

양방향 선단재하시험을 이용한 단층파쇄대에 시공된 대구경 현장타설말뚝의 선단지지력 측정 연구

A Study on the Measurement of End Bearing Capacity for Large Diameter Drilled Shaft Constructed in Fault Zone Using the Static Bi-directional End Loading Test

정 창 규¹ Jung, Chang-Kyu

정 성 민² Jung, Sung-Min

황 근 배² Hwang, Geun-Bac

최 용 규³ Choi, Yong-Kyu

Abstract

In the land section of marine bridge construction site, to confirm the end bearing of large diameter drilled shaft constructed in the fault zone which was discovered unexpectedly, the bi-directional end loading tests were performed. The objectives of this study are to confirm the end bearing of the pile constructed in fault zone and the increasing effect of end bearing after grouting the base ground beneath the pile toe. After grouting the pile base ground, the settlement of pile base decreased considerably and the pile base resistance increased more than twice.

요 지

해상교량건설 현장의 육상구간에서 예기치 않게 발견된 단층파쇄대에 시공된 대구경 현장타설말뚝의 선단지지력을 확인하기 위하여 양방향 선단재하시험을 실시하였다. 본 연구의 목적은 단층파쇄대에 시공된 대구경 현장타설말뚝에 재하시험을 실시하여 단층파쇄대에서의 선단지지력을 확인하고, 그 후 말뚝 선단 하부지반에 보강 그라우팅을 실시하여 선단보강에 의한 선단지지력 증가효과를 확인하는 것이다. 선단보강 그라우팅 후 선단지지력은 2배 이상 증가하였으며 보강전 보다 선단의 침하량이 현저하게 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

Keywords : End bearing capacity, Fault zone, Large diameter drilled shaft, Static bi-directional end loading test

1. 서 론

말뚝기초는 상부구조물의 하중을 안전하게 하부 지층으로 전달하기 위해 사용되는 깊은 기초의 한 형태이다. 말뚝에 작용하는 하중은 선단지지력과 주면마찰력에 의해 지지되어 지는데 이러한 말뚝기초의 지지력 및 침하량을 추정할 수 있는 방법으로는 이론적·경험적 방법들이 제안되어 있다.

현재 사용되고 있는 말뚝의 극한연직지지력 결정방법 중 가장 신뢰성이 있는 말뚝정재하시험은 말뚝에 실하중을 가하여 실제 상부구조물이 건설되었을 때를 재현하므로 신뢰도가 높다는 장점이 있으나, 하중재하를 위한 (사하중 혹은 반력 시스템) 방법선정 및 설치방법, 재하시험 그리고 넓은 시험부지 필요 등의 제약이 많이 받는다.

반면, 본 연구에서 적용된 양방향 선단재하시험에서

1 정희원, 부산광역시 감사관실 (Member, Inspection Dept., Busan metropolitan City)

2 정희원, 경성대학교 공학기술연구소 (Member, Research Institute of Engrg. & Technology, KyungSung Univ.)

3 정희원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng, KyungSung Univ., ykchoi@ks.ac.kr)

는 말뚝의 선단부에 특수하게 설치된 복수의 유압잭을 말뚝 시공시 설치하여 하중재하 수단으로 사용하므로, 별도의 반력 시스템이 필요치 않고 좁은 공간에서도 시험이 가능하다. 따라서 큰 재하용량이 필요한 대구경 말뚝에서는 정재하시험의 효용성이 낮으며, 이러한 경우에 양방향 선단재하시험의 적용성이 높다.

본 연구에서는 위치별로 파쇄정도가 큰 차이를 보이고 있는 단층파쇄대에 시공된 현장타설말뚝에 양방향 선단재하시험을 실시하였다. 그러나 시험도중 극히 낮은 하중단계에서 선단지반의 파괴가 유발되어 선단지반에 그라우팅 보강을 실시하였고, 보강 전·후의 말뚝의 지지력을 분석하였다. 또한 보강후의 축하중분포도 및 주변마찰력분포도를 작성하여 현장타설말뚝의 거동을 분석하였다.

2. 양방향선단재하시험의 개요 및 특징

양방향 선단재하시험은 미국 노스웨스턴 대학의 명예 교수인 Osterberg 박사(Osterberg, J. O, 1998)에 의해 고안된 오스트버어그 셀 시험을 대체하기 위하여 국내의 기술로 개발된 시험방법이다.

양방향 선단재하시험은 오스트버어그 셀 시험에서 대구경 말뚝의 굴착 후 바닥 상태가 불량할 경우 발생하는 과도한 선단변위 및 하중재하장치의 수평성에 대한 문제점을 보완하기 위하여 재하장치의 하판에 받침대용 강봉을 설치하였으며, 재하장치 하부의 콘크리트 충진을 확보하기 위하여 상판에 트레미관을 유도할 수 있는 강철재의 깔대기를 설치하였다. 또한 재하시 상·하판의 기울어짐을 방지하고 하중을 균등하게 작용시킬 수 있도록 정다각형으로 복수 유압잭을 설치하였으며, 복수의 유압잭에 개별적으로 압력을 제공하고 회수할 수 있도록 하였다.

