

## 양방향재하시험을 통한 바렛말뚝의 하중-침하특성 연구

# Load-Displacement Characteristics Study of Barrette Pile by Bi-directional Loading Test

임대성<sup>1)</sup>, Dae-Sung Lim, 박성완<sup>2)</sup>, Seong-Wan Park, 이상래<sup>3)</sup>, Sang-rae Lee

<sup>1)</sup> 삼보E&C(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, Technical Research Center, Sambo Tosfoc

<sup>2)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor of Civil & Environmental Engineering, Dankook University

<sup>3)</sup> 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Master student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University.

**SYNOPSIS** : Recently, the construction of buildings and large bridges has been increasing rapidly causing foundation structure growing larger than before, especially in the use of large size cast-in-place piles. Barrette Pile will usually be used at the site where diaphragm wall is the retaining wall to save time and cost in mobilization of equipments. This study uses bi-directional loading test data obtained from two different sites to observe the bearing capacity and displacement characteristics of barrette pile. Numerical analysis of the test is done by using commercial 3D computer program and the interface effect and capacity of the pile as well as displacement characteristics of the pile is verified

**Key words** : Barrette pile, Bi-directional loading test, Interface

## 1. 서론

일반적으로 원형말뚝에 가해지는 하중이 크고 지지층이 깊은 곳에 존재할 경우 공벽의 안정성을 확보하기 위해 Casing 사용은 필수적이며 그로 인해 말뚝의 시공성이 떨어지고 비경제적이 된다. 이러한 이유로 벤토나이트 슬러리를 이용한 Barrette는 대구경 원형 현장타설말뚝의 대안으로 제시되고 있다. 형상학적 측면에서 Barrette 말뚝은 원형말뚝에 비해 주변장(단면적 대비)이 더 크고 방향성을 충족할 때 휨모멘트와 수평력에 상대적으로 원형에 비해 우수한 장점을 가지고 있다. 그러나, 원형말뚝에 비해 이론적으로나 실제 하중재하시험에 대한 연구가 미미한 실정이며 편심으로 인한 구조적 영향도 발생할 수 있어 효율적인 사용을 위해서는 Barrette말뚝의 침하-거동특성에 대한 연구가 시급한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 실물크기의 Barrette말뚝의 양방향재하시험을 실시하였고 하중-침하곡선을 나타냈으며 그 결과를 토대로 등가하중침하곡선을 작도하고 현장재하시험의 검증을 위하여 유한요소해석 프로그램인 MIDAS-GTS 3D를 사용하여 수치해석을 실시하였다.

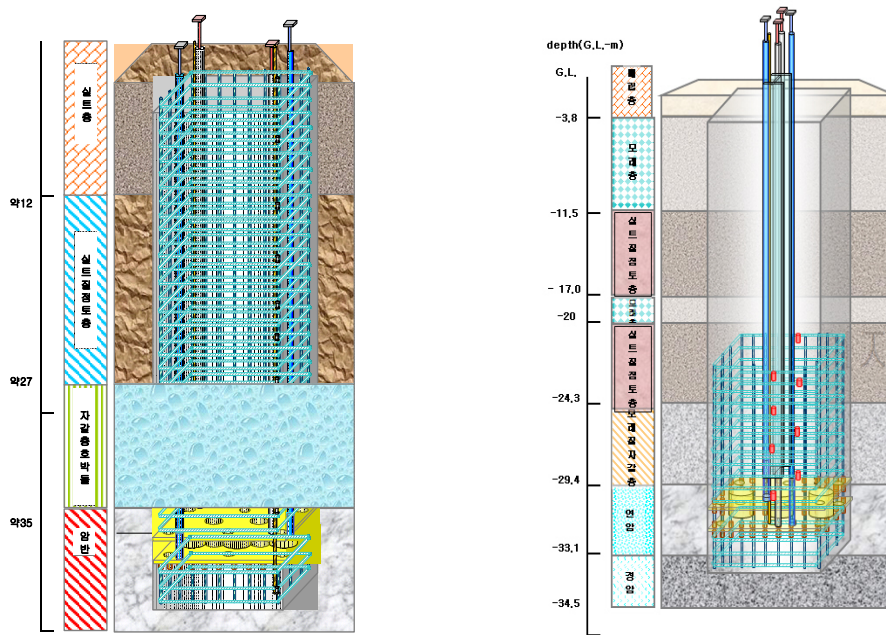
이를 위하여 A-현장(2.8m×1.0m), B-현장(2.8m×1.7m)에 시공된 Barrette 말뚝 2본에 대하여 양방향재하시험을 실시하였으며 그 시험결과를 분석하고 양방향재하시험을 각 현장별로 모델링하여 수치해석을 실시하였다.

