

관내토 선단부 그라우팅된 개단강관 말뚝의 모형실험연구 Model Test Study on Soil Plug Toe-Grouted Pipe Pile

정두환¹⁾, Doo Hwan Jeong, 최용규²⁾, Yongkyu Choi, 정성교³⁾, Sung-Gyo Chung

¹⁾ 동아대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.

²⁾ 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environment. Eng., KyungSung Univ.

³⁾ 동아대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.

SYNOPSIS : In this study, model tests were performed using calibration chamber and a lot of preliminary tests and main tests were done. The objective of this study is to observe the improvement effect for the vertical pile capacity of soil plug toe-grouted pipe pile. While pile capacity of soil plug toe-grouted pipe pile was less than that of open-ended pipe pile, the capacity of the grouted pipe pile which had the enlarged base-grouted area was increased by about 35% in comparison with that of open-ended pipe pile.

Keywords : vertical pile capacity, soil plug toe-grouted pile, open-ended pipe pile, calibration chamber test, model pile.

1. 서론

대형 교량 공사의 교각기초로 사용이 급증하고 있는 개단강관말뚝은 취급과 이음이 용이하며 타입시 관입 저항력이 적어서 국내 기초 공사에 많이 사용하고 있다. 개단강관말뚝은 관입시 말뚝 내부로 밀려 들어오는 관내토의 팽창거동(dilatancy)이나, 아칭(arching)효과로 관내토와 말뚝 내벽면과의 마찰력에 의해 폐색효과(soil plugging)가 발휘되어 진다. 직경이 큰 말뚝일 경우 정적 재하 시험에서도 완전 폐색 되지 않는 경우가 있다는 것이 모형 실험에서 이미 알려져 있다(이승래 외, 1994)(백규호 외, 1996). 실제 현장에서 말뚝 직경이 700~800mm 보다 큰 개단말뚝이 지중에 관입될 경우 폐색 효과는 현저히 떨어지며, 광안대교와 영종대교 등과 같은 초대형하중을 지지하는 경우에는 직경이 1.5~2.5m 정도의 대구경 말뚝들이 사용되어 지는데, 이러한 대구경 말뚝의 지중 관입 시에는 관내토의 폐색 효과가 충분히 발휘될 수 있을 지 의문시되고 있다. 보통 이런 말뚝들은 강관 말뚝 타입후 관내토를 굴착한 후 콘크리트로 속채움하거나 현장타설 말뚝으로 대부분 시공하게 된다. 그러나, 이러한 경우 말뚝 내부 관내토 굴착시 동수경사에 의한 상향 침투압에 의한 분사현상, 굴착시 말뚝선단 지지 지반의 교란, 굴착 후 바닥 면에 축적된 슬라임(Slime)의 미처리로 인한 지지력 저감 및 과도한 침하가 발생하여 구조물에 치명적인 문제가 발생할 가능성이 많이 잠재하고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 추천할 수 있는 개단강관말뚝공법으로는 관내토를 고압분사 그라우팅 또는 Soil Cement로 고결시키거나 관내토 선단 하부지반까지를 그라우팅하는 공법을 들 수 있으며, 이는 현행의 현장 타설 공법의 문제점을 최소화시킬 수 있는 공법으로 예상되어 진다. 아울러 현행 대구경 강관말뚝 내에 콘크리트 속채움하는 시공법이나 현장타설 말뚝공법의 문제점들을 보완할 수 있는 대체공법으로서 현장에서 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 개단말뚝이 수심 220m 이상의 심해에 설치된 경우 해진에 의해 관내토의 폐색력이 80%이

상 저감되어 폐색력이 완전히 파괴된다는 기존의 연구(최용규 외, 1998)에 기초하여 관내토 선단부의 그라우팅을 통해 관내토의 파괴를 방지할 수도 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 개단말뚝, 폐단말뚝, 관내토선단부만 그라우팅한 말뚝 그리고 선단하부지반까지 그라우팅한 말뚝들에 대한 재하시험을 통하여 지지력을 비교하였으며, 지지력 증진 효과를 관찰하였다.

