한국지반공학회논문집 제16권 제2호 2000년 4월 PP. 135 ~ 143

고강도 H말뚝의 연직 지지력 특성

The Characteristics of Axial Bearing Capacity for the High Strength H-pile

신 방 웅*1 Shin, Bang-Woong
여 병 철*2 Yeo, Byung-Chul

Abstract

Recently, high strength H-piles have been widely used in the world for pile foundations of highway and building constructions because of the better driveability and lower cost than other piles. This study estimates the allowable bearing capacity of high strength H-Piles, steel pipe pile and PHC pile by dynamic and static load tests. Also this paper evaluates the time effect of these piles by the dynamic load test.

According to the dynamic load test compared with the static load test, the load- settlement curve from the dynamic load tests was considerably similar to results obtained from the static load tests. In addition, it was found that the allowable bearing capacity of those piles increases due to the time effect. Based on test results, it can be proposed that the time effect should be considered for the allowable bearing capacity of piles.

요 지

고강도 H말뚝은 다른 말뚝에 비해 관입성이 우수하며, 경제적으로 시공이 가능하여 도로공사 및 건축공사의 기초말뚝으로 광범위하게 전세계적으로 사용되어지고 있다. 따라서 본 논문에서는 고강도 H말뚝, 강관말뚝 및 PHC말뚝에 정재하시험과 동재하시험을 실시하여 허용지지력을 비교 분석하였으며, 각각의 말뚝에 대한 동재하시험을 통해 시간경과 효과를 평가하였다.

정재하시험과 동재하시험을 비교 분석한 결과 하중-침하곡선이 유사한 것으로 조사되었다. 또한 고강도 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝이 지반내에 항타되었을 때의 허용지지력은 시간이 경과함에 따라 증가하는 것으로 평가되었다. 재하시험 결과 시간경과효과로 인해 지반의 허용지지력이 상승됨을 알 수 있어 앞으로 기초말뚝 설계시 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

Keywords : High strength H-Pile, Dynamic load test , Static load test, Load-settlement curve, Time effect

*1 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 박사수료

1. 서 론

구조물의 장대화, 대형화, 초고층화되고 있는 추세에 맞추어 말뚝길이와 크기, 사용재료, 설치방법 및 사용목적도 다양해지고 있어 새로운 종류의 말뚝기초 형식이 요구되고 있는 실정이다.

최근 들어 외국에서 많이 사용되고 있는 H말뚝은 압연에 의해 만들어졌기 때문에 품질의 균질성, 이음 및 길이 조정의 간편성, 운반 및 취급의 용이성 등 장점을 갖고 있으며 동시에 관입성, 주변지반의 영향, 상부구조와의 연결 등에서 다른 종류의 말뚝보다 우수한 장점을 갖고 있다. Tomlinson(1994)에 의하면 미국의 Hartlepools 원자력발전소에 기초말뚝 선정을 위해 PC말뚝을 동시에 시공하여 비교 · 분석한 결과 H말뚝이 PC말뚝보다 지지력이 높은 것으로 연구 발표되었으며, Huang(1988), Wong(1994)등은 말뚝의 지지력, 허용하중, 버클링등에 대해 검토한 결과 H말뚝이 기성 콘크리트 말뚝보다 우수한 것으로 연구되었다. 특히 홍콩, 싱가포르를 비롯한 동남아 지역의 경우 일반강도 H말뚝보다 고강도 H말뚝을 사용함으로써 지반조건에 따라 다소 차이는 있지만 공사비가 약 7%증가되는 반면에 지지력은 약 30% 더 얻을 수 있어 많은 건설현장에서 경제적이고 효율적으로 시공할 수 있는 말뚝으로 인식되고 있다(Ho, 1991).

시간경과에 따라 지지력이 증가되는 현상을 Michell (1984), Schmertmann(1991)에 의해 사례로 제시된 바 있으나 그 원인을 명확히 결론을 내리지 못하고 대부분 사례에 대한 현상을 가설로 전해지고 있다. 국내에서도 이 등(1994, 1998), 천 등(1999)에 의해 시간경과에 따른 타입말뚝의 지지력 변화 연구가 수행된 바 있으며 이에 의하면 지지력 증가의 상당 부분이 초기항타후 7일 이내에 나타나는 것으로 연구되었다.

특히 건설시장의 개방에 따른 치열한 공사수주 경쟁에 적절히 대처하기 위해서는 선진 외국에서 많이 사용되고 있는 고강도 H말뚝에 대한 설계 및 시공 기술이 연구되어 국제화 시대에 대비한 말뚝기초 설계 흐름에 대비할 필요가 있다. 그러므로 본 논문에서는 고강도 H말뚝, 강관말뚝 및 PHC말뚝에 대해 현장 재하시험을 통해 시간경과에 따른 연직 지지력 특성을 비교, 분석하여 고강도 H말뚝이 국내 건설현장의 기초말뚝으로 적용되기 위한 발판을 마련하고자 하였다.

2. 말뚝의 허용지지력 결정

말뚝의 설계 및 시공에 있어서 말뚝의 허용지지력을 결정하기 위해서는 말뚝이 받을 수 있는 지반의 허용축하중과 재료의 허용지지력을 함께 고려하여야 한다. 즉, 말뚝의 허용지지력은 재료의 허용축하중과 지반의 허용지지력을 비교하여 작은 값으로 결정한다.

