

대구경 현장타설말뚝의 지지력 측정 사례연구

A Case Study on the Measurement and Estimation of Bearing Capacity of Large Diameter Bored Pile

이원제¹⁾, Lee-Won Je, 정훈준²⁾, Jeong-Hun Jun, 이우진³⁾, Lee-Woo Jin, 장기수⁴⁾, Jang-Ki Soo

¹⁾ 세진기초산업(주) 이사, Director, SEJIN Engineering Co., Ltd

²⁾ 세진기초산업(주) 부장, Senior researcher, SEJIN Engineering Co., Ltd

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

⁴⁾ (주)보강테크 상무, Managing Director, BogangTech Engineering Co., Ltd

SYNOPSIS : Though there has been increasing use of large diameter drilled shaft as a foundation structure of bridges, current practice for quality control is to confirm the minimum required load carrying capacity during construction stage. For economic and appropriate design of drilled shaft, it is necessary to evaluate the load transfer mechanism by pile load tests during initial stage of construction and to use the test results as a feedback to a revision of initial design.

In this paper, results of load tests performed at several domestic sites are presented to investigate the load transfer characteristics of large diameter drilled shaft. It was found that most of the load on piles is sustained by shaft friction and that only small portion of the load reaches the bottom of the drilled shaft. Some test results of drilled shaft by Pile Driving Analyzer performed at same sites are also presented to compare the load transfer characteristics interpreted from static pile load tests.

1. 서론

고속도로, 국도, 지방도 등의 도로건설 및 철도건설 등을 위한 공사노선 중에 계획되어 있는 교량구조물의 기초형식은 지반조건과 구조물의 중요도에 따라 결정되지만 말뚝기초로 설계/시공하는 예가 매우 많으며, 상부구조물의 특성상 현장타설말뚝을 시공하는 경우가 주종을 이루고 있다. 최근에는 직경이 1000mm 이상인 대구경 현장타설말뚝의 품질관리 방법으로 재하시험을 시행하는 예가 점차 증가함으로써 품질확인에 의한 안전확보뿐만 아니라 설계내역과의 비교·평가를 실시하여 설계·시공의 합리성과 경제성을 향상시키고자하는 의식이 점차 확산되고 있다.

대구경 현장타설말뚝으로 시공하는 기초구조물은 상부의 연직 하중 및 횡방향 하중 등 작용하중이 매우 클 뿐 아니라 상부구조물의 중요도가 매우 높아 안전시공에 주안점을 두는 것이 일반적이다. 따라서 연암층에 최종근입시키는 설계가 주를 이루고 있어 하중전이에 의한 지지력 특성을 고려하지 않는다면 풍화암과 연암층의 층후가 두꺼울 경우 상대적으로 비경제적인 시공을 초래할 수도 있다.

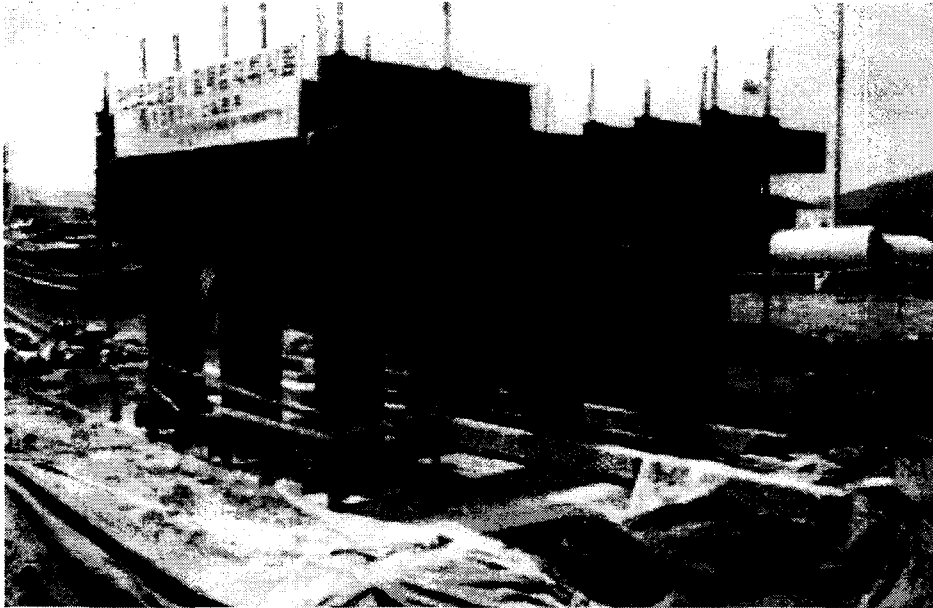
본 사례연구에서는 최근 2년간 수행된 대구경 현장타설말뚝의 정적 압축재하시험 및 동적재하시험 성과를 분석하여 국내 시공품질 현황과 지지력 및 침하량 특성을 평가하였다. 또한 시험성과 중에는 시공 과정에서 미리 설치한 계측시스템으로부터 말뚝의 하중전이해석을 수행한 사례가 있어 이로부터 지지거동에 대한 분석을 병행하였다.

