

## 대형 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 하중전이특성 파악을 위한 재하시험

# Pile Load test on a Large Barrette Pile and a Bored Pile for the Identification of the Load Transfer Characteristics

한성길† · 박종관\*

Sung-Gil Han · Jong-Kwan Park

### Abstract

In this study, two large pile load tests were performed in the deep sand gravel deposit of Nakdong river basin so that the characteristics of the load transfer was identified. The fully instrumented rectangular barrette pile in the size of 1.5×3.0 m and the circular bored pile of the diameter 1.5 m were placed into the ground below 50 m. Under the applied loads of 2,400 tonf and 4,000 tonf, the test results of the load transfer showed the portion of 83% and 93% of the applied loads on the barrette pile and the bored pile, respectively, were supported by the skin friction along the pile shaft. It was revealed that the most of these skin friction mobilized in sand layer underlying clay layer having N-value more than 30 and that the friction per unit area of the bored pile was larger than the friction of barrette pile. However, if embedded in the stiff sand gravel layer, the both piles were proven to be sufficient for using as the friction piles.

**Keywords** : Pile load test(말뚝재하시험), Barrette pile(바렛말뚝), Bored pile(현장타설말뚝), Load transfer(하중전이), Gravel layer(자갈층), Skin friction(주면마찰력)

## 1. 서론

부산 김해 경전철이 건설되는 낙동강 유역의 퇴적층은 깊이가 60~80m에 이르기 때문에 교량의 기초공사에 많은 시간과 경비가 소요된다. 이 지역의 일반적인 퇴적층 지층 분포는 지표에서 20m아래까지 상부사질토와 연약 점성토층, 20~40m 하부사질토층, 40~60m 자갈층이며, 60m 아래부터 풍화암층 이상의 기반암이다. 특히 말뚝기초 공사에서 말뚝의 선단부가 풍화암 이상의 지지지반에 설치되기 위해서는 10~20m 두께의 자갈층을 관통해야 하며, 이 경우 기초공사에 상당한 기간이 소요될 뿐 아니라 시공성 및 경제성 측면에서 매우 불리하다.

암반지지층이 깊은 경우, 모래자갈층에 선단부를 설치하는 현장타설말뚝이나 바렛말뚝 등이 국내외에서 사용되고 있다. 이때 상부 교량하중은 말뚝의 선단지지력과 주변마찰

력으로 지지된다. 최근에 국내에서 현장타설말뚝의 지지력 검증을 위해 계측기를 매설한 시험말뚝에 말뚝재하시험을 실시한 사례들이 보고되었다. 그러나 바렛말뚝의 경우 국내 시공사례가 있음에도 불구하고 국내에서는 지지력에 대한 검증이 보고되지 않고 있다.

최근 현장타설말뚝에 대한 대표적인 지지력평가는 다음과 같다. 정성기 등(1998)은 설계목적의 시험시공을 통해 말뚝 기초 구조물의 안정성 확보뿐만 아니라 공사비 절감효과 사례를 발표하였다.

천병식 등(2003)은 낙동강 하구의 교량기초에 사용된 약 30m 길이의 현장타설말뚝에 대해 하중전이 시험을 실시하고, 국내외에서 적용하고 있는 이론적인 공식을 이용하여 그 결과를 비교분석하여 현장타설말뚝의 주된 지지력은 주변마찰력이라는 것을 제시한 바 있다. 홍원표 등(2005)은 연암층에 근입된 약 20m 길이의 현장타설말뚝에 대해 하중전이 시험을 수행하고, 수치해석을 통해 분석한 결과, 현장타설말뚝의 길이방향을 따라 발휘되는 극한단위주면마찰력은 말뚝중간 깊이에 존재하는 모래자갈층과 자갈층에서 먼

