

재하시험을 활용한 인천대교 국고구간 현장타설말뚝의 설계와 시공 Drilled Shaft Designs and Constructions using Pile Load Tests at the Government-Financed Section of Incheon Bridge

조성민¹⁾ Sung-Min Cho, 전병섭²⁾ Byeong-Seob Jeon, 정일환³⁾ Il-Hwan Chung, 최고일⁴⁾ Go-Il Choi

¹⁾ 한국도로공사 인천대교건설사업소 기술지원팀장, Director of Technical Advisory Team, Incheon Bridge Construction Office, Korea Highway Corporation(KHC)

²⁾ 한국도로공사 인천대교건설사업소 공사1팀장, Director of Construction Team-1, Incheon Bridge Construction Office, KHC

³⁾ 한국도로공사 인천대교건설사업소 소장, Head of Incheon Bridge Construction Office, KHC

⁴⁾ 한국도로공사 민자도로처 처장, Head of Private Investment Highway Department, KHC

SYNOPSIS : Incheon Bridge which will be the world's 5th long cable-stayed bridge in 2009 has been built under the management by Korea Highway Corporation. Incheon Bridge consists of several special-featured bridges and construction sections are divided into two groups, the private investment section with the foreign concessionaire and the government-financed section. 8 pile load tests were performed to investigate the behavior of rock-embedded large-diameter drilled shafts at both sections. Among these, 4 tests at the government-financed section have been utilized to adjust the detailed designs that were carried out individually as well as to find the actual bearing capacity of the ground prior to the commencement of constructions under the joint control of all contractors. Comprehensive procedures of the design and the construction of foundations using pile load tests were introduced.

Keywords : 인천대교, 현장타설말뚝, 말뚝재하시험

1. 개 요

인천대교(Incheon Bridge)는 우리나라의 관문인 인천국제공항을 송도국제도시(건설 중)를 경유하여 제1경인고속도로, 제2경인고속도로, 제3경인고속도로(계획), 서해안고속도로, 영동고속도로, 서울외곽순환고속도로, 제2서울외곽순환고속도로(계획) 등 거미줄 같은 고속도로망과 연결함으로써, 수도권과 충청권의 공항 접근성을 제고하고, 인천의 경제자유구역 및 영종도 물류, 레저 단지의 발전을 촉진하여 우리나라를 동북아 경제중심국가의 반열에 올려 놓기 위한 핵심 인프라 시설이다.

총사업비가 2조 4천여억원에 이르는 인천대교 건설사업은 민간자본(정부보조금 포함)을 투자하는 '민자구간(private investment section)'과 국가예산을 투입하는 '국고구간(government-financed section)'으로 나누어 추진하고 있다(그림 1, 그림 2). 국고구간은 해상에 위치한 민자구간의 양측으로 모두 5개 공구로 구성되어 있으며, 영종도에 위치한 서측구간인 1공구는 주로 토공부류 이루어져 있다. 민자구간은 영국의 AMEC 등 외국기업 위주로 구성된 민간사업시행자가 참여하는 BTO 사업으로 진행되고 있으며, 인천대교의 상징인 주경간 800m의 해상 사장교가 포함되어 있다. 한국도로공사는 국고구간과 민자구간을 포함한 인천대교 전체 노선의 사업관리와 감독을 맡고 있다.

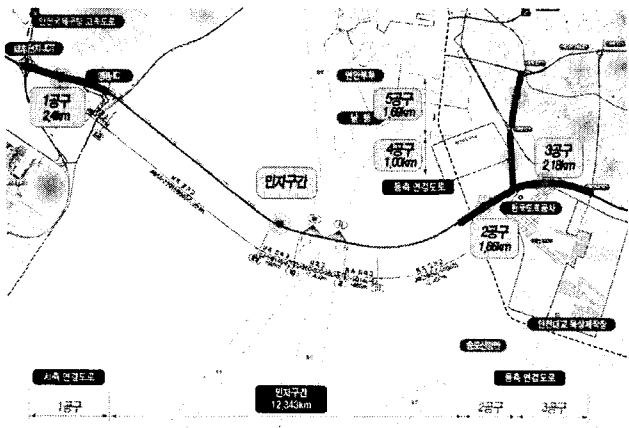


그림 1. 인천대교 노선도



그림 2. 인천대교 조감도

교량과 토공 구간으로 구성된 전체 사업연장은 21.27 km이며, 이 중에서 순수한 교량의 길이는 18.25 km로서 세계에서 6번째로 긴 다리가 된다. 영종도의 해안도로에서부터 시작하여 황해를 건너 현재의 제2경인고속도로 학익분기점(JC)에서 끝나게 되는 총길이 18.25 km, 왕복 6차선 고속도로인 인천대교는 인천항 주항로에 위치한 해상 사장교를 포함하여, 접속교 및 고가교, 하이브리드 중로 아치교, 스트럿 부착 박스 거더교, V형 강박스 주탑 사장교, 엑스트라도즈교 등 다양한 형식으로 구성된 특수 교량들의 집합체이다. 이 중에서 주탑간의 거리(주경간)가 800 m인 해상 사장교는 인천대교의 대표교량으로서, 준공되는 2009년을 기준으로 세계 5번째 규모의 사장교가 된다(그림 3).

1	2	3	4	5	23
Sutong대교 (중국)	Stonecutters대교 (홍콩)	多多羅대교 (일본)	Normandy대교 (프랑스)	인천대교 (대한민국)	서해대교 (대한민국)
주경간장→1,088m	주경간장→1,018m	주경간장→890m	주경간장→856m	주경간장→800m	주경간장→470m
2009년 예정	2008년 예정	1999년	1995년	2009년 예정	2000년

그림 3. 주경간장 기준 세계 사장교 규모 순위

표 1에는 인천대교를 구성하는 주요 특수 교량들의 구조양식을 간단하게 정리하였다. 인천대교는 구간별로 상부구조 형식은 차이가 있으나, 하부기초는 모두 암반근입 현장타설말뚝(drilled shaft)으로 구성되어 있다. 왕복6차선의 고속도로이고, 해상에 설치되는 만큼 교량의 상부하중이 매우 커서 말뚝은 최대직경이 3m에 이르는 대구경이며, 암반까지 근입하여 지지력을 확보하게 된다.








