

공벽유지용 유체에 따른 대구경 현장타설말뚝의 하중전이특성 Load Transfer Characteristics on Drilled Shafts by Hole Stability Fluids

임대성¹⁾, Dae-Sung Lim, 박성완²⁾, Seong-Wan Park, 박정환³⁾, Jung-Hwan Park, 오세훈⁴⁾, Se-Hun Oy

1) 삼보지질(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Technical Research Center, Sambo Tosfoc

2) 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

3) 삼보지질(주) 부사장, Executive Vice President, Sambo Tosfoc

4) 경남기업(주) 설계팀 과장, Manager, Design Team, KeangNam Enterprises, Ltd.

SYNOPSIS : In most drilled shafts construction sites, it is common, depending on the site condition, to use either water or slurry as fluids for maintaining stability of the holes, however, there are yet no design manuals by hole stability fluids. In this paper, in order to evaluate load transfer characteristics of the drilled shafts by hole stability fluids, two test piles are constructed over the soft ground of the lower *Busan Bay* based on the Bi-directional Pile Load Test. The test results showed that no ultimate states has found under the condition of applied loads with fresh water and slurry as hole fluids for drilled shafts. Then, the load transfer behavior were estimated with the data measured in fields and the effect of hole stability fluids were compared. All these results are presented in the paper.

Key words : Drilled Shaft, Load Transfer, Hole Stability Fluids, Slurry, Bearing Capacity

1. 서 론

대부분의 원형 현장타설말뚝 시공시 토사층과 같이 연약한 지층은 Casing으로 공벽을 유지하며 굴착하고 그 이하 견고한 하부지층 굴착시에는 청수나 슬러리 같은 유체로 공벽의 안정성을 유지하면서 굴착한다. 특히 Barrette Pile과 같은 사각말뚝은 Casing을 사용할 수 없어 상부 느슨한 토층부터 하부 견고한 지층 모두 슬러리를 이용한 굴착이 이루어지고 있는 실정이다. 또한 표 1과 같이 기존 문헌에 의하면 현장타설말뚝 시공시 슬러리 사용에 따른 강도감소계수를 제안하고 있으며 암반부 주변마찰력에 대해 Carter and Kulhawy(1988)는 ϕ (강도감소계수)=0.55, Horvath and Kenney (1979)는 ϕ (강도감소계수)=0.65로 적용하도록 제안하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 부산 센텀시티 업무구역내 24 Block 기초설계를 위하여 부산만으로 이어지는 수영강 하류지역에 연약한 퇴적점토층을 지나 안산암질 기반암에 정착한 2개의 현장타설 시험말뚝을 설치하고 지지력 평가를 수행하였다. 각각 말뚝의 시공법은 동일하게 적용되었고 하부 모래자갈층 이하 Casing 하부지층 공벽의 안정성을 위하여 1공은 슬러리로 1공은 청수를 각각 사용하여 굴착하였다. 또한 지지력 평가를 위하여 현장시험말뚝 하부로부터 일정간격으로 응력계와 변형률계를 설치하고 양방향 말뚝재하시험을 실시하였다.

표 1. 슬러리 아래 시공된 현장타설말뚝 강도감소계수

Procedure-soil condition	Resistance factor ϕ	
	Side resistance in rock	Carter and Kulhawy(1988)
Horvath and Kenney(1979)		0.65
Base resistance in rock	Canadian Geotech. Society	0.50
	Pressuremeter method	0.50

2. 지반조건

현장타설 시험말뚝의 위치는 부산만 수영강 하류지역으로 조사부지에 분포되어 있는 지층은 전반적으로 상부 매립토층, 해성퇴적토층, 기반암층 순으로 구조되어 있다. 매립토층은 자갈 또는 모래를 주 구성성분으로 부지 매립 시 형성된 층으로 판단되며, 매립토층 아래로 부지 전반에 걸쳐 퇴적토층이 매우 두텁게 형성되어 있다. 퇴적토층의 구성 성분으로는 상부는 모래를 주 구성으로 하는 치환층(매립토층이 혼재된 지층), 중간부의 점토 및 실트 등 점성토를 주성분으로 하는 연약층, 하부의 자갈층으로 나누어 볼 수 있다. 기반암층은 안산암이며 조사 위치에 따라 다양한 성층구조로 형성되어 있다. 각 지층의 성층상태 및 구성성분 등을 요약하면 다음 표 2와 같다.