2. 종래의 연구

개단말뚝의 지지력을 증가시키고 침하를 억제하기 위한 연구들이 있어왔는데, O'Neill 등(1986)은 개단말뚝의 선단 두께부의 기하학적인 형상을 달리하여 압력토조 내에서 모형시험을 실시하였는데, 말뚝 내부에 있는 관내토의 상태에 따라 지지력에서 큰 차이가 있음을 밝혔고, 그라우트로 폐색막개를 형성한 경우에는 재하용량 부족으로 완전한 하중-침하량 곡선을 구할 수 없을 정도로 지지력이 증가하였다. 이들의 경우 외주면 마찰력은 크게 차이가 나지 않았으나, 단위선단 지지력은 크게 변화하는 것을 볼 수 있었다. Okamoto 등(1988)은 Soil Cement로 구성된 굳지 않은 현장 말뚝 내에 돌기가 있는 립(rib)으로 둘러싸인 강관 파이프를 삽입하는 현장타설말뚝 공법을 제안하였으며, Soliman 등(1988)은 직경 15~17cm의 소구경 말뚝을 굴착후 현장 타설 말뚝을 시공하는 사례 등을 보고하였다. Teparaksa(1992, 1994)는 강관내부 흙을 굴착한 후 프리스트레스 콘크리트로 선단 보강되어진(base-grouted) 직경 2.0m 와 1.5m의 현장타설 말뚝과 선단 보강되지 않은 직경 1.0m의 현장타설말뚝에 대한 재하시험 결과를 보고하였는데, 그는 굴착후 선단 보강한 말뚝에서 발생할 수 있는 문제점들을 지적하였으며 말뚝직경이 1.0m이상인 경우에 더욱 심각하게 대두된다고 하였다. Kusakabe 등(1994)은 말뚝 선단부에 그라우팅 블록(grouted base block)이 있는 경우에 대한 실내모형실험 및 이론적 모델 등을 제시하였다. 또한, Neely(1994), Reese & O'Neill(1988) 등은 굴착후 확대선단형 현장타설 말뚝들에 대한 재하시험 결과들을 보고하였으며, 이들 말뚝에 대한 시공방법, 설계방법 등을 제시했다.

3. 실험 계획

3.1 실험장치

전반적인 실험 장치는 그림 1에 나타나 있으며 압력토조, 모형말뚝, 스프링-질량시스템을 가진 정하중 재하장치, 주기파 발생장치, 상부수조, 간극수압 측정용 센서, 그라우팅 장비, 그리고 동적 변형 측정시스템등으로 구성되어져 있다.

조립된 압력토조는 높이 564mm, 직경 610mm의 강재로 제작된 원통형이며, 수평방향의 구속압력과 수직방향의 구속압력을 따로 작용시킬 수 있게 수평방향과 수직방향으로 고무판 멤브레인을 따로 설치하였고, 고무 멤브레인과 시료와의 마찰을 줄이기 위해 Teflon Sheet를 수평 멤브레인과 상부멤브레인의 하부에 사용하였다. 따라서, 압력토조의 벽면과 상부 멤브레인은 유연성(flexible)경계를 가지며, 바닥면은 강성(rigid)경계를 가진다. 압력토조 상부 뚜껑에는 간극수의 배수와 모형말뚝의 설치를 위한 배·출입구를 만들어 두었다. 그리고, 압력토조 위 뚜껑 상부에는 높이 50mm의 수조를 고정시켜 주기파 발생장치에서 생성된 동수압이 수조를 통하여 모형지반 지표면 내에 전달되게 하였다. 또한, 수조의 중앙부에는 말뚝의 타격 관입 설치를 위한 구멍을 만들어 두었고, 간극수압 측정센서의 설치된 상부 멤브레인에 구속압력의 작용을 위한 장치를 해두었으며 압력토조 내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다. 그리고, 압력토조의 바닥에는 시료의 포화를 위한 급수용 파이프를 설치하였다.

