

# 타격관입 개단말뚝의 동적진동에 의한 압축지지력 저감특성

Characteristics on the Vertical Load Capacity Degradation for Impact-driven Open-ended Piles During Simulated Earthquake/Sinusoidal Shaking.

최 용 규\*<sup>1</sup>  
Choi Yong-Kyu

---

## Abstract

After the model open-ended pile attached with strain gages was driven into a pressure chamber, in which the saturated micro-fine sand was contained, the static compression loading test was performed for that pile. Based on the test results, ultimate pile capacity was determined. Then, either simulated earthquake shaking or sinusoidal shaking was applied to the pile with the sustained certain level of ultimate pile load. Then, pile capacity degradations characteristics during shaking were studied. Pile capacity degradation during two different shakings were greatly different. During the simulated earthquake shaking, capacity degradation depended upon the magnitude of applied load. When the load applied to the pile top was less than 70% of ultimate pile capacity, pile capacity degradation rate was less than 8%, and pile with the sustained ultimate pile load had the degradation rate of 20%. Also, most of pile capacity degradation was reduced in outer skin friction and degradation rate was about 80% of ultimate pile capacity reduction. During sinusoidal shaking, pile capacity degradation did not depend on the magnitude of applied load. It depended on the amplitude and the frequency: the larger the amplitude and the fewer the frequency was, the higher the degradation rate was. Reduction pattern of unit soil plugging force depended on the mode of shaking. Unit soil plugging force by the simulated earthquake shaking was reduced in the bottom 3.0  $D_i$  of the toe irrespective of the applied load, while reduction of unit soil plugging force by sinusoidal shaking was occurred in the bottom 1.0-3.0  $D_i$  of the toe. Also, the soil plugging force was reduced more than that during simulated earthquake shaking and degradation rate of the pile capacity depended on the magnitude of the applied load.

---

\* 정회원, 경성대학교 공과대학 토목공학과 조교수

## 요 지

축하중계측장치가 부착된 모형 개단 강관 말뚝을 상대밀도 49%인 초세립질 포화 모래지반을 담고 있는 압력 토조속에 타입한 후 정적압축재하시험을 실시하여 극한지지력을 결정하였다. 극한지지력의 임의 수준의 압축하중을 말뚝머리에 재재하한 후 유사지진 진동 및 Sine정현파 진동을 작용시켜 동적 진동에 의한 개단말뚝의 압축지지력 저감특성을 연구하였다. 유사화된 지진진동과 Sine정현파 진동에 의한 개단말뚝의 지지력 저감특성은 큰 차이를 보였다. 유사화된 지진진동중 지지력 저감율은 작용하중의 크기에 따라 크게 달라지는데, 작용하중의 크기가 약 70% 이하일 경우에는 지지력 감소율이 8%이하였으며, 극한하중의 90%이상을 지지하는 개단말뚝의 극한지지력은 약 15%이상 감소되었다. 또한, 외주면 마찰력성분의 감소량은 감소된 총 지지력의 약 80%를 차지하였다. Sine정현파 진동중 지지력의 감소율은 작용하중의 크기에 따라 달라지지 않으며, 진폭과 진동수에 의해 크게 영향을 받았다. 즉, 진폭이 클수록, 진동수가 적을수록 지지력은 크게 감소되었다. 관내토 폐색응력의 감소양상은 진동의 종류에 따라 크게 달랐다. 유사 지진 진동에 의한 관내토 폐색응력의 감소는 작용하중의 크기에 상관없이 말뚝 선단으로부터 약 3.0 D<sub>i</sub> 이내의 관내토에서 발생되었다. Sine정현파 진동에 의한 관내토 폐색응력의 감소는 말뚝 선단으로부터 약 1.0 D<sub>i</sub> 이내의 관내토에서 크게 감소하고, 1.0-3.0 D<sub>i</sub>의 관내토 부분에서는 거의 감소되지 않았다. 또한, 관내토 폐색력은 크게 감소되어졌고, 작용하중의 크기에 따라 감소율도 크게 달랐다.

Keywords : Open-ended pipe pile, Compressive pile capacity degradation, Simulated earthquake motion, Sinusoidal motion

### 1. 서 론

최근 미국의 LA지역과 일본의 고베지역에서 발생한 지진 등과 같은 믿기 어려운 사고 등에서 볼 수 있듯이 동적인 하중에 의한 구조물의 붕괴를 흔하게 접할 수 있다.

일반적으로 동적인 하중은 불규칙한(random) 진동 형태를 갖게 되나, 해석의 편의를 위하여 반복하중(cyclic loading), 주기하중(periodic loading), 순간하중(transient loading) 그리고, 복합순간하중(multiple transient) 등으로 모델링하여 적용시킬 수 있다. 예를 들면, 기계의 진동이나 해상구조물(offshore structure)에 파랑등이 미치는 진동은 반복하중으로, 구조물내의 활하중이나 풍하중 등은 주기하중으로, 발파 등은 순간하중으로, 그리고 지진은 복합순간하중으로 각각 유사화시킬 수 있을 것이다.

지진진동중의 지지력 저감에 관한 실험자료는 많지 않은데, O'Neill등(1990)은 유사지진중 인발 말뚝들의 안정성에 관한 모형실험을 수행하여 안정성 도표를 제안하였으며, Prakash등(1990)은 내진설계 방법을 제시하고 있다. 주기하중에 의한 지지력저감에 관한 연구는 Holmquist(1976), Matlock(1976), Van Weele(1979), Poulos(1981a, 1981b, 1982, 1983, 1988) 등에 의해 수행되어졌다. 이들 연구는 폐단 말뚝에 대해 수행되어졌을 뿐, 동적진동에 의한 개단 말뚝의 지지력 저감에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 따라서, 동적진동에 의한 개단 말뚝의 지지력 저감에 관한 모형실험 연구는 의미를 가질 것이다.