표 2. 지층별 요약표

지 층	토질 및 암반 분류	두께 (m)	N-치	
			범 위	평 균
매립토층	GP-GM, SM	1.8~4.2	6~50	24
퇴적토층	상부층	SP-SM	3.4~10.9	1~32
	중간층	SM, SC, ML, CL	4.6~20.3	1~50
	하부층	GP-GM	3.2~11.9	16~50
기반암층	풍화암층	HWR(안산암)	1.0~2.8	50
	연암층	MWR(안산암)	0.7~9.3	-
	보통암층	SWR(안산암)	2.0~13.8	-
	경암층	FSR(안산암)	2.0~14.5	-

3. 현장재하시험

3.1 시험 말뚝 시공

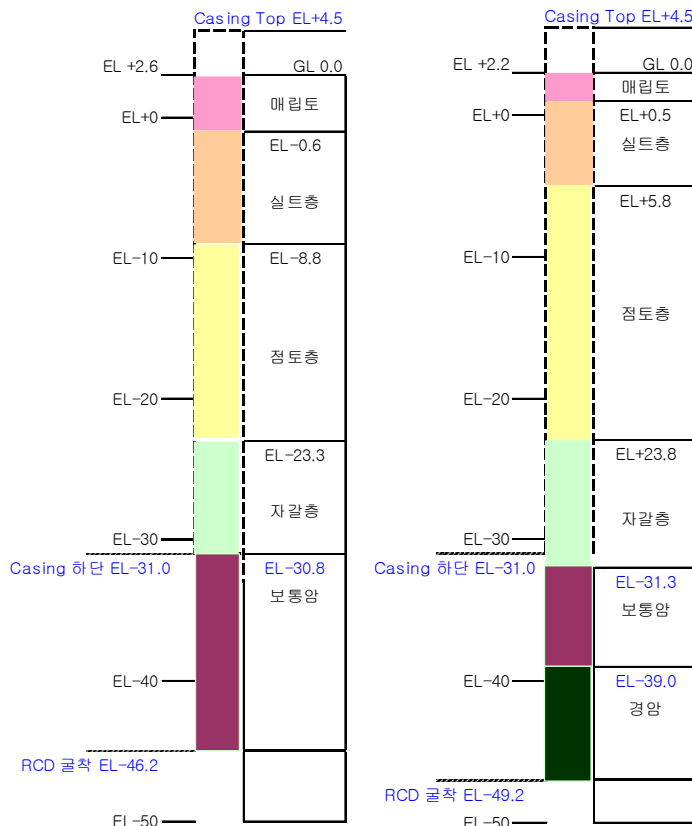
시험말뚝 시공은 상부 토사층의 경우 Grab을 이용한 굴착이 이루어졌으며 하부 암층부터 회전식 굴착기인 RCD장비를 활용하여 굴착하였다. 굴착 홀의 붕괴와 지하수 침투를 방지하기 위해 상부는 일정 깊이까지 오실레이터를 이용하여 강관 Casing을 삽입하였고 자갈층 하부의 경우 시험말뚝-1은 Casing 하단 이하 슬러리를 공급하면서 굴착을 수행하였고 시험말뚝-2는 Casing 하단 이하 청수를 공급하면서 굴착을 수행하였다. 말뚝의 직경은 2.0m의 원형이고 길이는 기반암층 이하 15m이상 근입하였으며 굴착 후 지중에 양방향 재하시험장치를 거치한 소요 철근망을 설치하고 굴착면 하단까지 트레미파이프를 삽입한 후 콘크리트를 타설하여 말뚝을 조성하였다. 시험시공말뚝의 제원은 다음 표 3과 같다.

