

선단 하부지반 그라우팅된 개단강관말뚝의 연직 지지력에 관한 연구

Study on the Vertical Pile Capacity of Base-grouted Pile

정 두 환*¹

Jeong, Doo-Hwan

최 용 규*²

Choi, Yong-Kyu

정 성 교*³

Chung, Sung-Gyo

Abstract

Static load tests were performed for open-ended piles, closed-ended piles, piles with grouted toe, and base-grouted piles by using calibration chamber. Then vertical bearing capacities determined from load tests were compared with each other. The stability of base-grouted pile during a simulated seaquake was investigated by changing the penetration depth. Also, static load tests and seaquake tests for 2-piles and 4-piles group were performed.

The bearing capacity of the pile grouted inside the toe was 11.2~30.8% less than that of open-ended pile because of reduction of base resistance due to disturbance of base soil under pile toe. The bearing capacity of a base-grouted pile was 23.8~33.9% more than that of an open-ended pile and was similar to that of a closed-ended pile. The bearing capacity of base-grouted group pile was increased : the bearing capacity of base-grouted 2-piles group increased 14.6~31.8% compared to that of open-ended 2-piles group, and that of base-grouted 4-piles group increased 15.3~22.4% compared to that of open-ended 4-piles group. During the simulated seaquake in deep sea, stability of base-grouted pile was found to be dependent on the pile penetration depth. During seaquake motion, single long base-grouted pile longer than 20m was stable and short base-grouted pile shorter than 12m failed. But relatively long base-grouted pile longer than 12m kept mobility state. Bearing capacity of base-grouted group pile with penetration depth less than 7m was degraded a little bit : so, base-grouted group pile could maintain mobility condition.

요 지

모형 압력 토조에 개단, 폐단, 관내토 그라우팅, 그리고 선단 하부지반 그라우팅 말뚝들을 설치하여

-
- *1 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 석사
 - *2 정회원, 경성대학교 공과대학 토목공학과 부교수
 - *3 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수

수행된 재하실험을 통해 그 지지력을 비교하였고, 유사화된(Simulated) 해진시 말뚝의 설치깊이를 변화시켜 선단 하부지반 그라우팅 말뚝의 안정성을 검토하였다. 또한, 재하실험과 해진 실험은 2개와 4개로 된 군말뚝에 대해서도 수행되었다.

관내토 선단부만 그라우팅한 말뚝의 지지력은 선단 지반 교란으로 인한 선단지지력 감소로 개단말뚝에 비해 극한지지력이 약 11.2~30.8%정도 작았다. 관내토 선단 하부지반 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력보다 약 23.8~33.9%정도 증가하였으며, 이는 폐단말뚝의 지지력과 비슷하였다. 선단 하부지반 그라우팅된 군말뚝은 개단 군말뚝에 비해 증가하였는데, 2개의 군말뚝의 경우에는 14.6~31.8%만큼 지지력이 증가하였으며, 4개의 군말뚝의 경우는 15.3~22.4%만큼 증가하였다. 심해에서 발생된 해진시 관내토 선단 하부지반 그라우팅된 개단말뚝의 안정성은 말뚝의 설치 형태와 말뚝의 지중관입 길이에 따라 달라졌다. 외말뚝의 경우에는 지중 관입 깊이가 20m보다 깊어지면 안정한 상태를 유지할 수 있었으나, 12m보다 짧은 말뚝은 파괴될 수 있었고, 12m보다 긴 말뚝의 경우에는 가동(Mobility) 상태를 유지할 수 있었다. 군말뚝의 경우에는 지중 관입깊이가 7m이상이면 지지력의 일부만 감소하여 약간 변위하는 "Mobility" 상태를 유지할 수 있었다.

Keyword : Open-ended pile, Closed-ended pile, Pile with grouted toe, Base-grouted pile, Static load test, Bearing capacity, Group pile, Stability to seaquake

1. 서 론

관입 깊이가 깊고 직경이 큰 말뚝을 사용해야만 하는 대형구조물이나 해양구조물의 기초공사에서 사용이 급증하고 있는 개단강관말뚝은 취급과 이음이 용이하며 재료자체의 강성이 크고 주면 마찰력이 커서 국내 기초공사에서 많이 사용하고 있다. 또한 국내에서는 폐단말뚝에 비해 타격관입 설치의 용이성으로 인하여 널리 사용되고 있다. 사질토 지반에 타입되는 개단강관말뚝은 말뚝 내부로 밀려 올라가는 흙의 팽창거동(Dilatancy)으로 인한 횡방향 응력의 증대와 말뚝 선단부 부근 관내토에 형성되는 아칭(Arching)효과로 관내토와 말뚝 내벽면과의 마찰력에 의해 폐색효과(Soil plugging effect)가 발휘되어 진다. 개단강관말뚝 관내토 선단부의 폐색에도 불구하고 폐단말뚝에 비하여 관입저항력이 작아서 타입이 용이하다.

국내에서 시공되는 대구경말뚝들은 토사지반을 향타 또는 진동에 의해 관입시킨 다음, 풍화토, 풍화암 그리고 연암층을 RCD(Reverse Circulation Drill)에 의해 굴착 관입 시킨후 콘크리트로 속채움하거나 연암부에 소켓트시켜 현

장타설 콘크리트 말뚝으로 시공하고 있다. 이와 같이 말뚝선단을 연암층에 반드시 지지하거나 또는 소켓트시켜야 한다는 잘못된 인식된 설계개념으로 인하여 극히 비경제적인 설계가 이루어지고 있으며, 실제 시공상 많은 난점들을 초래하기도 한다. 그러나, 단단한 토사지반에 현장타설말뚝을 시공할 경우에는 말뚝 내부 관내토 굴착시 상향 침투압에 의한 분사현상, 굴착시 말뚝선단 지지 지반의 교란등으로 인하여 지지력이 저하될 수 있으며, 또한 굴착 후 바닥면에 축적된 슬라임(Slime)의 미처리로 인한 지지력 저감과 과대한 침하가 발생하여 구조물에 치명적인 손상이 야기될 수 있는 가능성이 있다. 그리고, 연암층에 소켓트된 현장타설말뚝의 경우에도 슬라임의 미처리로 인한 지지력 저감과 과대한 침하가 발생할 가능성이 있으므로 주의하여야 한다.

개단말뚝 설치시 관내토 폐색에 대한 의구심을 불식시키고 현장타설말뚝설치시 발생할 수 있는 문제점을 보완하기 위해서 추천할 수 있는 말뚝공법으로는 개단강관말뚝을 향타가능한 지층까지 향타 관입시킨후 고압분사 그라우팅하거나 또는 Soil Cement화시켜 관내토 뿐만 아

니라 관내토 선단 하부지반까지를 고결시키는 공법을 들 수 있으며, 이는 현행의 현장타설 콘크리트 말뚝 공법의 문제점을 최소화시킬 수 있는 공법이 될 수 있을 것으로 예상된다. 아울러, 이 공법은 현행 대구경 강관말뚝 내에 콘크리트 속채움하는 시공법이나 현장타설 말뚝공법의 문제점들을 보완할 수 있는 대체공법으로 현장에서 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

또한, 기존의 연구(최용규 등, 1998)에서 개단말뚝이 수심 220m 이상의 심해에 설치된 경우 해진에 의해 관내토의 폐색력이 80% 이상 저감되어 폐색력이 완전히 파괴된다는 것이 밝혀졌다. 따라서, 관내토 선단부의 그라우팅을 통해 해진시 관내토의 파괴를 방지할 수 있을 뿐만 아니라 해진시 개단말뚝의 지지력 저감을 억제하는 공법으로도 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

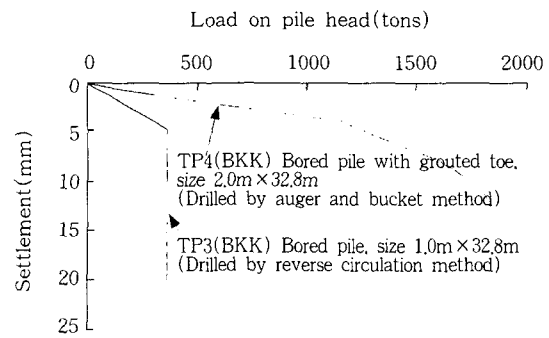
본 연구에서는 세립질 모래로 형성된 상대밀도 50%의 포화된 모형지반에 유효 구속압력 20, 35, 60, 120kPa를 작용시킨 상태에서 모형 강관말뚝을 향타 관입하였다. 개단말뚝, 폐단말뚝, 관내토 선단부 그라우팅 말뚝, 선단 하부지반 그라우팅 말뚝들에 대한 정재하실험을 수행하였다. 정재하실험을 통하여 말뚝의 극한하중을 결정하고, 각각의 말뚝들에 대한 연직 극한 지지력 증감을 비교하였다. 또한, 선단하부지반 그라우팅 말뚝에 극한하중을 작용시킨 상태에서 유사화된(Simulated) 해진을 작용하여 해진 후 모형말뚝의 지지력 변화를 측정하였으며 유사화된 해진 후 선단하부지반 그라우팅 말뚝의 연직지지력 특성을 파악하였다. 또한, 2개와 4개로 된 군말뚝에 대해서도 유사화된 해진 후 지지력 변화를 측정하여 해진 후 군말뚝의 연직지지력 특성을 파악하였다.

