAP capacity	항복 하중		
포방	2C7	Φ508×9.5 t (SPS400)	폐단	10.3	EOID	70.0	206.0	276.0	276.0	3.9	
	1차Restrike				84.0	203.0	287.0	261.0	6.2	15	
	2차Restrike				90.0	207.0	297.0	279.0	5.7	28	
	개단		18.3	EOID	207.6	157.0	364.6	264.0	5.8		
				1차Restrike	255.0	145.0	400.0	400.0	7.1	15	
	4C7	Φ508×9.5 t (SPS400)	폐단	14.6	EOID	46.0	185.0	231.0	213.0	4.2	
	1차Restrike				90.0	183.0	273.0	273.0	6.0	15	
	폐단		9.6	EOID	63.0	185.0	245.0	220.0	3.9		
				1차Restrike	64.0	172.0	236.0	147.0	5.7	10	
	15C5		2차Restrike	54.0	182.0	236.0	192.0	3.7	21		
	개단	17.8								EOID	71.0
	7C7	Φ406×7.9 t (SPS400)	폐단	10.5	EOID	45.0	161.0	206.0	206.0	2.9	
	1차Restrike				74.0	187.0	261.0	180.0	6.7	14	
	2차Restrike				59.0	183.0	242.0	242.0	3.7	27	
	10C7		10.3	EOID	22.0	150.0	172.0	172.0	2.1		
1차Restrike				31.0	187.0	218.0	199.0	4.1	11		
11C7	13.7		2차Restrike	53.0	169.0	222.0	195.0	4.1	23		
			EOID	42.0	148.0	190.0	190.0	2.7			
13C5	10.5		1차Restrike	62.0	180.0	242.0	242.0	4.1	11		
			EOID	34.8	181.2	216.0	185.0	3.0			
12C5	12.8		1차Restrike	57.2	202.5	260.0	260.0	4.4	10		
		EOID	40.0	149.0	189.0	189.0	2.5				
6C7	13.9	1차Restrike	82.0	161.0	243.0	243.0	4.2	10			
		EOID	29.0	126.0	155.0	155.0	1.9				
1HC5	Φ508×9.3 t (SPS490)	폐단	23.0	1차Restrike	105.0	146.0	251.0	251.0	3.8	14	
				2차Restrike	94.0	150.0	244.0	244.0	3.3	27	
망	1HC5	Φ508×9.3 t (SPS490)	폐단	23.0	EOID	62.5	243.0	305.5	304.0	5.1	
	2HO5				개단	24.2	EOID	125.6	202.4	328.0	328.0
	3HO4	24.6	1차Restrike	202.7			200.7	403.4	403.4	9.6	11
			2차Restrike	173.3	190.3	363.6	363.6	8.5	11		
	6HC4	Φ406×9.3 t (SPS490)	개단	24.6	EOID	157.0	210.0	367.0	367.0	6.2	
					1차Restrike	178.8	206.8	385.5	385.5	9.7	13
			8HC4	23.6	2차Restrike	108.3	242.6	350.9	350.9	8.5	12
					폐단	23.6	EOID	64.9	248.9	313.0	313.0
	15HO4	24.1	EOID	143.5	173.7	317.2	317.2	5.6			
			개단	24.4	EOID	161.7	189.3	351.0	351.0	5.8	
	12HO35	Φ355×9.3 t (SPS490)	개단	22.0	EOID	73.9	180.7	254.6	254.6	4.2	
					1차Restrike	78.5	169.6	248.1	248.1	4.9	10
	14HO35	23.7	2차Restrike	111.0	194.0	305.0	305.0	6.2	12		
			EOID	151.3	172.7	324.0	324.0	6.1			
	4HO32	Φ323×9.3 t (SPS490)	개단	24.0	EOID	162.0	153.0	315.0	315.0	5.2	
1차Restrike					158.8	161.8	320.6	320.6	8.0	12	
9HO32	24.4	2차Restrike	102.7	189.5	292.2	292.2	7.9	12			
		EOID	104.0	180.0	284.0	284.0	5.2				
10HC32	Φ273×9.1 t (SPS490)	개단	24.0	1차Restrike	80.0	198.0	278.0	278.0	7.4	20	
				EOID	42.9	227.1	270.0	265.0	5.6		
16HO32	(SPS400)	폐단	23.6	EOID	77.6	217.4	295.0	295.0	5.8		
				개단	23.3	EOID	96.7	107.3	204.0	204.0	2.5
18Q32	23.3	EOID	96.7	107.3	204.0	204.0	2.5				
		개단	24.0	EOID	98.0	157.0	255.0	255.0	4.3		
5HO2	Φ273×9.1 t (SPS490)	개단	24.0	1차Restrike	113.9	146.8	260.7	260.7	6.2	13	
				2차Restrike	106.1	140.9	247.0	247.0	6.4	12	
11HC2	24.0	폐단	24.0	EOID	68.1	164.9	233.0	233.0	4.5		
		17HO2	24.0	EOID	109.7	138.3	248.0	248.0	4.8		
1C5	21.4			개단	21.4	EOID	76.0	220.0	296.0	296.0	5.5
		2C5	20.4	1차Restrike	146.8	204.9	351.7	351.0	8.1	26	
3C5	22.2			폐단	20.4	EOID	35.0	285.0	300.0	245.0	5.3
		4C5	22.8	1차Restrike	98.0	253.6	351.6	351.0	7.9	27	
5C5	22.0			EOID	106.3	203.7	310.0	310.0	4.8		
		6C5	20.7	1차Restrike	137.4	237.6	375.0	375.0	8.0	15	
15C5	22.4			2차Restrike	172.2	197.8	370.0	370.0	7.7	27	
		EOID	96.3	191.7	288.0	288.0	4.5				
1차Restrike	160.0								210.0	370.0	371.0
EOID	64.5	222.5	287.0	277.0	5.4						
							개단	22.0	EOID	35.0	250.0
6C5	20.7	1차Restrike	69.9	279.5	349.4	245.0	10.4	15			
		2차Restrike	82.3	269.4	351.6	307.0	8.8	26			
EOID	92.4	224.6	317.0	317.0	5.5						
							1차Restrike	145.7	235.3	361.0	381.0

