

교량기초의 지지력확인 시험 결과에 따른 건설비 절감사례

Test results confirm the bridge foundation bearing capacity due to construction costs case

이수곤¹⁾, Soo-Gon Lee, 우재경²⁾, Jae-Gyung Woo

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Ph. D Student, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

SYNOPSIS : Case studies published in Korea versus the low ground fault is applied on the bridge based on theory or experience in the design of pile bearing capacity by the value of the expression is designed to conduct field tests Disclosure Load bearing capacity value, the result of applying a reasonable construction cost savings of approximately 10 eokyeowon Has, in the design of site investigation was insufficient to require additional efforts. Apply the appropriate value from the extra support in the design of accurate ground survey and air speed to cut the budget and social technology can ensure the reliability was unknown.

Keywords : Fault zone, field Casting Pile, Pile Load Test, The unit friction

1. 서 론

말뚝기초는 상부의 하중을 안전하게 하부지지층으로 전달하기 위해 사용하는 깊은 기초 형식이다. 이러한 말뚝기초는 일반적으로 타당성조사 → 기본 및 실시설계 → 시공시 시험말뚝 재하시험(생략 하는 경우 많음) → 사용말뚝 검증시험 → 구조물 시공의 과정을 거치게 된다. “구조물기초 설계기준”에 의하면 현재 우리나라 설계의 경우 거의 대부분 시험시공을 실시하지 않고 이론이나 경험식에 의한 말뚝지지력을 산정하고 있다. 그 결과 말뚝본체의 허용압축응력의 40~60% 정도만을 설계에 활용하고 있는 실정이나 외국(선진국 및 개발도상국)에서는 말뚝본체의 허용압축하중의 거의 100%에 근접하는 설계가 보편화 되어있어 일정 규모 이상의 공사에서는 설계를 위하여 시험말뚝설치 및 압축 재하시험을 실시하도록 개선하였고 이때에는 반드시 말뚝의 극한 축방향 압축지지력을 확인하도록 하였으나(건설교통부, 2003) 대부분이 잘 적용하지 않고 있는 실정이다. 또한 현장시공시에도 재하시험 결과를 설계시의 지지력 확인용으로 참고만 하고는 것이 일반적인 추세이다. 본 문에서는 한강상 교량인 00대교건설공사 교량기초공사시 단층대 지반에서 말뚝기초에 대한 하중재하시험을 통해 나타난 지지력 값으로 재설계하여 적정한 말뚝제원으로 시공한 결과 30여개 교각에서 당초보다 497m의 말뚝길이를 축소하여 총 10억여원을 절감할 수 있었고, 또한 설계시 부터 잘못된 지반조사 미흡으로 이를 보완하기 위한 추가적인 노력이 있었는데 이러한 지지력 시험 및 지반조사의 중요성에 대하여 현장 시공 과정에서 경제성을 통해 검증할 수 있었다.

2. 지반특성

2.1 단층대의 특성

시공현장 남단지점에 출현한 단층파쇄대의 특성을 조사하기 위하여 설계시 탄성과 조사를 수행하였으

며 시추공 BB-24, BB102에서 공내 재하시험과 BB-24, 25, 79, 102에서 실내시험을 시행하였으며 시공 시에도 확인 시험을 하였다.

