

지진발생시 과잉간극수압비의 증가에 따른 지중 매설구조물의 거동

Behavior of Buried Geo-structures due to Increase of Excess Pore Water Pressure Ratio During Earthquakes

강 기 천¹ Kang, Gi-Chun

Abstract

Uplift phenomenon occurs when the apparent unit weight of buried geo-structures becomes smaller than that of the liquefied backfill due to the increase of an excess pore water pressure during strong earthquakes. In order to explain the relationship between the uplift displacement of the buried geo-structures and the increase of the excess pore water pressure ratio in backfill, dynamic centrifuge model tests are conducted. In the present study, primary and secondary factors against uplift behavior of the buried geo-structures are considered in the dynamic centrifuge model tests. Among these factors, the most important factors affecting the increase in the excess pore water pressure ratio were the ground water depth, the relative density of backfill, and the amplitude of the input acceleration, which were also largely affect the uplift amount of the buried geo-structures.

요 지

강한 지진 발생 시 뒤채움내의 과잉간극수압의 증가에 의해 지반이 액상화 되었을 때, 주변의 액상화 지반보다 작은 단위중량을 가진 지중 매설구조물은 부상하는 현상이 발생한다. 뒤채움에서의 과잉간극수압의 증가와 지중 매설 구조물 부상량의 관계를 설명하기 위해 동적 원심모형 실험을 수행되었다. 본 연구에서는, 매설구조물의 부상현상에 영향을 미치는 요인으로써 직접요인과 간접요인이 실험에 고려되었다. 이러한 요인들 중에, 과잉간극수압비의 증가에 영향을 주는 중요한 요인은 직접요인으로써의 지하수위, 뒤채움의 상대밀도, 그리고 입력 지진가속도의 크기이다. 그리고 이 요인들은 지중 매설구조물의 부상량에도 크게 영향을 주는 것으로 나타났다.

Keywords : Buried geo-structure, Dynamic centrifuge model tests, Excess pore water pressure ratio, Liquefied backfill, Uplift phenomenon

1. 서 론

최근 2011년 3월 11일에 발생한 일본의 동북부 대지진($M=9.0$)에 의해 세계적으로 지진에 대한 관심이 급격히 증가하였으며 지진에 의한 지반-구조물에 많은 피해들이 보고되고 있다. 특히, 지진이 발생하여 강한 진동에 지반이 노출되었을 시, 지반 액상화와 그에 따른

지반의 측방유동과 침하현상은 토목/지반 기반시설의 피해에 심각한 원인이 되고 있다. 이러한 기반시설물 중에, 소규모 구조물로서는 가스공급배관, 상수도 및 하수 시스템, 전기 설비 등이 있으며 대규모 시설물로서는 터널구조물을 들 수 있다. 이러한 소·대규모 지하 매설구조물은 1964년 일본 니이가타 지진과 동년 미국 알래스카 지진, 1983년 니혼 추부 지진, 1990년 필리핀

¹ 정회원, 미주리 과학기술 대학교 Post-Doctoral Research Fellow (Member, Post-Doctoral Research Fellow, Dept. of Civil, Architectural, and Environmental Engrg., Missouri Univ. of Science and Technology, kangg@mst.edu)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

루존 지진 등에서 부상 혹은 침하의 피해가 계속 해서 보고되고 있다(Hall and O'Rourke, 1991; Taniguchi and Morishita, 1985; Hamada, 1991, Tokimatsu et al., 1994). 이러한 토목/지반 기반시설물들의 피해는 인간의 삶과 직접적인 관계가 있는 lifeline system에 물리적인 피해를 입힘으로써 지진 후 장기간동안 시민의 일상적인 생활을 불가능하게 만들고 있다.

