

기성말뚝의 지지력 거동해석과 시공관리방안 Bearing Capacity and Control Method of Driven Piles

박영호¹⁾, Young-Ho Park, 김경석²⁾, Kyung-Suk Kim,

¹⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 실장, Research Director, Highway Research Center, KHC

²⁾ 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 연구원, Researcher, Highway Research Center, KHC

ABSTRACT : Dynamic load and static load tests are performed on steel pipe piles and concrete piles at five construction sites in highway to compare the difference of load bearing mechanisms. At each site, one steel pile is instrumented with electric strain gages and dynamic tests are performed on the pile during installation. Damages of strain gages due to the installation are checked and static test is performed upon the same pile after two or seven days as well.

It shows that load transfer from side friction to base resistance behaves somewhat differently according to the results of load-settlement analysis obtained from PDA and static load test. Initial elastic stage of load settlement curves of two load tests is almost similar. But after the yielding point, dynamic resistance of pile behaves more stiffer than static resistance, thus, dynamic load test result might overestimate the real pile capacity compared with static result.

Analysis of gage readings shows that unit skin friction increases exponentially with depth. The skin friction is mobilized at the 1~2m above the pile tip and contributes to the considerable side resistance. Comparison of side and base resistances between the measured value and the calculated value by Meyerhof's bearing capacity equation using SPT N value shows that the calculated base resistance is higher than the measured. Therefore, contribution of side resistance to total capacity shouldn't be ignored or underestimated. Finally, based upon the overall test results, a construction control procedure is suggested.

Key words : PDA, Static load test, Load transfer, Instrumented pile

1. 서 론

말뚝의 연직방향에 대한 하중전이거동을 알아보기 위하여, 다음과 같이 말뚝의 정재하와 동재하시험을 실시하였다. 실물크기의 말뚝기초에 대하여 지반조사 자료와 기본적인 구조계산서를 바탕으로 파동이론해석을 수행하고, 시험타시 동재하시험을 수행하여 항타관리기준안을 제시한다. 본항타시 스트레인 게이지가 부착된 말뚝에 대해 계측기 손상여부를 조사하면서 동재하시험을 수행하고, 아울러 정재하시험을 수행하여 하중-침하량 거동과 주면 및 선단지지력을 분리 측정하였다.

그 결과, 동재하시험 결과에서 산정된 주면지지력과 선단지지력은 정재하시험의 거동을 반영하는데 있어서 신뢰도가 높지 않았지만, 두시험 방법의 하중거동에서 초기탄성영역의 거동은 매우 유사하게 나

타났다. 그리고 정재하시험의 하중-침하량 곡선의 변곡점 이후의 거동은 CAPWAP 분석 결과의 지지력이 정재하시험 결과에 비해 과대평가하는 결과를 나타냈다. 또한, 단위면적당 주면지지력은 말뚝선단부 1~2m 이내에서 차지하는 비중이 상당히 큰 것으로 나타났다.

2. 현장재하시험

4개 현장에서 수행한 정재하와 동재하시험의 내용은 다음과 같다.

2.1 수행방법

2.1.1 정재하시험

반력말뚝을 이용한 정재하시험방법은 미국의 표준압축시험방법인 ASTM D 1143-81 시험법에 의거하여 완속재하시험(Maintained Load Test)후, 과도재하시험(Excess Load Test)을 수행하는 기본적인 시험방법을 사용한다.

2.1.2 하중전이 거동 계측

4개의 정재하시험 현장 가운데 말뚝 종류가 강관말뚝인 3개의 현장 말뚝기초에 변형율게이지를 부착하고, 나머지 1개의 현장은 PC말뚝으로 변형율게이지를 부착하지 않고 정재하시험을 실시하여 하중전이거동을 파악한다. 그리고 계측기 부착위치는 그림 2에 나타나 있다.