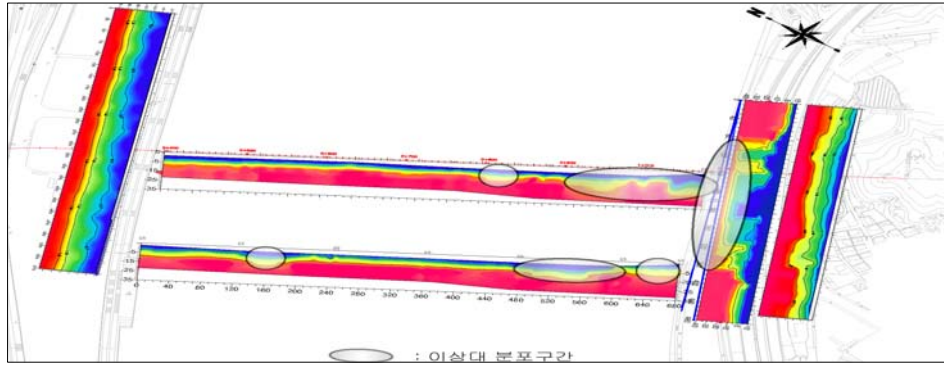


그림 1. 단층대 탄성과 조사 결과

시추공 No.	단층대분포 심도(m)	단층대 분포구간 코아 사진
BB-100	15.3~56.0	

그림 2. 단층대 시추조사 현황

표 1. 단층대 공내재하시험 결과

구 분	심도 (m)	TCR (%)	RQD (%)	지 층	변형계수 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	비 고
BB-24	49.0	44	0	연암(단층대)	11,351	18,286	
BB-102	18.5	-	-	단층점토	137.9	-	불교란
	27.0	71	-	단층점토	61.8	-	교란
				단층각력	569.3	-	불교란
연암평균					16,417 (8,675 ~ 26,058)	22,073 (11,927 ~ 31,732)	
경암평균					52,195 (27,226 ~ 109,035)	78,458 (35,176 ~ 154,683)	

표 2. 단층대 토성시험 결과

공 번	심도 (m)	WN (%)	Gs	Atterberg		Sieve Analysis(%)			통일분류 (U.S.C.S)
				LL(%)	PI(%)	0.002mm	#200	#4	
BB-24	27.0	21.5	2.68	36.4	15.9	1	59.8	100	CL
BB-25	15.0	21.7	2.70	44.9	22.0	3	56.4	100	CL
BB-79	22.5	23.1	2.69	45.2	24.7	4	68.0	100	CL
BB-102	18.0	26.0	2.72	43.0	22.0	13	89.5	100	CL

3. 시험말뚝 하중재하시험 개요

3.1 시험목적

교량기초 시공을 위해 선정된 구간에서 시험말뚝 및 시공말뚝에 대해 주변마찰력과 선단지지력을 분리 측정, 지층별 하중전이 특성을 파악하기 위한 축하중 전이시험을 포함한 양방향재하시험 및 반력앵커를 이용한 정재하시험을 수행함으로써 시공 말뚝의 설계지지력 확보방안 및 기 설계된 자료의 검증을 위한 기초자료를 효율적이고 직접적인 방법에 의해 제공하였다.

3.2 시험계획

표 3. 시공단계별 재하시험 개요(전체 계획)

구 분	시험목적	말뚝직경	시험위치	시험수량	시험시기
정재하시험	지지력확인	∅1,000	CP-2,GP-10,GP-6,AP-3	4	본시공초기
		∅1,200	MA-1, MP-3	2	
	하중전이 측정 및 지지력확인	∅1,000	TP-3	1	시공전계획단계
			F1A-1,F1A-2,GP-8,GA-2	4	본시공초기
		∅1,000	TP-1, TP-2	2	시공전계획단계
			MP-12, MP-13	2	본시공초기
양방향재하시험	지지력확인	∅1,000	GP-3	1	본시공초기
		∅1,200	MP-11	1	
	하중전이 측정 및 지지력확인	∅1,000	DP-5, DP-6	2	본시공초기

3.3 판정 및 활용

3.3.1 판정

- (1) 시험결과 하중-침하 및 하중전이를 검토하여 항복하중 및 말뚝의 연직하중 전이특성을 분석하였다.
- (2) 말뚝 선단지지력 및 심도별 주변마찰력의 크기를 산정하였다.
- (3) 시험말뚝 재하시험의 하중전이 측정결과를 활용하였다

