



P17을 시공하고 선단유압재하시험을 실시하여 말뚝선단의 지지력과 주변 지반의 마찰력을 파악하기로 하였다. 그리고 시험도중 극히 낮은 하중단계에서 선단지반의 파괴가 유발되어 선단지반에 그라우팅 보강을 실시하였고, 보강 전후의 말뚝의 선단지지력 및 주변마찰지지력에 대하여 비교 분석 하였다.

## 2. 선단유압재하시험

### 2.1 선단유압재하시험의 개요

선단유압재하시험은 미국 노스웨스턴 대학의 명예 교수인 Jory O. Osterberg 박사에 의해 고안된 오스트버어그 셀 시험을 대체하기 위하여 국내의 기술로 개발된 시험방법이다. 종래의 말뚝 정재하시험의 경우 시험하중만큼의 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력이 필요하고, 이런 반력하중을 사용할 수 없을 경우 말뚝정재하시험을 할 수 없다. 그러나 선단유압재하시험은 유압식 잭(Jack)을 말뚝선단 가까이 설치하여 선단지지력과 주변마찰력에 의해 하중재하에 필요한 반력을 상호간에 마련해 주는 방법이므로 별도의 하중재하장치가 필요 없고, 좁은 시험공간이나 경사진 곳에서도 적용이 가능하다.

그림 1은 종래의 말뚝정재하시험방법과 선단유압재하시험방법의 차이를 보여준다.

말뚝정재하시험의 경우, 말뚝두부에 재하되는 하중  $P$ 는 주변마찰력  $F$ 와 선단지지력  $Q$ 에 의해 지지되고, 이 두 지지력을 분리하기 위해서는 말뚝의 하중전이측정이 반드시 수행되어야 한다.

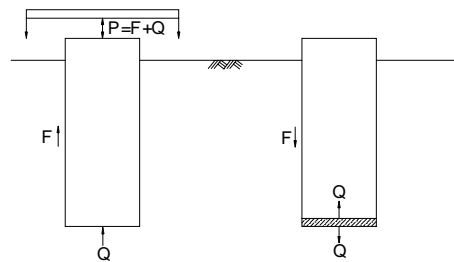


그림 1. 종래의 말뚝정재하시험과 오스터버어그 셀 시험의 비교(Osterberg, 1998)

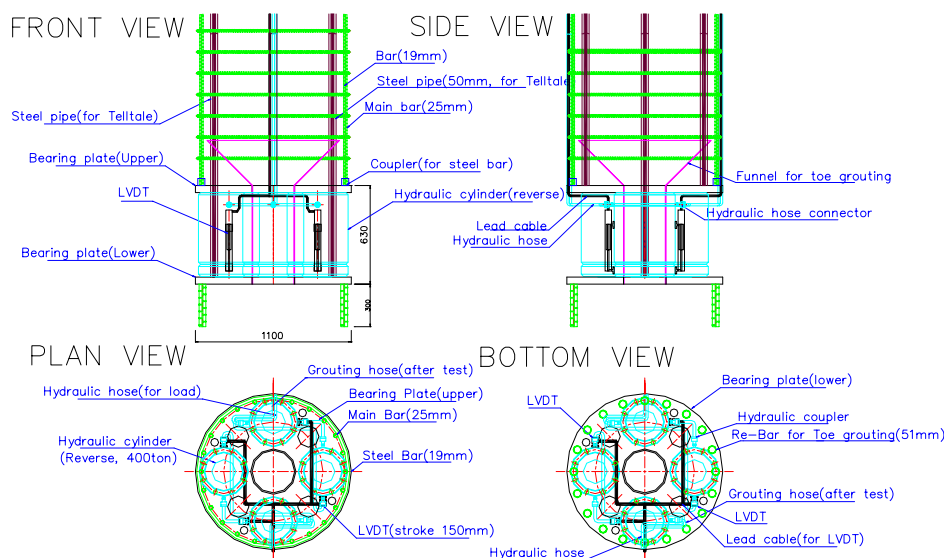


그림 2. 선단유압 재하장치 설치 상세 도면(경성대학교 공학기술연구소, 2000)

선단유압재하시험의 경우, 지상에서 유압을 가하면 유압재의 하부는 하향으로 움직여 선단지지력을 발생시키고 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 말뚝에 주면마찰력을 발생시킨다. 또한 말뚝두부가 아닌 선단이나 말뚝의 임의 위치에서 하중을 재하하므로 주면마찰력 F와 선단지지력 Q는 서로에 대해 반력으로 작용하게 된다. 이런 이유로 선단유압재하시험에서는 별도의 하중재하장치가 필요치 않는 것이다.