2.1 재료의 허용축하중

H말뚝과 강관말뚝의 재료 허용축하중은 일반강도(SHK 400)와 고강도(SHK 490)의 경우 허용압축응력을 각각 1,400kg/cm^{2}과 1,900kg/cm^{2}으로 보고 부식대(2mm)를 공제한 단면적을 구하여 허용축하중을 구하고 있으며, 말뚝이음에 의한 저감(타입인 경우 1개소당 5%), 장경비에 의한 저감(=(L/D - n)×100)을 고려하여 재료의 허용축하중을 결정한다. 그러나 본 연구에 사용된 말뚝은 단본이라 말뚝이음 및 장경비에 대한 저감을 고려하지 않았다. PHC말뚝의 재료 허용축하중 결정은 일반적으로 식(1)을 사용하고 있다.

$$Q_{ma} = A_p(0.25\,\delta_c - \delta_{ce}) \quad (1)$$

여기서, Q_{ma} : 말뚝의 허용축하중
A_p : 말뚝의 단면적
δ_c : 콘크리트의 압축강도
δ_{ce} : 유효 prestress

특히 PHC말뚝에 대해서는 관입깊이가 85D 이상이 되면 세장비가 늘어나거나 말뚝 이음부에 대한 저감을 추가로 고려해야 하나 본 연구에 사용된 말뚝은 그 이하의 단본이므로 세장비 및 이음에 대한 저감은 고려하지 않았다.

H말뚝에 관한 제원 및 기준은 KS F 4603(한국표준협회, 1996)에 규정되어 있으며 말뚝의 재료 허용축하중을 계산하여 표 1과 표 2에 정리하였다. American Iron and Steel Institute(1975)의 연구자료에 의하면 미국의 경우 강말뚝 사용시 강관말뚝 보다 고강도 H말뚝이 일반적으로 사용되고 있으며, 말뚝의 규격은 대부분이 300×300~350×350, 설계하중은 최저 100톤~최고 200톤, 말뚝의 길이는 최저 24m~최대 45m까지 사용되는 것으로 연구되었다. 그러나 본 연구에 사용된 시험말뚝은 고강도 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝의 허용지지력을 비교하기 위해

표 1. H말뚝 및 강관말뚝의 재료 허용축하중

규격 및 강종 (mm)	단면적 (cm^2)	부식공제 단면적 (cm^2)	허용 압축응력 (kg/cm^2)	재료의 허용 축하중 (ton)
H-200x204x12x12 (SHK 490)	71.53	47.85	1,900	90.0
H-244x252x11x11 (SHK 490)	82.06	52.74	1,900	100.0
H-294x302x12x12 (SHK 490)	107.70	72.42	1,900	137.0
강관 ϕ406.4x9t (SPS 400)	112.20	86.90	1,400	121.0

표 2. PHC말뚝의 재료 허용축하중

말뚝규격 (mm)	단면적 (cm^2)	압축강도,σ_c (kg/cm^2)	유효 Prestress,σ_{ce} (kg/cm^2)	재료의 허용 축하중 (ton)
ϕ400x65t	684	800	39	110.0

재료의 허용축하중이 비슷한 말뚝으로 선정하였다.

2.2 지반의 허용지지력 판정법

2.2.1 동재하시험

시험말뚝에 가속도계와 변형율계를 지표면에서부터 최소 말뚝직경의 2배 떨어진 위치에 2쌍의 가속도계와 변형율계를 말뚝 주변에 대칭이 되도록 설치한 후 케이블을 항타 분석기(PDA)에 연결한다. 항타분석기에 초기값 입력 및 측정 준비를 하고 2~3회 초기타격을 실시하여 입력값을 조정하였다. 이후 항타를 실시하여 항타분석기에 의해 가속도와 변형율을 측정 및 저장하여 CAPWAP(GRL Associates Inc, 1996) 방법을 사용하여 분석하고 CAPWAP 분석결과 구해진 하중 - 침하곡선에 Davisson 판정법으로 항복하중을 판정하였다.

2.2.2 정재하시험

정재하시험은 말뚝을 설계 심도까지 설치한 후 하중을 가하여 말뚝의 극한하중이나 허용침하량 이내에서 지지할 수 있는 하중의 크기를 구하는 시험이다. 그러므로 지지력을 예측하는 여러 가지 방법중 어느것 보다 신뢰성이 높아 현실적으로 이 방법에 의해 얻어진 값은 실제 말뚝 지지력의 기준값(참값)으로 여겨지고 있다. 정재하시험은 재료 허용축하중의 2배이상 크기의 재하중이 재하장치위에 상재하중을 가하는 상부하중식과 반력말뚝의 인발 저항력을 이용하여 유압잭으로 하중을 가하는 반력하중식으로 대별된다. 정재하시험을 통해 지반의 허용지지력을 판정하는 데에는 도로교 표준시방서(건설부, 1996)에 의하면 극한하중이 판정되었을 경우 3.0의 안전율을 적용하며, 지반구성 및 강도특성이 유사하고 말뚝길이가 거의 같은 조건으로 만족되면 2.5의 안전율을 적용할 수 있도록 하고 있다. 만일 극한하중이 판정되지 못한 경우에는 항복하중에 2.0의 안전율을 적용하도록 되어 있다. 구조물 기초 설계기준(건교부, 1997)에 의하면 항복하중을 구하는데는 S - log t, log P - log S 및 dS/d(log t) - P 분석법에 의하도록 규정하고 있다. 그러나 이들 방법들은 주면 마찰력의 선(先)항복으로 인한 가(假)항복하중이 판정될 가능성이 있으므로 이러한 불확실성을 배제하기 위해 본 연구에서는 허용하중 결정시 상대적으로 신뢰도가 높은 것으로 평가되고 있는 Davisson 판정법을 이용하여 항복하중을 판정하였다.

