

타입 말뚝의 지지력 증가효과 특성

The Characteristics of the Set-up Effect of Driven Piles

조 천 환* Cho, Chun-Whan

Abstract

Since the study of Lee et al.(1994) there have been some case studies on the set-up effect of driven piles in Korea country. However, comprehensive examination on the analyses of the set-up effect with various testing data has not been carried out. In particular, the analysis of the influence of soil type and pile shape on the set-up effect has not been reported. It is necessary to analyse the test results of production piles in order to apply the set-up effect of driven piles for the field engineering. In this study some test piling and analyses were performed to give basic information to the piling design as well as the research on the set-up effect in sandy soils. The analyses on the set-up effect were performed with the monitoring data obtained from the high-strain dynamic loading tests. It was shown that the set-up effect of driven piles was not only affected by soil type but also by soil formation history. It turned out that the set-up effect in sandy soils was considerable one that should not be ignored in the field, and that the bearing capacity increase of pile is mainly caused by the increase of shaft resistance. It was shown that the set-up effect of closed pile was larger than that of opened pile in clayey soils, while the set-up effect of opened pile was larger than that of closed pile in sandy soils.

요 지

국내의 경우 이 등(1994)의 연구를 시작으로 국지 현장별로 타입말뚝의 지지력 증가효과에 대한 사례연구들이 있었다. 그러나 충분한 시험자료를 바탕으로 한 지지력 증가효과에 대한 전반적인 검토는 아직 미흡한 실정이고, 또한 지지력 증가효과에 지반조건 및 말뚝의 형상이 미치는 영향에 대해서는 아직 보고 된 바 없다. 타입말뚝의 지지력 증가효과를 실무적으로 이용하기 위해서는 현장에서 실구조물에 적용된 말뚝에 대한 시험자료의 분석을 실시하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 말뚝기초의 설계 및 향후 사질토에서의 지지력 증가효과 등의 연구를 위한 기본 자료로 활용하기 위해 실구조물에 적용되는 다양한 시험말뚝의 시공과 동재하시험 자료 분석을 통해 지지력 증가효과에 대한 현상을 알아보았다. 말뚝의 동재하시험의 분석 결과, 말뚝지지력의 증가는 토질별로도 영향을 받지만 조성이력에도 영향을 받는 것으로 분석되었으며, 특히 사질토에도 상당한 지지력 증가효과가 나타났다. 이러한 말뚝의 지지력의 증가는 주로 주변부에서 발생하였으며, 선단형상에 따른 지지력 증가효과는 점성토에서는 폐단말뚝이 크고, 사질토에서는 개단말뚝이 큰 것으로 나타났다.

Keywords : Driven pile, Dynamic load test, Set-up effect, Set-up factor, Time effect

1. 서 론

말뚝지지력의 시간경과효과(time effect)를 분석하기

위해서는 항타시 시험과 이후 시간경과에 따른 일련의 시험이 필요하다. 항타시 시험은 일반적으로 항타관입성(driveability) 분석을 수반하므로 항타분석기 등에

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

의한 동적측정이 필요하게 된다. 따라서 말뚝지지력의 시간경과효과에 대한 연구는 동적측정기의 활용이 시작된 '80년대 초에 시작되어 '80년대 후반에 활발하게 이루어 졌다. 그러나 '60년대 말에서 '70년대 초에도 Parsons (1966), Yang 등(1970), Tavenas 등(1971)에 의해 항타기록 또는 정재하시험에 의해 어렵게 시간경과효과에 대한 연구가 이루어졌지만 현상의 보고에 치중한 면이 있다.

말뚝지지력의 시간경과효과에 대한 전반적인 연구경향은 '90년 이전까지의 연구들이 주로 현상의 보고에 치중한 반면 '90년 이후 최근의 연구들은 이를 실무에 반영하고자 하는 차원에서 연구가 진행되고 있는 것으로 평가된다. 특히 최근에는 사질토에서 set-up 효과의 원인에 대한 연구가 관심을 모으고 있다.

항타 후 말뚝주변 흙의 강도변화가 시간경과에 따라 평형상태로 회복하는 현상은 지반의 특성에 크게 의존하며, 여기에는 말뚝의 지지력이 증가하는 set-up현상과 지지력이 감소하는 relaxation 현상이 있다. 실무적인 관점에서 보면 대부분의 현장에서는 항타 후 지지력이 증가하는 set-up현상이 주로 나타나게 된다. 본 연구에서는 말뚝지지력의 시간경과효과 중 시간경과에 따라 지지력이 증가하는 set-up효과에 대해서만 국한하여 분석하였다.

말뚝지지력의 시간경과효과에 대한 연구는 시간경과에 따라 지지력이 감소하는 relaxation 현상에 대해 먼저 시작되었는데, 이는 Parsons(1966) 등에 의해 처음 보고된 후 Yang 등(1970), Seidel 등(1992), York 등(1994), 천 등(1997)에 의해 연구되었다. set-up 현상에 대한 연구는 Tavnas(1972) 등에 의해 보고된 후 Karlsrud 등(1986), Skov 등(1988), Fellenius 등(1989), Svinkin (1994), 이 등(1994), Paikowsky 등(1996), 이 등(1997)에 의해 연구되었다. 한편 Mitchell(1986), Schmertmann (1991) 등, Chow 등(1998)은 사질토의 aging에 대해서 연구하였으며, 이 분야는 최근에 주요 연구주제로 되고 있다.

set-up효과를 실무에 반영하기 위해서는 현장에서 실 구조물에 적용된 말뚝에 대한 시험자료의 분석을 통해 이들의 경향을 조건별로 상세히 파악하는 것이 필요하다고 본다. 국내의 경우 이 등(1994)의 연구를 시작으로 국지 현장별로 set-up효과에 대한 사례연구(이 등, 1995 ; 이 등, 1997; 천 등, 1998)들이 있었고 또한 실무설계를 위한 분석 연구(천 등, 1999; 조 등, 2001; 조, 2002)등이

있었다. 그러나 다양한 자료를 바탕으로 한 set-up효과에 대한 전반적인 검토가 없고, 또한 set-up효과에 토질 종류, 말뚝의 형상 등이 미치는 영향에 대해서는 아직 보고된 바 없다. 최근에 사질토의 set-up효과의 원인분석에 대한 연구가 세계적 관심사로 대두되고 있는바 이러한 원인의 연구를 시도하기 위해서는 다양한 시험 자료를 이용하여 set-up효과에 대한 전반적인 경향을 분석해 보는 것도 의미가 있다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 말뚝기초의 설계에 반영할 수 있는 기초자료를 제공하고 향후 사질토에서의 set-up 효과 등의 연구에 기본 자료를 제공하기 위해 다양한 실험시험을 통해 set-up효과에 대한 현상을 분석해 보았다.

2. 현장 및 시험 개요

2.1 시험 내용 및 방법

본 연구는 타입말뚝의 set-up 효과에 대한 자료를 분석·제시함으로써 신뢰성이 있는 말뚝설계에 도움을 주고 향후 관련 연구의 기초 자료로서 활용하기 위함이다. 이러한 목적을 달성하기 위해 6개 지역에서 총 77본의 말뚝을 타입시공한 후 실험시험을 수행하였다.

