

자갈층에 근입된 대구경 현장타설말뚝의 지지능력 확인을 위한 양방향 재하시험 적용사례

A Case Study on Application of Bi-directional Pile Load Test for verifying the Bearing Capacity of a Large-diameter Drilled Shaft Pile

이민희¹⁾, MinHee, Lee, 정성민²⁾, SungMin, Jung, 김상일³⁾, SangIl, Kim, 최용규⁴⁾, Yongkyu, Choi

1) 경성대학교 건설·환경공학부 겸임교수, Adjunct Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung Univ

2) 경성대학교 공학기술연구소 연구원, 공학석사, Master, Researcher, Research Institute of Engineering & Technology, Kyungsung Univ.

3) 한국양방향 말뚝재하시험협회 사무국장

4) 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Kyungsung Univ.

SYNOPSIS : In this study, multi-level bi-direction pile load tests for drilled shaft pile socketed into the gravel were performed. The lower and upper bi-direction load test assemblies were located on tip of pile and 15m above the tip of pile. Based on the results of pile load test, it was analyzed bearing capacity of gravel, skin friction of upper soils and skin friction of lower soils. It was confirmed that drilled shaft socketed into the gravel had enough bearing capacity.

Key words : Bi-direction load test, Gravel, Bearing capacity, Multi-level load test

1. 서 론

말뚝정재하시험은 일종의 실물시험으로 말뚝에 실하중을 가하여 실제 상부구조물이 건설되었을 때를 재현하므로 신뢰도가 높다는 장점이 있으나, 하중재하를 위한 사하중 및 반력 시스템 설치시 넓은 시험 부지와 공기가 필요하며, 현장조건의 제약을 많이 받으며 특히 재하용량의 한계를 극복하는 것은 쉽지 않다. 반면, 양방향 말뚝재하시험은 일반적으로 말뚝의 선단부에 복수 유압잭(Jack) 또는 셀(Cell)을 말뚝 시공시 설치하여 하중재하 수단으로 사용하므로, 사하중 및 반력 시스템이 따로 필요치 않고 좁은 공간에서도 시험이 가능하다. 특히, 큰 재하용량이 필요한 경우나 해상부와 같은 난해한 현장조건의 경우 특히 효과적으로 적용 가능할 수 있는 장점이 있다.

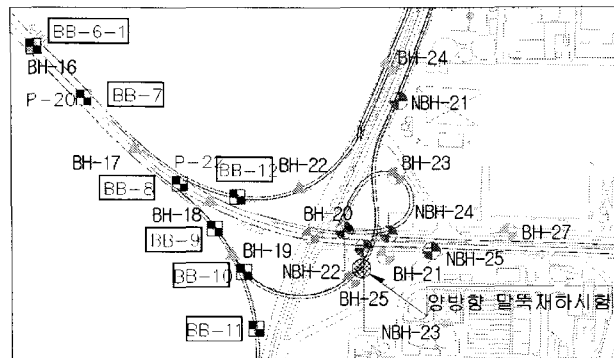
본 연구에서는 말뚝 선단조건이 자갈층인 현장타설말뚝에 양방향 재하장치를 2개소(선단부 1개소, 중간부 1개소)에 설치하여 복수레벨(Multi-Level) 현장재하시험을 수행하였다.

