

## 오스트버그식 재하시험을 이용한 대구경 현장타설말뚝의 축하중전이거동

### Axial Load Transfer Behavior of a Large Diameter Drilled Shaft by Osterberg Type Load Test

임태경<sup>1)</sup>, Tae-Kyung Lim, 정창규<sup>2)</sup>, Chang-Kyu Jung, 정성민<sup>3)</sup>, Sung-Min Jung, 최용규<sup>4)</sup>, Yongkyu Choi,

<sup>1)</sup> (주)헤인이엔시 지반공학부, Geotechnical Division, HYEIN E&C Co. Ltd.

<sup>2)</sup> 부산광역시 건설본부 교량 1과장, Manager, Construction Headquarter, Busan metropolitan City

<sup>3)</sup> 경성대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Kyungsoong University

<sup>4)</sup> 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsoong University

**개요(SYNOPSIS)** : In this test, two separated oil jacks were placed at bottom of drilled shaft(D = 1,500mm, L = 33m), and maximum upward and downward load of 1,250 tonf was applied. Also, the deformable rod sensors were placed on each level, and axial strains at each level were measured.

Because the side skin friction and the end bearing could be measured separately in the Osterberg type pile load test, this test might be more economical and more applicable than a conventional static pile load test. Thus, if this Osterberg type pile load test could be established during design stage, construction cost might be reduced and its application for large diameter pile could be enhance greatly.

**주요어(Key word)** : two separated oil jacks, Osterberg type pile load test, large diameter piles

## 1. 서론

오스트버그식 재하시험은 별도의 반력 재하장치 없이도 주변마찰력과 선단지지력을 분리하여 측정할 수 있으므로 종래의 말뚝정재하시험에 비해 경제적인 시험방법이며 현장에서의 적용성도 높을수 있다.

본 연구에서는 국내에서 최초로 직경 1,500mm, 길이 33m인 대구경 현장타설말뚝의 하부에 분리된 복수 유압잭을 설치하여 최대하중 1,250 tonf까지 하중을 재하하는 오스트버그식 재하시험을 실시하였다. 이 때 재하하중은 상향과 하향으로 동일하게 작용되었다. 또한 각 깊이 별로 변형봉센서를 설치하여 말뚝체의 축방향 변형율을 측정하였고, 그 결과를 이용하여 대구경 현장타설말뚝의 축하중전이거동을 분석하였다.

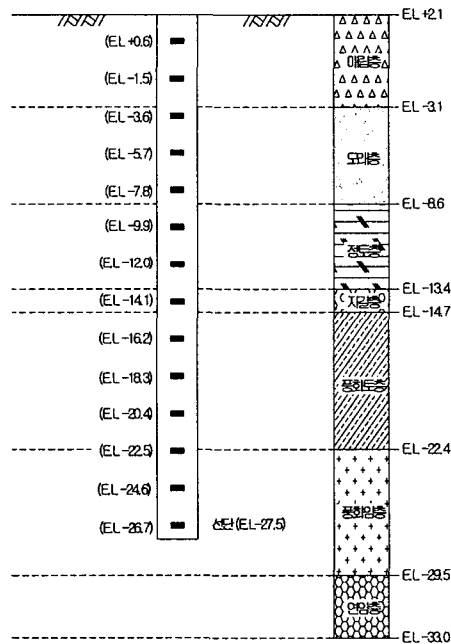
## 2. 시험말뚝 제원 및 지층 개요

시험말뚝 및 하중재하수단인 복수 유압잭의 제원은 표 1과 같다. 각 지층의 하중 지지 거동을 측정하

기 위해 축하중 계측용 센서를 설치하였으며, 시험말뚝의 센서위치와 지층구분은 그림 1에 나타내었다. 말뚝부재에 발생하는 축방향 변형율을 측정하기 위하여 경성대학교 지반공학연구실에서 개발한 완전결선형 회로를 가진 전기저항식 변형봉 센서(출원번호 :10- 2000-0035816)를 설치하였고, 설치 위치와 수량은 시험말뚝의 길이, 시험하중의 크기, 지반조건 등을 고려하여 결정하였다. 또한 복수 유압잭을 그림 2와 같이 철근망 하부에 설치하여 하중을 재하하였다.