예비실험에서는 이중튜브형 모형말뚝이 사용하였으며, 외경 40.14mm, 내경 28.45mm, 선단강재부 두께 5.86mm이었다. 본 실험에서는 단일튜브형 모형말뚝을 사용하였으며, 외경 40.35mm, 내경 33.5mm, 두께 3.6mm 그리고 길이 600mm이었다. 시료는 세립질의 모래를 사용하였으며, $D_{10} = 0.06\text{mm}$, $C_u = 1.66$ 으로 통일분류기호는 SM이다. 지반은 약 50%의 상대밀도로 형성되었으며 이때의 투수계수는 $1.21 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이고 건조단위 중량은 16.35 N/m^3 이다. 벽면 마찰각 (δ)은 22° 이었다.

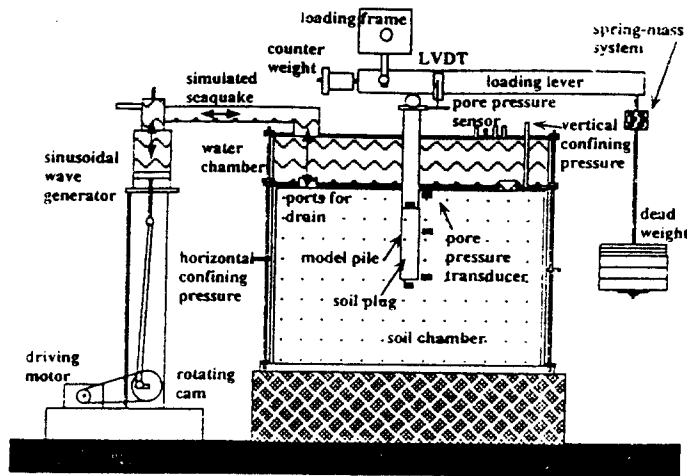


그림 1. 시험 장치의 모식도

표 1. 예비실험과 본시험의 계획표

(a) 예비실험

대분류	Series 1(P)					Series 2(P)				
구분기호	P1-O	P1-C	P1-G1	P1-G2	P1-G3	P2-O	P2-G1	P2-G2	P2-G3	P2-G(B)
상대밀도(%)	50					50				
구속압력(kPa)	60					60				
말뚝종류	개단	폐단	선단부 그라우팅	선단부 그라우팅	선단부 그라우팅	개단	폐단	선단부 그라우팅	선단부 그라우팅	하부지반 그라우팅
정재하실험	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

(b) 본 실험

대분류	Series 1(T)				Series 2(T)				Series 3(T)			
구분기호	T1-O	T1-C	T1-G	T1-G(B)	T2-O	T2-C	T2-G	T2-G(B)	T3-O	T3-C	T3-G	T3-G(B)
상대밀도(%)	50				50				50			
구속압력(kPa)	20				35				60			
말뚝종류	개단	폐단	선단부 그라우팅	하부지반 그라우팅	개단	폐단	선단부 그라우팅	하부지반 그라우팅	개단	폐단	선단부 그라우팅	하부지반 그라우팅
정재하실험	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

비고 ; O : 개단말뚝, G : 관내토 선단부(2Di)만 그라우팅한 말뚝
 C : 폐단말뚝, G(B) : 선단하부지반까지 그라우팅한 말뚝

3.2 실험계획

모형압력토조에 작용시켜 줄 구속압력의 크기는 유효응력의 상사법칙에 의해 결정할 수 있으며 크기 계수도 정할 수 있다. 말뚝의 실제 관입 깊이 7, 12, 그리고 21m을 유사화 시키기 위하여 압력 토조의 구속압력을 20, 35, 그리고 60kPa로 변화시켰다. 예비실험단계에서는 내관과 외관으로 이루어진 이중 튜브 모형말뚝을 사용하였으며, 말뚝의 축하중 전이 양상을 측정할 목적으로 스트레인 게이지를 내관의 외면과 외관의 내면에 부착시켰다. 그러나, 예비실험 단계에서 발생한 여러 가지 문제점들로 인하여 단일튜브 모형말뚝을 제작하여 본 실험에 사용하였다. 예비실험과 본 실험의 구체적인 계획을 표 1에 나타내었다.