선단유압 재하장치의 설치부위는 실험목적에 따라 달라진다. 본 시험에서는 일반적으로 사용하는 방법인 선단부에 설치하는 것으로 하였다. 그림 2와 같이 본 시험에 사용된 재하장치는 최대용량이 600tonf인 실린더 4개가 사용되었고, 재하장치를 철근망 최하부에 고정시키고 변위봉(telltale)을 상판과 하판에 각각 2개씩 설치하여 상판 및 하판의 변위를 측정하였다. 또 상판과 하판 사이에는 LVDT를 설치하여 실린더의 변위를 측정하였다.

## 2.2 시험방법

본 선단유압재하시험에서는 ASTM(1994)에서 규정하고 있는 완속표준재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태로 실시한다. 각 위치별로 설치된 축하중계측용 센서의 변형율은 TDS-302로 측정하였고, 실시간으로 데이터를 모니터링하면서 하중을 제어하였다.

## 3. 시험말뚝의 제원 및 지층개요

### 3.1 시험말뚝의 제원

표 1. 시험말뚝의 제원

시험말뚝명	P16	P17
말뚝형식	현장타설말뚝	현장타설말뚝
직경(mm)	1,500	1,500
말뚝길이(m)	41.5	41.5
시험하중(tonf)	600 (미보강시) 800 (보강시)	600 (미보강시) 750 (보강시)

### 3.2 지층개요

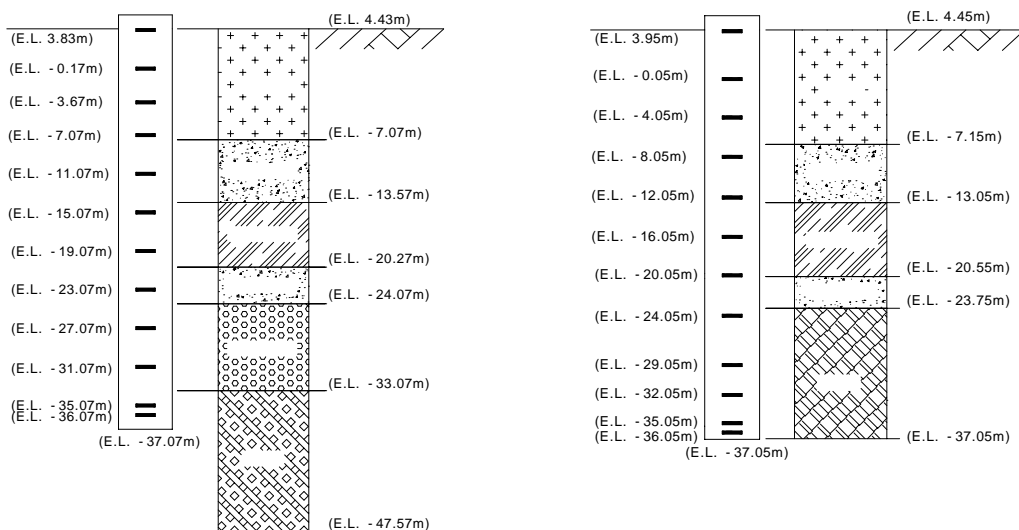


그림 3. 지층구분 및 시험말뚝 센서설치 위치도(부산광역시 건설본부, 2002)

지반조사결과(P16-1)에 의하면, P16의 경우 지층은 매립토층, 실트질모래층, 실트질점토층, 실트질모래층, 자갈질모래층, 단층대층으로 구성되어 있었고, P17의 경우 지층은 매립토층, 실트질모래층, 실트질점토층, 실트질모래층, 단층대층으로 구성되어 있었다.

본 시험에서 사용한 현장타설말뚝에는 말뚝부재에 발생하는 축력을 측정하기 위해서 각 설치단면에 철근센서를 90° 방향으로 4개씩, 콘크리트센서를 90° 방향으로 4개씩을 각각 설치하였다. 계측센서의 설치위치도 및 지층분포도는 그림 3에 나타내었다.

