

# 소형 압력 토조내에 타입된 말뚝의 인발 거동과 극한 인발 지지력 결정에 관한 연구

Study on Pullout Behavior and Determination of Ultimate Uplift  
Capacity of Pile Driven in Small Pressured Chamber

최 용 규\*  
Choi, Yong Kyu

---

## Abstract

Based on the various test data acquired in the field, the large pressure chamber and the small pressure chamber, uplift behaviors and method of determining the ultimate uplift capacity of pile driven in small pressure chamber were studied.

After uplift pile experienced 2 or 3 sudden slip due to increase of uplift load, complete pull-out failure was occurred. Thus, it appears that the ultimate uplift capacity could be identified as the load at displacement where first slip occurs.

The ultimate uplift capacity might be determined in every test and the disturbance after first uplift test could be recovered by adding one blow of the drop hammer, which had to depend on the model pile capacity.

## 요 지

소형 압력 토조(small pressure chamber)를 이용하여 포화된 사질토에 타입된 폐단 강관 말뚝의 인발거동 특성을 연구하였다. 소형 압력 토조 시험에서는 인발 하중이 인발변위와 함께 증가하다가 급작스러운 미끄러짐 변위가 발생하는 현상이 2~3회 반복되다가 완전 인발파괴에 이르게 되는데, 이때 첫번째 미끄러짐 변위가 발생하는 하중의 크기를 극한 인발 지지력으로 정의할 수 있다. 또한, 소형 압력 토조 시험에서는 미세한 시험 조건에 의해서도 극한 인발 지지력의 크기가 50% 이상의 오차를 나타낼 수도 있으므로 모형 지반을 형성할 때마다 인발 재하 시험에 의하여 극한 인발 지지력을 결정하여 사용하는 것이 좋을 것으로 판단되며, 이때 1차 인발 시험에 의해 교란된 지반의 상태는 모형 말뚝의 크기에 적합한 타격에너지를 가해주어 회복시킬 수 있다.

---

## 1. 서 론

송전용 철탑, 수리용(hydraulic) 구조물과

교량, 해양 플랫폼, 말뚝에 고정된 부교 등과 같이 정적 및 동적 전도 모멘트를 크게 받는 구조물을 지지하고 있는 말뚝에는 인발 하중이

---

\*정회원, 경성대학교 공과대학 토목공학과 조교수

작용하게 된다. 이들 구조물의 기초로는 연약한 점성토의 경우, 강관 말뚝을 깊숙이 타입하여 사용하며, 사질토인 경우에는 전면 기초를 사용하는 것이 대부분이었다. 그러나, 지반의 지지능력이 충분한 사질토 지반인 경우에도 말뚝기초를 사용해야 할 경우가 있다. 예를 들면, 액상화 현상이 유발될 수 있는 지진 활성지대나 경사지등에 설치된 전면 기초는 불안정할 수도 있으므로 전면 기초 아래에는 말뚝 기초가 사용되어질 수도 있다.

이와 같이 사질토에 타입된 말뚝의 인발 및 압축 지지력의 결정에는 유한 요소법과 하중전이 함수 방법등과 같은 해석적인 방법, 원심 분리 모형 실험 방법, 압력 토조(calibration chamber)에 의한 모형 실험 방법등이 이용되어질 수 있다. 이들 방법중 압력 토조 실험에서는 각 경계면에서의 구속압력을 변화시켜 경계효과를 고려할 수 있으며, 실제 말뚝과의 크기효과를 고려할 수 있는 장점이 있고, 큰 압력 토조를 사용하면 모형 말뚝의 크기도 크게 할 수 있어서 크기효과를 줄일 수 있어 유리하다. 현재까지 사용된 가장 큰 압력 토조는 O' Neill<sup>2)</sup>이 사용한 것으로 직경 0.75m 높이가 2.5m 원통형 압력 토조였다. 그러나, 말뚝의 지진시의 거동을 규명하기 위한 실험에서는 대형 압력 토조를 진동시킬 수 있는 진동기가 설치된 채하 장치를 제작하기란 극히 어려우므로 소형 압력 토조를 사용할 수 밖에 없다. 모형 압력 토조를 이용한 말뚝의 거동에 관한 연구는 1978년 Yazdanbod<sup>1)</sup>가 직경 0.5m, 높이가 2.5m 크기의 토조를 제작하여 사용한 이래 많은 연구자들에 의해 활발하게 연구가 진행되어지고 있다. O' Neill et al.<sup>2, 3, 5, 6, 9)</sup>은 직경 1.0m, 높이가 2.5m 크기의 대형 압력 토조를 이용한 연구를 진행하였으며, 또한 O' Neill et al.<sup>6)</sup>은 직경 0.5m, 높이가 0.5m의 소형 압력 토조를 이용하여 지진시의 인장 말뚝의 안정성(stability)에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 이 연구는 현재도 진행되어지고 있다. 또한, R.E. Olson 교수도 직경 1.0m, 높이가 1.32m의 모형 압력 토조를 이용하여 개단 강관 말뚝의 폐쇄 거동 및 극한

지지력에 관한 연구를 진행하고 있으며 현재 국내에도 소형 압력 토조를 이용한 말뚝의 거동 연구가 진행되어지고 있다. 모형 압력 토조를 이용한 연구는 주로 말뚝의 관입능력(driveability)과 압축 하중을 받는 말뚝의 거동에 관심이 집중되어져 왔으며, 인발 하중 작용시의 말뚝의 인발 거동 특성에 관한 연구는 찾기가 힘든 형편이다.