표 3. (계속) 재하시험결과 요약

현장 위치	시험 말뚝 번호	말뚝직경 × 두께(mm) (강재 종류)	선단 종류	관입 깊이 (m)	시험방법	CAPWAP분석 및 Davisson 판정법에 의한 항복하중 판정결과(ton)				EMX (t-m)	경과 일수 (일)
						주 면 지지력	선 단 지지력	CAPWAP capacity	항복 하중		
광양	7O4	Φ406 × 9.5 t (SPS400)	개단	22.1	EOID	72.9	168.7	241.5	241.0	3.9	14
	1차Restrike				104.4	187.9	294.3	294.0	4.8		
	2차Restrike				106.5	204.9	311.4	311.0	6.6		
	8C4		폐단	20.6	EOID	31.4	171.4	202.8	150.0	3.1	14
	1차Restrike				106.1	199.4	305.5	280.0	7.9		
	2차Restrike				80.0	192.0	272.0	270.0	6.4		
9O4	개단	22.2	EOID	79.5	168.7	248.2	248.0	3.7	25		
10C4	폐단	20.5	EOID	40.3	197.7	238.0	190.0	3.4			
11O4			1차Restrike	45.8	242.2	288.0	288.0	4.7			
12O4	개단	21.0	EOID	78.0	200.0	278.0	249.0	6.0	13		
	개단	21.1	EOID	59.0	207.0	266.0	266.0	4.2			
			1차Restrike	102.0	186.0	268.1	288.0	5.6			
	개단	21.1	2차Restrike	103.2	215.8	319.0	319.0	6.6			
										25	
시흥	1SS	Φ 406 × 10 t (SPS400)	개단	29.1	EOID	106.1	104.9	211.0	211.0	4.9	4
	Restrike				255.0	45.0	300.0	300.0	6.1		
	2SS		개단	28.4	EOID	116.9	160.6	277.5	277.5	6.2	4
					Restrike	234.0	68.0	302.0	302.0	6.6	
	3SS		개단	28.8	EOID	122.6	142.4	265.0	265.0	6.2	3
					Restrike	289.6	39.9	329.5	329.5	6.4	
	4SS		개단	26.1	EOID	105.1	164.9	270.0	270.0	5.8	3
					Restrike	186.1	126.1	312.1	312.1	6.0	
	5SS		개단	28.1	EOID	108.0	157.0	265.0	265.0	6.8	3
Restrike		270.0			60.0	330.0	330.0	6.1			
6SS	개단	27.7	EOID	125.1	134.6	259.8	259.8	6.5	4		
			Restrike	138.3	147.6	285.9	285.9	6.4			
7SS	개단	27.3	EOID	120.0	125.6	245.6	210.0	5.5	5		
			Restrike	153.1	141.4	294.5	294.5	7.0			
8SS	개단	27.9	EOID	123.1	161.9	285.0	285.0	7.5	4		
			Restrike	198.2	117.7	315.8	315.8	6.6			
9SS	개단	27.1	EOID	94.6	154.4	249.0	249.0	4.3	5		
			Restrike	144.2	156.3	300.5	300.5	6.3			
영종도	1Y6	Φ609.6 × 12 t (SPS 400)	개단	32.1	EOID	75.0	230.0	305.0	305.0	6.1	9
	Restrike				198.5	162.6	361.6	361.6	9.1		
	2Y6		개단	31.3	EOID	181.4	106.4	287.7	287.7	-	7
					Restrike	249.5	105.5	355.0	355.0	8.0	
	3Y6		개단	42.8	EOID	216.1	123.9	340.0	340.0	9.3	8
					Restrike	331.0	100.1	431.1	431.1	10.0	
	4Y6		개단	33.6	EOID	228.8	163.2	392.0	392.0	9.8	8
Restrike		550.6			73.9	624.4	624.4	10.1			
5Y6	개단	40.2	EOID	153.2	152.2	305.3	305.3	8.4	18		
			Restrike	538.6	50.4	589.0	589.0	9.7			
6Y4	개단	34.7	EOID	150.8	131.8	282.6	282.6	6.7	9		
7Y4	개단	39.6	Restrike	292.0	40.2	332.2	332.2	5.6			
					EOID	39.2	211.7	250.9	189.0	5.6	
			Restrike	175.7	93.0	268.7	268.7	6.8			

