

동재하시험에 의한 모래자갈층에 근입된 매입말뚝의 지지력 산정
**The Estimation of Bearing Capacity of Auger-drilled Pile in Sand-Gravel
by Dynamic Load Test**

최기철*
Choi, ki-Chul

문유호**
Moon, Yu-Ho

오원근*
Oh, Won-Keun

천병식***
Chun, Byung-Sik

ABSTRACT

This study results of performed field load test in order to estimate the best pile length assessment and allowable bearing capacity of the pile foundation. End of initial driving(EOID) and restrike of pile dynamic loading tests were performed to calculate allowable bearing capacity of the experimental pile side and results were compared with the allowable bearing capacity estimated by theory. The results of allowable bearing capacity by EOID test is 1.08~1.21 in the range of compared to the capacity calculated by the Structure Foundation Design Criterion. Allowable bearing Capacity by restrike of pile dynamic loading test is 1.32~1.48 in the range of compared to the Structure Foundation Design Criterion. The Foundation Design Criterion underestimated the pile capacity. If the bearing capacity calculated by Structure Foundation Design Criterion is 100, EOID of pile dynamic loading test is 116, restrike of pile dynamic loading test is 138 for 20m pile used in this experimental.

국문요약

본 연구는 실제 본 구조물이 위치할 현장에서, 최적의 말뚝 길이 산정 및 그때의 허용 지지력 산정을 위해 말뚝기초에 대한 시험시공을 실시한 것이다. 시험시공과 병행하여 시험 말뚝의 허용지지력 산정을 위하여 시험타 및 재항타 동재하시험을 실시하였으며 그 결과를 지지력이론에 의한 허용지지력과 비교하였다. 본 연구에 의하면, 시험타 동재하시험에 의한 허용 지지력은 이론식에 의한 허용지지력의 1.08 ~ 1.21배, 재항타 동재하시험에 의한 허용 지지력은 이론식에 의한 허용지지력의 1.32 ~ 1.48배로 나타나 구조물기초설계기준에서는 파일의 지지력을 과소평가하는 것으로 나타났다. 또한, 본 시험시공 현장의 약 20m 말뚝에 한해서, 구조물기초설계기준에 의해 계산된 허용지지력을 100으로 가정했을 경우, 시험타 동재하시험은 116, 재항타 동재하시험은 138로 평가 되었다.

* 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ., 비회원

** (주)지오사이트 대표이사, Member, President of Geosite Co., Ltd., 비회원

*** 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ., 정회원

E-mail : hengdang@unitel.co.kr

TEL : (02)2220-0326 FAX : (02)2298-3270

1. 서론

산업이 발달로 인한 건설의 가속화됨로 구조물이 점차 대형화와 고층화와 이를 지탱하기 위한 하부 구조물(기초)의 안정성에 대한 문제가 점차 대두되고 있다. 또한, 각종 토목 구조물이 열악한 토층에 건설될 수밖에 없는 경우에 직면하고 있다. 이러한 토층은 일반적으로 연약하거나 불규칙한 지층을 형성하고 있거나, 또는 지지층의 깊이가 상당히 깊어지는 등의 문제점이 있으며, 그 빈도도 점차 증가하고 있는 추세에 있다. 따라서 현실적으로 국내에서는 하부 구조물의 안정을 도모하기 위한 여러 가지 방법 중 말뚝기초의 사용이 보편화 되고 있는 추세이다.

말뚝기초를 설계하는 데는 안정하고 경제적인 지지력의 예측이 필요할 뿐만 아니라 시공성과 경제성 또한 고려하여 설계를 해야 한다. 말뚝기초의 지지력 예측 방법으로는 말뚝재하시험에 의한 방법, 실내 역학실험 결과를 이용하는 정역학적인 방법, 현장원위치시험 결과에 의한 방법, 파동방정식을 이용하는 방법, 항타공식을 이용하는 방법 등이 있다. 상기 지지력 예측 방법들은 시험 수행 과정 및 시험결과 해석의 오류, 한정된 지반 정보, 설계와 시공의 차이점 등 많은 불확실성을 내재하고 있는 것이 현실이기는 하지만, 상기 방법 들 중 말뚝재하시험에 의한 방법이 그중 가장 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다(이명환 등, 1995).