본 논문에서는 현장 실험, 대형 및 소형 압력 토조에서 실시된 모형 실험에서 인발 하중을 받는 말뚝의 거동을 알아보고, 소형 압력 토조에서 실시된 모형 실험을 토대로 하여 인발 하중이 작용된 말뚝의 극한 지지력을 결정하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 모형 실험

### 2.1 실험계획

말뚝의 인발 거동을 알아보기 위하여 총 13회의 실험을 수행하였으며, 구체적인 실험계획을 표 2.1에 나타내었다. 각 실험에서 모형 지반의 상대밀도는 중간 정도 촘촘한 상태로 하였으며, 모형 토조에는 1.8, 2.2t/m<sup>2</sup>의 2가지 구속 응력을 작용시켜 주었다. 압력 토조에 말뚝을 타입하는데 적용된 25mm 당의 타격수는 최종 75mm 타입에 소요된 총 타격수를 평균한 값을 사용하였으며 매 실험의 타격수가 달라서 표 2.1에는 나타내지 않았으며 그림 4.1(d)에 나타내었다.

### 2.2 실험 장치 및 절차

#### 모형 지반

실험에는 초 세립질 모래(micro-fine sand)를 사용하였으며  $D_{10}=0.06\text{mm}$ ,  $C_u=1.66$ 으로 통일 분류법상의 분류기호는 SM였다. 소요 밀도로 형성된 지반의 투수 계수는  $1.21 \times 10^{-3}\text{cm/sec}$ 였으며 모형 말뚝과 모래와의 벽면 마찰각은  $22^\circ$ 이었다. 모형지반은 레이닝 방법에 의해 형성되었으며, 각 층의 상대밀도는 모형 토조 내부에 놓여진 3개의 알루미늄 용기들을 이용하여 측정하였다. 각 층의 상대밀도

표 2.1. 실험계획

실험 번호	구속 용력 (t/m <sup>2</sup> )	상대 밀도 %	인치당 타격수	목적
1~4	2.2	중간정도 층층 (49)	변화됨	인발 하중시의 말뚝의 거동, 극한 인발 지지력을 이용한 말뚝의 인발 지지력 결정
5~8	2.2	중간정도 층층 (49)	변화됨	인발하중시의 말뚝의 거동, 극한 인발 지지력 결정방법의 제안
9~10	1.8	중간정도 층층 (49)	변화됨	인발하중시의 말뚝의 거동, 극한 인발 지지력 결정방법의 제안
11~13	1.8	중간정도 층층 (49)	변화됨	인발하중시의 말뚝의 거동

를 균질하게 유지시켜주기 위해 소요의 시료 낙하 높이를 유지시켜 줄 수 있도록 시료통의 하부에 연결되어 있는 노즐의 높이를 조절하였으며, 시료 낙하용 노즐을 연속적으로 동심원 방향으로 돌리면서 압력토조의 내부에 시료를 낙하시켜 주었다. 각 층에서 측정된 상대밀도는 3%내외의 오차 범위를 갖고 있으나 압력토조 내부에 형성된 모형지반 전체의 상대밀도는 49%로 일정하게 됨을 알 수 있었다. 또한, 반복 제작된 시료의 상대밀도에 대한 통계분석에서 신뢰도가 99.6%이었으므로, 반복제작된 시료에 대한 동일성은 문제가 없는 것으로 보인다. 지반을 완전 포화시키기 위하여 압력토조 내부의 흙을 동일한 두개의 층으로 나누어서 형성시켰는데, 먼저 하부층을 레이닝하고 포화시킨후, 상부층을 레이닝하고 포화시켰다.

#### 모형 말뚝

직경 25mm 총길이 450mm(관입 길이 380mm)의 폐단 말뚝을 사용하였으며, 지표면 근처, 말뚝 중간 부분, 말뚝 선단 부분등 3개 깊이 위치에 스트레인 게이지를 부착하였으며, 스트레인 게이지들은 파이프의 안쪽면에 부착되어졌다. 각 깊이 위치에는 스트레인 게이지를 각각 180°반대쪽에 부착하여 4개이 지 결선법을 형성하였으며, 이들 게이지에 연결된 선들은 말뚝의 내부를 통하여 말뚝 머리부분까지 끌어올려 말뚝 머리부근에 있는 구멍을 통하여

밖으로 뽑아내어 자료 측정 시스템까지 연결되어졌다.

#### 압력 토조

조립된 압력토조는 높이 564mm, 직경 610mm의 강재로 제작된 원통형이며, 수평 방향의 구속압력과 수직방향의 구속압력을 따로 작용시킬 수 있게 수평방향과 수직방향으로 고무판 멤브레인을 따로 설치하였으며, 고무 멤브레인과 시료와의 마찰을 줄이기 위해 Teflon Sheet를 수평멤브레인과 상부멤브레인의 하부에 사용하였다. 따라서, 압력토조의 벽면과 상부멤브레인은 유연성(flexible)경계를 가지며, 바닥면은 강성(rigid)경계를 갖는다. 압력토조의 바닥에는 시료의 포화를 위한 급수용 파이프를 설치하였다. 말뚝은 압력토조의 중앙에 타격관입되어졌으며, 수평방향경계는 말뚝중심으로부터 말뚝반경의 20배이며, 수직경계는 말뚝 선단아래 말뚝반경의 10배이다.