종래의 말뚝 정재하시험의 경우 시험하중만큼의 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력이 필요하고, 이런 반력하중을 사용할 수 없을 경우 말뚝정재하시험을 할 수 없다. 그러나 양방향 선단재하시험은 유압식 잭(Jack)을 말뚝선단부에 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 양방향 선단재하시험방법의 차이를 보여준다. 말뚝정재하시험의 경우, 말뚝두부에 재하되는 하중 P는 주변마찰력 F와 선

단지지력 Q에 의해 지지되고, 주로 주변마찰력에 의한 하중지지양상이 측정되어진다. 또한 주변마찰력과 선단지지력을 분리 측정하기 위하여 말뚝의 하중전이측정이 반드시 수행되어야 한다.

양방향 선단재하시험의 경우, 지상에서 유압을 가하면 유압잭의 하부는 하향으로 움직여 선단지지력을 발생시키고 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 말뚝에 주변마찰력을 발생시킨다. 또한 말뚝두부가 아닌 선단이나 말뚝의 임의 위치에서 하중을 재하하므로 주변마찰력 F와 선단지지력 Q는 서로에 대해 반력으로 작용하게 된다. 이런 이유로 양방향 선단재하시험에서는 별도의 하중재하장치가 필요치 않는 것이다.

양방향 선단재하장치의 설치부위는 실험목적에 따라 달라진다. 본 시험에서는 일반적으로 사용하는 방법인 선단부에 설치하는 것으로 하였다. 본 시험(그림 2)에 사용된 재하장치는 최대용량 600tonf인 유압잭 4개를 사

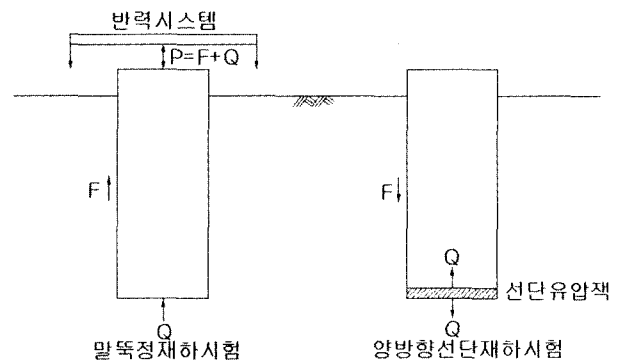


그림 1. 종래의 말뚝정재하시험과 양방향 선단재하시험의 비교(정창규, 2004)

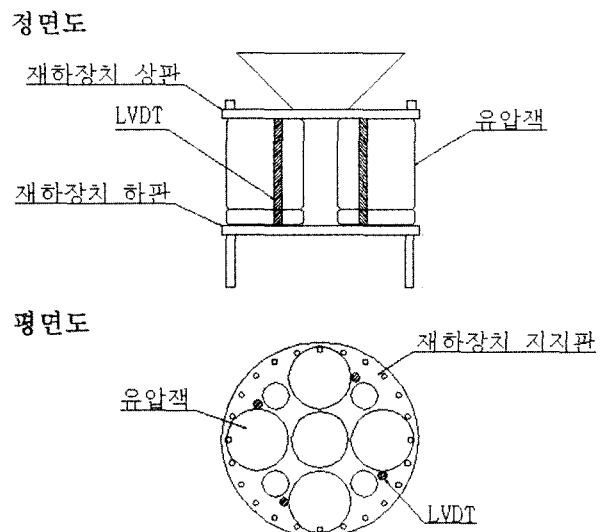


그림 2. 양방향 선단재하장치 설치도(경성대학교 공학기술연구소, 2000)

용하였고, 재하장치를 철근망 최하부에 고정시키고 변위봉(Telltale)을 상판과 하판에 각각 2개씩 설치하여 상판 및 하판의 변위를 각각 측정하였다. 또 상판과 하판 사이에는 LVDT를 설치하여 상·하변위의 합을 측정하였다.

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

3. 지반조건 및 시험말뚝개요

3.1 지반조건

본 연구는 부산OO대교 2공구 현장에 시공된 직경 1000 mm 대구경 현장타설말뚝(P16과 P17)에 대하여 시험을 수행하였으며, 시험말뚝의 시공위치는 그림 3과 같다. 수험 대상 위치의 지층분포는 그림 4와 같다. 그림 4에

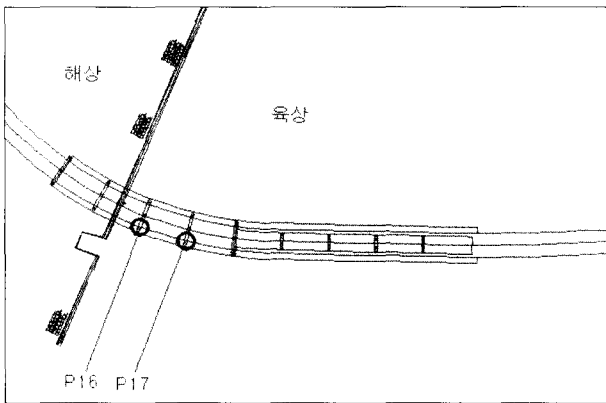


그림 3. 시험현장 위치도

서 보는 바와 같이 상부에 매립토가 약 7.0m 정도 분포하고 있으며, 하부에 실트질 모래, 실트질 점토, 실트질 모래 순으로 분포하고 있으며, 그 하부에는 심하게 파쇄된 단층대가 60~70m까지 깊게 분포되어 있었다. 그러나 단층파쇄대의 N 치는 50이상 이었다.