표 1. 시험말뚝 및 복수 유압잭 제원

시험위치		본선구간 교대 A1
말뚝형식		대구경 현장타설말뚝
시험말뚝제원	직경	1,500 mm
	길이	33 m
시험하중		2,500 tonf
설계하중		320 tonf
복수 유압잭	용량	650 tonf × 2 EA
	치수	O.D.430×H595 mm
	최대변위	250 mm



재 료 표					
설치부위	품 명	기호	산출근거	계	비고
철근망	철근 센서	■	14개소 × 4방향 = 56개	102개	20% 할증
	콘크리트 센서		14개소 × 2방향 = 28개		

그림 1. 지층구분 및 계측센서 위치도

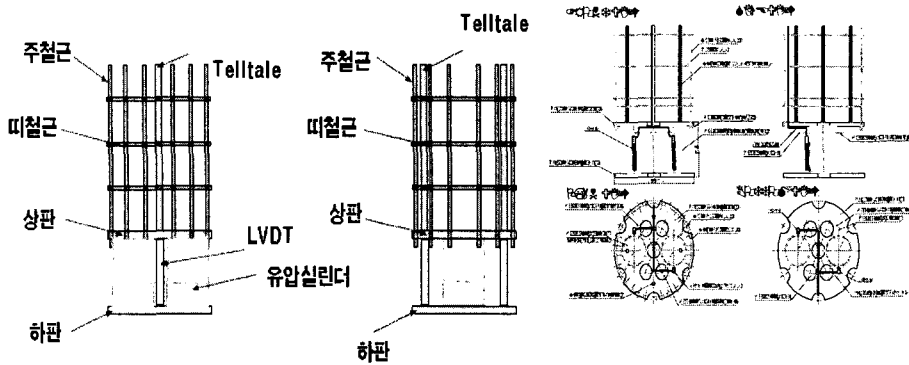


그림 2. 복수 유압식재 설치도 및 상세도

### 3. 오스트버그식 재하시험

오스트버그식 재하시험은 급속재하시험방법(ASTM D1143, 1981)에 따라 수행하는 것이 일반적이나, 다른 방법으로 시험도 가능하다(Schmertmann & Hayes, 1997).

본 시험에서는 ASTM에서 규정하고 있는 완속표준재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태로 실시하였고, 하중재하 주기는 표 2와 같다.

각 위치별로 설치된 변형봉센서의 응력은 TDS-302로 측정하였고, 실시간으로 데이터를 모니터링하면서 하중을 제어하였다.

표 2. 하중재하 주기

주기	재하단계
①	0t → 62.6t → <b>125t</b> → 62.5t → 0t → Next Cycle
②	0t → 125t → 187.5t → <b>250t</b> → 187.5t → 125t → 0t → Next Cycle
③	0t → 125t → 250t → 312.5t → <b>375t</b> → 312.5t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle
④	0t → 125t → 250t → 375t → 437.5t → <b>500t</b> → 437.5t → 375t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle
⑤	0t → 125t → 250t → 375t → 500t → 562.5t → <b>625t</b> → 562.5t → 500t → 375t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle
⑥	0t → 125t → 250t → 375t → 500t → 625t → 687.5t → <b>750t</b> → 687.5t → 625t → 500t → 375t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle
⑦	0t → 125t → 250t → 375t → 500t → 625t → 750 → 812.5t → <b>875t</b> → 812.5t → 750t → 625t → 500t → 375t → 250t → 125t → 0t → Next Cycle
⑧	0t → 125t → 250t → 375t → 500t → 625t → 750 → 875 → 937.5t → <b>1000t</b> → 937.5t → 875t → 750t → 625t → 500t → 375t → 250t → 125t → 0t → End