소규모 지반기반 시설물의 부상현상의 피해는 다음과 같이 설명 할 수 있다. 일반적으로 상·하수 시스템 등의 소규모 시설물의 설치를 위해 원지반을 굴착하여 트렌치를 제작한다. 그 후 시공성이 편리한 사질토질의 흙을 뒤채움으로써 사용하게 되며, 지진이 발생하였을 때 이 뒤채움의 액상화가 지중 매설구조물의 부상을 야기한다고 알려져 있다(Koseki, et al., 1997ab; Yasuda and Kiku, 2006). 그림 1에서처럼 부상한 맨홀 또는 하수관은 하수시스템의 기능인 유하기능을 마비시킬 뿐만 아니라 그 시설물이 도로에 설치된 경우에는 돌출된 시설물로 인해 교통 혼잡을 야기하는 등 많은 문제가 되고 있다. 특히, 1993년 쿠시로오키 지진후에는 약 20개소의 하수 맨홀 시설물이 지상으로부터 1.5m 부상하였으며(Yasuda and KiKu, 2006), 동년도의 홋카이도 난세이 오키 지진에서는 55개의 하수 맨홀이 10cm에서 57cm 정도 부상하는 피해가 보고되고 있다. 근래의 연구에서는 소방요원 등의 설문조사를 통해 소규모 매설구조물의 허용 부상량(Honda et al., 2002)에 대해서도 연구가 진행되어졌다.

액상화 지반에서 지중 매설구조물의 부상량에 영향

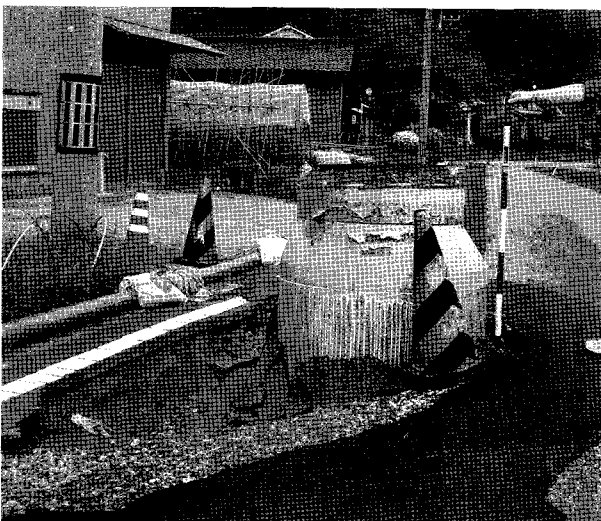


그림 1. 2007년 Noto Peninsula 지진시 하수 맨홀의 부상(약 80cm)과 주변 지반의 침하

을 미치는 인자에 대한 연구는 기존의 연구에서도 다루고 있다(Tobita et. al., 2011). 하지만 본 연구에서는 지중 매설구조물의 부상현상에 대해서 그 원인을 규명하고 과잉간극수압비의 증가와 부상거동에 대해서 심도 깊게 고찰하며 어떠한 인자가 과잉간극수압비의 증가에 영향을 미치며, 그로 인한 지중 매설구조물의 부상량에는 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 위해 19회의 원심모형 실험을 수행하였다. 원심모형 실험에서는 트렌치 내에서 뒤채움을 포함한 지중 매설구조물의 부상에 직접적으로 영향을 주는 인자를 직접요인, 원지반의 특성을 나타내며 지중 매설구조물의 부상에 간접적으로 영향을 주는 간접요인에 대해서 연구가 수행되어 졌다.

2. 원심모형 실험

2.1 원심모형시험기

본 연구에서는 지중 매설구조물의 부상거동을 평가하기 위하여 교토대학교 방재연구소(DPRI-KU)에 소재하고 있는 원심모형시험기(최대 용량 24g-ton)를 이용하여 실험을 수행하였다. 모델 지반 및 구조물은 1/20 축소 제작되었고 원심가속도 20g에서 수행되었다. 그림 2는 원심모형장치의 개요도를 나타내며, 회전축으로부터 반경이 2.5m이다. 또한, 지반-구조물의 동적 거동을 조사하기 위해 허용변위 $\pm 5\text{mm}$ 의 진동대가 비치되어있고, 진동대는 원심가속도 50g 이하에서 작용되도록 설계되어 있다. 입력 지진파와 각종 계측기는 무선 LAN에 의해 제어되며, 모형토조 전방에 CCD카메라가 설치되어 있어 실험 중의 지반과 구조물의 거동을 관찰할 수 있도록 설계 제작되었다.