#### 하중 재하

진동기가 장치된 동적 시험장치(instron dynamic testing machine)위에 압력토조를 위치시킨 후 모형 말뚝의 머리에 케이블을 연결하여 재하통을 달아두었으며(그림 2.1 참조), 인발 하중은 아주 작은 납 구슬을 재하통에 부어 넣어서 재하하였다. 이때, 하중재하로 인한 급작스러운 인발 파괴를 방지하기 위하여, 깔대기를 통하여 납구슬을 천천히 부어주었다.

#### 실험 절차

그림 2.1에는 실험 장치의 모식도를 나타내었으며, 실험 절차를 개략적으로 설명하면 다음과 같다.

모형 지반을 2층으로 나누어 레이닝법에 의해 형성한 다음 포화시켜 상부 뚜껑을 닫고 구속 압력을 측면과 상부에서 가해준다. 이때, 각 방향으로 동일한 구속압력을 가해주며, 따라서, 토조내의 응력상태는 등방성을 갖는 것으로 보아 정지토압계수(Ko)는 1.0으로 볼 수 있다. 모형말뚝은 압력토조내에 타격 관입되어졌다. 모형말뚝을 타입하는 동안 압력토조의 상부뚜껑에 있는 다른 구멍에서는 타격으로 인하여 흙이 밀려나오는 것을 관찰할 수 없었으

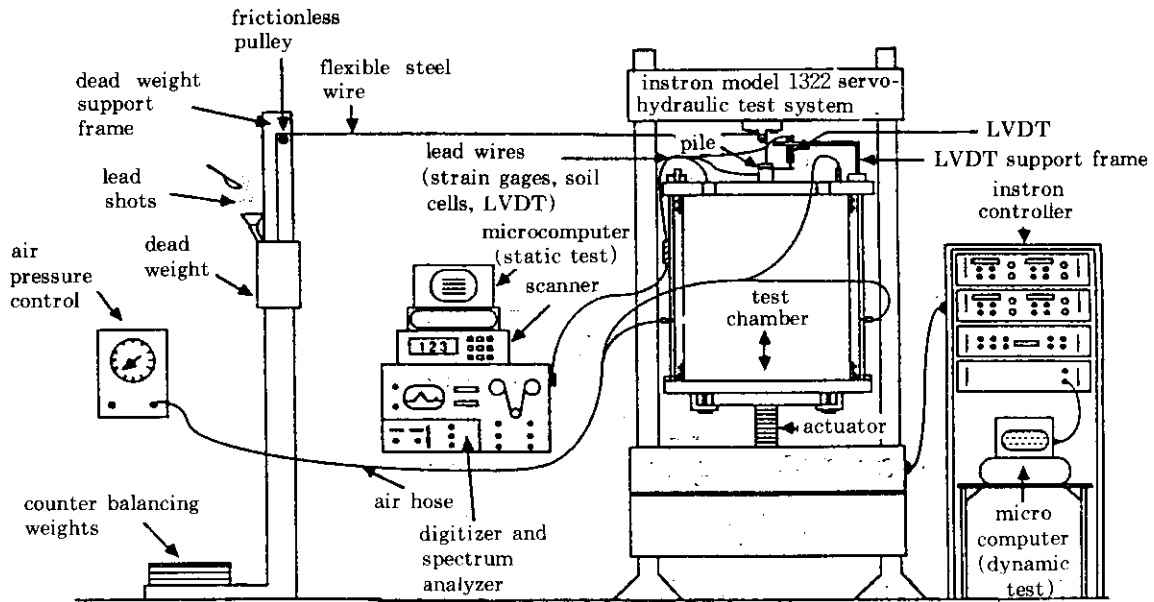


Fig 2.1 Schematic of testing arrangement

며, 물은 약간 배출되어졌다. 따라서, 모형말뚝의 타격관입으로 인한 지반의 다짐은 압력토조 내부에서 약간 발생하였을 것으로 추측되어지나, 직접 관찰하는 것은 곤란하였다. 말뚝 상부 캡을 통하여 케이블로써 재하통을 연결시킨 다음, 재하통에 납구슬을 매우 천천히 깔대기를 통하여 부어 넣으면서 말뚝이 급작스럽게 인발될 때까지 하중을 가한다. 실험 1-4, 11-13에서는 말뚝이 완전하게 인발될 때까지 하중을 계속 증가시켜주며, 실험 5-10에서는 1차 미끄러짐 변위가 발생된 후 하중을 제하하고 다짐 실험용 해머로써 한번 타격을 한 다음, 다시 인발 재하실험을 하여 완전하게 인발될 때까지 하중을 증가시켰다.

### 2.3 압력 토조 실험과 현장 크기 실험과의 상사 법칙

말뚝이 타입된 실제 현장의 조건, 말뚝의 제원 그리고 압력 토조에 사용할 모형 말뚝의 제원이 주어졌다면, 모형 압력토조에 작용시킬 구속 압력의 크기를 유효응력의 상사 법칙에 의해 결정할 수 있으며, 크기계수(scaling fac-

tor)도 정할 수 있다. 현장 지반의 흙이 완전 포화되어 있고 압력 토조내의 지반도 완전히 포화되었다고 가정하면 그림 2.2를 참조하여 식 2.1의 관계가 성립한다.

$$\left( \frac{\sigma'_{ov}}{\gamma' L_{60\%}} \right)_m = \left( \frac{\sigma'_{ov}}{\gamma' L_{67\%}} \right)_p \quad (2.1)$$