본 연구에서는 두가지 형태의 동하중 즉, Sine정현파와 주기하중과 유사화된 지진하중을 극한지지력의 100%, 70%, 40% 수준의 압축하중을 지지하고 있는 모형 개단 강관 말뚝에 작

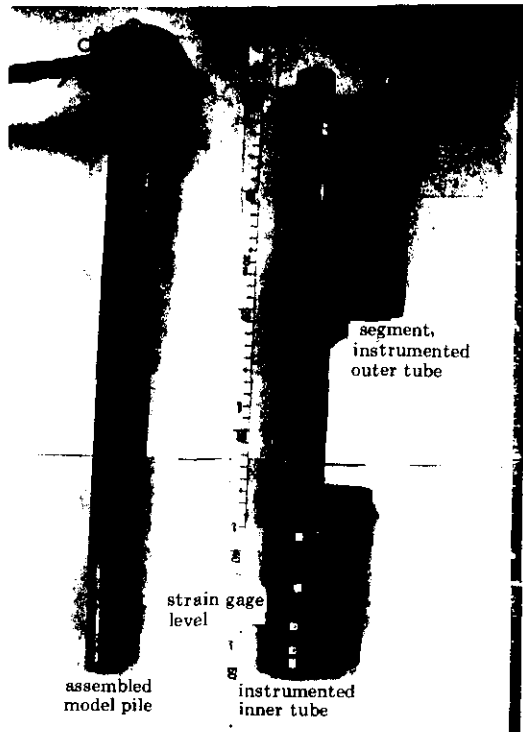
용시켰다. 모형실험 결과를 토대로, 두가지 상이한 형태의 동하중 작용시 개단 말뚝의 압축 지지력 저감 특성과 관내토 폐색력의 감소 특성을 연구하였으며, Sine정현파와 작용시 압축 지지력 감소에 진폭, 주파수, 진동수 등이 미치는 영향을 연구하였다.

## 2. 진동 변위 저감 모델

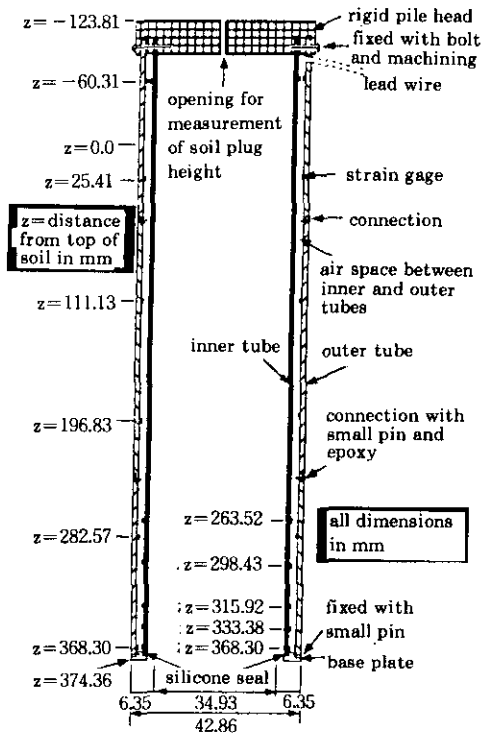
### 2.1 외주면 마찰력의 감소

일반적으로, 주기하중(cyclic loading)은 극한 외주면 마찰력의 감소를 유발시킨다. Poulos (1988)는 점토와 모래 지반에서 실시된 소형 폐단 말뚝에 대한 모형 실험결과로부터 외주면 마찰력의 감소는 진동횟수와 진동변위( $\rho_c$ )에 따라 달라진다고 하였다. 또한, 그는 재성형된 점토지반에 대한 진동횟수, 진동변위에 따른

폐단 말뚝의 외주면 마찰력의 감소계수(degradation factor,  $D_r$ )를 보여주는 진동 변위 저감 모델(cyclic displacement degradation model)을 제안하였으며, 그것은 그림 1에 나타내어졌다. 여기서, 진동변위는 말뚝 직경과 정적 재하시험에서 완전한 미끄러짐 활동을 유발시키는데 필요한 변위( $\rho_{st}$ )에 대하여 정규화시켜 나타내었다. 정규화된 진동변위( $\rho/\rho_{st}$ )가 4-0.5에 도달하면 비로소 외주면 마찰력의 저감이 시작되며, 진동변위의 증가에 따라 외주면 마찰력의 저감은 증가하는 데,  $\rho_c/\rho_{st}$ 가 2보다 크게 되면 1000 Cycles진동하는 경우 외주면 마찰력은 40%이상 저감된다. Holmquist 등(1976)은 진동과 압축 두가지 주기하중을 동시에 받는 경우 지지력저감은 압축주기하중보다 훨씬 심각한 것을 모형실험을 통하여 밝혔다.



(a) model pile



(b) schematic drawing

Photo 1. Photographs and schematic drawing of model pile

## 2.2 극한 선단 지지력 감소

주기 진동하중하에서 선단 지지력의 저감에 관한 자료는 찾아보기가 쉽지 않다. Van Weele (1979)은 모래지반에서 선단지지력의 저감은 외주변 마찰력의 저감보다 더 클 수도 있다고 하였으며, 주기진동하중시의 극한 선단 지지력 감소에 관한 실험자료는 극히 희소하므로, Poulos(1982)는 앞에서 제시한 진동 변위 저감 모델을 약간 수정하여 적용시킬 수 있다고 제안하였다. 즉,  $p_u$  대신에 말뚝 선단 지지력을 충분히 발휘시킬 수 있는 변위를 사용하도록 추천하고 있다.

## 3. 실험

실험장치는 소형압력토조, 모형개단말뚝, 동적 및 정적 재하시스템, 그리고 동적 및 정적 변형측정기구 등으로 구성되었다. 모형개단강관말뚝은 사진 1에 나타내었으며, 동하중재하시스템을 이용하여 각종 형태의 주기하중을 적용시킬 수 있으며, 실제 지진기록을 지진 모델링 기법에 의하여 유사화시킨 지진하중도 적용시킬 수 있다. 실험장치에 관한 자세한 설명은

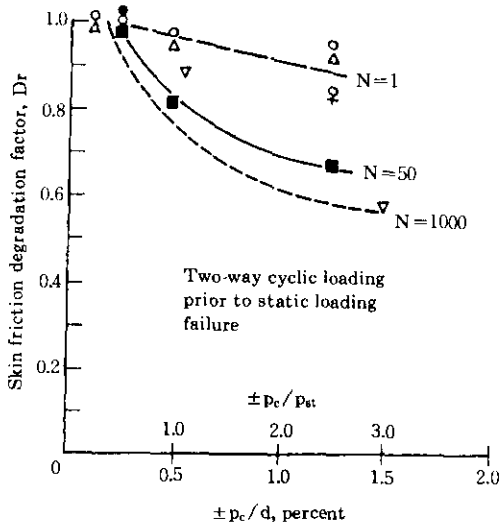


Fig. 1 Cyclic displacement degradation model for skin friction of closed-ended pile