2.2 구조물 및 지반 모델 제작

그림 3은 원심모형 실험에 사용된 지중 매설구조물로서 알루미늄 재질의 원기둥 형태의 중공 구조물이고 지하 하수시스템의 맨홀구조물을 대상으로 제작되었다. 길이는 15cm와 10cm(Model-scale), 외경은 5.5cm이며, 내경은 4.5cm이다. 모델 구조물의 겉보기 단위중량은 각각 9.57kN/m^3 과 9.99kN/m^3 이다.

본 실험에서 사용한 시료는 표준사이며, 그림 4의 입도분포곡선에 나타난 바와 같이 균등계수는 1.73, 곡률

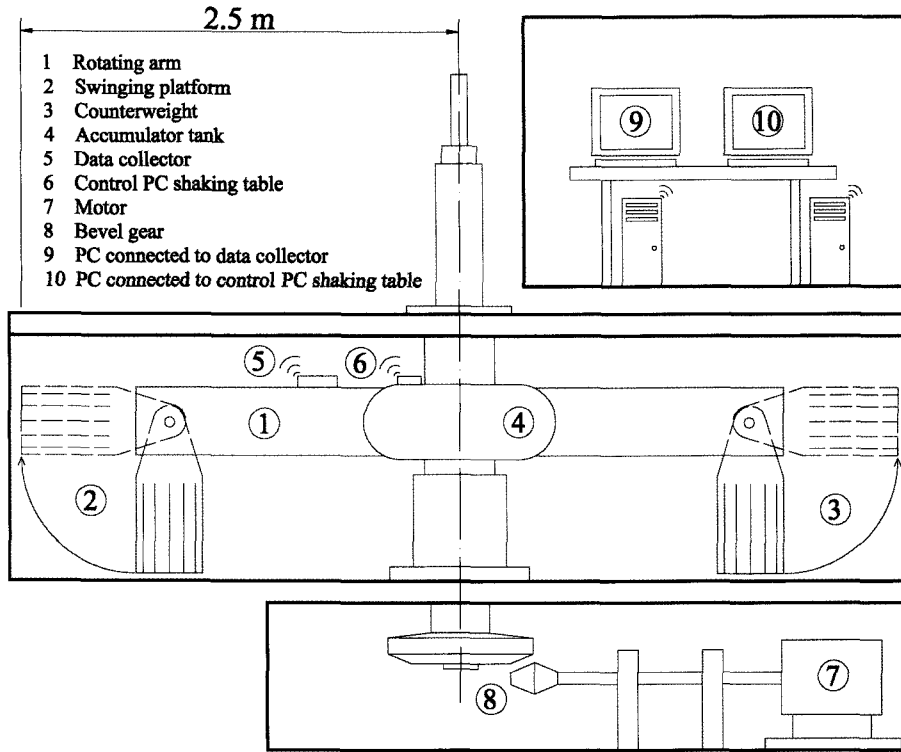


그림 2. 원심모형시험기의 개요도

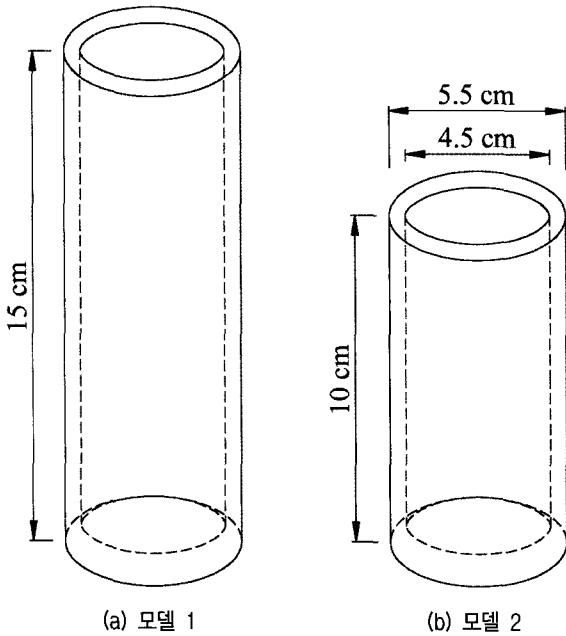


그림 3. 구조물 모형(Model-scale)

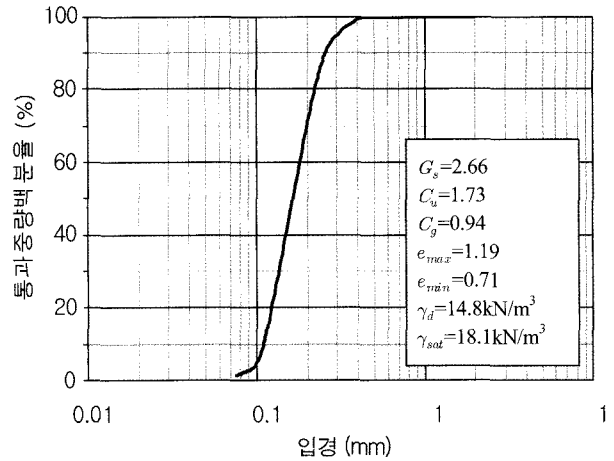


그림 4. 표준사의 입도분포곡선

