

말뚝기초의 적정 지지력 확보 방안¹

– 말뚝기초 재하시험 결과 활용 사례를 중심으로 –

1. 서론²

교량의 기초는 상부구조물의 하중을 지반에 전달하는 하부구조로서 외부하중에 대해 말뚝기초 주변³의 지반 및 지층과 상호작용으로 거동한다. 따라서, 말뚝기초의 상부하중에 대한 안정성을 확보하기 위해서는 허용범위 이상 침하가 발생하지 않도록 설계 및 시공되어야 한다.

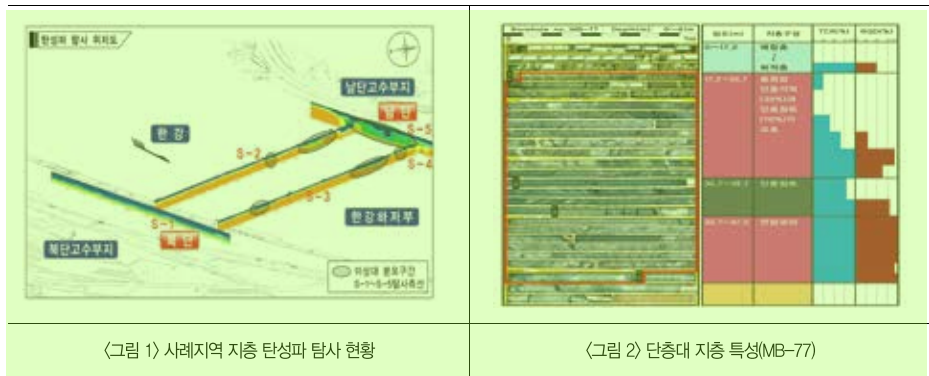
말뚝기초 설계 시에는 지반조사를 통해 지층 특성을 정확히 파악한 후 지지층의 적정여부를 검토하⁵고, 시험 말뚝에 대해 재하시험을 실시하여 측정된 지지력을 설계에 반영하여야 한다(대한토목학회, 2008). 또한 말뚝기초에 대한 설계 및 시공 시 시험말뚝에 대한 재하시험을 실시할 경우 말뚝기초의 안정성 확보뿐만 아니라 공사비를 절감하여 경제적인 효과를 얻을 수 있다(정성기 등, 1998).

본 사례에서는 단층파쇄대 지층에서 시험시공 말뚝을 설치하고 재하시험을 통한 선단지지력 및 하중 전이시험 결과를 이용하여 산정한 심도별 주면마찰력 값으로 말뚝제원을 조정 시공한 결과 말뚝기초의 안정성과 경제성을 확보할 수 있었다(우재경, 2013).

2. 말뚝기초 설치⁶

2.1 지반 현황⁷

본 사례구간 한강의 단층대인 <그림 1>의 위치에 건설되는 교량 말뚝 기초를 설계하기 위해 지반시⁸추 조사 및 탄성파탐사를 하여 교량 설치구간 전체의 지층별 분포특성을 파악하였다.



지반조사 및 분석 결과 본 지역 지반은 <그림 2>에 나타난 바와 같이 12~14m 두께의 퇴적층이 최상부에 분포하고 있다. 그 아래¹⁰는 단층대로서 상부층은 두께가 19.5m로 단층각력 30%와 단층 점토 70%가 혼입된 지층이며, 하부연속한 단층대는 두께 3m로 단층점토 성분 70%와 단층각력성분 30% 정도가 혼재하여 분포되어 있으며, 그 하부는 파쇄상태의 연암층이 연속해 분포되어 있다. <표 1>은 시추공에 대한 하부단층대의 시추공전단시험 결과로서 단층의 공학적 특성인 점착력이 0.50~4.07 ton/m²이고 내¹¹부마찰각은 0.60~32.17° 인 비교적 취약한 지층으로 나타났다.