2. 문헌고찰

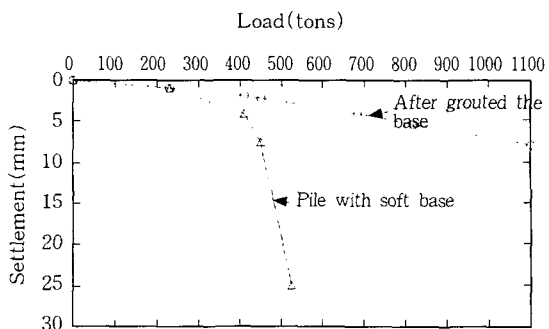
2.1. 개단말뚝의 그라우팅 효과에 대한 기존의 연구들

O'Neill 등의 연구(1986)는 개단말뚝의 선단

두께부의 기하학적인 형상을 달리하여 압력토조 내에서 설치된 모형말뚝에 대한 압축재하실험을 실시하였다. 여기서, 말뚝내부에 있는 관내토의 상태에 따라 말뚝의 압축지지력은 크게 차이가 나는 것을 알 수 있었는데, 관내토가 없는 경우에는 폐색효과가 완전하게 발휘되지 않아 지지력이 매우 작았으며, 그라우트로 폐색막대를 형성한 경우에는 재하장치의 용량 부족으로 하중-침하량 곡선을 충분히 구할 수 없을 정도로 지지력이 증가하였다. 이들 각각의 경우 외주면 마찰응력은 크게 차이가 나지 않았으나 단위선단 지지력은 크게 변화하는 것을 볼 수 있었다. 이 연구에서 그라우트 폐색막대(grout-plug)는 관내토를 제거한 후 시멘트 풀을 채워넣어 형성시켰다



(a) Teparaksa's test(1992)



(a) Teparaksa's test(1992)

그림 1. Load-settlement curves of bored piles with grouted toe and base-grouted piles

Teparaksa의 연구(1992, 1994)는 대표적으로 상부 연약 점토층과 하부 실트질 모래 층으로 구성된 지층에 강관 케이싱 삽입후 내부 흙을 굴착하고 벤토나이트를 주입한 후 직경 2m의 프리스트레스 콘크리트로 선단 보강된 현장타설 말뚝과 선단보강하지 않은 직경 1m의 현장타설 말뚝에 대한 재하시험 결과를 보고하였다(그림 1(a)). 그 후 직경 1.5m의 선단 하부지반 보강형 말뚝과 보강하지 않은 현장타설 말뚝에 대한 재하시험 결과를 보고하였다(그림 1(b)). 그는 현장타설말뚝 시공시 굴착후 말뚝 선단부에 매우 느슨한 실트, 세립질 모래층, 그리고 점토 덩어리나 불순물을 포함한 고밀도의 벤토나이트 침전층에 의해 과도한 침하와 선단지지력 저하를 유발시킬 수 있다고 지적하였다. 이러한 문제점들은 직경이 1m을 초과하는 대구경 말뚝의 경우 더욱 심각하게 대두될 수 있다고 보고하였다.

Kusakabe 등의 연구(1994)는 보링 구멍에 설치되는 기성말뚝(Precast pile)의 지지력을 증대시키기 위한 목적으로 선단 그라우팅 블록을 형성하여 삼축셀과 소형 압력토조(직경: 600mm, 높이: 700mm), 그리고 큰 압력토조(직경: 1500mm, 높이: 1600mm)에서 실험을 실시하여 이론적 예측과 실험적 결과를 비교·분석하였다. 실험결과 기초의 파괴 형태는 펀칭파괴(Punching failure)와 할열파괴(Splitting failure)가 $H/a < 2$ 일 경우는 펀칭파괴가, $H/a > 2$ 일 경우는 할열 파괴가 일어난다고 보고하였다. 여기서, H = 말뚝 선단부에서 부터 하부 그라우팅 두께이며, a = 말뚝선단부의 반경이다. 그리고 그라우팅 두께(H/a)가 두꺼울 수록 강도는 크게 나타나며, 그라우팅 블록의 최적의 형태는 $b/a = 2$ 이고, $H/a \geq 4$ 일 경우 최대극한 지지력을 나타낸다고 보고하였다. 여기서, b = 그라우팅의 유효반경이다. 그러나, 이 실험은 그라우팅 블록의 재료로 석고를 사용하였으므로 일반적으로 그라우팅 재료로 사용하는 시멘트보다 그 강도가 현저히 작은 재료이다.

Okamoto 등의 연구(1988)는 도심지 공사시

강관말뚝의 항타 시공은 소음과 진동으로 인하여 그 사용이 제한되므로 강관의 우수한 재료적 성질을 이용하고, 쉽게 부식될 수 있는 단점을 보완하기 위하여 선 굴착후 쏘일 시멘트(Soil cement)재를 주입하고 굳지 않은 상태에서 말뚝 내·외면으로 돌기가 있는 립(Rib)으로 둘러싸인 강관 파이프를 삽입하는 현장타설말뚝 공법을 제안하였다. 이 말뚝은 무소음과 무진동으로 시공되었으며, 립(Rib)을 사용하여 말뚝과 쏘일 시멘트(Soil cement) 사이에 큰 마찰력을 유발시켰다.

Neely의 연구(1994)은 빙하토의 경우 지층의 다양성과 시료채취의 어려움으로 이론적인 지지력 결정보다 경험적인 값에 의존한다. 선단 확대된 말뚝의 극한지지력과 하중 침하거동을 파악하여 경험적 설계방법을 개발할 목적으로 연구하였다.

2.2 해진이 말뚝 기초의 지지력에 미치는 영향에 관한 연구들

지진시 기초에는 3가지 진동성분 즉, 지반의 수평진동, 지반의 연직진동에 의해 발생된 상부 구조물과의 피드백(Feedback)에 의한 말뚝의 연직진동, 그리고, 지반의 연직진동에 의해 유발된 해진(Sequake)의 진동이 발생한다. 이들 진동들은 해상에 설치된 개단 강관말뚝의 관내토 폐쇄에 영향을 미칠 수 있다. 지반과 말뚝의 진동은 유사화된 수평 및 연직 진동으로 흙과 말뚝을 진동시켜 모델링할 수 있지만, 연직 지반진동에 의해 유발된 해진의 진동은 해저면에 유사화된 동수압을 작용시켜 모델링할 수 있다.