표 3. 시험 시공 말뚝 제원

말뚝 구분	Test Pile - 1	Test Pile - 2
말뚝 직경	φ2,000mm	φ2,000mm
선단부 직경	φ1,850mm	φ1,850mm
말뚝 시공 깊이	G.L(-)43.4m	G.L(-)47.0m
시공 장비	Grab + R.C.D	Grab + R.C.D
설계 하중	2,600ton	2,600ton
재하 하중	8,000ton	8,000ton
콘크리트 설계기준강도	400kg/cm ²	400kg/cm ²
철근 규격	SD50, H35-38ea	SD50, H35-38ea
선단 지지층	보통암	경암

3.2 양방향재하시험

본 시험방법은 말뚝 시공시 하중재하장치인 고유압셀을 말뚝 선단에 장착하고 말뚝 선단과 두부의 변위를 측정하여 말뚝이 저항할 수 있는 최대 지지력을 확인하는 시험방법이다. 선단과 주면의 지지력이 분리되어 각각 측정되며 응력재에 변형을 게이지를 장착하여 심도별 하중전이를 측정할 수 있다. 본 시험에 적용된 재하하중은 설계하중의 3배 이상인 8,000ton을 재하하였으며 시험말뚝별 지층현황 및 시험시공전경은 그림 1과 같다.



(a) Test Pile-1(슬러리사용) (b) Test Pile-2(청수사용)



(c) Test Pile-1 시공전경



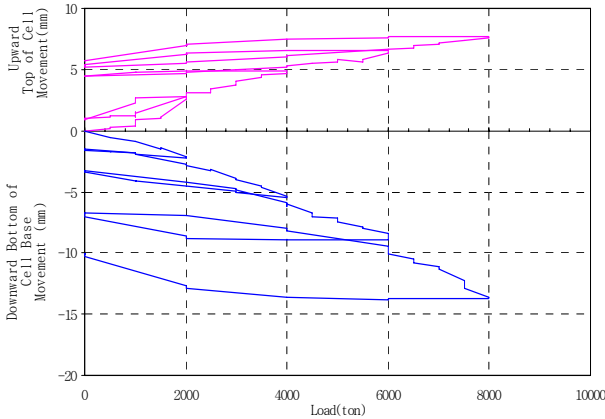
(d) Test Pile-2 시공전경

그림 1. 시험말뚝별 지층 굴착 현황 및 시험 시공 전경

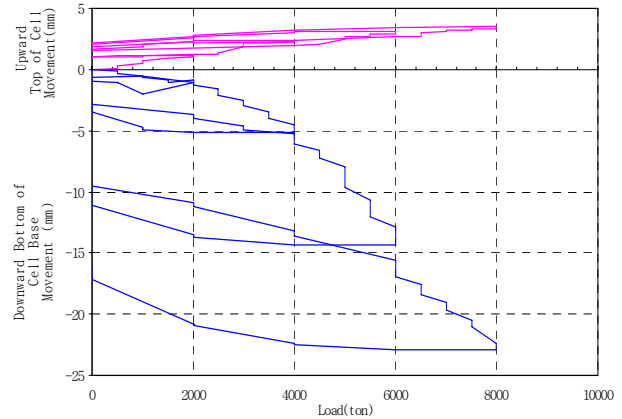
4. 양방향재하시험 결과 및 분석

4.1 지지력 및 침하 특성

말뚝의 양방향재하시험은 단계별 잔류침하량을 확인하기 위하여 반복주기(4주기) 재하방법을 병행하여 재하시험을 실시하였다. 그림 2는 시험말뚝에 재하된 하중에 따른 선단 및 주면부 변위를 나타낸 것이다.