† 책임저자 : 정회원, 현대산업개발, 부산-김해경전철 건설단  
E-mail : sghan@hyundai-dvp.com

TEL : (055)339-9506 FAX : (055)339-9510

\* 정회원, 서울산업대학교 토목공학과 교수

저 발현되는 것을 밝힌바 있다. 홍사면과 이영생(2005)은 H-형 강말뚝에 계측기를 설치하여, 하중전이시험을 수행한 결과와 여러 연구자들이 제안한 t-z모델을 이용한 유한차분 해석을 통해 비교분석을 수행하였다. 바렛말뚝에 대한 재하시험으로는 Thasnanipan et al.(2001)이 태국의 연약지반에서 수행한바 있다. 이들은 동일한 건물기초로 사용된 바렛말뚝과 현장타설말뚝에 대해 하중전이를 포함한 재하시험을 수행하였다. 최대시험하중은 각각 5,290tonf과 2,700tonf이었다. 말뚝길이는 57.5m이며 말뚝의 선단은 N치 50이상의 견고한 모래층에 지지되었다. 시험결과 대부분의 하중은 30m 깊이에 존재하는 약 10m 두께의 모래층에서 발현되는 것으로 나타났다. Fellenius et al.(1999)은 siltstone 지반에 28.2m 길이의 바렛말뚝을 설치하고, 오스터버그셀을 이용하여 1,160tonf의 재하시험을 수행하였다. 그 결과를 유한요소해석을 통해 분석하고, 설계의 타당성을 검증한 바 있다.

본 논문에서는 부산 김해 정전철 기초설계를 위해 낙동강 유역의 깊은 퇴적층에 2개의 시험말뚝(현장타설말뚝과 바렛말뚝)을 설치하고 지지력 평가를 실시하였다. 특히 지표 아래 50~60m에 놓여있는 자갈층에 대한 지지층 가능성여부를 검증하였다. 이를 위하여 시험말뚝인 현장타설말뚝과 바렛말뚝에 대하여 응력계와 변형률 게이지를 설치하고 말뚝 정재하시험을 실시하여 하중전이특성, 주변마찰력 및 선단 지지력을 비교 평가하였다.

## 2. 지반조건

말뚝시험시공 위치는 낙동강 퇴적지역의 중앙부인 김해 공항 인근으로 지층의 구성은 낙동강 하구에서 일반적으로 나타나는 지층과 동일하다. 낙동강유역의 대표적인 지층분포는 그림 1과 같으며 지층구성을 정리하면 표 1과 같다.

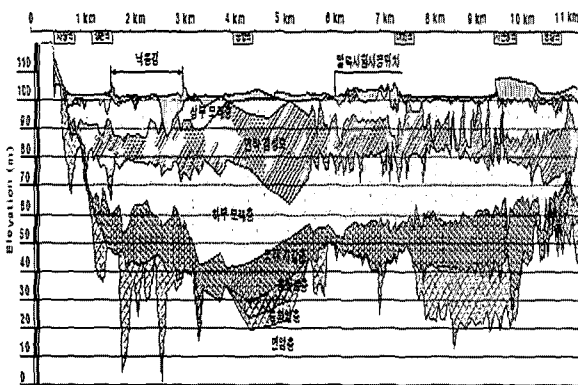


그림 1. 낙동강 유역의 대표적인 지층분포

지층 순서는 상부로부터 매립층, 상부모래층, 실트질 모래층 및 점토층, 하부모래층, 자갈층, 풍화암, 연암 순으로 분포한다.

시험시공 위치의 지층구성을 보면, 상부 실트질 모래 및 점토층의 SPT N치는 약 2~5의 범위에 있으며, 지표에서 27m까지 분포한다. 그 아래로는 N치 30~40범위를 보이는 모래층이 약 22m 정도 두께로 있다. 그 아래로는 N치 50이상의 견고한 자갈층이 4m 정도 두께로 쌓여있다. 시험말뚝은 자갈층 상부 0.6m까지 굴착하여 시공하였다.

## 3. 시험말뚝설치

시험 바렛말뚝은 폭 1.5m와 길이 2.8m의 직사각형 콘크리트 타설말뚝이며, 시험 현장타설말뚝은 직경 1.5m의 원형 콘크리트 타설 말뚝으로 시험시공 말뚝에 대한 제원은 표 2와 같다. 바렛말뚝은 BC-30장비를 이용하여 굴착하였고 굴착면의 붕괴와 지하수 침투를 방지하기 위해 안정액을 공급하면서 굴착을 수행하였다. 말뚝의 길이는 49.4m로 두께 약 4m의 자갈층 상단 0.6m까지 굴착하였다. 그 후 지중에 철근망을 설치하고, 굴착면 하단까지 트레미파이프를 삽입한 후, 콘크리트를 타설하여 말뚝을 조성하였다. 현장타설말뚝은 all casing공법으로 casing tube를 casing jack을 사용하여 회