3.3.2 활용

- (1) 시공 보링을 통한 시험말뚝 및 사용 말뚝의 지층별 연계성 분석
- (2) 시험말뚝의 하중전이 측정결과를 이용한 지층별 주변마찰력 특성치를 산출
- (3) 사용 말뚝의 기초지지력 및 침하평가, 제원 변경(말뚝근입심도, 지지력, 침하 등)
- (4) 변경된 사용 말뚝의 확인시험(재하시험)계획수립

3.4 말뚝재하시험(TP-1)

3.4.1 재하하중 크기의 적합성

현장타설말뚝에 대해 최대 시험하중을 2,400ton까지 재하하여 말뚝의 항복을 관찰하고자 계획하였는데, 상부 연암층이 전체하중의 약 50%를 지지하여 실지 단층대에 전달된 하중은 약 1,000ton을 약간 상회하는 것으로 나타났다. MP-12의 확인하고자하는 재하시험 결과치는 실시설계 허용지지력이 332.3ton임을 감안할 때 극한지지력은 996.9ton(3배)이므로, 본시험의 단층대 단위마찰력 측정값은 극한지지력까지 재하된 상태라 할 수 있으므로 만약 재하하중을 MP-12의 3배 정도인 약 1,000ton 정도의 계획으로 하중을 재하 하였다면, 단층대의 하중전이는 거의 없었을 것이어서 2,400ton의 재하하중은 적절하였던 것으로 판단되었다. TP-1의 하중전이 시험을 통하여 측정된 각 지층별 값은 다음의 3가지 그래프로 시험결과를 알 수 있었다.