#### 4. 하중 - 침하량 곡선 분석

그림 4 ~ 9는 P16과 P17의 시험결과에 의한 각 주기별 최대하중 - 변위 곡선과 추정된 등가 하중 - 침하량 곡선을 도시한 것으로 선단유압재 하판의 하향변위와 상판의 상향변위를, 변위봉을 이용하여 직접 구할 수 있었다. 본 시험에서는 P16과 P17의 그라우팅 미보강시와 보강시로 나누어서 시험하였으며 각 주기별 최대하중 - 변위 관계에서 말뚝의 보강시가 미보강시보다 하부침하량이 현저하게 줄어든 것을 알 수 있었다.

표 2에 최대재하하중시 침하량 결과에 대하여 요약하였다.

표 2. 최대재하하중시 침하량 결과 요약

분석기준	말뚝명	P16		P17	
		미보강시	보강시	미보강시	보강시
최대재하하중(tonf)		600	800	600	750
상판변위(mm)		1.6	1.3	1.2	3.9
하판변위(mm)		170.2	109.5	172.7	86.6

#### 4.1 P16의 경우

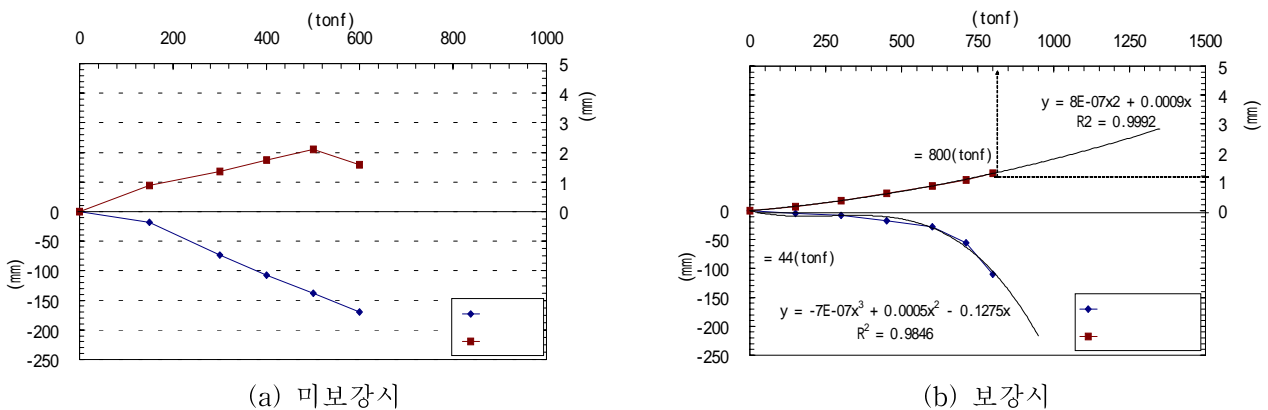
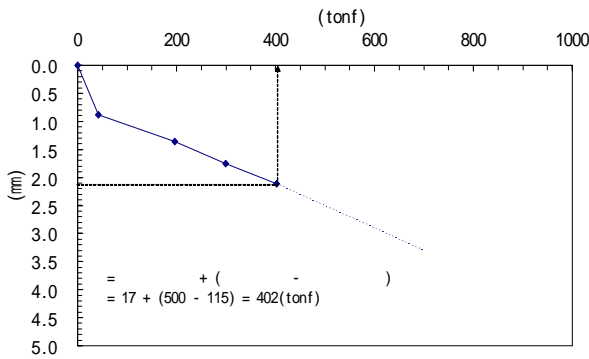


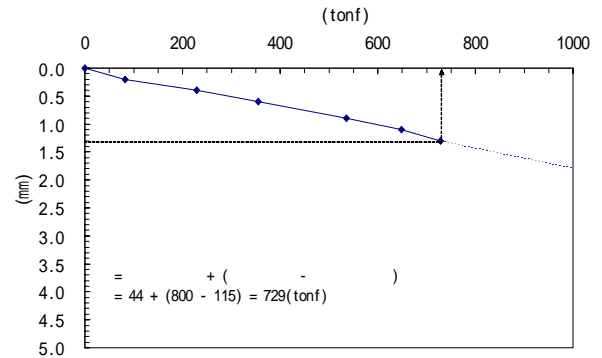
그림 4. 각 주기별 최대하중 - 변위 곡선(P16의 경우)