주) 폐단은 평면폐단형임. EMX는 항타시 최대 전달에너지 값임.

준관입시험값(N)의 절대치만을 이용하여 관입깊이를 가정하는 방법에 문제가 있음을 시사하는 것이다. 그림 4의 말뚝의 단위면적당 선단지지력과 주변마찰력의 반비례관계로 부터 말뚝의 관입깊이를 단순히 선단부의

N값으로 결정하는 것은 관입깊이 산정에 오류를 줄 수 있으며 따라서 이에 의해 결정된 지지력에도 문제가 있음을 유추할 수 있다. 결국, 타입말뚝의 관입 깊이를 결정할 경우는 주요 인자로서 선단저항은 물론 주변저항

도 고려되어야 할 것이다.

말뚝이 타입될 때 주면 및 선단저항을 극복하고 말뚝이 관입될 수 있는지의 여부는 말뚝의 항타관입성에 대한 분석을 실시하여 결정하는 것이 바람직하다. 말뚝의 항타관입성 분석시는 지반의 저항, 타격에너지, 말뚝재료의 항타응력 등을 종합적으로 고려하여야 하며 이를 위해서는 파동이론분석이 적용될 수 있다.

그림 4에 의하면 타입말뚝의 항타시 선단지지력의 평균값은 1086.0 t/m^2 이며 상한값 (q_{bl})은 1500 t/m^2 정도로 나타낼 수 있다(선단지지력은 시간경과 효과가 크지 않음). 이로부터 타입말뚝의 지지력 계산시 정적지지력 공식에 의해 어떠한 선단지지력이 계산되더라도 상한값 한계를 적용하는 것이 필요하다고 보며 상한값은 1500 t/m^2 정도로 평가된다. 이러한 결과는 한국지반공학회(1999)에서도 유사한 결론을 얻었다. 일반적으로 Q_s 의 경우는 시간경과효과가 유력하게 반영되기 때문에 실물 말뚝의 경우 극한지지력의 측정이 곤란하다. 본 연구에서는 정량적인 Q_s 의 측정에 의한 f_s 값을 얻지 못하였는데 일반적으로 f_s 의 상한값은 10 t/m^2 (한국지반공학회, 2003)으로 주어진다