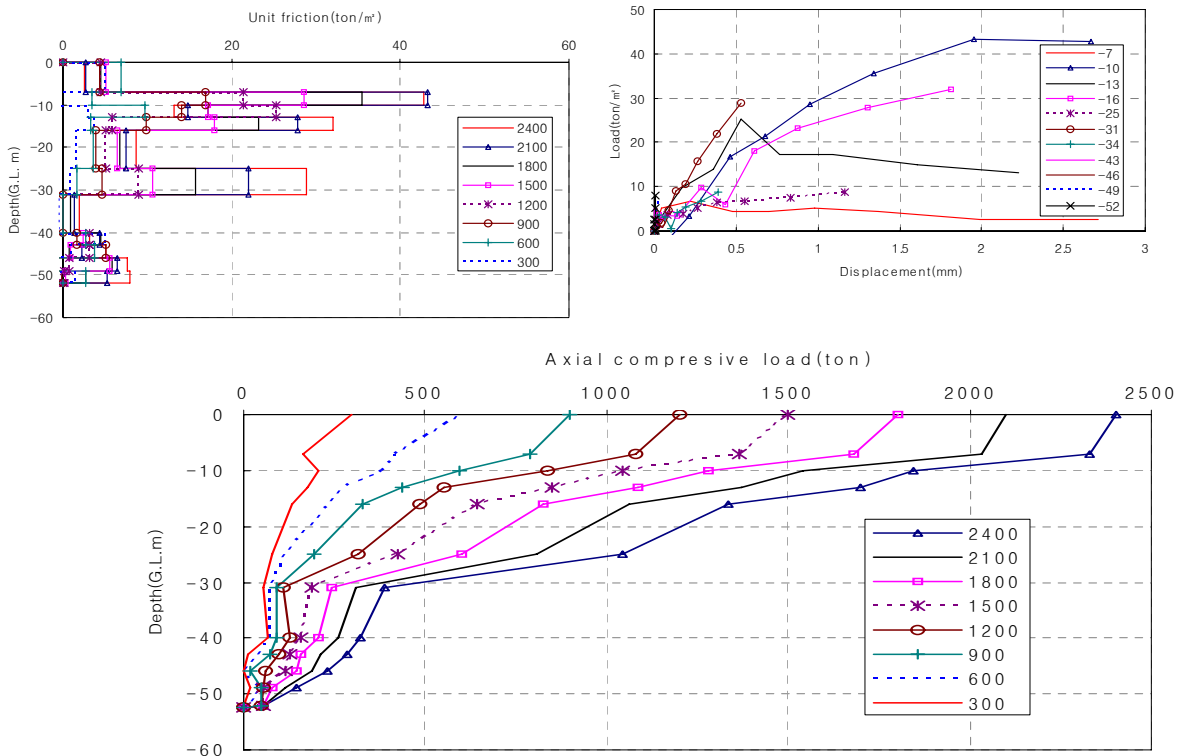


그림3. 시험말뚝(TP-1) 재하시험결과

위의 그래프에서 분석된 결과를 정리하여 각 지층별로 발현된 단위 마찰력을 각 지층에 전달된 하중과 함께 요약하면 다음 표 4와 같다.

표 4. 지층별 단위마찰력과 전달하중

Layer	Depth(m)	Unit friction(tonf/m ²)	전달하중(ton)
퇴적층 1	0~ -7	2.62	2331.0
퇴적층 2	-7~-10	42.73	1847.9
연암 1	-10~-13	13.15	1699.3
연암 2	-13~-16	32.00	1337.5
단층 1 점토	-16~-25	8.65	1044.2
단층 1 각력	-25~-31	28.83	392.3
단층 2	-31~-40	2.00	324.5
	-40~-43	3.19	288.5
	-43~-46	5.02	231.8
	-46~-49	7.64	145.4
	-49~-52	7.97	55.3

3.4.2 말뚝재하시험결과 단위지지력 검토

말뚝재하시험 측정결과 각 지층별로 단위 마찰력의; 측정 크기가 상당한 차이를 보이고 있어 지반조사 결과와 현장의 상황 및 구조물의 안정성을 고려하여 각 지층에서 측정된 단위마찰력 중 가장 작은 값을 재설계에 반영하였다

- (1) 상부 퇴적층은 모래자갈층인데 7m까지는 2.62ton/m²을 보이나, 이후 7m~10m에서 42.73ton/m²을 나타내고 있어 일반적인 퇴적층에서 나타나는 값의 범위를 훨씬 상회하는 값이어서 하부 연암의 영향이 미치고 있는 것으로 판단되어 반영하지 않았으며, 상부 퇴적층 아래의 연암 또한 검토에서 제외하였다.
- (2) 단층대는 상부층과 하부층으로 분류가 되며, 16m~25m 구간의 상부층은 점토의 영향을 많이 받은 지층으로 8.65ton/m²이 측정 되었으며, 하부는 28.87ton/m²으로 측정 되었으나, 미세한 점토 함유량의 변화에 대응하는 값으로 판단하기에는 증가량이 너무 크며, 유사사례(최용규 등, 2004)와도 상당한 차이를 보이고 있어, 국부적인 비정상 측정치로 평가되므로 이하 하부의 단층대에서 측정된 값들은 충분한 하중전달이 되지 않아 반영하기에는 무리가 있는 것으로 판단하였다.
- (3) 위와 같은 검토 결과 상부 퇴적층의 단위마찰력 2.62ton/m²과 단층 점토층의 단위 마찰력이 8.65ton/m²이 적절한 값으로 판단 하였다.
- (4) 말뚝재하시험결과를 설계에 반영함에 있어 추가 검토사항은 시공 위치의 단층 점토층의 지층상태가 시험위치에서 채취한 코어시료(MB-16-2)의 상태보다 불량한 단층대에서는 더 작은값이 적용 되어야 하므로 시험값의 적용시는 세밀한 지층상태 검토가 동시에 되어야 하였다.

3.5 말뚝제원 분석

말뚝재하시험 결과를 반영함으로써 말뚝제원이 변경(말뚝 근입심도)되어 말뚝의 본수, 지름, 길이의 변화에 따른 공사비 영향을 분석한 결론은 아래와 같다.