2. 지층 개요 및 시험말뚝 제원

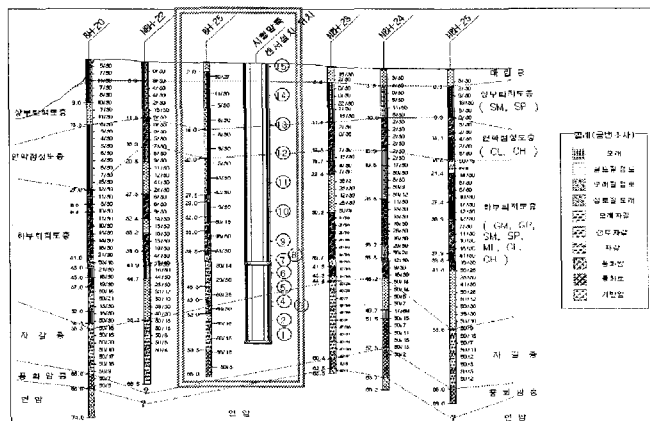
본 현장의 지반조건은 그림 1과 같이 상부퇴적토층(SM, SP)은 0~14m(N치 : 1/30~50/27), 연약점성토층(CL, CH)은 5.4~13.5m(N치 : 0/30~9/30), 하부퇴적토층(GM, GP, SM, SP, ML, CL, CH)은 26.3~36.3m(N치 : 2/30~50/9), 자갈층은 6~16m(N치 : 39/30~50/2), 풍화암, 연암의 순서로 분포하는 것으로 조사되었다(명지대학교주식회사, 2005). 시험용말뚝은 BH-25 시추공 부근에 58m의 길이로 시공하였으며 말뚝선단을 모래질 자갈층에 위치시켰다. 선단부 자갈층에 대한 선단지지력을 확인하기 위하여 선단부에 양방향 말뚝재하장치(일방향 재하용량 : 12.0 MN)를 설치하였으며, 상부 양방향 말뚝재하장치(일방향 재하용량 : 24.0 MN)를 말뚝선단에서 약 15m 위치에 설치하였다. 상부 재하장치의 설치시 도로교설계기준 해설(하부구조편)(2001)에서 제시하고 있는 현장타설말뚝에 대한 지지력 산정방법중 N치를 이용하는 지지력산정 방법(일본도로교시방서 방법)을 적용하여 상향지지력(18.6 MN)과 하향지지력(18.0 MN)이 비슷한 위치를 결정하여 양방향 말뚝재하장치를 설치하도록 하였다. 본 시험말뚝의 개요를 표 2.1에 나타내었다.

표 1. 시험말뚝 개요

시험말뚝 번호	말뚝형식	시험말뚝제원		최대시험하중(MN)		추정설계하중(kN)	재하방법
		직경(mm)	길이(m)	하부	상부		
TP1	현장타설말뚝	1,500	58	8.25	20.63	8.84	양방향 말뚝재하



(a) 양방향 말뚝재하시험의 위치 및 시험조사위치



(b) 지층분포 및 시험말뚝의 센서배치

그림 1. 시험위치 및 지층분포

3. 시험말뚝의 시공 절차

3.1 축하중 계속용 센서의 설치

본 시험말뚝에는 15개소에 축하중 측정용 센서를 설치하였다. 여기서, 1~4, 7~15단면에는 철근용 센서와 시스터바를 각각 4방향으로 설치하고, 5, 6 단면에서는 시스터바 만을 4방향으로 설치하였다. 철근용 센서는 철근망 조립전에 4개의 주철근을 준비하여 현장에서 철근의 요철부분을 제거하고 변형률센서부착하고 방수처리를 하였다. 센서가 부착된 주철근을 철근망 조립시 직각방향으로 설치하여 조립하였다. 시스터바는 현장에서 사용되는 주철근을 길이 약 90cm로 절단하여 공장에서 센서부착부분을 가공하여 실내에서 센서를 부착하고 방수처리를 하였다.

3.2 시험말뚝의 시공절차

자갈층 소켓 현장타설말뚝의 시공과정은 일반적인 풍화암 또는 연암 소켓 현장타설말뚝의 시공과정과 유사하나, 콘크리트의 타설시 철근망이 자중에 의해서 굴착심도 아래로 관입되는 것을 막는 방법과 굴착공내 슬라임의 발생 막기 위한 방법을 들에 특히 큰 차이가 있다. 따라서, 자갈층에 소켓되는 시험말뚝의 시공과정을 자세히 설명하였다.