3.2 시험말뚝의 제원

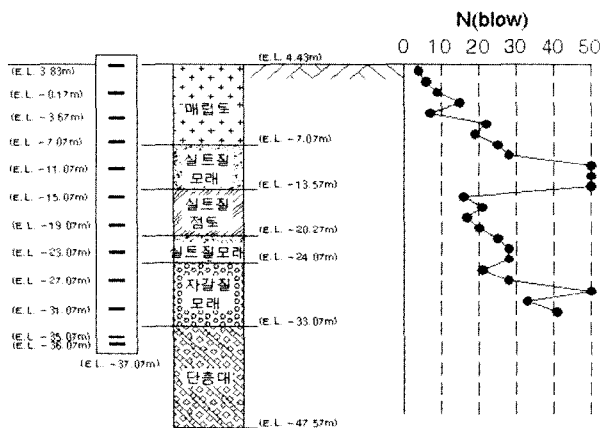
본 연구에서 사용한 직경 1500mm의 현장타설말뚝의 제원은 표 1과 같다. P16말뚝과 P17말뚝의 길이는 41.5m로 하였으며 단층파쇄대에 각각 4, 13.3m 만큼 소켓되어 시공되었다. 원 설계에서 말뚝의 시공길이를 41.5m로 정하였으나, 시공시추조사에서 지층구조가 크게 상이하게 나타나 말뚝의 시공조건이 크게 상이하게 되었다. 또한 시험말뚝에는 축하중전이를 측정하기 위하여 그림 4와 같이 철근용 센서와 콘크리트 센서를 각 설치 위치에서 90°방향으로 4개씩 설치하였다.

3.4 현장재하시험 절차

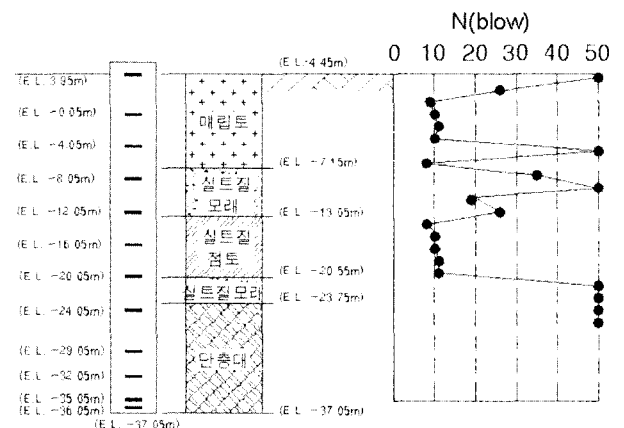
본 연구에서 수행한 양방향 선단재하시험은 아래의 순서로 수행하였다.

표 1. 시험말뚝의 제원

시험말뚝명	P16	P17
말뚝형식	현장타설말뚝	현장타설말뚝
직경(mm)	1,500	1,500
말뚝길이(m)	41.5	41.5
축하중전이 센서 설치	콘크리트용과 철근용 센서 4방향 설치	콘크리트용과 철근용 센서 4방향 설치



(a) P16



(b) P17

그림 4. 지층구분 및 시험말뚝 센서설치 위치도(부산광역시 건설본부, 2002)

- ① 축하중계측용 센서 설치 및 양방향 선단재하시험 장치 조립
- ② 양방향선단재하시험용 시험말뚝 시공
- ③ 1차 재하시험 실시 ; 선단부 변위과다 발생으로 600 tonf까지 재하
- ④ 재하하중제거
- ⑤ 그라우팅 보강 ; 시험말뚝의 선단지반을 선단에서 두 부까지 연결되어 있는 변위봉 케이싱을 이용하여 그라우팅 작업을 실시하며, 그라우팅을 실시하기전 압력수를 주입하여 공극안의 이물질을 제거하고, 한쪽 케이싱으로 제를 7kgf/cm^2 의 압력으로 주입하고 다른 쪽 케이싱에서 그라우트제가 나오면 그라우팅 완료
- ⑥ 시간경과에 따른 그라우트 공시체의 강도 확인
- ⑦ 2차 재하시험 실시

4. 하중 - 침하량 곡선 분석

양방향 선단재하시험은 정재하시험과는 하중재하방식이 상이하여 말뚝거동이 차이점을 보이는데, 이는 다음과 같다.

양방향 선단유압재하시험에 의한 등가하중 - 침하량 관계는 정재하시험에 의한 하중 - 침하량 관계에 비하여 침하량이 과소평가되어 그라우트 나타난다. 또한 축하중 분포도에서는 양방향 선단유압재하시험이 정재하시험에 비하여 주면마찰력은 유사하게 나타나지만 선단지력은 과대평가된다.