참고문헌들(최용규, 1995a, 1995b)을 참고할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 Sine정현파와 유사화된 지진의 두가지 형태의 동하중을 극한 지지력의 100%, 70%, 40% 수준을 지지하고 있는 개단강관 말뚝에 작용시켜 주었으며, 구체적인 실험 수행내용은 표 1에 나타내었다. 유사화된 지진하중실험에서는 2개의 실제지진을 이용하여 지진 규모(M) 8.0 유사화시킨 2개의 지진하중을 작용시켰다. 유사화된 Upland 지진하중하에서 S-1, S-2, S-3의 실험들이 수행되었고, 유사화된 Oceanside지진하중하에서 S-4의 실험들이 수행되었다. Sine정현파 주기하중 실험에서는 진폭, 진동수 등을 변화시켜 C-1~C-7의 실험들이 수행되어있으며, 진동의 총횟수는 100회로 일정하게 유지시켜 주었다. 적용된 Sine정현파 진동은 식 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$z = a \cdot \sin(\omega t) \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $z$  = 변위(mm)

$a$  = 진폭(mm)

$\omega$  = 회전 진동수(rad/sec)

$t$  = 시간(sec)

$f$  = 진동수(Hz) ( $= \omega/2\pi$ )

본 실험에서는 진폭을 2.54, 1.36, 0.32, 0.16 mm의 4종류로 변화시켰으며, 진동수는 18, 9, 5 Hz의 3종류로 변화시키고, 말뚝머리에 적용된 하중은 극한지지력의 100%, 70%의 수준으로 하였다. 상대밀도 49%인 모형자반을 담고 있는 압력토조에 구속압력 20kPa를 가한 후 모형말뚝을 타격관입시켰다. 이때, 사용된 타격기의 무게는 49.8N이었으며, 자유낙하 높이는 380mm였다. 타격관입도중 말뚝머리 중앙에 만들어져있는 구멍을 통하여 50mm 말뚝관입 깊이마다 관내토의 상승높이를 측정하였으며, 관입에 소요된 타격횟수도 측정하였다. 이때, 모든 변형 측정자료들이 말뚝관입중에 발

생될 잔류응력의 영향을 포함할 수 있도록 하기 위해 모든 변형계이지 회로의 영점은 말뚝이 압력토조에 관입되기 직전에 조정되었다. 타격 관입후 약 1시간이 경과하면 최대 침하량이 말뚝직경의 10%이내가 되도록 일정한 속도로 말뚝머리 침하량을 증가시키면서 정적압축 재하시험을 실시하였다. 정적 재하시험 결과를 이용하여 말뚝의 극한지지력을 결정하였으며, 하중재하후 결정된 말뚝의 극한지지력의 소요 수준의 하중을 말뚝머리에 다시 작용시켜 주었다. 다음으로, 유사화된 지진하중 또는 Sine 정현파 하중을 압력토조에 작용시켜 동적하중시험을 실시하였다. 동적하중 실험중에는 동적진동에 의한 하중의 감소량만을 측정할 수 있었다.

본 연구에 사용된 모형말뚝은 내관과 외관으로 분리되어 있으므로, 내관과 외관에 부착된 스트레인게이지들로 부터 내관과 외관에 대한 말뚝축방향 하중을 따로 측정할 수 있었고, 말뚝의 극한 지지력은 내관과 외관의 지지력을 합하여 구할 수 있었으며, 관내토 폐색력의 분포는 내관의 축방향 하중의 분포를 이용하여 결정할 수 있었다.

#### 4. 동하중에 의한 개단 말뚝의 지지력 저감 특성

그림 2는 말뚝의 정적 재하실험에서 결정된 극한 지지력에 대하여 정규화된 말뚝하중과 말뚝직경에 대해 정규화된 말뚝머리 침하량과의 관계를 보여주고 있으며, 11회의 모형 말뚝 재하실험 결과를 토대로 작성되었다. 이중 대수축(double log) 상에서 두개 직선의 교점으로 나타내어지는 하중(De Beer, 1963)으로 정의되는 극한 지지력을 결정하였으며, 극한 지지력을 나타내는 말뚝머리의 변위는 대체로 말뚝 직경의 약 1.7-3.0%의 범위에 들었다. 타격관입말뚝의 경우 Vesic은 말뚝 직경의 10%에 해당하는 말뚝 머리 침하량에서 극한 지지력을 결정하는 방법을 제안하였는데, 본 모형 실험

의 경우 극한 지지력이 발휘되어지는 말뚝 머리 침하량은 Vesic의 기준보다는 훨씬 작았다.

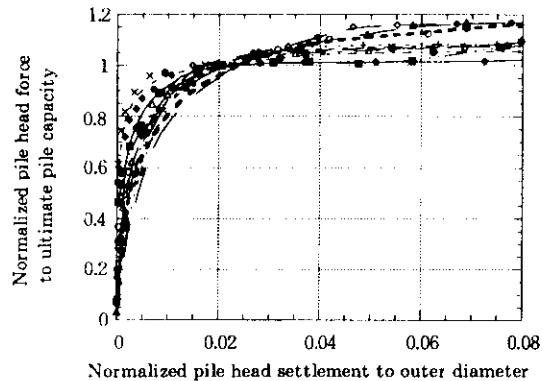
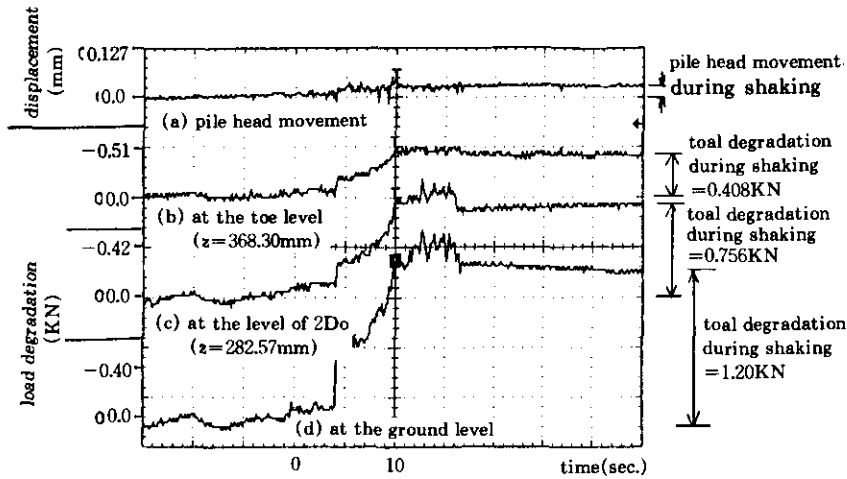


Fig. 2 Normalized pile head force versus normalized pile head settlement for static pile load tests