- 1) 시험말뚝의 시공공법은 요동식 올케이싱 공법으로 케이싱을 오실레이터로 선굴진 시키고 헤머그램으로 내부 토사를 굴착하였다. GL. -58 m까지 굴착하고 공내 혼탁액에 포함되어 있는 슬라임의 침전을 막기 위하여 굴착공내의 혼탁수를 깨끗한 순환수로 순환하였다.
- 2) 철근망을 굴착공내에 설치하기 전까지 계속해서 공내수위를 지하수위보다 약 2m이상 높게 유지하였다. 이는 케이싱의 선단부 지반(자갈층)이 공내수위가 지하수위보다 낮으면 보링현상이 발생할 수 있기 때문이며, 본 현장에서는 소수의 말뚝에서 선단부가 연약화된 사례가 있었으므로 특히 이점에 유의하여 시험시공 하였다.
- 3) 축하중 시험용 센서는 철근망에 철근용 센서와 콘크리트용 시스터바를 각각 설치하였다. 이때, 철근용 센서는 철근망 조립이전에 주철근의 적정위치에 센서를 부착하여 방수처리 하였으며, 콘크리트용 시스터바는 철근망이 모두 제작된 후 적정위치에 설치하였다.
- 4) 하부 양방향 말뚝재하장치에 첫 번째 철근망을 조립(그림 2 (a) 참조)하고 굴착공내에 철근망과 양방향 말뚝재하장치를 근입시키면서 주철근을 따라 하부 재하장치의 유압호스를 고정하였으며(그림 2 (b) 참조), 첫 번째 철근망의 근입이 완료된 후 케이싱에 철근망을 거치시키고 상부 재하장치를 조립하였다(그림 2 (c) 참조).
- 5) 상부 재하장치의 조립 후 두 번째 철근망을 상부 재하장치의 상판에 조립하였으며, 상부 재하장치의 팽창에 의한 상부재하장치 하부의 전선과 유압호스의 파손을 막기 위하여 보호처리 하였다.
- 6) 상부 재하장치와 철근망의 조립이 완료된 후 철근망을 굴착공내에 계속 근입 시키면서 하중전이 측정용센서의 전선과 가압용 유압호스를 철근망 외부에 고정하였다.
- 7) 최상부의 철근망까지 근입하고 상·하부 재하장치와 연결되어 있는 변위봉 보호용 케이싱에 전선 및 유압호스를 고정하여 콘크리트타설 및 케이싱의 인발 작업에 영향을 미치지 않도록 하였다(그림 2 (d) 참조).
- 8) 최종 철근망을 안착시키기 전 케이싱의 높이와 굴착심도를 다시 확인하고 철근망이 계획심도 보다 자갈층으로 근입되지 않도록 철근망의 최상부를 케이싱에 고정하였다(그림 2 (e) 참조).
- 9) 콘크리트타설시 우선 콘크리트를 약 40m 타설하고 1차 케이싱(약 24 m)을 인발하였다. 케이싱인발이 완료된 후 다시 철근망의 높이를 확인하고 케이싱에 고정한 후 콘크리트를 타설하였다.
- 10) 약 1m³의 레미콘이 케이싱 외부로 흘러 넘칠때 까지 2차로 콘크리트를 타설하고 나머지 케이싱을 전부 인발하였다(그림 2 (f), (g) 참조).