표 1. 낙동강유역의 대표적인 지층구성 현황

지층 구분	통일분류	심도(m)	층두께(m)	N치
상부 사질토	SC~SM	0 ~ 10	10	5~10
연약 점성토	CL~CH	10 ~ 20	10	1~3
하부 사질토	SM~SP	20 ~ 40	20	10~30
모래 자갈층	GP~GM	40 ~ 60	20	> 50
풍화암, 연암		60 이후		> 50

표 2. 시험말뚝의 제원

말뚝 종류	바렛말뚝	대구경말뚝
시공 수량	시험말뚝 1본	시험말뚝 1본 반력말뚝 6본
말뚝 규격	1.5m×2.8m	D1.5m
말뚝 시공깊이	G.L(-)49.4m	G.L(-)49.4m
시공 장비	BC-30	BG-40
설계하중	1,300ton	800ton
콘크리트 규격	25-300-18	25-300-18
콘크리트 설계기준강도	300kgf/cm <sup>2</sup>	300kg/cm <sup>2</sup>
철근 규격	SD32, N=58EA	SD29, N=28EA
선단지지층	자갈층	자갈층

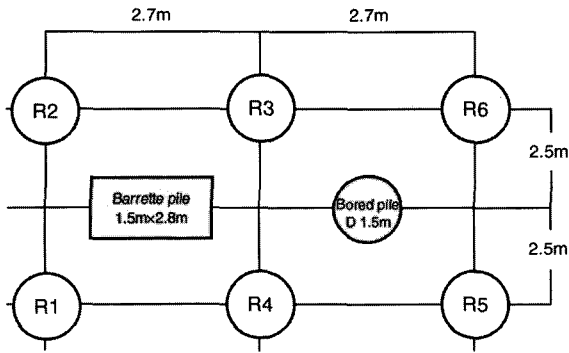


그림 2. 시험말뚝과 반력말뚝의 배치

전 압입하여 지중에 삽입하였으며, 내부 토사는 grab을 이용하여 외부로 반출하였다. 바렛말뚝과 동일한 깊이까지 굴착 후, 철근망을 삽입하고 트레미파이프를 이용하여 콘크리트를 타설하였다.

재하시험의 반력을 얻기 위하여 반력말뚝 6본을 직경 1.5m의 현장타설말뚝으로 시공하였다. 그림 2는 시험말뚝과 반력말뚝의 배치를 보인 것이다. 반력말뚝의 시공깊이는 지반조사 결과를 근거로 하여, 주변마찰력에 의한 인발력을 산정하여 시공깊이를 결정하였다.

#### 4. 정재하시험 결과 및 분석

##### 4.1 하중에 따른 말뚝변위

말뚝의 재하시험은 ASTM D 1143-81(1986)에 따라 수행하였다. 그림 3은 말뚝에 재하된 하중과 말뚝두부의 변위를 나타낸 것이다. 표 3은 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 설계하중과 설계하중의 2배 하중, 최대시험하중에서의 말뚝두부변위를 정리한 것이다. 두 말뚝 모두 설계하중에서의 말뚝두부 변위는 각각 11.5mm와 9.9mm로 미소한 변위만 발생한 것으로 나타났다. 그림 3의 하중-변위 관계곡선에서 하중증가에 의한 급격한 말뚝두부 변위가 발생하지 않은 것으로 보아 극한항복하중이 작용하중보다 큰 것으로 판단된다. 즉, 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 극한항복하중은 각각 최대작용하중 인 4,000tonf과 2,400tonf 이상이며, 최대작용하중에 의한 말뚝두부 변위는 각각 72.6mm와 60.2mm이다.

##### 4.2 하중전이특성

바렛말뚝과 현장타설말뚝의 하중전이 특성곡선은 그림 4와 같다. 하중전이 곡선은 말뚝 내에 깊이별로 설치된 계측기를 통하여 얻어진 콘크리트 응력과 변형률을 이용하여, 재하하중 단계에 따라 말뚝에 전달되는 하중을 측정하여 구

표 3. 적용된 하중과 말뚝두부변위

말뚝종류	설계하중 (tonf)	최대작용 하중 (tonf)	말뚝두부변위(mm)		
			설계하중	설계하중의 2배하중	최대작용 하중
바렛말뚝	1,300	4,000	-11.5	-34.9	-72.6
현장타설 말뚝	800	2,400	-9.9	-30.5	-60.2