표 1은 현장별 시험내용을 요약한 것이다. 말뚝은 현장에 따라 다양한 말뚝이 이용되었으며 포항, 광양, 시흥현장에서는 선단 형상에 따른 관입성을 비교하기 위해 개단말뚝과 폐단말뚝(평면 폐단 적용, 20mm 강관을 베벨링한 선단부에 용접)을 시험하였다. 특히 광양현장에서는 강관의 강도에 따른 항타관입성을 분석하기 위해 일반강도말뚝(SPS 400)과 고강도 강관말뚝(SPS 490)을 이용하여 시험하였다. 6개 현장 모두 유압해머로 직타하여 말뚝을 설치하였다. 다만, 부산현장의 경우 상부 매립층에 전석이 포함되어 있는 관계로 매립층을 천공기(T4)로 굴착한 후 말뚝을 타격하였다.

시험시 적용된 지지력 시험방법은 ASTM D 4945 (Crowther, 1988)에 따라 항타분석기를 이용한 동재하 시험(high strain dynamic load test)을 실시하였다. 항타시 사용된 항타분석기는 미국 PDI사의 MODEL PAK이다(PDI, 1995).

항타 시에는 항타시공성과 관련된 주요 항목(항타에너지, 항타응력, 저항력 등)을 관입깊이 및 타격수에 따라 측정하였다. 항타종료기준은 현장의 시험목적에 따라 허용항타응력까지 타격하여 항타를 종료하였다. 말

표 1. 현장별 시험내용

현장명	시험말뚝종류 (mm)	시험말뚝 본수 (본)	동재하시험 (회)		시공법	비고
			EOID	restrike		
포항	강관말뚝(ø406, 7.9 t)	5	5	7	직항타 (유압7톤)	· 허용타격응력까지 항타 · 개단 및 폐단 말뚝
	강관말뚝(ø508, 9.5 t)	6	6	9		
광양	강관말뚝(ø406, 9.5 t)	8	8	9	직항타 (유압7톤)	· 허용타격응력까지 항타 · 개단 및 폐단 말뚝 · 일반 및 고강도 강관말뚝 비교
	강관말뚝(ø508, 9.5 t)	7	7	8		
	고강도강관말뚝(ø273~ø508)	16	16	11		
시흥	강관말뚝(ø406, 10 t)	9	9	9	직항타 (유압7톤)	· 허용타격응력까지 항타 · 개단 및 폐단 말뚝
	콘크리트말뚝(PHC 400)	9	9	9		
영종도	강관말뚝(ø406, 12 t)	5	5	5	직항타 (유압7톤, 10톤)	· 허용타격응력까지 항타
	강관말뚝(ø609, 12 t)	2	2	2		
동해	콘크리트말뚝(PHC 350)	5	6	10	직항타 (유압7톤)	· 허용타격응력 이내에서 종료 · 폐단 말뚝
부산	콘크리트말뚝(PHC 450)	5	5	8	T4천공후 직항타 (유압7톤)	· 허용타격응력 이내에서 종료 · 폐단 말뚝
합 계		77	78	87		

뚝의 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.

항타시 측정된 항타 시공성 관련 데이터는 PDAPLOT 프로그램(PDI, 1995: 항타시 측정된 항목을 관입깊이 또는 타격수에 따라 표시할 수 있는 프로그램)을 이용하여 분석하였으며(조 등, 2003), 또한 EOID와 재항타시 시험에서 측정된 응력파는 CAPWAP(CAse Pile Wave Analysis Program, GRL Associate Inc., 1996)을 이용하여 분석함으로써 지지력을 산출하였다. CAPWAP에 의한 지지력 결정은 우선, 하중-침하량 곡선을 도출한 후 여기에 Davisson 판정법(Crowther, 1988)을 적용하여 항복하중을 결정하였다.

2.2 지반조사

본 시험 현장에서는 시추와 표준관입시험을 위주인 지반조사가 수행되었다. 포항 및 광양의 경우 단일 시험지점에 대한 지반조사가 이루어졌지만 나머지 지역은 일정 단지 내에서 시험 항타한 지점별로 지반조사가 수행되었다. 따라서 조사내용이 방대하므로 본 논문에는 이러한 지반조사 자료(조, 1998)를 요약하여 제시하였다.

(가) 포항현장

시험항타를 위한 시험장소의 지층구성은 지표면으로

부터 매립토층(지표로부터 1.5m: N값 11~13), 퇴적토층(지표로부터 14.7m), 이하 기반암층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있다. 퇴적층은 상부의 모래층(지표로부터 11.0m: N값 21~49)과 하부의 모래자갈층(지표로부터 14.0m, N값 50 이상)으로 이루어져 있다. 공내 지하수위는 지표로부터 약 6.5m에서 형성되었다.

(나) 광양현장

시험부지에 대한 시추조사 성과에 의하면, 기초지반은 매립토층(지표로부터 약 5.0m: N값 8~12), 퇴적토층(지표로부터 약 20.0m~21.6m: N값 1~3), 잔류토층(지표로부터 약 22.0m: N값 50 이상) 이하 기반암층으로 구성된 층서구조를 나타내고 있다. 퇴적토층은 실트질 점토로 구성된 매우 연약한 층으로 이루어졌다. 기반암은 사암으로 이루어져 있다. 공내 지하수위는 지표로부터 약 2.0m에서 형성되었다.

(다) 시흥현장

시험 현장의 지층구성은 지표면을 이루고 있는 3m 내외의 매립층(N값 7~12) 하부에 연약층을 포함한 실트질 모래, 점토질 실트로 구성된 퇴적층(N값 7~9)이 평균 3.0~16.1m까지 나타나고, 그 하부에 모래질 퇴적층(N값 15~25)이 위치에 따라 평균 16.1~28.7m까지 존재한다. 퇴적층 아래쪽의 일부 위치에서는 풍화토층이 나타나거나 풍화암층, 연암층이 바로 나타나기도 한다. 기반암은 편마암이며 공내 지하수위는 지표 하 2.2~2.6m 정도로 조사되었다.

(라) 영종도현장

본 현장은 상당히 광범위하여 많은 양의 시추조사가 수행되었는데 시추조사 성과에 의한 시험지역의 지층은 생성기원 및 층서에 따라 준설 매립층(두께 1.0~5.3m, 평균 N값 7~9), 상부 해성 퇴적층(두께 2.1~14.8m, 평균 N값 0~12), 하부 해성 퇴적층(두께 19.2~38.0m, 평균 N값 4~50) 잔류토층(두께 0.6~5.1m, 평균 N값 27~50) 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.

(마) 동해현장

시추조사결과에 따르면 시험지역의 층서는 지표로부터 모래자갈층, 모래층, 자갈층 이하 기반암층의 순서로 비교적 균등하게 이루어진 지반이다. 기반암층 위의 모래층 및 모래자갈층은 하천수계에 의해 운반되어 퇴적된 충적토층으로 분류된다. 기반암은 석회암으로 구성되어 있으며 공내 지하수위는 지표하 0.7~1.3m 정도에서 나타나고 있다. 모래자갈층은 지표로부터 4.5~6.0m의 두께(평균 5.1m)로 이루어져 있으며 N값은 평균 29.6 정도로 나타나고 있다. 하부의 모래층은 지표로부터 21.0~26.0m까지 존재하고 있으며(평균두께 16.5m), N값은 13.0~37.0(평균 20.2)까지 나타나고 있다. 이하 자갈층은 N값이 44 정도인 조밀한 지층이 평균 11.0m 두께로 기반암층까지 분포되어 있다.

(바) 부산현장

시험지역의 층서는 지표로부터 매립층, 퇴적층, 기반암의 순서로 나타나고 있다. 매립층은 인위적으로 조성된 층으로 보이며 모래 및 점토에 전석이 혼재되어 있고 두께는 0~9.3m 정도(N값 11~18)로 이루어져 있다. 퇴적층은 주로 점토자갈층으로 지표로부터 평균 35.3m 깊이(N값 34~40)까지 나타나고 있으며 층의 상부에서는 모래 또는 모래자갈층이 협재되어 있기도 한다. 퇴적층 하부에는 풍화토층 이하 기반암층이 나타나며 모암은 안산암이다. 대부분의 층에 자갈이 포함되어 있고 전석이 간혹 나타나기도 하여 N값은 불규칙하게 나타난다. 공내 지하수위는 지표하 2.9~3.1m 정도에서 존재하고 있다.