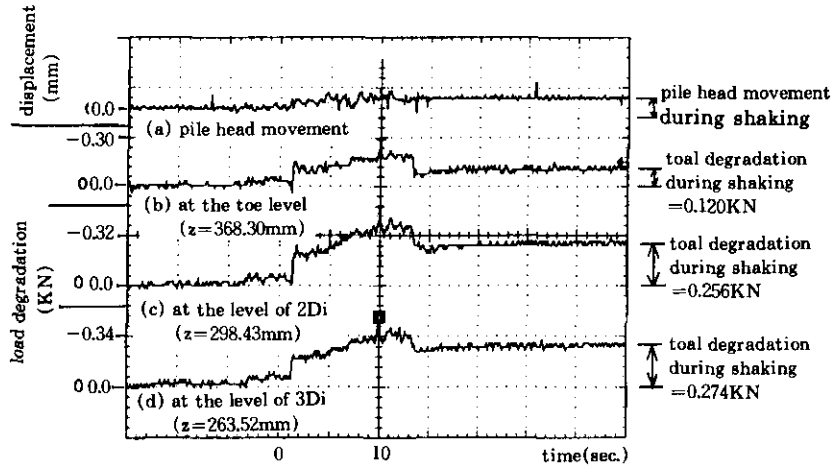
#### 4.1 유사 지진 진동에 의한 지지력 저감 특성

그림 3은 유사 지진 진동 결과의 대표적인 측정 예를 보여주고 있다. 여기서, 외관의 선단, 선단으로 부터  $2D_0$  ( $D_0$  = 말뚝의 외경), 모형지반의 지표면부근에서 측정된 말뚝축하중의 감소량과 말뚝 머리 침하량의 시간에 대한 이력을 그림 3(a)에 나타내었으며, 내관의 선단, 선단으로 부터  $2D_0$ ,  $3D_0$ 의 위치에서 측정된 관내토 폐색력의 감소량과 말뚝 머리 침하량의 시간에 대한 이력을 그림 3(b)에 나타내었다. 유사화된 지진 진동의 작용시간은 약 17.1초이며, 지진에 의한 영향은 다양한 방향으로 작용하게 되나, 이들중 수평성분에 의해 구조물의 안정성에 크게 영향을 미치는 경우가 많으므로 유사화된 지진 진동은 수평방향들만을 합성하여 모델링하였으며, 진동은 원주방향으로 작용되었다. 따라서, 그림 3(c)에 나타난 지진 진동중의 말뚝 머리 최대 변위는 약 0.03 mm로 극히 미소하였다.

그림 4는 유사 지진 진동 중 발생된 말뚝 지지력의 감소 비율을 나타내고 있다. 지지력의 감소비율은 유사화된 지진 진동의 종류에 상관없이 말뚝에 작용된 하중의 크기에 따라 크게



(a) outer tube



(b) inner tube

Fig. 3 An example of test data measurement of pile head movement, axial load degradations in the inner tube and the outer tubes during simulated earthquake shaking

달라졌다. 즉, 말뚝에 작용된 하중이 극한 지지력의 40%, 70%일때에는 지지력의 감소율이 크게 증가하지 않아 최대 7%정도였으나, 말뚝에 작용된 하중이 극한 하중에 가까워질수록 지지력의 감소율은 급격히 증가하여 극한하중을 지지하고 있는 말뚝의 경우 극한 지지력의 약 18-23%가 감소하였다.

개단말뚝의 지지력은 세 지지부위, 즉 외주면, 강재선단부, 관내토부분에서의 지지력을 합하여 결정할 수 있었는데, 본 실험에서는 각 지지부의 지지력 성분들을 분리하여 측정하는 것이 가능하였으므로(최용규, 1995a), 각 지지부 지지력 성분들의 감소량을 분리하여 그림 5에 나타내었다. 여기에는 S-1과 S-3 실험들에

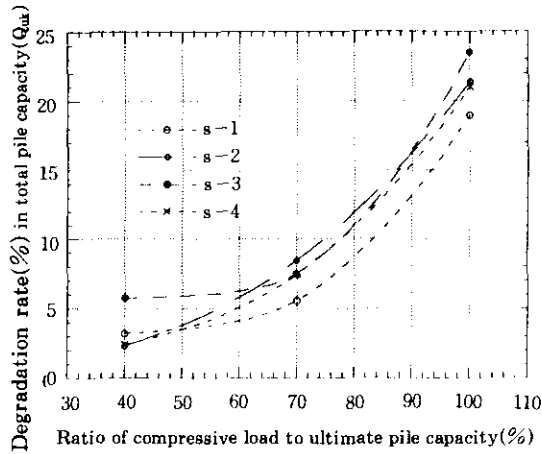


Fig. 4 Degradation in total pile capacity during simulated earthquake shaking

대한 결과를 나타내었다. 지지력 감소량에 대한 성분의 감소량의 비율은 말뚝머리에 작용된 하중의 크기에 상관없이 지지부위마다 특정한 감소율을 가지게 되었다. 즉, 외주면 마찰력의 감소량은 말뚝 지지력 감소량의 대부분을 차지하여 약 80%임을 알 수 있었으며, 선단 지지력과 관내토 폐색력의 감소율은 거의 비슷하여 각각 약 10%였다. 이 결과는 참고문헌 2에 이미 보고된 결과와도 일치하였는데, 이와 같은 경향은 말뚝의 설치방법의 상이에 의해서도 달라지지 않았다.

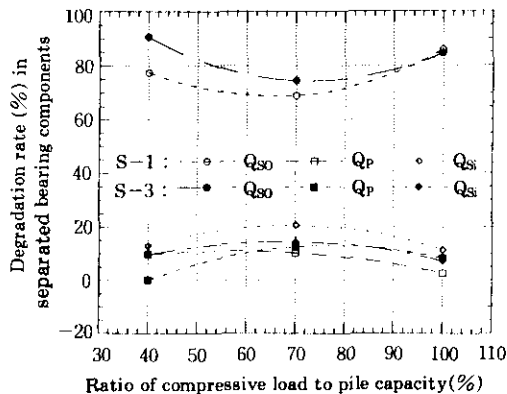


Fig. 5 Degradation rate of separated bearing components during simulated earthquake shaking ( $Q_{si}$ : external friction,  $Q_p$ : steel toe bearing,  $Q_{sl}$ : soil plugging force)

그림 6은 정적압축재하시험에서 발휘된 외주면 마찰응력과 관내토 마찰응력의 분포를 보여주고 있으며, 또한, 유사지진 진동후 감소되어진 외주면 마찰응력과 관내토 폐색응력의 크기도 함께 나타내어져 있다. 여기서, 관내토 마찰응력은 작용된 하중의 크기와 상관없이 말뚝 선단으로부터 약  $3.0D_i$  ( $D_i$ : 말뚝내경)이내의 관내토에서 발휘되어 졌으며, 유사지진 작용후에도 동일한 부분의 관내토에서 관내토 마찰응력이 작용하였다. 또한, 관내토 마찰응력의 감소율은 작용된 하중의 크기에 상관없이 약 10-20%였다.