2. 대구경 현장타설말뚝의 재하시험 방법

건설공사의 품질관리가 강화됨에 따라 건축·토목현장에서의 중소규모 말뚝재하시험은 이미 필수적 과정으로 정착되어 가고 있다. 반면 대구경 현장타설말뚝에 대한 재하시험은 시험하중의 규모, 시험비용, 시험준비 및 시험시간 등 불리한 측면에 의해 상대적으로 그 사례가 미진한 실정이었다. 그러나 최근에는 전통적인 정적시험방법에 더하여 PDA를 이용한 동적시험, Statnamic 시험, Osterberg Cell 시험 등 해외사례가 소개되고 기술이 도입되면서 국내건설현장에서의 시험사례가 증가하고 있다.

본 사례에서는 이들 시험방법 중 Earth Anchor의 반력이나 기 시공 되어있는 주변말뚝의 반력을 이용한 정적압축재하시험과 PDA를 이용한 동적재하시험이 수행되었던 사례를 중심으로 말뚝의 지지력 특성을 분석하였다.

<그림 1>에는 Earth Anchor의 반력을 이용하여 압축재하시험을 수행한 예를 나타내었다.



<그림 1> 정적재하시험 광경 (Earth Anchor 반력 이용)

3. 재하시험 사례

3.1 정적재하시험

재하시험이 수행되었던 시험말뚝들은 주로 All Casing 공법으로 시공되었으며 말뚝의 직경은 1000mm 및 1500mm 의 두 종류였다. 말뚝선단의 지층은, 풍화암층이 두꺼워 연암층까지의 심도가 깊은 경우에는 풍화암층에 최소 10m 최대 23m 정도까지 근입되도록 시공하였으며 연암층이 비교적 얇은 심도에서 출현하는 경우에는 연암층에 2.5-11.2m 깊이까지 시공되었다.

시험하중은 시험목적에 따라 다르나 일반적으로 설계하중의 2배 내외정도 재하하게 된다. 본 시험사례에서는 변위법 등으로 산정된 말뚝의 최대반력을 설계하중으로 설정하고 이를 기준으로 평균 2.3배 정도 재하하였으며 사례1 과 사례9 에서는 설계하중의 3배 이상을 재하하여 지지력의 항복이나 극한상태를 해석해보고자 시도하였다.

<표1>-<표3>은 시험말뚝의 개요와 지층조건, 판정한 허용지지력 등이며 <그림2>에는 측정된 하중-침하량 거동을 종합적으로 도시하였다.