3.3 실험방법

모형지반은 동일한 낙하높이를 유지한 채 모래를 낙하하는 레이닝 방법에 의해 형성되었으며, 포화도에 따른 간극수압을 관찰하기 위해서 관입된 말뚝의 선단하부, 선단측면, 중간부분, 지표면에 간극수압계를 매설하면서 지반을 형성하였다. 지반을 포화시키기 위하여 수조 뚜껑을 닫고 Back Pressure를 가하여 시료 내의 공기를 완전히 배제시켜 완전 포화상태에서 모형말뚝을 압력토조 속에 49.8N의 래머(rammer)를 380mm 높이에서 자유 낙하시켜 타격 관입하였다.

먼저, 구속압이 20kPa 상태에서 표 1의 순서대로 개단말뚝과 폐단말뚝을 상대밀도 50%인 모형지반에 향타한 후 향타로 인한 모형지반의 과잉간극수압이 완전히 소산된 후 정재하시험을 실시하였다. 이어서 구속압력을 작용시킨 상태에서 개단말뚝을 향타한 후, 상향 침투로 인한 관내토 선단에 분사현상을 최소화하기 위해 구속압을 제거하고 상태에서 강관말뚝 내부의 관내토를 오거(Auger)장비로써 이용하여 굴착하였다. 굴착후 시멘트와 물유리를 강관말뚝 내부에 주입한 후 교반기로 교반시켜 관내토를 Soil Cement화 시켰다. 그라우팅이 어느 정도 경화된 후 구속압을 가하고 하루가 지난 후 말뚝과 모래사이의 마찰력 회복을 위해서 개단말뚝의 최종 향타 관입량 크기와 같아질 때까지 그라우팅 말뚝의 두부를 타격하였다. 그리고, 과잉간극수압 소산된후 정재하시험을 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

소형압력토조속에 소구경 모형말뚝을 타격관입하여 말뚝 내부에서 관내토에 대한 그라우팅을 실시하는 것은 극히 곤란하였다. 관내토를 굴착해 낸 다음 그라우트액을 부어넣고 굴착해 낸 흙과 혼합하여 그라우팅된 말뚝을 형성하였다. 따라서, 예비실험에서 많은 시행착오를 겪었으며 그 결과를 요약하여 그림 2와 3에 나타내었다.

먼저, 예비실험에서는 내관과 외관으로 구성된 이중튜브 모형말뚝을 사용하였으며, 그림 2에는 관내토 선단부만을 그라우팅한 말뚝에 대한 재하시험 결과를 나타내었는데, 관내토 선단부를 그라우팅한 말뚝들의 지지력은 개단말뚝의 지지력보다도 오히려 작았다. 관내토 선단부를 그라우팅한 말뚝들의 지지력은 개단 말뚝의 지지력에 비해 약 25%만큼 감소하였다. 관내토 선단부를 그라우팅하는 과정에서 관내토를 굴착해 내면서 관내토 선단바닥에 유발된 큰 동수경사로 인하여 보일링 현상이 발생하여 말뚝 선단하부 지반을 느슨하게 만든 것으로 보인다.

그림 3은 이중튜브 모형말뚝에 대한 관내토 선단부와 말뚝선단 하부지반 그라우팅 말뚝들에 대한 재하시험 결과이다. 여기서, 이중튜브 말뚝의 벽 두께가 두꺼워 교반장치의 영향 범위는 그림 2와 3에 점선으로 나타낸 범위에 한정되었다. 즉, 말뚝선단하부지반의 그라우팅 범위는 말뚝 직경을 거의 벗어나지 못하는 정도였다. 그림 3에서 알 수 있듯이 관내토 선단부만을 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력보다 작았으나, 선단하부지반을 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력보다 약 10%만큼 증가하였다.

