

기성말뚝의 지지거동

The Behavior of Bearing Capacity for the Precast Piles

박 영 호* Park, Young-Ho

Abstract

Dynamic and static load tests are conducted in four construction sites by using steel pipe piles(SPP) and concrete piles to compare differences of load bearing mechanism. Steel pipe piles are instrumented with electric strain gages and are subject to dynamic load tests during driving. The damage of strain gages attached is checked simultaneously. Static load test is also conducted on the same piles after two to seven days' elapse. Then load-settlement behavior and shaft and/or tip resistances are measured.

As a result, the allowable bearing capacity calculated by the Davisson's offset method of CAPWAP analysis shows 2~33% larger than that of static load test. The average value of allowable bearing capacity of static load test is closer to the allowable capacity obtained at the safety factor of 2.5 applied on ultimate bearing capacity than to the one obtained from the Davisson's offset method. The analysis of strain gage readings shows that unit skin friction increases with depth. Furthermore, the friction mobilized around the 1~2m above the pile tip considerably contributes to the total shaft resistance.

요 지

4개 현장에 실물크기의 강관말뚝과 PC 및 PHC 말뚝의 축방향에 대한 지지거동을 알아보기 위하여, 강관말뚝에 스트레인게이지를 부착하고 항타시 계측기 손상여부를 조사하면서 동재하시험을 수행하였다. 아울러 동일한 말뚝에 대하여 2일과 7일 경과후에 정재하시험을 실시하여 하중-침하량 거동과 주면 및 선단지지력을 분리 측정하였다.

그 결과, CAPWAP 해석에 Davisson 방법을 적용하여 구한 강관말뚝의 허용지지력은 정재하시험에서 구한 허용지지력보다 약 2~33% 정도 크게 나타났다. 그리고 정재하시험 결과에서 구한 산술평균한 허용지지력은 CAPWAP 해석에서 Davisson's offset 방법으로 구한 허용지지력보다 극한지지력에 FS=2.5를 적용하여 구한 허용지지력에 더 근접하는 경향을 보였다. 또한, 단위면적당 주면지지력은 깊이가 증가함에 따라 증가하였고, 말뚝선단부 1~2m 이내에서 발휘되는 비율이 상당히 큰 것으로 나타났다.

Keywords : Load bearing mechanism, CAPWAP analysis, Static load test, Instrumented pile

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 실장

1. 서론

직타에 의한 기성말뚝의 하중전이 실험한 사례는 여러 연구자들의 연구결과에서 찾아 볼 수 있으며 이들의 연구들은 대부분 현장말뚝의 정재하시험에 의해 수행되었다(Choi & O'Neil, 1997). 국내에도 강관말뚝에 계측기를 부착하여 항타관입한 후 정재하시험한 연구 결과를 볼 수 있다(최용규, 1998). 그러나 계측기가 부착된 기성말뚝에 대해 동재하와 정재하시험을 동시에 수행하여 말뚝의 지지 및 하중전이 거동을 비교한 연구 결과는 드물다. 그리고 재항타후, CAPWAP 해석에서 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 시간경과에 따른 지지력 증감효과(set-up or relaxation effect)를 파악하는데 이에 대한 신뢰도와 동재하시험에서 허용지지력을 산정할 때 각기 다른 안전율을 적용하므로써 말뚝의 지지력 산정에 큰 차이를 보이고 있다.

따라서 사질토지반에 타입된 강관말뚝과 PC 및 PHC 말뚝의 축방향에 대한 지지 및 하중전이 거동을 알아보기 위하여, 4개 현장에 정재하와 동재하시험을 동시에 실시하였다. 강관말뚝에는 스트레인게이지를 부착하고, 항타시 계측기 손상여부를 조사하면서 동재하시험을 수행하였다. 아울러 동일한 말뚝에 대하여 정재하시험을 수행하였다. 이 두 시험에서 구한 하중-침하량 거동과 주변 및 선단지지력을 분리 측정하여 거동을 비교하였으며, 동재하시험의 안전율과 시간경과에 따른 지지력 증감현상을 살펴보고자 한다.

2. 말뚝의 지지거동

말뚝의 극한지지력을 결정하는 방법은 ① 정재하시험과 동재하시험에 의한 방법, ② 정역학적 추정지지력 공식에 의한 방법, ③ 항타공식에 의한 방법, ④ 기존자료에 의한 추정으로 분류할 수 있으나 말뚝재하시험 방법 외에는 신뢰도가 극히 낮은 상태이다.

2.1 하중전이해석

말뚝과 그 주변의 흙에서 발생하는 마찰력인 주변마찰력과 선단지지력은 응력-변위-시간의 특성, 말뚝-흙 시스템내에 있는 모든 요소의 파괴특성, 말뚝의 설치방법 등에 의해 영향을 받으며(Vesic', 1977) 이를 해석하는 방법은 계측기를 이용하여 재하시험하는 방법과 하중전이 함수를 이용하는 방법, 탄성 및 고체방법 그리고 수치해석으

로 결정하는 방법이 있다. 본 논문에서는 계측기를 이용한 재하시험방법으로 하중전이 거동을 해석하였다.

2.2 CAPWAP 해석의 신뢰도

CAPWAP 해석결과는 CASE 방법이 토질의 Damping 값을 경험적으로 가정하는 것과는 달리, 신호조정기법(signal matching technique)을 사용하여 직접적으로 해를 구하기 때문에 CASE 방법보다 신뢰도가 높다고 할 수 있다. 그림 1은 CAPWAP 방법으로 산정한 하중-침하량 곡선과 정재하시험에서 측정된 곡선 관계를 나타내고 있다(GRL, 1988). 이 그림에 의하면, 동재하시험시 말뚝의 관입량이 충분한 경우 두 시험의 하중-침하량 곡선이 어느 정도 잘 일치하고 있음을 보여주고 있지만, 그렇지 않은 연구결과도 많다(Lee 등, 1996; 대한주택공사 등, 1998).