여기서,  $\gamma'_m, \gamma'_p, (L_{50\%})_m, (L_{57\%})_p$ 는 그림에 설명되어져 있으며,  $(\sigma'_{ov})_m, (\sigma'_{ov})_p$ 는 모형 말뚝과 실제크기 말뚝의 전 길에 걸쳐 작용되어지는 유효 응력의 평균 크기를 나타내는데 모형 압력 토조의 측면과 상부에서 동일한 압력을 작용시켜주면 등방 응력 상태이고, 과압밀된 사질토에 타입된 현장 말뚝을 가정하면 현장말뚝에 작용하는 평균 수평 방향 유효 응력의 크기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\sigma'_{ov})_p = (L_{67\%}) (\gamma'_p) (1 + 2K_{op}) / 3 \quad (2.2)$$

여기서  $K_{om}$ 과  $K_{op}$ 는 모형 지반과 현장 지반에서의 수평 정지 토압 계수이며 Mayne & Kulhawy가 제안한 다음 식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$K_o = (1 - \sin \phi') OCR^{sin \phi'} \quad (2.3)$$

여기서, 모형 지반에는 모든 방향으로 동일한 크기의 응력이 작용되고 있으므로 OCR은 1로 볼 수 있으며 현장 지반은 중간 정도 촘촘한 과압밀된 사질토라고 가정하여 OCR을 1.5로 하였다. 또한, 본 실험에 사용된 지반의 내부 마찰각은 39이고 현장지반의 내부 마찰각도 동일하다고 가정하면  $K_{om}$ 과  $K_{op}$ 는 각각 0.37과 0.48이다. 여기서, 현장에 10m의 말뚝이 타입되어졌고 모형 말뚝의 관입 깊이가 400mm이고 직경이 25mm라면 압력 토조에 가해질 구속 응력의 크기는 다음과 같다.

$$(\sigma'_{ov})_p = (2/3 \times 10)(0.88) \left( \frac{1 + 2 \times 0.48}{3} \right) = 3.83t/m^2$$

여기서, 유효 응력의 상사성에 의해  $(\sigma'_{ov})_p$ 와 동일한 응력을  $3.83t/m^2$ 을 모형압력 토조에 등방적으로 작용시켜 준다고 가정하면,  $\gamma'_m = \gamma'_p$ 이므로 식 2.1에서 크기계수(scaling factor) N을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(L_{50\%})_m \times N = (L_{67\%})_p$$

$$N = \frac{(L_{67\%})_p}{(L_{50\%})_m} = \frac{2/3(10)}{1/2(0.4)} \approx 33$$

따라서, 모형 실험에서 사용된 직경 25mm, 관입 깊이가 400mm의 모형 말뚝은 현장에 타입된 직경 0.8m 정도의 실제 말뚝이 길이 13m 또는 그이상 관입된 긴 말뚝인 경우에는 상부 13m의 말뚝 부분에 대한 거동을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

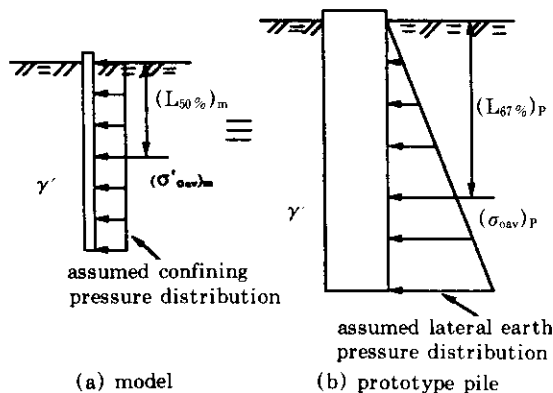


Fig 2.2 Simulation between model pile in the calibration chamber and prototype pile in the field

### 3. 소형 압력 토조에 타입된 말뚝의 인발 거동 특성

그림 3.1에는 직경 270mm, 관입 깊이가 18.0m의 현장 타입 말뚝 5개에 대한 인발재하 시험들<sup>1)</sup>의 평균 값, 대형 압력 토조에 타입된 직경 100mm, 관입 깊이가 2.5m 모형 말뚝 16개에 대한 인발 재하 시험들<sup>3)</sup>의 평균 값 그리고 소형 압력 토조에 타입된 직경 25mm, 관입 깊이가 400mm인 모형 말뚝에 대한 인발 재하 시험들 27회(촘촘한 지반에 7회, 중간 촘촘한 지반에 20회 실시)에 대한 평균 값을 나타내었으며, 여기에는 최대 인발 하중과 말뚝의 직경에 대하여 재하 하중과 말뚝머리의 인발 변위를 각각 정규화(normalization)하여 나타내었다. 최대 극한 인발 하중이 발생되어지는 변위는 말뚝 직경의 약 5%이내로 되어짐을 알 수 있으며, 특히 소형 압력 토조에서 실시된 인발 재하 시험의 경우에는 최대 극한 하중이 발생되어지는 변위는 더욱 작아서 말뚝 직경의 1% 이내의 변위로 되어짐을 알 수 있다. 그리고, 대형 압력 토조에서 실시된 인발 재하 시험의 경우에는 최대 극한 인발하중이 나타나게 되면 더 이상의 하중 증가는 거의 없는 것을 볼 수 있다.