본 연구에서는 실제 본 구조물이 위치할 현장에서, 최적의 말뚝 길이 산정 및 그 때의 허용 지지력 산정을 위해 말뚝기초에 대한 시험시공을 실시하였다. 시험시공과 병행하여 시험 말뚝의 허용지지력 산정을 위하여 시험타 동재하시험을 실시하였으며, 시간 경과에 따른 시멘트 페이스트 양생 효과를 확인하기 위해 재항타 동재하 시험도 실시하였다. 또한, 국내에서 사용되고 있는 매입말뚝에 대한 지지력 추정 공식을 사용하여 허용지지력을 산정하였으며 그 결과를 동재하시험과 비교·분석하였다.

2. 이론적 배경

일반적으로 말뚝의 시공방법은 크게 타입에 의한 방법과 선굴착하여 매입에 의한 방법으로 구분할 수 있다. 타입에 의한 방법은 중량물의 낙하에너지를 이용하여 말뚝을 지반에 압입하는 방법이며 선굴착에 의한 매입방법은 오거 및 T-4 등으로 미리 천공한 후 천공구멍에 시멘트 페이스트를 주입하고 말뚝을 삽입하여 지지력을 확보하는 방법이다.

2.1 매입말뚝공법의 원리 및 시공방법

매입말뚝공법은 굴착 오거를 사용하여 지반내에 굴착을 실시하며, 오거는 연속오거가 일반적으로 사용되지만 경우에 따라서는 오거 날개대신에 교반용 날개를 부착하기도 한다. 오거의 직경은 말뚝의 직경보다 50mm 큰 경우에서부터 150~200mm 큰 경우까지 다양한 규격들이 사용되며 국내의 경우에는 말뚝의 직경보다 100mm 큰 오거가 일반적으로 통용되고 있다. 굴착공의 직경은 굴착공벽과 삽입되는 말뚝주위가 Soil Cement로 충전되어 말뚝의 주변마찰력이 발휘되는 관계로 적절한 직경의 오거 선정이 중요하다.

2.2 동재하시험

동재하시험시 사용하는 말뚝 항타 분석기(Pile Driving Analyzer)는 항타로 인한 말뚝의 변위와 가속도를 항타 즉시 분석하여 항타기의 효율적인 작동 여부, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 예상지지력, 말뚝의 손상 여부를 출력한다. 따라서 말뚝이 손상되지 않는 범위 내에서 소정의 지지력을 얻을 수 있도록 항타관리가 가능하며 항타기의 효율 및 적절성을 판단하여 항타장비 및 항타시스템, 말뚝의 적절한 조합을 유도할 수 있다(한국지반공학회, 2002). 말뚝 항타 분석기는 파동 방정식을 이용한 항타해석(Wave Equation Analysis of Pile Driving)과는 달리 두부에서의 힘과 속도를 입력 값으로 사용하기 때문에 항타기의 모델링 또는 효율의 추정으로부터 생기는 오차를 제거하였다. Globe Rausche Likins and Associates, Inc(1993)의 CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program)는 말뚝 항타 분석기로 계

산된 힘과 속도를 Wave Matching Technique으로 분석하여, 말뚝의 극한 지지력, Quake 및 Damping 등을 추정하며, 이들을 이용하여 정적재하시험을 모사한 하중-변위 곡선, 주면 마찰력의 분포 및 크기, 선단 지지력을 예측한다. 파동 방정식에 의한 말뚝 해석 프로그램(WEAP), 말뚝 향타분석기(PDA), 정적재하 시험을 적절히 조합하여 사용 하면, 말뚝의 설계 및 시공성 향상, 시공 관리 및 품질 향상, 공비 절감 등 상당한 효과를 얻을 것으로 기대된다.

3. 모래자갈층에 근입된 매입말뚝의 현장 동재하시험

3.1 현장개요

본 현장은 “경상남도 ○○시 ○○동”에 위치하고 있으며, 본시공 이전에 구조물 기초로 사용되어질 말뚝에 대해서 시공성 및 경제성의 측면에서 최적의 말뚝 길이를 산정하고, 이때의 허용지지력을 설계에 적용하기 위하여 시험시공을 통한 시험타 동재하시험 및 재향타 동재하시험을 실시하였다.