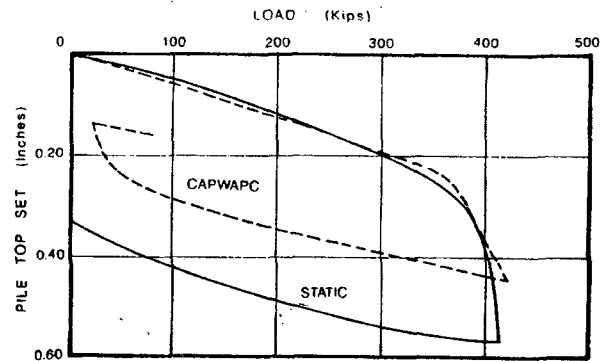


그림 1. CAPWAP과 정재하시험의 하중-침하 곡선 비교(GRL, 1988)

CAPWAP 분석과 정재하시험에 의한 말뚝의 지지력과 관계를 그림 2에 나타내었고, 이 결과를 이용하여 CAPWAP의 지지력을 정재하시험의 지지력으로 나눈 값을 그림 3과 같은 확률밀도함수로 나타내었다(Likins 등, 1996). 이 그림에서 시간비(time ratio)는 항타후 동재하시험(restrike)까지의 시간을 항타후 정재하시험까지의 시간으로 나눈 값이며, 이 해석에서 Radiation Damping이 사용되었다. 동재하시험 시기와 정재하시험 시기가 비슷한 말뚝이 41개이며 동재하시험이 훨씬 빨리 수행된 말뚝이 30개, 동재하시험이 늦게 수행된 경우가 11개로 총 82개에 대한 분석 결과이다.

동재하시험과 정재하시험 시기가 비슷한 결과에서 즉, 시간비가 0.33~1.25인 경우에 지지력 비율의 평균값이 1.03으로 동재하시험 결과가 약간 더 크게 산정되었으며, 분산이 0.09로 매우 작게 산정되어 동재하시험의 신뢰도가 매우 높음을 보여주는 것이다. 그러나 동재하시험을 정

재하시험보다 훨씬 이전에 수행하는 경우와 반대인 경우는 시간효과 때문에 분산 값이 더 크게 나타나고 있다. 정재하시험 결과와 CAPWAP 결과를 보다 정확히 비교하기 위해서는 두 시험의 정적지지력이 완전히 발휘되어야 한다는 것이다. 이것을 만족시키기 위해서는 정재하시험의 경우 파괴에 도달하여야 하며, 동재하시험시의 최종관입량은 2.5mm/blow 이상이어야 한다. 이 이하인 경우 지지력은 과소평가 된다. 또한 CAPWAP 분석은 신호조정기법을 사용하기 때문에 해석하는데 시간이 많이 걸리며 프로그램 사용자에게 따라 해가 다르므로 해석 결과의 유일성(uniqueness)에 관한 문제점이 있다.

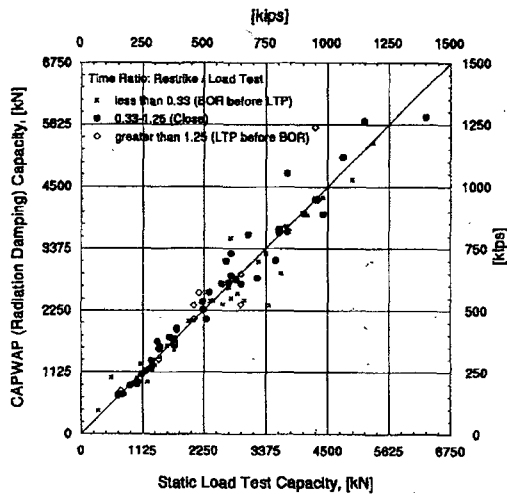


그림 2. CAPWAP과 정재하시험의 극한지지력 비교(Likins 등, 1996)

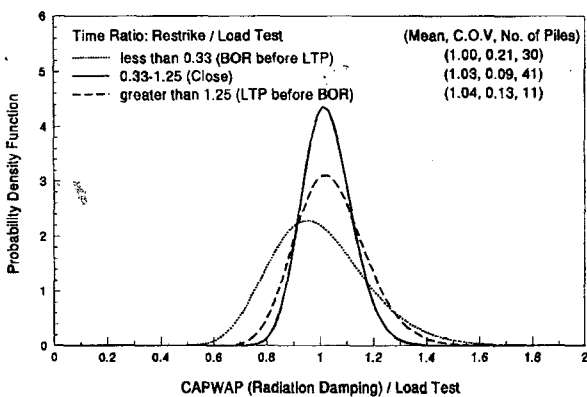


그림 3. 극한지지력비에 대한 확률밀도함수(Likins 등, 1996)

2.3 시간경과에 따른 말뚝 지지력 증감 효과

일반적으로 포화된 점토지반, 연약에서 중간정도 밀도의 실트지반 또는 세립의 모래지반 등에서 지지력 증가현상(set-up effect)이 발생하고, 포화되고 조밀한 세립토지반, 세일 등과 같은 연약한 압반층 등에서 지지력 감소현상

(relaxation effect)이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이는 항타시 말뚝선단부의 조밀한 지반이 팽창하면서 부의 간극수압이 유발하고, 연약한 압반층에 있어서는 구속되어 있던 수평방향의 응력이 이완되는데에 기인하는 것으로 알려져 있다.