그러나 소형 압력 토조에서 실시된 인발 재하 시험의 경우에는 말뚝의 인발 변위와 함께 인발 하중이 점차적으로 증가하다가 급작스러운 미끄러짐(slip) 변위가 발생하게 되는 현상이 2~3회 반복되다가 파괴에 이르게 됨을 알 수 있는데(그림 3.2), 이러한 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다.<sup>(5)</sup>

인장시의 파괴는 말뚝과 흙 모두에서 변형 에너지의 감소를 수반하면서 흙에 대하여 말뚝이 연속적으로 미끄러지기 때문에 일어나게 된다. 일단, 미끄러짐(slip)이 발생하게 되면 활동 마찰력이 정지 마찰력으로 다시 변환되어 말뚝의 인발 변위와 속도를 순간적으로 감소시키게 된다. 말뚝이 흙에 대하여 다시 미끄러지기 전까지는 이차적인 정지 마찰력이 이전에

발생된 미끄러짐 직후의 정지마찰력보다 항상 약간 크게 되어 급작스런 미끄러짐이 연속적으로 발생되지는 않는다. 이러한 거동은 압축 재하 시험에서는 관찰할 수 없는 특성이다.

소형 압력 토조내에 형성된 동일한 지반에 인발 재하 시험을 실시(1차 인발재하 시험)한 후 재하하고 실내 다짐 시험용 래머로 1회 타격하여 교란된 지반의 상태를 회복시켜 준다음 인발 재하 시험을 재실시(2차 인발 시험)하였다. 그림 3.3~3.5에는 각각 2회의 재하 시험에 대한 인발력-말뚝 인발 변위와의 관계, 길이에 따른 말뚝의 하중 전이 관계 그리고 말뚝 머리의 인발변위에 따른 인발 마찰 응력과의 관계를 나타내었다. 그림 3.3에서는 2회의 인발 재하 시험에서 미끄러짐이 발생하는 하중(최대 인발 하중으로 정의한다)은 크게 변화하지는 않으나 변위는 상당히 달라지는 것을 알 수 있다. 그림 3.4와 3.5에서는 일차 인발 재하 시험시에 말뚝 선단에 발생되어지게 되는 공동 확장(cavity expansion)에 의한 지반교란이 래머에 의한 1회의 타격으로 완전하게 회복되지 않는 것을 볼 수 있다. 특히, 그림 3.5에는 말뚝의 3위치에서 측정된 하중을 토대로 말뚝의 중앙 위부분과 중앙 아래 부분에서의 단위 인발 마찰력을 나타내었는데, 여기서는 말뚝의 아랫부분에서 인발에 의한 마찰 응력의 대부분이 발생되어짐을 알 수 있으며 2회의 인발 시험에 의한 마찰 응력의 크기는 중앙 위부분에서는 거의 비슷하나 중앙 아래부분에서는 약간 차이가 나는 것을 볼 수 있는데 그 원인은 앞에서 설명한 바와 동일하다.

그림 3.6에는 2회의 인발 재하 시험을 실시하여 최종 관입 깊이에 대한 타격수와 극한 인발 하중과의 관계를 나타내었다. 여기서, 타격수가 클수록 극한 인발하중이 증가하는 관계를 구하기는 어려우나, 2회의 인발 재하 시험에서 측정된 극한 인발 하중은 10% 이내에서 변화하고 있는 것을 볼 수 있다.

그림 3.7에는 13회의 실험에서 측정된 인발 하중과 인발 변위를 극한 인발 하중과 말뚝 직

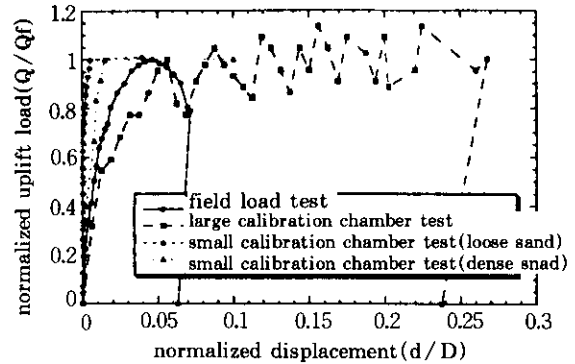


Fig. 3.1 Normalized uplift load vs. normalized displacement for uplift test performed in field and calibration chamber

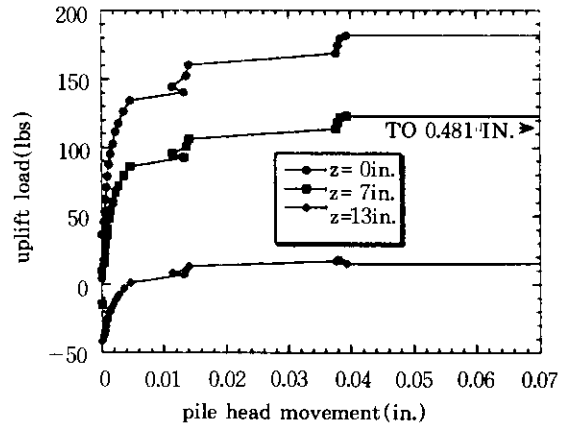


Fig. 3.2 Representative uplift load test in small calibration chamber

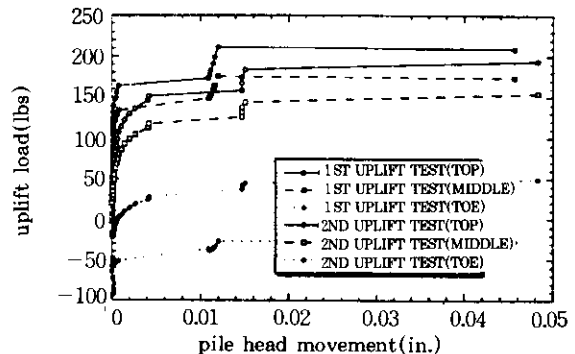


Fig. 3.3 Representative 1st and 2nd uplift load test performed on the same model ground in the calibration chamber