3. 시험조건 및 내용

3.1 시험내용 및 재료특성

시험말뚝의 지지력 특성을 파악하기 위해 고강도 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝에 정재하시험과 동재하시험을 동

표 3. 시험말뚝의 종류 및 재하시험 내용

말뚝번호	규격 및 강종	동재하시험			경과일수(日)		정재하시험
		EOID	Restrike 1	Restrike 2	Restrike 1	Restrike 2	
H1	H-200x204x12x12 (SHK 490)	○	○	-	9	-	-
H2		○	○	-	9	-	-
R1	H-244x252x11x11 (SHK 490)	○	○	-	9	-	-
R2		○	○	-	9	-	-
R8	H-294x302x12x12 (SHK 490)	○	○	-	9	-	-
H3		○	○	○	2	9	○
S	ϕ406.4x9t (SPS 400)	○	○	○	2	9	○
P	ϕ400mmx65t	○	○	○	2	9	○

표 4. 허용항타응력 및 관입량 기준

말뚝종류	최대허용 항타응력 δ_a(kg/cm^2)	항타 기준		
		항타응력 (kg/cm^2)		최종 단위길이당 타격수 (BPM)/mm/blow
H말뚝 (SHK 490)	2,970(0.9δ_y)	2,673	0.9δ_a	500/2
강관말뚝 (SPS 400)	2,160(0.9δ_y)	1,944		500/2
PHC말뚝	480(0.6δ_y)	432		200/5

일지점에서 실시하였다. 특히 동재하시험의 신뢰도 확인을 위해 동일 말뚝에 정재하시험을 실시하여 지반의 허용지지력을 비교하였다.

서론에서 설명한 바와 같이 시간경과에 따른 지지력의 증가는 상당부분이 초기항타후(EOID) 7일 이내에 발생한다고 연구되어 초기항타후 2일과 9일 후에 재항타시험(Restrike)을 실시하여 지지력의 변화를 비교하였다. 본 연구에서 말뚝의 허용항타응력은 고강도 H말뚝과 강관말뚝에 항복하중의 90%, PHC말뚝은 콘크리트 압축강도의 60%를 적용하였으며, 시험말뚝의 종류 및 재하시험 내용은 표 3과 표 4에 나타내었다.

3.2 지반조건 및 말뚝 배치도

시험 시공할 대상지반의 지층구성은 그림 1과 같으며, 지하수위는 GL. - 1.55m에 위치하고 있다.

시험말뚝은 그림 2와 같이 배치하였으며, 말뚝 중심간 거리는 구조물 기초 설계기준(1997)에서 제시한 바와 같이 말뚝 직경의 2.5배 이상인 2m로 하였다. 양쪽 가장자리

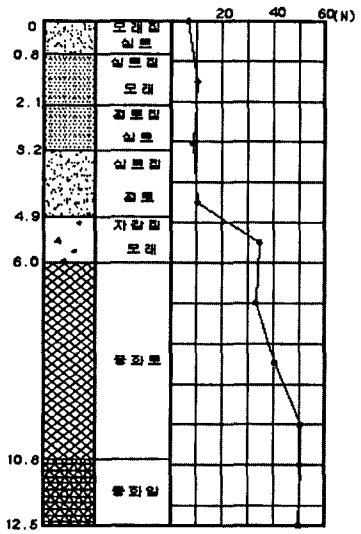


그림 1. 지층 구성도

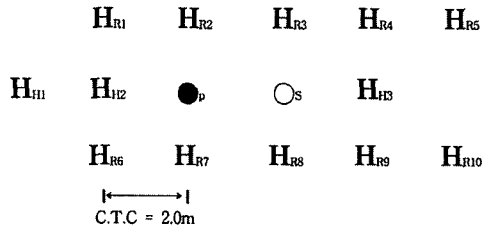


그림 2. 말뚝 배치도

의 R로 표시된 고강도 H말뚝은 동재하시험을 실시한 후 중앙에 위치한 H3, S, P 말뚝에 정재하시험을 실시하기 위한 반력말뚝으로 사용하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 동재하시험 결과

동재하시험 결과는 2.2.1절에서 설명한 바와 같이 분석하였다. 본 연구에서는 시간경과 효과를 분석하기 위해 PDA를 이용하여 항타시 초기항타시험(EOID)을 실시하고 동일 말뚝에 재항타시험(Restrike)을 실시하여 시간경과에 따른 지지력의 변화를 조사하였다. 동재하시험 결과를 이용하여 시간경과효과를 분석하는 경우 시험시 항타에너지의 크기 및 차이, 말뚝 관입깊이의 차이, CAPWAP 분석시 사용된 타수(Blow number)의 차이, 분석오차 등에 따라 차이가 나게되므로 시간경과효과를 명확하게 분석하는 것은 쉽지가 않았다. 따라서 이러한 영향을 최소화 하기 위해 Davisson 판정법으로 항복하중을 판정한 후 안전율 2.0을 적용하여 지반의 허용지지력을 판정하였다. 표 5는 초기항타시험과 재항타시험의 재하시험 결과를 비교하였다.