지지력 증감현상의 크기는 지반특성, 말뚝재질과 말뚝 크기에 주로 의존한다. 지지력이 복원되는 기간은 매우 변동적이며, 이는 지반의 종류와 항타시 교란된 정도에 의존한다. 일반적으로 점토지반이나 세립토성분이 우세한 지반에서 정재하시험 및 재항타시험은 최소 2주 또는 그 이상 시간이 지난 뒤 수행하는 것이 바람직하다. 모래질 실트지반이나 세립 모래질지반에서는 간극수압의 소산이 보다 빨리 일어날 수 있다. 이와 같은 조립토 지반에서는 5일에서 일주일 정도를 잡아도 무방하다.

국내에서도 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화에 대한 연구결과가 보고되고 있으며, 국내 토질조건에서도 상당히 긴 시간경과 효과가 확인되고 있다. 기존의 연구결과에 의하면 주로 말뚝의 주면마찰력에 대하여 지지력의 변화가 나타나는 것으로 알려져 있다. 국내에서 시험한 경우 말뚝을 항타한 후 주면마찰력이 항타시보다 2~3배까지도 증가한 경우도 있으며, 상당한 시간이 경과하더라도 주면마찰력 증가가 거의 나타나지 않거나 극히 드문 경우도 있다. 아울러 시간경과에 따라 말뚝지지력이 감소할 가능성도 배제할 수는 없다.

3. 현장 재하시험 개요

4개의 정재하시험 현장 가운데, 3개의 현장에서 사용한 강관말뚝에는 말뚝 축방향으로 양면에 변형률게이지를 부착하고, 항타시 부착된 변형률게이지를 말뚝 주변의 흙으로부터 보호하기 위하여 C형강을 말뚝에 용접한다. 또한 변형률게이지의 망실여부를 확인하면서 말뚝에 과도한 압축항타응력이 발생하지 않도록 항타높이를 조절하면서 관입깊이별 동재하시험(E.O.I.D)을 실시한다. 또한 재항타시 동재하시험을 수행하여 시간경과에 따른 말뚝 지지력의 증감현상을 파악한다. 현장 여건상 EOID 시험 후, 며칠 후에 정재하시험을 수행하여 하중전이거동을 계측한다. 나머지 1개의 현장에서 사용한 PC 말뚝은 변형률게이지를 부착하지 않고 관입깊이별 동재하시험과 정재하시험을 실시하여 하중-침하 거동을 파악한다.

반력말뚝을 이용한 정재하시험방법은 미국의 표준압축시험방법인 ASTM D 1143-81 시험법에 의거하여 완속

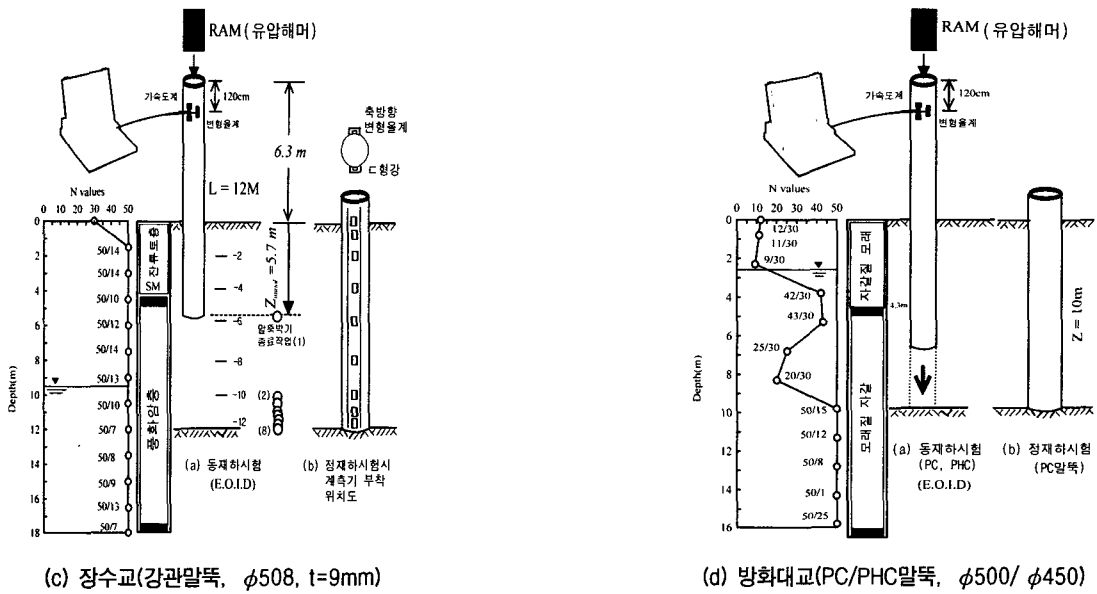
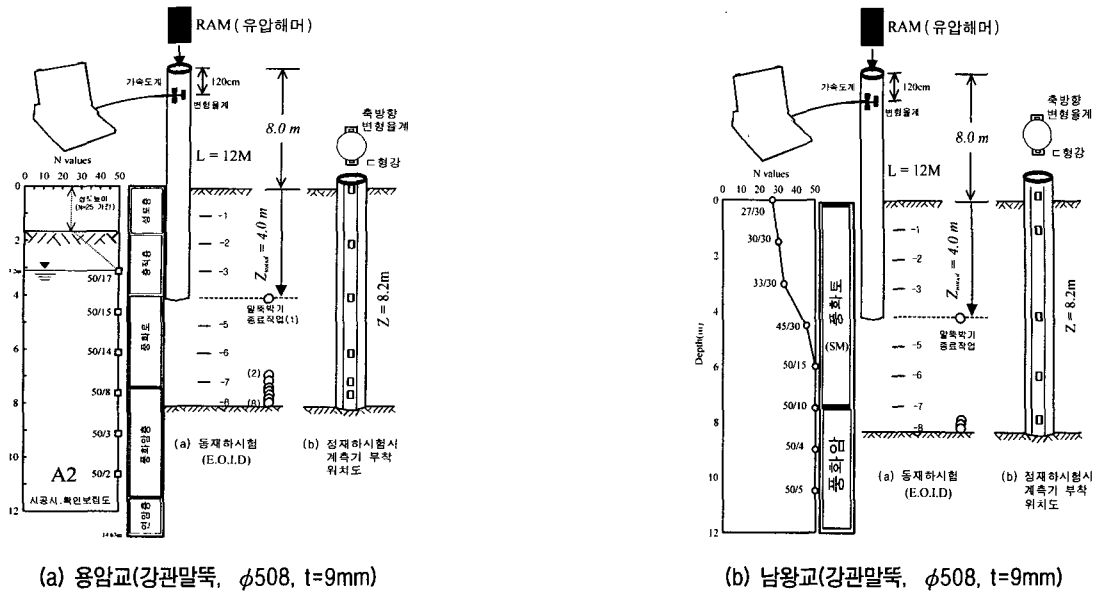