4.1 P16의 경우

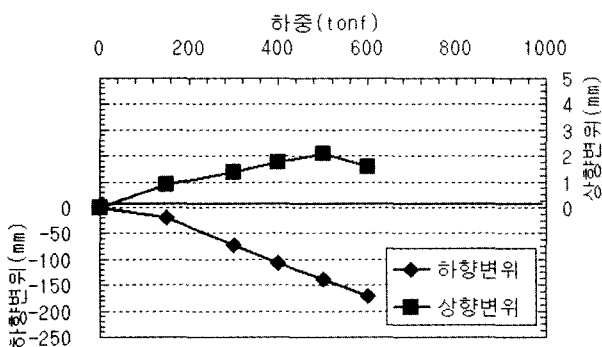
표 2에는 말뚝선단 하부지반을 그라우트로 보강한 경우와 보강하지 않은 경우에 대한 최대재하하중과 그 단

계에 대응된 상향과 하향 변위를 나타내었다. 1차 재하시험에서 발생된 상향변위는 최대 1 ~ 2mm정도 발생되었으므로(그림 5(a), 7(a) 참조), 보강그라우팅을 실시한 후 수행된 2차 재하시험에서 주면마찰력에 영향을 미칠 정도의 주변지반 교란은 발생하지 않은 것으로 판단되었다. 그러나 선단하부지반에서는 1차 재하시험시 최대 170mm정도의 하향변위가 발생하였으므로(그림 5(a), 7(a) 참조) 교란이 심하게 발생된 것으로 판단되었다. 그러나 선단하부지반은 1차 재하시험 후 보강그라우팅을 실시하였으므로 2차 재하시험시 말뚝선단 하부지반의 교란이 시험결과에 영향을 미치지 않은 것으로 볼 수 있다. 표 2와 같이 그라우트로 보강하지 않은 경우 P16과 P17 말뚝 모두 매우 큰 하향 변위 양상을 보이고 있어 지지력이 극히 작게 발휘되는 것을 알 수 있었다. 그래서 선단지반을 그라우트로 보강한 후, 그라우트의 양생 기간이 지난 후 시험 한 결과, 보강하지 않은 경우 보다 하향 변위가 크게 안정된 것으로 나타났다.

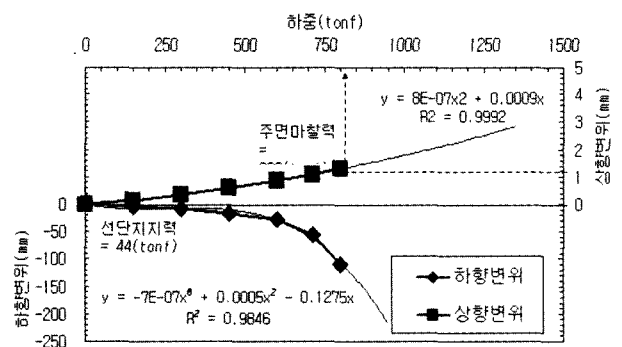
그림 5에는 P16말뚝에 대한 선단지반 미보강시와 선단지반보강시에 대한 양방향재하시험 결과를 도시하였다. 여기서, 선단지반보강시(그림 5(b)) 선단지반의 침하가 크게 안정됨으로 인하여 선단지력이 크게 증가된 것으로 나타났다. 본 시험에서는 선단 보강시 시험최대 하중인 800 tonf에서 하향변위는 약 109.5mm 정도 발생하여 선단지반이 파괴된 것으로 볼수 있었으나 상향변

표 2. 최대재하하중시 상·하부 변위량 결과 요약

분석기준	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



(a) 미보강시



(b) 보강시

그림 5. 각 주기별 최대하중 - 변위 곡선(P16의 경우)

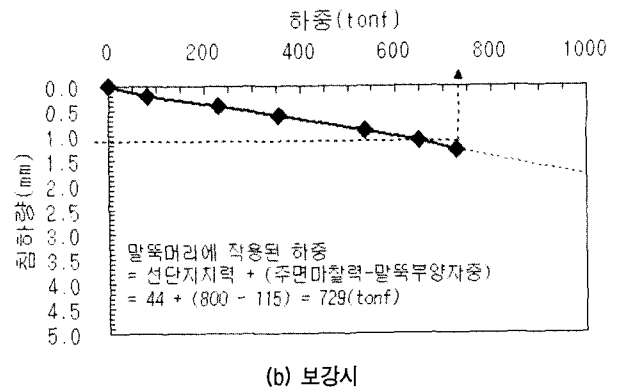
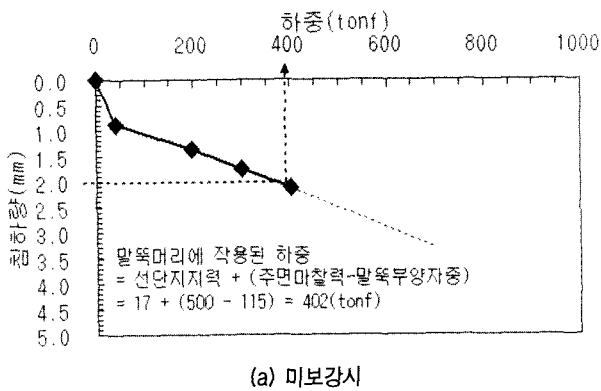


그림 6. 보강시 등가 하중 - 침하량 곡선

위는 1.3mm정도 발생하여 마찰력은 극히 일부분만 발휘된 것으로 볼 수 있었다. 선단부 보강시 등가 하중 - 침하량 곡선(그림 6)에 의하면 말뚝두부에 작용된 최대 하중은 729 tonf이고 말뚝의 침하량은 1.3mm로 판단되었다. 여기서, 등가 하중이 작용하중보다 증가하지 못하고 오히려 감소하였는데, 그것은 선단지지력이 매우 작게 발휘되어 부양자중보다 작은 값으로 나타났기 때문이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 729 tonf에서는 지반은 항복되지 않았으나 그 이후 재하단계에서는 선단지반의 항복이 유발될 것으로 추정되었다.

