

말뚝기초의 적정 지지력 확보 방안

– 말뚝기초 재하시험 결과 활용 사례를 중심으로 –

1. 서론

교량의 기초는 상부구조물의 하중을 지반에 전달하는 하부구조로서 외부하중에 대해 말뚝기초 주변의 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 검토하고, 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 설치

2.1 지반 현황

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



<그림 1> 사례지역 지층 탄성파 탐사 현황



<그림 2> 단층대 지층 특성(MB-77)

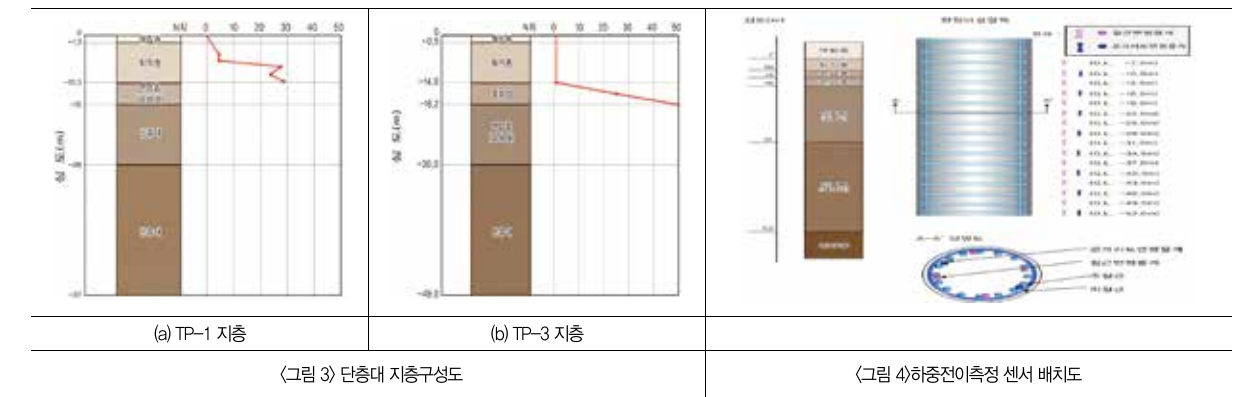
지반조사 및 분석 결과 본 지역 지반은 <그림 2>에 나타난 바와 같이 12~14m 두께의 퇴적층이 최상부에 분포하고 있다. 그 아래는 단층대로서 상부층은 두께가 19.5m로 단층각력 30%와 단층 점토 70%가 혼입된 지층이며, 하부연속한 단층대는 두께 3m로 단층점토 성분 70%와 단층각력성분 30% 정도가 혼재하여 분포되어 있으며, 그 하부는 파쇄상태의 연암층이 연속해 분포되어 있다. <표 1>은 시추공에 대한 하부단층대의 시추공전단시험 결과로서 단층의 공학적 특성인 점착력이 0.50~4.07 ton/m²이고 내부마찰각은 0.60~32.17°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

〈표 1〉 시추공 전단시험 결과						
시험내용	심도(m)	지층분류	점착력 C(ton/m ²)	내부마찰각φ(°)	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 설치

말뚝기초의 극한지지력을 확인하기 위해서는 설계 시에 현장의 시험시공말뚝에 대해 재하시험을 시행하여 적용토록 하였으나, 대부분이 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 위해 <그림 4>와 같이 철근망에 철근변형률계 및 콘크리트응력계를 부착하여 현장타설말뚝 기초를 시공하였다.



3. 말뚝재하시험 개요

3.1 정재하시험 결과 허용지지력 분석

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

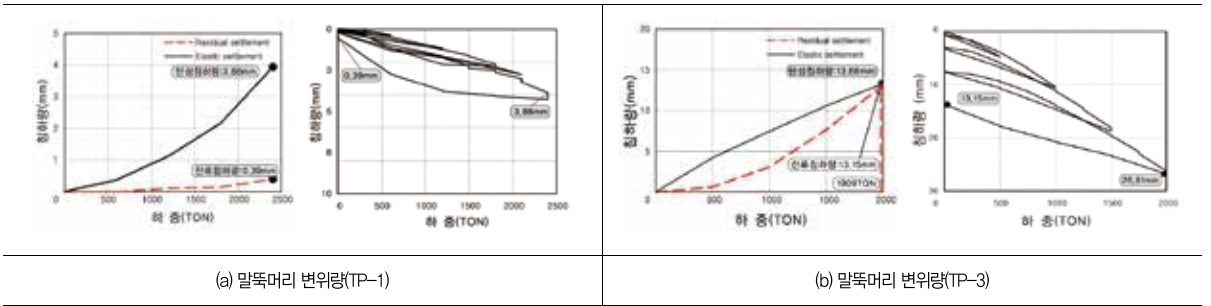
재하시험 결과는 하중-침하-시간 곡선을 이용하여 해석하였으며, 허용지지력은 시험말뚝에 대한 시험최대하중에서 극한하중에 대응하는 극한전침하량인 25.4mm를 기준으로하고, 극한잔류침하량 12.7mm인 때의 하중을 극한하중으로 하여 최대시험하중에 대해 안전율 2.0을 적용하여 산정하였다.