### 3. 축하중전이 분석

#### 3.1 하중-변위 곡선

그림 3은 오스트버그식 재하시험의 하중단계별 주기재하 결과를 도시한 것으로 복수 유압재 하판의 하향변위와 상판의 상향변위를 직접 측정하였다. 본 시험에서는 시험최대하중인 1,250 tonf에서도 주변 마찰력과 선단지지력 모두 항복을 보이지 않아 최대 재하가능하중인 1,250 tonf 재하 후 시험을 종료하였다. 시험최대하중에서의 하향변위는 약 15 mm, 상향변위는 약 10 mm가 발생하였다.

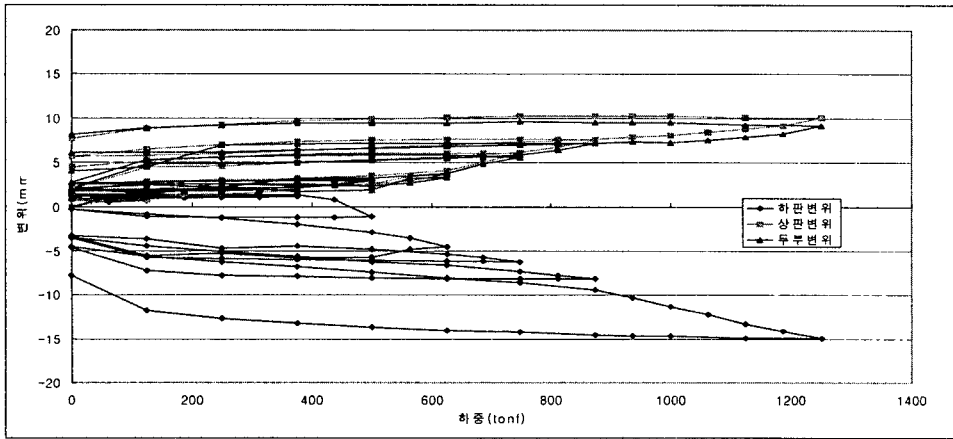


그림 3. 주기재하(Cyclic loading) 결과

그림 4는 각 주기에서의 최대하중과 변위의 관계를 도시한 것으로 약 400 tonf까지의 하판의 변위가 상향인 것을 볼 수 있는데, 이는 측정과정에서 발생한 오차인 것으로 판단되었다.

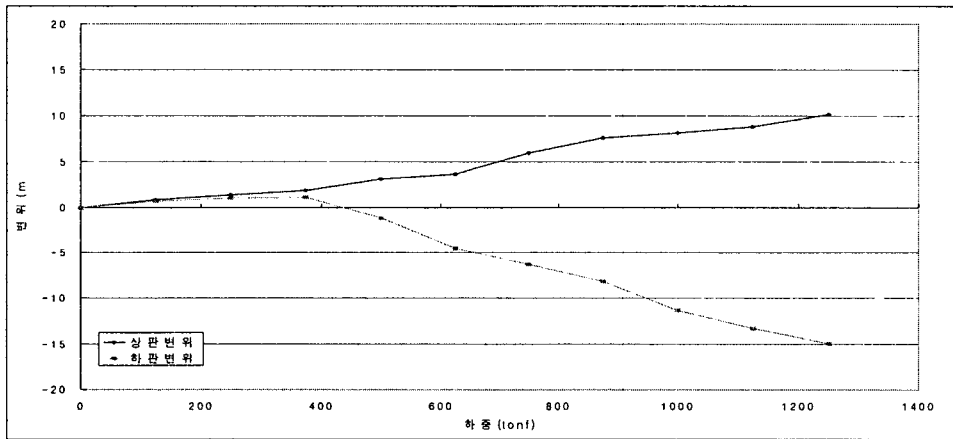


그림 4. 각 주기별 최대하중-변위 곡선

#### 3.2 등가 하중-침하량 곡선(Equivalent pile head load-settlement curve)

그림 5는 각 주기별 최대하중 - 변위 곡선(그림 4 참조)에서 약 400 tonf까지 발생한 하판의 변위를 외삽법에 의해 수정한 곡선이다. 주변마찰력과 선단지지력 모두 탄성거동을 하고 있음을 알 수 있고, 수