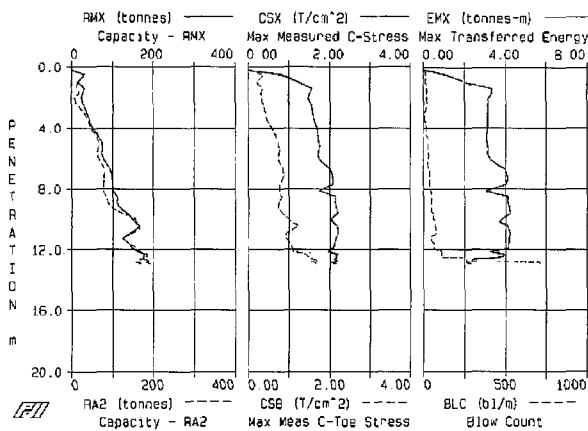
포항현장 및 광양현장에서 개단말뚝과 폐단말뚝의 항타관입성이 분석되었다. 그림 5는 포항 현장에서의 항타관입성 관측치를 PDAPLOT으로 분석하여 도시한 것중 일예를 나타낸 것이다. 그림 5에서와 같이 항타시 말뚝에 걸리는 응력을 선단형태 별로 비교해보면, 개단말뚝의 경우 말뚝두부의 응력(CSX)과 선단부의 응력(CSB)은 지지층에서 일정한 격차를 유지하는 상태로 허용항타응력에 이르러 항타가 종료되는 반면, 폐

단말뚝의 경우는 두 값이 격차를 유지하다가 최종관입 깊이에서 2개의 응력의 크기가 비슷한 상태로 허용항타응력에 이르러 항타가 종료됨을 알 수가 있다. 이러한 현상은 광양현장의 말뚝들에서도 유사하게 나타났다. 이는 개단말뚝과 폐단말뚝의 관입특성 차이에 기인하는 것으로, 개단말뚝의 관입성은 주면저항력에 의해 더욱 영향을 받고, 폐단말뚝의 관입성은 선단저항력에 의해 더 영향을 받는다는 것을 시사하는 것이라고 생각된다.

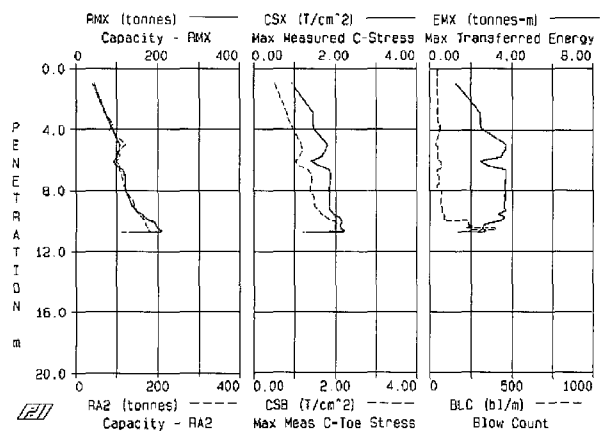
3.2 임피던스의 영향

항타관입성에 영향을 주는 여러 가지 요인중 임피던스(impedence, $Z=EA/C$; EA는 말뚝의 축방향 강성도, C는 충격파의 전달속도)는 항타관입성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(US DOT, 1996). 표 4는 포항과 광양현장에 있어서 일반강관말뚝(선단조건 변화)들에 대한 관입깊이와 임피던스의 관계를 나타낸 것이다. 두 현장에서의 말뚝은 모두 일정한 항타기준 ($0.9 \sigma_c$ 이내 또는 $BPM = 500$ 중 먼저 이르는 값에서 항타 종료)으로 타격되었기 때문에 관입된 깊이는 항타관입성을 반영한 결과라고 할 수 있다. 따라서 표 4에서와 같은 해당 말뚝의 관입깊이와 임피던스의 비교를 통해서 임피던스가 항타관입성에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

그림 6은 표 4의 내용을 도시한 것인데 그림에서와 같이 임피던스가 클수록 관입성(L/L_{max})이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 개단말뚝은 폐단말뚝에 비해 관입성(L/L_{max})이 우수하며, 또한 그림 6의 관입성(L/L_{MAX})의 기



(a) 개단말뚝 (강관 ϕ 406mm, 7.9 t, 120S)



(b) 폐단말뚝 (강관 ϕ 406mm, 7.9 t, 13C5)

그림 5. 개단말뚝과 폐단말뚝의 항타관입성 비교 (포항현장)

표 4. 임피던스와 관입깊이비(L/L_{max}, 관입깊이/최대관입깊이)