4.2 P17의 경우

그림 7은 P17말뚝에 대한 양방향재하시험 결과인데, 각 하중재하주기별 최대하중 - 변위 관계곡선을 도시한 것으로 상향변위보다 하향변위가 현저하게 큰 것을 알 수 있었다. 여기서, 말뚝의 주면마찰력에 비해 선단지지력은 매우 작은 것으로 추정할 수 있었다. 본 시험에서는 선단 보강시 시험최대하중인 750 tonf에서 하향변위는 약 86.6mm 정도 발생하여 선단지반이 파괴된 것으로 볼 수 있었으나 상향변위는 3.9mm정도 발생하여 마

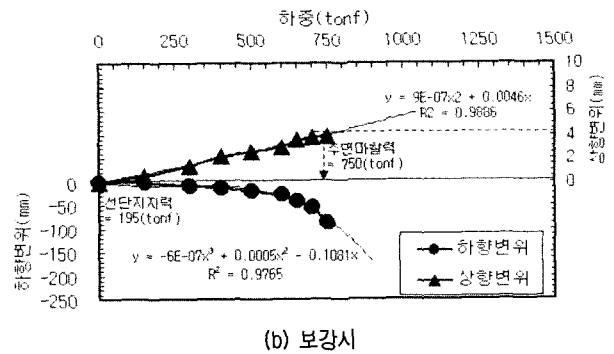
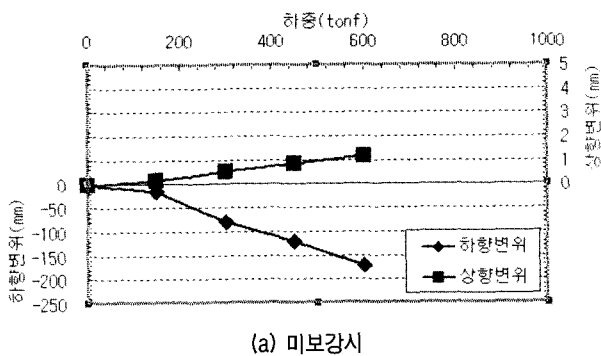


그림 7. 각 주기별 최대하중 - 변위 곡선(P17의 경우)

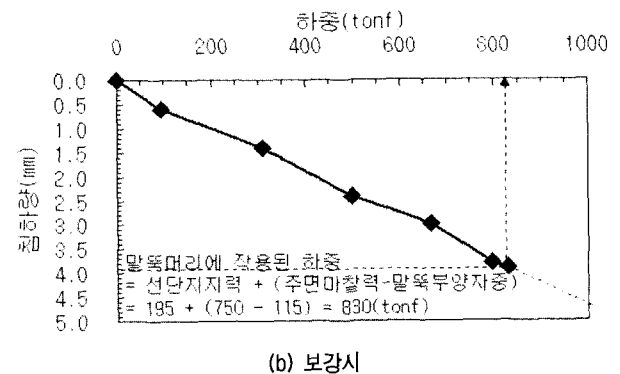
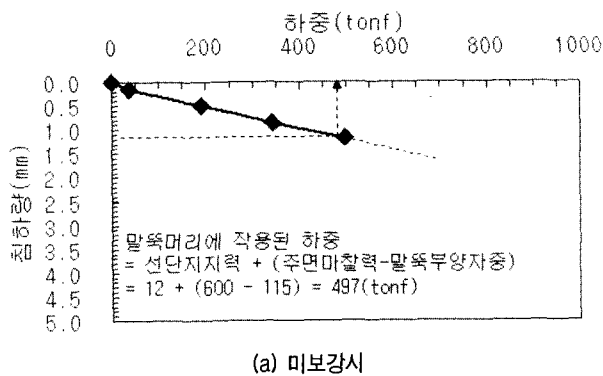
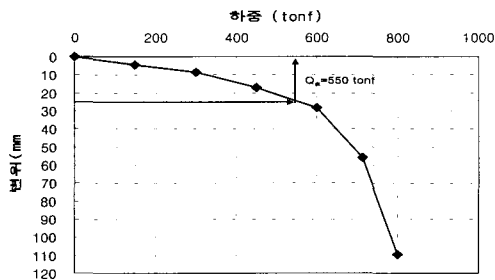