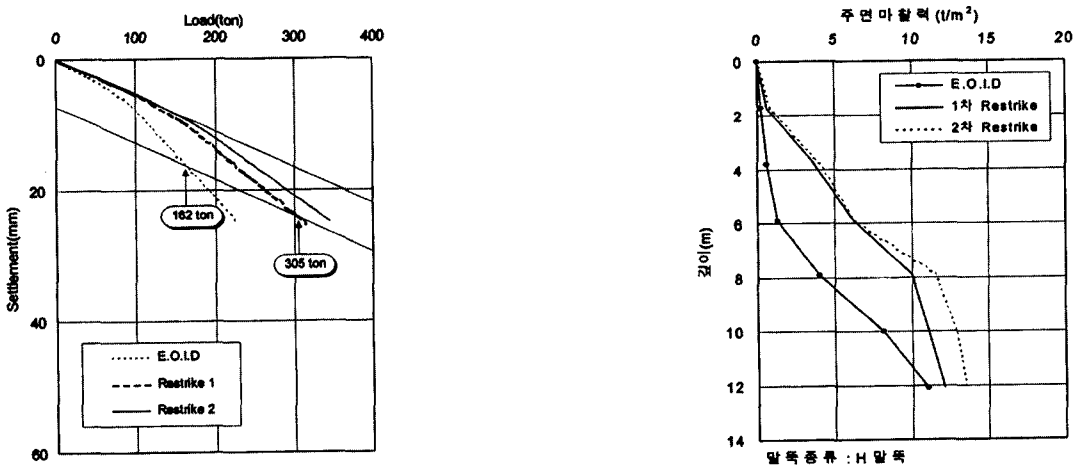
분석결과 초기항타시 모든 말뚝의 지반 허용지지력은 재료의 허용축하중 보다 최대 약 54% 적게 조사되어 2일과 9일이 지난 후 재항타시험을 실시하였다. 그 결과 고강도 H 말뚝은 지반의 허용지지력이 재료의 허용축하중 보다 최소 약 10%~최대 약 51% 높은 지지력을 얻은 반면 강관말뚝과 PHC말뚝은 1차 재항타시험(Restrike 1)시 지반의 허용지지력이 재료의 허용축하중보다 약 27%, 약 5% 각각 적게 조사되었으며, 2차 재항타시험(Restrike 2)을 실시한 결과 강관말뚝은 약 21% 높아진 반면에 PHC말뚝은 비슷한 결과를 보였다.

지지층이 깊고 중간에 느슨한 실트질 모래로 형성된 지반에서 시간경과에 따른 말뚝 의 지지력 변화는 초기항타

표 5. 초기항타시험 및 재항타시험의 결과 비교

말뚝 번호	관입 깊이 (m)	규격 및 강종 (mm)	시험 구분	타격당 최종 관입량 (mm/打)	CAPWAP 분석 및 Davisson 방법에 의한 항복하중(ton)	지반의 허용 지지력 (ton)	재료의 허용 축하중 (ton)	경과 일수 (日)
H1	10.7	H-200×204×12×12 (SHK490)	EOID	2.0	156↑	78↑	91	-
			Restrike	10.0	194↑	97↑		9
H2	11.6		EOID	2.0	189↑	94↑		-
			Restrike	5.0	275↑	137↑		9
R1	11.5	H-244×252×11×11 (SHK490)	EOID	6.0	173	86	100	-
			Restrike	6.0	266↑	133↑		9
R2	12.2		EOID	9.0	120	60		-
			Restrike	6.0	269	134		9
R8	11.9	H-294×302×12×12 (SHK490)	EOID	7.0	217	108	137	-
			Restrike	3.0	303↑	151↑		9
H3	12.1		EOID	6.0	162	81		-
			Restrike 1	3.0	305	152		2
			Restrike 2	1.0	345↑	172↑		9
S	10.8	φ400×9 (SPS400)	EOID	8.0	142.	71	121	-
			Restrike 1	10.0	191	95		2
			Restrike 2	4.0	295↑	147↑		9
P	9.6	φ400×65	EOID	4.0	118	59	110	-
			Restrike 1	5.0	211	105		2
			Restrike 2	2.0	218	109		9

주)↑은 하중-침하량 곡선이 Davisson offset line과 만나지 않아 결정된 지지력은 그 이상이 될 수 있음을 의미함.