본 현장에 대한 지반조사는 총 21개소에서 실시하였다. 본 조사지역에서 실시한 시추조사결과, 지층구성상태는 대체적으로 ①매립토층 ②퇴적토층(모래섞인 자갈) ③붕적토층 ④퇴적토층(모래) ⑤풍화암층 ⑥연암층의 층서를 이루고 있으며, 지하수위는 GL(-)3.60~3.80m에 위치하고 있는 것으로 측정되었다. 본 현장은 강변에 위치하는 지역적 특성으로 인하여 모래섞인 자갈로 구성된 퇴적토층이 매우 깊게 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 본 퇴적토층은 갈색의 색조를 띠고 있으며 습윤한 상태로 구성되어 있었다. 본 층은 모래섞인 자갈로 구성되어 있으며 상부에는 암갈색의 자갈섞인 실트층이 존재하는 것으로 조사되었다. 또한 본 퇴적토층에는 중간중간 박층의 실트층 및 비교적 단단한 모래자갈층이 협재되어 있는 것으로 조사되었으며 자갈의 크기는 약 5~20cm 정도로 파악되었다.

본 현장은 향타로 인한 민원의 발생 우려가 있어, 소음과 진동을 유발할 수 있는 향타공법을 적용하는 것은 문제가 있을 것으로 판단되며, 따라서 본 현장에서는 소음과 진동의 발생을 최소화 할 수 있는 매입말뚝 공법을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단하였다. 또한 본 현장은, 지하수위 GL(-) 3.6~3.8m에 존재하고 있으며 직경 5~20cm 크기의 자갈을 협재한 퇴적토층의 전구간에 걸쳐 26.50~28.80m의 두께로 매우 깊게 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 본 현장에서는 Auger 천공 시 공벽의 붕괴를 방지 할 수 있도록 외부 Casing을 적용해야 하며 자갈(전석)의 파쇄·배출이 용이한 공법을 적용해야 할 것으로 판단되었다. 상기와 같은 현장상황을 고려할 경우, 본 현장에서는 PRD공법을 적용하여 말뚝을 시공하는 것이 타당할 것으로 판단하였다.

3.2 시험시공 말뚝 제원 및 시험일

본 시험시공에서 사용한 말뚝의 종류는 PHC($\Phi=450\text{mm}$, $t=70\text{mm}$) 말뚝을 사용하였으며, 시험타시에는 4.0ton 드롭해머를, 재향타시에는 7.0ton 유압해머를 사용하였다.

표 1. 동재하시험 말뚝 제원 및 시험일

시험 번호	말뚝길이 (m)	관입심도 (m)	직경 (mm)	시험타 시험일 (월/일)	재향타 시험일 (월/일)
T-1	21.0	20.5	450	07/06	07/24
T-2	22.0	19.6	450	07/13	07/24
T-3	22.0	20.3	450	07/13	07/24
T-4	22.0	19.4	450	07/13	07/24

4. 결과분석 및 고찰

4.1 에너지 전달율

말뚝 두부에 전달되는 항타에너지(EMX)와 항타기의 항타에너지 또는 WH(W; 항타기 램의 무게, H; 항타기 램의 낙하고)의 비를 에너지 전달율(Energy Trasfer Ratio, ETR)이라고 하며, 이는 항타기의 종류, 쿠션, 말뚝 캡 등 항타 시스템 전체와 말뚝의 종류에 따라 상이하다(Rausche, 1985).

본 동재하시험에서 측정된 에너지 전달율은 시험타 동재하시험의 경우 49.0 ~ 83.10(평균 65.8)%, 재항타 동재하시험의 경우 60.36 ~ 88.57(평균 79.1)%로 측정 되었으며, 드롭해머(시험타 동재하시험) 보다 유압해머(재항타 동재하시험)의 에너지 전달율이 평균 13.3% 더 크게 측정되었다.

표 2. 동재하시험시 측정된 에너지 전달율

시험타 동재하시험		재항타 동재하시험	
시험 번호	에너지전달율(%)	시험 번호	에너지전달율(%)
T-1(E)	49.00	T-1(R)	60.36
T-2(E)	64.20	T-2(R)	87.86
T-3(E)	67.00	T-3(R)	79.46
T-4(E)	83.10	T-4(R)	88.57

주) (E) : 시험타, (R) : 재항타

4.2 항타 응력

말뚝항타분석기를 이용하여 항타와 동시에 말뚝 두부의 편타에 의한 말뚝의 Bending, 말뚝 선단의 최대 압축응력(CSB)을 통한 선단부의 손상, 말뚝 두부의 최대 압축응력(CSX)을 통한 말뚝 두부의 손상, 말뚝에 걸리는 최대 인장응력(TSX)을 통한 콘크리트 말뚝의 인장균열을 관찰할 수 있었다.