2.3 현장 항타 및 시험 결과

국내 6개 지역에서 실시한 77개소 말뚝에 대한 총 165회 시험한 시험결과를 정리하면 표 2와 같다.

3. 시험결과 분석

3.1 전체지지력

3.1.1 전체 지지력 증가비

그림 1은 표 2의 데이터를 이용하여 실물 시험한 6개 현장 총 77개 말뚝의 항타시 및 재항타시의 단위면적당 선단지지력(q_b)과 단위면적당 주면마찰력(f_s)을 도시한 것이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 재항타시 지지력은 항타시 지지력에 비해 전체적으로 증가하였고, 특히 주면마찰력의 증가가 두드러짐을 알 수 있다. 선단지지력은 변화가 거의 없음을 알 수 있는데 이는 재항타시험시 타격에너지의 부족으로 에너지가 선단부까지 충분히 전달되지 못함으로써 항타시에 비해 선단지지력이 작게 측정된 것에 기인한다. 즉, 재항타시험시 타격에너지가 제한되어 말뚝의 지지력을 충분히 발현(mobilize)시키지 못함으로써, 상대적으로 타격에너지의 전달이 작은 선단지지력이 과소평가된 것이다.

상기의 타격에너지 문제를 감안하여 그림 2는 동일한 시험자료에 대해 다음 세 경우의 값을 계산한 후 이들

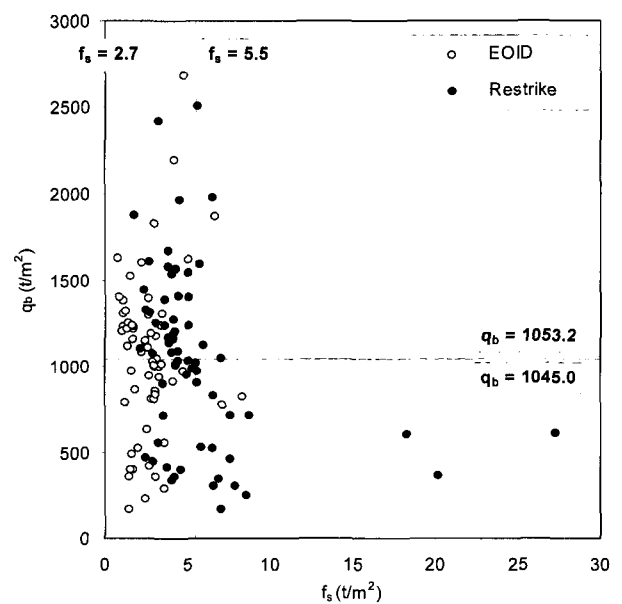


그림 1. 항타시와 재항타시의 단위면적당 주면마찰력과 선단지지력

표 2. 동재하시험 결과

관망 위치	시험 항목 번호	원목직경×두께(mm) (장재 종류)	선단 종류	관위 길이 (m)	시험방법	CAPWAP분석 및 Davison 관정법에 의한 항박하중 관정결과(ton)				EMX (t/m)	경과 원수 (원)	주요 토질조건	
						주 면 지지력	선 단 지지력	CAPWAP capacity	항박 하중			skin	toe
포함	2C7	φ508×9.5 t (SPS400)	폐단	10.3	E/OID	70.0	206.0	276.0	276.0	3.9	15	S	S
					1차Restrike	84.0	203.0	287.0	281.0	6.2			
					2차Restrike	90.0	207.0	297.0	279.0	5.7			
					E/OID	207.6	157.0	364.6	264.0	5.8			
					1차Restrike	255.0	145.0	400.0	400.0	7.1			
	307		개단	18.3	E/OID	46.0	185.0	231.0	213.0	4.2			
					1차Restrike	90.0	183.0	273.0	273.0	6.0			
	4C7		폐단	14.6	E/OID	63.0	185.0	245.0	220.0	3.9			
					1차Restrike	64.0	172.0	236.0	147.0	5.7			
	14C5		폐단	9.6	2차Restrike	54.0	182.0	236.0	192.0	3.7			
					E/OID	71.0	129.0	200.0	200.0	3.8			
	1505		개단	17.8	1차Restrike	215.0	145.0	360.0	360.0	6.1			
					E/OID	45.0	161.0	206.0	206.0	2.9			
	7C7		폐단	10.5	1차Restrike	74.0	187.0	261.0	180.0	6.7			
2차Restrike		59.0			183.0	242.0	242.0	3.7					
10C7	폐단	10.3	E/OID	22.0	150.0	172.0	172.0	2.1					
			1차Restrike	31.0	187.0	218.0	199.0	4.1					
1107	개단	13.7	2차Restrike	53.0	169.0	222.0	195.0	4.1					
			E/OID	42.0	148.0	190.0	190.0	2.7					
13C5	폐단	10.5	1차Restrike	62.0	180.0	242.0	242.0	4.1					
			E/OID	34.8	181.2	216.0	185.0	3.0					
1205	개단	12.8	1차Restrike	57.2	202.5	260.0	260.0	4.4					
			E/OID	40.0	149.0	189.0	189.0	2.5					
607	개단	13.9	1차Restrike	82.0	161.0	243.0	243.0	4.2					
			E/OID	29.0	126.0	155.0	155.0	1.9					
1HC5	폐단	23.0	1차Restrike	105.0	146.0	251.0	251.0	3.8					
			2차Restrike	94.0	150.0	244.0	244.0	3.3					
2HO5	개단	24.2	E/OID	62.5	243.0	305.5	304.0	5.1					
			E/OID	125.6	202.4	328.0	328.0	6.0					
3HO4	개단	24.6	1차Restrike	202.7	200.7	403.4	403.4	9.6					
			2차Restrike	173.3	190.3	363.6	363.6	8.5					
8HC4	폐단	23.6	E/OID	157.0	210.0	367.0	367.0	6.2					
			1차Restrike	178.8	206.8	385.5	385.5	9.7					
8HO4	개단	24.1	2차Restrike	108.3	242.6	350.9	350.9	8.5					
			E/OID	64.9	248.9	313.0	313.0	6.0					
15HO4	개단	24.4	E/OID	143.5	173.7	317.2	317.2	5.6					
			E/OID	161.7	189.3	351.0	351.0	5.8					
12HO35	개단	22.0	E/OID	73.9	180.7	254.6	254.6	4.2					
			1차Restrike	78.5	169.6	248.1	248.1	4.9					
14HO35	개단	23.7	2차Restrike	111.0	194.0	305.0	305.0	6.2					
			E/OID	151.3	172.7	324.0	324.0	6.1					
4HO32	개단	24.0	E/OID	182.0	153.0	315.0	315.0	5.2					
			1차Restrike	158.8	161.8	320.6	320.6	8.0					
9HO32	개단	24.4	2차Restrike	102.7	189.5	292.2	292.2	7.9					
			E/OID	104.0	180.0	284.0	284.0	5.2					
10HC32	폐단	23.6	1차Restrike	80.0	198.0	278.0	278.0	7.4					
			E/OID	42.9	227.1	270.0	265.0	5.6					
16HO32	개단	23.9	E/OID	77.6	217.4	295.0	295.0	5.8					
			E/OID	96.7	107.3	204.0	204.0	2.5					
18O32	개단	23.3	E/OID	96.7	107.3	204.0	204.0	2.5					
			E/OID	98.0	157.0	255.0	255.0	4.3					
5HO2	개단	24.0	1차Restrike	113.9	146.8	260.7	260.7	6.2					
			2차Restrike	105.1	140.9	247.0	247.0	6.4					
11HC2	폐단	24.0	E/OID	58.1	164.9	233.0	233.0	4.5					
			E/OID	109.7	138.3	248.0	248.0	4.8					
17HO2	개단	24.0	E/OID	76.0	220.0	296.0	296.0	5.5					
			1차Restrike	146.8	204.9	351.7	351.0	8.1					
105	개단	21.4	E/OID	35.0	265.0	300.0	245.0	5.3					
			1차Restrike	98.0	253.6	351.6	351.0	7.9					
2C5	폐단	20.4	E/OID	106.3	203.7	310.0	310.0	4.8					
			1차Restrike	137.4	237.6	375.0	375.0	8.0					
305	개단	22.2	2차Restrike	172.2	197.8	370.0	370.0	7.7					
			E/OID	96.3	191.7	288.0	288.0	4.5					
405	개단	22.8	1차Restrike	160.0	210.0	370.0	371.0	8.7					
			E/OID	64.5	222.5	287.0	277.0	5.4					
505	개단	22.0	E/OID	35.0	250.0	285.0	140.0	5.3					
			1차Restrike	69.9	279.5	349.4	245.0	10.4					
6C5	폐단	20.7	2차Restrike	82.3	269.4	351.6	307.0	8.8					
			E/OID	92.4	224.6	317.0	317.0	5.5					
1505	개단	22.4	1차Restrike	145.7	235.3	381.0	381.0	8.8					
			E/OID	72.9	168.7	241.5	241.0	3.9					
704	개단	22.1	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	E/OID	31.4	171.4	202.8	150.0	3.1					
			1차Restrike	106.1	199.4	305.5	280.0	7.9					
904	개단	22.2	2차Restrike	80.0	192.0	272.0	270.0	6.4					
			E/OID	79.5	168.7	248.2	248.0	3.7					
10C4	폐단	20.5	E/OID	40.3	197.7	238.0	190.0	3.4					
			1차Restrike	45.8	242.2	288.0	288.0	4.7					
1104	개단	21.0	E/OID	78.0	200.0	278.0	249.0	6.0					
			E/OID	59.0	207.0	266.0	266.0	4.2					
1204	개단	21.1	1차Restrike	102.0	186.0	288.1	288.0	5.6					
			2차Restrike	103.2	215.8	319.0	319.0	6.6					