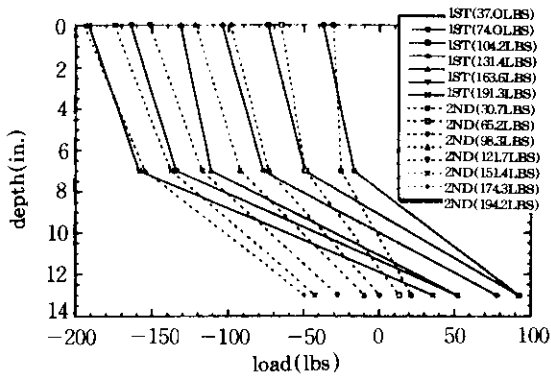


Fig 3.4 Load distribution vs. depth during 1st and 2nd uplift load tests

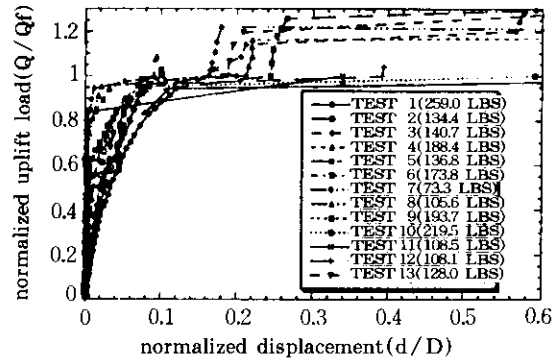


Fig 3.7 Normalized uplift load vs. displacement for uplift load tests

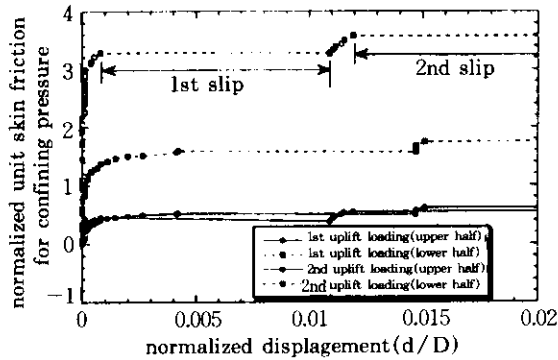


Fig 3.5 Normalized unit skin friction for confining pressure vs. normalized displacement

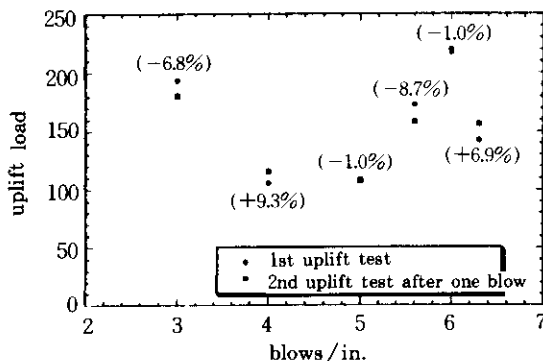


Fig 3.6 Comparison of uplift capacity between 1st and 2nd uplift load test after one blow

경에 대하여 정규화하여 나타내었다. 여기서, 극한 인발 하중이 발생하는 말뚝의 변위는 대체로 말뚝 직경의 10% 이내임을 알 수 있으며 이들 변위는 말뚝 직경의 10% 이내의 큰 범위에서 변화하고 있음을 알 수 있다. 그림의 괄호 안에는 매회 시험에서 측정된 극한 인발하중의 크기를 나타내었는데 비슷한 실험 조건에서도 이 값은 매우 큰 범위에서 변화하고 있음을 알 수 있다. 이와같이 정규화된 하중-변위 곡선이 크게 달라지는 것으로 보아 소형 압력 토조에서는 변위를 기준으로 극한 인발 하중을 결정하는 것은 극히 곤란할 것으로 판단된다. 또한 구속 응력, 지반의 상대 밀도, 포화도 등의 실험 조건을 동일하게 유지하더라도 실험자에 따라 실험 결과가 달라지게 될 가능성이 있으므로 말뚝의 극한 인발 지지력은 매회마다 결정하여 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

#### 4. 소형 압력 토조에 타입된 말뚝의 극한 인발지지력 결정

소형 압력 토조 실험에서는 구속 압력의 크기, 지반의 상대 밀도, 포화도 등과 같은 실험 조건을 동일하게 유지하더라도 실험자의 실험에 대한 숙련도, 말뚝 타입시의 정확도 등 실험시의 미소한 변화에 의해서도 극한 인발 지지

력 값에 큰 오차가 발생할 수가 있다. 본 실험의 경우 동일한 상대 밀도와 포화도로 형성된 지반에 구속 응력의 크기를 2가지로 변화시켜 반복 실험을 하였는데, 극한 인발지지력의 평균 값에 대해 최대 50%의 오차를 수반하였다(그림 3.7 참조). 따라서, 동일하게 설정된 실험 조건으로 실험을 수행하더라도 예비 실험에 의해 그 지반의 극한 인발 지지력의 크기를 미리 구해두고 다음 단계의 실험을 하는 것은 크게 잘못된 결과를 수반할 수도 있을 것으로 생각된다. 즉, 소형 압력 토조 실험에서 동일하게 정하여진 지반 조건에 대한 극한 인발 지지력을 구할 경우에는 형성된 모형 지반에 대하여 매번 결정하여 사용하여야 할 것으로 생각된다.