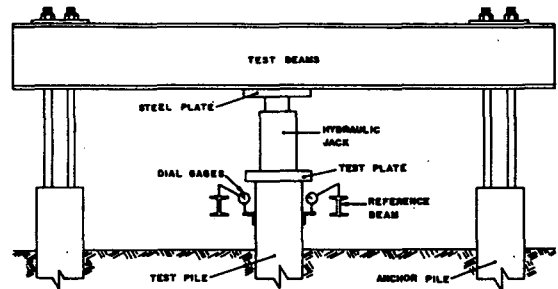


그림 1. 반력장치와 유압 잭을 이용한 재하장치도

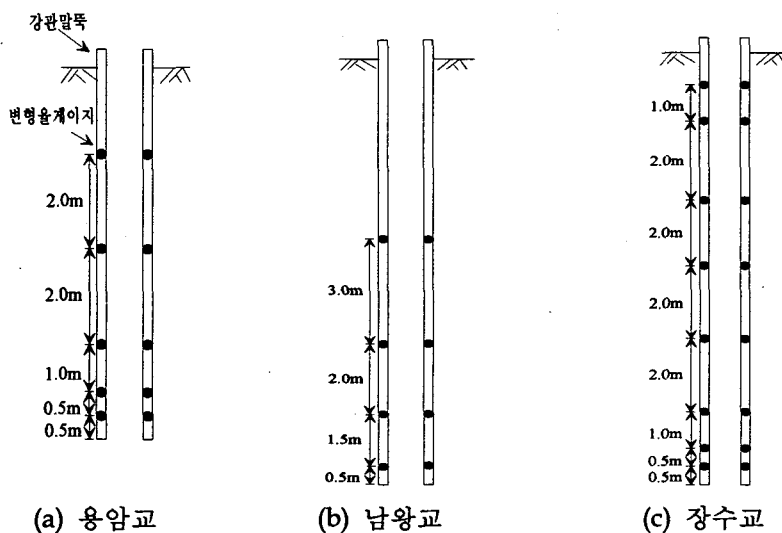


그림 2. 교각 및 교대 말뚝에 부착한 변형율게이지 위치

2.2 현장시험의 개요

정재하시험을 수행할 1개의 말뚝에 대해 전기저항식 변형율계이지를 말뚝 축방향으로 양면에 부착하고, 항타시 변형율계이지의 망실여부를 확인하기 위하여 PDA로 말뚝에 작용하는 압축응력이 과다하게 발생하지 않도록 항타고를 조절한다. 그리고 현장 여건상 항타후 며칠 후에 정재하시험을 수행하여 재하시험시 하중전이거동을 계측한다. 이때 사용한 항타장비의 제원과 동재하시험에서 구한 해머효율은 표 1, 지질주상도는 그림 3에 나타나 있다.

3. 현장재하시험 결과 분석 및 고찰

3.1 용암교

강관말뚝에 대한 정재하와 동재하시험 결과의 하중-변위 곡선은 그림 4(a)에 나타나 있다. 그림 2와 같이, 미계측한 말뚝선단부분(0~0.5m)을 고려하여 추정된 주변지지력과 선단지지력은 그림 4(a)에서 추정이라는 표현을 사용한다.

표 1. 현장재하시험한 말뚝기초와 항타장비 제원

구분	현장시험	용암교 (서해3공구)	남왕교 (수도8공구)	장수교 (수도11공구)	방화대교 응벽 (신공항4공구)	오창육교 (충청지역본부)
말뚝직경, D (mm)		508	508	508	450	508
말뚝두께, t (mm)		9(SPP)	9(SPP)	9(SPP)	70(PHC)	9(SPP)
초기관입깊이, z_0 (m)		4	12	5.7	5.7	4~5
유압해머 종류		DKH7	JUNTAN7	DKH-7	NH-7	DKH-7
낙하높이, h (cm)		72 (6단)	84 (7단)	84 (7단)	64(4단)-80(5단)	70 (6단)
해머중량, W_r (ton)		7	7	7	7	7
해머효율, e_h (%)		(교대A2) 0.85 (교대A2) 0.81	92	84	89	70
해머반발계수, n		0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