계수는 0.94이다. 통일 분류법으로 SP에 속하며, 비중은 2.66이며 포화도(S) 30%, 상대밀도 50%로 간주하여 산정한 건조단위중량은 14.8kN/m^3 이고, 포화단위중량은 18.1kN/m^3 이다. 모형지반은 실제 현장에서 지중 매설구조물을 설치하는 방법으로 다음과 같이 제작되었다. (1) 습윤 상태의 표준사를 모형토조에 삽입 후 아래에서부

터 여러 층에 대해서 균일한 하중을 가하면서 액상화가 발생하지 않도록 상대밀도 85%정도로 원지반을 제작하였다. (2) 지중 매설구조물을 설치하기 위해 $11.5(\text{가로}) \times 11.5(\text{세로}) \times 16(\text{높이})\text{cm}$ 의 트랜치를 굴착하였다. (3) 1cm의 자갈층을 트랜치 하부에 깔고 그 위에 모형 지중구조물을 거치시킨 후, 트랜치 내부에 점도($20\text{mPa}\cdot\text{s}$)가 있는 증류수를 넣고 원지반을 포화시키면서 수중 낙하법으로 뒤채움 상대밀도 약 36%로 제작하였다. 일반적으로 지중 매설구조물은 36%보다 큰 상대밀도를 가진 뒤채움 내에 설치되지만 본 연구에서는 지중 매설구