그림 4. 강관말뚝 부착한 계측기 위치와 지지주상도

표 1. 말뚝재하시험 방법

시험말뚝	말뚝 종류	최종관입깊이 (m)	말뚝시공방법	동재하시험		정재하시험		하중전이실험
				초기항타	재항타	방법	초기항타후, 정재하시험까지의 경과일	
용암교 교대	강관말뚝 ($\phi 508$, t=9mm)	8.2	직타	E.O.I.D	초기항타후 2, 14일 경과후	표준 압축시험	2일	실시
남왕교 교각	강관말뚝 ($\phi 508$, t=9mm)	8.2	직타	E.O.I.D	-	표준 압축시험	2일	실시
장수교 교각	강관말뚝 ($\phi 508$, t=9mm)	12.5	직타	E.O.I.D	-	표준 압축시험	2일	실시
방화대교 옹벽기초	PC말뚝 ($\phi 500$)	10	직타	E.O.I.D	초기항타후 1일 경과후	표준 압축시험	7일	-
	PHC말뚝 ($\phi 450$)	10	직타	E.O.I.D	초기항타후 15일 경과후	-	-	

표 2. 현장 재하시험한 말뚝기초와 항타장비 제원

구분	현장시험	용암교	남왕교	장수교	방화대교 응벽	
					PC 말뚝	PHC 말뚝
말뚝직경, D (mm)		508	508	508	500	450
말뚝두께, t (mm)		9(SPP)	9(SPP)	9(SPP)	70	
유압해머 종류		DKH-7	JUNTAN-7	DKH-7	NH-7	
낙하높이, h (cm)		72 (6단)	84 (7단)	84 (7단)	64(4단)~80(5단)	
해머중량, W_r (ton)		7	7	7	7	
해머효율, e_h (%)		(교대A1) 85 (교대A2) 81	92	84	89	



사진 1. 강관말뚝에 부착한 스트레인게이지

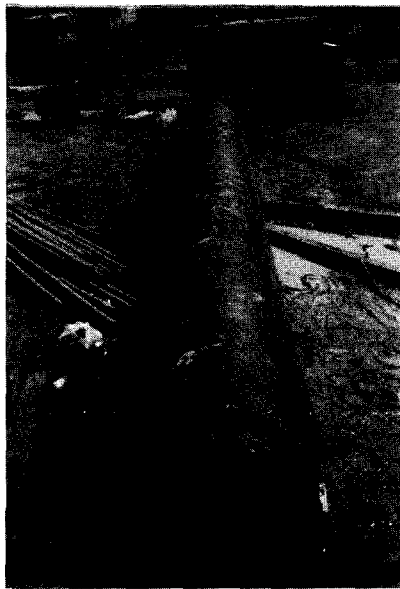


사진 2. 계측기 보호용 C형강

재하시험(maintained load test) 후, 과도재하시험(excess load test)을 수행하는 기본적인 시험방법을 사용한다. 그리고 강관말뚝에 스트레인게이지 부착 현황은 사진 1과 2에, 각 현장별 지질주상도는 그림 4에, 말뚝재하시험 방법은 표 1, 그리고 사용한 항타장비의 제원과 동재하시험에

서 구한 해머효율은 표 2에 나타나 있다.

4. 현장 말뚝시험 결과

4.1 하중-침하량 거동 곡선 비교

그림 4와 같은 지반조건의 기성말뚝에 정재하시험과 동재하시험을 동시에 실시하여 얻은 하중-침하량 거동 곡선은 그림 5에 나타나 있다.

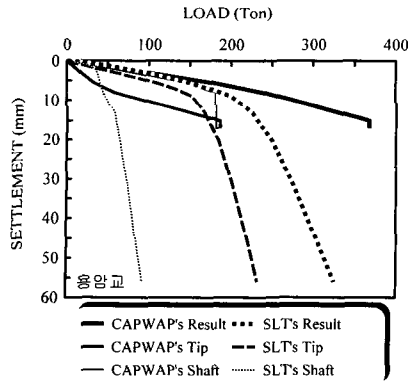
그림 5에 의하면, 정재하시험에서 측정된 하중-침하 거동곡선의 초기선형부분은 CAPWAP 분석 결과의 하중-침하 거동과 매우 유사하며, 그 이후의 거동은 동일한 침하량에 대해 동재하시험 거동이 정재하시험 거동보다 다소 큰 결과를 보이고 있다. 이는 동재하시험한 날로부터 2일(시간비=1/2=0.5)과 7일(시간비=1/7=0.14) 경과후에 정재하시험한 결과이며, 시간경과에 따른 말뚝 지지력 증가효과를 감안한다면 두 곡선거동의 편차는 더욱 커질 것으로 판단된다.