표 2. 동재하시험 결과 (계속)

현장 위치	시험 발목 번호	말뚝직경 × 두께(mm) (강재종류)	선단 종류	관입 깊이 (m)	시험방법	CAPWAP분석 및 Davison 판정법에 의한 항복하중 판정결과(ton)				EMX (t-m)	경과 일수 (일)	주요 토질 조건							
						주 연 지지력	선 단 지지력	CAPWAP capacity	항복 하중			skin	toe						
광양	1304	Φ406 × 9.5 t (SPS400)	개단	21.4	EIOD	88.3	169.4	257.7	257.0	3.3	24	C/SM	SM (WF)						
	Restrike				130.3	182.1	312.4	312.0	6.5										
	1404		개단	21.6	EIOD	83.4	152.4	245.8	245.0	3.1	7								
					Restrike	137.6	200.0	337.6	337.0	7	25								
시흥	1SS	Φ 406 × 10 t (SPS400)	개단	29.1	EIOD	106.1	104.9	211.0	211.0	4.9	4	SM	S						
	Restrike				255.0	45.0	300.0	300.0	6.1										
	2SS				개단	28.4	EIOD	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	EIOD	122.6	142.4	265.0				265.0	6.2	3			
	Restrike				269.6	39.9	329.5	329.5	6.4										
	4SS				개단	26.1	EIOD	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	EIOD	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	EIOD	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	EIOD	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	EIOD	123.1	161.9	265.0				265.0	7.5	4			
	Restrike				198.2	117.7	315.8	315.8	6.6										
	9SS				개단	27.1	EIOD	94.6	154.4	249.0				249.0	4.3	5			
	Restrike				144.2	156.3	300.5	300.5	6.3										
	1SP				Φ 400 PHC	폐단	27.9	EIOD	33.8	151.2				185.0	185.0	4.3	4	SM	S
	Restrike							101.0	135.0	235.9				235.9	5.7				
2SP	개단	27.2	EIOD	64.4				211.6	276.0	276.0	6.8	4							
Restrike	140.0	160.0	300.0	300.0				6.5											
3SP	개단	28.1	EIOD	71.4				177.8	249.2	249.2	6.2	3							
Restrike	175.0	120.0	295.0	295.0				6.4											
4SP	개단	25.3	EIOD	51.1				201.8	253.0	253.0	5.8	3							
Restrike	85.0	165.0	250.0	250.0				6.0											
5SP	개단	25.2	EIOD	59.5				186.5	246.0	246.0	6.5	1							
Restrike	85.2	202.0	288.0	288.0				6.3											
6SP	개단	26.2	EIOD	68.0				162.0	250.0	250.0	5.7	4							
Restrike	135.0	150.0	285.0	285.0				6.6											
7SP	개단	26.0	EIOD	55.7				199.3	255.0	255.0	5.3	5							
Restrike	131.7	136.3	268.0	268.0				6.2											
8SP	개단	27.0	EIOD	56.9				195.7	252.7	252.7	6.0	4							
Restrike	120.4	155.9	276.3	276.3				6.3											
9SP	개단	26.5	EIOD	47.0				193.0	240.0	240.0	4.2	5							
Restrike	157.3	130.3	297.6	297.6				6.4											
영종도	1Y6	Φ609.6 × 12 t (SPS 400)	개단	32.1				EIOD	75.0	230.0	305.0	305.0	6.1	9	C	S			
	Restrike							198.5	162.6	361.6	361.6	9.1							
	2Y6		개단	31.3	EIOD	181.4	106.4	287.7	-	-	7								
	Restrike		249.5	105.5	355.0	355.0	8.0												
	3Y6		개단	42.8	EIOD	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	EIOD	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	EIOD	153.2	152.2	305.3	305.3	8.4	18										
Restrike	538.6	50.4	589.0	589.0	9.7														
6Y4	Φ406.4 × 12 t (SPS 400)	개단	34.7	EIOD	150.8	131.8	282.6	282.6	6.7	9	SM	SG							
Restrike				292.0	40.2	332.2	332.2	5.6											
7Y4	개단	39.6	EIOD	39.2	211.7	250.9	189.0	5.6	6										
Restrike	175.7	93.0	268.7	268.7	6.8														
동해	1D	Φ350 PHC	폐단	22.0	EIOD	41.5	38.5	80.0	55.0	2.8	0.05	S	SG						
	1차 Restrike				105.0	45.0	150.0	150.0	2.8										
	2차 Restrike				139.9	51.0	190.9	190.9	2.9										
	2D		폐단	22.0	EIOD	39.2	47.2	86.4	54.0	3.3	0.2								
	Restrike		69.4	43.6	113.0	110.0	3.1												
	3D		폐단	25.5	EIOD	42.7	38.6	81.3	54.0	3.2	0.05								
	1차 Restrike		77.9	39.3	117.2	111.0	2.7												
2차 Restrike	105.4	40.0	145.4	145.4	3.2														
4D	개단	14.7	EIOD	15.7	21.0	36.7	22.0	1.6	0.05										
1차 Restrike			34.3	20.7	55.0	47.0	1.3												
2차 Restrike	60.0	27.0	87.0	71.0	3.3														
5D	개단	26.0	EIOD	32.7	35.0	67.7	48.0	2.2	0.09										
1차 Restrike			43.1	34.9	78.0	73.0	2.1												
2차 Restrike	54.0	45.0	99.0	97.0	3.4														
6D	개단	26.0	EIOD	42.5	16.1	58.6	48.0	2.4	1										
Restrike	131.3	38.5	169.8	169.8	2.2														
부산	1B	Φ450 PHC	폐단	29.0 (24.0)	EIOD	17.5	36.4	53.9	24.0	2.7	0.2	C	C						
	1차 Restrike				62.0	32.0	94.0	74.0	4.9										
	2차 Restrike				101.5	99.5	201.0	175.0	4.7										
	3차 Restrike		128.9	97.0	225.9	225.9	3.3												
	2B		폐단	29.0 (24.0)	EIOD	25.5	46.4	71.8	37.0	3.3	0.6								
	Restrike		142.5	58.5	201.0	193.0	4.2												
3B	폐단	21.5 (18.0)	EIOD	41.2	130.8	172.0	78.0	6.3	1										
1차 Restrike	79.7	134.5	214.2	141.0	6.6														
2차 Restrike	134.7	97.1	234.7	222.0	4.4														