선단조건	Z(t/m/s)	L(m)	L/L _{max}	말뚝번호	
포항현장 L _{max} = 18.3(m)	개단	61.08	18.3	1.00	307
	폐단	61.08	14.6	0.80	4C7
	개단	40.5	13.8	0.75	607, 1107
	폐단	40.5	10.4	0.57	10C7, 7C7
광양현장 L _{max} = 22.3(m)	개단	61.08	22.3	1.00	305, 1505
	폐단	61.08	20.55	0.92	2C5, 6C5
	개단	48.37	22.15	0.99	904, 704
	폐단	48.37	20.55	0.92	10C4, 8C4

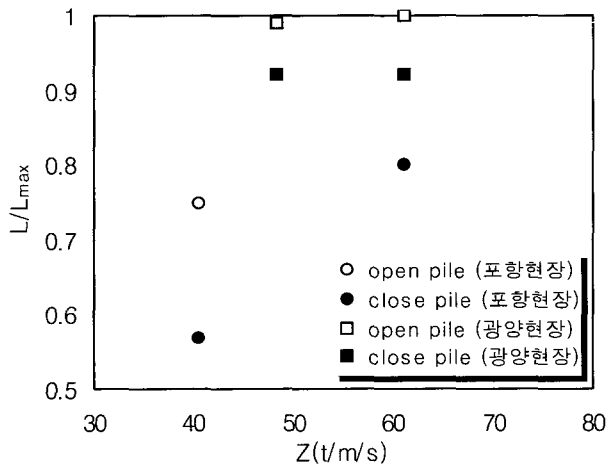


그림 6. 임피던스와 관입성(L/L_{max})의 관계

울기로부터 판단할 때, 개단말뚝의 관입성은 폐단말뚝의 관입성에 비해 임피던스에 약간 더 영향 받는 것으로 나타나고 있다.

임피던스가 항타관입성에 미치는 영향을 지반조건별로 살펴보면, 깊이가 깊어질수록 강도가 서서히 증가하는 일반적인 모래 지반조건(포항현장)에서는 항타관입성에 대한 임피던스의 영향이 크지만, 연약층 하부에 견고한 기반암층이 지지층으로 있는 지반조건(광양현장)에서는 항타관입성에 대한 임피던스의 영향이 상대적으로 작게 나타나고 있음을 알 수가 있다. 즉, 광양현장의 경우 연약층 직하부에 단단한 기반암층이 나타나므로 항타관입성에 대한 임피던스의 영향이 포항현장에 비해 상대적으로 작게 나타난 것에 기인한다. 이러한 결과는 선단에서 항타저항력이 상대적으로 큰 지반에서 경제적이고 안전한 항타관입을 위해서 임피던스 외에 재료특성(강도 등)을 고려할 필요가 있다는 것을 보여주는 것이다.

3.3 재료강도의 영향

말뚝의 강도가 항타관입성에 미치는 영향을 분석하기 위해 동일한 임피던스를 갖되 강도가 다른 강관말뚝(표 5 참조)을 같은 장소(광양현장)에서 허용항타응력까지 타격하는 방식으로 시험시공한 후 이들에 대해 항타관입성 분석을 수행하였다.

표 5에서와 같이 강도를 제외한 시험말뚝의 모든 조건이 거의 동일함에도 불구하고 관입깊이는 고강도강관말뚝이 일반 강관말뚝보다 더 큼을 알 수 있다. 이러한 관입성의 차이는 허용항타응력까지 타입한 시공관리기준에 기인하는 것으로 강도가 클수록 말뚝은 저항력이 큰 지반까지 재료의 파손없이 관입할 수 있음을 의미한다. 따라서 광양현장과 같이 견고한 지지층이 나타나는 지반조건에서는 재료강도가 큰 말뚝을 선택하는 것이 경제성 및 안전성에 있어 유리할 것으로 판단된다.

표 5로부터 2 종의 말뚝들은 모두 지반의 지지력이 대단히 양호하여 말뚝의 지지력은 재료의 허용한도까지 충분히 발휘할 수 있으므로 고강도강관말뚝은 일반 강관말뚝에 비해 재료의 우수한 특성을 그대로 지지력에 반영하고 있음을 알 수 있다.