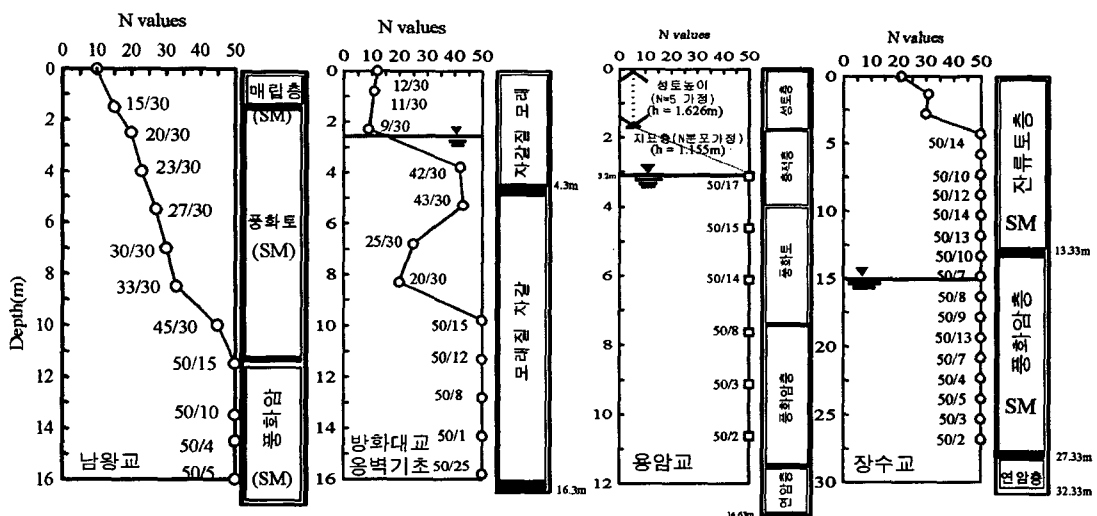


그림 3. 현장재하시험한 지반조건

3.1.1 정재하시험과 동재하시험 결과 비교

정재하시험한 하중-침하량 거동곡선에서 초기 탄성영역의 거동은 동재하시험 결과인 CAPWAP 방법으로 산정한 지지력 거동곡선과 비슷한 거동을 보이지만, 초기 탄성영역 이후의 거동은 동재하거동이 정재하거동보다 다소 큰 결과를 보이고 있다. 이 결과는 동재하시험한 날로부터 2일 경과후에 정재하시험한 결과이며, 지지력의 시간효과를 감안한다면 두 곡선거동의 편차는 더욱 커질 것으로 추정된다. 그리고 동재하시험거동곡선이 추정된 정재하거동곡선보다 선단지지력에 비해 주면지지력을 상당히 과대평가하는 결과를 보인다.

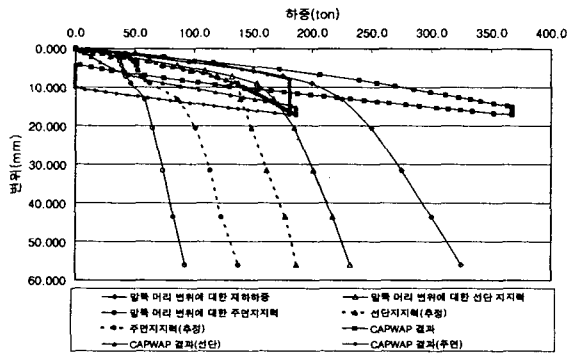


그림 4(a). 하중-침하 곡선(서해3공구)

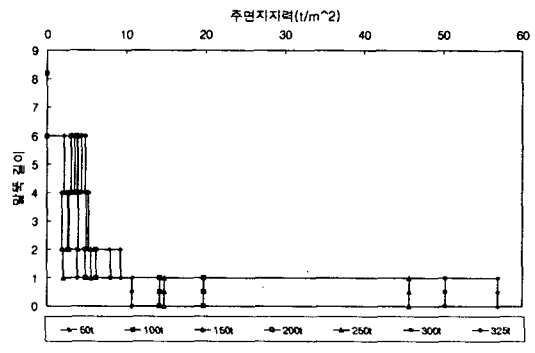


그림 4(b). 단위면적당 주면마찰력(용암교)

3.1.2 정적 지지력공식과 정재하시험 결과와의 비교

수정 Meyerhof 식을 이용하여 구한 극한주면지지력과 극한선단지지력은 각각 65ton, 304ton이다. 지반조사 결과가 시험말뚝이 근입된 지반조건을 잘 반영한다고 보았을 때 정역학적 지지력 공식을 통한 계산결과는 실측값에 비해 선단지지력을 과대평가하는 결과를 보이나, 이러한 결과는 정재하시험이 항타후 충분한 시간이 지난 뒤에 수행된 결과가 아니므로 지지력의 시간효과에 대한 영향으로 감안하여 판단하여야 한다. 일반적으로 사질토 지반에 근입된 말뚝의 경우 주면지지력 부분의 지지력증가(Set-up) 효과가 크게 나타나는 일반적인 경우를 고려해 볼 때, 최대 정재하하중 325ton이 가해질 때 주면지지력은 100ton를 상회할 것으로 판단된다. 이 결과에서 살필 수 있는 것은 주면지지력의 경우, 말뚝머리 변위 약 2mm에서 소성변형이 발생하는 것으로 나타났으며 선단지지력의 경우, 약 9mm에서 소성변형이 발생된 것으로 나타났다.

3.1.3 허용하중

정재하시험 결과를 해석하여 허용하중을 결정하는 방법에는 여러 가지가 있으나 여기서는 항복하중 판정법을 통해 허용하중을 산정한 결과는 표 2에, 동재하시험 결과는 표 3에 나타나 있다. 표 2에 나타나 있는 항복하중 분포범위는 너무 큰 편차(최대 50ton 까지)를 보이기 때문에 동재하시험과 정재하시험 결과에서 항복하중을 동일하게 구할 수 있는 Davisson 방법을 적용하여 구한 결과, 정재하시험의 허용하중은 124ton, CAPWAP 결과, 183.7ton으로 나타나, 동재하시험 값이 약 50% 가량 과대평가하는 결과를 보였다.

3.1.4 단위주면마찰력 거동

그림 4(b)의 말뚝길이는 강관말뚝이 지반 속에 관입된 깊이이고, 깊이 0m는 말뚝선단위치를, 9m는 지

표면을 그리고 각 점들은 변형율게이지 위치의 단위주면마찰력을 나타낸다. 이 그림은 단위면적당 주면지저력을 말뚝깊이에 따라 도시한 결과로 주면지저력은 선단부 1m 이내에서 차지하는 비중이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 재하하중이 커질수록 그 비율은 높아지는 것으로 나타났다.