주) 폐단은 평면 폐단임. EMX는 말뚝에 전달된 최대 에너지값임. 주변부의 토질조건은 주변마찰력이 주로 발휘되는 토층의 조건임.

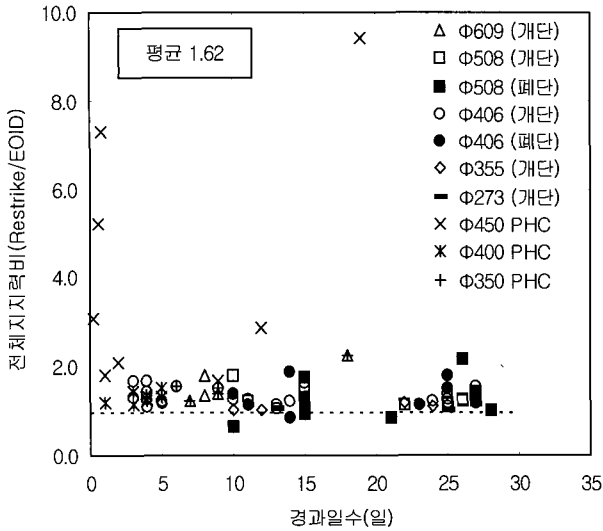


그림 2. 시간경과에 따른 전체지지력의 변화

중 가장 큰 값을 지지력증가비(set-up factor=항타 후 안정된 지지력/ 항타시 지지력)로 채택하여 도시한 것이다.

- ① 항타시와 재항타시 전체지지력의 비교
- ② Davisson의 파괴하중(failure load)의 비교
- ③ 재항타시 타격에너지 부족으로 선단지지력이 충분히 평가되지 못한 경우 재항타시 측정된 주면마찰력과 항타종료시점에서 확인된 선단지지력을 합한 후 이를 항타시 지지력과 비교

상기와 같이 구한 값이라 하더라도 재항타시 선단부에 가까운 말뚝하부의 주면마찰력과 항타시 선단지지력에 set-up효과가 충분히 반영되지 못한 점을 감안하면

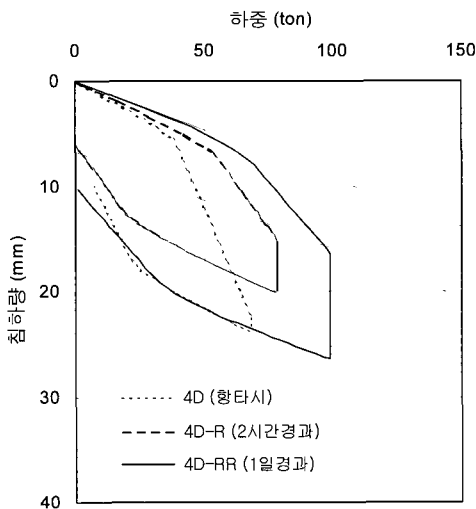


그림 3. 시간경과별 하중-침하량곡선 비교 (동해, 4D)

그림 2의 값들은 여전히 보수적인 값이라고 볼 수 있다.

그림 2에서와 같이 전체지지력의 지지력증가비는 약 1.62배 정도임을 알 수 있다. 그림 2의 자료들에는 지반조건, 말뚝조건, 항타조건 등이 구별되지 않아 시간경과에 따른 지지력증가 현상의 경향은 뚜렷하게 나타나지 않고 있다.

그림 2의 분석 데이터 중 전체지지력비가 1.0 이하로 된 경우가 4개의 말뚝에서 나타나고 있는데 이는 시간경과에 따라 지지력이 줄어드는 것(relaxation)이 아니고 말뚝이 항타된 위치의 지반상태에 기인하는 것으로 추정되었다. 즉, 본 말뚝들이 위치한 지반(포항현장)은 퇴적모래층이므로 지지력은 퇴적이력에 따라 연경도가 교호하는 특성이 나타나 상기의 결과는 이러한 특성에 영향 받은 것으로 생각된다. 따라서 이후 분석에서는 이들 데이터를 제외하였다.

전체지지력의 증가양상은 하중-침하량의 곡선으로도 비교할 수 있다. 그림 3과 그림 4는 6개 현장에서 대표적인 말뚝에 대한 시간경과별 하중-침하량 곡선을 보여주고 있는데 시간경과에 따른 지지력의 증가를 분명히 확인할 수 있다. 즉, 시간경과에 따라 하중-침하량 곡선은 점점 양호해지고 또한 파괴하중(Davisson의 offset line과 만나는 점)도 시간경과에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

3.1.2 토질별 지지력증가비

본 절에서는 시간경과별로 측정된 동재하시험 데이터를 이용하여 토질별 지지력증가비에 대해서 분석을 실시하였다. 표 2에서 제시된 시험결과는 전체 토질을

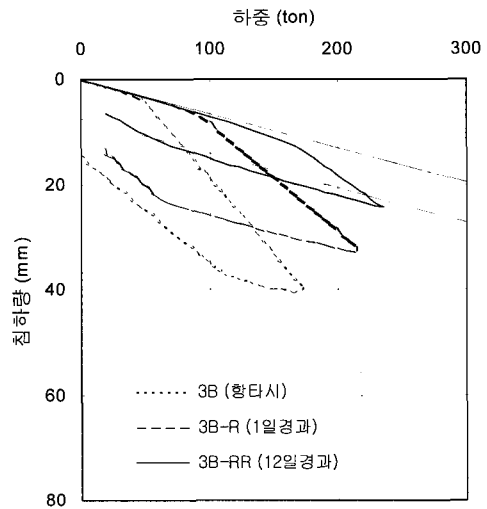


그림 4. 시간경과별 하중-침하량곡선 비교 (부산, 3B)

대표하기에는 상대적으로 현장수가 적고 또한 현장별로 시험수량이 달라 이들만으로는 대표적인 결과를 얻을 수 없다고 판단하여 이외에 22개 현장의 38개 말뚝의 시험자료를 추가하였다. 다만, 표 2에서 어느 한 현장의 데이터가 상대적으로 많이 포함되어 편중된 결과가 나타나는 것을 배제하기 위해 시험 현장 중 각 지점 별로 2개씩의 자료 만 취해 총 16 개의 자료만을 포함시켰다. 따라서 분석 말뚝수로는 총 54개의 자료가 이용되었다. 추가된 자료는 국내에서 시험된 자료와 국외 문헌에서 인용한 시험자료를 수집하여 정리한 것으로 이에 대한 상세 내용은 조(1998)에 나타나 있다.