해상공사와 육상공사가 병행되는 조건에서 전체 노선이 모두 설계-시공 일괄입찰방식으로 추진 중인 인천대교는 그 규모만큼 기술적 세부 사항들이 매우 복잡하고, 다양한 종류의 설계 기준들이 혼용되고 있으며, 특히 기초의 경우 국내의 일반적 관행을 탈피한 새로운 개념의 설계와 시공이 이루어지고 있다. 민간자본이 투자되는 민자사업 구간은 우리나라 SOC 민자사업 최초로 외국인(AMEC)이 사업시행자로 참여하면서 외국 기준의 적용이 불가피하였으며, 이에 따라 거가대교와 함께 국내에서는 처음으로 상부 및 하부구조 설계에 하중-저항계수설계법(load and resistance factor design, LRFD)을 적용하고 있다. 기본 설계시에는 AASHTO LRFD 시방서(2판)의 저항계수를 그대로 반영하여 기초의 지지력을 평가하였으나, 실시설계시에는 해상에 실시한 세계최대하중의 연직재하시험 결과와 미국 TRB (2004) 등의 연구성과를 분석하여 별도의 저항계수 체계를 개발, 적용함으로써 지반 특성 및 시공 조건, 품질 수준의 영향을 반영하도록 노력하였다(조성민 외, 2005; 정성준 외, 2005; 김정환 외, 2005). LRFD 시방서(3판)에서는

기초 설계를 위한 저항계수 값들이 기존 판에 비하여 대폭 수정되었으며, 인천대교에 적용한 시스템과 매우 유사한 방향으로 변경되었다.

반면에 5개 공구로 구성된 국고구간은 국내 기준에 따라 하부구조물 설계에 허용응력법(allowable stress method)을 적용하였다. 실시설계 당시에는 여건상 재하시험이 실시되지 않아, 공구별로 각각 경험식과 인접 지역의 재하시험 결과를 이용하여 지지력을 평가하였다. 이에 따라 국고구간은 공구별 설계의 일관성을 높이고, 실제 지반의 지지력을 확인하여 기초의 안정성을 확보하기 위해서 착공 직후에 본 시공에 앞서 공구별 공동재하시험을 실시하고, 그 결과를 분석하여 말뚝의 지지력 평가기준을 수립, 시공에 반영하고 있다.

이 글에서는 인천대교 국고구간에 대해서 말뚝재하시험의 현황과 그 결과를 설계와 시공에 활용한 절차에 대해 정리하여 소개한다. 재하시험의 분석 과정과 결과 자체는 지면 여건상 자세히 다루지 못하므로, 이에 대해서는 별도의 문헌을 참조하기 바란다.

표 1. 인천대교를 구성하는 주요 특수 교량과 구조양식

구간	교량		주요 형식
민자 구간	사장교		<ul style="list-style-type: none"> 강바닥판 박스 거더 + PWS 케이블 경간구성 : 주경간장 800m, 측경간장 260m, 측경간장 80m 역Y형 콘크리트 주탑 + 현장타설말뚝 (직경 3.0m/파일캡형)
	접속교		<ul style="list-style-type: none"> 7경간 연속 PSC 박스거더교 (주경간장 145m + 측경간장 82m) 중공사각교각 + 현장타설말뚝 (직경 2.4m/파일캡형) 시공법 : FCM (free cantilever method)
	고가교		<ul style="list-style-type: none"> 5경간 연속 PSC 박스거더교 (경간장 50m) 시공법 : FSLM 중공사각교각 + 현장타설말뚝 (직경 1.8m, 2.4m, 3.0m) 파일캡형 및 파일베트형(단일현장타설말뚝) 적용
국고 구간	하이브리드 중로아치교 (2공구)		<ul style="list-style-type: none"> 합성 아치리브 + 강합성 거더 (주경간장 120m + 측경간장 46.5m) 콘크리트 아치 교각 + 현장타설말뚝 (직경 2.4m/파일캡형) * ILM으로 시공하는 박스거더교 구간은 직경 2.4m의 파일베트 적용
	스트럿 부착 PSC박스거더교 (3공구)		<ul style="list-style-type: none"> FRP 피복 콘크리트 스트럿 적용 (경간장 60m) * 시공법 : MSS PSC 박스거더교 + 현장타설말뚝 (직경 1.0m, 2.0m, 2.5m/파일캡형) 시공법 : MSS (movable scaffolding system)
	사장교 (4공구)		<ul style="list-style-type: none"> 강바닥판 박스 거더 + PWS 케이블 (경간장 115m) V형 강박스 주탑 + 현장타설말뚝 (직경 2.5m/파일캡형)
	엑스트라도즈교 (5공구)		<ul style="list-style-type: none"> PSC 박스거더교 (주경간장 140m + 84m) H형(햇볼형)주탑 + 현장타설말뚝 (직경 1.5m/파일캡형) 시공법 : FCM (free cantilever method)

2. 말뚝재하시험

2.1 배경

인천대교 국고구간인 연결도로 건설공사 제2, 3, 4, 5공구 교량 기초의 주요 형식은 암반에 근입된 현장타설콘크리트말뚝으로서, 실시설계시에는 공구별로 지반조사 성과와 경험식 해석을 통해 지지력을 산정하였다. 인천대교의 말뚝 설계 현황을 표 2에 간략하게 정리하였다. 이에 따라 설계자별로 지반 분류와 거동 특성에 대한 평가가 상이하여 공구별로 설계 내용에 다소간의 차이가 있게 되었다. 설계자의 공학적 판단은 나름대로의 근거를 기준으로 한 것이므로 옳고 그름의 문제는 아니지만, 말뚝 기초의 안정성을 확보하고, 유사한 지반조건의 동일 노선 교량에서 설계의 일관성을 유지하며, 현장의 시공관리 및 품질관리를 위하여 말뚝재하시험을 통해 실제 지지력을 확인하고, 그 결과를 반영하여 공구별 설계

를 수정하고 시공관리 방안을 수립하게 되었다. 재하시험은 공구별로 실시설계시에 이미 계획되었으며, 발주처에서는 시험의 효과를 극대화하기 위하여 공구별로 수립된 시험계획을 통합하여 공동재하시험을 실시하도록 하였다.