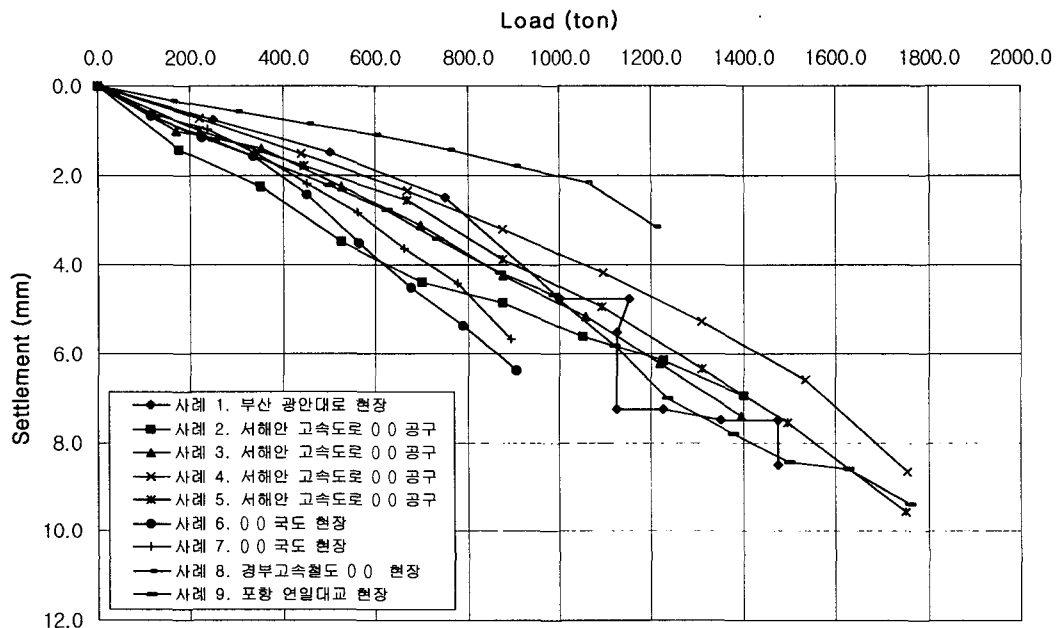
(1) 재하시험 개요

<표 1> 정적재하시험 개요

사례 번호	현장명	말뚝제원		정역학적 방법에 의한 설계하중 (ton)	말뚝에 작용하는 최대반력 (ton)	정적재하시험		비고
		Dia. (mm)	Length (m)			시험하중 (ton)	하중재하 수단	
1	부산 광안대로 현장	1,000	32.00	-	500.0	1,500	A	축하중전이 시험 병행
2	서해안 고속도로 ○○ 공구 현장	1,500	30.35	-	697.0	1,405	A+B	-
3	서해안 고속도로 ○○ 공구 현장	1,500	28.14	-	697.0	1,396	A+B	-
4	서해안 고속도로 ○○공구 현장	1,500	26.20	-	875.0	1,753	A+B	-
5	서해안 고속도로 ○○ 공구 현장	1,500	18.50	-	875.0	1,752	A+B	-
6	○○ 국도현장	1,000	30.50	497.7	409.0	906	B	동일현장내 동재하시험 실시
7	○○ 국도현장	1,000	34.50	497.7	409.0	894	B	동일현장내 동재하시험 실시
8	경부고속철도 ○○ 현장	1,500	14.289	650.0	594.8	1,208	A	-
9	포항 연일대교 개체공사현장	1,500	21.00	706.8	500.0	1,759	A	축하중전이 시험 병행