분석자료들은 동재하시험을 통해 얻은 항타시와 재항타시의 CAPWAP 결과들로 구성되었는데 재항타시의 자료들이 여러 개일 경우는 최종시점의 자료를 선택하였다. 전절에서 설명한 바와 같이, 대부분의 재항타 시험자료들은 해머용량 및 말뚝재료강도의 한계로 인해 말뚝의 지지력이 충분히 발현되지 않았으므로 지지력증가비는 전 절에서 설명한 방법으로 구하였다.

토질종류는 전체 데이터 수를 감안하여 선단부의 경우 선단 위치의 토질을 사질토(S), 점성토(C), 실트질모래(SM), 모래자갈(SG) 등 4종류로 구분하고, 주면부의 경우 사질토(S), 점성토(C), 실트질모래(SM) 등 3종류로만 구분하였다. 실트질 모래는 대부분 우리나라에서 지지층으로 많이 이용되는 풍화산류토에 해당된다. 주면부는 일반적으로 말뚝의 관입깊이에 걸쳐 층상으로 이루어진 경우가 대부분이지만 주면마찰력에 가장 큰 영향을 주는 층의 토질종류로 분류하였다.

그림 5는 항타시에 대한 재항타시 지지력비 즉, 지지력증가비를 주면부의 토질종류별로 통계분석한 것이다. 그림에서 m은 평균값, SD는 표준편차, N은 분석 자료의 개수를 의미한다. 지지력증가비는 흙의 입자가 작을수록 크

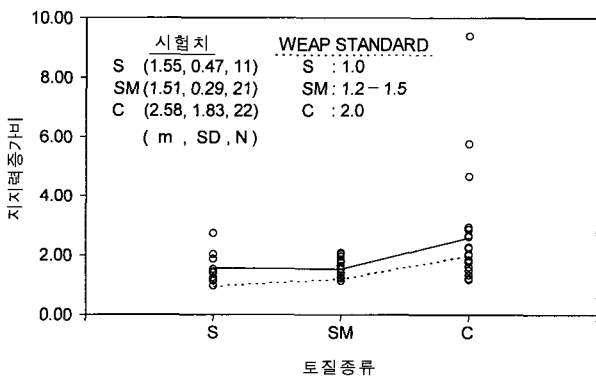


그림 5. 토질별 지지력증가비

표 3. 토질종류별 지지력증가비

말뚝주면의 유력한 토질종류	지지력증가비(보수적인 값임)
Clay	2.0
Silt - Clay	1.0
Silt	1.5
Sand - Clay	1.5
Sand - Silt	1.2
Fine Sand	1.2
Sand	1.0
Sand - Gravel	1.0

게 나타나고, 평균값은 사질토에서 1.5, 실트질모래에서 1.5, 점성토에서 2.5 정도가 됨을 알 수가 있다. 이러한 값은 WEAP(PDI, 1998)이나 FHWA(US DOT, 1996)의 제안값(표 3 참조)보다 약간 크지만 전술한 바와 같이 재항타시험 결과의 대부분이 극한지지력에 미치지 못하는 것을 감안하면 여전히 보수적인 값으로 평가할 수 있다.

사질토와 점성토에서는 지지력증가비의 분산도가 큰데 표준편차를 벗어난 데이터의 현장에 대한 지질주상도를 분석해 보면 하상퇴적도가 대부분이었다. 특히 사질토의 경우라 하더라도 하상퇴적도에서는 set-up효과가 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 이러한 사실로부터 set-up효과는 입자의 크기뿐만 아니라 조성역력에도 영향을 받는 것으로 보인다.

3.2 선단지지력

항타후 말뚝의 지지력은 시간에 따라 변화하며 이들 지지력이 변화하는 요인을 지지력 성분별로 분석하기 위해 우선, 선단지지력의 증가비를 분석하였다. 전술한 바와 같이 선단지지력은 타격에너지 문제로 인하여 측정 및 분석이 용이치 않으므로 여기서는 표 4에서와 같이 시험말뚝중 타격에너지가 충분하여 재항타시에도 항복하중이 판정된 것(침하량이 Davisson offset line을 만난 것)만 선정하여 선단지지력 증가비(항타시에 대한 재항타시의 선단지지력비)를 비교하였다.

그림 6은 표 4의 선단지지력비를 시간경과에 따라 말뚝 종류별로 도시한 것이다. 표 4와 그림 6에서 보면 선단지지력의 set-up효과를 분명히 확인할 수가 있으며, 지지력증가비는 평균 약 1.33 정도로 분석되었다. 이렇게 하여 구한 평균 지지력증가비라 하더라도 Davisson 파괴기준은 선단부의 지지상태가 탄-소성의 중간단계에서 유도된 것(Canadian Geotechnical Society, 1992)을 감안하면 여기

표 4. 시간경과에 따른 선단지지력의 변화율

번호	말뚝 종류	선단 종류	경과일수(일)		선단지지력비		현장 (지반조건)	비고 (말뚝번호)
			1차	2차	1차	2차		
1	강관 Φ 508	평면폐단	15	28	0.99	1.00	포항(사질토)	2C7
2	강관 Φ 406	평면폐단	14	27	1.16	1.14	포항(사질토)	7C7
3	강관 Φ 406	평면폐단	11	23	1.25	1.13	포항(사질토)	10C7
4	강관 Φ 406	개단	11		1.22		포항(사질토)	11O7
5	강관 Φ 406	평면폐단	10		1.12		포항(사질토)	13C5
6	강관 Φ 406	개단	10		1.08		포항(사질토)	12O5
7	강관 Φ 508	평면폐단	15	26	1.12	1.08	광양(사질토)	6C5
8	강관 Φ 406	평면폐단	14	25	1.16	1.12	광양(사질토)	8C4
9	PHC 350	평면폐단	1	5	1.29	1.29	동해(사질토)	4D
10	PHC 450	평면폐단	0.6		1.26		부산(점성토)	2B
11	PHC 450	평면폐단	0.8	19	2.73	2.67	부산(점성토)	1B
평균					1.31	1.35		
표준편차					0.46	0.55		

서 구한 지지력증가비는 역시 보수적인 값이라 할 수 있다.

표 4에서 부산 현장을 제외하면 나머지 현장의 선단부의 지반조건은 모두 사질토로 분류할 수 있으며 이들 지역의 선단지지력의 평균 증가비는 1.15 정도로 측정되었다. 한편, 지반조건이 점성토인 부산현장의 선단지지력의 증가비는 2.73 정도로 나타나 사질토보다는 점성토 조건에서 set-up효과가 큼을 알 수 있고, 특히 점성토지반에서는 선단지지력도 상당히 증가하는 것으로 나타났다.

우리나라 지반조건상 타입말뚝은 대부분 사질토 상에 지지되는 것을 감안하면 우리나라 타입말뚝의 선단

지지력에 대한 지지력증가비는 1.15배 정도라고 볼 수 있으며, 결국 set-up효과에 의한 선단지지력의 증가는 주변마찰력에 비해 상대적으로 작다고 볼 수 있다.