본 절에서는 소형 압력 토조에서 반복 수행된 실험을 토대로 말뚝의 극한 인발지지력을 결정하는 방법을 제안하였다. 그림 4.1에는 말뚝에 실시된 압축/인발재하시험에서 구한 극한 지지력의 크기와 최종 1인치 관입에 필요한 타격수를 나타내었는데, (a)-(d)에는 직경 270mm, 관입 길이 13m의 폐단 강관 말뚝에 대한 현장 시험 결과, 직경 100mm, 관입 길이 250mm의 개단 강관 말뚝에 대한 대형 압력 토조 시험 결과, 직경 25mm, 관입 길이 0.9~2.5m의 개단 강관 말뚝에 대한 중형 압력 토조 시험 결과 그리고 직경 25mm, 관입 길이 0.36m의 폐단 강관 말뚝에 대한 소형 압력 토조 시험 결과를 각각 나타내었다. 이들 그림에서 최종 관입타격수의 증가에 따라 압축 지지력은 증가하는 관계를 알 수 있으나, 인발 지지력은 항상 증가하는 관계에 있지 않음을 알 수 있다. 특히, 그림 4.1(d)에는 소형 압력 토조에서 집중적으로 실시된 인발 재하시험 결과를 나타내었는데, 실험자에 따라 약 20% 정도의 오차를 보이고 있으며 극한 인발 지지력 값의 평균치에 대해 약 50% 정도의 오차를 수반하는 것은 관찰할 수 있다. 따라서, 압축 재하시험에서는 최종 관입에 소요되는 타격수에 따른 극한 지지력의 관계를 사용할 수 있을 것으로 판단되나 인발 재하시험에서는 이 관계를 사

용하는 것이 어려울 것으로 판단된다.

또한, 그림 3.7에서 활동 마찰력에 의한 말뚝의 흠에 대한 상대적인 1차 미끄러짐(slip) 변위가  $7 \times 10^{-3} \sim 1.77\text{mm}$  정도의 극히 작은 인발 변위에서 발생하는 점, 1차 미끄러짐 변위가 발생하는, 말뚝 직경에 대해 정규화된 인발 변위가 0~7%의 범위에서 변화하는 점, 그리고 말뚝 직경의 10%에 해당하는 인발 변위보다 작은 범위에서 말뚝의 2차, 3차 미끄러짐 변위가 발생하고 있는 점등을 알 수 있다. 따라서, 흠에 대한 말뚝의 1차 미끄러짐이 발생하는 범위에서 극한 인발지지력을 정의할 수 있으며, 말뚝 직경에 대해 정규화된 인발 변위로써 극한 인발 지지력을 규정하는 것은 곤란할 것으로 판단된다.

소형 압력 토조에 타입된 말뚝에 실시된 1차 인발 재하 시험에서의 극한 인발지지력과 다짐 시험용 래머로써 1회 타격후 실시된 2차 인발 재하 시험에서의 극한 지지력 값은 10%이내의 오차를 보이고 있는데(그림 3.6), 여기서 (+) 오차는 타격 에너지가 큰 래머(무게 4.5Kg, 낙하높이 0.45m)를 사용하여 타격한 경우이고, (-)오차는 타격 에너지가 작은 래머(무게 2.5Kg, 낙하 높이 0.30m)를 사용하여 타격한 경우이다. 또한, 깊이에 따른 말뚝의 하중 지지력도 크게 변화되어지지 않는 것(그림 3.4-5)으로 보아 실험에 사용되어진 말뚝의 크기에 적합한 타격 에너지를 정하여 1차 인발 재하시험후의 말뚝에 타격함으로써 인발 시험에 의해 교란된 지반의 상태를 회복시켜줄 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로, 소형 압력 토조 시험에서는 모형 지반을 형성할 때마다 인발 재하시험을 실시하여 극한 인발 지지력을 결정하는 것이 좋을 것으로 판단되며, 말뚝의 극한 인발 지지력은 흠에 대한 말뚝의 1차 미끄러짐 변위가 발생하는 하중으로 정의할 수 있고, 이때 1차 인발 재하 시험에 의해 교란된 모형 지반은 말뚝의 크기에 적합한 타격 에너지를 정하여 타격함으로써 회복되어질 수 있을 것으로 판단된다.



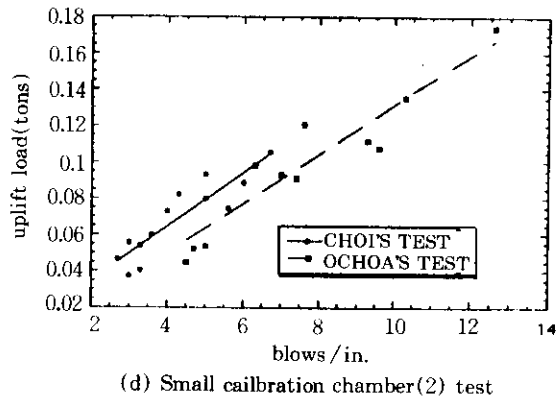
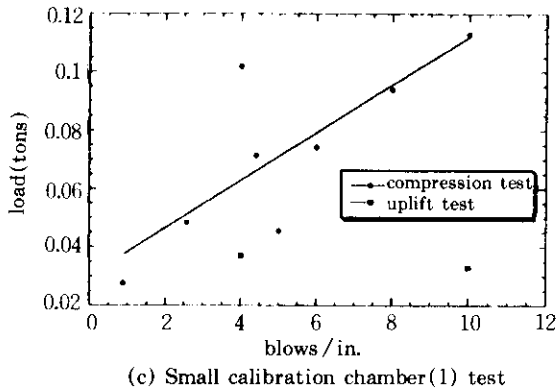
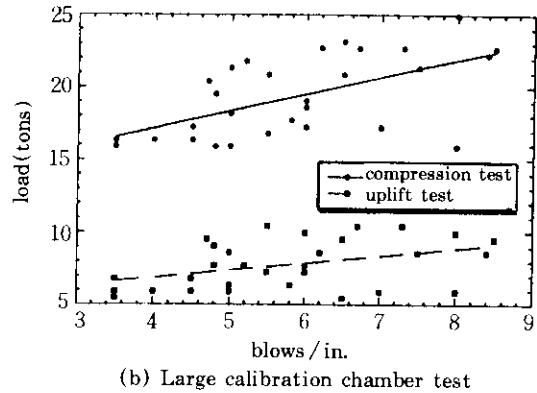
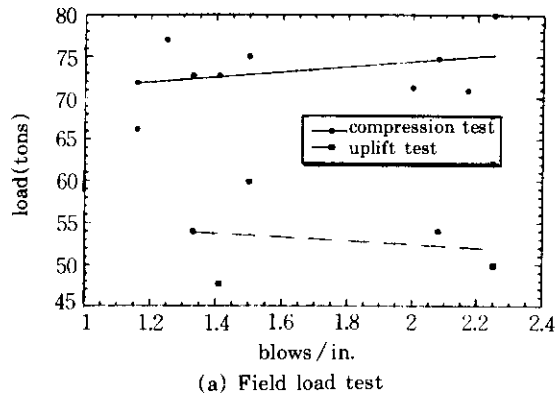