주)하중재하방법 A: Earth Anchor의 반력이용, B: 기 시공된 주변말뚝의 반력이용, A+B: 두 방법 병용

(2) 하중-침하량 곡선



<그림 2> 하중-침하량 곡선

(3) 시험말뚝 위치의 지층상태

<표 2> 사례별 지층개요

사례	매립층 표토층	퇴적층			풍화토층	풍화암	기반암	말뚝 선단층
	m/N값	m/N값			m	m	m	
1	4.4 / 34.0	2.7 / 15.0	-		2.9	35.0	-	풍화암 23.10m 관입
	매립층	실트질모래	-		실트질모래	-		
2	-	15.0 / 10.0	10.0 / 32.0	-	-	7.5	2.5 이상	연암 2.52m 관입
	-	점토질실트	자갈질모래	-	-	화강암 풍화대	연암(화강암)	
3	-	13.5 / 6.0	8.8 / 23.0	1.5 / 27.0	-	3.7	5.0 이상	연암 5.06m 관입
	-	실트질모래	점토질실트	실트질모래	-	화강암 풍화대	연암(화강암)	
4	-	11.0 / 8.0	3.6 / 3.0	-	4.0	16.4	-	풍화암 12.4m 관입
	-	실트질모래 (해성퇴적층)	실트질점토 (해성퇴적층)	-	굴진시 모래로 분해	굴진시 모래로 분해	-	
5	-	7.0 / 2.0	1.9 / 5.0	5.9 / 13.0	5.5	-	4.2 이상	연암 4.2m 관입
	-	모래질실트 (해성퇴적층)	실트질점토 (해성퇴적층)	모래질실트 (해성퇴적층)	굴진시 모래로 분해	-	연암 (변성퇴적암류)	
6	-	9.8 / 22.5	10.5 / 49.0	-	4.7	42.0	-	풍화암 10.0m 관입
	-	실트취인 모래	모래취인 자갈	-	실트취인 모래	굴진시 모래로 분해	-	
7	-	10.5 / 9.7	1.5 / 17.0	-	7.5	40.5	-	풍화암 15.0m 관입
	-	실트취인 모래	모래취인 자갈	-	실트취인 모래	굴진시 모래로 분해	-	
8	2.0 / 18.0	-			2.6	15.4	2.0	풍화암 12.49m 관입
	실트 및 자갈취인 모래(표토층)	-			실트 및 모래	굴진시 모래로 분해	연암	
9	-	10.0 / 8.0	3.8 / 48.0	-	-	-	33.2	이암 11.19m 관입
	-	세립질모래, 모래질점토, 점토질모래 (모래층)	자갈 다량 함유 (점토층)	-	-	-	이암 (역암, 사암 혼재)	

(4) 침하거동 및 허용지지력

<표 3> 사례별 침하량 및 허용지지력 판정

사례 번호	최대반력 (ton)	시험하중 (ton)	탄성변형량 (mm) $\Delta = \frac{PL}{AE}$	전침하량 (mm)	잔류침하량 (mm)	설계하중 (최대반력)에 서의 침하량 (mm)	항복하중 분석에 의한 허용지지력 (ton)
1	500.0	1500.0	23.520	약 11.0	1.500	약 2.000	750.0 이상
2	697.0	1405.0	10.491	8.680	1.570	3.700	702.5 이상
3	697.0	1396.0	9.665	7.405	0.980	3.113	698.0 이상
4	875.0	1753.0	11.300	8.640	1.213	3.193	876.5 이상
5	875.0	1752.0	7.975	9.560	2.527	3.880	876.0 이상
6	409.0	906.0	15.297	6.380	0.223	1.900	453.0 이상
7	409.0	894.0	13.997	5.670	1.273	1.900	447.0 이상
8	594.8	1208.0	4.247	3.150	0.247	1.000	604.0 이상
9	500.0	1759.0	8.320	9.393	1.000	2.225	879.5 이상

(5) 시험결과 고찰

구조물기초설계기준이나 건교부 제정 도로교표준시방서 등에 제시되어 있는 판정방법에 근거하여 시험말뚝의 허용지지력을 판정한 결과 공히 설계하중을 만족하는 지지력이 확인되었으며, 하중-침하량 곡선 및 침하량(말뚝머리 전침하량과 하중제거후의 잔류침하량)에서 보여주듯이 설계하중의 2~3배의 시험하중재하시까지 말뚝의 항복 및 극한상태는 규명되지 않았다. 최대 시험하중단계에서의 전 침하량은 3.150 mm ~ 11.000mm로서 이는 말뚝의 이론적인 탄성변형량 4.247mm ~ 23.520mm보다도 대부분 작다는 점과 약2mm 내외의 잔류침하량을 고려할 때 재하하중은 상당부분 주면마찰력에 의해 지지하고 있다고 판단된다. 즉 시험말뚝들은 지지력과 침하량 측면에서 매우 양호한 지지거동을 보여주고 있어 말뚝의 설계지지력을 증가시킬 수 있는 여지를 내포하고 있다.