3.3 주변마찰력

그림 7에는 전체 데이터에 대해 시간경과에 따른 주변마찰력의 비(항타시에 대한 재항타시 주변마찰력의

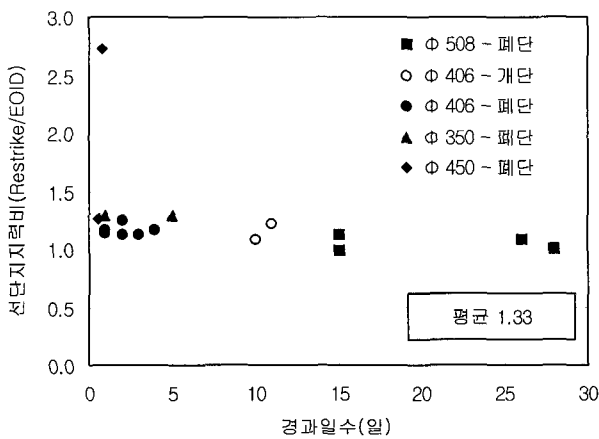


그림 6. 시간경과에 따른 선단지지력의 변화

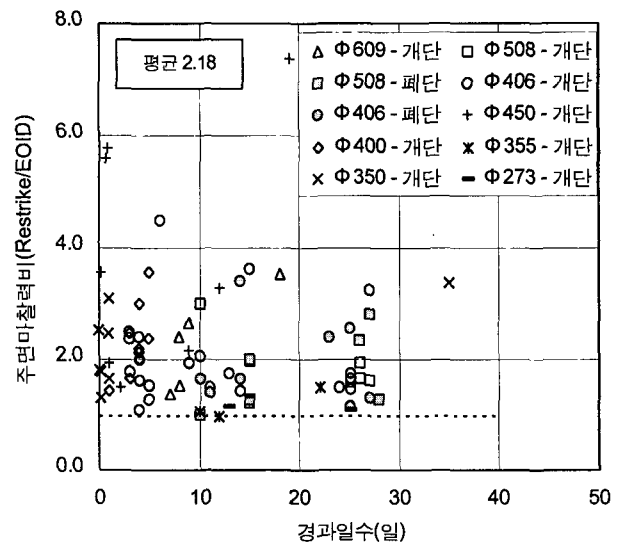


그림 7. 시간경과에 따른 주변지지력의 변화

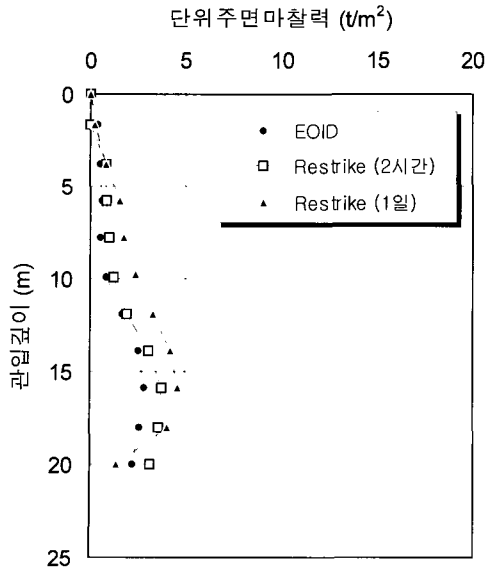


그림 8. 시간경과에 따른 관입깊이별 주면마찰력의 변화 (등해, 4D)

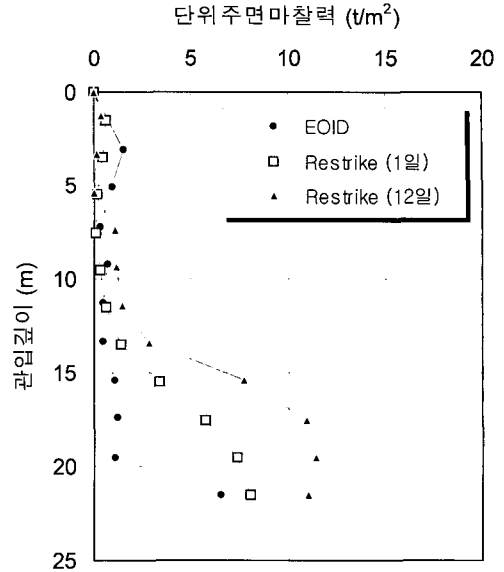


그림 9. 시간경과에 따른 관입깊이별 주면마찰력의 변화 (부산, 3B)

비)를 도시하였다. 토질조건, 말뚝조건, 타격조건 등을 구분하지 않고 모든 조건에 대한 데이터를 같은 그림에 도시하였기 때문에 시간경과에 따른 경향이 뚜렷하게 나타나고 있지 않지만 전체적으로 주면마찰력은 항타시에 비해 평균 2.18배 정도 증가하였음을 알 수가 있다. 말뚝의 지지력이 충분히 발현되지 않은 것을 감안하면 이 값 역시 보수적인 것으로 간주할 수 있다. 그림 7을 그림 6의 내용과 비교해 볼 때 set-up효과의 대부분은 주면마찰력의 증가에 의해 발생한다고 볼 수 있다.

그림 8과 그림 9는 시험말뚝 중 대표적인 말뚝(각각 그림 3과 그림 4에 대한 주면마찰력 분포임)의 관입깊이별 주면마찰력의 변화양상을 보여주는 것으로 시간에 따른 주면마찰력의 증가가 분명히 나타나고 있음을 알 수 있다.

전술한 바와 같이 재항타시 측정된 말뚝의 지지력은 항타시에 비해 크게 증가한 마찰력으로 인해 타격력이 선단부까지 전달되지 못하는 경우가 발생하며 따라서 선단부근의 마찰력은 과소 평가될 수 있는데 그림 8과 그림 9에는 이러한 현상이 잘 나타나 있다.

3.4 선단부 형상에 따른 Set-up 효과

선단부 형상에 따른 set-up효과를 분석하기 위해 개단 말뚝과 평면말뚝을 동일지점(포항현장 및 광양현장)에서 허용항타응력까지 관입한 후 시간경과에 따라 지지력을 측정하였다.

그림 10과 그림 11에는 지질조건별로 선단부 형상별

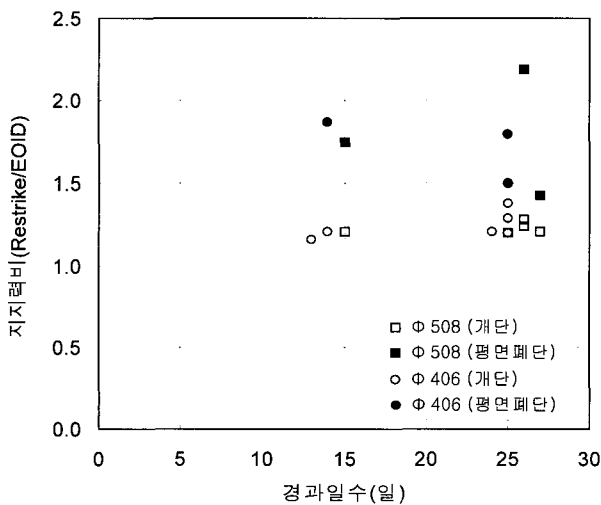


그림 10. 선단부 형상에 따른 set-up효과 (점성토, 광양현장)

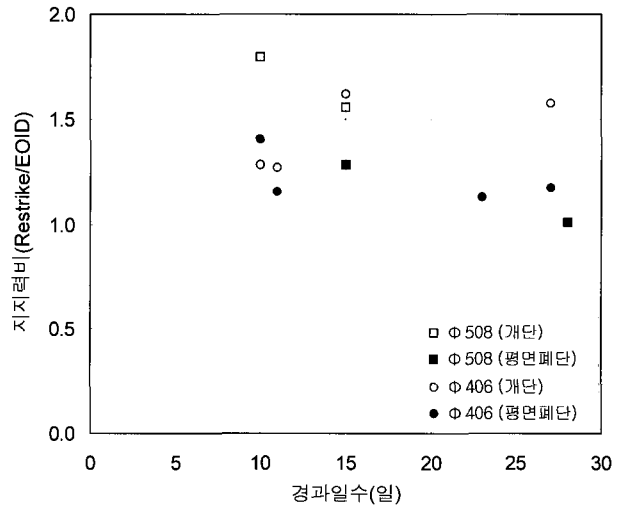


그림 11. 선단부 형상에 따른 set-up효과 (사질토, 포항현장)

로 시간경과에 따른 지지력비를 나타낸 것이다.