표 2. 인천대교 구간별 말뚝기초 설계 현황 : 실시설계 기준

구분	민자구간	국고구간 (2,3,4,5공구)
공칭직경 (D)	1.8, 2.4, 3.0 (m) ※ rock socket 직경 = 공칭직경 - 0.15m	1.2 ~ 2.5 (m) ※ rock socket 직경 = 공칭직경 - 0.15m
하중지지	○ 주면마찰력 + 선단저항력 ○ 영구케이싱 부위는 마찰 무시	○ 주면마찰력 (3공구) ○ 주면마찰력 + 선단저항력 (2,4,5공구) ○ 영구케이싱 부위는 마찰 무시
연직하중	최대 72.8 MPa/본	최대 26.0 MPa/본
케이싱	○ 풍화암층에 1m 이상 근입 ○ 희생관(영구케이싱)	○ 풍화암층에 1m 이상 근입 ○ 2,4공구 : 희생관 사용 ○ 3공구 : 사용 후 인발 ○ 5공구 : 사용 후 인발, 파형강관 설치
지지층	풍화암 ~ 경암	연암 ~ 경암 (소수 풍화암)
콘크리트 강도	30 MPa	27 ~ 30 MPa
기타	고가교 구간 Pile Bent 적용 ※ D=2.4m, 3.0m	일부 구간 Pile Bent 적용 ※ 2공구 D=2.4m / 3공구 D=2.5m

전술한 바와 같이, 설계-시공 병행 방식인 패스트 트랙(fast track)을 적용 중인 민자구간에서는 이미 실시설계 이전에 4본의 시험말뚝을 대상으로 실규모 재하시험을 실시해서 지지력 평가기준을 수립, 설계 매뉴얼에 반영하고, 이를 토대로 실시설계를 진행하였다.

시공 전 말뚝재하시험에 대해서는 우리나라의 각종 지방에서도 언급하고 있다. 먼저, ‘도로교 설계기준(건설교통부, 2005)’에서는 말뚝기초의 설계시에 ‘예비설계’, ‘검증시험’, ‘예비설계보완’의 절차를 수행하는 것이 바람직하다고 기술하고 있으며, 이 때 검증시험은 지지력 평가를 통한 말뚝길이 및 하중지지력 확인 과정이 되고, 설계단계시에 검증시험이 곤란한 경우에는 시공 초기에 재하시험 계획을 수립하도록 하고 있다. ‘구조물기초 설계기준(건설교통부, 2003)’에서는 시험말뚝을 대상으로 압축재하시험을 실시하여 지지력을 확인하도록 하고 있으며, 공사규모가 작거나 여건상 곤란한 경우에는 경험식을 적용 후 설계를 수행하고, 공사 초기에 실제 말뚝을 대상으로 재하시험을 실시해서 지지력을 확인하도록 하고 있다.

2.2 시험의 세부 사항

인천대교 국고구간은 관련 지방서 규정과 실시설계시 계획에 따라 말뚝의 연직재하시험을 실시하여 기초의 지지력을 확인하고, 공학적 합리성을 바탕으로 공구별 지지력 산정방법의 일관성을 유지하고자 하였다. 이를 위하여 4본의 시험말뚝을 공사 구간 내에 설치(그림 4)하였으며, 하중의 크기와 부지 조건 등 시험 여건을 감안하여 말뚝의 하단에 가압셀을 설치하여 시험반력을 얻는 양방향재하시험 (bi-directional loading test) 방법을 적용하였다. 양방향재하시험은 원래 미국의 오스터버그(Osterberg) 교수가 개발한 가압셀(Osterberg Cell)에 기원하며, 말뚝 내에 수압, 또는 유압을 이용하는 재하장치(셀)를 매설하고 위, 아래에 재하판을 설치하여 수행한다. 이 시험은 가압셀의 위치를 기준으로, 말뚝의 주면 마찰력과 선단지지력, 또는 상하층의 주면마찰력을 상호 반력으로 이용하므로 하중이 매우 크거나, 해상과 같이 탐다운 재하가 곤란한 경우에 매우 유용하다.