유사화된(Simulated) 지진에 의한 해상 말뚝 기초의 거동에 관한 연구는 주로 소형 압력토조에서 수행되었는데, Ochoa(1990)는 유사지진진동시의 폐단 인발 말뚝의 안정성에 관해 연구하였고, Rao(1997)는 유사지진진동과 해진중 인발 말뚝의 거동에 관한 연구를 수행하였다. Choi and O'Neill(1997b)은 유사 수평진동중 지지력의 이완(Relaxation)과 관내토 폐쇄력의 저감특성을 연구하였다. Choi and O'Neill(1997a)

은 유사 수평 또는 연직 지진진동 중 압축력을 지지하는 개단 강관말뚝기초의 지지력 저감 특성과 관내토 거동에 관한 연구를 수행하였으며 또한, 유사 수평 또는 연직 지진 진동중 압축 지지력 저감과 관내토의 폐색거동 특성을 연구하였다. 여기서, 진앙거리 75km에서 리히터 지진규모 $M = 8$ 로 유사화된 수평 및 연직 지진진동을 작용시켰다. 이때, 연직 지진 진동시에는 관내토 폐색력이 감소되지 않았으나, 수평지진 진동시에는 관내토 폐색력의 약 20%가 감소되었으나 관내토 폐색이 완전히 파괴되지는 않았다. 또한, 최용규 등(1998)과 Choi, et al.(1998)는 포화된 세립의 중간 밀도 지반에 이중개단강관말뚝을 타입하여 지진의 수직성분에 의해 해수에 유발된 해진이 관내토의 폐색을 파괴시키는 지를 연구하였으며, 말뚝의 외주면 마찰력을 크게 저감시킬 수 있는 지를 연구하였다. 실험결과 유사해진중 수심 220m 이상의 심해에 설치된 관입깊이가 작은 단일 압축 개단 말뚝은 완전하게 파괴되었으며, 관내토 폐색력은 80% 이상 저감되었다. 그러나 수심이 220m 이하의 천해에 설치된 개단 말뚝의 압축 극한 지지력은 거의 감소하지 않았으며, 관내토의 폐색력은 5%이하 만큼만 저감되었다.

3. 실내 모형실험

3.1. 실험장치

전반적인 실험 장치는 그림 2에 나타나 있으며 압력토조, 모형말뚝, 시료, 스프링-질량시스템을 가진 정하중 재하장치, 주기와 발생장치, 상부수조, 간극수압 측정용 센서, 그라우팅 장비, 그리고 동적 변형 측정시스템 등으로 구성되어 있다.

조립된 압력토조는 높이 564mm, 직경 610mm의 강재로 제작된 원통형이며, 수평방향의 구속압력과 수직방향의 구속압력을 따로 작용시킬 수 있게 수평방향과 수직방향으로 고무박막(membrane)을 따로 설치하였고, 고무 멤브레인과 시료와의 마찰을 줄이기 위해 테프론

쉬트(Teflon Sheet)를 수평 멤브레인의 내면과 상부 멤브레인의 하부에 사용하였다. 따라서, 압력토조의 벽면과 상부 멤브레인은 유연성 경계를 가졌으며, 바닥면은 강성(rigid)경계를 가졌다. 압력토조 상부 뚜껑에는 간극수의 배수와 모형말뚝의 설치를 위한 배·출입구를 만들어 두었다. 압력토조 위 뚜껑 상부에 높이 50mm의 아크릴로 제작된 수조가 연결되어 있었다. 그리고 주기와 발생장치에서 발생된 동수압이 수조를 통하여 모형지반 지표면 내에 전달될 수 있도록 구멍을 설치하였다. 상부 멤브레인에 구속압력을 작용시킬 수 있는 장치를 해두었으며 압력토조 내로만 압력이 전달될 수 있도록 밀폐되었다. 그리고, 압력토조의 하부 바닥에는 토조안 시료에 물을 공급하기 위한

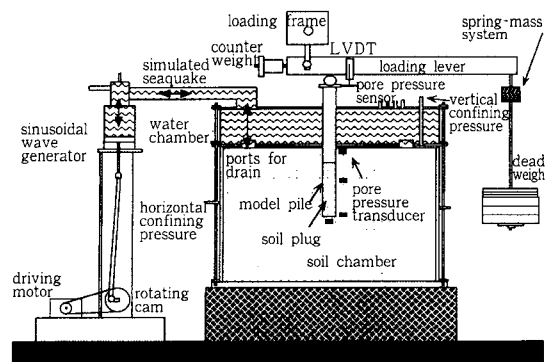


그림 2. The simulated seaquake testing equipment

작은 구멍들을 뚫었다.

예비실험에서는 하중전이를 측정할 목적으로 이중관 튜브의 모형말뚝을 사용하였으며 외경 40.14mm, 내경 28.45mm, 선단강재부 두께 5.86mm 그리고 말뚝길이 500mm인 모형말뚝은 탄소강 1020으로 제작되었으며, 관내토의 폐색력을 측정할 수 있도록 스트레인 게이지(Strain gage)를 외부튜브에는 안쪽 면에, 내부

튜브에는 바깥 면에 각각 양쪽 대칭되게 총 22 개를 설치하였으며 각 위치의 게이지들은 4개 이지 결선법(Whiston bridge)에 의하여 연결되었다. 그러나 이중튜브인 관개로 선단 두께부가 넓어 관내토 선단 하부 그라우팅시 유효면적이 좁았다. 따라서, 본 실험에서는 선단 두께가 상대적으로 작은 단관튜브 모형말뚝을 사용하였으며, 그림 3에 나타난 것과 같이 외경 40.35mm, 내경 33.50mm, 두께 3.60mm 그리고 말뚝길이 600mm인 모형말뚝이었다.

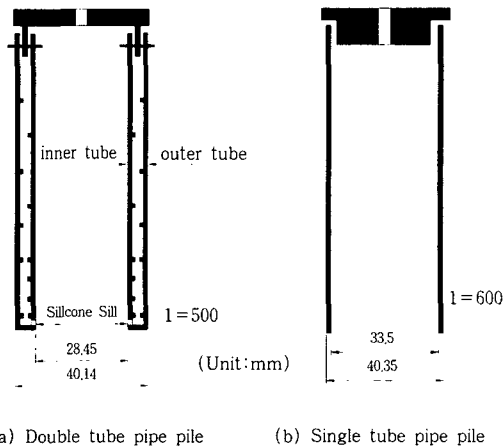


그림 3. Model pile

시료는 간극수의 분산(Diffusion)에 의한 동적 크기효과를 반영할 수 있도록 하기 위해 현장 흙의 입경보다 훨씬 작은 세립질 모래(Micro-fine sand)를 사용하였으며, 최소건조단위중량(γ_{dmin})은 15.51kN/m³이었고, 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 18.12 kN/m³이었다. $D_{10} = 0.107$ mm, $C_c = 1.87$, $C_u = 0.99$ 이었으며 통일분류법상 SM이었다.

지반은 약 50%의 상대밀도로 형성되었을 때 정수두시험 (Constant head permeability)에 의한 투수계수는 1.21×10^{-3} cm/sec였으며, 모형 말뚝과 모래와의 벽면 마찰각(δ)은 22°였다.

그라우팅재로 시멘트, 몰유리 그리고 물을 혼합하여 사용했다. 시멘트:몰유리:물을 중량비 1:0.5:2의 배합비로 사용하였다. 경화시간(Gel time)을 조절하기 위해서 시멘트는 초조강 시멘트를 사용하였으며 경화제로 몰유리를 사용하였다. 초조강시멘트와 몰유리의 특성은 참고문헌(정두환, 1999)을 참고할 수 있을 것이다.

그라우팅 장비로는 내경이 33.5mm인 개단강관말뚝의 관내토를 굴착하기 위해서 충분한 길이의 핸드 오거 장비를 제작하였다. 선단부를 뾰족하게 해서 관입시 마찰을 줄이게 하였고 봉의 주변은 원환 모양으로 연속적으로 둘러감아 고정시켰다. 손으로 오거를 돌리면 관내토는 밀려 올라오게 되었다. 오거후 그라우팅재를 넣고 시료와 혼합시키기 위해서 그라우팅 혼합기를 제작하였다. 혼합기는 말뚝의 선단 하부까지 충분히 교반시킬 수 있도록 선단부를 말뚝내경에 맞게 철판조각으로 고정시켰다.

말뚝 상부에는 압축 정하중을 재하할 수 있도록 재하 실험장치를 설치하였으며, 말뚝과 상부하중 사이에는 스프링을 설치하여 상부구조물과 피드백(feedback)을 가능하도록 하였다.

해진 실험장치는 상부수조에 직경 150mm의 파이프로써 수평하게 연결시켰으며, 주기파의 주기는 드라이빙 모터(Driving motor)의 회전수를 조절하였고, 회전캠(Rotating cam)의 회전반경을 조절하여 진폭의 크기를 조절하였다.