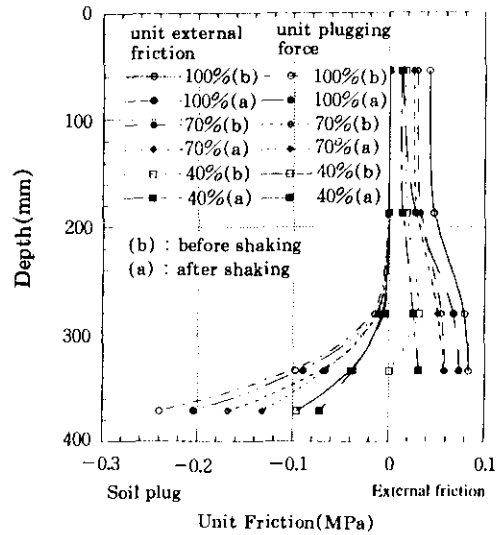


Fig. 6 Degradation pattern in unit friction of soil plug and external skin during simulated earthquake shaking for s-1

결론적으로, 타격관입말뚝의 지지력 감소율은 작용하중의 크기에 따라 크게 달라지는데, 하중의 크기가 극한 지지력의 약 70% 이하일 경우에는 지지력 감소율이 극히 작으며, 하중의 크기가 극한 하중에 가까워질수록 지지력 감소율은 급격히 증가하여 약 20% 수준에 도달하게 되었다. 또한, 극한 지지력 감소량에 대한 각 지지력 성분의 감소량의 비율은 하중의 크기에 따라 달라지지 않았으며, 외주면 마찰력 성분의 감소율이 대부분을 차지하여 약

80% 정도였고, 강재선단부 지지력과 관내토 폐색력의 감소율은 각각 약 10% 였다. 그리고, 관내토 폐색력은 말뚝선단으로부터 약 3.0 D<sub>i</sub> 이내의 관내토에서 발휘되었으며, 유사지진 진동후에도 동일하였다.

#### 4.2 Sine 정현파 진동에 의한 지지력 저감 특성

그림 7은 Sine 정현파 진동중 측정된 전형적인 시험결과를 보여주고 있다. 그림 7(a)는 외관의 선단, 선단으로부터 2D<sub>o</sub>, 그리고 모형지반

지표면 부근에서 측정된 말뚝축하중과 말뚝머리 침하량을 보여주고 있으며, 그림 7(b)는 내관의 선단, 선단으로부터 2D<sub>i</sub>, 그리고 3D<sub>i</sub> 위치에서 측정된 관내토 폐색력과 말뚝머리 침하량을 보여주고 있다.

그림 8은 Sine 정현파의 진폭과 진동수에 따른 말뚝 지지력의 감소율을 보여주고 있다. 지지력의 감소율은 말뚝에 작용된 하중의 크기에 따라 크게 달라지지 않았으며, 진폭과 진동수에 따라 더 크게 달라졌다. 즉, 진폭이 매우 작

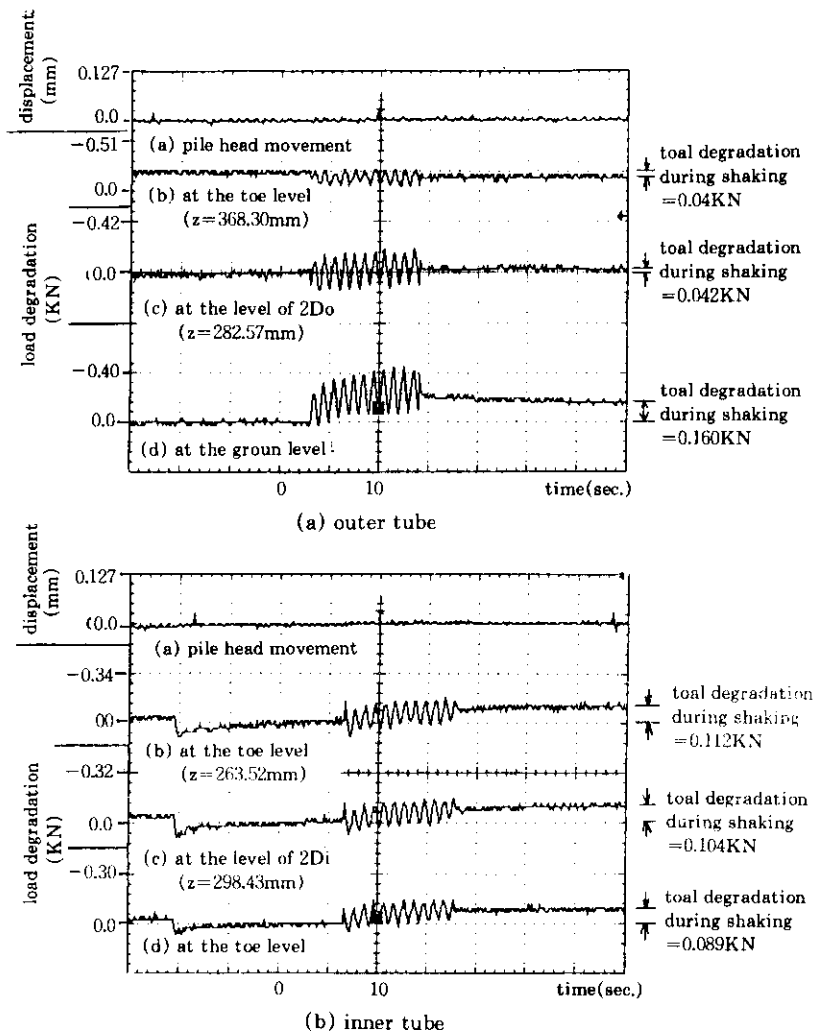


Fig. 7 An example of test data measurement of pile head movement, axial load degradations in the inner tube and the outer tubes during sinusoidal shaking



은 경우( $a = 0.16\text{mm}$ ,  $0.32\text{mm}$ )에는 지지력의 감소율이 극히 작아 5%이하였으나, 진폭이 큰 경우( $a = 1.36\text{mm}$ ,  $2.54\text{mm}$ )에는 지지력의 감소율이 크게 증가하여 최대 40%에까지 도달하였다. 따라서, Sine 정현파 진동중 지지력의 감소율은 진폭의 크기에 따라 크게 변화하였다. 진폭이 약 1.0mm이상이면 지지력 감소율은 진동수에도 크게 영향을 받는데 진동수가 적을수록 지지력의 감소율은 증가 하였으나, 진동수가 18 Hz인 경우에는 지지력 감소율이 매우 줄어들어 진폭의 크기에 상관 없이 약 10% 이하였다.