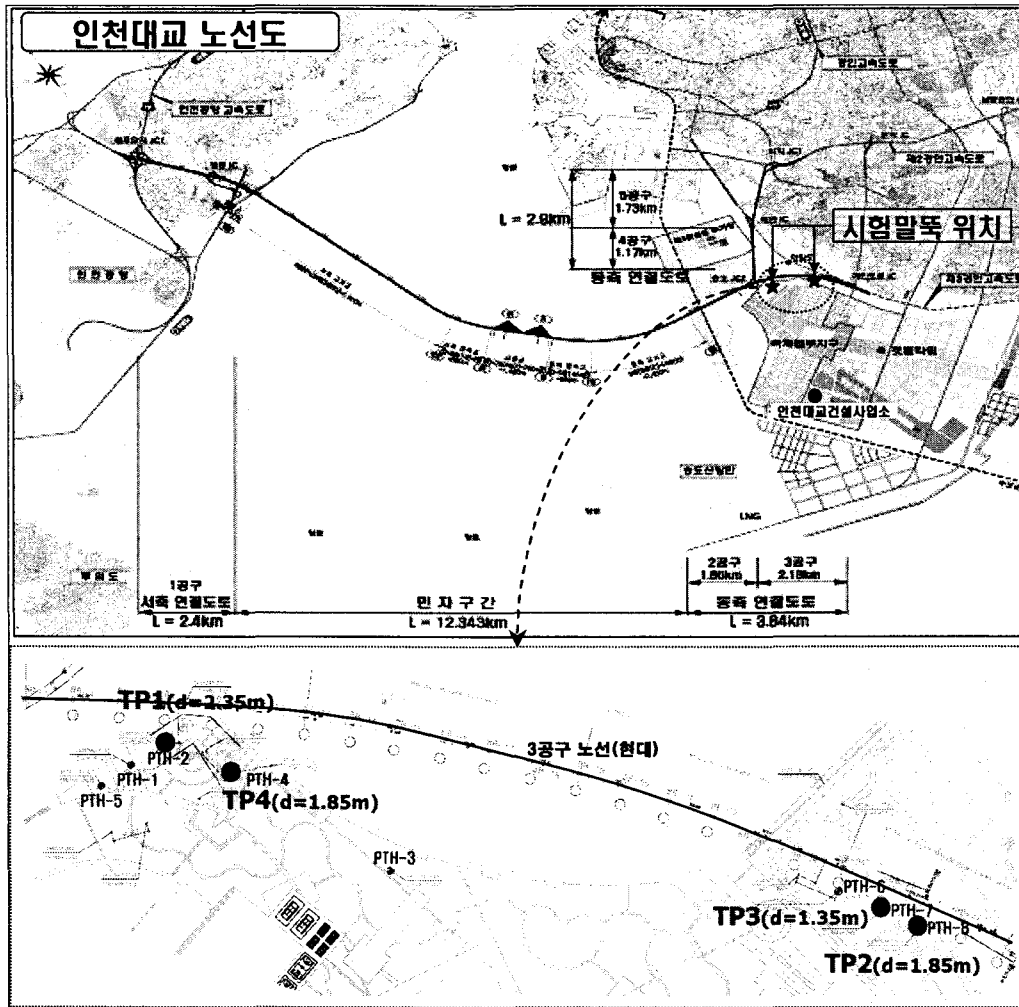


그림 4. 인천대교 국고구간의 말뚝재하시험 위치

한편, 공구별 말뚝 설계 내용을 검증하기 위해서는 다양한 지층에서 시험값을 얻어야 하므로, 민자구간 시험과는 달리 말뚝 한 본의 2개 층에 유압셀을 설치하는 다층재하(multi level loading) 방식을 채택했다. 다층재하시험은 하나의 시험말뚝만으로 구간별, 지층별 지지력을 파악할 수 있게 해준다. 2개의 셀을 사용할 경우 시험 중 하부셀과 상부셀의 관리에 주의를 해야 하는데, 재하단계별로 셀의 가압 상태와 하중 작용 방향은 그림 5와 같다. 이 그림에서 하부셀의 시험 후 상부셀을 가압할 때에 셀 사이 구간의 마찰력 작용방향이 바뀌는 것을 알 수 있다.

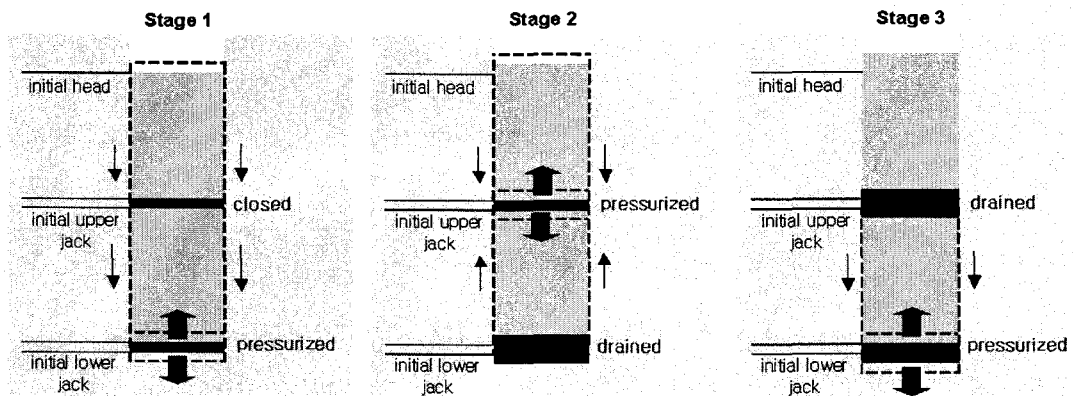


그림 5. 다층 양방향재하시험에서 가압셀 상태와 하중 방향 (서울대, 2006)

이미 실시설계시에 물리탐사를 포함하여 다양한 종류의 지반조사를 실시하였으나, 재하시험에 앞서, 시험 후보지를 포함해서 총 8개소에서 시추조사를 추가로 실시하였다. 8개소의 시추조사 결과와 실시 설계 지반조사 보고서를 검토하고 비교하여, 공구별 지반특성을 대표할 수 있는 4개소의 시험말뚝 위치를 선정하였으며, 이 곳에서 피에조콘관압시험(CPT_U), 공내재하시험 등 현장시험을 실시하고 풍화암의 경우는 트리플 코어 배럴, 연암의 경우는 D3 코어 배럴을 이용하여 코어 시료를 채취하였다. 암석 코어 시료는 실험실로 운반하여 점하중강도시험, 일축압축강도시험 등 강도를 구하기 위한 시험을 수행하였다. 그림 6은 시험말뚝 4개소(TP1~4)의 지층조건을 지반조사결과와 함께 나타낸 것이다. TP1, 2, 4 말뚝은 다층재하시험을 위해 말뚝당 2개층에 가압셀을 설치하였으며, TP3 말뚝은 가압셀을 선단에만 매설하였다. 셀의 설치 위치와 수량 등은 하중의 크기, 지반조건, 예상 지지력의 크기를 고려하여 정하였다. 그림 7은 시험말뚝에서 상부 및 하부 가압셀의 배치 단면과 양방향재하시험시 계측기 설치 사례를 보여준다. 하중전이를 관측하기 위하여 진동현 방식의 변형률 게이지(시스터바)를 매설하였다.