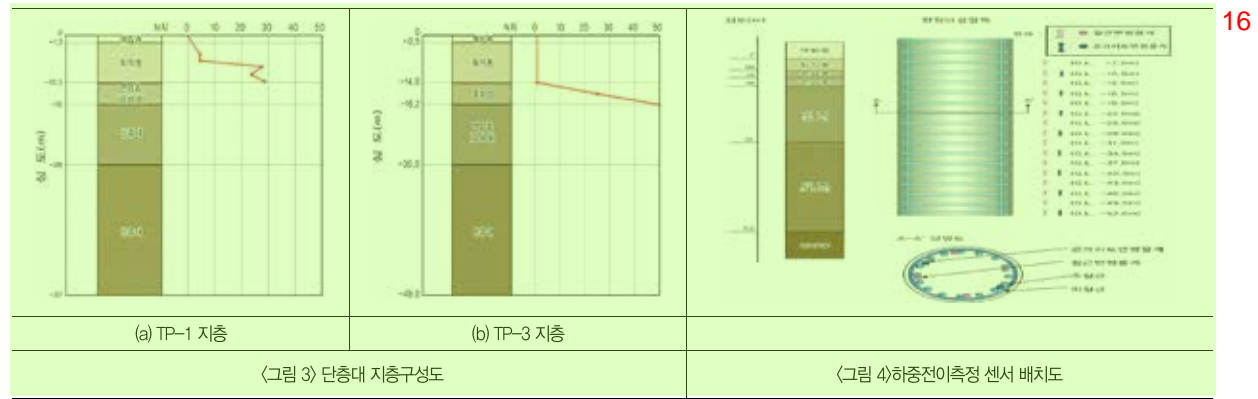
<표 1> 시추공 전단시험 결과¹¹

시험내용	심도(m)	지층분류	점착력 C(ton/m ²)	내부마찰각 ϕ(°)	N 치(회/cm)	비 고
BB-24	26.0	단층점토	4.07	32.17	50/14	
BB-102	19.5	단층점토	2.60	21.30	50/29	불교란
			3.10	0.60	50/29	교란
	25.0	단층점토	0.50	19.3	—	불교란

2.2 시험시공말뚝 설치¹³

말뚝기초의 극한지지력을 확인하기 위해서는 설계 시에 현장의 시험시공말뚝에 대해 재하시험을 시행하여 적용토록 하였으나, 대부¹⁴분이 시공단계에서 시행하고 있다. 본 사례에서도 시공단계에서 지지력을 확인하도록 되어 있어 <그림 3>의 단층대 지층에 2개의 현장 타설 시험말뚝에 재하시험을 시행하였다.

시험 말뚝은 직경이 1.2m, 길이는 각각 53m와 48m인 2개의 말뚝(TP-1, TP-3)을 설치하였다. 말뚝기초의 변위량 측정을 위해¹⁵ <그림 4>와 같이 철근망에 철근변형률계 및 콘크리트응력계를 부착하여 현장타설말뚝 기초를 시공하였다.



3. 말뚝재하시험 개요¹⁷

3.1 정재하시험 결과 허용지지력 분석¹⁸

재하시험은 ASTM D1143-81(1994) 규정에 따라 하중재하 단계별로 시험최대하중까지 재하하여 극한지지력을 측정하고 이를 분¹⁹석하여 지지력을 산정하였다.

재하시험 결과는 하중-침하-시간 곡선을 이용하여 해석하였으며, 허용지지력은 시험말뚝에 대한 시험최대하중에서 극한하중²⁰에 대응하는 극한전침하량인 25.4mm를 기준으로하고, 극한잔류침하량 12.7mm인 때의 하중을 극한하중으로 하여 최대시험하중에 대해 안전율 2.0을 적용하여 산정하였다.

말뚝기초에 적용할 설계허용지지력과 극한지지력을 확인하기 위해 하중재하단계별 설계하중, 설계하중의 2배 및 최대시험하중을²¹ 재하하여 <표 2>의 결과를 얻었다.