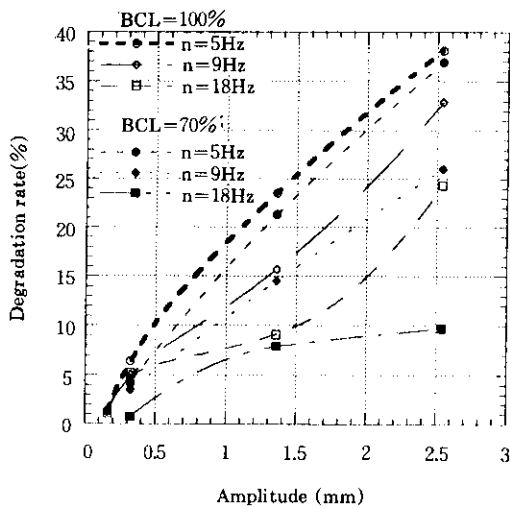


Fig. 8 Reduction in pile capacity due to various amplitude and biased compression load during sinusoidal shaking

그림 9는 작용된 하중의 크기가 지지력 감소에 미치는 영향을 보여주고 있다. 여기서, 작용된 하중의 크기는 지지력 감소에 크게 영향을 미치지 않고 있으며, 오히려, Sine 정현파의 진폭이 지지력 감소에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 즉, 진폭의 크기가 1.36mm인 경우 지지력 감소율은 10-20%였으나, 진폭의 크기가 2.54mm인 경우 지지력 감소율은 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 경향은 그림 8에서도 살펴볼 수 있었다.

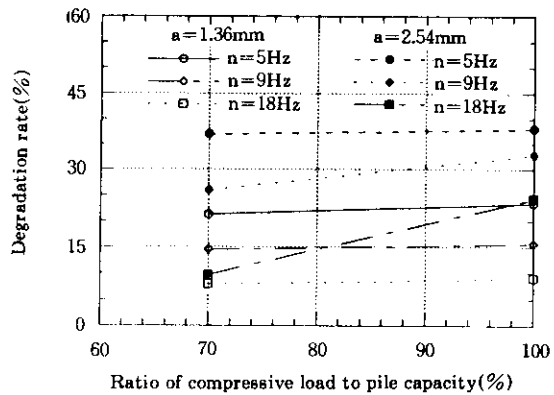


Fig. 9 Reduction in pile capacity versus biased compression load during sinusoidal shaking

그림 10은 극한 하중상태에서 극한 지지력 감소량에 대한 각 지지 성분들에 대한 감소량의 비율을 보여주고 있다. 그림 10(a)는 외주면 마찰력 성분의 감소비율을 보여주고 있는데, 여기서 극한 외주면 마찰력의 감소량은 극한 지지력 감소량의 약 25-50%였으며 진동수가 클수록 외주면 마찰력의 감소율도 증가하여  $f = 18\text{Hz}$ 인 경우 약 50%에 도달하였다. 그림 10(b)는 강제선단부 지지력 성분의 감소비율을 보여주고 있으며, 여기서, 극한 강제선단부 지지력의 감소율은 극한 지지력 감소량의 약 40%였으며 주파수에 따라 변화하지 않았다. 극한 관내토 폐색력의 감소량은 극한 지지력 감소량의 약 10-30%였으나, 진동수가 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있었으며  $f = 18\text{Hz}$ 인 경우에는 감소비율이 약 10%에 접근하였다. 그림 10에는 Sine 정현파 진폭이 각 지지력의 감소율에 미치는 영향도 보여주고 있는데, 감소비율이 진폭에 따라 크게 변화하지는 않았다.

그림 11은 말뚝의 관입깊이에 따른 외주면 마찰응력과 관내토 마찰응력의 분포를 보여주고 있다. 그림 11(a)는 Sine 정현파 진동전과 후의 외주면 마찰응력과 관내토 폐색응력을 보여주고 있는데, 진동후 관내토 폐색응력의 분포특성은 유사지진 진동후의 그것과 매우 상이하였다. 관내토 폐색응력은 Sine 정현파 진동

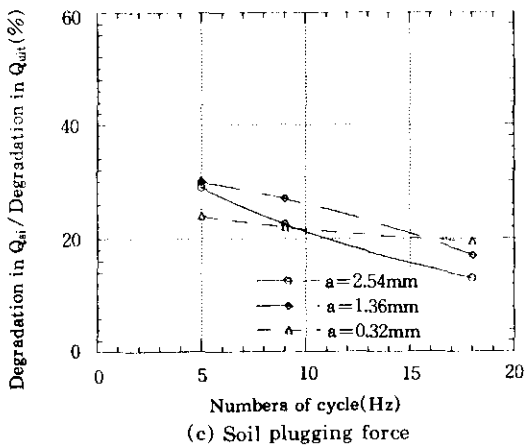
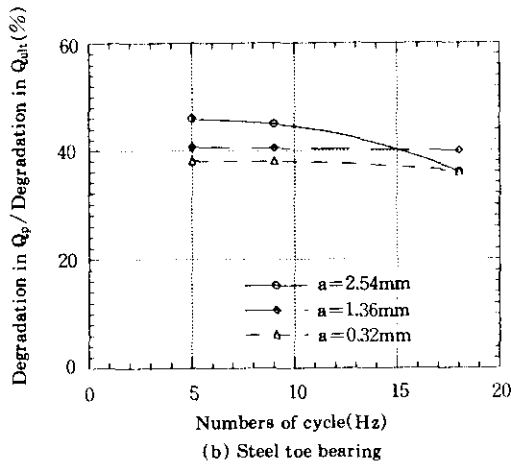
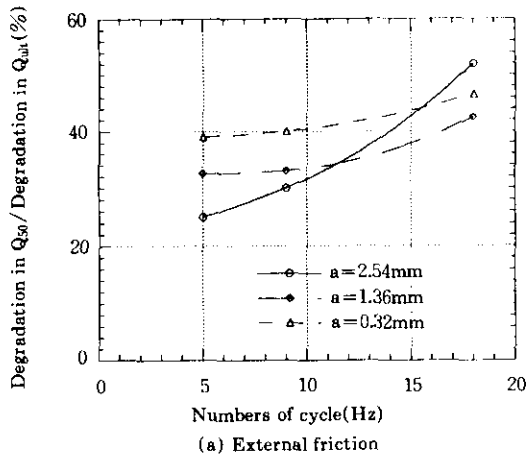


Fig. 10 Degrations in separated bearing components during sinusoidal shaking for biased compression load=100%

에 의해 말뚝 선단으로부터 1.0D<sub>i</sub>이내의 관내 토에서 크게 감소하였으며, 2.0-3.0D<sub>i</sub>의 관내 토 부분에서는 거의 감소하지 않았다. 또한, 진동수가 적을수록 관내 토 폐색 응력은 감소하였