그림 4는 선단 보강시 각 주기별 최대하중 - 변위 관계곡선을 도시한 것으로 상판변위보다 하판 변위가 현저하게 큰 것을 알 수 있었다. 여기서, 말뚝의 주면마찰력에 비해 선단지지력은 매우 작은 것으로 추정할 수 있었다. 본 시험에서는 선단 보강시 시험최대하중인 800 tonf에서 하향변위는 약 109.5 mm, 정도 발생하여 선단지반이 파괴된 것으로 볼 수 있었으나 상향변위는 1.3mm정도 발생하여 마찰력은 충분히 발휘되지 않은 것으로 볼 수 있었다. 선단부 보강시 등가 하중 - 침하량 곡선에 의하면 말뚝두부에 작용된 최대 하중은 729 tonf이고 말뚝의 침하량은 1.3 mm로 판단되었다. 여기서, 등가 하중이 작용하중보다 증가하지 못하고 오히려 감소하였는데, 그것은 선단지지력이 매우 작게

발휘되어 부양자중보다 작은 값으로 나타났기 때문이다. 그림 5(b)에서 알 수 있듯이 729 tonf 에서는 지반은 항복되지 않았으나 그 이후 재하단계에서는 선단지반의 항복이 유발될것으로 추정되었다.



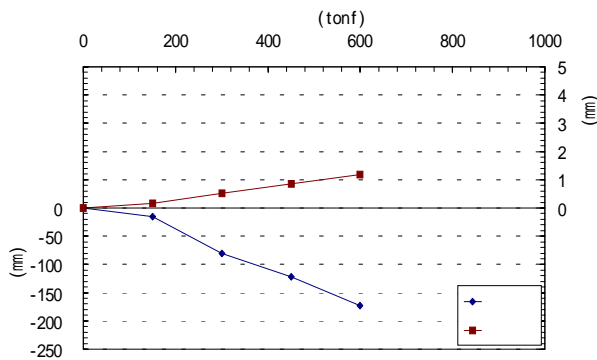
(a) 미보강시



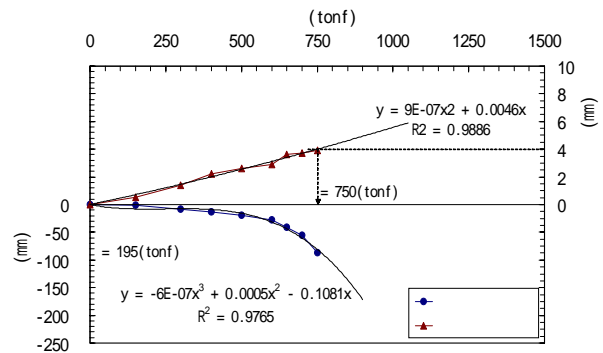
(b) 보강시

그림 5(b) 보강시 등가 하중 - 침하량 곡선

## 4.2 P17의 경우



(a) 미보강시



(b) 보강시

그림 6. 각 주기별 최대하중 - 변위 곡선(P17의 경우)

그림 6은 선단 보강시 각 주기별 최대하중 - 변위 관계곡선을 도시한 것으로 상판변위보다 하판 변위가 현저하게 큰 것을 알 수 있었다. 여기서, 말뚝의 주면마찰력에 비해 선단지지력은 매우 작은것으로 추정할 수 있었다. 본 시험에서는 선단 보강시 시험최대하중인 750 tonf에서 하향변위는 약 86.6 mm, 정도발생하여 선단지반이 파괴된 것으로 볼수 있었으나 상향변위는 3.9 mm정도 발생하여 마찰력은 충분하게 발휘되지 않은 것으로 볼수 있었다. 선단부 보강시 등가 하중 - 침하량 곡선에 의하면 말뚝 두부에 작용된 최대 하중은 830 tonf이고 말뚝의 침하량은 3.9 mm로 판단되었다. 여기서, 등가 하중이 작용하중보다 증가하지 못하고 오히려 감소하였는데, 그것은 선단지지력이 매우 작게 발휘되어 부양자중보다 작은 값으로 나타났기 때문이다. 그림 7(b)에서 알 수 있듯이 830 tonf 에서는 지반은 항복되지 않았으나 그 이후 재하단계에서는 선단지반의 항복이 유발될것으로 추정되었다.