정된 하중-변위 곡선에서의 선단지지력은 962 tonf, 주변마찰력은 1,250 tonf로 나타났다.

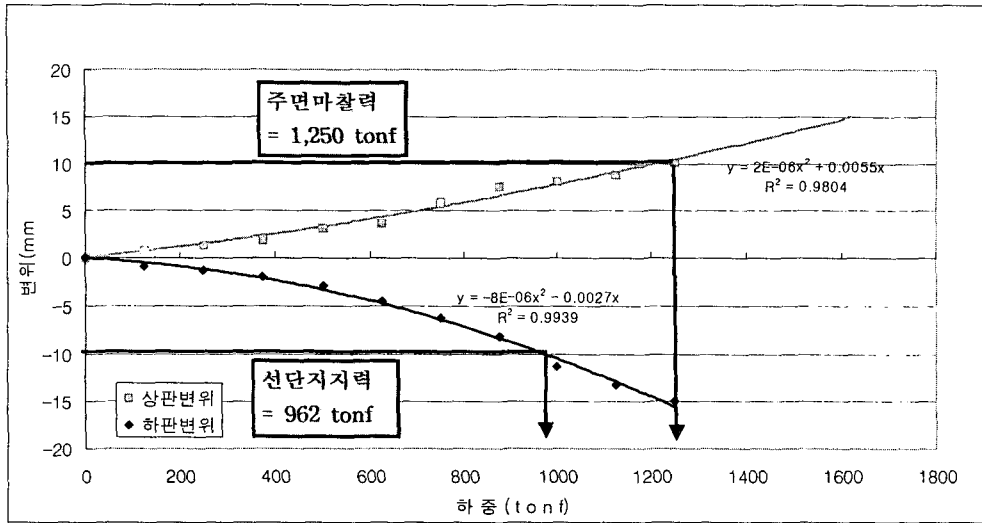


그림 5. 수정된 하중 - 변위 곡선

오스트버그식 재하시험에서 얻은 상향과 하향의 하중 - 변위 곡선을 이용하여 등가 하중 - 침하량 곡선을 도시하면 그림 6과 같다.

말뚝 몸체의 변형을 무시하면 말뚝두부에 하중재하시 주변과 선단에서의 침하량은 같다. 따라서 오스트버그식 재하시험에서 구한 두 개의 하중-변위 곡선(그림 5 참조)에서 같은 변위량에서의 선단지지력과 말뚝의 부양자중(Buoyant weight of the test pile)을 뺀 순주변마찰력을 합하면 말뚝두부에 작용된 전체하중이 되고, 등가 하중 - 침하량 곡선상의 한 점으로 나타낼 수 있다. 같은 방법으로 여러 점을 구하여 도시하면 그림 6과 같은 등가 하중 - 침하량 곡선을 그릴 수 있다(Osterberg, 1998).