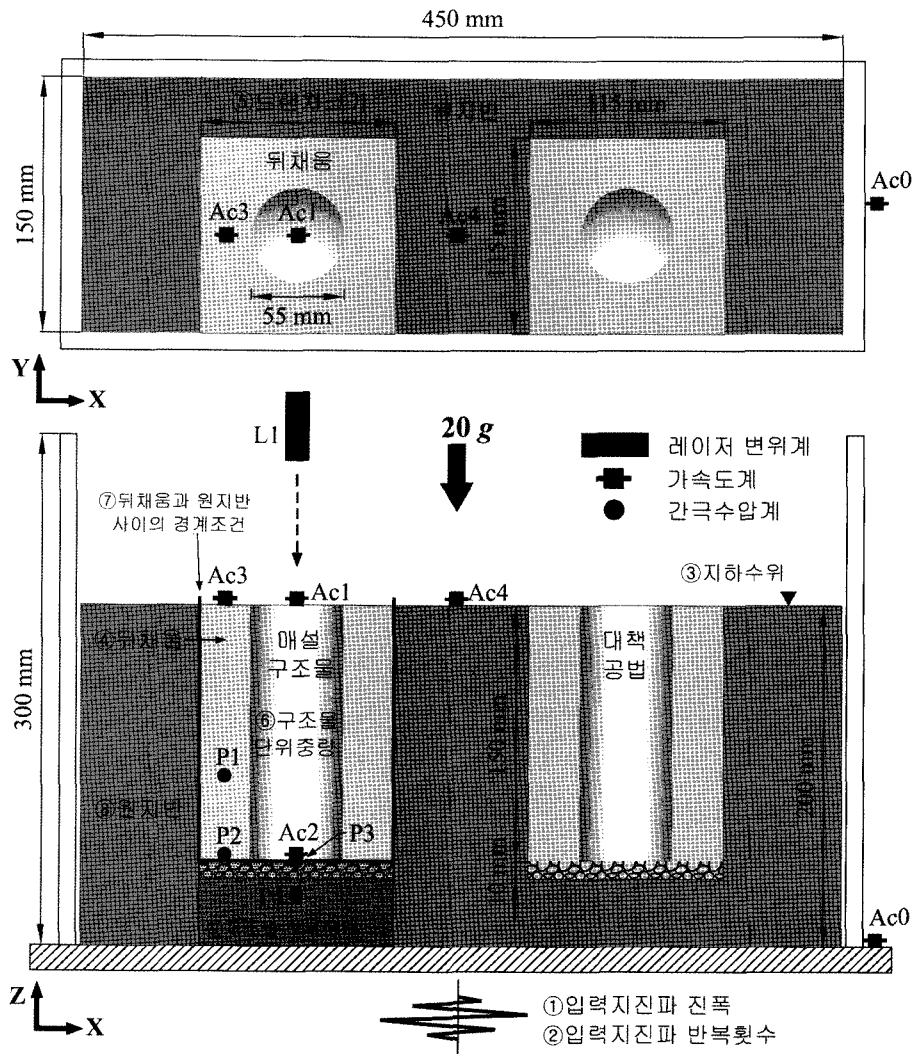


그림 5. 모형토조의 개요도(Model-scale)

조물의 부상거동에 대한 최대 부상량에 대하여 여러 인자에 대해 변화를 줌으로써 그 영향을 평가하기 때문에 초기 뒤채움의 상대밀도를 최대한 작게 제작 하였다.

그림 5는 모형토조의 개요도를 나타내며 그림에서 나타난 바와 같이 실험에서는 두 개의 모형구조물에 대해서 수행하였으며 오른쪽의 모형은 대책공법이 설치되어 있는 구조물로서 지진하중이 가해졌을 때 지반내의 간극수를 구조물 내부로 소산시킬 수 있는 장치가 설치되어 있다. 하지만 본 논문에서는 매설구조물의 부상거동에 대한 메커니즘을 다루기 때문에 대책공법에 대한 실험 결과는 무시되었다.

지중 매설구조물과 지반의 동적 거동을 관찰하기 위해 그림 5에서 보인 것처럼 레이저 변위계(L1), 가속도계(Ac0~Ac4), 간극수압계(P1~P4)를 각각 1, 5, 4개 설치하였다. 매설구조물의 부상량은 L1에 의해 측정되며 지반 침하량은 각각의 실험 전 후, 줄자를 사용하여 계

측하였다. 뒤채움 내의 간극수압을 측정하기 위해서 P1과 P2가 각각 지표면으로부터 2m, 3m 깊이에 설치되었고, 매설구조물이 부상할 때 그 하부에서의 수압을 측정하기 위해 P3를 구조물 바닥에 설치하였다. P4는 원지반의 액상화 여부를 판단하기 위해 매설구조물 하부의 원지반에 설치되었다. 또한 가속도계의 경우, 정확한 입력 가속도를 측정하기 위해 모형토조에 Ac0를 설치하였고, 부상현상과 관련하여 구조물의 거동을 살피기 위해 매설구조물 상부와 하부에 Ac1과 Ac2가 설치되었으며 뒤채움과 원지반의 지표면에서의 가속도를 측정하기 위해 Ac3와 Ac4가 설치되었다.