3.2 축하중 전이 측정사례

축하중 전이시험은 말뚝 시공시 지반조건을 고려하여 일정 간격 및 배열로 매설한 계측센서를 통해 하중재하시 콘크리트 및 철근에 작용하는 응력을 하중단계 및 심도별로 측정하고 그 결과를 분석함으로써 말뚝의 축하중 전이 거동을 해석할 수 있을 뿐 아니라 말뚝지지력의 성분별 비율을 평가하여 지지양상을 해석코자 실시된다.

<표 4>는 전술한 정적재하시험중 하중전이 측정을 병행했던 사례의 개요이며, <표 5>는 시험의 주요 결과인 지지력 성분별 크기를 해석한 결과이다.

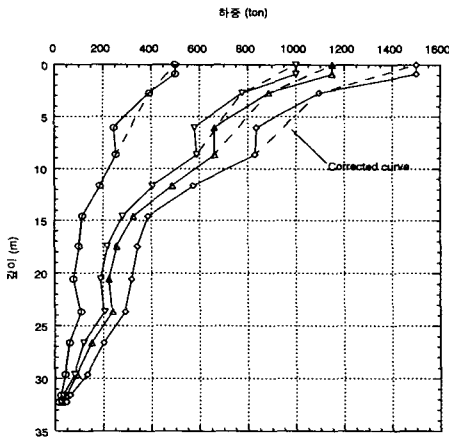
<표 4> 축하중전이 시험사례

사례 번호	현장명	말뚝제원		시험하중 (ton)	센서설치 깊이 레벨수	비고
		Dia.(mm)	Length (m)			
1	부산 광안대로 현장 제5공구	1000	32.0	1500	13 Level	(최용규, 2000)
2	포항 연일대교 개체공사 현장	1500	21.0	1759	8 Level	

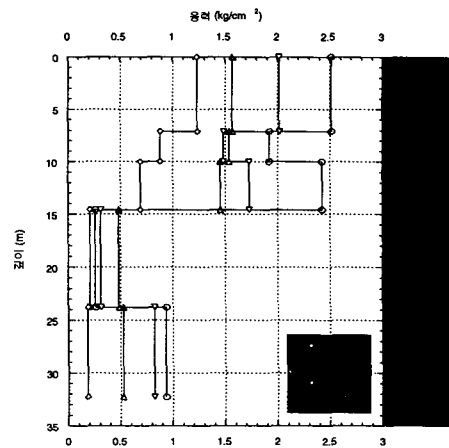
<표 5> 축하중전이 시험 결과

사례번호	설계하중(최대반력기준) (ton)	시험하중	해석된 지지력 성분	
			선단지지력(ton)	주면마찰력(ton)
1	500	1,500	20.0	1480.0
2	500	1,750	1183.0	567.0

(1) 축하중전이 시험 결과 [사례 1]

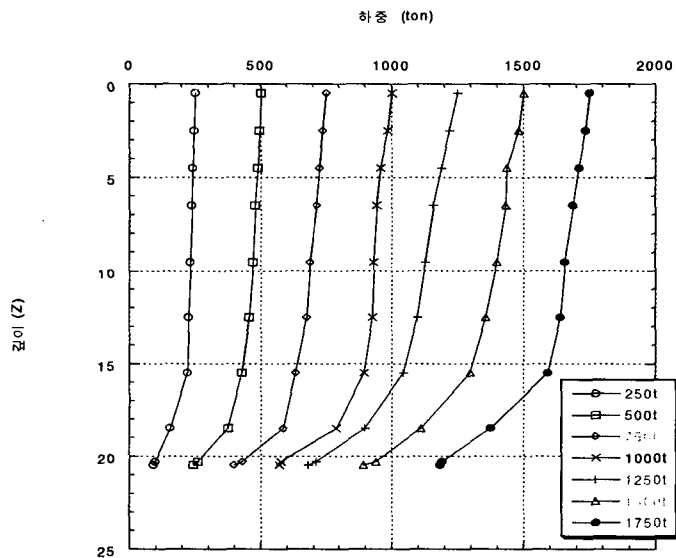


<그림 3> 말뚝축하중 분포도



<그림 4> 각 지층에 발생된 평균 마찰저항력

(2) 축하중전이 시험 결과 [사례 2]