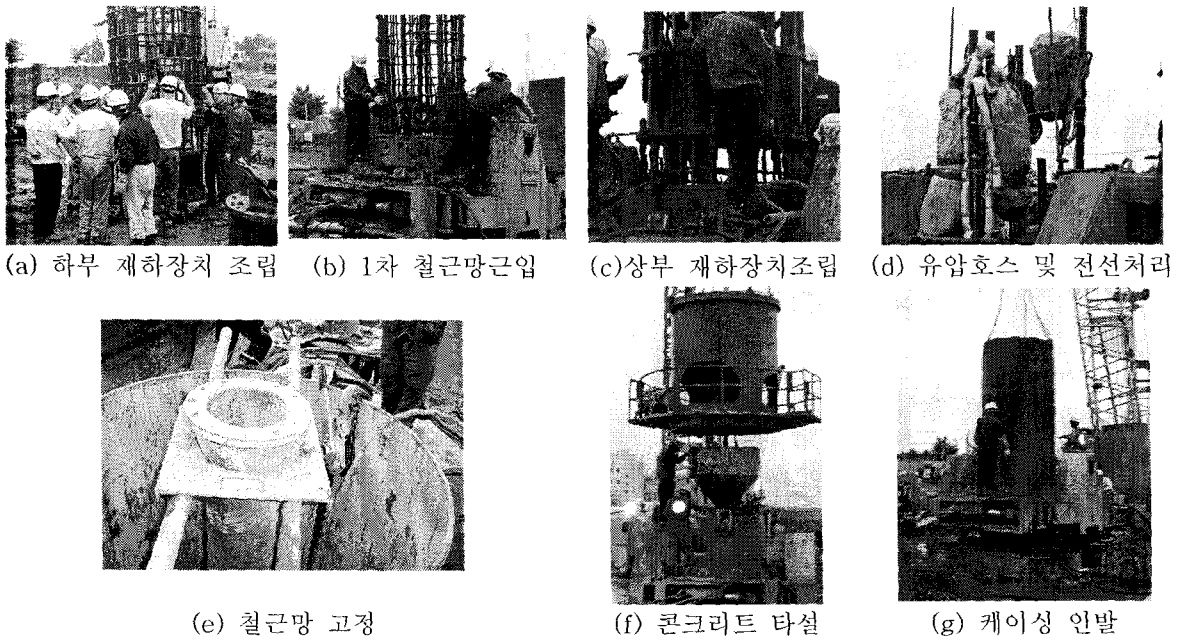


그림 2. 시험말뚝의 시공과정

4. 양방향 말뚝재하시험 및 하중전이 측정

먼저 하부 양방향 말뚝재하 시험을 수행하고 시험종료 후 하부재하장치의 벨브를 열어 놓고 상부 양방향 재하시험을 수행하였다. 시험시 시험방법은 ASTM D1143-81(Reapproved by 1994)에서 규정하고 있는 완속재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태로 정재하시험을 실시하였다. 표 2에 각 재하주기별 재하하중단계를 나타내었다. 하중전이 측정은 각 재하주기별 재하하중단계에서 심도별 변형을 데이터로그를 통하여 측정하였다. 또한, 각 하중단계별 변위계(LVDT)를 통하여 계측하였다. 실제시험은 자동화 측정시스템을 통하여 각 하중단계의 말뚝두부 변위, 상·하부 재하장치의 상판 및 하판 변위와 각 부재별 심도별 변형을 데이터를 동시에 확인하면서 하중을 제어하였다.

표 2. 양방향 재하시험에서 하중재하 주기별 재하단계

구분	주 기	1방향 재하하중 (MN)
하부	①	0 → 0.5 → 0.75 → 1.0 → 1.15 → 1.30 → 1.50 → 1.15 → 0.5 → 0 → Next
	②	0 → 0.75 → 1.50 → 1.88 → 2.25 → 2.63 → 3.00 → 2.25 → 1.15 → 0 → Next
	③	0 → 1.50 → 2.25 → 3.00 → 3.50 → 4.00 → 5.00 → 3.00 → 1.50 → 0 → Next
	④	0 → 1.50 → 3.00 → 4.00 → 5.00 → 5.50 → 6.00 → 4.00 → 2.25 → 0 → Next
	⑤	0 → 1.50 → 3.00 → 5.00 → 6.00 → 6.75 → 7.50 → 4.00 → 2.25 → 0 → Next
	⑥	0 → 3.00 → 6.00 → 7.50 → 8.00 → 8.25 → 6.75 → 3.00 → 0 → Next
상부	①	0 → 1.88 → 3.75 → 1.88 → 0 → Next
	②	0 → 3.75 → 5.63 → 7.50 → 5.625 → 0 → Next
	③	0 → 7.50 → 9.38 → 10.31 → 11.25 → 9.38 → 7.50 → 0 → Next
	④	0 → 7.50 → 11.25 → 13.13 → 14.06 → 15.00 → 13.13 → 7.50 → 0 → Next
	⑤	0 → 7.50 → 15.00 → 15.94 → 16.88 → 17.81 → 18.75 → 17.81 → 15.94 → 7.50 → 0 → Next
	⑥	0 → 7.50 → 15.00 → 16.88 → 18.75 → 20.63 → 16.88 → 7.50 → 0 → Next