3.2 실험계획

유효응력의 상사법칙에 의해 정적 크기계수를 25로 결정할 수 있었으며, 본 연구에서 사용한 직경 40.35mm인 모형말뚝은 직경 약 1m의 현장말뚝의 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있었다. 말뚝의 실제 관입 깊이가 7, 12, 21, 그리고 40m를 유사화시키기 위해서 압력토조의 유효구속압력을 20, 35, 60, 120kPa로 변화시켰다. 지진의 연직성분에 의해 수중에 유발된 해진은 해저면에 동수압을 작용시켜 모델링 하였는데, 해저면에 작용되는 동수압은 sine 정현파로 모델링하였다. 해저 수심은 동수압의 진폭

의 함수로 나타낼 수 있었는데, 지진규모 $M = 8.0$ 으로 유사화된 해진을 나타내는 동수압의 진폭과 수심과의 관계를 그림 4에 나타내었다(최용규, 1998). 여기서, 심해는 수심이 약 220m 이상으로 볼 수 있었다. 실제 해진의 주파수 0.6Hz ($M = 8.0$ 으로 확대시킨 지진의 평균주파수), 1.2Hz를 유사화시키기 위해서 유발된 동수압의 주파수를 2.5Hz, 5.0Hz로 변화시켰다(주파수의 크기계수 = 4). 여기서, 해수와 해저면의 상호작용을 모델링하기 위하여 Froude의 상사법칙과 Mach 상사법칙을 만족시켜야 하는데 두 상사 법칙에 대해 계산된 주파수 크기계수들은 차이를 나타내고 있었으므로 평균적으로 4를 사용하였다. 해진 모형실험에서는 약 20초내외로 동수압을 작용시켜 주었다.

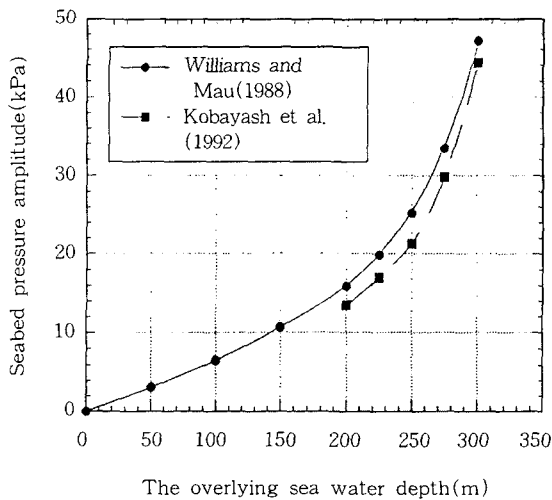


그림 4. Simulated seaquake amplitude on the seabed versus water depth(1986 Oceanside event at 75km from epicenter)(최용규 등, 1998)

예비실험과 본실험의 구체적인 계획은 표 1 ~ 4에 나타내었다.

표 1. Plan of static load test(single pile)

Test mark	Relative density(%)	Confining pressure(kPa)	Pile type	Static load test
T1	50	20	O	○
			C	○
			G	○
			G(B)	○
T2	50	35	O	○
			C	○
			G	○
			G(B)	○
T3	50	60	O	○
			C	○
			G	○
			G(B)	○
T4	50	120	O	○
			C	○
			G	○
			G(B)	○

where, O: Open-ended pipe pile, C: Close-ended pipe pile
G: Plug toe-grouted pile, G(B): File grouted below pile toe

표 2. Plan of static load test(group pile)

Test mark	Relative density(%)	Confining pressure(kPa)	Pile type	Static load test
T1*	50	20	O	○
			G(B)	○
			O	○
			G(B)	○
T2*	50	35	O	○
			G(B)	○
			G	○
			G(B)	○
T3*	50	60	O	○
			G(B)	○
			G	○
			G(B)	○

where, mark*: group pile
mark(2): 2 group pile, (4): 4 group pile
O: Open-ended pipe pile, G(B): File grouted below pile toe

표 3. Seaqueake test plan(single pile)

	Relative density (%)	Confining pressure (kPa)			Q/ Qult (%)	Static load before seaquake	Squake shaking test			Static load test after seaquake
		20	35	60			Amplitude (kPa)		Frequency Hz	
							Deep sea	Shallow sea		
S1	50	○			95	○	21		2.5	○
S2	50	○			95	○		14	2.5	○
S3	50		○		95	○	20		5.0	○
S4	50		○		95	○		9	5.0	○
S5	50			○	95	○	22		5.0	○
S6	50			○	95	○		11	5.0	○

표 4. Seaqueake test plan(group pile)

	Relative density (%)	Confining pressure (kPa)			Q/ Qult (%)	Static load before seaquake	Squake shaking test			Static load test after seaquake
		20	35	60			Amplitude (kPa)		Frequency Hz	
							Deep sea	Shallow sea		
S1* (2)	50	○			95	○	22		2.5	○
S2* (2)	50	○			95	○		14	2.5	○
S3* (4)	50	○			95	○	24		2.5	○
S4* (4)	50	○			95	○		9	2.5	○
S5* (2)	50		○		95	○	20		5.0	○
S6* (2)	50		○		95	○		11	5.0	○
S7* (4)	50		○		95	○	21		5.0	○
S8* (4)	50		○		95	○		12	5.0	○
S9* (2)	50			○	95	○	22		5.0	○
S10* (2)	50			○	95	○		12	5.0	○
S11* (4)	50			○	95	○		9	5.0	○

where, mark* group pile
mark(2): 2 group pile, (4): 4 group pile

3.3. 실험 절차

모형지반의 형성은 모형실험 지반의 밀도를 일정하게 유지할 수 있도록 하기 위해 낙하높이에 따른 상대밀도를 측정하였으며 5회에 걸친 실험의 평균값으로 각 실험의 오차는 ±5% 정도의 오차를 가졌다.

먼저 필터 페이퍼(Filter paper)를 모형 토조 밑바닥에 깔고, 모형지반은 레이닝법(Raining method)에 의해 형성하였다. 모형지반 형성시 간극수압 센서(Pore pressure sensor)는 말뚝 선단하부와 지표면 근처에 매설하였다. 모형지반 상부 층에 필터 페이퍼(Filter paper)를 깔고, 그 위에 200번 철망(Mesh)을 이중으로 깔아 포화 시 배압(Back pressure)에 의해 시료가 빠져 나오지 않도록 하였다. 망 사이에 쇄석을 약 1cm 두께로 깔아 해진 실험시 주기파가 모형지반에 잘 전달될 수 있게 하였다. 토조 상부 뚜껑과 밀폐된 수조를 조립하여 진공펌프로써 시료 내에 내재된 공기를 배출시켰다. 49.8N의 래머(Rammer)를 380mm의 높이에서 자유 낙하시켜 말뚝을 타격 관입하였다. 타입시 50mm당 타격 횟수를 측정하였고, 380mm까지 관입시켰다. 정재하실험은 과잉간극수압이 완전히 소산된 후 말뚝 두부에 대칭되게 다이얼 게이지(Dial gage)와 LVDT를 설치하여 재하 실험시 말뚝두부의 침하량을 측정하게 하였다. 각 단계별 재하 하중은 다이얼게이지의 변화가 없을 때까지 기다렸다가 재하 하중을 증가시켰다. 하중단계에 따라 재하 하중과 말뚝머리 침하량을 기록하였고, 변위가 급격하게 증가할 때까지 하중을 계속 증가시켰다. 극한하중을 결정할 수 있을 때까지 재하하중을 증가시킨후 하중을 제거하였다.

그라우팅은 개단말뚝을 향타 관입한 후 관내 토를 오거(Auger)로 굴착하여 그라우팅을 하였다. 그러나, 관내토를 제거해 낼 때 가해진 구속 압력으로 인한 동수경사의 차이로 인해 말뚝 선단으로부터 흙이 계속 밀려 올라와 말뚝 선단 하부지반을 이완시켰다. 따라서, 구속압을 제거한 후 선단으로부터 약 2D_i 부분까지의 관

내토만 남기고 굴착해낸 후 경화재와 시멘트를 주입하여 그라우팅 교반기(Mixer)로써 관내토 선단까지 쏘일 시멘트(Soil-cement) 형태로 혼합하였다. 약 1시간 이후에 정해진 구속압을 가하고, 1일 동안 경화시킨 후 마찰력 회복을 위해서 몇 회 향타후 정재하실험을 실시하였다.