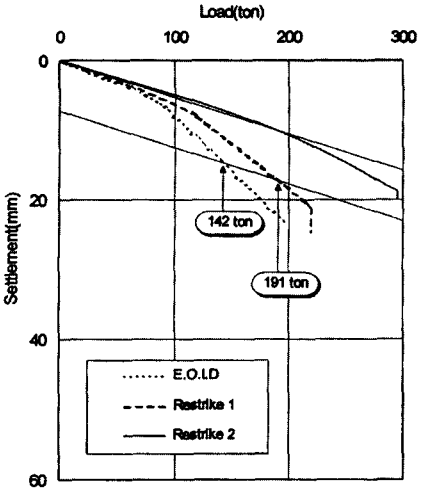
(a) 하중-침하량 곡선

(b) 주면 마찰력 분포

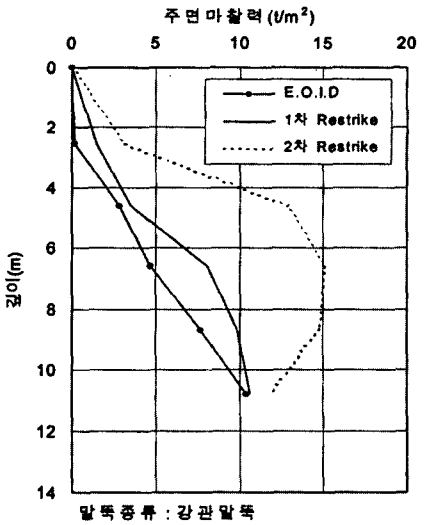
그림 2. 하중-침하량 및 주면 마찰력 분포도(H3)

후 2일이 지난 후 1차 재항타시험을 실시한 결과 시험말뚝의 지지력이 평균 1.64배 증가하였고 초기항타후 9일이 지난 후 2차 재항타시험을 실시한 결과 지지력이 평균 1.77배 증가하였다. 시간경과에 의한 지지력의 증가 원인은 항타시 교란되었던 말뚝 주면부의 지반이 set - up 현상이 발생하여 증가되는 것으로 연구되었다. 특히 고강도 H말뚝의 경우 극한하중이 발생하지 않은 시험말뚝에 대해서 항복하중을 비교하기에는 다소 부정확성을 갖기는 하지만 말뚝이 클수록 시간경과효과가 높아질 것으로 예상되었다.

Mitchell(1984), 이 등(1994)의 연구에 의하면 시간경과에 따라 지지력이 증가되는 요인은 항타시 발생한 과잉 간극수압의 소산 및 aging 효과로 알려지고 있다. 과잉간극수압의 소산은 항타후 우선적으로 발생하는 set-up 효과의 일차적인 원인으로서 유효응력의 증가를 초래하게 된다. 그

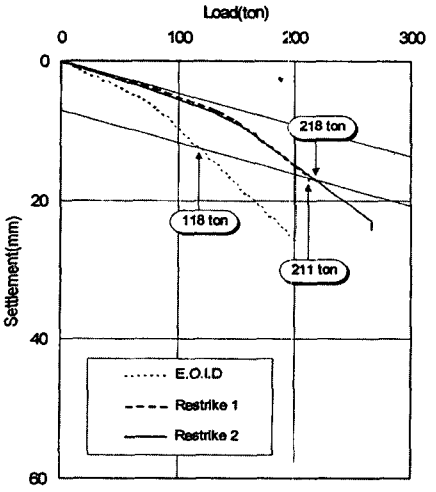


(a) 하중-침하량 곡선

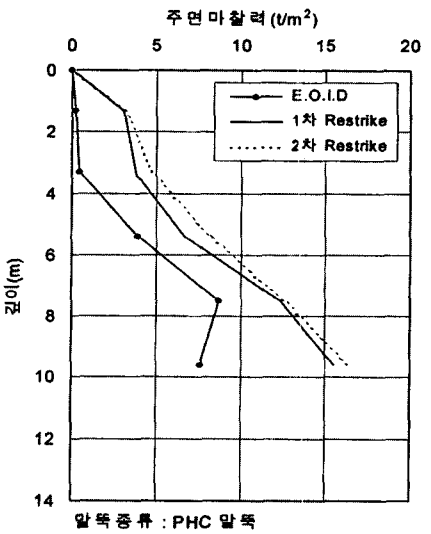


(b) 주면 마찰력 분포

그림 3. 하중-침하량 및 주면 마찰력 분포도(S)



(a) 하중-침하량 곡선



(b) 주면 마찰력 분포

그림 4. 하중-침하량 및 주면 마찰력 분포도(P)

러나 이후 유효응력변화, 항타에 의한 밀도 및 토립자의 재배치등 외부요인에 의한 aging 효과가 발생한다고 하였다.

따라서 그림 2~그림 4에 말뚝별 시간경과에 따른 하중-침하량곡선과 주면 마찰력의 증가 현상을 도시하였다. 고강도 H말뚝(H3)과 PHC말뚝(P)의 경우 1차 재항타시험후 주면 마찰력의 증가는 미미한 것으로 분석되었다. 반면에 강관말뚝(S)은 1차 재항타시험시 주면 마찰력의 증가현상은 미미하나 2차 재항타시험후 주면 마찰력의 증가현상이 매우 크게 발생하였다.

4.2 정재하시험 결과

정재하시험은 반력말뚝을 이용한 인발 재하시험을 실시하여 2.2.2절에서 설명한 바와 같이 분석하였다. 이 등(1997)에 의하면 인발 재하시험은 주면 마찰력 규명을 위해 효과적인 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 그림 2의 말뚝배치도에서 보듯이 6개의 반력말뚝을 사용하였으며 시험말뚝과 반력말뚝의 간격은 시험말뚝 직경의 5배이상(약 2m이상) 대칭으로 배치하여 8단계로 나누어 재하시험을 실시하였다. 특히 항타직후 지반의 지지력이 급속히 변화할 것이 예상되어 항타후 최소한 1일 후와 재하시험기 설치 시간을 고려하여 H3, S, P 말뚝순으로 재항타시험후 각각 1일, 2일, 4일에 정재하시험을 실시하였다.