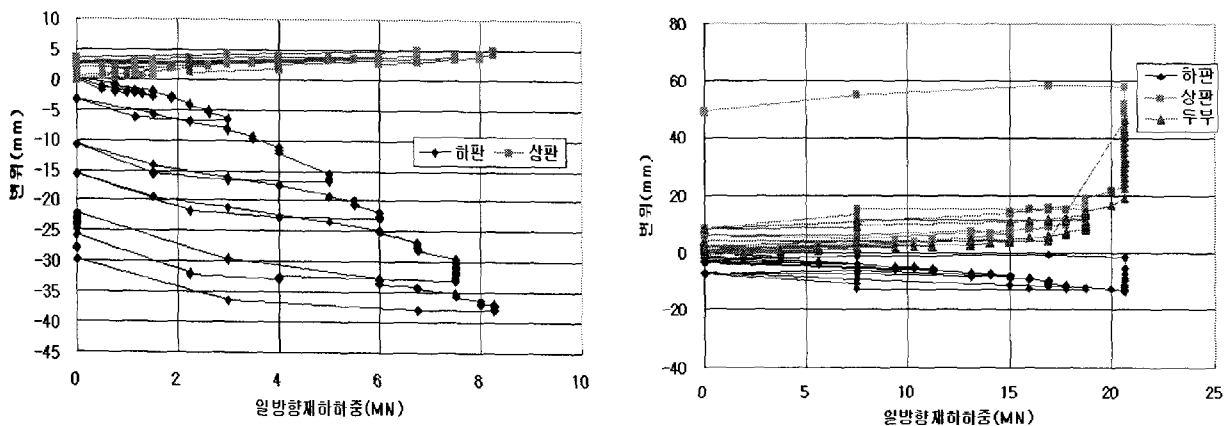
5. 양방향 말뚝재하시험과 하중전이시험의 결과 및 분석

5.1 양방향 말뚝재하시험 결과

양방향 말뚝재하시험을 선단부 재하장치에서 먼저 수행하여 그림 3 (a)의 하중-변위 관계가 나타났으며, 2차로 상부 재하장치의 시험을 실시하여 그림 3(b)의 하중 - 변위 관계를 얻을 수 있었다. 하부 양방향 말뚝재하시험시 시험최대하중 8.25 MN에서 상판 변위는 4.66mm, 하판 변위는 37.96mm로 나타났다. 그리고, 상부 양방향 말뚝재하시험시 시험최대하중 20.63 MN에서 하판변위 13.71mm, 상판 변위 57.68mm로 나타났다.

말뚝선단부 자갈층의 지지력을 확인하기 위하여 그림 3 (a)에서 하판의 하중 변위 곡선으로부터 P-S 곡선으로부터 허용침하량 25.4mm 기준으로 하여 허용지지력 하여 허용지지력을 6.36MN으로 구할 수 있었다.

상부 재하장치의 상부지반의 주면 마찰력과 하부 재하장치와 상부재하장치 사이 지반의 주면 마찰력은 그림 3 (b)의 그래프에서 P-S, S-log t 분석하였는데 상부지반의 극한마찰력은 20.63MN, 항복마찰력은 17.81MN으로 나타났고 하부지반에서는 극한 또는 항복마찰력이 나타나지 않아 최대시험하중 20.63MN을 최소항복지지력으로 하였다.