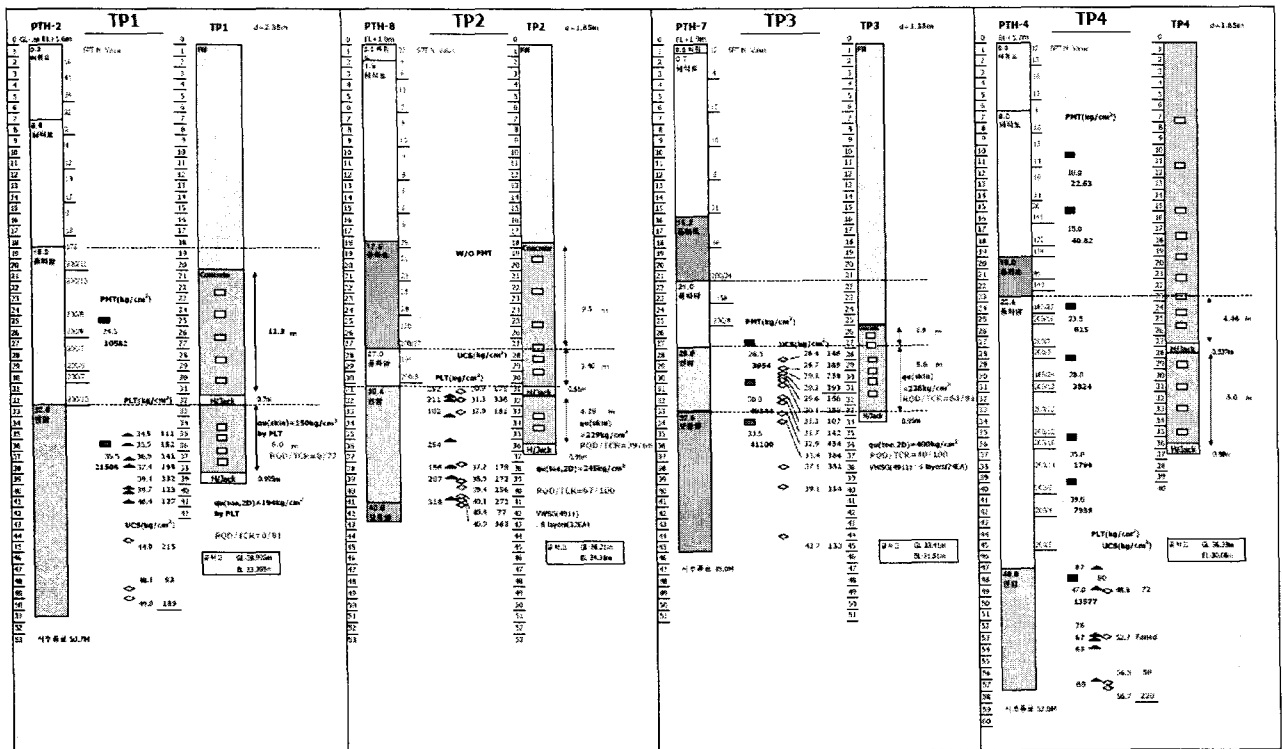


그림 6. 시험말뚝 설치 지반의 특성 (현대건설 기술연구소, 2006)

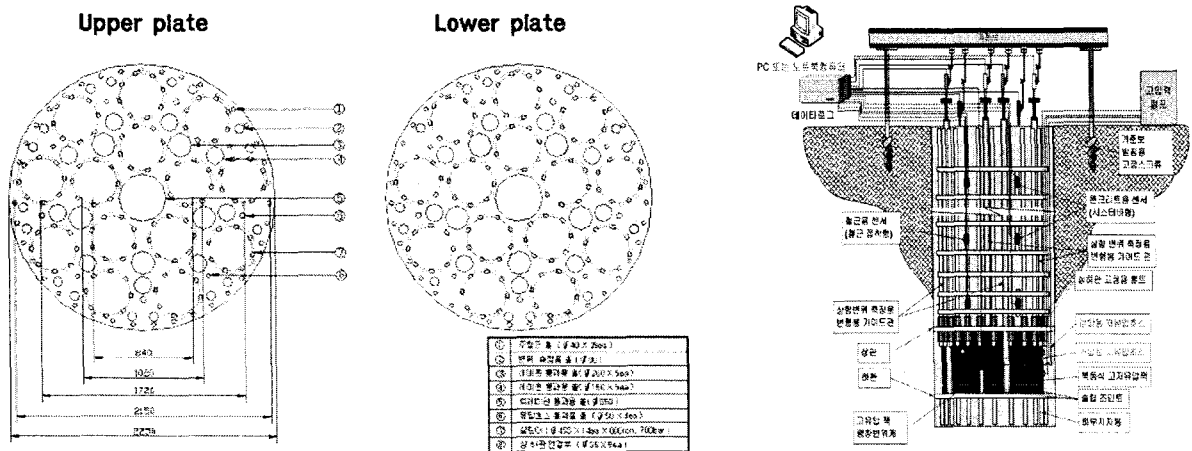


그림 7. 다층재하시험을 위한 가압셀의 설치 단면 및 시험말뚝 계측기 배치 예 (경성대, 2005)

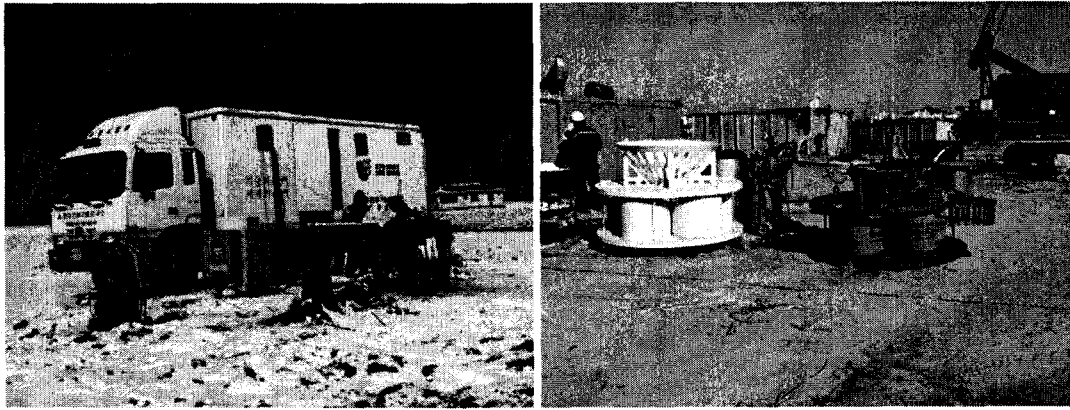


그림 8. 재하시험 전경 및 설치한 가압셀의 모습

2.3 시험 결과

다층재하시험의 지지력 평가를 위한 분석시에는 1단계(stage 1) 재하시험 결과를 우선적으로 적용하였다(그림 5 참조). 그러나, 1단계 재하시 변위가 10 mm 미만인 경우는 2단계 재하 결과를 적용하였고, 선단부는 1단계, 3단계 변위를 누적하여 하중-침하 곡선을 작성하였다.