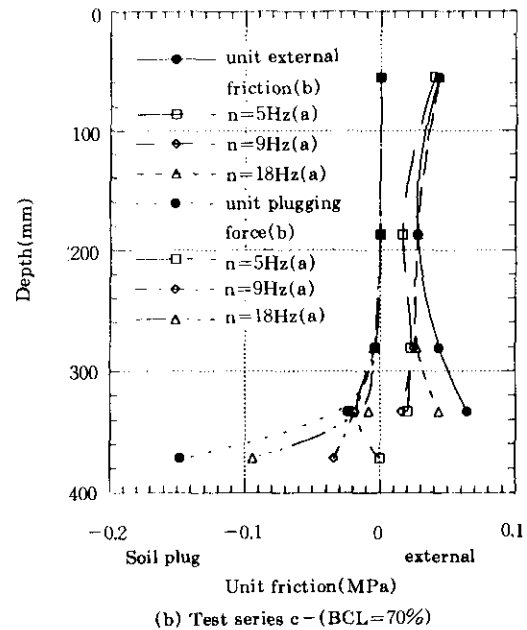
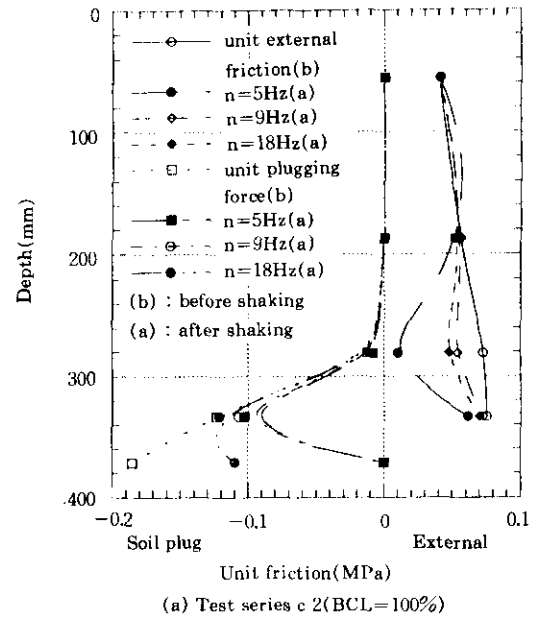


Fig. 11 Degradation pattern in unit friction of soil plug and external skin during sinusoidal shaking for c-2 and c-5

다. 그림 11(b)에는 말뚝에 작용된 하중이 극한 하중의 70%인 경우 진동전과 후에 외주변 마찰응력과 관내토 마찰응력의 감소경향은 극한 상태와 비슷하였으며, 말뚝선단으로부터 1.0 D<sub>i</sub>이내의 관내토에서 관내토 마찰응력이 크게 감소하였다.

요약하면, Sine 정현파 진동중 말뚝의 지지력 감소율은 유사지진 진동중의 지지력 감소율과 큰 차이를 보였다. Sine 정현파 진동에 의한 지지력의 감소율은 작용된 하중의 크기에 크게 영향을 받지 않았으며, 진폭과 진동수에 의해 크게 영향을 받았다. 즉, 진폭이 클수록, 진동수는 적을수록 지지력 감소율이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한, 외주변 마찰력, 강재선단부 지지력 그리고 관내토 폐색력의 감소량은 각각 극한 지지력 감소량의 30-50, 40, 10-30%를 차지하였으며, 주파수가 클수록 외주변 마찰력의 감소비율은 증가하고 관내토 폐색력의 감소비율은 감소하였는데, 이러한 경향은 유사지진 진동시의 각 지지력 성분의 감소비율의 추이와 비슷하였다. 관내토 마찰응력은 Sine 정현파 진동에 의해 말뚝선단으로부터 1.0 D<sub>i</sub>이내의 관내토에서 크게 감소하였으며, 1.0-3.0 D<sub>i</sub>이내의 관내토에서는 거의 감소하지 않았는데, 이와 같은 경향은 말뚝에 작용된 하중의 크기에 따라 변화하지 않았다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 압력토조속에 타입된 모형개단 말뚝에 정적압축재하시험을 실시하여 극한 지지력을 결정된 후 극한 지지력의 임의 수준의 압축하중을 재재하한 후 동적 진동시험을 실시하여 동적 진동에 의한 개단말뚝의 압축 지지력 저감 특성을 고찰하였다. 본 연구에서 얻은 결론들은 다음과 같다.

1. 유사화된 지진진동과 Sine 정현파 진동중의 개단말뚝의 지지력 저감 특성은 큰 차이를 나타내었다.

2. 유사화된 지진진동중 지지력의 감소율은 작용하중의 크기에 따라 크게 달라졌는데, 작용하중의 크기가 극한 지지력의 약 70%이하 일 경우에는 지지력 감소가 극히 작아 8% 이하였으며, 작용하중의 크기가 극한 하중에 가까워질수록 지지력 감소는 커지게 되어 극한하중을 지지하고 있는 말뚝의 극한 지지력은 약 20%가 저감되었다.

3. 유사화된 지진진동중 각 지지력 성분의 감소율은 작용하중의 크기에 따라 달라지지 않았으며, 외주변 마찰력 성분의 감소량은 지지력 감소량의 대부분을 차지하여 80%정도였고 강재 선단부 지지력과 관내토 폐색력 성분들의 감소량은 각각 지지력 감소량의 10%정도였다.

4. Sine 정현파 진동중 지지력의 감소율은 작용된 하중의 크기에 따라 크게 달라지지 않았으며, 진폭과 진동수에 의해 보다 더 영향을 받았다. 즉, 진폭이 클수록, 진동수가 적을수록 지지력은 크게 감소하였다.

5. Sine 정현파 진동중 전체 지지력 감소량에 대한 외주변 마찰력, 강재선단부 지지력 그리고 관내토 선단력의 감소량의 비율은 각각 30-50, 40, 10-30%였으며, 주파수가 클수록 외주변 마찰력의 감소비는 크고, 관내토 폐색력의 감소비는 작았다.

6. 유사화된 지진 진동과 Sine 정현파 주기 진동중의 관내토 폐색응력의 저감특성은 매우 상이하였다. 전자의 진동중 관내토 폐색응력은 말뚝 선단으로부터 3.0 D<sub>i</sub>이내의 관내토에서 감소하며 관내토 폐색응력은 작용된 하중의 크기에 상관없이 10-20%정도 감소하였다.