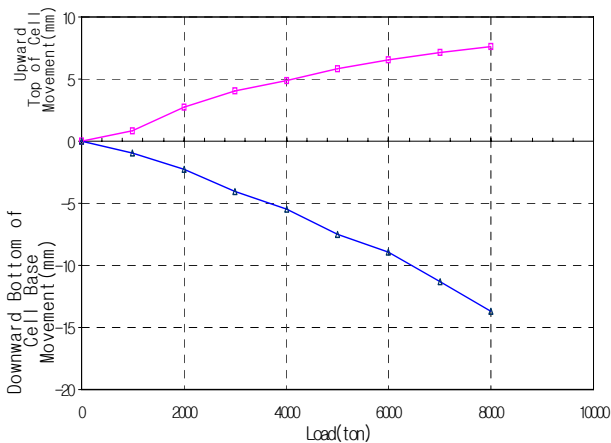
(a) Test Pile - 1



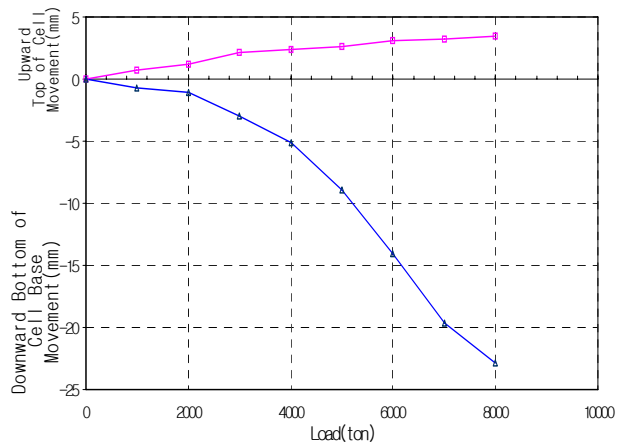
(b) Test Pile - 2

그림 2. 시험하중 - 변위 곡선

그림 3은 시험하중단계별 최대변위 곡선으로 시험말뚝-1의 경우 8,000ton 재하시 선단변위 13.70mm, 주면변위 7.68mm의 결과를 보였으며 시험말뚝-2는 선단변위 22.84mm, 주면변위 3.49mm의 결과를 보였다. 이는 같은 하중 재하시 주면부의 하중 저항력이 선단보다 크다는 것을 알 수 있었으며 선단지지력과 주면마찰력 모두 항복되지 않는 지속적인 침하곡선을 나타내고 있음을 알 수 있었다.



(a) Test Pile - 1



(b) Test Pile - 2

그림 3. 시험하중별 최대변위 곡선

극한하중 및 항복하중을 결정하기 위해 여러 분석법을 적용한 결과 하중증가 과정에서 Creep상수가 최대 0.2이하로 나타나 안정적인 거동을 나타냈으며 탄성변위량 및 소성변위량을 검토해 볼 때 지반 탄성범위내에서 시험이 종료되어 주면마찰력 및 선단지지력 모두 최대재하하중 8,000ton이상 지지하는 것으로 판단된다.

따라서, 두개의 시험말뚝 모두 선단지지력은 하중증가에 따른 지속적인 침하곡선을 나타내고 있어 최

대하중 이상의 하중을 지지할 것으로 추정되며 선단면적을 고려한 허용 선단 지지력은 동일하여 유체에 따른 차이는 거의 없는 것으로 나타났다.

4.2 하중전이특성

말뚝과 주변 지반사이에 발생하는 마찰력은 응력-변위-시간의 특성, 말뚝-지반시스템에 있는 모든 요소의 파괴 특성과 말뚝 시공 방법 등의 영향을 받는다(Vesic, 1977). 따라서, 양방향 하중별 변위상태 및 각 지층별 단위마찰력을 파악하기 위하여 응력계에 변형율게이지를 설치하여 지층별 하중전이를 측정하였다.