표 6과 그림 7은 광양현장에서 시공된 말뚝에 대해 일반강관말뚝과 고강도강관말뚝의 시공결과를 말뚝재료의 축방향 허용하중과 비교하였다. 표 6과 그림 7에서와 같이 시험된 말뚝중 직경 508mm 고강도강관말뚝을 제외한 나머지 모든 말뚝의 최종 허용지지력은 재료의 축방향 허용하중과 같아 최적설계가 가능함을 알 수가 있다.

직경 508mm의 고강도강관말뚝의 지지력이 재료하중에 약간 부족하게 측정된 것은 광양현장의 경우 7톤 유압해머 1종류만으로 시험하였기 때문이다. 즉, 해머용

표 5. 말뚝의 강도에 따른 관입성 비교시험 결과(광양현장)

번호	말뚝규격 (mm×mm)	임피던스 (t/m/s)	말뚝의 강도	관입깊이 (m)	분석 말뚝 번호
1	ø 323×9.3(t)	37.6	SPS400	23.3	18O32
			SPS490	24.4	9HO32
2	ø 508×9.5(t)	61.1	SPS400	22.2	105, 305, 405, 505, 1505
			59.7	SPS490	24.2
3	ø 406×9.5(t)	48.4	SPS400	21.6	7O4, 9O4, 11O4, 12O4, 13O4, 14O4
			46.5	SPS490	24.4

표 6. 시험말뚝의 허용지지력과 재료하중의 비교(광양현장)

번 호	시험 말뚝 번호	말뚝 직경 (mm) × 두께 (mm)	말뚝 종류	관입 길이 (m)	시험 방법	재료 하중 (ton)	지반 허용 지지력 (ton)	최종 허용 지지력 (ton)	최종 허용 지지력 / 재료 하중	지반 허용 지지력 / 재료 하중
1	2HO5	Φ508×9.3 t	SPS 490	24.2	1차 Restrike	216.0	201.7	201.7	0.9	0.9
2	3HO4	Φ406×9.3 t	SPS 490	24.6	2차 Restrike	172.0	175.5	172.0	1.0	1.0
3	15HO4	Φ406×9.3 t	SPS 490	24.4	E O I D	172.0	175.5	172.0	1.0	1.0
4	12HO35	Φ355×9.3 t	SPS 490	22.0	2차 Restrike	150.0	152.5	150.0	1.0	1.0
5	14HO35	Φ355×9.3 t	SPS 490	23.7	E O I D	150.0	162.0	150.0	1.0	1.1
6	4HO32	Φ323×9.3 t	SPS 490	24.0	2차 Restrike	136.0	146.1	136.0	1.0	1.1
7	9HO32	Φ323×9.3 t	SPS 490	24.4	1차 Restrike	136.0	139.0	136.0	1.0	1.0
8	5HO2	Φ273×9.1 t	SPS 490	24.0	1차 Restrike	111.0	130.4	111.0	1.0	1.2
9	17HO2	Φ273×9.1 t	SPS 490	24.0	E O I D	111.0	124.0	111.0	1.0	1.1
10	1O5	Φ508×9.5 t	SPS 400	21.4	1차 Restrike	164.0	175.5	164.0	1.0	1.1
11	3O5	Φ508×9.5 t	SPS 400	22.2	1차 Restrike	164.0	187.5	164.0	1.0	1.1
12	4O5	Φ508×9.5 t	SPS 400	22.8	1차 Restrike	164.0	185.5	164.0	1.0	1.1
13	15O5	Φ508×9.5 t	SPS 400	22.4	1차 Restrike	164.0	190.5	164.0	1.0	1.2
14	7O4	Φ406×9.5 t	SPS 400	22.1	2차 Restrike	130.0	155.5	130.0	1.0	1.2
15	12O4	Φ406×9.5 t	SPS 400	21.1	2차 Restrike	130.0	159.5	130.0	1.0	1.2
16	13O4	Φ406×9.5 t	SPS 400	21.4	1차 Restrike	130.0	156.0	130.0	1.0	1.2
17	14O4	Φ406×9.5 t	SPS 400	21.6	1차 Restrike	130.0	168.5	130.0	1.0	1.3