그러나, 후자의 진동중 관내토 폐색응력은 말뚝 선단으로부터 1.0 D<sub>i</sub>이내의 관내토에서 크게 감소하였으며, 1.0-3.0 D<sub>i</sub>이내의 관내토에서는 거의 감소하지 않았는데, 이와 같은 경향은 하중의 크기에 따라 달라지지 않았다. 또한, 관내토 폐색력의 감소율은 유사화된 지진진동의 경우에 비해 증가하여 약 10-30%였다.

Table 1. Test plan for measurements of degradation in pile capacity during simulated earthquake / sinusoidal shaking test

(a) stage 1 : simulated earthquake shaking tests

test series	test serial number	shaking type	bias compression load (%)	properties of shaking
s-1	s-x-100	simulated earthquake	100	Upland earthquake M = 8.0
s-2	s-x- 70	simulated earthquake	70	Upland earthquake M = 8.0
s-3	s-x- 40	simulated earthquake	40	Upland earthquake M = 8.0
s-4	s-4-100	simulated earthquake	100	Oceanside earthquake M = 8.0
	s-4- 70	simulated earthquake	70	Oceanside earthquake M = 8.0
	s-4- 40	simulated earthquake	40	Oceanside earthquake M = 8.0

(b) stage 2 : cyclic (sinusoidal type) shaking tests

test series	test serial number	shaking type	bias compression load (%)	properties of shaking
c-1	c-1- 5	sinusoidal shaking	100	a = 2.54mm f = 5Hz, n = 100
	c-1- 9	sinusoidal shaking	100	a = 2.54mm f = 9Hz, n = 100
	c-1-18	sinusoidal shaking	100	a = 2.54mm f = 18Hz, n = 100
c-2	c-2- 5	sinusoidal shaking	100	a = 1.36mm f = 5Hz, n = 100
	c-2- 9	sinusoidal shaking	100	a = 1.36mm f = 9Hz, n = 100
	c-2-18	sinusoidal shaking	100	a = 1.36mm f = 18Hz, n = 100
c-3	c-3- 5	sinusoidal shaking	100	a = 0.32mm f = 5Hz, n = 100
	c-3- 9	sinusoidal shaking	100	a = 0.32mm f = 9Hz, n = 100
	c-3-18	sinusoidal shaking	100	a = 0.32mm f = 18Hz, n = 100
c-4	c-4- 5	sinusoidal shaking	100	a = 0.16mm f = 5Hz, n = 100
	c-4- 9	sinusoidal shaking	100	a = 0.16mm f = 9Hz, n = 100
	c-4-18	sinusoidal shaking	100	a = 0.16mm f = 18Hz, n = 100
c-5	c-5- 5	sinusoidal shaking	70	a = 1.36mm f = 5Hz, n = 100
	c-5- 9	sinusoidal shaking	70	a = 1.36mm f = 9Hz, n = 100
	c-5-18	sinusoidal shaking	70	a = 1.36mm f = 18Hz, n = 100
c-6	c-6- 5	sinusoidal shaking	70	a = 2.54mm f = 5Hz, n = 100
	c-6- 9	sinusoidal shaking	70	a = 2.54mm f = 9Hz, n = 100
	c-6-18	sinusoidal shaking	70	a = 2.54mm f = 18Hz, n = 100
c-7	c-7- 5	sinusoidal shaking	70	a = 0.16mm f = 5Hz, n = 100
	c-7- 9	sinusoidal shaking	70	a = 0.16mm f = 9Hz, n = 100
	c-7-18	sinusoidal shaking	70	a = 0.16mm f = 18Hz, n = 100

remark :

1. a : amplitude of sinusoidal shaking, f : frequency, n : numbers of cycle
2. Biased compression load means the percentage of applied compression load on pile head to ultimate compressive pile capacity.
3. s-x-100 : x = 1, 2, 3, x = numbers of the repeated test runs.

## 감사의 글

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초진력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음 (관리번호 96-006).

## 참 고 문 헌

1. 최용규(1995a), "말뚝의 설치방법에 따른 관내 토의 폐색거동", 한국지반공학회지, 제11권 4호, pp.25-36.
2. 최용규(1995b), "유사지진 진동에 의한 개단말뚝의 지지력 저감", 한국지반공학회지, 제11권 1호, pp.75-86.
3. 日本土質工學會(1986), 杭基礎の設計法とその解説, p253.
4. Debeer, E. E. (1963), "The Scale Effect in the Transportation of the Results of Deep Sounding Tests on the Ultimate Bearing Capacity of Piles and Cassion Foundations", *Geotechnique*, Vol. XI, No. 1, pp.39-75.
5. Fang, H. Y. (1991), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp.685-700.
6. Holmquist, D. V. and Matlock, H. (1976), "Resistance-Displacement Relationships for Axially Loaded Piles in Soft Clay", *Proceedings 8th Offshore Technology Conference*, Houston, TX, paper OTC2474, pp.554-549.
7. Matlock, H. and Foo, S. C. (1976), "Axial Analysis of Pile using a Hysteretic and Degrading Soil Model", *Proceedings Conference Numerical Methods in Offshore Piling*, ICE, London, pp.165-185.
8. O'Neill, M. W., Vipulanandan, C., and Ochoa, M. (1990), "Response of Tension Piles to Simulated Seismic Motion in Saturared Fine Sand", UHCEE 90-09.
9. O'Reilly, M. P., and Brown, S. F. (1991), *Cyclic Loading of Soils from theory to design*, Van Nostrand Reinhold.
10. Poulos, H. G. (1981a), "Pile Foundations Subjected to Vertical Loading", *Symposium on Geotechnical Aspects of Coastal and Offshore Structures*, Bankok, pp.79-93.
11. Poulos, H. G. (1981b), "Cyclic Axial Response of Single Piles", *Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE*, 107, No. GT1, pp. 41-58.
12. Poulos, H. G. (1982), "Influence of Cyclic Loading on Axial Pile Response", *Proceedings 2nd Conference Numerical Methods in Offshore Piling*, Austin, TX.
13. Poulos, H. G. (1983), "Cyclic Axial Response-Alternative Analysis", *Proceedings, Geotechnical Practice in Offshore Engineering*, edited by Wright, S. G., ASCE, pp.403-421.
14. Poulos, H. G. (1988), "Cyclic Stability Diagram for Axially Loaded Piles", *Journal of Geotechnical Engineering Div., ASCE*, 114, No. GT8, pp.877-895.
15. Prakash, S., and Sharma, H. D. (1990), *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, Inc.
16. Van Weele, A. F. (1979), "Pile Bearing Capacity under Cyclic Loading compared with That under Static Loading", *Proceedings 2nd Behavior of Offshore Structures Symposium(BOSS)*, London, pp.475-488.

(접수일자 1996. 3. 8)