## 2. 현장재하시험

### 2.1 현장 개요

대구경 현장타설말뚝은 상대적으로 작용하중이 크기 때문에 종래의 재하시험으로 현장시험을 실시할 경우 시험하중만큼의 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력이 필요하다는 단점이 있다. 따라서 대구경 현장타설말뚝의 재하시험법으로는 유압식 잭을 말뚝 선단 가까이 설치하여 선단지지력과 주변마찰력이 상호간에 반력으로 작용하여 반력말뚝이나 앵커가 필요 없는 양방향 재하시험법을 주로 이용하는 추세이다. 따라서, 당 현장의 재하시험도 양방향재하시험을 이용하여 하중-침하를 평가하였다.

본 연구 대상 현장은 2개 현장으로 A-현장의 Barrette 재하시험 대상부지는 상부층에 매립층 및 실트층이 약 20m 깊이로 존재하고 Barrette 말뚝의 시공시점부터 실트질점토층, 자갈층과 연암반층이 존재한다. 말뚝은 암반에 1.6m 소켓되었고, 하중을 가하기 위한 유압식 잭은 말뚝 선단 상부 0.5m에 위치하였다. B-현장은 상부 토사층이 약 24m 깊이로 존재하며, 그 이후에 모래질 자갈층과 암반층이 존재한다. 말뚝은 암반에 4.5m 소켓되었고, 하중을 가하기 위한 유압식 잭은 연암층 지지 선단 0.5m 상부에 시공되었다. 그림 1에 말뚝형상 및 하중전이층정 게이지를 표시하였고 표 1에는 시험말뚝의 제원을 표시하였다. 시험은 ASTM D1143 기준에 따라 말뚝재하시험을 수행하였다.



(a) A-현장

(b) B-현장

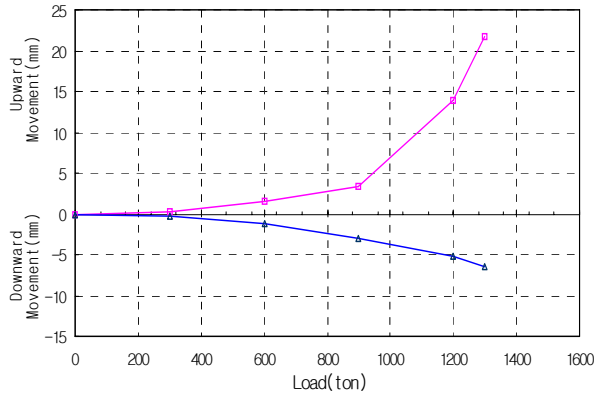
그림 1. 말뚝 시공 현황

표 1. 시험 말뚝 제원

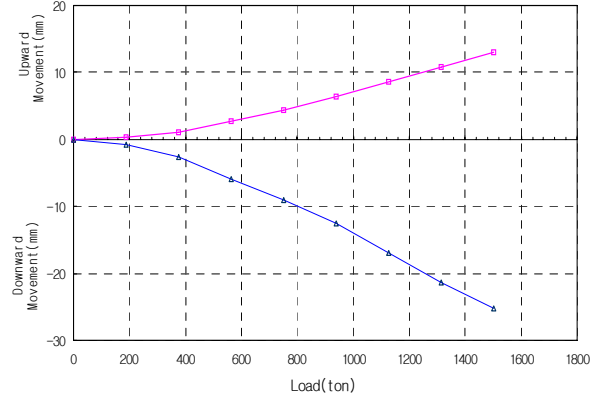
	크기	길이	설계 지지력	최대 시험하중
A-현장	2.8m × 1.0m	15.1m	1,200 tonf	2,600 tonf
B-현장	2.8m × 1.7m	9.5m	1,460 tonf	3,000 tonf