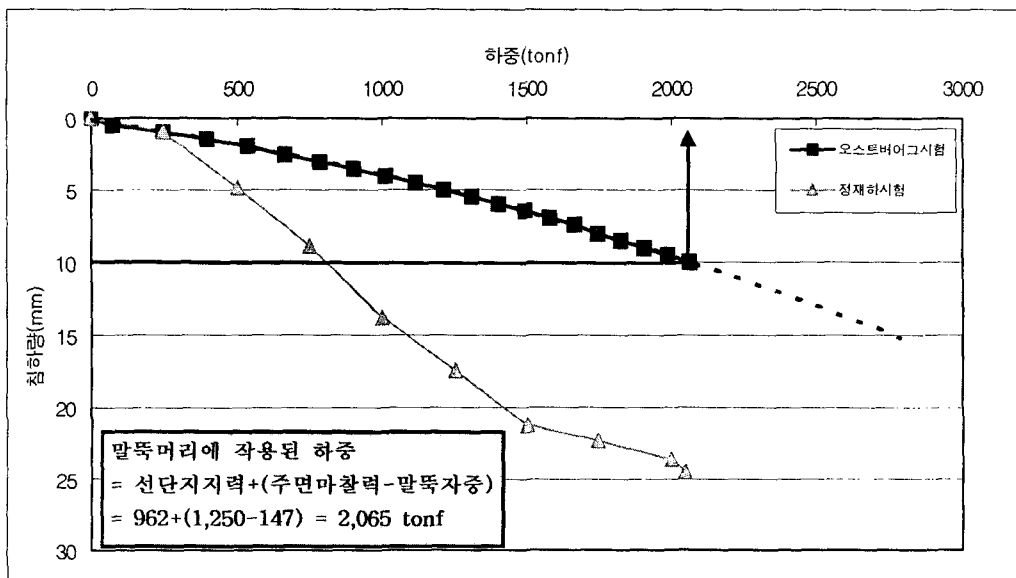


그림 6. 등가 하중-침하량 곡선

오스트버그식 재하시험 결과, 말뚝두부에 작용된 하중은 2,065 ton이고 이때 말뚝의 침하량은 10mm로 판단되었다. 그림 6에서도 알 수 있듯이 2,065 ton에서도 지반의 항복은 나타나지 않았고 침하량 또한

일반적인 말뚝의 침하량인 25.4mm 이내이므로, 안전율 2.0을 고려하면 본 시험말뚝의 최소허용지지력은 1,032 tonf 이상으로 결정할 수 있었다. 참고로 시험말뚝의 설계하중 320 tonf 이었다. 그리고 풍화암층이 지지층으로서의 역할을 충분히 할 수 있음을 알 수 있었다. 그림 6에서 보듯이 말뚝머리 하중 - 침하량 관계는 다소 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 오스트버그식 재하시험에서 침하량이 작게 나타나고 있는데, 이에 대한 보정이 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

## (2) 축하중전이거동

오스트버그식 재하시험은 선단지지력과 주변마찰력이 상호간에 반력에 의해 실시되는 시스템이므로 주변마찰력만으로도 분포도를 깊이에 따라 도시할 수 있다.

말뚝 깊이별로 구해진 마찰력을 각 하중단계별로 도시하면 그림 7과 같고, 이 분포도를 이용하여 각 지층에서 발휘된 평균 마찰응력을 구하면 그림 8과 같이 도시할 수 있다.