본 동재하시험에서 측정된 CSX값은 시험타 동재하시험의 경우 0.350 ~ 0.4.60(ton/cm²), 재항타 동재하시험의 경우 0.238 ~ 0.349(ton/cm²)로 측정되었으며, 본 시험시 측정된 항타응력은 모두 허용치 이내로 나타났다(한국지반공학회, 2003; 한국도로공사, 2000).

표 3. 시험타 동재하시험시 측정된 항타응력

시험 번호	CSX (ton/cm ²)	CSB (ton/cm ²)	TSX (ton/cm ²)
T-1(E)	0.379	0.289	0.088
T-2(E)	0.350	0.297	0.113
T-3(E)	0.365	0.146	0.107
T-4(E)	0.460	0.240	0.095

표 4. 재항타 동재하시험시 측정된 항타응력

시험 번호	CSX (ton/cm ²)	CSB (ton/cm ²)	TSX (ton/cm ²)
T-1(R)	0.238	0.241	0.044
T-2(R)	0.349	0.269	0.050
T-3(R)	0.252	0.187	0.028
T-4(R)	0.306	0.241	0.030

4.3 허용지지력의 산정

동재하 시험의 결과로부터 허용하중을 결정하기 위해서는 적절한 안전율로 나누어서 결정한다. 안전율에 대해서는 국내의 경우 정적 재하시험에 대하여 건설부 제정 구조물기초설계기준(2003)에서 명시한 항복하중에 대해서는 2.0을, 극한하중에 대해서는 3.0의 안전율을 적용하게 되어 있으나, 동재하시험에 대해서는 명확한 규정이 없는 상태이며(석중수, 1997), 본 시험시공의 동재하시험에서는 현장여건을 감안하여 CAPWAP에서 분석한 극한지지력에 보수적인 개념의 안전율 3.0를 적용하여 허용지지력을 산정하였다.

표 5. 시험타 동재하시험의 허용지지력

시험 번호	극한지지력 (ton)	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	허용지지력 (ton)	구조물기초설계기준의 허용지지력 (ton)
T-1(E)	185.4	64.4	121.0n	61.80	54.05
T-2(E)	186.5	25.6	160.9	62.17	51.58
T-3(E)	192.4	11.9	180.6	64.13	52.86
T-4(E)	180.7	21.7	159.0	60.23	55.98

표 6. 재항타 동재하시험의 허용지지력

시험 번호	극한지지력 (ton)	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	허용지지력 (ton)	구조물기초설계기준의 허용지지력 (ton)
T-1(R)	220.1	78.7n	141.5	73.37	54.05
T-2(R)	204.4	77.5	126.9	68.13	51.58
T-3(R)	211.7	158.9	52.8	70.57	52.86
T-4(R)	248.9	145.1	103.8	82.97	55.98