관내토 선단부만을 그라우팅한 말뚝들은 지지력이 저하된 반면, 선단 하부지반까지를 그라우팅한 말

뚝들의 지지력은 증가되었다. 선단하부지반의 그라우팅 영향 범위를 넓히면 지지력이 더욱 증가할 것으로 예상되었다. 이를 위하여 단일튜브 모형말뚝을 제작하여 본시험에 사용하였으며, 구속압력을 변화시켜 수행한 일련의 재하 시험결과들을 그림 4에 나타내었다. 여기서도 관내토 선단부만을 그라우팅한 말뚝들의 지지력은 개단말뚝의 지지력을 초과하지는 못한 반면, 선단하부지반을 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력에 비해 최대 약 35% 만큼 증가하였다. 여기서, 선단하부지반의 확대된 그라우팅 영역을 그림 4에 굵은 실선으로 나타내었는데, 강관 직경의 약 1.2배만큼 확대되었다.

사진 1에는 관내토 선단부만을 그라우팅한 말뚝과 선단 하부까지를 그라우팅한 말뚝에 대한 모습을 나타내었다. 그라우팅된 부분은 매우 단단하게 고결되어 있었다.

상기의 모형시험 결과를 토대로 강관말뚝을 타입하여 관내토를 굴착해 낸 다음 콘크리트 말뚝을 속채움하거나 현장타설 콘크리트를 시공하는 현행 우리 나라 설계법의 문제점을 고찰해 보고자 한다. 관내토 굴착시 큰 동수경사로 인해 굴착 바닥부에서 분사 현상이 유발될 가능성이 높아 말뚝 선단 하부지반이 교란될 수 있을 것이다. 따라서, 과대한 침하가 유발되고 지지력이 저하될 수 있을 것이다. 이에 대한 대안으로는 안정액을 사용하여 굴착하는 베노토 공법을 사용할 수 있으나 굴착 바닥면에 슬라임(Slime)이 잔류하여 과대한 침하와 지지력 저하를 유발시킬 가능성이 있다. 다른 대안으로는 본 연구에서 제안하는 공법으로 항타된 강관 말뚝 내에 있는 다져진 관내토를 굴착해 내지 않고 고압분사 그라우팅하거나 관내토를 교반시켜 Soil-Cement화 시켜 고결시키는 방법을 사용할 수 있을 것이다. 이 경우 관내토의 굴착으로 인한 말뚝 지지 선단지반의 이완을 방지할 수 있으며, 관내토 선단 하부 지반까지도 그라우팅하여 보강한다면 더욱 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이다.