(a) 하부 양방향 재하시험의 일방향 재하하중-변위 (b) 상부 양방향 재하시험의 일방향 재하하중-변위

그림 3. 양방향 말뚝재하시험의 하중 - 변위

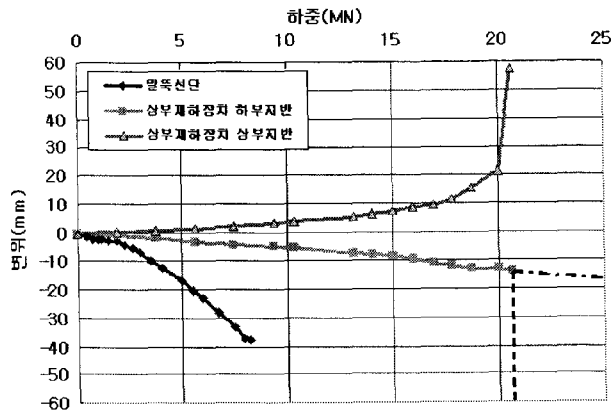
5.2 지지력 특성 분석

본 연구에서 하부와 상부에 양방향 재하장치를 설치하여 각각의 재하시험을 수행하였으며, 선단지반의 지지력과 상부 재하장치의 상/하부지반의 주면마찰력을 각각 분석하여 표 3에 나타내었다. 각각의 허용 지지력을 합하여 전체 허용지지력은 20.37 MN 으로 나타났다.

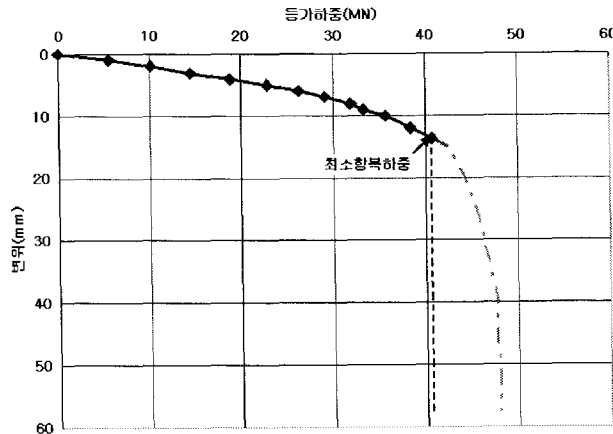
등가하중 - 변위 관계곡선을 작도하기 위하여 하부 재하장치의 하판변위, 상부 재하장치의 하판변위, 그리고 상부 재하장치의 상판변위를 일방향재하하중에 대하여 각각 그림 4(a)에 도시하였다. 그림 4(a)에서 상부재하장치의 상/하부지반의 실험결과를 토대로 임의 침하량에 대한 상부지반의 마찰력(상부말뚝체의 자중공제)과 하부지반의 마찰력을 합하여 등가하중을 찾고, 이 과정을 반복하여 그림 4 (b)와 같이 등가하중 - 침하량 관계 곡선을 도시할 수 있었다. 등가하중-변위 관계로부터 P-S, Log P-Log S 분석을 통하여 항복하중은 각각 42.44 MN, 43.00 MN으로 나타났다. 따라서, 안전율 2를 적용하여 본 시험말뚝의 허용지지력은 21.22 MN으로 나타났다.

표 3. 지지력 분석 결과

구분	최대 시험하중 (MN)	항복 또는 극한하중 (MN)		변위량 (mm)	적용안전율 (F.S)	허용 지지력	계산값 (일본도로교시방서)
선단지지력	8.25	항복하중	6.36	25.4	-	6.36	5.30
상부 지반 주면마찰력	20.63	항복하중	17.81	9.4	2.0	6.88	17.81
		극한하중	20.63	57.7	3.0		
하부 지반 주면마찰력	20.63	항복하중	20.62	13.7	2.0	10.31	12.71
계						23.55	
등가하중-변위 곡선	20.63	최소항복하중	40.67	13.7	2	20.34	



(a) 말뚝선단·하부지반·상부지반 변위 - 하중 관계



(b) 등가하중 - 변위 관계

그림 4. 하중 - 변위 관계

5.3 축하중전이 특성

그림 5는 하부 재하시험시 마찰력과 축하중 분포도를 도시한 것으로 시험하중 8.25MN 재하시 주면 마찰력은 중간 유압장치 설치 위치인 선단부에서 약 14m 구간내에서 마찰력이 크게 발휘되고 있었다. 그림 6은 상부 재하시험시 마찰력과 축하중 분포도를 나타내었다. 상부 재하시험시 그래프 양상을 보면 그림 6 (b)에서와 같이 두부재하 하중의 대부분이 주면 마찰력에 의해 지지되는 것으로 나타났으며 선

단부에는 약 16%의 하중만이 작용되는 것으로 나타났다. 말뚝머리작용하중 36.5MN에서의 각 지층별 평균마찰응력을 표 4에 요약하였다.