## 2.2 재하 시험 결과

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



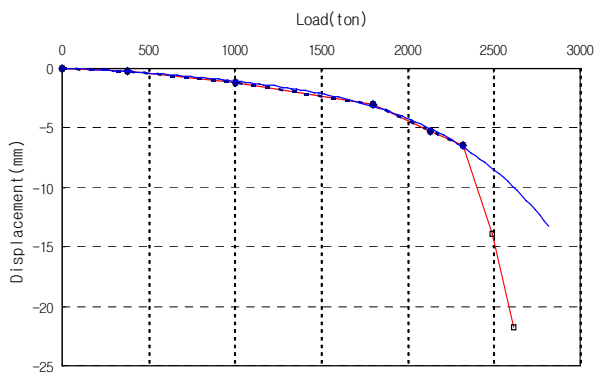
(a) A - 현장



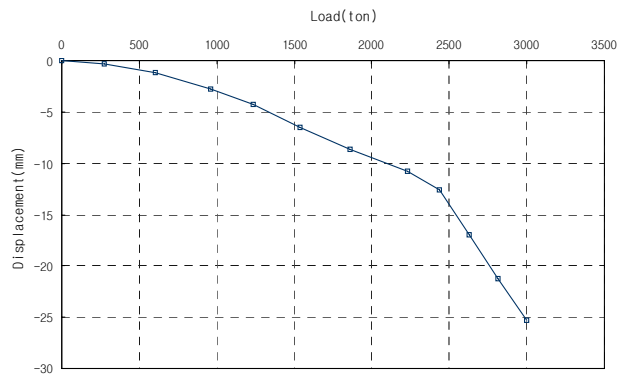
(b) B - 현장

그림 2. 하중 - 변위 곡선

그림 2는 시험하중단계별 최대변위 곡선으로 A-현장 Barrette 말뚝의 경우 2,600ton 재하시 선단변위 6.51mm, 주면변위 21.75mm의 결과를 보이고 있으며 이를 등가하중곡선으로 나타내면 그림 3(a)와 같이 도시되고 하중 1,270ton을 기점으로 변화가 나타나는 것은 상대적으로 선단지지력이 커서 주면마찰력에 비해 변위량이 적은 것에 기인한 것이다. B-현장은 선단변위 25.29mm, 주면변위 13.04mm의 결과를 보이고 있으며 등가하중곡선으로 나타내면 그림 3(b)와 같이 도시되고 추세가 3,337ton을 기점으로 변화가 나타나는 것은 상대적으로 주면마찰력이 커서 선단에 비해 변위량이 적은 것에 기인한 것으로 실제 항복과는 관련성이 적은 것으로 나타났다.



(a) A - 현장



(b) B - 현장

그림 3. 등가 하중 곡선

극한하중 및 항복하중을 결정하기 위해 여러 분석법(P-S, log P-log S, S-log T, P-ds/d(log t))을 적용한 결과 A-현장의 경우 1,300ton 하중 가력과정에서 Creep상수가 최대 1.6이하로 나타나 안정적인 거동을 보였으며 B-현장도 1,393ton의 하중 가력과정에서 Creep상수가 최대 0.15이하로 나타나 안정적인 거동을 보였다. 두 현장 모두 탄성변위량과 소성변위량을 검토해 볼 때 지반탄성 범위내에서 시험

이 종료되었다. 따라서, 두개의 시험말뚝 모두 하중증가에 따른 지속적인 침하곡선을 나타내고 있어 최대하중 이상의 하중을 지지할 것으로 추정되며 등가 침하 곡선으로 볼 때 계획된 설계하중을 충분히 지지하는 것으로 나타났다.

### 3. 수치해석

본 연구에서는 유한요소 해석 프로그램인 MIDAS-GTS 3D를 이용하여 Barrette 말뚝에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석 시 말뚝은 Elastic 모델을 사용하였고, 지반의 경우에는 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르는 탄소성 구성 모델을 사용하였다. Barrette 말뚝의 경우 시공중에 공벽유지를 위한 벤토나이트 슬러리 사용으로 생긴 Filter Cake 현상으로 말뚝과 지반의 미끄러짐 효과를 고려하기 위하여 Interface요소를 적용하였으며 수치해석시 사용된 요소망은 그림 4와 같다.