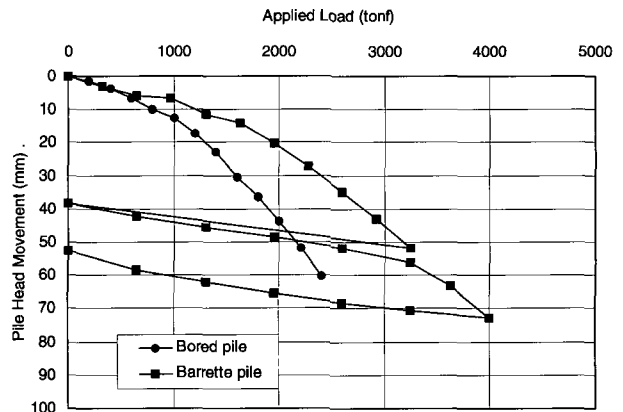


그림 3. 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 재하하중에 따른 말뚝두부변위

한 것이다.

그림 5는 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 하중에 따른 선단 지지력과 주변마찰력을 구분하여 나타낸 것이다. 바렛말뚝의 경우 수직하중이 2,925tonf에 이르렀을 때, 주변마찰력은 약 1,500tonf 정도로 극한항복상태에 도달한 것을 알 수 있다.

주변마찰력이 극한상태에 도달한 이후에는 말뚝의 선단에서의 하중이 지속적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 현장타설말뚝의 경우 설계하중의 3배인 2,400tonf에서도 여전히 주변마찰력이 극한상태에 도달하지 않은 것을 볼 수 있다. 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 설계하중 하에서 주변마찰력은 각각 83%와 92%를 지지하는 것으로 나타났다. 이 주변마찰력은 연약점성토층 하부에 존재하는 N치 30이상의 모래층에서 발현되는 것으로 나타났다. 이 결과로 볼 때, 이 지역과 같이 퇴적층이 깊은 대심도 지반에서 견고한 모래층 또는 자갈층 등이 두껍게 존재할 경우, 이들 지층의 주변마찰력을 이용하면 매우 효율적인 말뚝 설계를 할 수 있을 것으로 보인다. 시험 결과(그림 4)를 이용하여 설계하중과 최대작용하중에서 단위주변마찰력을 산정하면 그림 6과 같다.

여기서, 설계하중 하에서는 주변마찰력이 완전히 발현되지 않은 것을 볼 수 있다. 하지만, 최대시험하중 하에서의 마찰력은 설계에서 사용하는 경험식에 의한 마찰력 보다 큰