표 2. 정재하시험과 동재하시험 결과의 허용지저력

현장	판정기준	항복하중 (ton)	안전율	정재하시험(ton)		동재하시험에 의한 허용하중(ton)		비고
				허용하중	산술평균	최대하중의 FS=2.5에 해당하는 하중 값	Dav's (FS=2.0)	
용암교	P-S	200	2	100	112.4	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	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	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 옹벽기초	P-S	180	2	90	116.2	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				

표 3. PDA시험결과 및 CAPWAP 해석결과

현장명	시험발목	BL#	CASE METHOD				CAPWAP METHOD							
			압축용력 (ton/cm ²)		E M X	최종 침하량 (mm)	압축용력(ton/cm ²)			주면 마찰력 (ton)	선단 지저력 (ton)	총 지저력 (ton)	허용지저력 (ton)	
			머리	선단			머리	선단	최대용력				FS (=2.5)	DAV'S (FS=2)
용암교	PR7-76	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 ↑
	PR7-TST [STATIC]	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
	AUG1	387	1.715	0.581	4.02	2.9	1.739	1.762	1.940	61.4	178.8	240.2	96.2	87.5
	AUG2	497	1.941	1.389	4.4	6.0	1.854	1.688	1.892	0.7	213.9	214.6	85.8	62.5
남왕교	A#1	615	1.863	0.326	4.29	6.2	1.855	1.361	2.068	99.6	125.0	224.6	89.8	95.0
	A#1 [RE1]	34					2.237	1.631	2.333	116.5	157.1	273.6	109.4	136.8 ↑
	A#1 [RE2]	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 ↑
	A#2 [STATIC]	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#2	25					0.237	0.238	0.242	35.7	190.4	226.5	90.4	113.1
	PC#2 [RE]	5					0.215	0.264	0.264	60.6	194.8	255.4	102.2	127.7
	BH-TST [STATIC]	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
	BH-PHC	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
	BH-PHC [RE]	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
	BH-SIP	55	0.303	0.248	3.93	10.0	0.301	0.273	0.311	1.0	189.9	191.0	76.4	55.0
장수교	PR#3 [STATIC]	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

3.2 남왕교

그림 5는 정재하시험결과와 CAPWAP 분석 결과를 비교한 것으로, 정재하시험은 동재하시험한 후 2일 지난 뒤에 수행하였다.

3.2.1 정재하시험과 동재하시험 결과 비교

정재하시험 결과는 주면지지력과 선단지지력이 전체 지지력에서 차지하고 있는 비중이 비슷하며, 미계측한 말뚝선단부분(0~0.5m)을 고려하여 추정된 주면지지력은 선단지지력보다 다소 크게 발휘되는 결과를 나타냈다. 두 재하시험결과, 초기 탄성영역의 거동이 매우 유사하게 나타났지만, 그 이후의 거동은 CAPWAP 분석 결과의 지지력은 정재하시험 결과에 비해 과대평가하는 결과를 나타냈다.

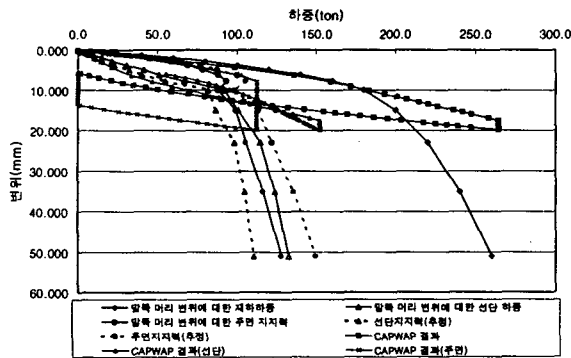


그림 5(a). 하중-침하 곡선(수도권8공구)

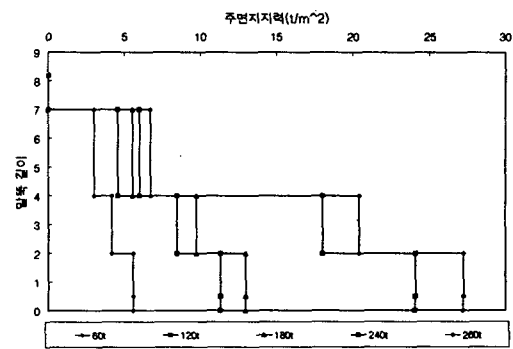


그림 5(b). 단위면적당 주면마찰력(장수교)

하중전이 계측 결과를 분석해 보면, 지지력을 과대평가한 결과는 CAPWAP 결과에서 선단지지력이 실제의 경우보다 과대평가된 결과에 기인하는 것으로 나타났다. 일반적으로 사질토지반에 근입된 말뚝의 경우, 주면지지력 부분의 지지력증가효과는 크게 나타나는 일반적인 경우를 고려해 볼 때 그림 5(a)에서 최대재하하중 260ton이 가해질 때 주면지지력은 150ton을 상회할 것으로 판단된다. 주면지지력의 경우 말뚝머리 변위가 약 8mm 일 때 소성변형이 발생되는 것으로 나타났으며, 선단지지력의 경우 약 10mm에서 소성변형이 발생된 것으로 나타났다.