<그림 5> 말뚝축하중 분포도(사례-2)

(3)결과 고찰

사례 중 저자들이 공동 참여한 광안대교 건설공사시의 재하시험과 하중전이 측정은 기 발표(최용규, 2000)된 바 있는데 전술한 일반 재하시험결과의 지지양상을 비교/판단키 위해 그 결과의 일부를 인용하였다. 최(2000)는 하중전이 측정결과 설계하중의 3-4배 정도까지 재하하여도 항복이나 극한현상이 발견되지 않았으며 이로부터 설계하중의 증가와 풍화암층의 마찰력을 고려한 설계의 필요성을 보고한 바 있다. 이와 같은 연구결과와 사례1의 시험결과를 전술한 하중전이 측정이 수행되지 않은 시험결과와 비교할 때 국내 대구경 현장타설말뚝은 마찰저항 위주의 지지양상을 보여주고 있음을 알 수 있다.

기존의 연구결과에 의하면 암반에 근입된 현장타설말뚝의 하중전이 특성은 말뚝 근입장과 직경의 비율(z/d)과 암반과 콘크리트의 탄성계수비(Er/Ec)에 의해 결정되며 z/d와 Er/Ec가 증가할수록 주변마찰이 차지하는 비율은 커지는 것으로 알려져 있다. 선형탄성이론에 의한 유한요소해석의 결과에 따르면 암반에 근입된 소켓의 z/d=1.0일때, Er/Ec=4인 경우와 Er/Ec=1/4인 경우에 각각 전체하중의 13%와 30%가 말뚝의 선단에 전달되는 것으로 나타났다. 따라서 본연구에서 분석한 결과는 기존의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 확인하였다. 단, 사례2의 경우에는 상부 및 중간 토사층이 연약하여(평균N값 10내외) 하중단계별로 마찰력보다는 선단지지력으로 저항하며 하부 기반암층에서는 상대적으로 마찰저항이 발휘되는 예를 보여 주고 있다.

3.3 동적 재하시험 사례

말뚝향타분석기(PDA, Pile Driving Analyzer)를 사용한 동적재하시험은 중소규모 말뚝기초에 대해서는 매우 활성화되어 있는 실정이나 대구경말뚝에 대한 재하시험방법으로서의 적합성은 국내의 경우 아직도 신뢰성 측면에서 논란이 남아 있는 상태이다. 이는 동적재하시험 결과의 해석이 아직까지 분명한 개념정립에 의한 보편 타당한 결과보다 해석 기술자의 능력과 판단에 의존하는 경우가 많은 데에 기인하는 것으로 생각되며 여전히 경험이 많고 숙련된 기술자에 의한 해석이 필요한 실정이다.

본 사례는 제한된 건수이나 동일 현장에서 정적재하시험이 수행되었던 예로써 두 시험결과를 비교하여 시험방법의 적용성을 평가해보고자 하였다. <표 6> 및 <표 7>에는 시험의 개요와 판정된 허용지지력, 침하거동 등을 나타내었다.

<표 6> 동적 재하시험 개요

사 례 번 호	현장명	말뚝제원		정역학적 방법에 의한 설계하중 (ton)	말뚝에 작용하는 최대반력 (ton)	사용 해머무게 (ton)	비고
		Dia.(mm)	Length (m)				
1	○○국도현장	1000	30.4	497.70	409.0	15	동일현장내 정적재하시험 실시
2	○○국도현장	1000	30.1	497.70	409.0	15	동일현장내 정적재하시험 실시
3	○○국도현장	1500	22.6	782.53	540.0	15	-