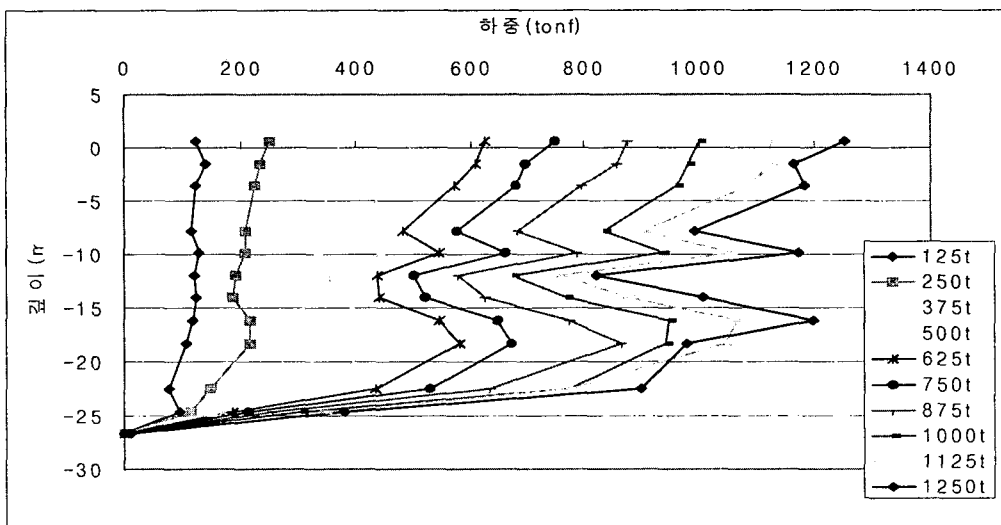


그림 7. 하중단계별 말뚝축하중 분포도

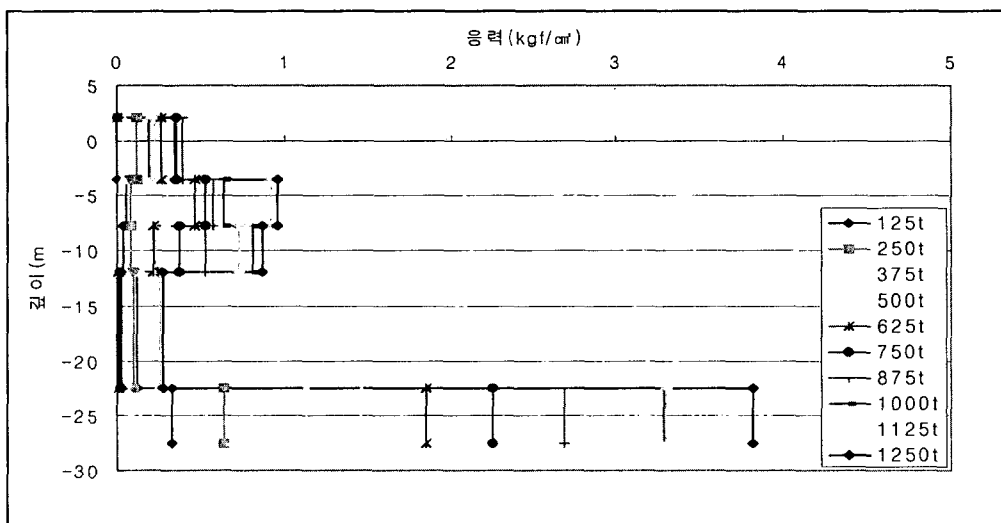


그림 8. 각 지층에서 발휘된 평균 마찰응력

시험최대하중인 1,250 tonf 재하시 하부지지층인 풍화암층에서의 최대 평균 마찰응력은  $3.81 \text{ kgf/cm}^2$

로 나타났다.

### 3.3 말뚝깊이에 따른 마찰력 분포도

기 시행된 정재하시험과 오스트버그식 재하시험에서 나타난 주변마찰력의 분포를 하중단계별로 각각 도시하면 그림 9와 같다. 그림 9에서 알 수 있듯이 정재하시험과 오스트버그식 재하시험 모두 하부지지층인 풍화암층에서 평균마찰응력이 최대로 발휘되는 것을 볼 수 있었고, 전체적인 주변마찰력의 분포양상이 매우 유사하게 나타났다.