3.2.2 정적 지지력공식과 재하시험 결과와의 비교

수정 Meyerhof 식을 이용해 지반조사 결과, N 값을 토대로 산정된 극한주면지지력과 극한선단지지력은 각각 82ton, 274ton으로 지반조사 결과가 시험말뚝이 근입된 지반조건을 잘 반영한다고 보았을 때 정역학적 지지력 공식을 통한 계산결과는 실측값에 비해 선단지지력을 과대평가하는 결과를 보였다.

3.2.3 허용하중

Davisson 방법에 의해 허용하중을 비교할 경우, 정재하시험 결과는 108ton(표 2참조), CAPWAP 결과는 132.3ton(표 3참조)으로 나타나, 동재하시험 값이 약 23% 가량 과대평가하는 결과를 보였다.

3.2.4 단위주면마찰력 거동

그림 5(b)는 단위면적당 주면마찰력을 말뚝 관입깊이에 따라 도시한 결과로 관입깊이가 증가함에 따라 단위주면마찰력은 증가하고, 최대 주면마찰력은 말뚝선단부 2m 이내에서 발휘하였다.

3.3 장수교

그림 6은 장수교 현장의 정재하시험결과와 CAPWAP 분석 결과를 비교한 것으로, 이 경우의 정재하시험은 항타후 2일 지난 뒤에 수행되었다.

3.3.1 정재하시험 결과의 하중전이거동

정재하시험결과, 추정된 선단부의 지지력이 약 40ton에서 파괴되는 것으로 추정되며, 이때의 말뚝머리의 침하량은 약 22mm로 측정되었다. 추정된 주변지지력은 머리변위 약 8mm에서 소성변형이 발생하는 것으로 나타났고, 그 이후에도 지지력이 증가하는 경화현상을 보였다. 이때의 지지하중은 약 110ton으로 측정되었다. CAPWAP 분석 결과의 정적지지력은 정재하시험 결과에 비해 다소 과대평가하는 결과를 나타냈다. 초기탄성영역의 거동은 지반강성이 정재하시험 보다 동재하시험에서 다소 크게 반영된 결과를 보였으며, 주변지지력은 작게 선단지지력을 크게 동재하시험 결과를 보였다.

3.3.2 정적 지지력공식과 재하시험 결과와의 비교

수정 Meyerhof 식을 이용해 지반조사 결과 N 값을 토대로 산정된 극한주면지지력과 선단지지력은 각각 172ton, 304ton으로 지반조사 결과가 시험말뚝이 근입된 지반조건을 잘 반영한다고 보았을때 정역학적지지력공식을 통한 계산결과는 실측값에 비해 선단지지력을 상당히 과대평가하는 결과를 보였다.

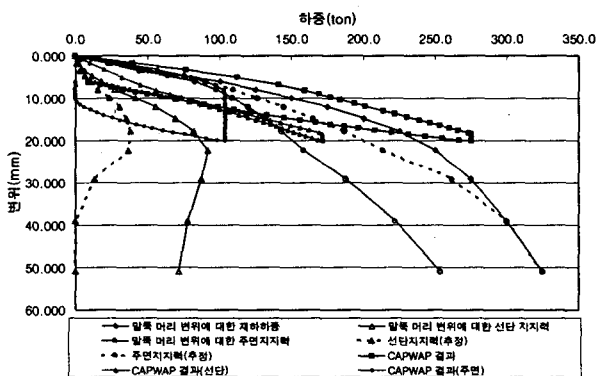


그림 6(a). 하중-침하 곡선(수도권11공구)

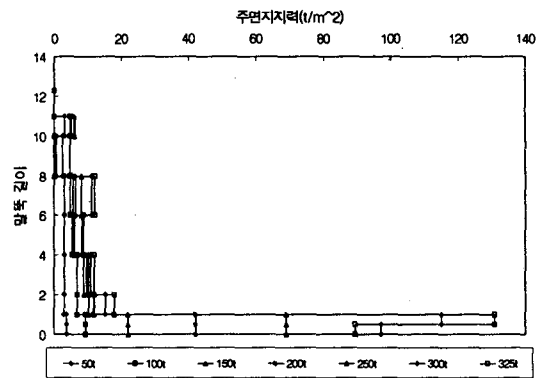


그림 6(b). 단위면적당 주면마찰력(장수교)

3.3.3 허용하중

Davison 방법으로 허용지지력을 산정한 결과는 정재하시험 결과가 135ton, CAPWAP 결과가 138ton으로 매우 유사한 결과를 나타냈다. 그러나 항타후 2일 경과후에 정재하시험을 실시한 결과를 미루어 보면(Set-up), 동재하시험 결과가 정재하시험결과보다 과대평가한 것을 알수 있다.