외말뚝의 해진 실험은 개단말뚝을 향타하고 선단 하부지반까지 그라우팅한 후 극한하중을 결정하였다. 극한하중의 95%을 말뚝머리에 상재한 후, 천해와 심해에서 유사화된 sine 정현파의 진폭(Amplitude)을 결정하기 위해 캠(Cam)의 회전길이를 조절하였으며, 수조를 통하여 주기파를 모형지반에 전달시켰다. 이때, 모형말뚝의 주변에 설치된 간극수압센서를 통해서 해진 실험중 간극수압의 발생 양상과 말뚝머리 침하량을 동적 변형 측정기로 측정하였다. 해진 실험 완료후 정재하실험을 실행하여 해진에 의한 압축지지력 저감량을 측정하였다.

2개의 군말뚝은 말뚝 중심간격이 27.4cm가 되게 향타 관입하여 설치하였으며, 4개로 된 군말뚝은 최소간격이 19.5cm가 되게 향타 관입하여 설치되었다. 그라우팅후 정재하실험을 실시하여 극한하중을 결정하였다. 군말뚝의 해진 실험은 2개와 4개로 된 개단 군말뚝을 향타하고 선단 하부지반까지 그라우팅 하였고, 경화후 정재하실험을 실시하여 극한하중을 결정하였다. 극한하중의 95%을 말뚝머리에 재하한후 진폭(Amplitude)과 주기를 실험계획에 있는 대로 조절해 가며 해진실험을 수행하였으며, 모형말뚝 주변에 설치된 간극수압센서를 통해서 해진 실험중의 간극수압 발생 양상과 말뚝머리 침하량을 동적 변형 측정기로 측정하였다. 해진 실험중 모형말뚝 상태를 주의 깊게 관찰하여 기록하였다. 해진 실험 완료후 정재하실험을 실시하여 해진에 의한 말뚝의 압축지지력 저감량을 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

상대밀도 50%인 포화된 모형지반에 유효 구

속압력을 작용시키고 타격 관입된 외말뚝의 개단, 폐단, 관내토 선단 그라우팅, 그리고 선단 하부지반 그라우팅 말뚝들에 대하여 압축 정재하실험을 실시하여 하중-침하 곡선을 구했으며, 이 곡선들로부터 연직 극한 하중을 결정하고, 그 특성을 비교·분석하였다. 또한, 선단 하부지반 그라우팅 말뚝에 대한 해진 실험을 실시하여 해진으로 인한 말뚝의 지지력 특성을 비교·분석하였다. 또한, 2개와 4개로 구성된 군말뚝들에 대해서도 정재하실험과 해진실험을 수행하여 그 특성을 비교·분석하였다.

4.1. 예비실험 결과 및 분석

유효 구속압력 60kPa를 작용시켜 얻어진 대표적인 하중-침하 곡선(Load-settlement curve)을 그림 5에 나타내었다. 여기서, Log P-Log S의 그래프에서 최대곡률점의 하중을 극한지지력으로 판정하는 De Beer(1967)방법에 의해서 결정하였다. 폐단말뚝은 개단말뚝에 비해서 지지력이 50%증가하였고, 관내토 선단부 그라우팅한 말뚝은 29~96%까지 지지력에 많은 차이가 있었다. 이러한 결과는 관내토 굴착시 관내토의 교란으로 인하여 상향의 침투가 유발되었고 이로 인하여 말뚝 선단 하부지반이 이완될 수도 있었기 때문이었다. 따라서, 관내토 선단부 그라우팅으로 인하여 오히려 단위 선단 지지력이 저하되어 지지력에서 말뚝의 압축 지지력도 감소하였으며 큰 분산이 발생하였는데, 이는 실험의 정밀도에 의해 좌우되었다. 말뚝 선단하부지반까지 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝 지지력의 103%이었으며, 말뚝의 침하량은 약 30%만큼 감소하였다. 이는 강관말뚝 선단두께가 두꺼워 상대적으로 선단하부지반의 그라우팅 영역이 말뚝의 외부직경을 벗어나지 못하여 지지력 증가 효과가 미미하였던 것으로 판단되었으나, 선단 하부 그라우팅된 말뚝의 지지력이 개단말뚝의 지지력 보다는 큰 값을 나타내어 말뚝 선단하부지반 그라우팅에 의하여 지지력이 증가될 가능성이 있음을 발견할 수 있었다.

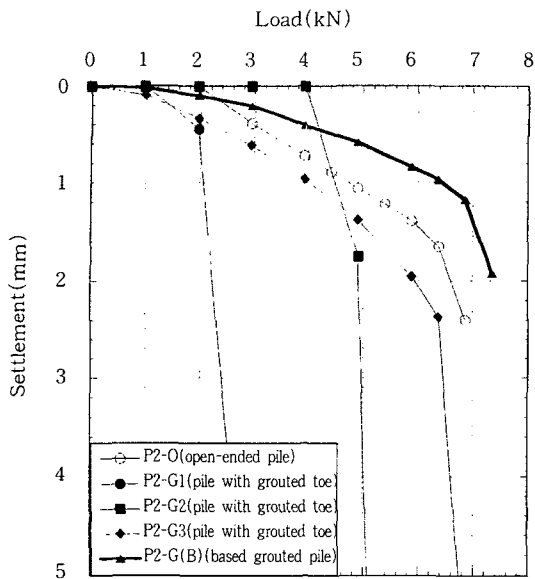


그림 5. Load-settlement curves for pre-test piles with grouted toe and base-grouted piles(double tube type)(Confining pressure = 60kPa)

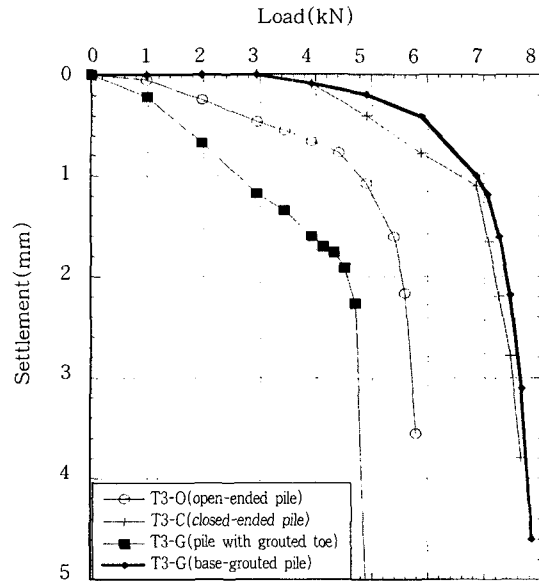


그림 6. Load-settlement curves (confining pressure: 60kPa)

4.2. 외말뚝의 정재하실험 결과 및 분석

상대밀도가 50%인 포화된 모형지반에 구속압이 20, 35, 60, 그리고 120kPa로 변화시켜서 정재하실험을 수행하였으며, 구속압력 60kPa일 때의 하중-침하 곡선을 그림 6에 나타내었다. 개단말뚝에 대한 다른 말뚝들의 극한 지지력을 비교하여 표 5에 나타내었다.

20, 35, 60, 그리고 120kPa의 구속압에서 폐단말뚝은 개단말뚝에 비해 각각 138.5, 130.6, 128.6, 120.3%의 극한지지력을 가졌으며, 따라서, 20~39%정도의 지지력 증가를 나타내었다. 그 이유는, 폐단말뚝은 지중 관입시 말뚝체적만큼의 흙을 측면으로 밀어내어 개단말뚝이 타입된 지반의 밀도보다 조밀하게 되어 외주면 마찰력이 더 크게 작용하였기 때문이었다. 즉, 횡방향 토압계수가 증가하기 때문이었다. 구속압이 증가할수록 지지력 증가율은 감소하는 것을 알 수 있었다. 이는, 다른 조건이 같은 상태에서 구속압이 증가할수록(즉, 말뚝의 관입깊이가 증가할수록) 개단말뚝의 폐색률이 증가하므로 폐단말뚝에 대한 개단말뚝의 지지력 차이는 감소함을

표 5. Bearing capacity comparison for pile with grouted toe and base-grouted pile(single pile)

Pile type		Confining pressure(kPa)	Ultimate Load(kN)	Increase and decrease for bearing capacity(Q/Q ₀ ,%)
T1-O	O	20	2.6	100
T1-C	C		3.6	138.5
T1-G	G		1.8	69.2
T1-G(B)	G(B)		3.3	126.9
T2-O	O	35	4.9	100
T2-C	C		6.4	130.6
T2-G	G		3.4	69.4
T2-G(B)	G(B)		6.2	126.5
T3-O	O	60	5.6	100
T3-C	C		7.2	128.6
T3-G	G		4.6	82.14
T3-G(B)	G(B)		7.5	133.9
T4-O	O	120	14.3	100
T4-C	C		17.2	120.3
T4-G	G		12.7	88.8
T4-G(B)	G(B)		17.7	123.8

where, O: Open-ended pipe pile, C: Close-ended pipe pile
G: Plug toe-grouted pile, G(B): Pile grouted below pile toe

알 수 있었다.