그리고 CAPWAP 분석 결과에서 구한 주면마찰력과 선단지지력의 거동은 정재하시험에서 구한 지지력 거동을 잘 묘사하지 못하였다.

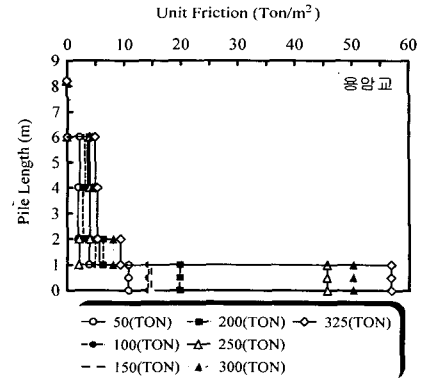
4.2 단위 주면마찰력 거동

변형률게이지를 부착한 강관말뚝에 하중단계별 정재하시험을 실시하여 구한 단위면적당 주면마찰력 분포는 그림 6과 같다. 이 그림의 Y축은 강관말뚝이 지반 속에 관입된 말뚝길이 이고, 말뚝길이 0m는 말뚝선단위치를 나타낸다.

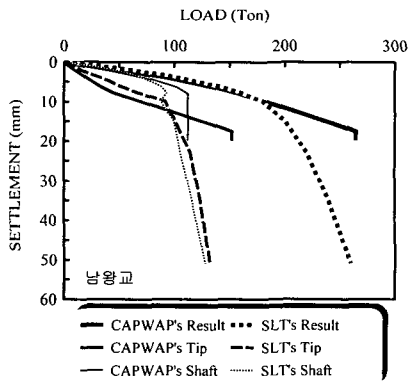
상기 그림에 의하면, 정재하시험에서 구한 강관말뚝의 단위면적당 주면마찰력은 말뚝선단부 1~2m 이내에서 차지하는 비율이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 재하하중이 커질수록 그 비율은 높아지는 것으로 나타났다.



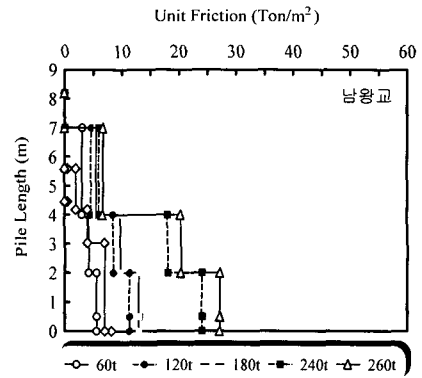
(a) 용암교 교대기초



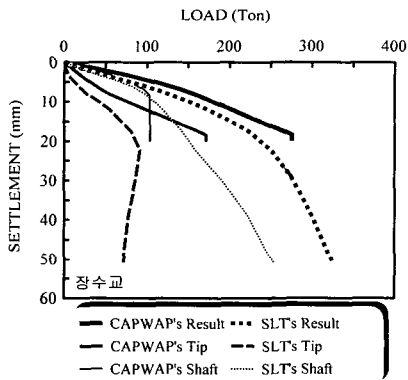
(a) 용암교 교대기초



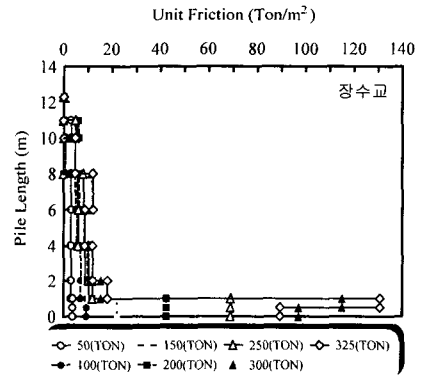
(b) 남왕교 교각기초



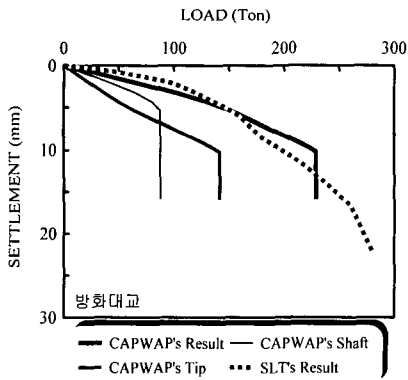
(b) 남왕교 교각기초



(c) 장수교 교각기초



(c) 장수교 교각기초



(d) 방화대교 옹벽기초

그림 5. 정재하시험과 동재하시험에서 측정된 하중전이거동 비교

그림 6. 강관말뚝($\phi 508, t=9\text{mm}$)의 단위면적당 주면마찰력 분포

4.3 시간경과에 따른 말뚝 지지력 증감 효과

기성말뚝의 시간경과에 따른 말뚝 지지력 증감효과를 살펴보기 위하여, 3가지 종류의 기성말뚝에 대하여 말뚝 관입 깊이별 동재하시험과 재항타를 실시한 결과는 표 3과 그림 7~11에 나타나 있다.

표 3과 그림 7~8에 의하면, 지지력 증가(set-up) 효과가 관찰되었으며 그 양은 초기항타 직후에 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 지지력 증가효과에 의한 지지력 상승분은 주면부분과 선단부분에 각각 17(ton), 32.1(ton)(초기항타