2.3 실험 방법 및 절차

지반모형제작 완료 후 모든 장비 및 계측기에 어떠한 문제도 없는 것을 확인한 후 원심가속도 20g에서 5분간

표 1. 모형지반 및 실험 조건(Full-scale)

| Test No. | 구조물 길이 m | 지하 수위 m | 입력최대 가속도 m/s ² | 반복 재하횟수 | 상대밀도 | | 트렌치단면 (굴착범위) m ² | 매설구조물의 단위중량 kN/m ³ | 구조물 하부 |
|----------|-------------|------------|------------------------------|---------|----------|----------|--------------------------------|----------------------------------|--------|
| | | | | | 뒤채움 % | 원지반 % | | | |
| CS1 | 3 | 0 | 6.78 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS2A | 3 | 1 | 7.15 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS2B | 3 | 1 | 7.25 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS3 | 3 | 1.7 | 7.19 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS4 | 3 | 3 | 6.60 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS5 | 3 | 1 | 2.05 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS6 | 3 | 1 | 4.64 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS7 | 3 | 1 | 6.79 | 30 | 72 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS8 | 3 | 1 | 6.47 | 30 | 85 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS9 | 3 | 1 | 6.87 | 15 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS10 | 3 | 1 | 6.91 | 60 | 36 | 85 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS11 | 3 | 1 | 6.97 | 30 | 36 | 36 | 13.5 | 9.57 | 자갈층 |
| CS12 | 3 | 1 | 7.05 | 30 | 36 | 65 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS13 | 3 | 1 | 6.97 | 30 | 36 | 아크릴박스 | 5.29 | 9.57 | 자갈층 |
| CS14L* | 2 | 1 | 6.51 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.98 | 자갈층 |
| CS14R* | 2 | 1 | 6.51 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.98 | 알루미늄판 |
| CS15 | 2 | 1 | 6.63 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 9.98 | 액상화지반 |
| CS16 | 3 | 1 | 6.95 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 11.3 | 자갈층 |
| CS17 | 3 | 1 | 7.06 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 13.1 | 자갈층 |
| CS18 | 3 | 1 | 6.93 | 30 | 36 | 85 | 5.29 | 15.5 | 자갈층 |

*L은 모형토조의 왼쪽구조물, R은 오른쪽구조물을 나타낸다.

압밀을 시킨다. 출자에 의해 압밀량을 기록하고 초기 지표면 표고를 확인한 후 다시 20g의 원심장에서 진동대를 통해 지진파를 입력한다. 입력 지진파는 사인파로써 1.25Hz의 진동수, 진동대로부터 기록된 가속도 진폭은 약 2~7m/s²이며 15~60회의 반복하중을 적용하였다.

원심모형 실험은 표 1(Full-scale)에 나타낸 바와 같이 총 19회의 실험을 실시하였다. CS2A와 CS2B는 동일한 초기조건에 대한 실험을 통해 그 예측결과로부터 거의 비슷한 결과를 얻음으로써 실험에 대한 신뢰성을 확인하였다. 그림 5에서 나타낸 바와 같이 ①~⑨까지의 인자를 변화시키면서 실험이 수행되었다; ①지진가속도의 진폭, ②지진가속도의 반복재하 횟수, ③지하수위, ④뒤채움, ⑤트렌치 크기, ⑥구조물의 단위중량, ⑦뒤채움과 원지반 사이의 경계조건, ⑧원지반, 그리고 ⑨구조물 하부상태. 본 연구에서는 매설구조물의 부상에 영향을 미치는 인자를 크게 직접요인과 간접요인으로 나누었으며, 직접요인은 그림에서 보듯이 트렌치 내에서 구조물의 부상에 영향을 미치는 인자로서 ①~⑥까지이며 간접요인은 트렌치 외부의 원지반의 상태에 의한 요인으로 ⑦~⑨까지를 나타낸다.