- (1) 말뚝 본수를 감소시키는 경우(일정지름)

말뚝 본수의 감소에서는 말뚝체적은 일정하고, 철근량은 증가하므로, 공사비는 감소요인은 없고 증가요인만 발생되어 공사비는 증가 된다.
- (2) 말뚝 지름을 감소시키는 경우(일정본수)

말뚝 지름의 감소에서는 말뚝체적은 감소하고, 철근량은 증가하므로, 공사비 전체 증감에 대한 상세 검토 결과 DP-6의 지름을 1.0m에서 0.8m로 변경할 경우 12.8%, MP-12의 지름을 1.2m에서

1.0m로 변경할 경우 3.8%의 공사비가 증가 하였다.

(3) 말뚝의 분수나 지름을 증가시키는 경우

말뚝의 최소 중심 간격 규정에 의하여 기초 저판이 더 커지고 말뚝 이외의 공사비 증가요인이 발생하고, 설계당시 구조에 대한 재설계 및 공기지연 등 여러 문제점이 발생되므로 검토대상에서 제외 하였다.

3.4 말뚝제원 조정 결과

현장내 단층대가 존재하는 지층인 주교량 (MP-12) 및 램프교량(DP-6)교각설치 위치에 시험말뚝 (TP-1)에 대한 재하시험을 통해 실측된 주변단위마찰력 적정값을 반영하여 말뚝제원을 재설계 한 후 토질분야기술자와 현장관계자들이 시험결과 및 지반여건과 잠재 위험요소를 고려한 기술적 평가와 분석으로 적정한 말뚝제원을 결정하여 예산절감 등 많은 효과가 있었음이 검증 되었다.

- (1) 단층대에 위치하는 교각 MP-12, DP-6 시험말뚝재하시험(TP-1)대해 수행된 결과 단위마찰력을 반영하여 말뚝길이를 조정하여 표3와 같이 시공하였다.

표 5. 말뚝길이조정 결과

교각번호	말뚝분수	실시설계	재하시험결과	감소길이	총 감소길이
DP-6	9	59m	41.5m	17.5m/본	157.5m
MP-12	21	54m	43.0m	11m/본	231m

- (2) 말뚝의 재설계는 상부구조에서 요구하는 지지력과 침하량이 충족 되도록 말뚝의 분수와 배열 및 말뚝의 제원(지름, 철근량)등을 결정하나, 시공단계에서 말뚝재하시험의 결과를 반영한 말뚝제원의 변경은 일반적으로 말뚝의 근입심도 조정에 제한하도록 공사설계시 시방서에 제시되어 있었는데 좀더 경제적인 설계를 위하여는 말뚝 근입심도 조정에 추가하여 말뚝에 대해 기본설계에서 검토되는 구조적인 부분 즉, 말뚝의 분수와 지름 등이 과연 최적화(Optimized) 되었는가를 검토 하여 반영함이 타당하나 실시공 과정에서 근본적인 재설계 수행은 공정추진 및 계약상의 제반 문제 등을 고려할 때 시기적으로 불가능 하였다.

- (3) 실시설계당시와 현장 검증의 결과를 통하여 기 설계된 기초저판의 범위에서 말뚝의 분수와 지름을 조정하는 가장 최적화 된 재설계 결과 표4와 같이 MP-12 교각에서만 약 2.23억원을 절감하는 등 30여개소 교각의 말뚝길이 조정으로 총 10.3억원의 예산절감을 기할 수 있음을 알 수 있었다.