표 3. PDA 시험결과 및 CAPWAP 해석 결과

현 장 명	시험 말뚝	BL#	CASE METHOD				CAPWAP METHOD								
			압축응력 (ton/cm ²)		E M X	최종 침하량 (mm)	압축응력(ton/cm ²)			주면 마찰력 (ton)	선단 지지력 (ton)	총 지지력 (ton)	허용지지력 (ton)		
			머리	선단			머리	선단	최대응력				F.S(2.5)	DAV'S (FS=2)	
남왕교 (강관말뚝)	교각 [E.O.I.D]	98	2.515	1.268	5.47	6.0	2.505	1.888	2.717	86.7	217.8	304.4	121.8	152.2↑	
	교각 [정재하시험]	480	2.147	0.772	4.95	7.0	2.114	1.613	2.240	112.4	152.2	264.5	105.8	132.3	
용암교 (강관말뚝)	교대 A1 [E.O.I.D]	615	1.863	0.326	4.29	6.2	1.855	1.361	2.088	99.6	125.0	224.6	89.8	95.0	
	교대 A1 [재항타:2일]	34	-	-	-	-	2.237	1.631	2.333	116.5	157.1	273.6	109.4	136.8↑	
	교대 A1 [재항타:14일]	37	2.487	0.956	3.64	2.7	2.473	1.654	2.570	123.8	189.8	313.6	125.4	156.8↑	
	교대 A2 [정재하시험]	369	2.849	2.147	4.22	3.8	2.839	2.232	2.872	181.1	186.2	367.3	146.9	183.7↑	
방화대교 (PC, PHC 말뚝)	PC 말뚝 [E.O.I.D]	25	-	-	-	-	0.237	0.238	0.242	35.7	190.4	226.5	90.4	113.1	
	PC 말뚝 [재항타:1일]	5	-	-	-	-	0.215	0.264	0.264	60.6	194.8	255.4	102.2	127.7	
	PC 말뚝 [정재하시험]	959	0.228	0.113	3.33	5.0	0.230	0.188	0.243	87.6	141.6	229.2	91.7	114.6	
	PHC 말뚝 [E.O.I.D]	672	0.285	0.311	3.95	6.0	0.285	0.319	0.319	1.5	229.3	230.8	92.3	62.5	
	PHC 말뚝 [재항타:15일]	26	0.282	0.336	3.46	4.0	0.281	0.330	0.330	9.6	240.7	250.4	100.2	95.0	
장수교 (강관말뚝)	교각 [정재하시험]	1013	2.296	0.744	5.34	2.8	2.266	1.826	2.389	103.7	171.5	275.2	110.1	137.6	

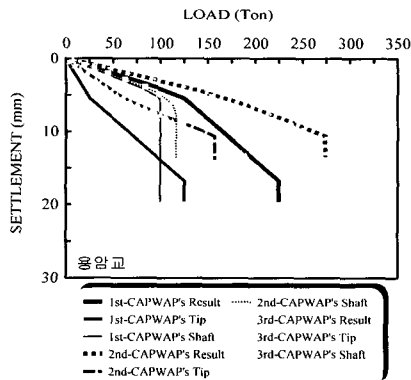


그림 7. 초기와 재항타시 동재하시험 결과(용암교)

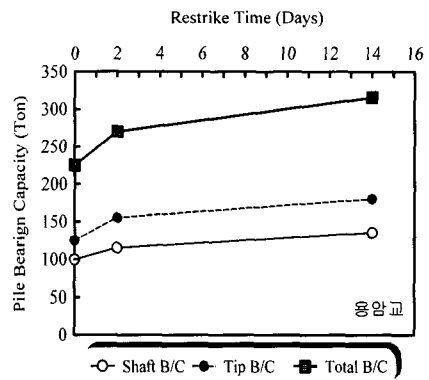


그림 8. 시간경과에 따른 말뚝 지지력 변화(용암교)

후 2일 경과 후), 7.3(ton), 32.7(ton)(재항타후 12일 경과 후)로 나타나 선단부의 효과가 다소 우세한 결과를 보였다. 그리고 총지지력은 초기항타에 비해 2일 후에는 약 22%, 14일 후에는 약 40%의 증가 양상을 보였다.

그림 9~10은 PHC 말뚝에 대한 재항타시험 결과이다. 초기항타후 15일 경과시, 총지지력 증가효과는 약 8% 정도로 나타났다. 다만 최대하중에서 침하량을 비교해 볼 때

초기항타시 약 22mm, 재항타시 약 18mm로 지반 강성이 증가한 결과를 보였다. 이 경우 15일 후주면지지력의 증가분은 약 8ton에 지나지 않으나 이는 초기항타시의 주면지지력 1.5ton의 약 5배에 해당하는 값이다. 침하량이 감소한 것은 선단부의 지반강성이 증가한 결과로 판단되며, 선단지지력의 증가분이 크지 않은 결과는 지지력 증가효과가 확인되도록 충분한 에너지로 항타하지 않은 결과인 것

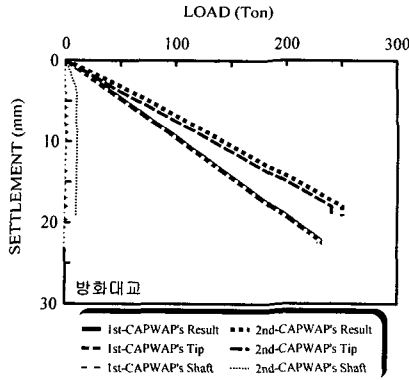


그림 9. PHC 말뚝에 대한 재항타시 동재하시험 결과 (방화대교 응벽기초)

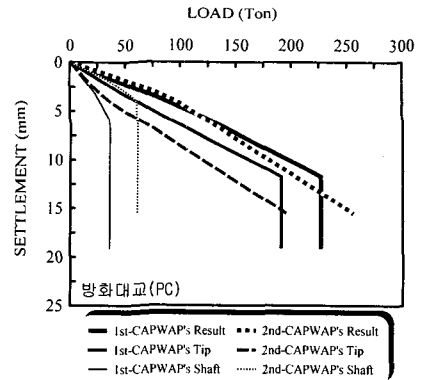


그림 11. PC 말뚝에 대한 재항타시 동재하시험 결과 (방화대교 응벽기초)