<표 7> 허용지지력 판정 및 침하량 추정

사 례 번 호	설계하중 (최대반력) (ton)	CAPWAP해석결과 (ton)			허용지지력 (ton)		해석최대하중 에서의 침하량 추정(mm)	설계하중 에서의 침하량 추정(mm)	비고
		주변마찰력	선단지지력	전체지지력	ASCE	Davisson			
1	409.0	893.0	248.0	1141.0	456.4	570.5 ↑	11.2	2.8	-
2	409.0	962.3	286.2	1248.4	499.4	624.2 ↑	12.3	3.1	-
3	540.0	540.2	865.6	1405.8	562.3	702.9 ↑	7.3	2.1	-

사례 1, 2의 경우 동일 현장에서 시행된 정적재하시험(<표 1>의 사례 6, 7)과 비교하여 볼 때 주면마찰력에 의한 지지거동을 나타내고 있으며 추정된 침하량도 매우 유사하게 나타났다. 이는 한정된 건수이지만 동적재하시험이 말뚝의 허용지지력 판정에 적절한 방법으로 적용될 수 있는 신뢰도에 접근하였음을 보여주고 있다.

4. 결론 및 제안

최근 들어 대구경 현장타설말뚝에 대해서 품질 및 지지력 확인을 목적으로 각종 재하시험 및 축하중전이시험 등이 시행되고 있으며 이는 국내 건설공사의 기술수준 향상을 고려할 때 매우 바람직한 현상으로 인식되고 있다. 최근 2년간 수행한 대구경 말뚝재하시험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 사례들의 경우 시험말뚝은 대부분 본말뚝(working pile)으로서 시험하중을 말뚝최대반력의 2-3배로 시행하여 극한하중에 대한 하중-침하 거동을 확인할 수 없었으나 일반 재하시험과 축하중 전이시험, 동재하시험결과 등을 종합할 때 최대시험하중 또는 해석된 하중의 90%이상이 마찰저항으로 지지되는 것으로 판단된다.
- 2) 지지력 성분의 비율을 고려할 때 본 건 사례들의 시험말뚝은 마찰말뚝의 특성을 보이는 것으로 평가된 점을 향후 설계에 반영함으로써 대구경 현장타설말뚝 설계/시공의 경제성을 증대시킬 필요성이 제기되었다고 판단된다.
- 3) 동일현장에서 시행한 정적시험과 동적시험의 결과를 비교할 때 동적시험의 해석결과도 대구경말뚝의 허용지지력 판정과 시공품질 확인에 적절한 시험방법임을 알 수 있었다.
- 4) 재하시험은 현재 말뚝시공후 지지력 확인을 주요 목적으로 시험하고 있으나, 실시설계나 시험시공단계에서 각종 방법으로 재하시험을 수행하여 그 결과를 설계에 반영한다면 건설시공비 절감 뿐 아니라 전반적인 건설기술의 진보가 이뤄질 것으로 사료된다.

감사의 글

대구경 현장타설말뚝 재하시험시 협조하여 주신 부산광역시 건설본부, 포항시 건설본부, 한국도로공사 서해 2사업소, 동아건설(주), 한진중공업, 삼성물산, SK건설(주) 및 유원건설(주) 관계자들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) (사)한국지반공학회 (1997), 구조물 기초설계 기준
- (2) 부산광역시 건설본부(2000), 광안대로 건설공사 말뚝정재하시험 종합보고서
- (3) 한국도로공사 서해 2사업소(1999), 서해안 고속도로(군산-무안간)건설공사 현장타설말뚝 정재하시험 보고서
- (4) S.K 건설(주) (1999, 2000), 구룡-부여간 도로 확장 및 포장공사 현장타설말뚝 정재하 시험 보고서
- (5) 경부고속철도 제 2-1공구(1999), 경부고속철도 제 2-1공구 노반시설 기타공사 현장타설말뚝 정재하시험보고서
- (6) 동아건설(주) (2000), 포항 연일대교 개체공사 현장타설말뚝 정재하시험 보고서
- (7) 최용규(2000), “대구경말뚝 정재하시험 및 축하중전이 측정사례” 한국지반공학회 2000년 말뚝기초 학술발표회
- (8) (주)한진중공업 (2000), 김제-부안간 도로 확장 및 포장공사 현장타설말뚝 동재하 시험 보고서