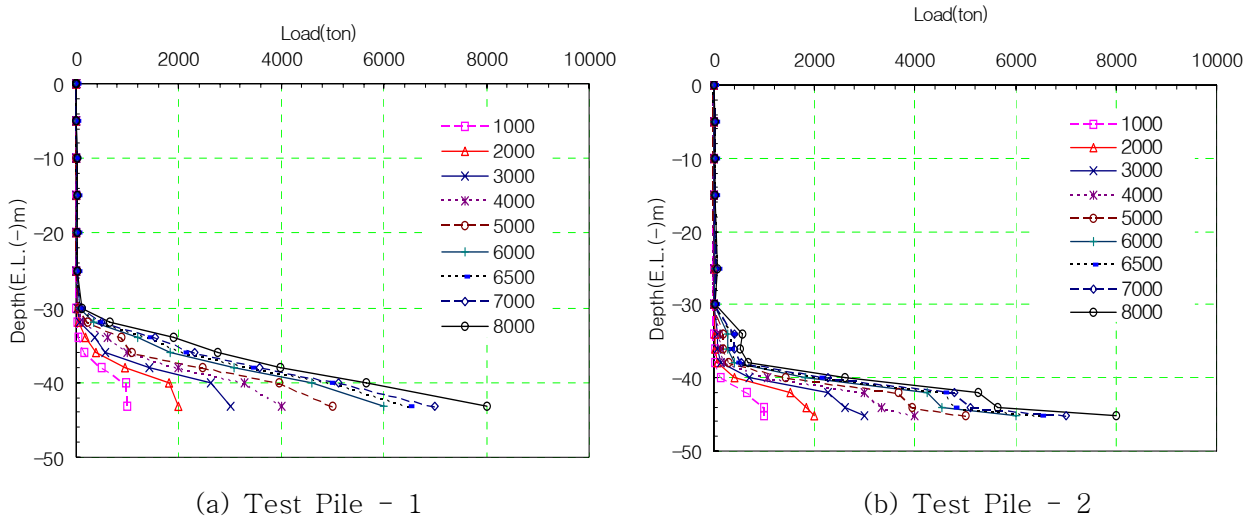


그림 4. 하중단계별 축력 분포도

그림 4는 선단재하시험시 말뚝 깊이별로 산출한 하중을 도시한 결과이다. 상기 결과와 같이 암층이 시작되는 지하 30m 부근을 기점으로 주변마찰력이 급격히 상승하고 있다. 각 지층별 마찰응력은 다음 식 (1)로 산정하였다.

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

여기서, ΔQ_{si} 는 각 지층에서 발휘된 마찰력, D 는 말뚝 직경이고 ΔL_i 는 각 지층의 두께이다.