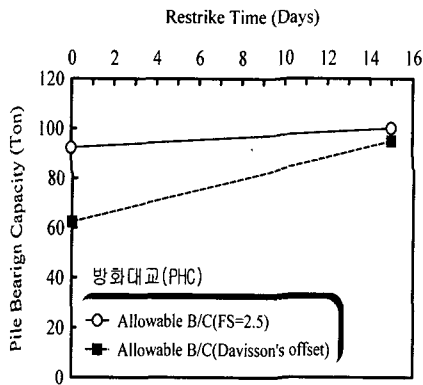


그림 10. 시간경과에 따른 말뚝 지지력 변화(PHC 말뚝)

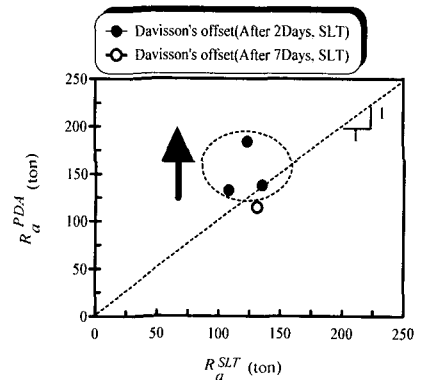


그림 12. Davisson's offset에 의한 허용지지력 비교

으로 추정된다.

그림 11은 PC 말뚝에 대한 재항타 결과이다. 1일 후 재항타를 수행한 결과로서 총지지력 증가효과는 약 13%의 증가를 보였는데 이는 약 70%의 주변마찰력 증가 때문이었다. 이 경우는 지반강성 증가가 뚜렷이 나타나지 않았으나 초기선형부분에서 주변마찰력 상승분에 의한 지반강성이 증가하는 양상을 보였다. 이 경우는 선단부의 지반강성 및 지지력의 증가양상이 관찰되지 않았으며 항타후 1일 후의 재항타 결과로 지지력 증가효과가 충분히 발생되지 않은 상태의 결과로 추정된다.

본 논문에서 3종류 말뚝에 대해 시간경과에 따른 동재하시험을 실시한 결과, 시간경과에 따른 말뚝 지지력 증가효과가 발생하였으며 항타후 시간 경과량, 지반조건 등에 따라 그크기와 선단 및 주변부분에서의 효과는 다양하게 나타나고 있음을 확인하였다.

4.4 허용하중 비교

동재하시험으로부터 허용하중을 구하는 일반적인 방법은 ① CAPWAP 분석으로 구한 하중-침하량 곡선에

Davisson 방법을 적용하여 항복하중을 구하고 이때 안전율, FS=2.0을 적용하여 허용하중을 구하는 Davisson 방법, ② AASHTO 기준은 지반조사 결과의 질과 지지력 확인에 대한 시공관리방법에 기초하여 결정하여야 한다고 명시하고 있으며, 과동방정식 분석과 동재하시험 수행시 극한하중에 안전율, FS=2.25를 적용하여 허용하중을 구하는 방법 그리고, ③ 미육군공병단 방법(US Army Corps, 1991)은 말뚝항타분석기에 의해 경험적 또는 이론적 예측이 뒷받침 되었을 때 극한하중에 안전율, FS=2.5를 적용하여 구하는 방법이 있다.

본 논문의 정재하시험에서 극한하중을 얻지 못하고 항복하중을 얻었다. 여기서 극한하중은 하중-침하량 곡선에서 침하량 축에 거의 평행하게 될 때의 하중을 의미한다(대한토목학회, 1996). 이 항복하중에서 허용하중을 결정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 논문에서는 건설교통부에서 권장하는 항복하중 판정법으로 허용하중을 산정한 결과는 표 4에 나타나 있다.

표 4에 나타나 있는 정재하시험에서 구한 허용하중 분포범위는 항복하중을 결정하는 방법에 따라 큰 편차(최대 50ton)를 보이기 때문에 동재하와 정재하시험 결과에서

표 4. 정재하시험과 동재하시험 결과의 허용지지력

현장	판정기준	항복 하중 (ton)	안전율	정재하시험(ton)		동재하시험에 의한 허용하중(ton)		비고
				허용 하중	산술 평균	최대하중의 FS=2.5에 해당하는 하중 값	Dav's (FS=2.0)	
용암교	P-S	200	2	100	112.4 (Δ25)	146.9	183.7	2일
	log P-log S	200	2	100				
	S-log t	250	2	125				
	P-ds/d(log t)	225	2	113				
	Davisson's offset	247	2	124				
남왕교	P-S	180	2	90	97.6 (Δ20)	105.8	132.3	2일
	log P-log S	180	2	90				
	S-log t	220	2	110				
	P-ds/d(log t)	180	2	90				
	Davisson's offset	215	2	108				
장수교	P-S	225	2	113	124.8 (Δ25)	110.1	137.6	2일
	log P-log S	225	2	113				
	S-log t	275	2	138				
	P-ds/d(log t)	250	2	125				
	Davisson's offset	270	2	135				
방화대교 옹벽 기초	P-S	180	2	90	116.2 (Δ50)	91.7	114.6	7일
	log P-log S	180	2	90				
	S-log t	280	2	140				
	P-ds/d(log t)	260	2	130				
	Davisson's offset	262	2	131				

항복하중을 동일하게 구할 수 있는 Davisson 방법을 적용하여 허용하중을 구한 결과는 그림 12에 나타나 있다. 여기서 R_a^{PDA} 와 R_a^{SLT} 는 동재하와 정재하시험에서 구한 허용지지력을 나타낸다.