표 3에 재하시험 결과인 작용 하중과 양방향의 발생 변위를 정리하였으며, 그림 9에는 1번 시험말뚝(TP1)의 단계별 하중-변위 곡선을 나타내었다. 그림 10, 11은 TP1의 주변 하중-변위 및 선단 하중-침하 관계를 보여준다. 2005년 초에 해상에서 재하시험을 실시한 민자구간에서는 말뚝재하시험 사상 세계최대압축하중인 28,900 tonf를 재하한 바 있는데, 2006년 초에 실시한 이번 국고구간 재하시험에서는 다층양방향시험의 산정 기준으로 세계 최대규모인 31,500 tonf (TP1)의 압축하중을 재하하였다. 또한, 단위면적당 하중으로도 세계 최대규모인 3,145 tonf² (TP3)을 기록하였다. 시험 결과의 분석 및 지지력 산정과 관련한 보다 세부적인 사항들은 이 글에서 다루지 않으므로, 별도의 문헌들을 참조하기 바란다.

표 3. 재하시험 결과 : 말뚝별 하중과 변위(침하량)

말뚝 번호	단계	하중재하방법	상부잭 최대변위(mm)		하부잭 최대변위(mm)	
			Top	Bottom	Top	Bottom
TP1	1	상부 잭 - 개방/잠금 하부 잭 - 8,500 tonf 재하	-	-	3.6	24.8
	2	상부 잭 - 10,750 tonf 재하 하부 잭 - 개방	103.6	22.5	-	-
	3	상부 잭 - 개방 하부 잭 - 10,000 tonf 재하	-	27.6	27.2	48.4
TP2	1	상부 잭 - 개방/잠금 하부 잭 - 5,000 tonf 재하	-	-	16.1	17.0
	2	상부 잭 - 1,563 tonf 재하 하부 잭 - 개방	88.9	2.5	-	-
TP3	1	4,500 tonf 재하	해당사항 없음		10.9	13.6
TP4	1	상부 잭 - 개방/잠금 하부 잭 - 3,750 tonf 재하	-	-	15.5	206.5
	2	상부 잭 - 2,350 tonf 재하 하부 잭 - 개방	112.7	32.1	-	-
	3	상부 잭 - 개방 하부 잭 - 2,466 tonf 재하	-	49.8	48.8	30.8

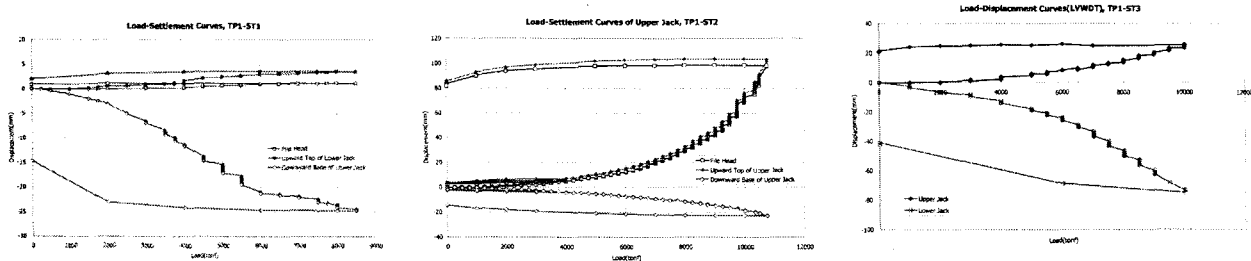
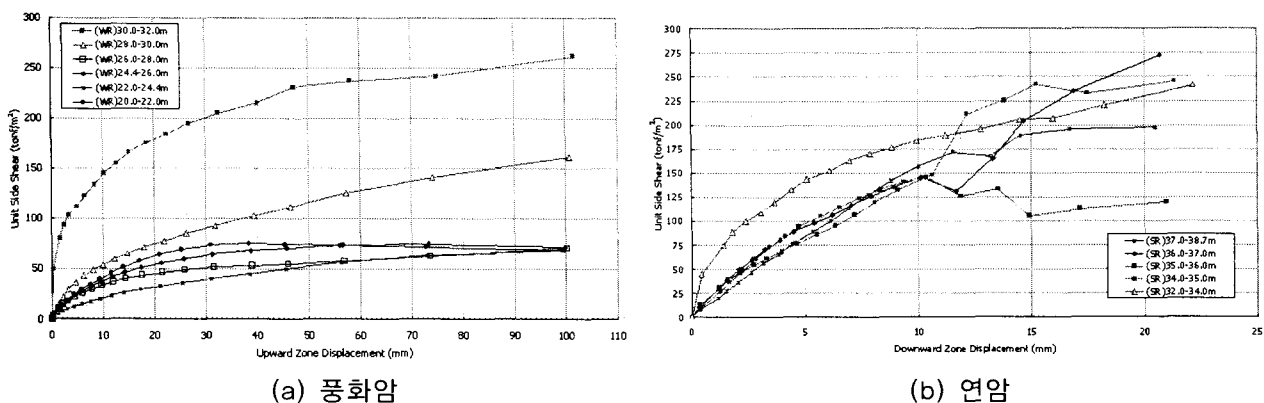


그림 9. TP1의 단계별 하중-변위 곡선 (현대건설 기술연구소, 2006)



(a) 풍화암

(b) 연암

그림 10. TP1에서 주면의 하중-변위 곡선(t-z curve)

그림 12는 4분의 시험말뚝에 대해서 하중전이 분석을 통해 구한 단위주면마찰력으로서, 그 값이 비교적 넓은 범위에 걸쳐 분포함을 알 수 있다.

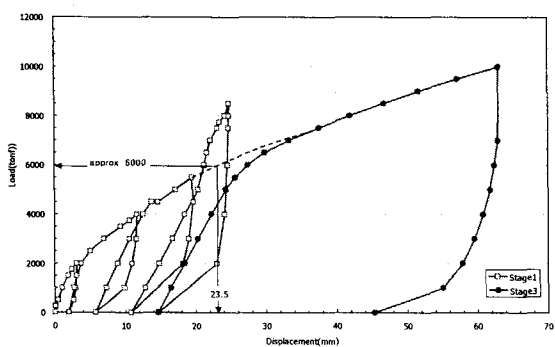


그림 11. TP1에서 선단의 하중-침하 곡선

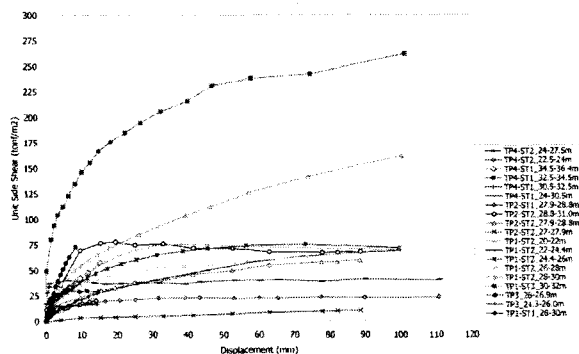


그림 12. 풍화암 구간의 단위 주면마찰력

이 재하시험은 인천대교 국고구간 2, 3, 4, 5공구의 시공사(대림산업, 현대건설, SK건설, 두산산업개발) 및 설계사가 함께 계획하였으며, 현대건설 기술연구소의 주관으로 실시하였다. 시험계획 수립, 시험 결과의 분석에는 해당 분야 전문가들이 별도로 참여하였다.