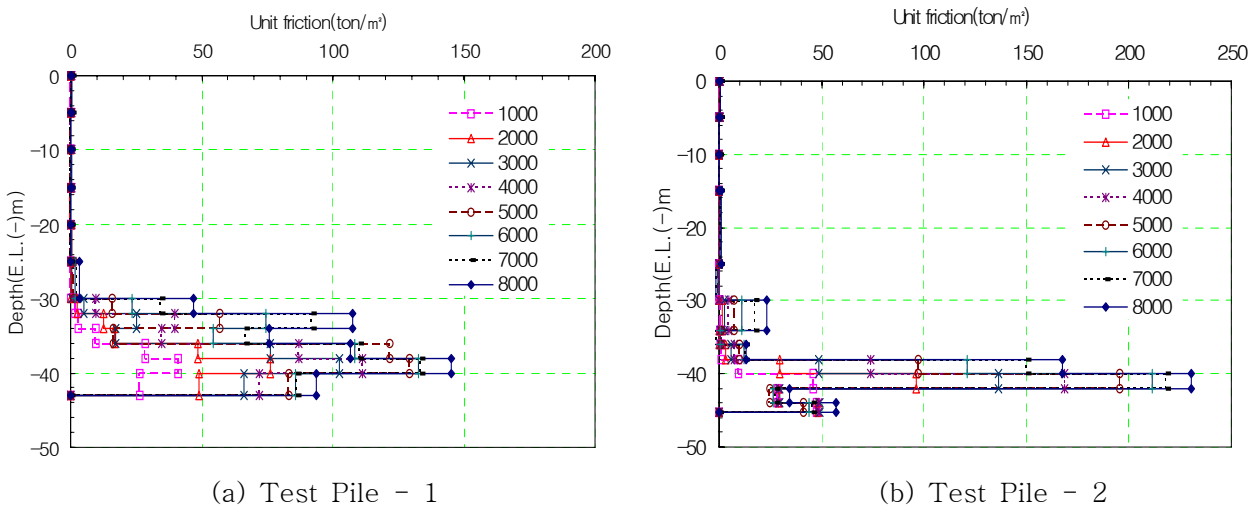


그림 5. 심도별 단위마찰력

각 재하단계에서 발휘된 심도별 단위마찰응력의 분포를 센서 부착 위치별로 도시하면 그림 5와 같다. 시험말뚝-1의 경우 말뚝이 근입된 암층이 모두 보통암층으로 구성되어 있어 최대재하하중에 대응하는 최대 단위주면마찰력은 38.0m에서 145.3t/m²으로 나타났으며 시험말뚝-2의 경우 말뚝이 근입된 암층이 39.0m를 기점으로 보통암층에서 경암층으로 변화하는 지층상태를 보여 보통암층에서의 최대재하하중에 대응하는 최대 단위주면마찰력은 38.0m에서 167.5t/m²로, 그리고 경암층에서 최대 단위주면마찰력은 42.0m에서 230.3t/m²으로 각각 나타났다.

이를 사용된 공벽유지용 유체에 따라 비교하면 보통암층을 기준으로 하였을 때 슬러리를 사용한 말뚝이 청수를 사용한 말뚝에 비해 최대값 대비 다소 저하되는 것을 볼 수 있으며 강도감소계수(ϕ)는 0.87(= 시험말뚝-1(145.3t/m²)/시험말뚝-2(167.5t/m²))로 산정되었다. 이는 기존 문헌결과보다 다소 큰 값을 보이고 있으며 암반근입말뚝의 경우 슬러리를 사용한 현장타설말뚝도 청수를 사용한 말뚝에 비해 주면마찰력의 저하가 크지 않음을 알 수 있었다.

5. 결론

부산만 하류지역에 동일한 시공법으로 굴착하고 Casing이하 공벽유지용 유체인 청수와 슬러리를 구분하여 설치한 두개의 현장타설말뚝에 하중전이 측정을 수반한 재하시험을 수행한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- (1) 시험말뚝별 지지력-침하특성을 살펴본 결과 항복이나 극한을 보이지 않고 최대하중이하 지속적인 침하를 보여 최대하중 이상의 하중을 지지할 것으로 판단되며 허용선단지지력이 동일하게 나타나 유체에 따른 차이는 없는 것으로 나타났다.
- (2) 시험말뚝별 하중전이 특성 분석 결과, 보통암의 경우 최대주면마찰력은 145.3t/m²이상 확보되며 경암의 경우는 최대주면마찰력이 230.3t/m²로 나타났다.
- (3) 현장타설말뚝 시공시 공벽유지용 유체에 따른 주면마찰력은 보통암 기준 슬러리를 사용한 말뚝이 청수를 사용한 말뚝에 비해 다소 감소함을 알 수 있으며 적용된 강도감소계수는 문헌에서 제시한 강도감소계수보다 다소 큰 값을 보이고 있다. 이는 암반에 근입되는 현장타설말뚝 시공시 사용되는 슬러리가 지지력 평가에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다.

참고문헌

1. 권오성, 최용규, 권오균, 김명모 (2006), “양방향 말뚝재하시험을 이용한 말뚝의 하중-변위곡선 추정 방법”, 한국지반공학회논문집, 제22권, 4호, 한국지반공학회, pp.11-19.
2. 홍원표, 여규권, 이재호 (2005), "대구경 현장타설말뚝의 주면마찰력 평가", 한국지반공학회논문집, 제 21권, 1호, 한국지반공학회, pp.93-103.
3. Carter, J. P., and F. H. Kulhawy, (1988), "Analysis and Design of Foundations Socketed into Rock," *EPRI Report no. EL-5918*, New York, 158pp.
4. Fellenius, B.H., Altaee, A., Kulesza, R. and Hayes, J. (1999), “O-cell testing and FE analysis of 28-m-deep barrette in Manila, Philippines”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.7, ASCE, pp.566-575.
5. Horvath, R. G., and T. C. Kenney, (1979), "Shaft Resistance of Rock Socketed Drilled Piers," *Proc. Symp. Deep Found., ASCE, Atlanta, Ga., pp. 182-214.*
6. Vesic, A. S. (1977), "Design of Pile Foundations" National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Highway Practice 42.