정재하와 동재하시험에서 구한 허용지지력이 같으면 그림 12의 사선상에 있어야 한다. 그러나 용암교 교대지반인 경우 정재하시험의 허용하중은 124ton과 CAPWAP 해석 결과는 183.7ton으로 동재하시험 값이 정재하시험 값보다 32.5%, 남왕교 교각지반에서는 18.4% 크게 나타났다. 그리고 장수교 교각지반에서는 정재하와 동재하시험 결과가 매우 유사한 결과를 보였으며, 방화대교 옹벽기초지반은 정재하시험 결과가 CAPWAP 분석 결과보다 14.3% 크게 나타났다. 그러나 시행타후 2~7일 경과후에 정재하시험을 실시한 결과를 미루어 보면, CAPWAP 해석에 Davisson 방법을 적용하여 구한 허용지지력은 정재하시험에서 구한 허용지지력 보다 과대평가된 것을 알 수 있다.

그리고 정재하시험에서 허용지지력을 결정하는 방법에 따라 허용지지력의 편차가 크기 때문에 정재하시험 결

과에서 여러 가지 방법으로 구한 허용지지력을 산술평균한 값($\overline{R_a^{SLT}}$)에 대하여 CAPWAP 해석에서 미육군공병단 방법(FS=2.5)과 Davisson's offset 방법으로 구한 허용지지력과의 관계를 나타낸 것이 그림 13과 같다.

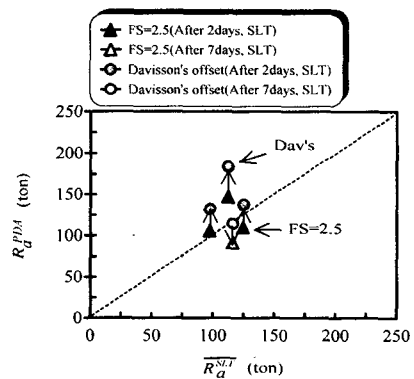


그림 13. 정재하시험과 산술평균한 동재하시험의 허용지지력 비교

이 그림에서 미육군공병단 방법으로 구한 허용지지력이 Davisson's offset 방법으로 구한 값보다 정재하시험 결과의 산술평균한 허용지지력에 더 근접하는 경향을 보였다.

5. 결론

4개 현장에 실물크기의 강관말뚝과 PC 및 PHC 말뚝의 축방향에 대한 지지거동을 알아보기 위하여, 강관말뚝에 스트레인게이지를 부착하고 항타시 계측기 손상여부를 조사하면서 동재하시험을 수행하였다. 아울러 동일한 말뚝에 대하여 2일과 7일 경과후에 정재하시험을 실시하여 하중-침하량 거동과 주변 및 선단지지력을 분리 측정된 결과는 다음과 같다.

- 1) 정재하시험에서 구한 강관말뚝의 단위면적당 주변마찰력은 말뚝선단부 1~2m 이내에서 차지하는 비율이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 재하하중이 커질수록 그 비율은 높아지는 경향을 보였다.
- 2) 시험말뚝에 대해 동재하와 정재하시험을 실시하여 Davisson 방법으로 허용지지력을 비교 한 결과, 용암교, 남왕교, 장수교의 강관말뚝에 대한 동재하시험 결과는 정재하시험 결과에 비해 각각 약 33%, 18%, 2% 정도 크게 나타났으며, 방화대교 옹벽기초의 PC 말뚝에 대해서는 약 14% 낮게 나타났다.
- 3) 동재하와 정재하시험의 허용지지력을 비교한 결과, 정재하시험 결과에서 구한 산술평균한 허용지지력은 CAPWAP 해석에서 Davisson's offset 방법으로 구한 허용지지력보다 극한지지력에 FS=2.5를 적용하여 구한 허용지지력에 더 근접하는 경향을 보였다.

참고문헌

1. 대한주택공사, 강원산업주식회사, 인천제철주식회사(1998), 고강도 H형강 말뚝의 지지력특성 연구, 대한주택공사 부설 주택연구소, 경기도, pp.99~120.
2. 대한토목학회(1996), 도로교표준시방서, 건교부, 서울, p.668.
3. 최용규, 정성기, 권오균(1998), "개단강관말뚝의 하중전이실험에 관한 연구", 대한토목학회지, 제18권, 제4호, pp.241~250.
4. ASTM D 1143-81(1992), "Standard Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load", American Society for Testing and Materials, Vol.4, No.8, Philadelphia, pp.195~205.
5. Choi, Y., and O'Neil, M.W.(1997), "Soil Plugging and Relaxation in Pipe Pile During Earthquake Motion", Journal of Geotechnical and Environment Engineering, Vol.123, No.10, pp.975~982.
6. GRL Associates, Inc.(1988), DFI annual conference in Raleigh, NC.
7. GRL Associates, Inc.(1996), CAPWAP User Manual.
8. Lee, W.J., Lee, I.M., Yoon, S.J., Choi, Y.J., and Kwon, J.H.(1996), "Bearing Capacity Evaluation of the Soil-Cement Injected Pile using CAPWAP", The Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles. Townsend, F.C., Hussein, M. and McVay, M.C. eds, Florida, pp.409~419.
9. Likins, G.E., Rausche, F., Thendean, G., and Svinikin, M.(1996), "CAPWAP Correlation Studies", The Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, Townsend, F.C., Hussein, M. and McVay, M.C. eds, Florida, pp.447~464.
10. Smith, E.A.L.(1960), "Pile-Driving Analysis by the Wave Equation", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol.86, SM4, pp.35~61.
11. US Department of Transportation Federal Highway Administration (1980), Wave Equation Analysis for Piles, Arlington, pp.14~47.
12. US Army Corps of Engineers(1991), Design of Pile Foundations Settlement Analysis, Engineer Manual, EM 1110-2-2906, pp.421~4-3.
13. U.S. Dpt. of Transportation(1996), Design and Construction of Driven Pile Foundations, Workshop Manual.
14. Vesic', A.S.(1977), Design of Pile Foundations, NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, pp.8~ 31.

(접수일자 1999. 10. 8)