시항타 동재하시험의 허용지지력 분포도

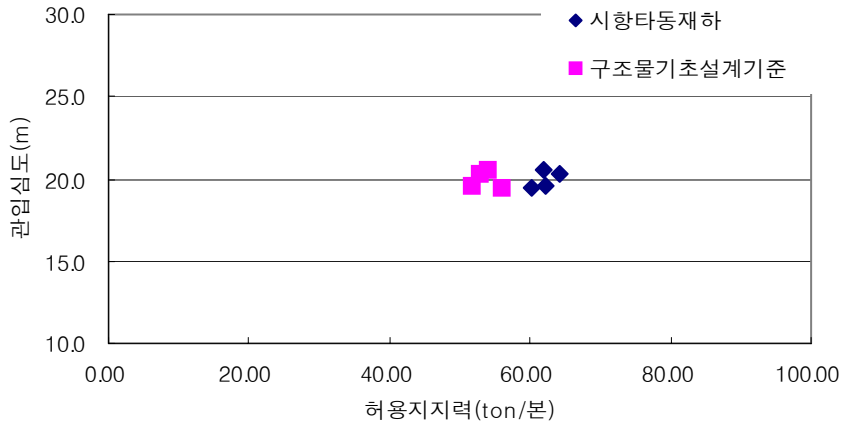


그림 1. 시항타 동재하시험의 허용지지력 분포도

재항타 동재하시험의 허용지지력 분포도

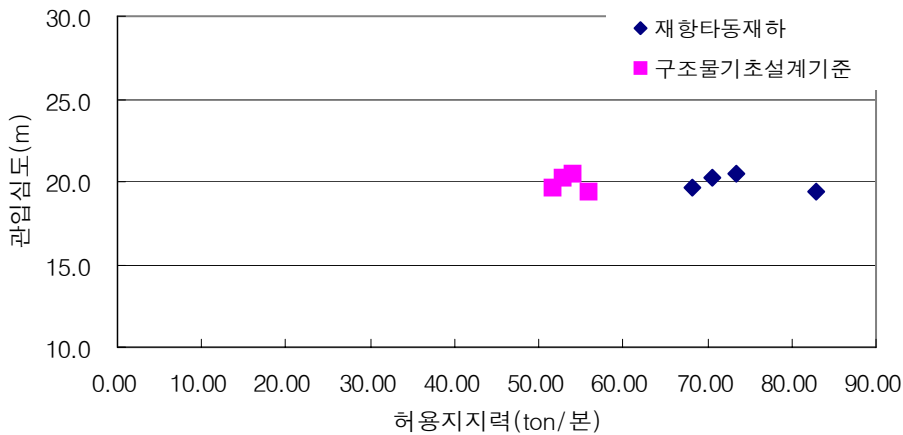


그림 2. 재항타 동재하시험의 허용지지력 분포도

본 시험시공 현장에 대한 시항타 동재하시험의 극한지지력은 185.4 ~ 192.4ton으로 측정·분석 되었으며, 측정·분석된 극한지지력을 안전율 3.0으로 나눈 허용지지력은 60.23 ~ 64.13ton으로 측정·분석되었다. 또한, 재항타 동재하시험의 극한지지력은 204.4 ~ 248.9ton으로 측정·분석 되었으며, 측정·분석된 극한지지력을 안전율 3.0으로 나눈 허용지지력은 68.13 ~ 82.97ton으로 측정·분석되었다. 그림 1, 2의 허용지지력 분포도를 관찰한 결과, 본 시험시공 현장에서는 말뚝 관입깊이는 약 20m 전후로 구조물 기초설계기준의 허용지지력보다 큰 허용지지력을 나타내는 것으로 측정·분석되었다.

4.4 지지력 이론에 의한 허용지지력 산정

표 7은 동재하시험(시항타 및 재항타)에 의해 측정·분석된 허용지지력과 구조물기초설계기준해설(2003)에 의해 산정한 허용지지력을 비교·검토하였다.

표 4, 6에 의하면, 구조물기초설계기준해설(2003)에 의해 계산된 허용지지력은 51.58 ~ 55.98ton으로 산정되었으며 시항타 동재하시험 및 재항타 동재하시험 결과와 구조물기초설계기준에 의해 계산된 허용지지력을 비교하면, 시항타 동재하시험에 의한 허용 지지력은 이론식에 의한 허용지지력의 1.08 ~ 1.21배, 재항타 동재하시험에 의한 허용 지지력은 이론식에 의한 허용지지력의 1.32 ~ 1.48배로 나타났다.

표 7. 동재하시험 및 지지력이론에 의한 허용지지력 비교

시험 번호	관입길이 (m)	시항타 동재하시험 (ton)	재항타 동재하시험 (ton)	구조물기초설계기준 (ton)
T-1	20.5	61.80	73.37	54.05
T-2	19.6	62.17	68.13	51.58
T-3	20.3	64.13	70.57	52.86
T-4	19.4	60.23	82.97	55.98

4.5 시간경과에 따른 지지력 상승효과

표 8은 시항타 동재하시험과 재항타 동재하시험의 시간경과에 따른 지지력을 비교한 것으로 토질조건, 말뚝조건, 타격조건 등을 구분하지 않았으나, 시간경과에 따른 경향이 두드러지지 않지만 전체적으로 주면 마찰력은 시항타에 비해 1.22~13.35배 증가하였음을 알 수 있다.

표 8. 시항타 동재하시험 및 재항타 동재하시험의 허용지지력 비교

시험 번호	관입길이 (m)	시험 종류	극한지지력 (ton)	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	안전율 S.F.	허용지지력 (ton)	비고
T-1	20.5	시항타	185.4	64.4	121.0n	3.0	61.80	
		재항타	220.1	78.7	141.5	3.0	73.37	
		비 고	34.7(+)	14.3(+)	20.5(+)	-	11.57(+)	
T-2	19.6	시항타	186.5	25.6	160.9	3.0	62.17	
		재항타	204.4	77.5	126.9	3.0	68.13	
		비 고	17.9(+)	51.9(+)	34.0(-)	-	5.96(+)	
T-3	20.3	시항타	192.4	11.9	180.6	3.0	64.13	
		재항타	211.7	158.9	52.8	3.0	70.57	
		비 고	19.3(+)	147.0(+)	127.8(-)	-	6.44(+)	
T-4	19.4	시항타	180.7	21.7	159.0	3.0	60.23	
		재항타	248.9	145.1	103.8	3.0	82.97	
		비 고	68.2(+)	123.4(+)	55.2(-)	-	22.74(+)	