그림 5에 나타난 바와 같이 고강도 H말뚝(H3)에 재료의 허용하중의 2배이상 최대 시험하중인 289.5톤을 재하한 결

표 6. 항복하중 및 Davisson 판정법에 의한 허용지지력 판정

말뚝번호	최대시험하중 (ton)	전 침하량 (mm)	순 침하량 (mm)	항복하중(ton)			Davisson에 의한 판정법 (ton)	지반의허용지지력 (ton)	재료의 허용 축하중 (ton)	경과일수 (日)
				S-log t	log P -log S	dS/d (logt)-P				
H3	289.5	18.72	1.023	289이상	289이상	289이상	289이상	144이상	138	재항타 시험후 1일
S	241.2	12.75	1.925	241이상	241이상	241이상	241이상	120이상	121	재항타 시험후 2일
P	201.1	14.05	2.378	201이상	201이상	201이상	201	100	110	재항타 시험후 4일

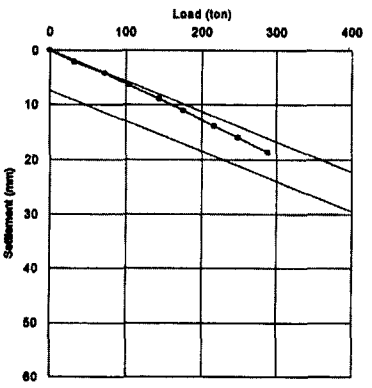


그림 5. 하중-침하량곡선(H3)

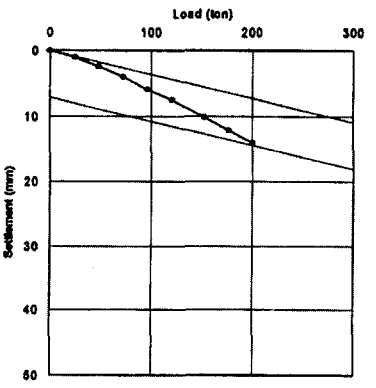


그림 7. 하중-침하량 곡선(P)

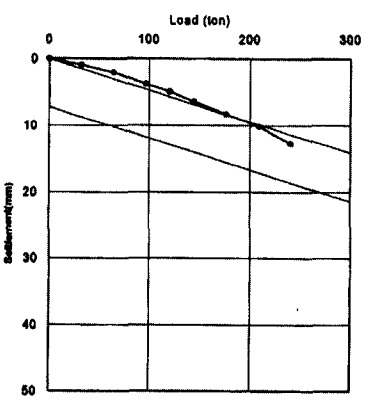


그림 6. 하중-침하량 곡선(S)

과 하중-침하량곡선이 거의 직선형태로 Davisson의 offset line과 만나지 않아 항복현상이 발생하지 않은 양호한 지지상태를 보여주고 있어 항복하중은 최대시험하중 이상임을 알 수 있었다. 또한 그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 강관말뚝(S)과 PHC말뚝(P)에 최대시험하중인 241.2톤과 201.1톤을 각각 재하한 결과 하중-침하량곡선이 완만한 포물선 형태를 보여 주고있다. 강관말뚝은 항복현상이 발생하지 않은 양호한 지지상태를 보여주고 있어 항복하중은 최대 시험하중 이상임을 알 수 있으나 반면에 PHC말뚝은 항복현상이 발생되었다. 이와 같이 시험결과에 의한 하중-침하량이 상이하게 나타난 것은 시험을 실시한 시점의 차이에 기인한 것으로 판단되어 이에 대한 검토는 정재하시험과 동재하시험 비교에서 상세히 서술하였다.

표 6에 분석된 바와 같이 고강도 H말뚝(H3), 강관말뚝(S), PHC말뚝(P)에 재료 허용축하중의 2배이상 최대시험하중인 289.5톤, 241.2톤, 201.1톤을 각각 재하한 결과 각 말뚝의 항복하중은 최대 재하하중 보다 큰 것으로 판정되었으며, 또한 각 판정기준에 따라 항복하중을 산정한 결과 최대재하하중 이상인 것으로 판정되었다.

따라서 구조물 기초 설계기준(1997)에 극한하중이 판정되지 않은 경우에 말뚝의 침하량이 말뚝직경의 10%(0.1D)에 도달하면 이를 극한하중으로 볼 수 있다고 규정하였다. 시험결과 H3, S, P의 최종재하 단계에서의 침하량이 각각 18.70mm, 12.75mm, 14.05mm로 모든 말뚝의 침하량이 0.1D(29.4mm, 40.6mm, 40.0mm 각각)이하 이기 때문에 극한하중은 최대시험하중 이상인 것으로 판정되어 Davisson 판정법을 이용하여 항복하중을 판정한 후 안전율 2.0을 적용하여 지반의 허용지지력을 산정한 결과 각각 144톤 이상, 120톤 이상, 100톤으로 판정되었다. 특히, 고강도 H말뚝은 지반의 허용지지력이 재료의 허용축하중 보다 약 4%이상 높은 것으로 판정되었으나 PHC말뚝

의 경우 지반의 허용지지력이 재료의 허용축하중 보다 약 9% 낮은 것으로 판정되었다.