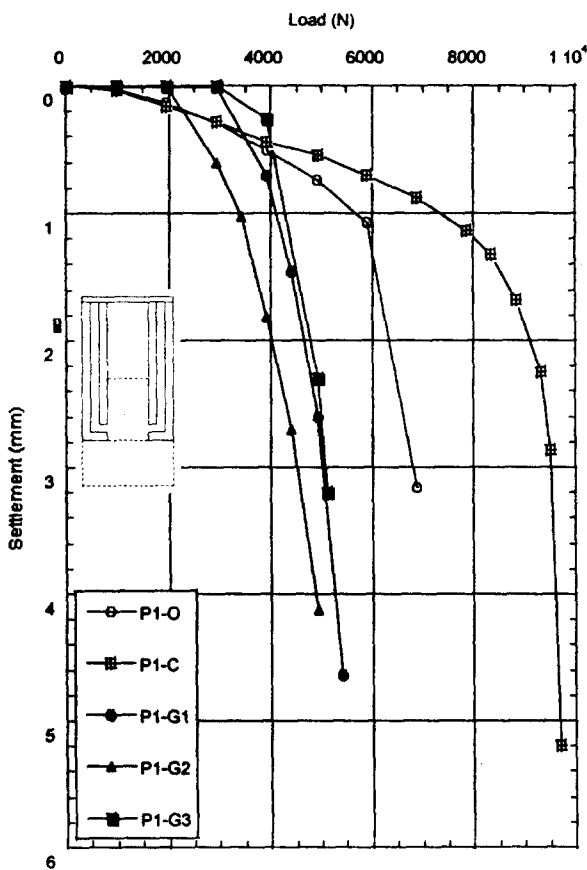


그림 2. 관내토 선단부 그라우팅 말뚝에 대한 예비 시험결과 ($\sigma_c = 60\text{kPa}$, 이중튜브형 모형말뚝)

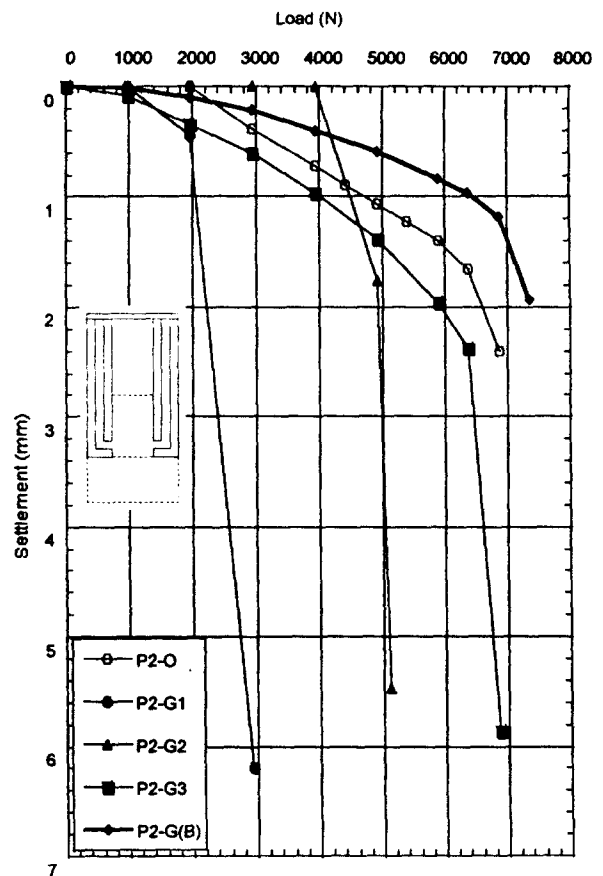


그림 3. 관내토 선단부와 선단 하부지반 그라우팅 말뚝에 대한 예비시험 결과 ($\sigma_c = 60\text{kPa}$, 이중튜브형 모형말뚝)