주) (+)는 시항타를 기준으로 재항타시 지지력의 증가를 의미함

5. 결론

본 연구에서는 구조물 기초로 사용되는 말뚝에 대해서 시공성 및 경제성의 측면에서 최적의 말뚝 길이를 산정하고자 하였으며, 이 때의 허용지지력을 설계에 적용하기 위해 시험시공을 통한 시항타 동재하시험 및 재항타 동재하시험을 실시하여 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구(동재하시험)에서 측정된 에너지 전달율은 시항타 동재하시험의 경우 49.0~83.10(평균 65.8)%, 재항타 동재하시험의 경우 60.36~88.57(평균 79.1)%로 측정 되었으며 드롭해머(시항타 동재하시험) 보다 유압해머(재항타 동재하시험)의 에너지 전달율이 평균 13.3% 더 크게 측정 되었다.
- (2) 본 연구(동재하시험)에서 측정된 CSX값은 시항타 동재하시험의 경우 0.350~0.4.60(ton/cm²), 재항타 동재하시험의 경우 0.238~0.349(ton/cm²)로 측정되어, 재료의 허용치 이내로 나타났다.
- (3) 본 시험시공 현장에 대한 시항타 동재하시험의 극한지지력은 185.4~192.4ton으로 측정되었으며, 측정된 극한지지력을 안전율 3.0으로 나눈 허용지지력은 60.23~64.13ton으로 측정되었다. 또한, 재항

타 동재하시험의 극한지지력은 204.4~248.9ton으로 측정·분석 되었으며, 측정된 극한지지력을 안전율 3.0으로 나눈 허용지지력은 68.13~82.97ton으로 나타났다.

- (4) 본 연구(동재하시험)에 의하면, 주변마찰력은 14.3~147.0(평균 84.15)ton, 허용지지력은 5.96~22.74(평균 11.68)ton 증가하는 것으로 확인 되었다.
- (5) “구조물기초설계기준”에 의해 계산된 허용지지력은 51.58~55.98ton으로 산정되었으며 시항타 동재하시험 및 재항타 동재하시험 결과와 “구조물기초설계기준”에 의해 계산된 허용지지력을 비교하면, 시항타 동재하시험에 의한 허용 지지력은 이론식에 의한 허용지지력의 1.08~1.21배, 재항타 동재하시험에 의한 허용 지지력은 이론식에 의한 허용지지력의 1.32~1.48배로 나타났다. 또한, 본 연구 현장의 약 20m 말뚝에 한해서, 구조물기초설계기준에 의해 계산된 허용지지력을 100으로 가정했을 경우, 시항타 동재하시험은 116, 재항타 동재하시험은 138로 평가되었다.
- (6) 본 연구에 의하면, 계산된 허용지지력과 현장 동재하시험에 의한 허용지지력의 차이가 비교적 많은 것으로 나타났다. 따라서 설계에 적용할 허용지지력은 반드시 현장시험을 실시하여 산정하는 것이 바람직 할 것으로 사료되며, 또한 설계와 시공과의 차이를 줄이기 위한 연구가 계속되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1997), “구조물기초 설계기준”, pp.187-309.
2. 석중수 (1977), “동적재하시험에 의한 말뚝지지력의 평가”, 공학박사학위논문, 국민대학교 대학원.
3. 이명환, 윤성진(1992), “말뚝의 설계하중 결정방법에 대한 비교”, 한국지반공학회 92년 봄학술발표회 논문집, pp.69-102.
4. 이명환, 홍현성, 이원제(1995), “말뚝기초의 최적설계”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, 제11권, 제4호, pp.5-12.
5. 한국도로공사(2000), “말뚝기초설계”, pp.91-99
6. 한국지반공학회 (2002). “깊은기초”.
7. 한국지반공학회(2003), “구조물 기초설계기준 해설”, pp.177-376
8. Goble, G. G., Rausche, F., and Likins, G.E(1985)., “The Analysis of Pile Driving, A State-of-the-Art”, The 1st Seminar on the Application of stress Wave Theory on Piles, Stockholm, Sweden.
9. Globe Rausche Likins and Associates, Inc(1993)., “CAPWAP-Case Pile Wave Analysis Program”, Cleveland, Ohio.