그림 10에서와 같이 점성토에서의 set-up효과는 개단말뚝보다는 폐단말뚝이 큰 것으로 나타나고 있다. 이는 점성토에서의 교란에 의한 강도회복정도 차이에 의한 것으로 보인다. 즉, 폐단말뚝은 개단말뚝에 비해 항타시 말뚝주변 지반의 교란 범위가 상대적으로 크고 따라서 set-up효과도 그만큼 커지는 것으로 생각된다. 이는 표 2에서 해당되는 말뚝들의 주변마찰력 성분의 set-up효과로부터도 유추할 수가 있다.

사질토에서의 set-up효과는 그림 11에서와 같이 선단부 형상에 따른 영향이 뚜렷하지는 않지만, 개단말뚝의 지지력이 항복하중에 이르지 않고 관입깊이도 큰 것을 감안하면 개단말뚝의 set-up효과가 폐단말뚝의 set-up효과에 비해 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 사질토에서 선단형상에 따른 set-up효과의 차이는 사질토에서의 set-up효과는 주로 토립자의 재배치에 기인한다는 Schmertmann (1991)의 보고로도 유추할 수 있다. 즉, 폐단말뚝의 경우 주변지반의 밀도증가에 의해 토립자의 재배치가 용이하지 않게되는 반면, 개단말뚝의 경우 말뚝의 관의 내외부 마찰력이 set-up효과에 영향을 줄 수 있으므로 지지력증가비도 그만큼 큰 것으로 생각된다.

4. 결론

국내의 6개 현장에서 총 77개의 말뚝을 타입하고 이에 대해 재하시험을 실시하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전체지지력의 지지력증가비의 평균값은 1.62배(주면마찰력은 2.18배)로 나타났으며, 지지력의 증가는 주로 주변부에서 나타나는 것으로 분석되었다.
- (2) 선단지지력의 경우도 시간경과에 따라 지지력이 증가하였는데, 선단지지력에 대한 지지력증가비는 1.15배 정도로 나타났다.
- (3) 지지력증가비는 흙의 입자가 작을수록 크게 나타나는데, 이의 평균값은 사질토에서 1.5, 실트질토에서 1.5, 점성토에서 2.5 정도로 나타났다.
- (4) 선단부 형상(개단 및 폐단말뚝)에 따른 지지력의 증가효과는 점성토에서는 폐단말뚝이 크고, 사질토에서는 개단말뚝이 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 이영남, 이종섭(1997), 대구경말뚝의 거동예측 및 지지력 산정, 현대건설(주) 기술연구소, pp.149-289.
2. 이명환, 홍헌성, 이원제(1994), "말뚝기초의 최적설계", Keynote Lecture, '94 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.60-76.
3. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환(1995), "시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력 변화 연구", 한국지반공학회, '95 봄학술발표회 논문집, pp.69-89.
4. 조천환(1998), 시간경과에 따른 타입말뚝의 지지력증대 특성에 관한 연구, 박사학위 논문, 한양대학교 대학원, pp.193.
5. 조천환, 이명환(2001), "새로운 항타공식의 적용", 한국지반공학회 논문집, 제17권 제5호, pp.157-164.
6. 조천환, 이명환(2003), "타입강관말뚝의 항타시공성 분석", 제출 심사 중.
7. 조천환(2002), "타입말뚝의 지지력증가의 예측", 대한토목학회 논문집, 제22권, 제1-C호, 대한토목학회, pp.57-65.
8. 천병식, 서덕동, 김재중, 이정학(1997), "재하시험에 의한 퇴적이 암지반에 시공된 강관말뚝의 지지특성연구", '97 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.391-398.
9. 천병식, 조천환(1998), "항타 H말뚝의 연직지지력 특성", 대한토목학회 논문집, 제18권, 제3-3호, 대한토목학회, pp.403-413.
10. 천병식, 조천환(1999), "Set-up 효과를 반영한 타입말뚝의 파동이론해석", 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제2호, pp.95-104.
11. Canadian Geotechnical Society(1992), Foundation Engineering Manual(3rd. Edition).
12. Chow F. C., Jardine R. J., Brucy, F. and Nauroy, J. F.(1998), "Effect of Time on Capacity of Pipe Piles in Dense Marine Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.124, No.3, March, 1998, pp.254-264.
13. Crowther, C. L.(1988), Load Testing of Deep Foundations, The Planning, Design, and Conduct of Pile Load Tests, John Wiley & Sons.
14. Fellenius, B. H., Riker, R. E., O'Brien, A. J. and Tracy, G. R. (1989), "Dynamic and Static Testing in Soil Exhibiting Set-up", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.115, No.GT7, pp.984-1001.
15. GRL Associates, Inc.(1996), CAPWAP User Manual.
16. Karlsrud, K. and Haugen, T.(1986), "Axial Static Capacity of Steel Model Piles in Overconsolidated Clay", Bull. No.163, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway, 3.
17. Mitchell, J. K. and Solyman, Z. V.(1984), "Time-Dependent Strength Gain in Freshly Deposited or Densified Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.110, No.11, November, 1984, pp.1559-1576.
18. Paikowsky, S. G. et al.(1996), "Dynamic Analysis and Time Dependent Pile Capacity", *Proceedings of the Fifth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Pile*, pp.325-339.
19. Parsons, J. D.(1996), "Piling Difficulties in the New York Area", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.92, No.SM1, January, 1966, pp.43-64.
20. Pile Dynamics, Inc.(1995), PDA User Manual.
21. Pile Dynamics, Inc.(1998), GRLWEAP User Manual.
22. Schmertmann, J. H.(1991), "The Mechanical Ageing of Soils", The 25th Karl Terzaghi Lecture, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.117, No.GT9, pp.1288-1330.

23. Seidel, J. P. and Anderson G. D.(1992), "The Effect of Pile Relaxation on Toe Capacity and Stiffness", *Proceedings of the Fourth International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Pile*, pp.619-626.
24. Skov, R. and Denver, H.(1988), "Time-dependance of Bearing Capacity of Piles", *Proceedings of the 3rd International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles*, BiTech Publishers, Ottawa, Canada, pp.879-888.
25. Svinkin, M. R., Morgano, C. M. and Morvant, M.(1994), "Pile Capacity as a Function of Time in Clayey and Sandy Soils", *Proceedings of the 5th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Bruges, Belgium, paper1.11.
26. Tavenas, F. and Audy, R.(1972), "Limitations of the Driving Formulas for Prediction the Bearing Capacities of Piles in Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Canada, 9(1), pp.47-62.
27. Yang, N. C.(1970), "Relaxation of Piles in Sand and Inorganic Silt", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ASCE, Vol.96, SM2, pp.395-409.
28. York, D. L., Brusey, W. G., Clemente, F. M. and Law, S. K. (1994), "Set-up and Relaxation in Glacial Sand", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 120(9), pp.1498-1513.
29. US Dpt. of Transportation(1996), Design and Construction of Driven Pile Foundation, FHWA Workshop Manual.

(접수일자 2003. 3. 31, 심사완료일 2003. 7. 1)