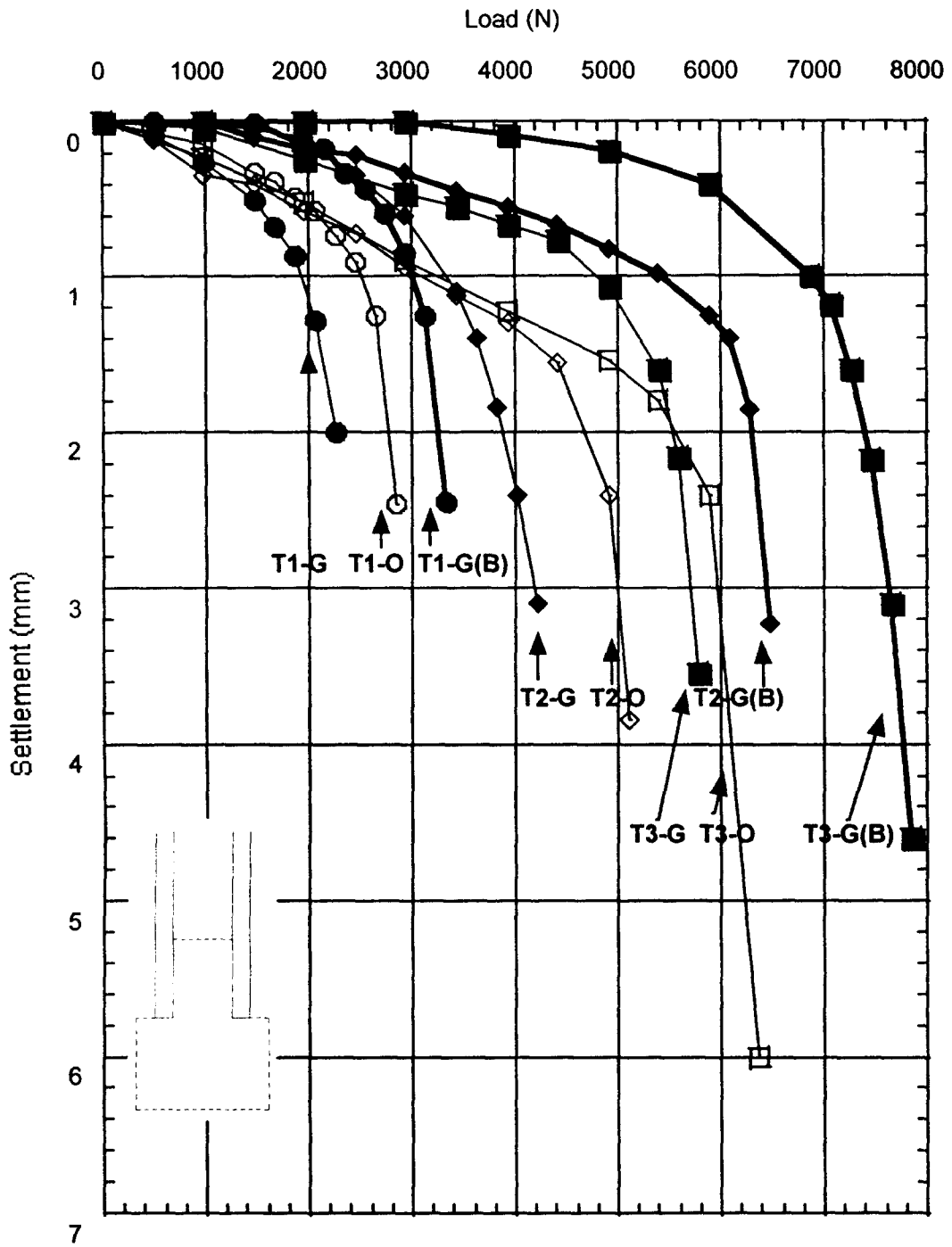
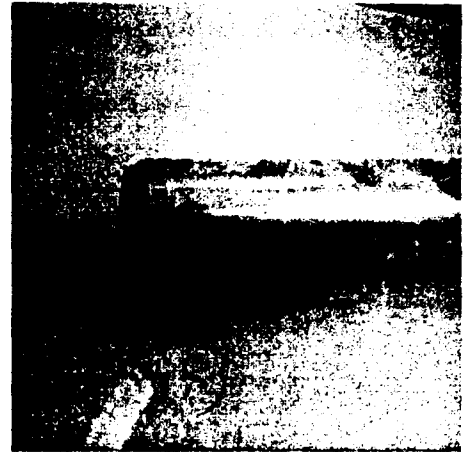


그림 4. 관내토 선단부와 선단하부 지반 그라우팅 말뚝에 대한 재하시험결과 (단일튜브형 모형말뚝)



(a) 관내토 선단부만 그라우팅된 말뚝



(b) 선단하부 지반까지 그라우팅된 말뚝

사진 1. 관내토 선단부 및 선단하부 지반 그라우팅된 말뚝

5. 결론 및 제언

이 연구에서는 매우 어려운 실험 여건으로 인하여 실험 방법 결정을 위하여 많은 예비실험을 수행하였으며, 이를 토대로 본 실험을 실시하여 얻은 결론들은 다음과 같다.