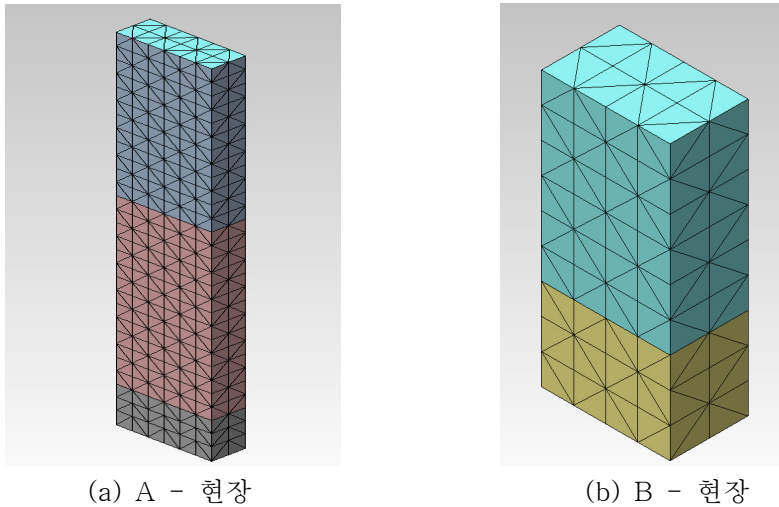


그림 4. 수치 해석 요소망

#### 3.1 Interface 요소

말뚝과 흙의 경계에 미끄러짐을 모사하기 위해 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 따르는 비선형 스프링 요소를 사용하였다. 스프링 요소는 수직강성  $k_n$  과 전단강성  $k_t$ 를 가지는 두 개의 스프링으로 구성된다. Interface에서 스프링강성을 산정하는 방법은 다음과 같다. Interface에 연직방향의 contact normal force  $F_n$  은 아래식과 같이 정의된다.

$$F_n = k_n u_n \quad (1)$$

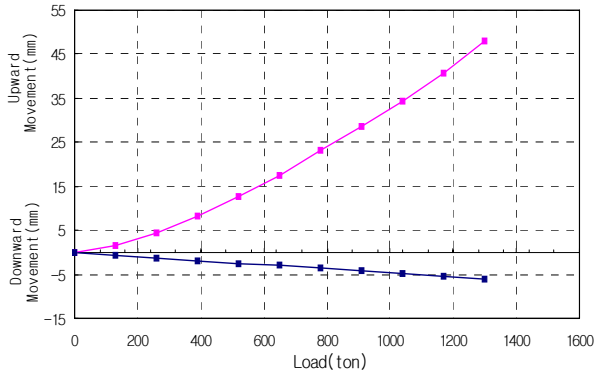
여기서,  $k_n = \frac{F_{n \max}}{u_{n \max}}$  이다.

표 2. 수치해석 입력 물성치

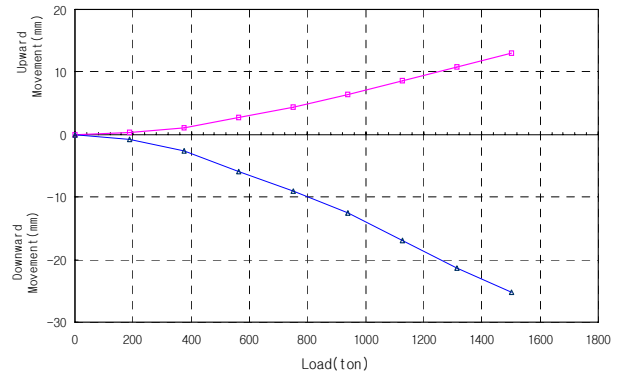
구 분	단위중량 ( $\gamma_t, kN/m^3$ )	탄성계수 ( $E, kN/m^2$ )	포아송비 ( $\nu$ )	$\phi(^{\circ})$	$c(kN/m^2)$
실트질점토층	18	18000	0.35	25	30
모래질자갈층	20	160000	0.3	37	0
연암층	28	37000000	0.25	40	50

### 3.2 수치해석결과

말뚝의 수치해석은 현장시험과 동일하게 하기 위하여 반복주기 재하방법을 사용하여 수치해석을 실시하였고, 그 결과는 아래 그림 5와 그림 6과 같다.