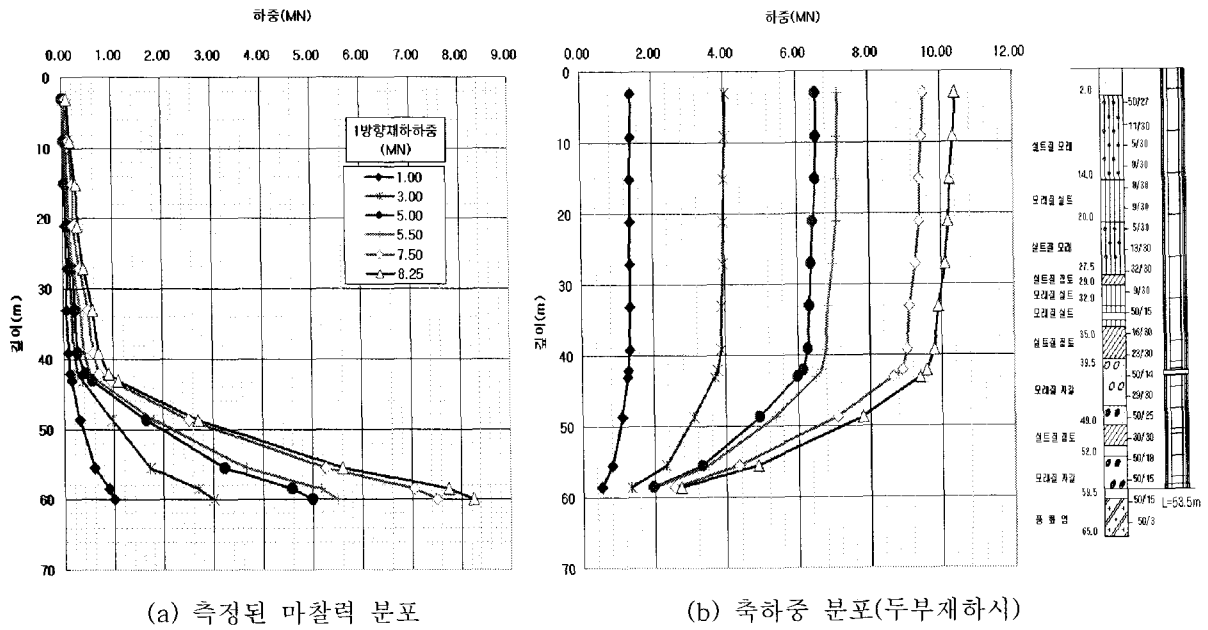


그림 5. 하부 양방향 말뚝제하시험에 의한 마찰력 및 축하중 분포

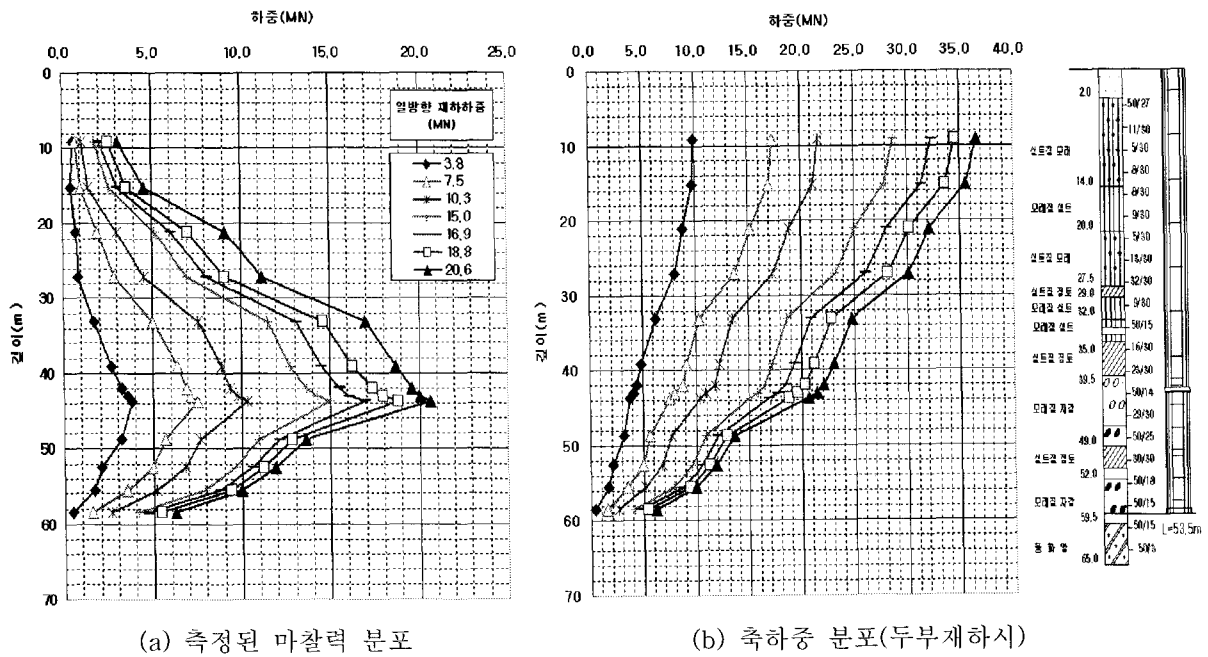


그림 6. 상부 양방향 말뚝제하시험에 의한 마찰력 및 축하중 분포

표 4. 말뚝머리하중 36.5MN에서 지층별 평균마찰응력 요약표(20.63MN 재하기준)

지층구분	평균마찰응력(kPa)	평균N치	심도(m)
실트질 모래	35.5	8	2 ~ 14
실트질 모래	72.2	20	20 ~ 27.5
모래질 실트	190.7	9	14~20, 29~35
실트질 점토	58.1	19	35 ~ 39.5
실트질 점토	115	30	49.0 ~ 52.0
모래질 자갈	262.2	50	39.5 ~ 49, 52~

6. 결론 및 제언

- 1) 자갈층 소켓 현장타설말뚝에 대한 국내 첫 시공사례를 소개하였으며, 자갈층 소켓말뚝에 대한 지지력을 양방향 재하시험을 통하여 검증하였다.
- 2) 하부의 양방향 재하시험을 통하여 자갈층의 선단지지력을 확인할 수 있었고 상부 양방향 재하시험을 통하여 재하장치 재하장치의 상/하부 지반의 주변마찰력을 확인할 수 있었다.