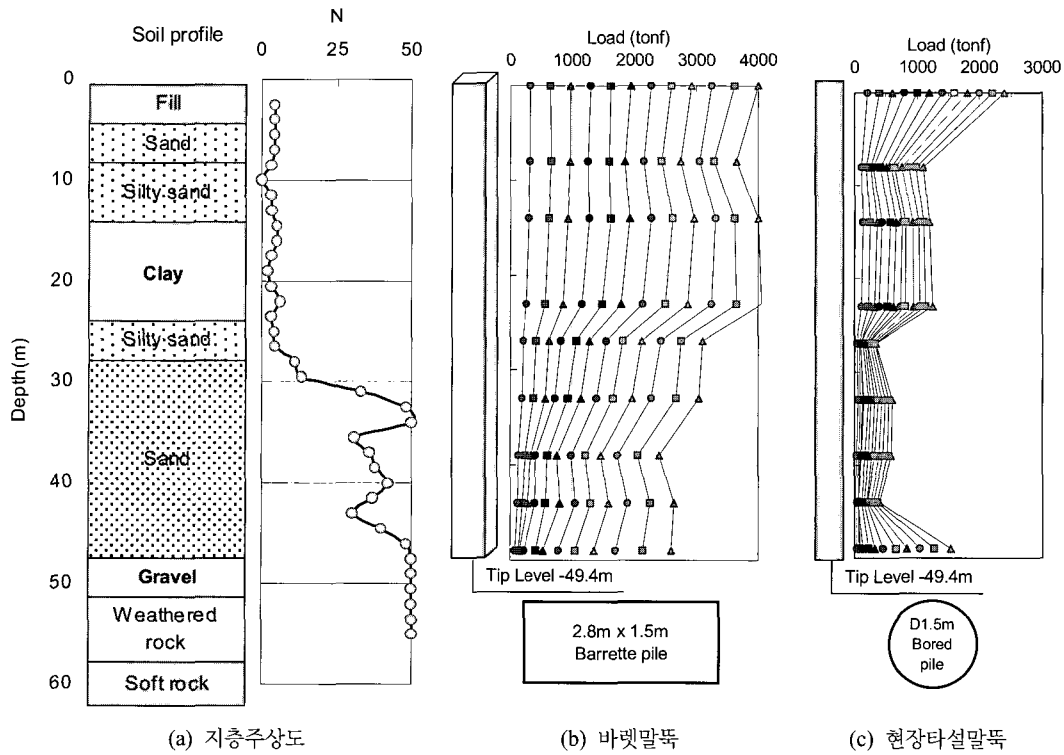


그림 4. 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 하중전이특성 곡선

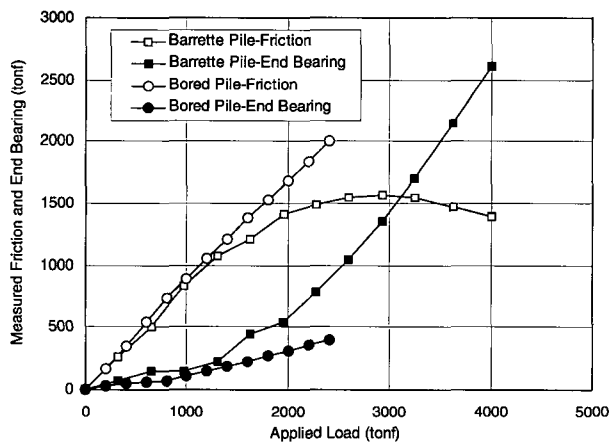


그림 5. 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 주면마찰력과 선단지지력 관계

마찰력이 발생되고 있다. 구조물기초설계기준(한국지반공학회, 2003), 도로교설계기준 해설(대한토목학회, 2001) 및 철도교설계기준(대한토목학회, 2004) 등에서 사용하는 경험적 단위주면마찰력  $f_s(t/m^2)$ 은 표준관입시험치  $N$ 를 이용하여 다음과 같다.

$$f_s = 0.5 N (\leq 20)$$

### 4.3 말뚝두부변위와 주면마찰력

최대주면마찰력이 발현되는 말뚝변위를 파악하기 위한 등가직경비(두부변위  $s$  / 말뚝의 등가직경  $D$ )와 주면마찰력비(주면마찰력 / 최대주면마찰력) 관계는 그림 7과 같다. 여기서, 바렛말뚝의 등가직경  $D$ 는 바렛말뚝의 단면적을 등가면적으로 환산해 준 것으로,  $D=(\text{말뚝면적} \times 4/\pi)^{1/2}$  하여 구한 것이다. 바렛말뚝(그림 7(a))은 말뚝두부변위 약 1.9%에서 최대주면마찰력이 발현되지만, 현장타설말뚝(그림 7(b))은 말뚝의 두부변위 4% 이상에서도 최대 주면마찰력이 나타나지 않고 있다. 바렛말뚝의 주면마찰력 감소는 시공과정의 차이로 기인된 것으로 보인다. 바렛말뚝의 경우 벤토나이트 슬러리를 이용하여 공벽을 유지하면서 굴착되었다. 이때 굴착과 철근망 근입 등의 시공 시간동안 공벽 안쪽에 수평 변위가 발생되어 토압 상태가 정지상태에서 주동상태로 바뀌면 구속력과 주면마찰력이 감소된다. 또한 굴착면에 벤토나이트 슬러리 덩어리(cake)가 부착되면 주면마찰력이 감소될 수 있다. 반면 현장타설말뚝의 경우 전 깊이에 케이싱(casing)을 이용하여 공벽을 지지하여 바렛말뚝에 비해 지반의 이완이 적고 큰 구속압이 작용한다. 따라서, 현장타설말뚝은 바렛말뚝에 비해 큰 주면마찰력이 발생되고, 큰 수직변위도 극한상태에 도달하지 않았다.