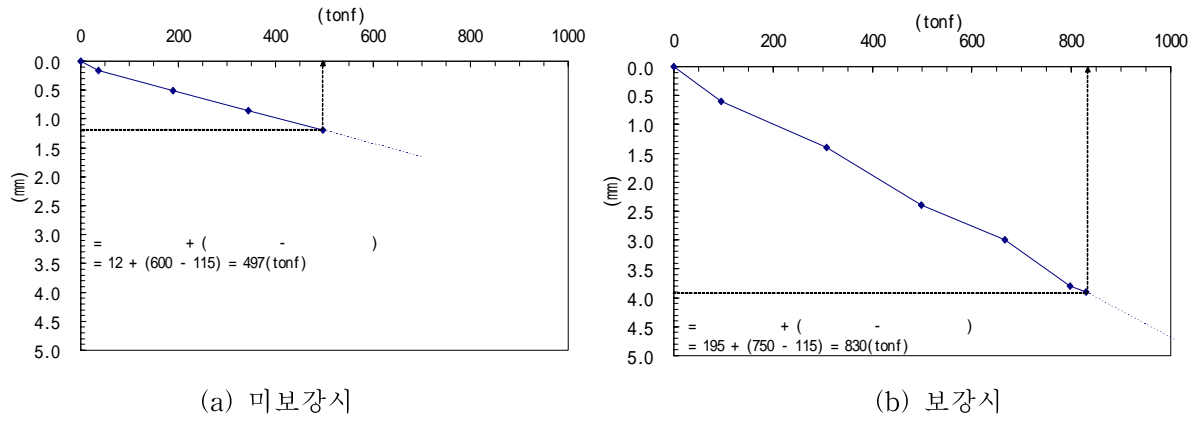


그림 7. 등가 하중 - 침하량 곡선

### 4.3 선단지지력 분석

선단하중 - 침하량 관계에서는 P16의 미보강시와 보강시, P17의 미보강시와 보강시로 나누어서 나타내었으며 각각 말뚝의 보강시가 미보강시 보다 그라우팅에 의한 선단지지력이 크게 증가한 것을 알 수 있었다.

표 3. 선단허용지지력 분석 결과 요약

판별법	말뚝명	P16			P17		
		미보강시 (tonf)	보강시		미보강시 (tonf)	보강시	
			항복지지력 (tonf)	허용지지력 (tonf)		항복지지력 (tonf)	허용지지력 (tonf)
침하량 기준 (25.4mm)		170	-	550	175	-	575
P - S		-	645	323	-	640	320
log P - log S		-	645	323	-	665	333
S - log t		-	800	400	-	700	350
$\Delta S / \log(\Delta t) - P$		-	680	340	-	680	340
De Beer		-	700	350	-	680	340
Chin		-	909	455	-	899	450

선단 보강시 P16, P17의 허용선단지지력에 대한 침하량은 각각 약 10mm, 약 11mm 정도이었다.

표 4. 선단지지력 분석 결과 요약

선단지지력	말뚝명	P16		P17	
		미보강시	선단 보강시	미보강시	선단 보강시
항복선단지지력		-	645tonf	-	640tonf
허용선단지지력 (항복선단지지력/2)		170tonf	323tonf	175tonf	320tonf
선단침하량		25.4mm	약 10mm	25.4mm	약 11mm

## 5. 말뚝깊이에 따른 말뚝축하중 분포도

선단유압재하시험에 작용된 축하중 분포를 그림 8에 나타내었다. 선단유압재하시험에서는 선단지지력과 주변마찰력이 각각 측정되어지므로 그림 8은 선단지지력은 제외한 주변마찰력에 의한 하중단계별 축하중분포를 나타내었으며 주변마찰력의 대부분을 선단유압재과 인접한 지층에서 받고 있는 것으로 판단되었다.