3. 원심모형 실험에 의한 매설구조물의 부상거동

지중 매설구조물의 부상현상은 주변 뒤채움의 액상화에 의해 발생하며, 우선 뒤채움의 액상화와 매설구조물의 부상현상사이의 관계를 인지할 필요가 있다. 그림 6은 이를 설명하기위해 도시되었으며, 그림과 같이 동일한 깊이 (z)에서의 뒤채움과 구조물 하부부분의 응력상태를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma'_m = (\gamma_m - \gamma_w)z \quad (1)$$

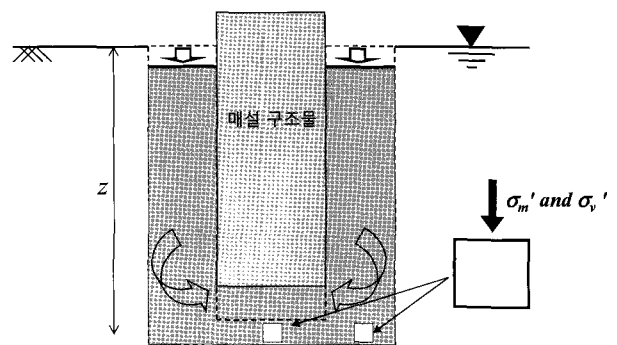


그림 6. 액상화에 의한 매설구조물 부상

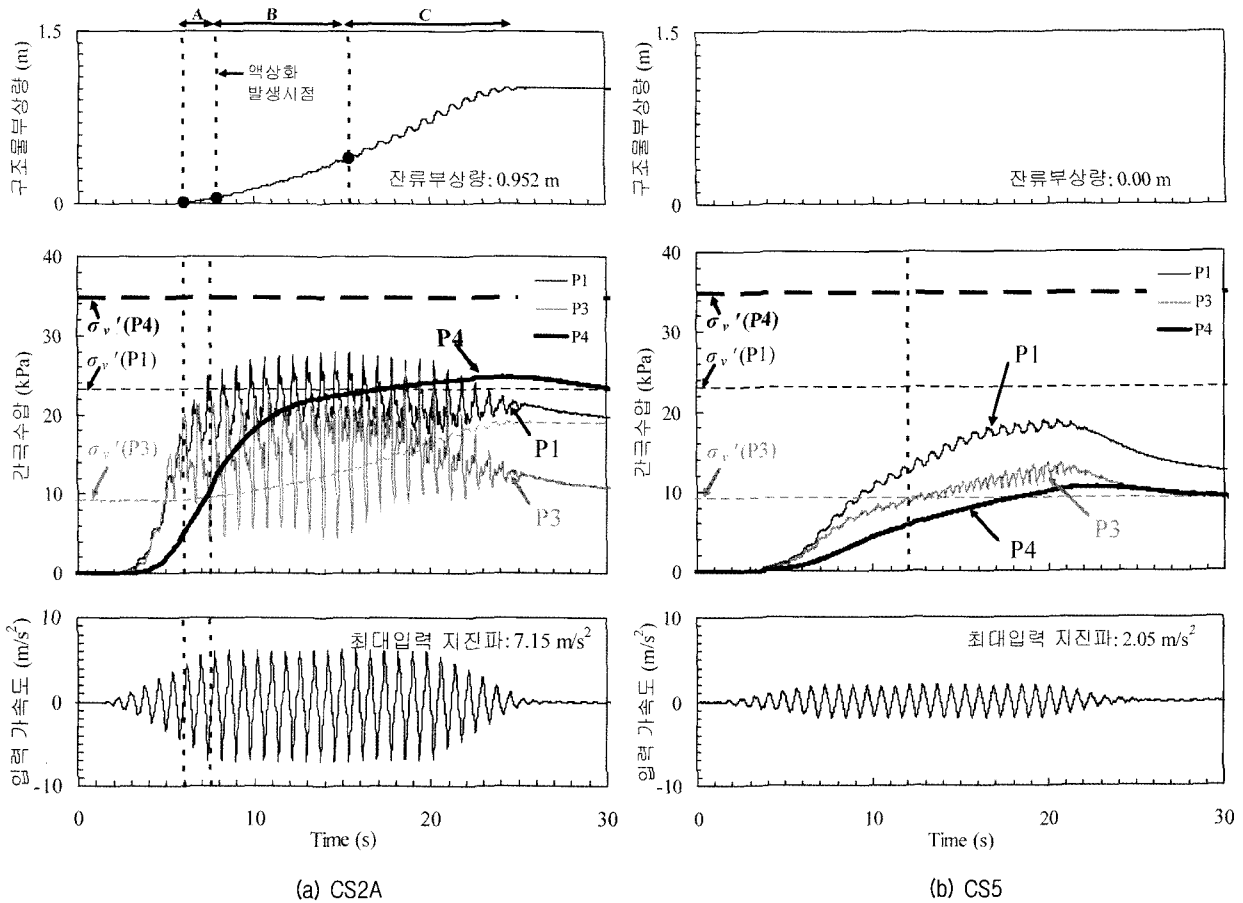


그림 7. 원심모형 실험 계측 결과

$$\sigma'_v = (\gamma_{sat} - \gamma_w)z \quad (2)$$

$$\sigma'_m < \sigma'_v \quad (\gamma_m = 9.57 \text{ kN/m}^3, \gamma_{sat} = 18.1 \text{ kN/m}^3) \quad (3)$$