Thasnanipan 등(2001)은 태국의 연약지반상의 건물기초

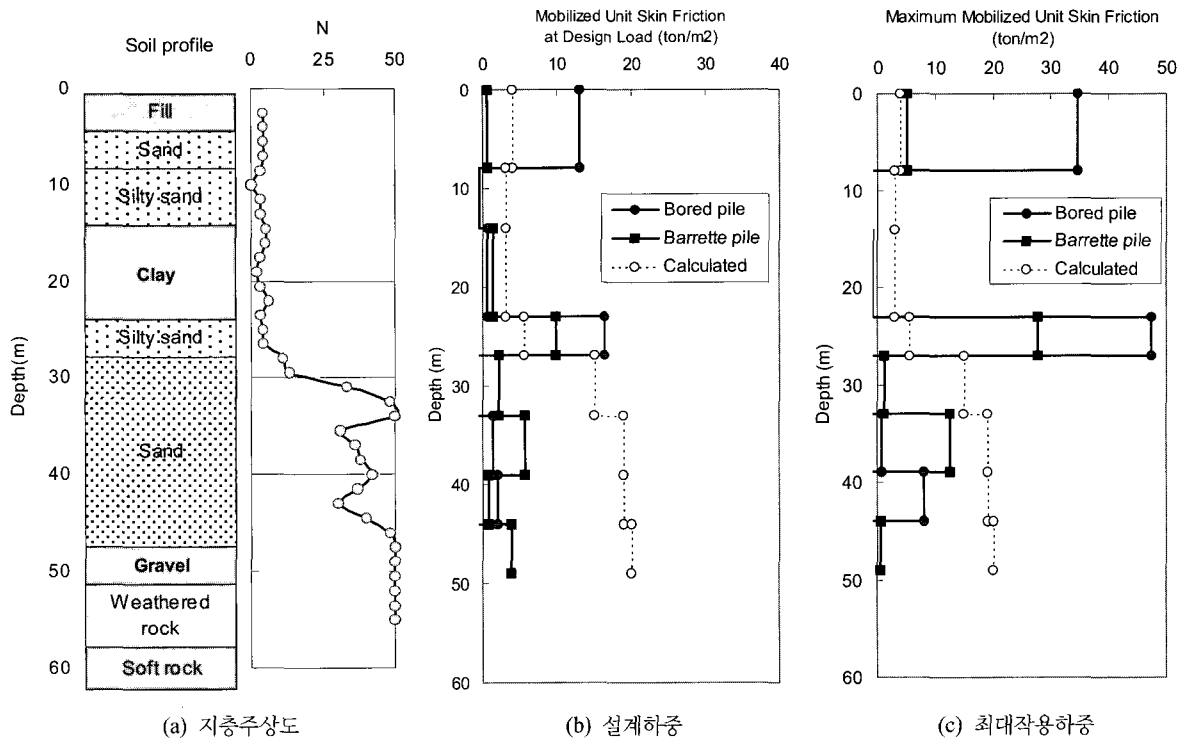


그림 6. 바릿말뚝과 현장타설말뚝의 설계하중과 최대작용하중에서 단위주면마찰력

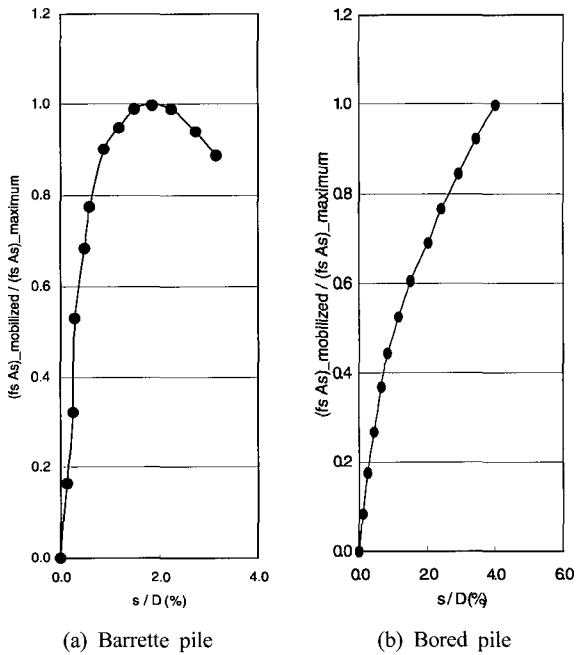


그림 7. 말뚝두부 변위에 대한 등가직경비와 발현된 주면마찰력비

에서 본 연구와 유사한 재하시험을 수행하였다. 이들은 길이 57.5m의 바릿말뚝(3.0m×1.5m)과 현장타설말뚝(직경 1.5m)에 대해 벤토나이트 슬러리를 이용하여 공벽을 유지하며 시험말뚝을 시공하였다. 다만 공벽에 부착된 필터 케이크(filter