4.3 정재하시험과 동재하시험 결과의 비교

최근까지의 연구결과에 의하면 동재하시험의 말뚝 지지력은 정재하시험 결과와 비교해 볼 때 ±15%정도의 오차를 갖는 것으로 알려져 있다. 표 7에 분석된 바와 같이 고강도 H말뚝(H3), 강관말뚝(S), PHC말뚝(P)의 초기 동재하시험의 지반 허용지지력이 정재하시험의 지반허용지지력 보다 각각 44%, 41%, 41% 낮게 조사되었다. 그러나 2차 동재하시험의 지반 허용지지력을 정재하시험의 지반 허용지지력과 비교해 볼 때 각각 19%, 23%, 9% 높게 조사되었다. 각 시험의 오차는 시험시기, 시험순서, 시험방법, 시험시 하중의 크기, 지지력 해석방법등에 의해 ±15%의 오차 범위보다 고강도 H말뚝과 강관말뚝이 다소 높게 나타난 것으로 조사되었다.

그림 8에서 보듯이 고강도 H말뚝(H3)에 정재하시험과 동재하시험을 실시하여 비교한 결과 하중-침하곡선이 유사한 것을 알 수 있었다. 강관말뚝(S)은 그림 9에 나타난 바와 같이 동재하시험이 끝난 후 2일 후에 정재하시험이 실시되었기 때문에 다소 침하가 초기 부분에 약간 증가하였

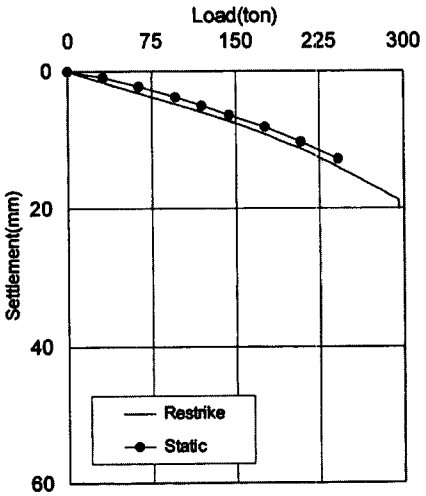


그림 9. 하중-침하량 곡선(S)

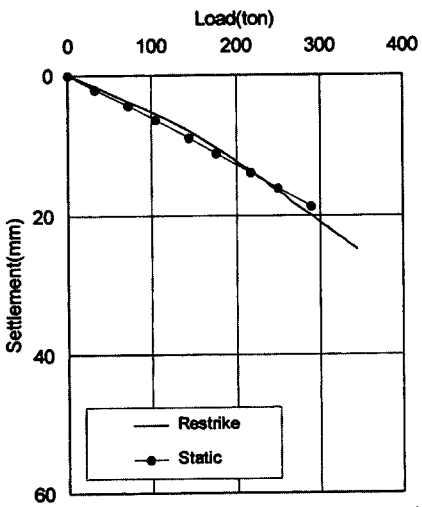


그림 8. 하중-침하량 곡선(H3)

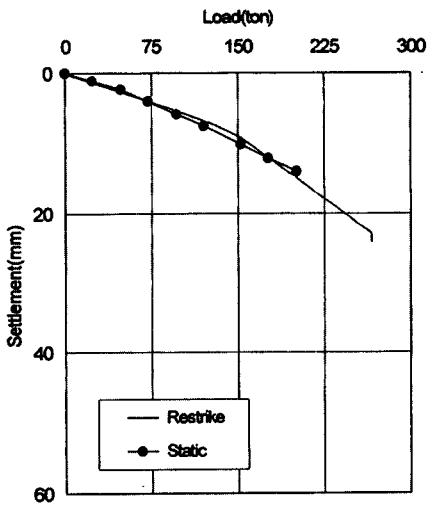


그림 10. 하중-침하량 곡선(P)

표 7. 정재하시험과 동재재하시험 결과비교

말뚝번호 및 시험구분		지반의 허용 지지력		재료의 허용 축하중 ③(ton)	지반의 허용 지지력 (①/②)	지반의 허용 지지력 / 재료의 허용축하중	
		동재하시험 ①(ton)	정재하시험②(ton)			①/③	②/③
H3	EOID.	81	144↑	138.0	0.56	0.59	1.04↑
	Restrike	172↑			1.19↑	1.25	
S	EOID.	71	120↑	121.0	0.59	0.59	1.00↑
	Restrike	147			1.23	1.21	
P	EOID.	59	100↑	110.0	0.59	0.54	0.91↑
	Restrike	109			1.09	0.99	

(주) ↑은 하중-침하량 곡선이 Davisson offset line과 만나지 않아 결정된 지지력은 그 이상이 될 수 있음을 의미함.