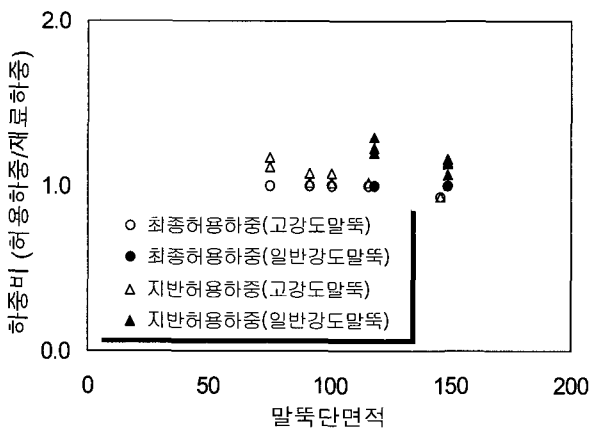


그림 7. 강관말뚝의 단면적별 재료하중에 대한 허용하중비(광양현장)

량에 비해 고강도말뚝의 강성이 커서 재료허용하중을 모두 발휘할 수 있는 만큼 충분히 관입시킬 수 없었기 때문이다. 이러한 현상은 그림 7에서와 같이 지반허용하중과 재료허용하중의 비는 말뚝이 고강도일수록 말뚝의 단면적이 클수록 작아지는 것으로도 간접 확인할 수가 있다.

결과적으로 본 연구에서와 같이 적절히 시공관리에 의해 항타관입성이 보장된다면 설계하중을 재료허용하중만큼 올리는 것이 가능하고, 특히 추가의 재료비 부담 없이 지지력을 높일 수 있는 고강도강관말뚝의 최적설

계도 가능한 것으로 평가된다.

상기에서 언급한 최적설계가 가능하다면, 전술한 바와 같이 현재 우리나라의 강관말뚝의 설계하중은 지지력만으로 비교할 경우 재료허용하중의 평균 51%만(조천환, 1998)을 활용하고 있으므로 이에 비해 일반강관말뚝은 1.9배, 고강도강관말뚝은 2.6배의 경제성 향상이 가능하게 된다.

3.4 해머의 영향

항타시 주 영향 요인은 해머, 말뚝재료 및 모양, 지반 조건 등이다. 특히 주어진 재료 및 지반조건에서 말뚝이 충분한 관입성을 발휘하게 하기 위해서는 적절한 해머의 선정이 대단히 중요하다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 해머조건을 변경하여 이에 따른 관입성 및 지지력 특성을 분석하였다.

표 7은 포항현장에서 수행한 시험중 해머의 종류에 따른 말뚝의 관입깊이와 허용지지력의 변화를 나타낸 것이다. 표 7의 각 말뚝들은 지정된 해머를 이용하여 허용항타응력까지 타입한 후 재하시험을 실시하였다.

표 7에서와 같이 전반적으로 7톤 해머는 5톤 해머에 비해 관입성을 증가시켜 지지력 측면에서도 유리한 결과를 보여주고 있음을 알 수가 있다. 그러나 이러한 차

표 7. 적용해머에 대한 관입깊이와 허용지지력의 비교(포항현장)

말뚝종류	항 목	ø 508mm 강관		ø 406mm 강관		분석 말뚝 번호
		관입 깊이 (m)	허용 지지력 (ton)	관입 깊이 (m)	허용 지지력 (ton)	
7 톤 해머	개단	18.3	200.0	13.7	121.0	307, 1107
	폐단	10.3	130.5	10.5	90.0	2C7, 7C7
5 톤 해머	개단	17.8	180.0	12.8	121.5	1505, 1205
	폐단	9.6	73.5	10.5	130.0	14C5, 13C5
비 고		허용지지력은 재항타시험값중 작은 값임.				

이는 크게 나타나고 있지 않는데 이는 허용항타응력까지 말뚝을 관입한 시험방법에 기인하는 것이다. 즉, 말뚝을 허용항타응력까지 타입하기 위해 5 톤 해머의 경우 해머를 최대한 활용(최대 낙하높이까지 항타)한 반면 7 톤 해머의 경우는 그 이하로 활용하였는데, 실제로 본시공시에는 해머를 최대 낙하높이까지 지속적으로 활용하는 것은 곤란하다.

4. 결론

말뚝이 요구되는 관입깊이 또는 지지력을 얻는데 까지 항타되지 못할 경우, 즉 항타관입성이 확보되지 못할 경우는 지지력을 예측한 모든 정적방법들은 의미가 없게 된다. 그럼에도 설계 실무에서는 이러한 항타관입성 분석을 이해하지 못하는 경우도 있고 또한 이에 대한 중요성을 인식하지 못하여 항타관입성 분석없이 설계를 수행하는 경우도 있다. 따라서 본 연구에서는 항타관입성에 대한 특성을 분석하여 이에 대한 자료를 제공하기 위해 항타분석기를 이용하여 항타시 관입성에 영향을 주는 요인에 대해 검토하였다.