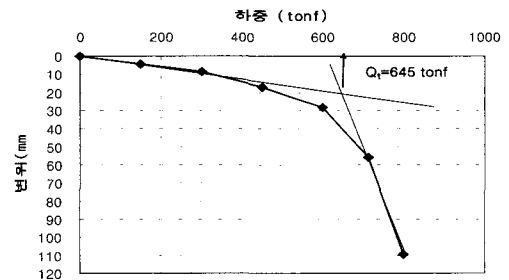
그림 8. 등가 하중 - 침하량 곡선

표 3. 허용선단지지력 분석 결과 요약

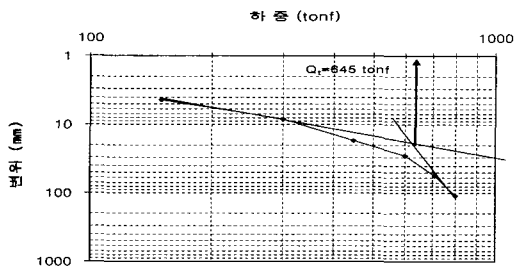
판별법	말뚝명	P16			P17		
		미보강시	보강시		미보강시	보강시	
		허용 지지력 (tonf)	항복 지지력 (tonf)	허용 지지력 (tonf)	허용 지지력 (tonf)	항복 지지력 (tonf)	허용 지지력 (tonf)
(a) 침하량 기준 (25.4mm)		170	-	550	175	-	575
(b) P - S		-	645	323	-	640	320
(c) log P - log S		-	645	323	-	665	333
(d) S - log t		-	800	400	-	700	350
(e) $\Delta S / \log(\Delta t) - P$		-	680	340	-	680	340
(f) De Beer		-	700	350	-	680	340
(g) Chin		-	909	455	-	899	450
적용치		170	645	323	175	640	320
선단침하량		25.4mm		약 10mm	25.4mm		약 11mm



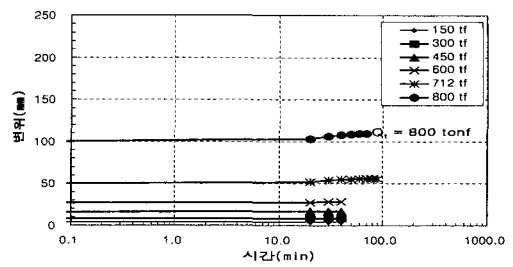
(a) 침하량 기준(25.4mm)



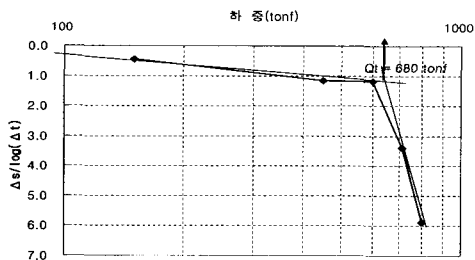
(b) P - S 판별법



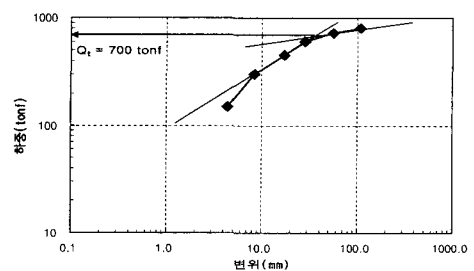
(c) log P - log S 판별법



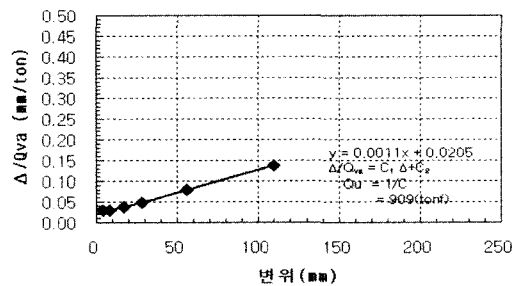
(d) S - log t 판별법



(e) $\Delta S / \log(\Delta t) - P$ 판별법



(f) De Beer 판별법



(g) Chin 판별법

그림 9. P16에 적용한 항복지지력 분석 방법들

찰력은 충분하게 발휘되지 않은 것으로 볼 수 있었다. 선단부 보강시 등가 하중 - 침하량 곡선(그림 8)에 의하면 말뚝두부에 작용된 최대 하중은 830 tonf이고 말뚝의 침하량은 3.9mm로 판단되었다. 여기서, 등가 하중이 작용하중보다 증가하지 못하고 오히려 감소하였는데, 그것은 선단지지력이 매우 작게 발휘되어 부양자중보다 작은 값으로 나타났기 때문이다. 그림 8(b)에서 알 수 있듯이 830 tonf에서는 지반은 항복되지 않았으나 그 이후 재하단계에서는 선단지반의 항복이 유발될 것으로 추정되었다.

4.3 단층파쇄대 지반의 선단지지력 분석

단층파쇄대에 지지된 현장타설말뚝에 대하여 선단을 그라우트로 보강한 경우와 보강하지 않은 경우의 선단지지력을 여러 가지 판별법에 의하여 분석한 결과를 표 3에 나타내었다. 대표적으로 P16에서 적용한 분석방법들에 의한 판정결과를 그림 9에 수록하였다. 여기서 각 분석방법들 중에서 최소치를 허용선단지지력으로 채택하였으며 따라서, 선단 그라우트 보강시 P16과

P17 말뚝의 허용 선단지지력은 각각 323 tonf와 320 tonf이었다.

5. 말뚝깊이에 따른 외주면마찰력 분포도

단층파쇄대에 근입된 현장타설말뚝의 양방향 선단재하시험시 발생하는 주변마찰력 분포도는 그림 10과 같으며, 지층별 발휘되는 평균 마찰응력 분포도는 그림 11과 같다. 그림 10과 그림 11에서 보는 바와 같이 대부분의 주변마찰력은 단층파쇄대 지층에서 받고 있는 것을 알 수 있었다. 이것은 단층파쇄대의 압축지지능력은 떨어지지만, 말뚝 표면과 단층 파쇄대 사이의 마찰력은 상당히 크게 발휘될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

P16과 P17에 대한 주변마찰응력과 변위 관계인 t-z 곡선을 그림 12에 나타내었다. 그림 12에서 알 수 있듯이 단층파쇄대층에서는 다소 큰 주변마찰응력이 나타나고 있으나, 각 지층의 주변마찰력은 모두 탄성적인 거동을 보이고 있으므로 실제로는 이것보다 더 큰 마찰저항을 발휘할 수 있을 것으로 판단되었다.