3.3.4 단위주면마찰력 거동

그림 6(b)은 단위면적당 주면지지력을 말뚝길이에 따라 도시한 결과로 단위주면지지력은 선단부 1m 이내에서 차지하는 비중이 상당히 큰 것으로 나타났으며 재하하중이 커질수록 그 비율은 높아지는 것으로 나타났다.

3.4 방화대교 웅벽기초

그림 7은 정재하시험 결과와 동재하시험 결과를 함께 도시한 그림이다. 이 경우 정재하시험은 항타후 7일 지난 뒤에 수행되었다.

3.4.1 두 재하시험 결과 비교

초기 탄성영역 부분의 경우 정재하시험 결과가 동재하시험의 CAPWAP 분석 결과보다 지반 강성이 큰 것으로 나타났으며 이는 Set-up 효과를 감안할 때 주변지지력의 증가효과에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 최대하중을 비교해 볼 때 지지력의 시간효과가 반영되지 않은 CAPWAP 분석의 전체 지지력은 정재하시험 결과보다 과소평가한 것으로 나타났으며, 만약 동일한 시간효과를 반영하였을 경우에는 동재하시험의 전체 지지력은 정재하시험의 지지력보다 과대평가될 것으로 추측된다.

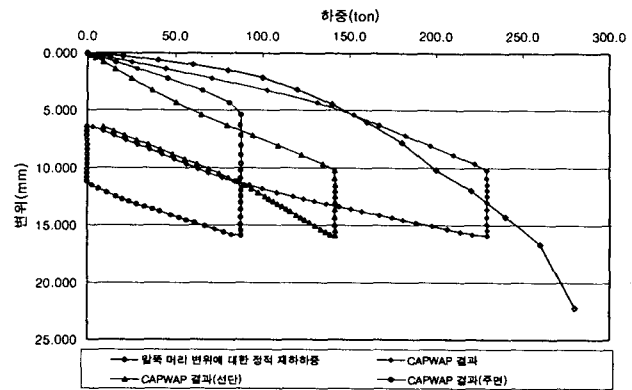


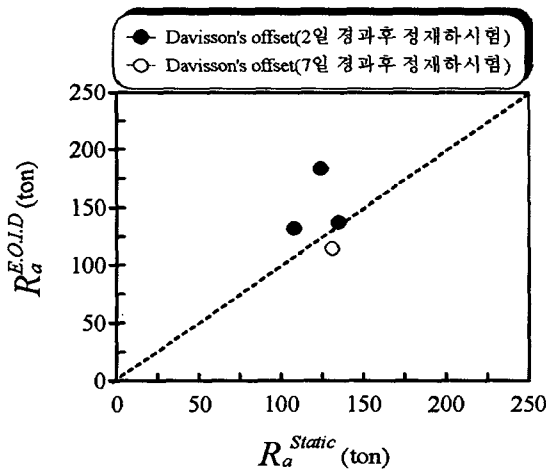
그림 7. 정재하시험과 동재하시험 결과 비교

3.4.2 허용하중

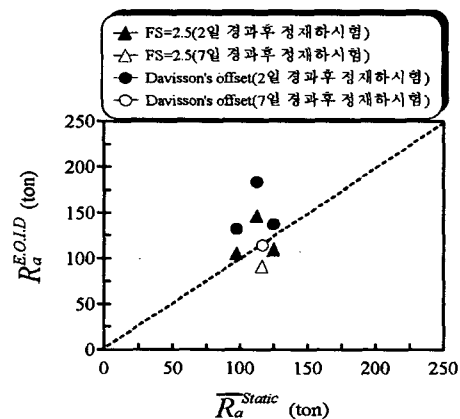
Davisson 방법에 의한 허용하중이 정재하시험 결과 131ton, CAPWAP 분석 결과 115ton으로 산정된 결과에서도 알 수 있다.

4. 동재하시험 결과 해석시, 안전율을 적용

동재하시험으로부터 허용하중을 구하는 방법으로 ① CAPWAP으로 구한 하중-침하량 관계를 Davisson 방법을 적용하고 이때 안전율을 2.0(개선된 강관말뚝의 설계와 시공, 1997)를, ② AASHTO 기준은 지반조사 결과의 질과 지지력 확인에 대한 시공관리방법에 기초하여 결정되어야 한다고 명시하고 있으며, 파동방정식 분석과 동재하시험 수행시 안전율을 2.25로 제안한 바 있다. 그리고 ③ 미공병단방법(US Army Corps ENG. Manual)에 의하면 말뚝 항타분석기에 의해 경험적 또는 이론적 예측이 뒷받침되었을 때 압축력에 대한 안전율을 2.5로 제시하고 있다.