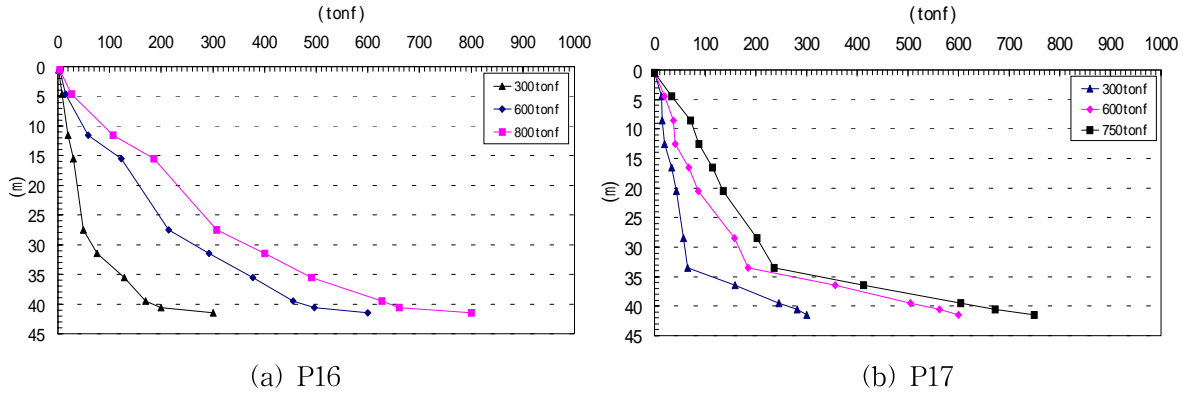


그림 8. 하중단계별 말뚝축하중 분포도

## 6. 결론 및 제언

선단유압재하시험은 종래의 말뚝정재하시험에 비해 매우 경제적이고, 합리적인 시험방법이다. 또한 적은 공간에서의 시험이 가능하고 안전하므로 현장에서의 적용성도 매우 높다. 본 연구에서는 선단유압재하시험 및 하중전이측정을 하여 시험말뚝(P16, P17)의 선단지지력을 측정하였다.

### 6.1 결론

- (1) 선단유압재하시험에서 P16, P17의 선단보강 그라우팅 전의 하중 - 침하량 곡선에서는 말뚝 두부의 변위량은 미소하였으나 선단이 과도하게 침하하여 600 tonf이 시험최대하중이었으며 선단의 허용지지력을 침하량 기준 25.4mm으로 하여 P16에서는 170 tonf, P17에서는 175 tonf으로 결정하였다.
- (2) P16, P17의 선단보강 그라우팅 후의 하중 - 침하량 곡선에서는 보강전 보다 선단의 침하량이 현저하게 줄어들었으며 시험최대하중은 P16에서 800 tonf, P17에서 750 tonf이었다. 선단항복하중은 여러 분석법 중에서 가장 작은 값으로 결정하였으며 P16에서는 645 tonf, P17에서는 640 tonf으로 결정할 수 있었다.
- (3) 선단 보강시 선단유압재하시험에 의한 하중 - 침하량 곡선으로부터 추정된 등가 하중 - 침하량 곡선에서는 P16의 경우 등가 하중 729 tonf 작용시 침하량은 1.3 mm 로 판단되었고, P17의 경우 등가하중 830 tonf 작용시 침하량은 3.9 mm로 판단되었다. 그리고 P16과 P17에서 작용된 최대등가하중 작용시 항복의 경향은 보이지 않았다.
- (4) P16, P17 보강시의 시험최대하중인 800tonf, 750tonf일 때의 주변마찰력의 분포를 보면 P16의 경우 시험하중의 대부분을 선단유압재과 인접한 말뚝하부의 풍화암층, 자갈질모래층이 분담하고 있는 것을 알 수 있고 P17 역시 하부층인 단층대층, 풍화암층에서 대부분의 마찰력을 분담하고 있는 것을 알 수 있었다.

## 6.2 제언

- (1) 말뚝선단 지지층 변경이 곤란할 경우 말뚝시공시 선단부 보강 그라우팅을 실시하여 말뚝의 과도한 침하를 방지하는 것이 바람직할 것으로 판단되었다.
- (2) 선단유압잭을 이용한 정재하시험은 별도의 장치 없이도 주변마찰력과 선단지지력을 분리하여 측정이 되어서므로 말뚝의 지지력을 신속하고 정확하게 판단할 수 있다. 따라서 설계단계에서부터 계획을 수립하여 대구경 현장타설말뚝에 대하여 선단유압재하시험을 실시한다면 공사비 절감효과를 극대화시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

## 감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구 센터의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 경성대학교 공학기술연구소 (2000). “광안대로 건설공사의 대구경 말뚝 정재하시험과 수치해석을 통한 말뚝기초의 안정성 검토 보고서”, 2000.2
2. 부산광역시 건설본부 (2002). “부산남항대교 건설공사(2공구) 육상부 시공보링 지반조사보고서”, 2002. 11.
3. ASTM D1143-81(Reapproved by 1994) (1994). “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load”.
4. 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.