3. 재하시험 결과의 설계 및 시공 활용

인천대교 국고사업구간은 구간별로 분리발주된 특성상 공구별로 서로 다른 기준과 방법으로 기초 설계가 진행되었으며, 시공 전 공구별로 통합된 실규모 재하시험을 실시하여 지반분류와 지지력 평가를

말뚝재하시험을 실시할 경우에는 원칙적으로 3.0을 적용하되, 재하시험 횟수 및 대표성, 분석 수준 등에 따라 그 값을 하향조정할 수 있도록 하고 있다. 인천대교는 노선의 대부분이 해상에 위치하는 관계로 불가피하게 시험 위치가 노선과 다소 이격되어 있으며, 대표부지의 시험말뚝 시험으로는 공구별 지반조건을 모두 반영하기 어렵고, 또한 양방향 재하방식(O-cell 방식) 시험의 신뢰성을 기존의 탑다운 정재하 시험과 완전히 동일시하기 어려우며, 국내 최장대 교량의 기술적, 사회적 중요성이 매우 크고, 6차선 고속도로인 해상 장대교량에서 문제 발생시 피해 규모가 막대할 수 있다는 점 등을 감안할 경우, 안전율을 하향조정하는 것은 바람직하지 않다고 판단하였다. 민자구간의 경우에도 O-cell 방식 재하시험의 결과를 적용하는 점을 감안하여 LRFD의 저항계수를 저감하여 사용하고 있다.

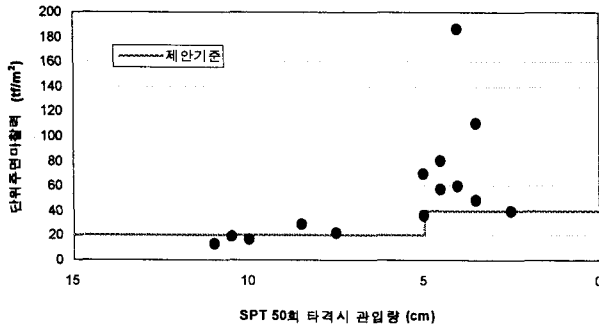


그림 14. 풍화암층의 극한단위주면마찰력 결정

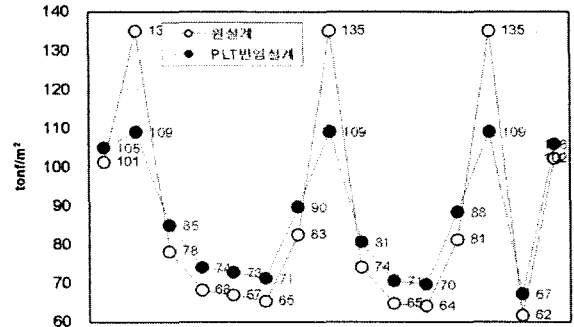


그림 15. 지지력 재평가 전후 주면마찰력 비교

수립된 ‘지지력 평가 기준’에 따라 공구별 실시설계 내용을 검토하여 지지력 재평가를 통해 시공 계획에 반영하였다. 지지력 재평가는 재하시험으로 확인한 지반의 실제 지지력을 기준으로 말뚝 실시설계를 검증하는 것으로서, 이 과정에서 허용지지력이 부족하다고 판단되는 경우는 말뚝의 암반 소켓 길이를 연장하고, 허용지지력이 과다하게 산정된 경우는 말뚝 길이를 적정하게 줄이게 된다. 그림 15는 말뚝의 주면마찰력 크기를 원설계(실시설계) 당시와 재하시험결과를 반영한 값에 대해 비교한 것이다.

또한, 실시설계시에 공구별 암반 분류기준에 다소 차이가 있었으므로, 재하시험시 분류 기준에 따라 일관되게 적용하도록 하였다(표 4). 이 기준은 민자구간 재하시험시 암반분류기준과 동일하다. 특히, 풍화암을 두 종류로 구분한 5공구에서는 시추 코어 분석 등을 통해 해당 암반의 공학적 특성을 고려하여 ‘풍화암 II’를 풍화암, 또는 연암으로 재분류하였다. 한편, 지반조사는 교각당 1개소를 기준으로 이루어졌으므로, 실제 말뚝의 지지력을 평가하기 위해서는 주변의 지반조사 및 시험 결과, 말뚝 굴착 시료, 인접 말뚝 시공 경험 등을 토대로 전문기술자가 지층을 분류하도록 하였다.

표 4. 공구별 실시설계시 암반분류기준과 재하시험시 기준의 비교

	2공구	3공구	4공구	5공구	재하시험
풍화암	SPT : 15cm미만/50타 RQD(%) ≤ 10	SPT : 15cm미만/50타 RQD(%) ≤ 10 TCR(%) ≤ 30	SPT : 10cm미만/50타	풍화암 I SPT : (5~15)cm/50타 q _u (MPa) ≤ 10 풍화암 II	SPT : 15cm미만/50타 RQD(%) ≤ 10 TCR(%) ≤ 30 1 < q _u (MPa) ≤ 20
연암	10 < RQD(%) ≤ 70 0 ≤ TCR(%) ≤ 20	10 < RQD(%) ≤ 40 30 < TCR(%) ≤ 60 10 < q _u (MPa) ≤ 40	30 < TCR(%)	SPT : 5cm미만/50타 10 < RQD(%) ≤ 10 10 < q _u (MPa) ≤ 23 연암 10 < RQD(%) ≤ 70 23 < q _u (MPa) ≤ 73	10 < RQD(%) ≤ 25 30 < TCR(%) ≤ 60 10 < q _u (MPa) ≤ 40

또한, 말뚝 시공을 위한 강관 케이싱은 풍화암층의 상단면으로부터 1 m 이상 근입되어야 하며, 암반

층의 강도가 약하거나 불연속면이 발달하여 공벽 유지가 어려울 경우는 충분히 연장하도록 하고, 공벽 유지를 위한 과형강관을 사용할 경우 그 설치 깊이는 지반조건을 고려하여 정하도록 하였다.