(a) Davisson's offset에 의한 정재하시험과 동재하시험의 허용지지력 비교



(b) 산술평균한 정재하시험의 허용지지력과 동재하시험의 허용지지력 비교

그림 8. 정재하시험과 동재하시험의 허용지지력 비교

표 2에서, 동재하와 정재하시험에서 구한 하중-침하량 곡선에서 허용하중을 결정하는 동일한 방법인 Davisson's offset 방법을 적용하여 구한 결과는 그림 8(a)에 나타나 있다. 사질토인 재하시험 기반조건과 Set-up 효과(동재하시험한 후 2일~7일 경과한 후에 정재하시험한 결과)를 미루어 보아 동재하시험의 허용지지력이 정재하시험의 허용지지력보다 이하이거나 비슷한 값이야 할 것으로 판단된다. 그러나 동재하시험의 허용지지력이 정재하시험의 값보다 더 큰 값을 보임을 알았다.

그리고 정재하시험의 허용지지력을 결정하는 방법에 따라 허용지지력의 편차가 크기 때문에 정재하시험 결과에서 여러 방법으로 구한 허용지지력을 산술평균한 값과 동재하시험에서 미공병단 방법과 Davisson's offset 방법의 허용지지력 결정방법을 같이 도식화한 것이 그림 8(b)와 같다(표 2참조). 이 그림에서 미공병단 방법으로 구한 허용지지력이 Davisson's offset 방법으로 구한 값보다 정재하시험 결과의 산술평균한 허용지지력에 더 근접함을 알 수 있다.

따라서 동재하시험에서 허용지지력을 결정하기 위하여 사용하는 안전율은 CAPWAP 해석의 하중-침하량 곡선에서 Davisson's offset 방법에 안전율 2.0을 적용하여 구한 허용지지력보다 최대하중에 안전율 2.5를 적용하여 허용지지력을 결정할 것을 추천한다. 또한 국내의 동재하시험 수행여건 등을 고려해 볼 때 CAPWAP 분석 결과를 이용하여 허용하중을 결정할 경우, 극한지지력에 안전율 2.5를 적용하여 허용지지력을 결정하는 것이 바람직하다고 본다.

5. 항타말뚝의 시공관리방안

여기서 수행한 재하시험 내용을 바탕으로 항타말뚝의 시공관리를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 설계시와 시공계획 단계에서 파동방정식을 이용한 말뚝의 항타시공 관입성을 검토한다.
- (2) 파동방정식 분석을 통해 적절한 항타장비를 선정 한 후, 본항타 전에 시험말뚝에 대한 시험타를 실시할 때 동재하시험을 수행한다: 동재하시험 개소 수는 현장의 규모와 기반조건의 편차여부, 정재하시험 결과의 이용 여부 등에 따라 적절히 조절하여야 한다. 시험타 개소 수는 공사규모와 기반조건의 변화 정도를 감안하여 결정하여야 하며 일반적으로, 하나의 푸팅내에 말뚝수가 70개 이내이면 동재하시험을 하나의 대각선상에 있는 말뚝에 대해 각각 한번씩 총 2개의 말뚝에 대해 실시한다. 만약, 하나의 푸팅내에 말뚝수가 140개 이내이면 한 대각선상에 있는 총 3개의 말뚝에 대해 동재하시험(E.O.I.D)을 수행하여 본항타시 항타관리기준을 마련한다.