Fig 4.1 Compression (or uplift) load vs. blows/in. in field and calibration chamber tests

## 5. 결 론

본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 압력 토조 시험에서는 유효 응력의 상사성에 의해 현장 크기 말뚝에 대한 크기계수 (scaling factor)를 결정할 수 있다.
2. 소형 압력 토조 시험에서는 인발 하중이 인발 변위와 함께 증가하다가 급작스러운 미끄러짐 변위가 발생하는 현상이 2, 3회 반복되다가 완전 인발에 이르게 되는데, 이 때, 첫번째 미끄러짐 변위가 발생하는 점에서의 하중의 크기를 극한 인발 지지력으로 정의할 수 있다. 여기서, 매우 미소한 변위에서 극한 인발하중이 나타나게 되므로 주의 기울여서 측정해야 할 것으로 생각된다.

3. 소형 압력 토조 시험에서는 미세한 시험 조건의 변화에 의해서도 극한 인발 지지력의 크기가 50% 이상의 오차를 나타낼 수도 있으므로 모형 지반을 형성할 때마다 인발 재하 시험을 실시하여 극한 인발 지지력을 결정하여 사용하는 것이 좋을 것으로 판단된다.
4. 1차 인발 재하 시험후 교란된 지반의 상태는 모형 말뚝의 크기에 적합한 타격 에너지를 정하여 타격해 줌으로써 회복되어질 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 한국 과학 재단의 “해외 Post-

Doc. 연수” 프로그램의 지원과 경성대학교 대학 학술연구조성비의 지원을 받아 수행되어진다. 또한, 본인의 연구를 위해 실험 장치들과 여러가지 현장 및 실내 실험 자료들을 사용할 수 있게 허락해준 Univ. of Houston의 M.W. O’Neil 교수께 감사를 드리며, 같이 실험을 수행한 동 대학 박사과정의 P.M. Rao 군에게도 고마움을 전하고 싶다.

### 참 고 문 헌

1. O’Neill, M.W., Hawkins, R.A. & Mahar, L.J., “Field Study of Pile Group Action, Final Report”, Report Nos. FHWA/RD-811002-008, Federal Highway Administration, Dept. of Transportation, March, 1981, in seven volumes.
2. O’Neill, M.W. & Wong, D.O., “Design and Analysis of an Apparatus to Simulate Density, and Stresses in Deep Deposits of Granular Soils”, Report No. UHCE 85-6, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Houston, June, 1985.
3. O’Neill, M.W., Ugaz, O.G., Ochoa, M. & Acosta, A., “Effect of Driving Shoe on the Dynamic and Static Performance of Open-ended Pipe Piles in Dense, Fine Saturated Sand under High Pressures”. Final Report, Exxon Production Research Company, Houston, Texas, Dec. 1986, in three volumes.
4. O’Neill, M.W., Vipulanandan. C., & Wong, D., “Laboratory Modeling of Vibro-Driven Piles”, J. Geotech, Engrg., ASCE, 116(8), Aug., 1990, pp.1190~1209.
5. O’Neill, M.W., Raines, R.D., “Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand”, J. Geotech. Engrg., ASCE, 117(8), Aug. 1991, pp.1208~1226.
6. O’Neill, M.W., Vipulanandan, C., & Ochoa, M., “Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturated Fine Sand”, Report No. UHCEE 90-09, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dec. 1990.
7. Poulos, H.G., Davis, E.H., Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley & Sons Inc., 1980, pp.64-65.
8. Rao, P.M., “Effect of Pile Geometry and Soil Saturation on the Behavior of Nondisplacement Piles installed by vibration” Master’s Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Houston, 1993.
9. Vipulanandan, C., Wong, D., & O’Neill M. W., “Modelling of Displacement Piles in Sand Using a Pressure Chamber”, Proc., Foundation Engineering Congress, ASCE, June 1989, pp.526~541.
10. Vesic, A.S., Design of Pile Foundation, NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, 1977.
11. Yazdanbod, A., “Long Slender Model Pipe Piles in overconsolidated Sands”, Master’s Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Univ. of Houston, 1979.

(접수일자 1994. 9. 3)