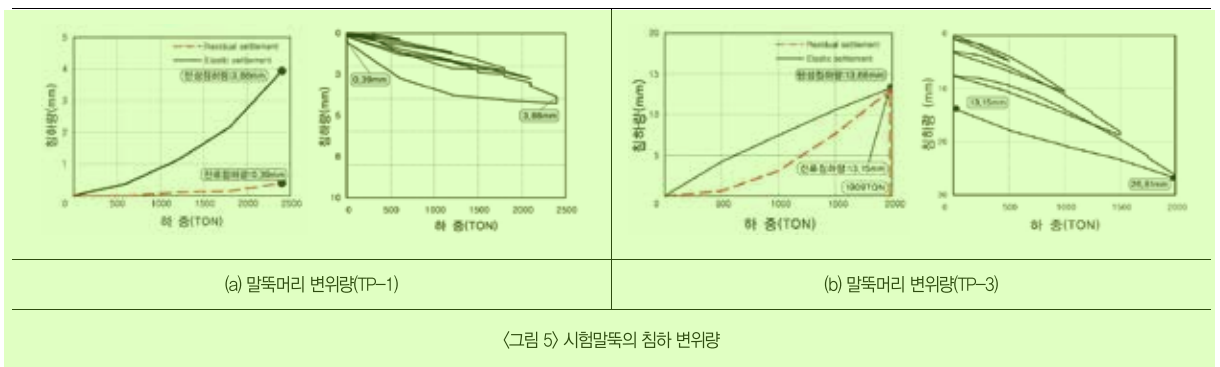
우재경

(주)제일엔지니어링종합건축사사무소 부사장⁴

〈표 2〉 재하하중에 따른 말뚝머리 변위량 측정 결과 1

말뚝위치	설계허용 지지력(tonf)	최대시험하중 (tonf)	재하하중별 말뚝머리 변위(mm)				
			설계하중 시	설계2배 시	최대시험하중 시		
					전침하량	탄성침하량	잔류침하량
TP-1	332.3	2,400	0.06	0.45	4.27	3.88	0.39
TP-3	288.7	2,000	2.55	5.42	26.81	13.66	13.15

〈그림 5〉는 재하시험 결과를 하중 - 침하량 관계 곡선으로 나타낸 것으로 두개의 말뚝 재하시험 결과 TP-1은 전침하량이 4.27mm로 시험최대하중까지 탄성거동을 하며, 탄성침하량 3.88mm를 뺀 잔류침하량은 0.39 mm로 극한하중에 도달할 수 없었다. 따라서 TP-1은 잔류침하량 규정치인 12.7mm인 때의 시험최대하중 2,400ton을 항복하중으로 하여 안전율 2.0을 적용하면 말뚝의 허용지지력은 1,200ton이다. TP-3은 전침하량이 26.81 mm이고 잔류침하량은 13.15mm로써 이에 해당하는 하중은 1,909ton에서 탄성거동을 나타내므로 안전율 2.0을 적용하면 허용지지력은 954ton이다.

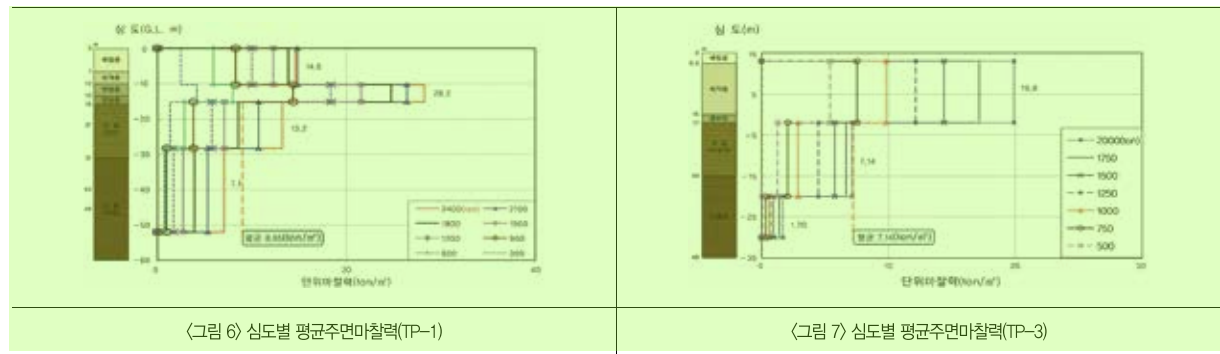


3.2 하중전이 시험 5

말뚝기초와 주변 흙 사이에 발생하는 마찰력은 응력-변위-시간의 특성, 말뚝-흙 시스템 내 모든 요소의 파괴 특성, 그리고 말뚝의 설치방법 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, 지층별 마찰응력은 아래 식 (1)과 같이 산정될 수 있다(Vesic, 1977).

$$f_{si} = \Delta Q_{si} / \pi \cdot D \cdot \Delta L_i \quad (1)$$

시험시공 말뚝에 TP-1은 시험최대하중 2,400tonf, TP-3은 시험최대하중 2,000tonf까지 재하단계별 하중전이 시험을 하여 각 심도별로 설치한 변형률계에 측정된 데이터로 심도별 평균주면마찰력 산정결과를 아래 〈그림 6〉 및 〈그림 7〉에 도시하였다.



하중전이시험 시 단층 점토층까지 전달된 하중은 설계 시 말뚝 허용지지력 332.3 tonf의 안전율 3배에 해당하는 극한지지력 996 tonf 이상이 발휘된 것으로 평가되었다. 따라서 〈표 3〉 및 〈표 4〉에서와 같이 시험구간 TP-1의 퇴적층 평균주면마찰력은 2.62 tonf/m²이고, 단층점토의 평균주면마찰력은 7.14~8.65 tonf/m²로 산정되었다.