그림 13에는 양방향 선단재하시험의 축하중 분포도

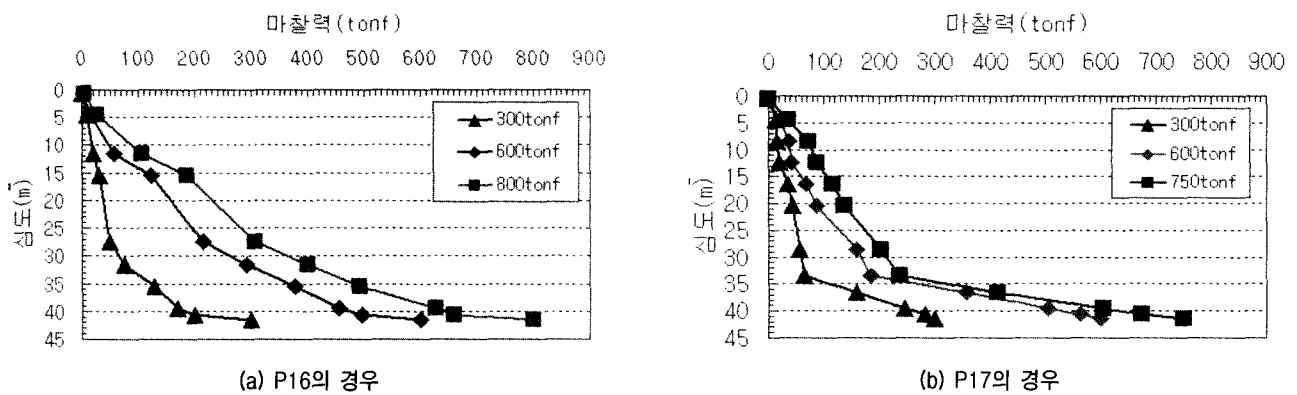


그림 10. 하중단계별 주변마찰력 분포도

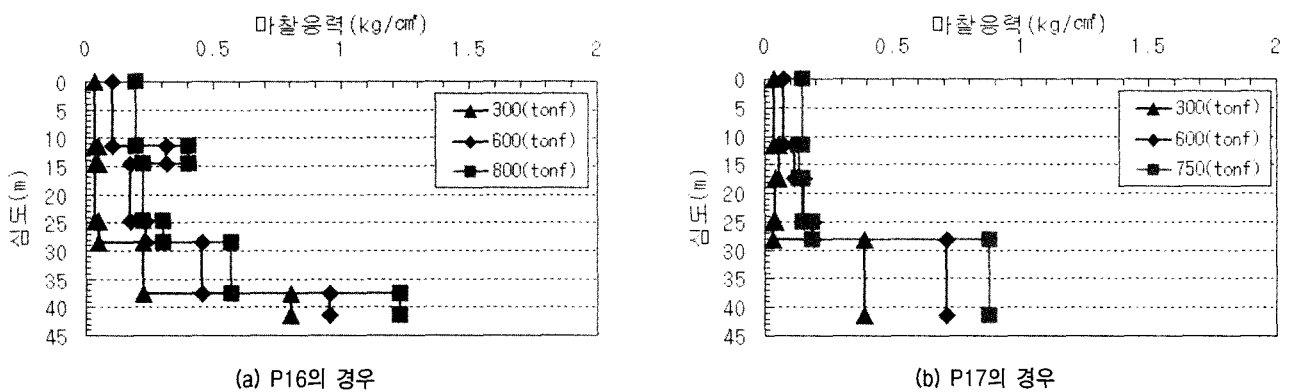
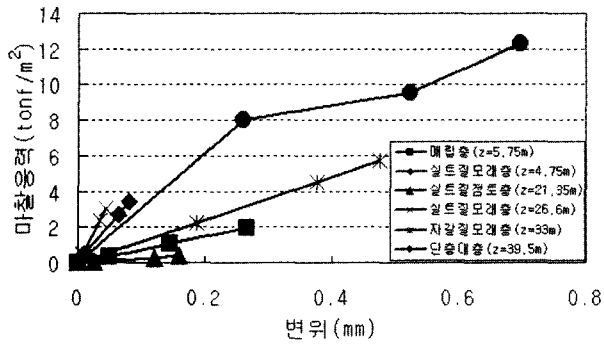
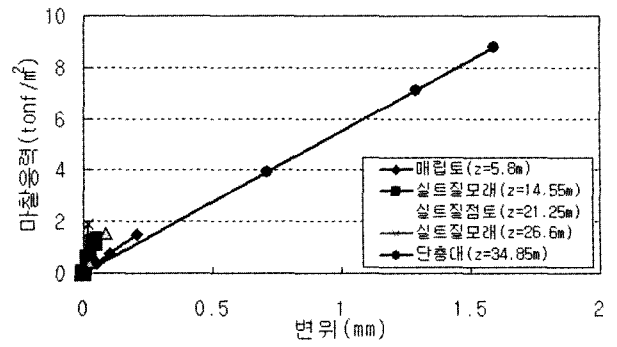