표 6. MP-12 현장타설말뚝 공사비 비교

구분		당초설계	제 1 안	제 2 안
말뚝설계	말뚝분수	21 = 3 x 7	21 = 3 x 7	18 = 3 x 6
	말뚝길이	54.1m	43.1m	54.1m
	단층대 주변마찰력 적용	4.37(t/m ²)	6.6(t/m ²)	6.6(t/m ²)
	본당 허용 지지력	332.3 ton	334.4 ton	425.6 ton
	교각 총 지지력	6978.3 (ton)	7022.4 (ton)	7660.8 (ton)
경제성	총 공사비(백만원)	1,327	1,104	1,138
	절감액		(-) 223	(-) 189
시공성	말뚝시공심도	61.7m	50.7m	61.7m
	케이싱 관입/인발	어려움	상대적 용이	어려움
기타	구조설계검토 등 재설계여부		<ul style="list-style-type: none"> 말뚝분수 변경 없음 구조검토 불필요 	<ul style="list-style-type: none"> 말뚝분수 변경, 말뚝자체 및 기초 등의 구조 재검토, 설계도면, 시방서 변경 필요
채택사유			<ul style="list-style-type: none"> 경제성, 시공성 가장 우수 건설비 절감 223백만원 	

4. 지반조사의 문제점

4.1 조사위치 선정의 부적절

설계시 시추가 어려운 위치임을 이유로 실시공할 위치보다 멀리 떨어진 곳이나 지반고 차이가 현격한 곳에서 시추한 결과치를 지지력 계산시 적용하여 시공시 보링결과 지층상태 및 지지력이 상이하게 나타났다. 아래 그림 4와 같이 최대 40m 이격되어 보링한 관계로 설계와 상이한 지지력 차이가 있어 재설계가 불가피하였다.

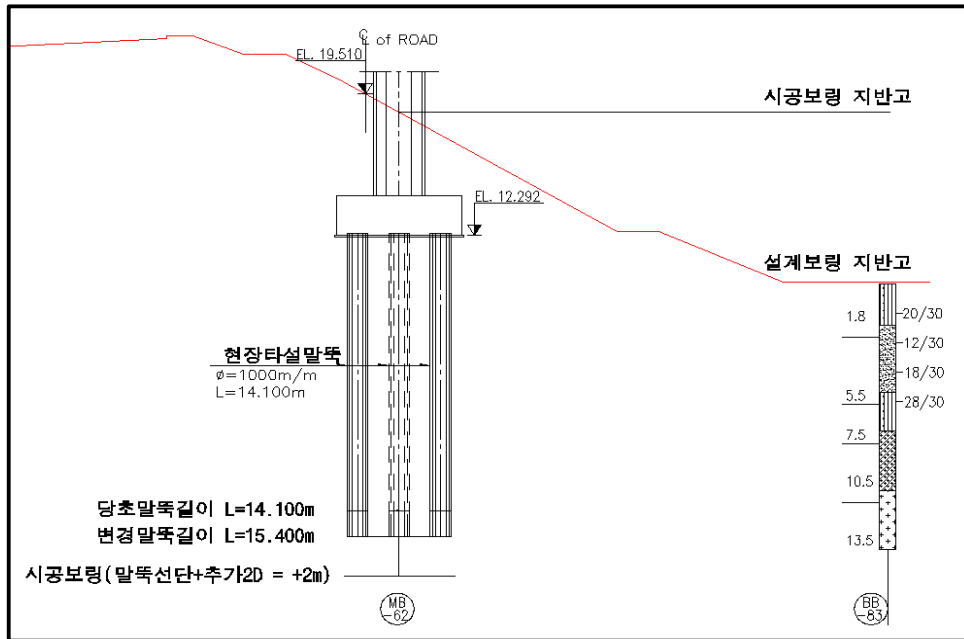


그림 4. 교각 DP-2의 지반조사 사례

4.2 조사심도 부족

지반침하 방지 및 균일한 압반층 여부 확인을 위해 적어도 일반적으로 적용하고 있는 2D~3D 이하 심도까지 지반상태 확인 미이행으로 추가보링이 불가피하였다.

4.3 시추조사 갯수 부족

설계시 교각기초마다 시추 하지 않고 인접구간에서 Sample조사 시추 결과치를 설계에 적용 산출한 사례도 있었다.

4.4 조사의 정밀도 부족

설계시 탄성파시험 결과와 현장 시추결과 지층변화 상이한 등 조사 및 분석 정밀도가 부족하였다.