관내토 선단부만 그라우팅한 말뚝의 경우, 20, 35, 60, 그리고 120kPa의 구속압에서, 개단말뚝에 비해 지지력이 69.2, 69.4, 82.14, 88.8%정도로 더 작음을 알 수 있었다. 그 이유는 관내토 굴착시 상향의 침투가 유발되었고, 이로 인하여 말뚝 선단 하부지반이 이완되었기 때문이다. 결과적으로 관내토 선단 그라우팅 말뚝은 오히려 단위 선단 지지력이 저하된 것으로 판단되었다. 극한지지력의 크기에서는 분산이 크게 발생하였는데, 이는 실험시 오거 작업과 그라우팅재를 넣고 교반기로 혼합한 시간등과 같은 차이, 즉, 실험의 정밀도에 의해 좌우되었다.

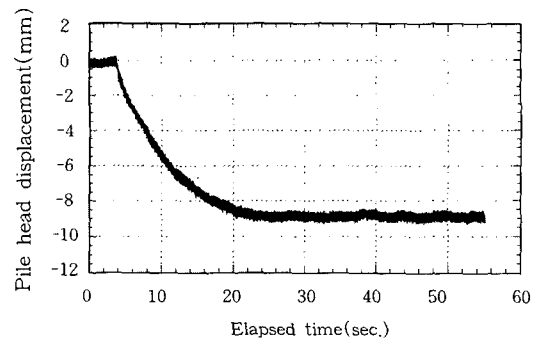
선단 하부지반까지 그라우팅된 말뚝의 경우, 20, 35, 60, 120 kPa의 구속압에서 개단말뚝에 비해 126.9, 126.5, 133.9, 123.8%로 지지력이 증가하였으며 폐단말뚝의 지지력과 거의 비슷하였다. 관내토 선단 그라우팅 말뚝은 선단 하부지반이 이완되었으므로 지지력이 작게 나오는 반면, 선단 하부지반까지 그라우팅한 말뚝은 관내토 굴착후 느슨해진 말뚝 선단 주변 흙을 쏘일 시멘트화 시켰으므로 말뚝 선단 외경보다 약 1.2배 크고 말뚝 선단 하부지반의 약 1.5D_o 깊이까지 걸친 구근이 형성되어 선단 지지력이 증가된 것으로 판단되었다. 선단 하부그라우팅 말뚝의 지지력 증가율은 개단말뚝에 비해 26.9, 26.5, 33.9, 그리고 23.8%로 대체로 비슷하였다. 이러한 지지력의 차이는 Kusakabe등의 연구(1994)에서와 같이 그라우팅 유효직경과 유효깊이에 따른 차이로 여겨지며, 선단 하부지반 그라우팅된 구근의 형태와 크기에 따른 연구는 계속 진행되어야 할 과제이다.

4.3. 외말뚝의 해진 실험결과 및 분석

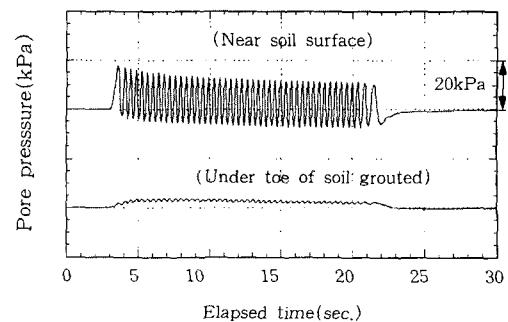
그림 7은 토조의 유효 구속압력 20kPa(즉, 말뚝의 관입깊이 7m를 모델링 하였음), 동수압의 진폭이 21kPa(심해를 모델링 하였음), 그리고 주파수가 2.5Hz인 경우의 해진 진동실험(S1)의 결과를 나타내었다. 이것은 Williams and Mau(1988)의 수심에 대한 진폭의 크기로부터

수심 약 232m을 유사화시켰는데, 해진중 지표면 부근의 말뚝 외주면에 작용하는 간극수압이 21kPa이었으므로 구속압 보다 더 큰 간극수압이 작용되었으나, 말뚝 선단 하부지반 근처의 간극수압의 크기는 약 5kPa로 선단 하부로 갈수록 간극수압의 크기는 크게 감소하였다. 해진 작용에 의해 발생된 간극수압은 말뚝의 외주면 마찰력을 감소시켰으며, 따라서, 말뚝의 지지력이 감소되어 파괴되는 것으로 판단되었다.

반면에, 그림 8은 토조에 유효 구속압력이 20kPa(즉, 말뚝 관입 깊이 7m를 모델링 하였음), 동수압의 진폭이 14kPa(천해를 모델링 하였음), 주파수가 2.5Hz인 경우의 해진 진동실험(S2)의 결과를 나타내었다. 수심 약 185m을 유사화시켰으며, 해진중 지표면부근의 말뚝 외주면에 작용하는 간극수압이 14kPa였으나, 말뚝

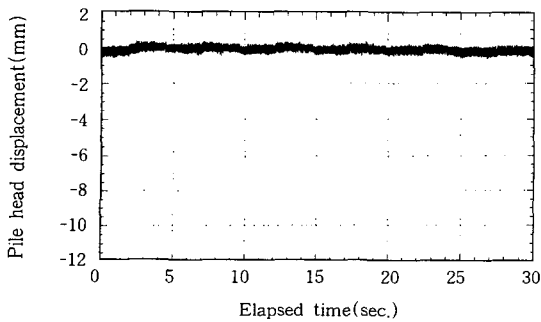


(a) Pile head displacement-time history

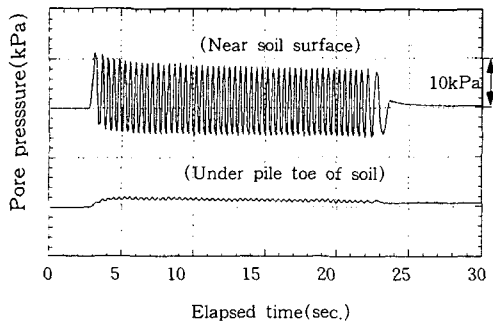


(b) Induced pore pressure-time history

그림 7. Seaqueake test results for a pile installed in simulated deep sea(S1, confining pressure = 20kPa, amplitude of seaquake = 21kPa, and frequency of simulated seaquake = 2.5Hz



(a) Pile head displacement-time history



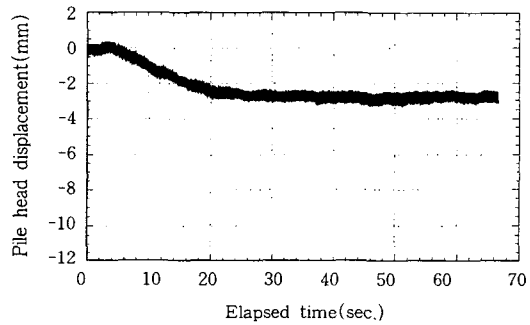
(b) Induced pore pressure-time history

그림 8. Seaqueake test results for a pile installed in simulated shallow sea(S2, confining pressure = 20kPa, amplitude of seaquake = 14kPa, and frequency of simulated seaquake = 2.5Hz)