그림 11. 지층별 발휘된 평균 마찰응력

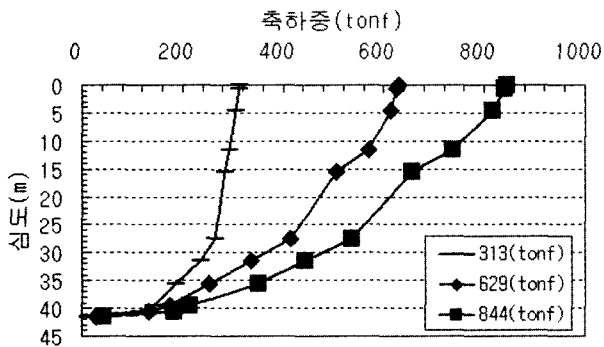


(a) P16의 경우

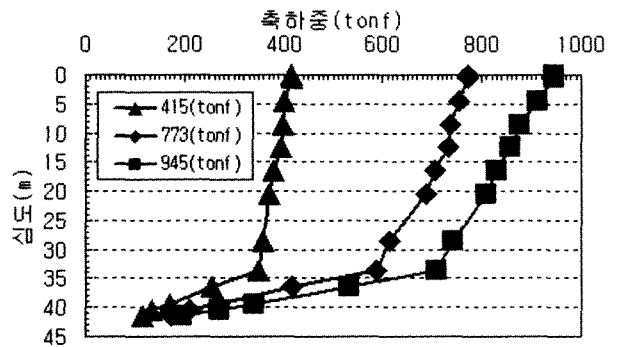


(b) P17의 경우

그림 12. 주변마찰응력과 변위와의 관계곡선

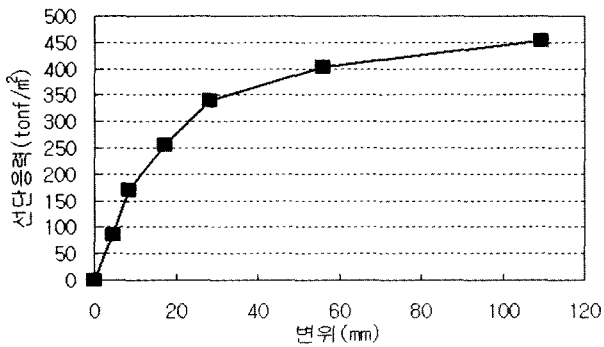


(a) P16의 경우

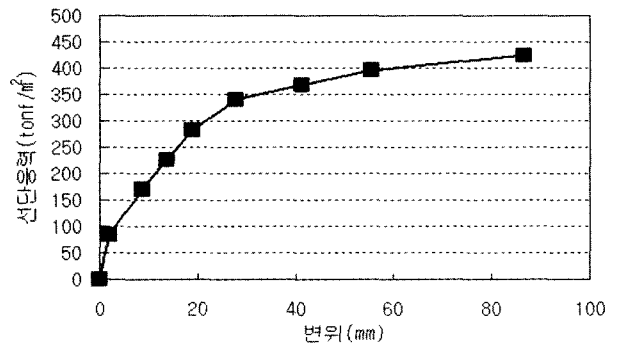


(b) P17의 경우

그림 13. 축하중분포도



(a) P16의 경우



(b) P17의 경우

그림 14. 선단응력과 변위와의 관계 곡선

를 나타내었는데 대부분의 주변마찰저항은 단층파쇄대 층에서 발휘되고 있음을 알 수 있었다.

축하중분포도(그림 13)와 등가하중-침하량관계(그림 6, 8)를 이용하여 선단지지응력-침하량($q-z$)관계를 작도 하여 그림 14에 나타내었다. 여기서, 단층파쇄대의 선단 지지응력은 거의 극한단계에 도달된 것으로 나타났다.

6. 결론 및 제언

단층파쇄대에 시공된 대구경 현장타설말뚝에 양방향 선단유압재하시험을 시리시하여 선단지지력을 측정하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 선단보강 그라우팅 후의 하중 - 침하량 곡선에서는 보강전 보다 선단의 침하량이 현저하게 줄어들어드

는 것을 알 수 있었다.

- (2) 단층파쇄대에서 선단지지력은 170~175 tonf으로 나타났으나, 선단보강 그라우팅 후의 선단지지력은 320~323 tonf으로 측정되어 약 1.8배 만큼 증가되었다.
- (3) 외주면마찰력을 발생시키는 상향변위는 극히 미소하게 나타나 본 연구에서 실시한 재하단계에서는 마찰력의 극히 일부만 발휘되었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 정창규 (2004), “선단유압재하시험법의 현장적용성에 관한 연구”, 경성대학교 공학박사 학위논문, 2004. 2.
2. 한국지반공학회 (2003), “부산남항대교 건설공사 (2공구)시 오스트버어그셀을 이용한 단층파쇄대에 근입된 대구경현장타설말뚝의 선단지지력 측정 및 하중전이측정 연구용역 보고서”, 2003. 7.
3. 부산광역시 건설본부 (2002). “부산남항대교 건설공사 (2공구) 육상부 시공보링 지반조사보고서”, 2002. 11.
4. American Society for Testing and Materials [ASTM] (1994), “Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load”, ASTM D1143-81.
5. 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.

(접수일자 2004. 5. 31, 심사완료일 2004. 7. 5)