- 1) 분사현상의 유발 가능성을 최소화하기 위해 구속압을 제거한 후 관내토를 굴착하였으며, 관내토 선단부와 선단하부지반 그라우팅액이 경화한 후 마찰력 회복을 위해 말뚝 머리에 몇 회의 타격을 가해주었다.
- 2) 관내토 선단부만을 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력을 초과하지 않았다.
- 3) 관내토 선단 하부지반을 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력보다 최대 약 35% 만큼 증가하였으며, 그라우팅 범위가 확대될 수록 지지력 증가 효과는 증진되었다.
- 4) 강관타입후 관내토를 굴착한 후 콘크리트로 속채움하거나 현장타설말뚝을 시공하는 현행 설계 관행은 과도한 침하와 지지력 감소를 유발할 수 있으므로 관내토를 굴착해 내지 않은 상태에서 관내토를 고압분사 그라우팅하거나 Soil Cement화시키는 공법을 사용할 수 있을 것이다. 이 때, 관내토 선단하부지반까지를 고결 시키면 더욱 좋을 것이다.
- 5) 약 220m 이상의 심해에 설치된 개단말뚝의 관내토는 해진에 의해 지지력의 대부분을 손실하여 파괴되는데, 관내토 선단부를 그라우팅하면 개단말뚝의 파괴를 방지할 수도 있을 것으로 예상되는데 이에 대한 연구는 진행 중에 있다.

참고문헌

1. 이승래 등 (1994), “말뚝직경 변화에 따른 개단강관말뚝의 관내토 거동특성,” 94년 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 87~93.
2. 백규호 등 (1996), “말뚝직경이 개단말뚝의 폐색정도와 지지력에 미치는 영향,” 한국지반공학회, pp. 85~94.
3. 최용규 등 (1998), “해저면의 수직 지진 진동에 의해 유발된 해진에 대한 해상 개단강관말뚝 기초의 거동,” 한국지진공학회 논문집, 제2권 제1호, 한국지진공학회, pp. 11~21.
4. Kusakabe, O., Kakurai, M., Ueno, K., and Kurachi, Y. (1994), “Structural Capacity of Precast Piles with Grouted Base,” J. Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 8, pp. 1289~1306.

5. Neely, W. J. (1994), "Bearing Capacity of Expanded-Base Piles in Till," Proceedings of International Conference on Design and Construction of Deep Foundation, Vol. II, pp. 817~828.
6. Okamoto, T, Takano, K., and Nagaoka, H. (1988), "A New Pile Foundation Composed of Cement and Steel Pipe," Proceedings of the 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, 7~10, June, 1988, pp. 371~376.
7. O'Neill, M. W., Ugaz, O. G., Ochoa, M, and Acosta, A. (1986), "Large-Scale Laboratory Study of Driving and Static Loading of Open-ended Pipe Pile Driven with Shoes of Varying Geometry in very Dense, Saturated, Highly Pressured, Fine Sand," Dept of Civil Engineering, Univ. of Houston, Report No. UHCE 86~104. 296~301.
8. Reese, L. C., and O'Neill, M. W. (1988), "Field Load Tests of Drilled Shaft," Proceedings of the 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Ghent, 1~10, June, 1988, pp. 145~199.
9. Soliman, N., and Munfakh, G. (1988), "Foundations on Drilled and Grouted Mini Piles-A Case History" , Proceedings of the 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundation on Bored and Auger Piles, Ghent, 1~10, June, pp. 363~369.
10. Teparaksa, W. (1992), "Behavior of Base-grouted Bored Piles in Bangkok Subsoils," Piling-European Practice and Worldwide Trends, Proceedings of a Conference Organized by the Institution of Civil Engineers, London, 7~9, pp.
11. Teparaksa, W. (1994), "Newly Developed Toe-grouted Bored Pile in Soft Bangkok Clay : Performance and Behavior," Vol. III, Dec. 1994, pp. 1337~1351.