항타시 단위 선단지지력과 주변마찰력의 관계는 반비례 하는 것으로 나타났다. 이는 항타시 말뚝의 관입성은 선단저항 뿐 만 아니라 주변마찰저항에도 좌우되는 것을 의미하는 것이다. 이러한 사실은 표준관입시험값(N)의 절대치만으로 관입깊이를 가정하는 일반적인 설계방법을 수정할 필요가 있음을 시사하는 것이다. 따라서 타입말뚝의 설계시에는 파동이론분석을 수행하는 것이 바람직하고 사료된다.

말뚝선단의 모양(개단 및 폐단)별 항타관입성을 분석한 결과, 개단말뚝이 폐단말뚝에 비해 관입성이 우수한 것으로 나타났으며, 또한 개단말뚝 및 폐단말뚝의 항타관입성은 각각 주변저항력 및 선단저항력에 의해 더 영향 받는 것으로 나타났다.

전반적으로 임피던스가 클수록 항타관입성이 우수한 것으로 나타났다. 그러나 연약층 하부에 항타저항력이 상대적으로 큰 선단지지층이 나타나는 지반조건에서의 항타관입성은 임피던스에 크게 영향을 받지 않으므로, 이 경우는 항타관입성 분석시 말뚝재료의 강도를 고려할 필요가 있는 것으로 평가되었다. 따라서 이러한 지층조건이 나타나는 지반에서는 재료강도가 큰 말뚝을 선택하는 것이 경제성 및 안전성에 있어 유리할 것으로 판단된다. 해머의 용량 또한 항타관입성에 중요한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

전술한 일련의 시험 분석결과를 토대로 판단할 때 설계시에는 해머조건, 말뚝조건, 지반조건 등을 고려한 파동이론분석을 반드시 실시하며 주어진 지반조건하에서 적절한 해머와 말뚝조건을 선정하여 최적설계를 하는 것이 향후의 과제라고 판단된다. 또한, 이러한 과제가 해결될 경우 지반의 지지력을 충분히 활용하기 위한 고강도강관말뚝의 활용성도 고려할 필요가 있다고 판단된다. 특히, 강말뚝은 큰 비용의 추가없이 고강도로 제작하는 것이 가능하기 때문에 말뚝기초공의 경제성과 안전성 측면에서 향후 고강도강관말뚝의 이용이 기대된다.

참 고 문 헌

1. 이명환, 홍헌성, 이원재(1994), "말뚝기초의 최적설계", Keynote Lecture, '94 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.60-76.
2. 이명환, 홍헌성, 조천환(1996), "강관말뚝의 압축하중지지능력", 강관말뚝기초공법 세미나, pp.3-47.
3. 조천환(2003), "타입 말뚝의 지지력 증가효과 특성", 한국지반공학회, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제4호, pp.235-246.
4. 조천환(1998), "시간경과에 따른 타입말뚝의 지지력증대 특성에 관한 연구", 박사학위 논문, 한양대학교 대학원, pp.193.
5. 한국지반공학회, 포항종합제철, 한국강관협회, 파일테크(1997), 개선된 강관말뚝의 설계와 시공, 강관말뚝의 최적설계·시공 개선방안 연구 보고서, 한국지반공학회, pp.304.
6. 한국지반공학회(2003), 구조물기초설계기준해설, pp.277-320.
7. 한국지반공학회(1999), 강관말뚝의 설계와 시공가이드, pp.99.
8. 한국지반공학회(2002), 깊은기초, pp.221-265.
9. Crowther, C. L.(1988), *Load Testing of Deep Foundations. The Planning, Design, and Conduct of Pile Load Tests*, John Wiley & Sons.
10. GRL Associates, Inc.(1996), *CAPWAP User Manual*.
11. GRL Associates, Inc.(1996), *GRLWEAP User Manual*.
12. Pile Dynamics, Inc.(1995), *PDA User Manual*.
13. US Dpt. of Transportation(1996), *Design and Construction of Driven Pile Foundation*, FHWA Workshop Manual.

(접수일자 2003. 3. 25, 심사완료일 2003. 9. 15)