풍화암층이 두껍게 분포하여 연암 이상 기반암층의 출현 심도가 깊을 경우에는 허용지지력이 연직하중을 충분히 상회하고, 과도한 침하가 발생하지 않는 조건에서 풍화암층을 말뚝의 지지층으로 할 수 있게 하였고, 연암 이상 기반암층의 선단지지력을 반영하기 위해서는 말뚝을 기반암층 내에 적절한 깊이만큼 근입시키도록 하였다. 시공 중 지층 조건의 변화(예:암반선의 변동), 케이싱 강관 선단 위치의 변경, 기타 특이 사항 발생시에는 지지력 평가기준에 따라 지지력을 재산정하여 말뚝 근입 조건을 결정하게 된다.

5. 결론

인천대교 건설사업 구간 중 허용응력설계법을 적용하는 국고구간의 현장타설말뚝 설계를 검증하고 시공의 품질을 높여, 교량의 안전성을 확보하기 위하여 시공 전에 말뚝재하시험을 실시하였다. 또 다른 사업구간인 민자구간에서도 이미 실시설계 이전에 재하시험을 완료하여 그 성과를 설계에 반영하였으므로, 인천대교는 전 구간에 걸쳐 재하시험으로 지반의 실제 지지력을 확인하고, 그 결과를 설계와 시공에 활용한 모범적인 사례가 될 것이다. 또한 시험의 규모면에 있어서도 민자구간에서는 이미 28,900 tonf의 압축하중을 가한 세계최대규모 말뚝재하시험을 기록하였으며, 이번에 실시한 국고구간 시험시에는 다층 양방향 재하시험의 산정 기준으로 세계최대하중인 31,500 tonf을 기록하였다.

인천대교 국고구간에서 재하시험을 활용한 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 실시설계 당시에는 여건상 재하시험을 실시하지 못하고, 경험식 및 이론식을 위주로 설계를 완료하였으나, 착공 후 말뚝 시공을 개시하기 전에 4본의 시험말뚝을 시공하여 극한재하시험을 실시하였다.
- 2) 국고구간 사업은 공구별로 분리발주되어 실시설계를 각각 수행하였으나, 공구별로 시험계획을 통합하여 공동 재하시험을 실시함으로써 보다 효과적이고 경제적인 시험이 가능하였으며, 또한 교량 전체의 관점에서 설계의 일관성을 높이는 데에도 도움이 되었다.
- 3) 하중전이 측정을 병행한 다층 양방향 재하시험을 통해 교량의 기초를 지지하게 되는 암반의 종류별로 극한단위지지력을 산정하였으며, 이를 토대로 지지력 평가 기준을 수립하여 전문가 검토를 거쳐 실시설계의 내용을 검증하는 데에 적용하였다.
- 4) 수립한 지지력 평가 기준을 적용하여 설계가 완료된 말뚝의 지지력을 재평가하였으며, 그 결과에 따라 말뚝의 길이를 조정하였다. 시공시 예상하지 못한 지층 변화시에도 이 평가 기준을 적용하여 말뚝 길이를 결정하도록 하였다.
- 5) 재하시험시에 적용한 지반 분류 기준을 지지력 재평가와 감독원의 기초 암반 판정시에 활용함으로써, 교량의 시공관리와 품질관리를 한층 더 용이하게 하였다.

참고문헌

1. 경성대학교(2006), 인천대교 연결도로 현장타설말뚝 재하시험 계획서.
2. 김동준, 송명준, 박영호(2004), "해상대구경 현장타설 말뚝의 설계 및 시공 사례연구", 대한토목학회 가을정기학술발표회.
3. 대한토목학회(2001), "도로교설계기준 해설(하부구조편)".
4. 서울대학교(2006), 인천대교 연결도로 현장타설말뚝 지지력 산정 기준 결정.
5. 송명준, 박영호, 김동준 (2005), "대구경 현장타설말뚝의 설계를 위한 선단재하방법에 의한 시험말뚝재하시험", 한국지반공학회 봄 학술발표회.

6. 정성준, 김정환, 이현근, 김명모(2005), “LRFD 설계법에 따른 인천대교 현장 타설 말뚝의 지지력 산정”, 대한토목학회 2005년 정기학술대회 논문집.
7. 조성민, 정일환, 조주기, 설운호, 이성수(2005), LRFD를 적용하는 인천대교 현장타설말뚝 설계의 저항계수 평가, 대한토목학회 2005년 정기학술대회 논문집, pp.3933-3936.
8. 한국지반공학회(2003), “구조물 기초설계기준 해설”.
9. 현대건설기술연구소(2006), “인천대교 연결도로 건설공사 말뚝 재하시험보고서”.
10. AASHTO(1998, 2003), LRFD Bridge Design Specifications : 2nd Ed., (Interim version 2003), AASHTO, Washington DC.
11. AASHTO(2004), LRFD Bridge Design Specifications : 3rd Ed., AASHTO, Washington DC.
12. Carter, J.P. and Kulhawy, F.H. (1988), “Analysis and Design of Drilled Shaft Foundations Socketed into Rock”, Report No. EI-5918, Empire State Engineering Research Corporation and Electric Power Institute, New York, p.158.
13. FHWA (1999), “Drilled Shaft ; Construction Procedures and Design Method”.
14. Lo, S.C.R., Li, K.S.(2003), Influence of a permanent liner on the skin friction of large-diameter bored piles in Hong Kong granite saprolites, Canadian Geotechnical Journal, Vol.40, pp.793-805.
15. TRB(2004), LRFD for Deep Foundations, NCHRP Report 507, Transportation Research Board.