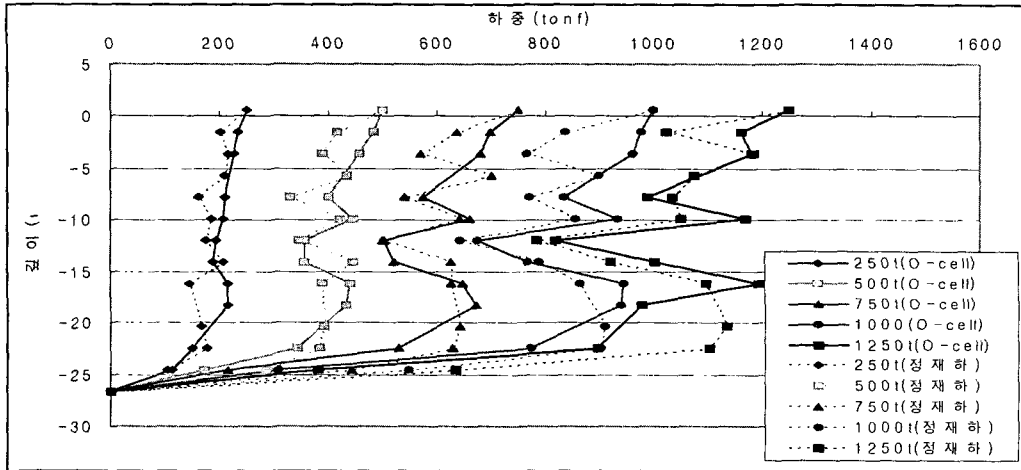


그림 9. 하중단계별 주변마찰력 분포도의 비교

하중단계별 마찰력 분포도를 참고로 각 지층에서 발휘된 평균마찰응력을 도시하여 그림 5.10에 나타내었다. 그림 5.10에 나타난 결과를 살펴보면 시험최대하중인 1,250 tonf 재하시 지지층인 풍화암층에서의 평균마찰응력은 정재하시험에서  $3.76 \text{ kgf/cm}^2$ , 오스트버그식 재하시험에서  $3.81 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타나 매우 유사함을 알 수 있다. 또한 각 지층에서 발휘된 평균마찰응력도 매우 유사하게 나타났다.

정재하시험과 오스트버그식 재하시험의 마찰력 분포에 대한 비교에서는 두 시험의 결과가 매우 유사하다는 결론을 얻었지만, 이것은 한 사례에 대한 비교이므로 앞으로 더 많은 실험이 수행되어 보다 객관적인 비교가 이루어 져야 될 것으로 생각된다.

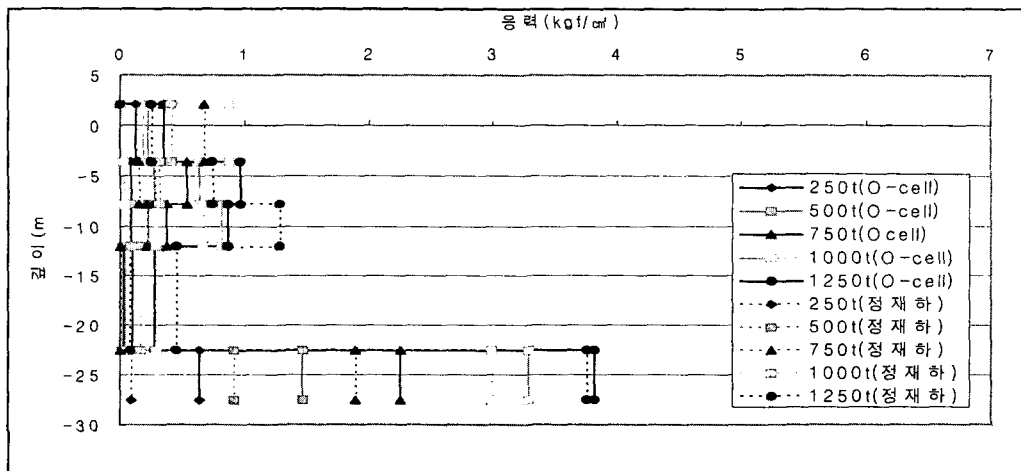


그림 10. 각 지층에서 발휘된 평균 마찰응력 비교

## 6. 결론 및 제언

본 연구에서는 대구경 현장타설말뚝에 대한 오스트버그식 재하시험을 수행하였고, 동시에 축방향 변형율을 측정된 결과를 이용하였으며 정재하시험 결과와 비교하였다.