cake)의 형성을 방지하기 위해 철근망 근입 전에 그레브(grab)를 이용하여 공벽을 긁어내었다. 그 결과 바릿말뚝과 현장타설말뚝의 등가직경비가 각각 0.6%와 1.6% 일 때 최대주면마찰력이 발현되는 것으로 나타났다. 이러한 일련의 결과로부터 최대주면마찰력이 발현되는 말뚝 두부변위는 말뚝의 시공방법에 따라 차이가 나는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

낙동강 하구의 대심도 지반에 설치한 바릿말뚝과 현장타설말뚝에 대해 하중전이 측정을 수반한 재하시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 바릿말뚝과 현장타설말뚝에 대한 정재하시험결과 각 말뚝 설계하중의 3배인 4,000tonf, 2,400tonf을 재하한 상태에서 극한상태가 나타나지 않았으므로 극한지지력은 각각 4,000tonf, 2,400tonf 이상인 것으로 나타났다.
- (2) 바릿말뚝과 현장타설말뚝의 하중전이특성을 분석한 결과, 설계하중 하에서 주면마찰력이 각각 83%와 92%를 지지하는 것으로 나타났다. 이때의 말뚝두부변위는 무시할 수 있을 만큼 작기 때문에, 두 말뚝 모두 마찰말뚝으로서 충분한 가능성이 있음을 확인하였다.

- (3) 최대시험하중 하에서 연약점토층 하부의 N치 30이상의 모래층에서 주면마찰력이 경험식보다 훨씬 크게 발견되는 것으로 나타났다.
- (4) 바렛말뚝과 현장타설말뚝의 단위주면마찰력의 차이는 시공방법이 다름으로 인해 발생한 것으로 판단되며, 바렛말뚝에 대해 주면마찰력 감소원인이 될 수 있는 필터 케이크 형성을 억제하고, 내공변위 발생전에 콘크리트 타설을 하면 주면마찰 저항력을 더 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 시험을 위해 준비에서 분석까지 조언을 아끼지 않으신 파일테크의 이명환박사님, 전영석부장님께 감사드립니다. 또한 현장 시험시공을 위해 힘든 과정을 함께 격어주신 동아지질 박순형사장님, 이성국부장님, 고수현차장님 외 직원 여러분께 감사의 말씀드립니다.

### 참고 문헌

1. 대한토목학회 (2001), 도로교설계기준 해설(하부구조편).
2. 대한토목학회 (2004), 철도교설계기준(철도교편).
3. 정성기, 최용규, 정성교 (1998), 설계목적의 말뚝재하시험을 이용한 말뚝기초 건설비용 절감에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 제18권 제III-3호, pp.341-352.
4. 천병식, 김원철, 최용규, 서덕동 (2003), “현장타설말뚝의 정재하시험에 의한 지지력과 이론식에 의한 지지력과의 비교”, 한국지반공학학회논문집, 제19권, 2호, 한국지반공학회, pp.237-246.
5. 한국지반공학회 (2003), 구조물 기초설계기준 해설.
6. 홍사면, 이영생 (2005), “사질토지반에서 H-형 강말뚝의 축방향 거동”, 한국지반공학학회논문집, 제21권, 8호, 한국지반공학회, pp.5-12.
7. 홍원표, 여규권, 이재호 (2005), “대구경 현장타설말뚝의 주면마찰력 평가”, 한국지반공학학회논문집, 제21권, 1호, 한국지반공학회, pp.93-103.
8. ASTM D1143-81 (1986), “Method of testing piles under static axial compressive loads, In Annual book of ASTM standards”, 04.08, Soil and rock, building stones, Philadelphia, PA, pp. 293-254.
9. 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.
10. Thasnanipan, N., Maung, A.W., Aye, Z.Z. and Tanseng, P. (2001), Record load test on a large barrette and its performance in the layered soils of Bangkok, 5th International Conference on Deep Foundation Practice incorporating Piletalk, 4~6 April, Singapore, pp.363-370.