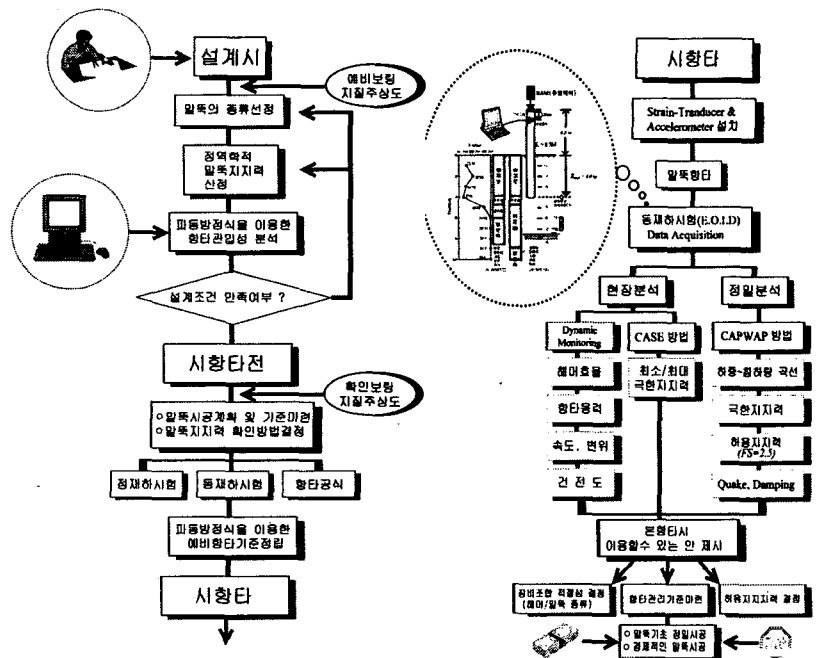


그림 9. 항타말뚝 시공관리절차

- (3) 시험말뚝에 대한 시험결과를 이용하여, 말뚝설계길이의 확인, 지지층 확인, 최종관입량 설정, 시공성, 시공 정밀성 및 시공능을 확인, 항타장비 선정의 적정성 확인 등의 시공관리에 필요한 자료를 얻고, 파동방정식 분석을 재수행하여, 본항타시 시공관리 방안을 확립한다.
- (4) 점성토지반이나 세립분이 우세한 지반조건일 경우에는 시진경과에 대해 말뚝의 지지력감소 현상

(Relaxation)이 발생할 수 있으므로 재항타를 실시하여 말뚝의 지지력을 확인하여야 한다: 재항타 시기는 최소 7~14일 후에 수행하는 것을 권장한다. 특히, 재항타 분석 결과로 지지력증감 효과를 감안하여 말뚝 시공할 경우, 해당분야 전문기술자(토질 및 기초기술자를 권장)의 판단에 의해 지지력 증감 정도를 판단하여 본항타 말뚝의 시공관리방안을 마련하여야 한다.

(5) 시험타와 재항타시에 동재하시험을 수행할 경우, CAPWAP 해석이 수반되어야 한다.

(6) CAPWAP 분석 결과를 이용하여 허용지지력을 결정할 경우, 극한지지력에 안전율 2.5을 적용하여 산정할 것을 권장한다.

6. 결론

고속도로 건설현장에서 실제 구조물의 기초로 사용하게 되는 실물크기의 말뚝기초에 대하여 지반조사 자료와 기본적인 구조계산서를 바탕으로 파동방정식 해석을 수행하였고, 시험타시 동재하시험을 수행하여 항타관리기준안을 제시하고 본항타시 계측기가 부착된 말뚝에 대해 항타시 동재하시험을 수행하였다. 아울러 정재하시험을 수행함으로써 하중-침하량 거동과 주면 및 선단지지력을 분리 측정된 결과는 다음과 같다.

- (1) 시험말뚝에 대한 동재하시험과 정재하시험의 비교하여 Davisson 방법으로 허용지지력을 구해 비교한 결과, 서해안 3공구, 수도권 8공구, 11공구의 강관말뚝에 대해 동재하시험 결과는 정재하시험 결과에 비해 각각 50%, 23%, 2% 크게 나타났으며 신공항 4공구의 PC 말뚝에 대해서는 12% 낮게 나타났다. 따라서 현장조건에 따라 PC말뚝을 제외한 강관말뚝의 경우, 동재하시험 결과는 정재하시험 결과보다 지지력을 과대평가하는 결과를 보였다.
- (2) 정재하시험시 하중전이 거동을 계측하고 이를 통해 말뚝의 주면지지력과 선단지지력을 분리 측정하여 동재하시험 결과와 비교 분석한 결과, 동재하시험 결과에서 산정된 주면지지력과 선단지지력은 실제의 거동을 반영하는데 있어서 신뢰도가 높지 않다.
- (3) 정재하와 동재하시험결과, 초기 탄성영역의 거동이 매우 유사하게 나타났지만, 정재하시험의 하중-침하량 곡선의 변곡점 이후의 거동은 CAPWAP 분석 결과의 지지력이 정재하시험 결과에 비해 과대평가하는 결과를 나타냈다.
- (4) 단위면적당 주면지지력은 말뚝선단부 1~2m 이내에서 차지하는 비중이 상당히 큰 것으로 나타났으며 재하하중이 커질수록 그 비율은 높아지는 것으로 나타났다. 이는 말뚝선단에 부착된 말뚝선단보강재의 영향이 큰 것으로 판단된다.
- (5) 지반조사 결과가 시험말뚝이 근입된 지반조건을 잘 반영한다고 보았을 때, 수정 Meyerhof 식의 정역학적 지지력 공식을 통한 계산결과는 정재하시험의 실측값에 비해 선단지지력을 과대평가함을 알았다.
- (6) 동재하시험과 정재하시험 결과를 비교한 결과, 동재하시험에서 허용지지력을 결정하기 위하여 사용하는 안전율은 CAPWAP 해석의 하중-침하량 곡선에서 최대하중에 안전율 2.5를 적용하여 허용지지력을 결정할 것을 추천한다.

참고문헌

1. 한국도로공사(1998), 고속도로 전문시방서, pp.7-1~7-21.
2. 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.
3. Gates, M.(1957), "Empirical Formula for Predicting Pile Bearing Capacity", Civil Engineering, ASCE, Vol.27, No.3, March, pp.65~66.