- (1) 직경 1,500mm, 길이 33m인 현장타설말뚝에 대한 오스트버그식 재하시험 결과, 시험최대하중인 2,500 tonf에서도 선단이나 주면의 항복은 나타나지 않았다. 최대시험하중 재하시의 등가 하중 - 침하량 곡선에서 말뚝두부에 작용된 총하중은 2,065 tonf이었고, 이 때의 침하량은 10mm로 나타났다. 따라서 최소허용지지력은 안전율 2.0을 고려하여 1,032 tonf 이상인 것으로 판단되었다.
- (2) 말뚝머리 하중 - 침하량 관계는 다소 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 오스트버그식 재하시험에서 침하량이 작게 나타나고 있는데, 이에 대한 보정이 이루어져야 할 것으로 판단되었다.
- (3) 시험최대하중 1,250 tonf 재하시 지지층인 풍화암층에서의 평균마찰응력은  $3.81 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타났는데 이는 정재하시험의  $3.76 \text{ kgf/cm}^2$ 와 매우 유사함을 알 수 있다. 또한 각 지층에서 발휘된 평균마찰응력도 매우 유사하게 나타났다. 정재하시험과 오스트버그식 재하시험의 마찰력 분포에 대한 비교에서는 두 시험의 결과가 매우 유사하다는 결론을 얻었지만, 이것은 한 사례에 대한 비교이므로 앞으로 더 많은 실험이 수행되어 보다 객관적인 비교가 이루어져야 될 것으로 생각된다.
- 3) O-cell 시험은 별도의 장치 없이도 주면마찰력과 선단지지력을 분리하여 측정이 되어서므로 말뚝의 지지력을 신속하고 정확하게 판단할 수 있다. 따라서 설계단계에서부터 계획을 수립하여 대구경 현장타설말뚝에 대하여 오스트버그식 재하시험을 실시한다면 재하용량을 크게 늘릴 수 있어 공사비 절감효과를 극대화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 부산광역시 건설본부 (1999), “부산정보단지 진입도로(수영3호교) 기본 및 실시설계 지반조사 보고서”, 1999. 12.
5. ASTM D-1143 (1981), “Standard Test Method for Piles under Static Axial Compressive Load.”
8. Osterberg, J. O. (1984), “A New Simplified Method for Load Testing Drilled Shafts”, FOUNDATION DRILLING, Vol.XXIII, No.6 (July/August, 1984), ADSC.
9. Osterberg, J. O. (1998), “The Osterberg Load Test Method for Bored and Driven Piles - The First Ten Years” Presented at 7th International Conference & Exhibition on Piling and Deep Foundations, Deep Foundations Institute, Vienna, Austria, June 1998.
10. Osterberg, J. O. (2001), “The Osterberg Load Cell as a Research Tool”, Presented at 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Istanbul, Turkey, August 2001.
11. Osterberg, J. O. (2001), “Load Testing High Capacity Piles What Have We Learned?”, Published in the Proceedings of the 5th International Conference on Deep Foundation Practice Singapore, April, 2001.
12. Osterberg, J. O. (1998), “Value Engineering - A Great Concept Why Isn't It Used More Frequently?”, Presented at the ORVSS XXX (Ohio River Valley Soils Seminar), Cincinnati, Ohio, October, 1999.
13. Osterberg, J. O. (1999), “What Has Been Learned About Drilled Shafts from the Osterberg Load Test”, Presented at the Deep Foundations Institute Annual Meeting, October, 1997.
14. Schmertmann, J. H. & Hayes, J. A. (1997), “The Osterberg Cell and Bored Pile Testing - A Symbiosis”, Proceedings: 3rd International Geotechnical Engineering Conference, Cairo University, Cairo, Egypt. January, 1997.