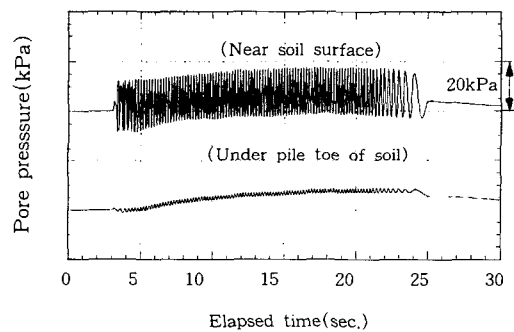
선단 하부지반 근처에서 간극수압은 약 2.5kPa로 구속압에 훨씬 못 미치게 발생되므로 말뚝을 파괴시키지 못하였다

그림 9는 토조의 유효 구속압력 35kPa(약, 12m의 말뚝 관입 깊이를 나타냄), 동수압의 진폭이 20kPa, 주파수가 5Hz인 경우의 해상파 진동실험(S3)의 결과를 나타내었다. 수심 약 230m를 유사화시켰는데, 토조의 유효 구속압력 35kPa에 비해 지표면부근의 말뚝 외주면에 작용하는 간극수압이 20kPa, 말뚝 선단하부지반 근처에서 간극수압은 9kPa로 나타났다. (a)에서와 같이 해진중 말뚝머리가 약 2.9mm 정도 침하하였는데, 이것은 모형말뚝 직경의 10%에도 미치지

지 못하였으므로 해진은 말뚝을 파괴시키지 못하였고, 해진에 의한 간극수압으로 인한 외주면 마찰력 감소와 주변 지반 흙의 유동으로 말뚝이 약간 미끄러지는 것으로 판단되었다. 최용규 등(1998)의 연구에서는 유효 구속압력 35kPa를 작용시킨 개단강관말뚝은 심해(Deep sea)에서 해진후 파괴되었다. 이 경우는 해진으로 인한 간극수압이 동수경사를 크게 하여 관내토를 파괴시켰는데 비해, 선단 하부지반 그라우팅된 개단말뚝은 해진으로 말뚝 선단근처에서 발생된 간극수압이 그라우팅된 관내토를 통하여 상향 침투를 유발시키지 못하였으므로 그라우팅된 관내토를 파괴시킬 수가 없었다. 따라서, 말뚝 상부의 외주면 마찰력의 극히 일부만 감소되므



(a) Pile head displacement-time history



(b) Induced pore pressure-time history

그림 9. Seaqueake test results for a pile installed in simulated deep sea(S3, confining pressure = 35kPa, amplitude of seaquake = 20kPa, and frequency of simulated seaquake = 5.0Hz)

로 말뚝의 파괴를 유발시키지 못하고 약간 미끌어지는 가동(Mobility) 상태를 유지하였다.

유효구속압력 60kPa인 심해(Deep sea)에서는 선단 하부그라우팅 말뚝의 지지력은 저감되지 않았으며, 따라서, 안정한 상태(Stability condition)를 유지하여 파괴되지 않았다. 외말뚝의 해진에 대한 안정성을 표 6에 요약하였다.

표 6. Seaquake test results on single pile

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Relative density (%)	50	50	50	50	50	50
Confining pressure(kPa)	20	20	35	35	60	60
Pile penetration depth(m)	7	7	12	12	20	20
Sea depth(m)	232	185	230	130	235	155
Stability	F	S	M	S	S	S
Remark	Fig.4.7	Fig.4.8	Fig.4.9	Fig.4.10	Fig.4.11	Fig.4.12

where, S: stability condition. M:mobility condition. F:failure condition

4.4. 군말뚝의 정재하실험, 해진 실험 결과 및 분석

상대밀도 50%인 포화된 모형지반에 구속압을 20, 35, 그리고 60kPa로 변화시켜가며 2개와 4개로 구성된 군말뚝에 대한 정재하실험을 수행하였으며, 여기서, 2개 군말뚝에 대한 하중-침하 곡선을 그림 10에 나타내었다. 여기서, 외말뚝에서와 같이 Log P-Log S의 그림에서 최대곡률점의 하중으로 극한지지력을 구하는 De Beer (1967)방법에 의해서 결정하였다.

말뚝의 직경(B)이 40.35mm이고, 2개로된 군말뚝의 경우 말뚝 중심간 간격(s)이 274.0mm로 s/B가 약 6.8이고, 4개로된 군말뚝의 말뚝 중심간 간격(s)이 195.0mm로 s/B가 약 4.8이었다. 흙의 교란과 말뚝 타입으로 인한 밀도의 증감오차를 고려한 3~3.5보다 충분하게 여유 있는 간

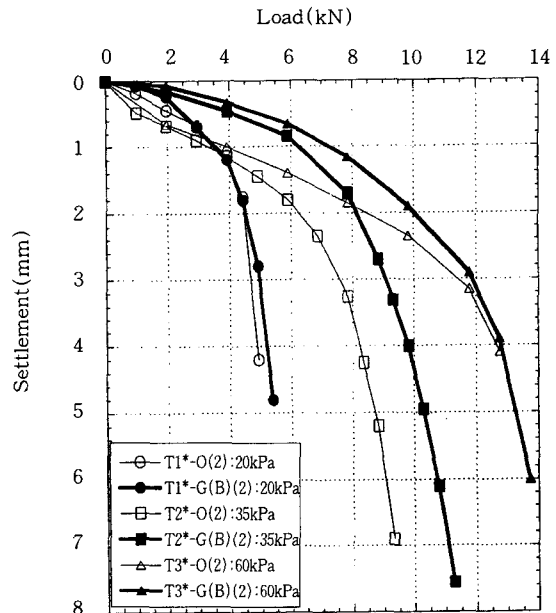
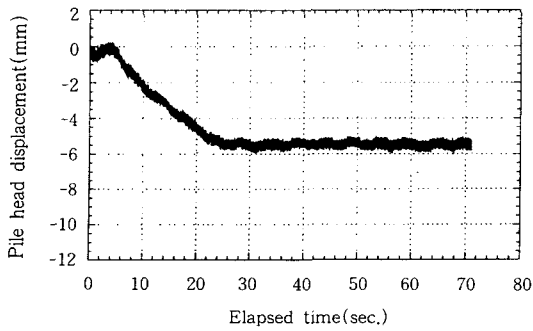


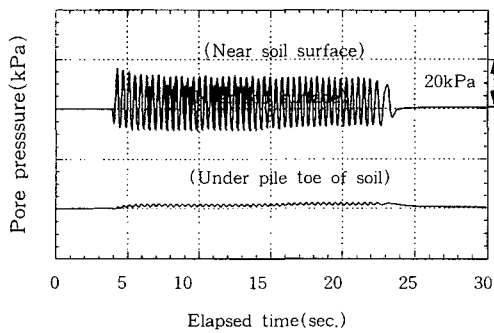
그림 10. Load-settlement curves(2-piles group)

격으로 배치되었고, 타입으로 인한 다짐효과로 군효율이 1보다 크게 나타났다. 또한, 개단말뚝에 대한 말뚝 선단 하부 그라우팅 말뚝의 극한 지지력은, 2개의 군말뚝의 경우 20, 35, 그리고 60kPa 구속압에서 121.4, 131.8, 그리고 114.6%이었고, 4개의 군말뚝의 경우 122.4, 120.0, 그리고 115.3%이었으므로 개단말뚝보다 지지력이 증가하였다. 그 이유는 외말뚝과 같이 선단 하부지반의 그라우팅으로 인한 선단지지력이 증가하였기 때문이고, 그라우팅 유효면적과 실험의 정도에 따라 다소 차이는 있는 것으로 판단되었다.