〈표 3〉 재하시험 측정결과 (TP-1) 11

심도(m)	평균마찰력(tonf/m²)	하중전이(tonf)	분포지층
0~7	2.62	2,330	퇴적층>N30
10	42.73	1,850	
13	13.15	1,700	
16	32.00	1,340	연암 파쇄대
25	8.65	1,040	단층점토
31	28.83	390	단층각력
40	2.00	320	
52	3.19~7.97	290~60	

〈표 4〉 재하시험 측정결과(TP-3) 12

심도(m)	평균마찰력(tonf/m²)	하중전이(tonf)	지층분포
0~8	8~19	2,000	퇴적층<N10
14	24~31	1,450	퇴적층<N50
20	7.14	550	단층대
32	1.70	80	

3.3 하중전이시험 결과 적용 주면마찰력 14

시험구간인 단층대에서 2개의 시험말뚝에 대해 측정한 평균 단위주면마찰력과 문헌에 나타난 타 지역 단층대 지층에 대해 측정한 주면마찰력 값은 아래 〈표 5〉와 같다.

〈표 5〉 유사지층 단위주면마찰력 (남향대교 : 정창규 등 2004) 16

구 분	시험위치	말뚝제원	재하하중(tonf)	지층두께(m)	단위마찰력(tonf/m²)	시험조건
A대교	TP-1	현장타설	2,400	9	8.65	시공단계시험 단층대 지반
	TP-3	말뚝	2,000	18	7.14	
남향 대교	P16	강관말뚝 (Ø508mm)	800	4	약 6~12	설계단계시험 선단지지층 보강
	P17		750	13.3	약 8.80	

단층점토의 주면마찰력은 설계 시 4.37tonf/m²로 적용하였으나, 재하시험 결과 지층별 평균 주면마찰력은 〈표 6〉과 같이 7.14 tonf/m²과 8.65tonf/m²로써 실제로 측정 결과 값과는 많은 차이가 있어 이를 분석하여 적절한 지지력 값을 반영하여야 필요가 있다.

〈표 6〉 설계 시와 재하시험 결과 평균주면마찰력 19

지 층 별	설계 시(tonf/m²)	재하시험 결과(tonf/m²)
사질토	6.91~8.44	2.62~19.90
단층파쇄대(각력층)	13.10	13.15~32.0
단층점토	4.37	7.14 / 8.65

4. 재하시험 결과 적용지지력 21

4.1 원 설계와 재하시험 결과 지지력 분석 22

본 사례구간은 단층대 지층에 현장타설말뚝 기초가 설치되나, 설계 시 시험말뚝에 대한 재하시험을 수행하지 않고 지반조사 결과 지층특성에 따른 지지력을 반영하여 AASHTO(1986), 일본도로교시방서(일본도로협회, 2002) 및 Hunt의 문헌식에 의해 말뚝지지력을 산정하여 설계하였다.

이를 본 공사 시 기초 근접지점에 시험시공말뚝을 설치해 하중전이 시험을 병행한 재하시험 결과를 문헌식에 반영하여 지지력을 재산정한 결과 Hunt식 값이 가장 보수적으로 나타났다. 이를 재하시험 결과 지지력과 비교하여 적정성을 검토한 후 말뚝제원을 조정하여 시공하고 본 말뚝에 대해서도 검증재하시험을 실시하여 안전성을 확인하고, 그 결과를 <표 7>에 나타내었다.

<표 7> 당초설계와 재하시험 결과 지지력 비교

교각 위치	말뚝 길이(m)	말뚝머리 최대작용력	설계 시 산정 지지력(TON)			시험 결과 지지력	본말뚝 지지력	비 고
			AASHTO	일본 도로교	Hunt			
MP-12	43	276	608.6	837.7	218.3	433.83	400이상	단층점토
MP-13	37	372	400.1	457.8	297.2	581.63	374이상	연암파쇄대
DP-6	41.5	229	529.9	651.5	189.8	375.7	367이상	단층점토
F1A-1	42	213	484.8	588.6	185.8	233.44	250이상	단층점토
F1A-2	45	228	438.7	596.7	207.9	284.4	250이상	단층점토
GP-8	50	235	545.9	636.1	194.8	300.74	250이상	단층점토

4.2 대표교각(MP-12)지지력 적용사례

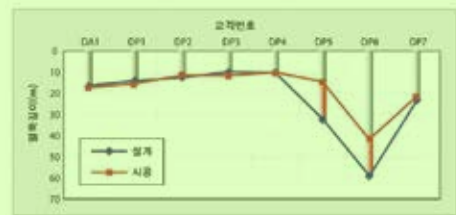
<그림 8>은 대표적인 교각 MP-12에 대해 설계 시 말뚝기초 지지력과 재하시험 결과를 반영한 지지력을 당초설계와 비교하였다. 재하시험 결과 사질토층의 주면 단위마찰력은 2.62ton/m², 단층대 주면단위마찰력은 8.65ton/m²로 산정된 값을 반영하여 말뚝제원을 조정한 결과, <표 8>에서와 같이 당초 설계 시 적용한 말뚝 1본 길이 54m가 43m로 조정되어 MP-12 교각 1개소에서 말뚝 길이를 총 231m 감소시킬 수 있었다.