으나 이후에는 하중-침하곡선의 기울기가 동일하게 진행되었기 때문에 지지력 분석시 큰 차이를 나타나지 않은 것으로 판단되었다. 그림 10은 PHC말뚝(P)에 정재하시험과 동재하시험을 실시하여 하중-침하곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 정재하시험의 최대 재하하중인 201톤까지는 매우 유사한 것으로 나타났으나, 이후에는 동재하시험의 하중-침하곡선에서 보듯이 침하가 다소 많이 발생할 것으로 나타났다. 이상과 같이 고강도 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝에 정재하시험과 동재하시험을 각각 비교한 결과 유사한 하중-침하곡선을 갖는 것으로 평가되었다.

5. 결 론

고강도 H말뚝의 지지력 특성을 연구하기 위해 강관말뚝과 PHC말뚝을 동일지점에서 정재하시험과 동재하시험을 실시한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 고강도 H말뚝, 강관말뚝, PHC말뚝에 초기항타시험(EOID)을 실시한 결과 지반의 허용 지지력은 재료의 허용축하중 보다 최대 54% 적게 조사되었으나, 9일이 지난 후 1차 재항타시험(Restrike)을 실시한 고강도 H말뚝의 지반 허용지지력은 재료의 허용축하 중 보다 최대 약 51%(H2) 높은 지지력을 얻었으나, 2일이 지난 후 1차 재항타시험을 실시한 강관말뚝(S)과 PHC말뚝(P)의 지반 허용지지력은 재료의 허용축하중 보다 약 27%, 약 5% 각각 적게 조사되었으나 9일이 지난 후 2차 재항타시험을 실시한 결과 강관말뚝은 약 21% 높고 PHC말뚝은 비슷한 결과를 보였다.
2) 지지층이 깊고 중간에 느슨한 실트질 모래로 형성된 지반에서 시간경과에 따른 말뚝 의 지지력 변화는 초기항타후 2일이 지난 후 1차 재항타시험(Restrike 1)을 실시한 결 과 시험말뚝의 지지력이 평균 1.64배 증가하였고 초기항타후 9일이 지난 후 2차 재항 타시험(Restrike 2)을 실시한 결과 지지력이 평균 1.77배 증가하였다.
3) 극한하중이 발생하지 않은 시험말뚝에 대해서 항복하중을 갖고 정재하시험과 동재하 시험을 비교하기에는 부정확성을 배제할 수는 없지만 최대시험하중까지의 하중-침하 곡선이 유사한 것으로 조사되었다. 동재하시험의 초기항타시험시 지반의 허용지지력 은 정재하시험의 평균 약 58%를 얻은 반면에 재항타시험시 지반의 허용지지력은 평 균 약 17% 높은 것으로 연구되었다. 이는 두 시험의 시간차 및 적용하중에 의한 것 으로 판단된다.
4) 국내의 경우 고강도 H말뚝은 주로 가설 토류벽재로 사용되고 있으나 상기에서 언급 된 바와 같이 강관말뚝 및 PHC말뚝과 비교해 볼 때 비슷하거나 다소 우수한 것으로 평가되어 기초말뚝 설계시 고려할 것을 제안하였다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997), 구조물 기초 설계기준, (사)한국지반공학회.
2. 건설교통부(1996), 도로교 표준시방서, (사)대한토목학회.
3. 이명환, 이인모(1994), "말뚝기초(Ⅶ)", 한국지반공학회, 제10권, 제1호, pp. 149~166.
4. 이명환, 홍헌성, 조천환, 여병철, 추문식, 엄재경(1998), "항타 H말뚝의 지지력특성 및 경제성", '98 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 195~202.
5. 이영남, 이종섭(1997), "대구경말뚝의 거동예측 및 지지력 산정", 현대건설(주) 기술연구소, pp. 149~289.
6. 천병식, 조천환(1999), "Set-up 효과를 반영한 타입말뚝의 파동이론해석", 대한토목학회, 제15권, 제2호, pp. 95~104.
7. 한국표준협회(1996), H형강말뚝, KS F 4603.
8. American Iron and Steel Institute(1975), Steel Pile Load Test Data.
9. Davisson, M. T.(1973), "High Capacity Piles", Soil Mechanics Lecture Series, Soil mechanics and Foundation Division, Illinois Section of ASCE, pp. 81.
10. GRL Associates, Inc.(1996), CAPWAP User Manual.
11. Ho, J.(1991), "The Use of High Strength H Bearing Piles in Hong Kong", Proc. of 4th Int. DFI Conf., Balkema, pp. 249~254.
12. Huang, S. M.(1988), "Application of Dynamic Measurement on Long H-Pile Driven into Soft Ground in Shanghai", Proc. of third Int. Conf. on the Application of Stress-Wave Theory of piles, BiTech Publisher, Ottawa pp. 635~643
13. Michell등(1984), "Time-Dependent Strength Gaim in Freshly Deposited or Densified` Sand", Journal of Geoteachnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 11, Nov., 1984, pp. 1559~1576
14. Schmertmann(1991), "The Mechanical Ageing of Soils", The 25th Karl Terzaghi Lecture, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. GT9, pp. 1288~ 1330
15. Tomlinson, M. J.(1994), Pile Design and Construction Practice (4th Ed.), John Wiley and Sons, Inc., pp. 8-35, 99~122.
16. Wong, I. W.(1994), "Performance of Long Slender Piles Installed by Jacking", Proc. of Int. Conf. on Design and Construction of Deep Foundations, FHWA, pp. 1657~1665.

(접수일자 2000.1. 26)