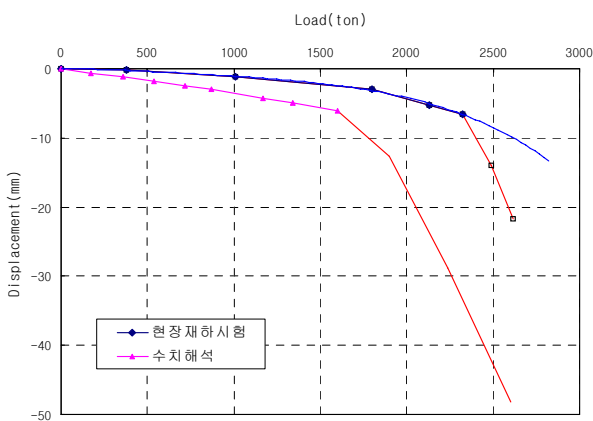
(a) A - 현장



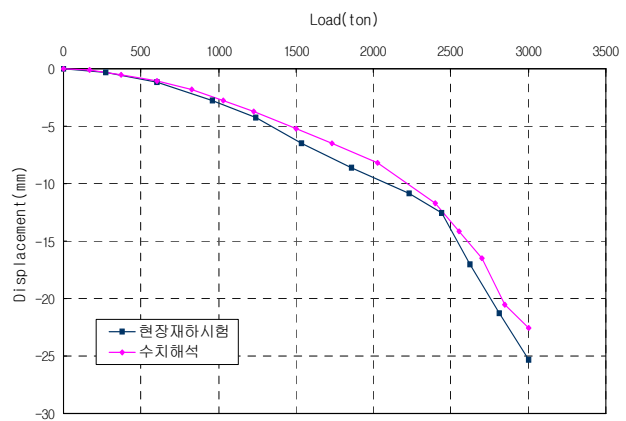
(b) B - 현장

그림 5. 하중 - 변위 곡선 (수치해석)

그림 5는 하중단계별 최대변위 곡선으로 A-현장 Barrette말뚝의 경우 2,600ton 재하시 선단변위는 6.1mm, 주변변위 48.1mm의 결과는 보이고 있다. 이는 현장 시험 하중과 비교하였을 때 선단의 변위는 비슷한 결과를 보이고 있으나 주변부의 변위는 시험결과보다 더 크게 발생하였다. 이는 Interface의 효과를 수치해석적으로 고려하였을 때 수치해석은 동일 지층에 균등하게 적용되는 반면 현장재하시험은 불균질 지층에 흙과 콘크리트 사이 interface 요소가 동일하지 않기 때문인 것으로 사려된다. B-현장은 선단변위 22.5mm, 주변변위 10.0mm의 결과를 보이고 있으면 이는 현장시험 결과와 유사한 것으로 나타났다.



(a) A - 현장



(b) B - 현장

그림 6. 증가하중침하곡선 (현장재하시험/수치해석)

그림 6은 현장 양방향재하시험결과와 수치해석으로 구한 선단부 및 주변부 하중-변위 곡선을 증가하중침하곡선으로 변환시켜준 결과를 보이고 있다. 이 결과 양방향재하시험을 통한 증가하중침하곡선과 수치해석으로 모사한 증가하중침하곡선간 하중-침하 거동이 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 양방향재하시험을 흙과 말뚝사이 interface 요소를 고려한 수치해석으로 모사한 결과가 하중-변위 곡선을 예측 하는데 유용한 것으로 보여진다.

## 4. 결론

비교적 비슷한 지층을 가진 두개의 현장에 실물크기의 Barrette말뚝에 양방향재하시험을 수행한 결과와 이를 토대로 결과를 검증하기 위한 3차원 유한요소해석을 수행한 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 각 현장별 Barrette 말뚝의 지지력-침하특성을 살펴본 결과 항복이나 극한을 보이지 않고 최대 하중 이하 지속적인 침하를 보여 최대 하중 이상의 하중을 지지할 것으로 판단되며 설계하중이상의 허용 지지력을 확보하는 것으로 나타났다.

(2) 각 현장별 Barrette 말뚝의 등가하중침하곡선을 분석한 결과 선단부와 주변부의 상대적 강성에 의한 변위차로 변곡점이 발생하나 이는 등가하중곡선 작도시 나타나는 현상으로 실제 항복과는 관련성이 적은 것으로 나타났다.

(3) 양방향재하시험을 모사한 유한요소해석을 실시하였으며 실제 현장재하시험시 나타난 등가하중곡선과 비교한 결과 유사한 거동을 보이고 있으며 이는 Barrette 말뚝 시공상 주변부에 나타나는 Filler cake를 interface 요소로 모델링하여 주변부 하중-변위양상과 잘 부합하는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 구조물기초 설계기준 해설 (2003), 건설교통부.
2. 임태경 (2006), “오스터버그셀을 이용한 현장타설말뚝의 축하중전이거동에 관한 연구”, 경성대학교 석사학위 논문.
3. 권오성, 최용규, 권오균, 김명모 (2006), “양방향 말뚝재하시험을 이용한 말뚝의 하중-변위곡선 추정 방법”, 한국지반공학회논문집, 제22권, 4호, 한국지반공학회, pp.11-19.
4. Fellenius, B. H., Altaee, A., Kulesza, R. & Hayes, J. (1999). "O-Cell Testing And FE Analysis of 28-M-Deep Barrette in Manila, Philippines" *J. Geotech. and Geoenviron. Engng.*, ASCE 125, No. 7, 566-575