그림 11은 토조의 유효 구속압력 20kPa, 동수압의 진폭이 22kPa, 주파수가 2.5Hz인 경우의 해진 진동실험(S1*(2))의 결과를 나타내었다. 이것은 Williams and Mau(1988)의 수심에 대한 진폭의 크기로부터 수심 약 235를 유사화 시켰는데, 구속압력 20kPa인 선단 하부그라우팅된 외말뚝이 심해에 설치된 경우 해진시 파괴되었으나, 선단 하부 그라우팅된 군말뚝(S1*(2))의

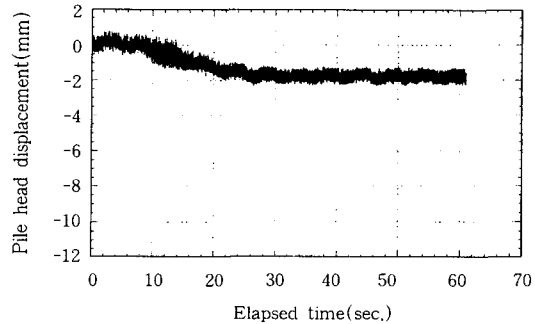


(a) Pile head displacement-time history

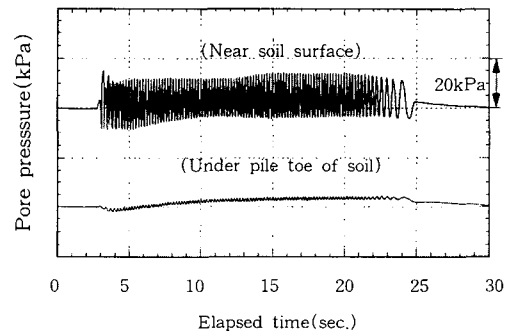


(b) Induced pore pressure-time history

그림 11. Seaquake test results for 2-piles group installed in simulated deep sea(S1*(2), confining pressure=20kPa, amplitude of seaquake=22kPa, and frequency of simulated seaquake=2.5Hz)



(a) Pile head displacement-time history



(b) Induced pore pressure-time history

그림 12. Seaquake test results for 2-piles group installed in simulated deep sea(S5*(2), confining pressure=35kPa, amplitude of seaquake=20kPa, and frequency of simulated seaquake=5.0Hz)

경우에는 해진시 해진으로 말뚝 머리가 각각 약 4.56mm, 5.1mm 침하하였다. 일반적으로 군말뚝의 경우 같은 작용 응력 상태에서 외말뚝보다 침하가 크게 나타나므로 군말뚝이 약간 변위하는 가동(Mobility) 상태를 유지하는 것으로 판단되었다.

그림 12는 토조의 유효 구속압력이 35kPa, 동수압의 진폭이 20kPa, 주파수가 5.0Hz인 경우의 해진 진동실험(S5*(2))의 결과를 나타내었다. 수심 230m를 유사화한 심해(Deep)에서의 해진 실험 결과인데, 외말뚝에서와 같이 파괴되지 않고 가동(Mobility)상태를 유지하는 것으로 판단되었다. 2개와 4개로 된 군말뚝의 경우에는 심해에서도 대체로 안정(Stability)한 것으로 나타났다. 군말뚝의 해진에 대한 안정성을 표 7에 요약하였다.

표 7. Seaquake result on group pile

	Relative density(%)	Confining pressure(kPa)	Pile penetration depth(m)	Sea depth(m)	Stability
S1*(2)	50	20	7	235	M
S2*(2)	50	20	7	185	S
S3*(4)	50	20	7	245	M
S4*(4)	50	20	7	130	S
S5*(2)	50	35	12	230	M
S6*(2)	50	35	12	155	S
S7*(4)	50	35	12	232	S
S8*(4)	50	35	12	160	S
S9*(2)	50	60	20	235	S
S10*(2)	50	60	20	160	S
S11*(4)	50	60	20	130	S

where, mark*:group pile
 mark(2): 2 piles group, (4): 4 piles group
 S: stability condition, M: mobility condition, F: failure condition

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 모형 압력 토조에 외말뚝의 개단, 폐단, 관내토 그라우팅, 그리고 선단 하부지반 그라우팅 말뚝들을 설치하여 수행된 재하 실험을 수행하여 그 지지력을 비교하였고, 유사화된 해진시 말뚝의 설치깊이를 변화시켜 선단 하부지반 그라우팅 말뚝의 안정성을 검토하였다. 또한, 이러한 재하실험과 해진 실험은 2개와 4개로 된 군말뚝에 대해서도 수행하였다. 본 논문에서 얻은 결론들은 다음과 같다.

1) 관내토 선단부만 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력의 70~89%정도였으며 이는 관내토 굴착시 선단하부지반이 교란되어 선단 지지력이 감소되었기 때문이다.

2) 관내토 선단 하부지반 그라우팅한 말뚝의 지지력은 개단말뚝의 지지력보다 약 23.8~33.9%정도 증가하였으며, 이는 폐단말뚝의 지지력과 비슷하였다. 여기서, 그라우팅의 유효범위는 말뚝직경의 약 20%정도 확대되었다. 그리고, 그라우팅 유효범위가 확대될 수록 지지력 증가 효과는 증진 될 것으로 예상되었다. 따라서, 선단하부지반의 그라우팅의 유효범위를 더 확대할 수 있다면 폐단말뚝의 지지력을 훨씬 초과하는 지지력 증진 효과를 거둘 수 있을 것이다.

3) 선단 하부지반 그라우팅된 군말뚝은 개단 군말뚝에 비해 지지력이 증가하였는데, 2개의 군말뚝의 경우에는 14.6~31.8% 지지력이 증가하였으며, 4개의 군말뚝의 경우는 15.3~22.4% 증가하였다.

4) 심해에서 발생된 해진시 관내토 선단 하부지반 그라우팅된 개단말뚝의 안정성은 말뚝의 설치 형태와 말뚝의 지중관입 길이에 따라 달라졌다.

5) 선단 하부지반 그라우팅된 외말뚝의 경우에는 지중 관입 깊이가 20m보다 깊어지면 안정한 상태를 유지할 수 있었고 12m보다 짧은 말뚝은 파괴될 수 있었으며, 12m 긴말뚝의 경우에는 가동(Mobility) 상태를 유지할 수 있었다. 그러나, 군말뚝의 경우에는 지중관입 깊이가

7m이상이면 지지력의 일부가 감소하여 약간 변위하는 가동(Mobility) 상태를 유지할 수 있었다.

6) 본 연구에서는 선단 하부지반의 그라우팅 영역(깊이와 지름)을 변화시키지는 못하였으며, 이에 관한 연구는 차후에 계속되어야 할 것이다. 또한, 차후에 현장에 설치된 실험대형 말뚝에 대한 실험도 수행하여 현장에서의 적용성을 검증하여야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 1996년 한국학술진흥재단의 공모 과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. 정두환(1999), "관내토 선단 하부지반 그라우팅 강관말뚝의 연직지지력에 관한 연구," 동아대학교 대학원 석사학위 논문, 1999. 2
2. 최용규, 남문석(1998), "해저면의 수직 지진 진동에 의해 유발된 해진에 대한 해상 개단 강관말뚝 기초의 거동," 한국지진공학회 논문집, 제2권 제1호, 한국지진공학회, pp. 11~21.
3. Choi, Y. and O'Neill, M. W. (1997a), "Response of Soil Plug to Horizontal and Vertical Excitation," Proceedings of the 7th (1997) International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, USA, May 25-30, pp. 772-777.
4. Choi, Y. and O'Neill, M. W. (1997b), "Soil Plugging and Relaxation in Pipe Pile During Earthquake Motion," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 10, Oct. pp. 975-982.
5. Choi, Y., O'Neill, M. W. and Nam, M. S. (1998), "Response of Soil Plug to Seaquake Induced by Vertical Seismic Excitation" Proceedings of the 8th (1998) International Offshore and Polar Engineering Conference, Montreal, Canada, May 24-29, pp. 390-397
6. Kobayashi, H., Sakuta, M., Okamoto, O., and

- Hirakawa, S. (1992), "Safety Consideration of the TLP on Earthquake Wave Propagated through Seawater," Proceedings of the 20th Annual OTC, Paper 6888, Vol. 2., pp. 139-145.
7. 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.
 8. 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.
 9. 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, pp. 371~376.
 10. 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.
 11. Ochoa, M., (1990), "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand," Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.
 12. Rao, P. M.(1997), "Performance of Tension Piles During Simulate Ground Shaking and Seaquakes," Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Houston.
 13. 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, and held in London on 7-9 Aprill.
 14. Teparaksa, W. (1994), "Newly Developed Toe-grouted Bored Pile in Soft Bangkok Clay : Performance and Behavior," Vol. III, Dec. pp. 1337~1351.
 15. Williams, A. N. and Mau, S-T, (1988), "Earthquake Response of Submerged Circular Arch," Journal of Waterways, Ports, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 4, pp. 405-422.

(접수일자 1999. 2. 4)