5. 결론 및 제언

본 연구사례는 설계시 재하시험을 시행하지 않고 이론이나 경험식에 의한 지지력 값을 적용한 단층과 쉐대에서의 시공단계에서 시험말뚝에 대해 재하시험을 수행하여 설계값과 비교하여 재설계후 시공한 결과 예산절감을 기할 수 있었다. 또한 설계 전체중 지반조사 및 토질설계 비율은 일반적인 3%가 아닌 실질적으로 10~25%에 달하는 중요한 기초자료라는 보고도 있었으므로 철저한 지반조사 만이 공사비의 실질적인 절감과 낭비를 발생시키지 않는 것임을 알 수 있었다. 향후로는 계획단계에서 과도한 예산 책

정과 공사중 불필요한 추가업무 발생 및 공기지연을 최소화하기 위하여 금번 사례를 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 단층대 구간에서의 단층점토층 주면단위 마찰력 적용
단층점토층에서 교가기초공사시 적용 가능한 층적층의 단위마찰력은 2.62ton/m²이며 단층점토층의 단위 마찰력은 8.65ton/m²을 적절한 값으로 적용 하였다.
- (2) 설계시부터 말뚝재하시험 수행시 경제성 향상
교량기초 말뚝설계시 이론이나 경험식에 의한 지지력 값과 실지 현장 시공시 지반조사 및 말뚝재하시험을 통한 지지력을 비교하여 적정값을 적용한 결과 당초보다 약 10억여원의 말뚝공사비가 절감됨이 검증되었으므로 설계시부터 말뚝재하시험 값을 반영하면 과다설계로 인한 공사비 낭비 요인이 없음을 알 수 있었다.
- (3) 시험비 반영으로 최적의 설계제공 및 시공시 추가적인 노력 감소 효과
말주자는 시험말뚝 재하시험비를 설계시부터 반영하고 설계자는 이를 토대로 최적화된 설계를 하여 계획단계에서 과다한 예산 책정과 공사중 검토과정 및 공기지연을 사전에 방지할 수 있음을 알 수 있었다.
- (4) 경제적인 지지력 적용기준 마련필요
시공시 재하시험 결과를 대부분이 지지력 확인용으로 참고만 하는데 “구조물 기초설계기준“에도 수록되어 있는바와 같이 향후로는 시공시 재하시험 분석사례를 많이 검토하여 외국과 같이 허용 압축하중에 접근하는 결과를 반영하면 경제성이 있음을 알 수 있었다.
- (5) 설계단계의 정확한 지반조사 결과 적용
지반조사시 실지 교각설치 위치에서 시추하여 정확한 지반분석과 지반여건을 고려한 신뢰성있는 설계품질을 확보할 시는 시공과정에서 설계변경 최소화 및 공기지연이 없어 기술자들에 대한 사회적인 불신요인을 사전에 방지할 수 있을 것이다.
- (6) 지반조사 미흡
인접지반조사 자료로 설계하였거나 교각기초 시공범위가 넓어 같은 교각내 에서도 지층 변화가 심한 경우에도 시추 개수 및 조사심도 부족과 설계시 탄성파시험 결과가 실지와 상이하여 추가 시추 조사를 하는 등 지반조사가 미흡하여 추가 확인이 필요하였던바 초기 지반조사가 중요하다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 한국지반공학회(2003), 건설교통부제정 구조물 기초설계 기준 해설
2. 건설교통부(1999), 도로교표준시방서
3. OO대교 건설공사 지반조사 보고서(2005)
4. 정성기 등(1998), “설계목적의 말뚝재하시험을 이용한 말뚝기초 건설비용 절감에 관한 연구”, 대한 토목공학회 논문집 제 18권 제 3-3권 pp.341~352.
5. 최용규, 정창규 등(2004), “양방향 선단재하시험을 이용한 단층과쇄대에 시공된 대구경 현장타설말뚝의 선단지지력 측정 연구” 한국지반공학회 논문집 제 20권 5호, pp135~143