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

〈표 2〉재하하중에 따른 말뚝머리 변위량 측정 결과

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 하중은1,909ton에서 탄성거동을 나타내므로 안전율 2.0을 적용하면 허용지지력은 954ton이다.



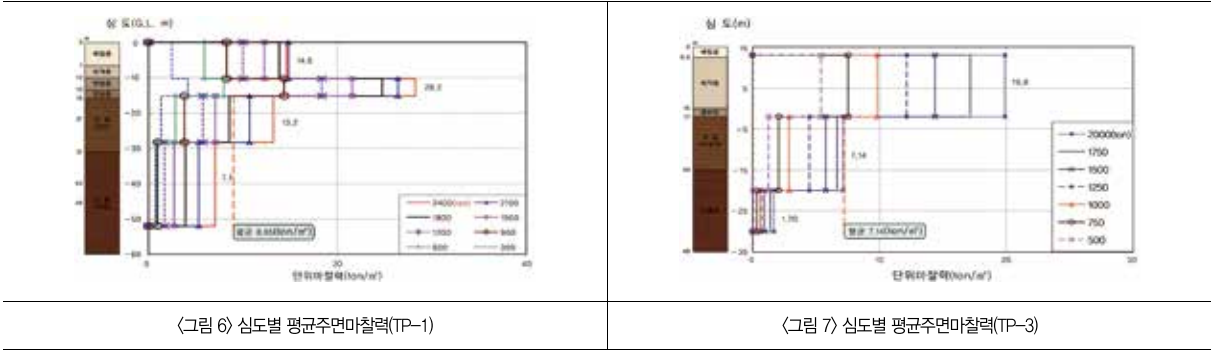
〈그림 5〉시험말뚝의 침하 변위량

3.2 하중전이 시험

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)				〈표 4〉 재하시험 측정결과(TP-3)			
심도(m)	평균마찰력(tonf/m²)	하중전이(tonf)	분포지층	심도(m)	평균마찰력(tonf/m²)	하중전이(tonf)	지층분포
0~7	2.62	2,330	퇴적층>N30	0~8	8~19	2,000	퇴적층<N10
10	42.73	1,850		연암 파쇄대	14	24~31	1,450
13	13.15	1,700	단층점토		20	7.14	550
16	32.00	1,340		단층각력	32	1.70	80
25	8.65	1,040					
31	28.83	390					
40	2.00	320					
52	3.19~7.97	290~60					

3.3 하중전이시험 결과 적용 주면마찰력

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)						
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		
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

4.1 원 설계와 재하시험 결과 지지력 분석

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.

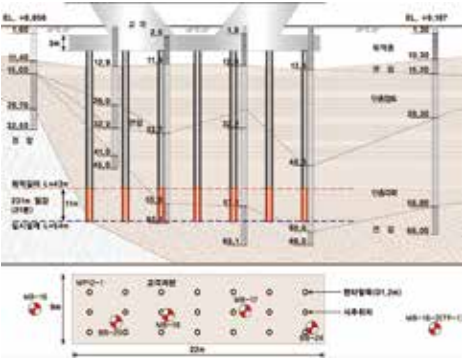
<표 7> 당초설계와 재하시험 결과 지지력 비교

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)



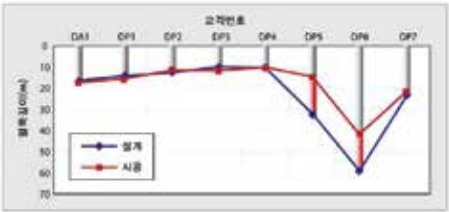
<표 8> 말뚝길이 조정결과

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/m²)	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

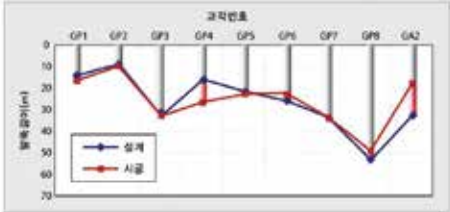
4.3 재하시험 결과 말뚝기초의 안정성 및 경제성

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.



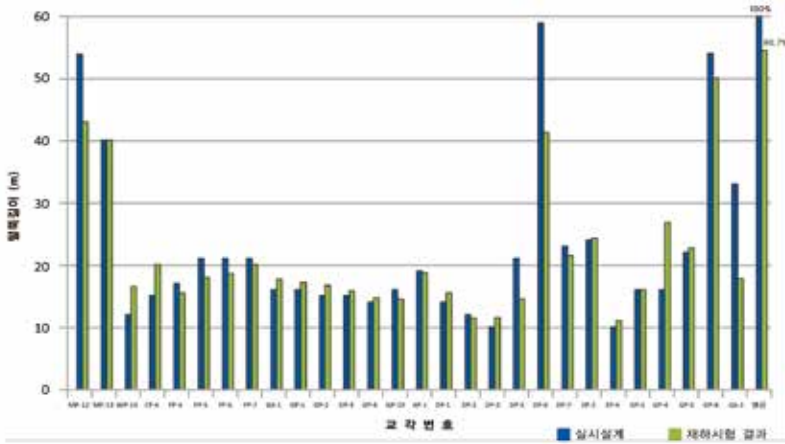
(a) D-Line 교각



(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.