- 3) 하부의 양방향 재하시험을 통하여 자갈층(N치 : 50/15)의 선단지지력을 허용침하량 기준으로 결정하였으며, 자갈층의 주변마찰력을 분석하였다. 여기서, 자갈층의 허용선단지지력을 6.36MN으로 나타냈으며, 마찰지지력은 17.19MN으로 나타냈다.
- 4) 상부의 양방향 재하시험을 통하여 상부 양방향 재하장치의 상부지반의 마찰지지거동과 상부 재하장치와 하부 재하장치 사이의 마찰지지거동을 각각 확인할 수 있었다. 여기서, 상부 재하장치의 상부 지반의 극한지지력은 20.63MN(항복지지력 17.81MN), 상부 재하장치와 하부 재하장치 사이 지반의 최소항복지지력은 20.63MN으로 나타냈다.
- 4) 말뚝의 선단지지력과 상부 재하장치의 상부지반의 지지력, 그리고, 상부 재하장치와 하부재하장치 사이 지반의 지지력을 종합적으로 분석하여 등가하중-침하량 곡선을 작성하였으며, 이 관계곡선으로부터 두부재하시의 항복지지력과 허용지지력은 각각 42.44MN, 21.22MN으로 분석되었다.

참 고 문 헌

1. 명지대교 주식회사(2005), “ 명지대교건설 민간투자사업 토질조사보고서”, 2005. 1
2. 한국도로교통협회(2001), “도로교설계기준해설(하부구조편)”, 2001.
3. ASTM D1143-81(Reapproved by 1994) (1994). "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load."