<그림 8> 재하시험 반영 결과(MP-12)		<표 8> 말뚝길이 조정결과			
		시행단계 말뚝제원	설계 시	시험반영	증, 감
		말뚝설치 수량(본)	21	21	-
		본당 말뚝길이(m)	54 (총 1,136m)	43 (총 905m)	(-) 11 (총 231m)
		주면마찰력(ton/m ²)	4.37	8.65	(+)4.28
		허용지지력(ton)	332.3	334.4	(+)2.10
		총 지지력(ton)	6,978.3	7,022.4	(+)44.10

4.3 재하시험 결과 말뚝기초의 안정성 및 경제성

본 사례구간인 단층대 지층에 시험말뚝을 설치하고 재하시험을 수행하여 실측된 선단지지력 및 심도별 주면단위마찰력 적용의 적정성에 대해 토질분야 기술자와 현장의 공사관계자들이 재하시험 결과 및 지반여건 등을 고려한 적정 값으로 말뚝제원을 검토하여 말뚝기초를 시공한 후 재하시험을 실시하여 지지력을 확인하였다.

이처럼 재하시험을 시행함으로써 사전에 지층별 지지력 및 침하량을 정확하게 파악할 수 있어서 <그림 9>에 나타낸 것과 같이 지지력이 충분한 기초는 말뚝길이를 줄였고, 지지력이 부족한 곳은 말뚝길이를 연장하여 구조물의 안정성을 확보하였다. 그 결과 <그림 10>에서와 같이 총 29개의 교각에서 총 681m의 말뚝길이를 줄일 수 있었다.



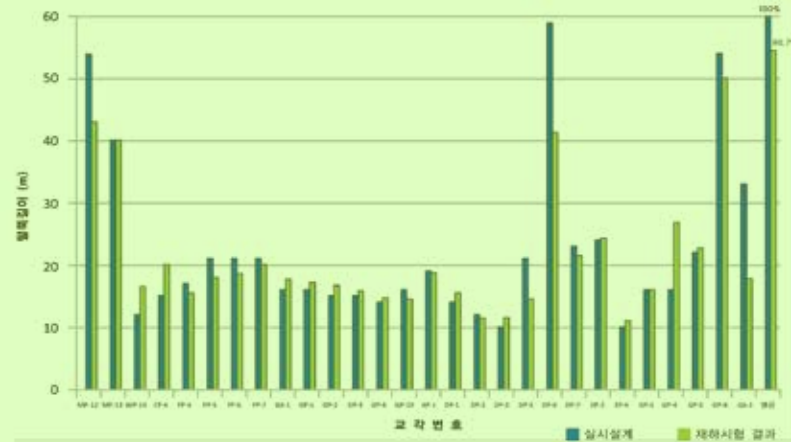
(a) D-Line 교각



(b) G-Line 교각

* 말뚝길이 축소시공구간 : 경제성 확보, * 말뚝길이 연장시공구간 : 안정성 확보

<그림 9> 말뚝제원 조정 시공결과



<그림 10> 전체교각 말뚝제원 조정 결과

5. 결론

한강의 단층파쇄대가 발달한 지층에 교량의 말뚝기초 시공을 위해 대규모 현장타설 시험시공말뚝을 설치하고 정재하시험을 실시하여 극한지지력 확인하였다. 또한, 하중전이시험을 병행하여 말뚝의 지층별 주면마찰력을 측정하고, 설계 시 적용한 문헌식 값과 재하시험 결과를 기존의 유사한 단층대의 주면마찰력을 참고하여 검토한 적정 값으로 말뚝제원을 변경하여 시공한 결과 말뚝기초의 안정성과 경제성을 기할 수 있었다.

따라서, 일정규모 이상의 공사 시 말뚝기초의 설계 시나 시공 초기에는 시험시공 말뚝을 설치하고 압축재하시험을 실시하여 지형 특성에 맞는 축방향 극한압축지지력으로 설계하고, 시공 후에는 재하시험 결과를 반영하여 말뚝제원을 조정하여 시공함이 타당하다. ^{카셈}

※ 외부 필진의 글은 본지 편집 방향과 다를 수도 있습니다.