여기서, σ'_m 는 구조물하부에 작용하는 유효수직응력, σ'_v 는 같은 깊이(z)의 뒤채움에서 작용하는 유효수직응력, γ_{sat} 는 뒤채움의 포화단위중량, γ_w 는 물의 단위중량이다. 지반 액상화가 발생하게 되면 뒤채움-구조물 사이에 작용하는 마찰력이 소멸하게 되며 위의 수식에서 보는 바와 같이 구조물 주변의 뒤채움에서의 유효수직응력(σ'_v)이 구조물 하부의 유효수직응력(σ'_m)보다 큰 상태가 되어 액상화된 뒤채움이 구조물 하부로 이동하려는 경향을 가지며 이로 인해 구조물은 상부로 부상하고 뒤채움은 침하하는 것이다.

그림 7은 CS2A와 CS5의 계측결과를 나타낸다. CS2A의 경우는 뒤채움이 액상화가 발생하였을 시, 즉 뒤채움에서의 과잉간극수압(P1)이 초기 유효수직응력에 거의 도달할 때(7초), 그리고 구조물 하부에서의 수압(P3)이 초기 유효수직응력을 넘어선 후에 매설구조물이 부상하기 시작한다. 구조물 하부에서의 유효수직응력이 시

간에 따라 증가하는 이유는 구조물의 부상으로 수압계의 위치가 지표면과 가까워지면서 매설구조물이 지표면으로 돌출된 만큼 상재하중이 증가하였기 때문이다. 원지반의 경우는 과잉간극수압(P4)이 초기 유효수직응력에 미치지 못하기에 액상화가 발생하지 않았으며, CS5는 뒤채움의 상대밀도가 85%이며 그림에 나타나있는 것처럼 매설구조물 하부에서의 수압(P3)이 초기 유효수직응력보다 증가하였지만, 뒤채움의 과잉간극수압이 초기 유효수직응력에 도달하지 못하여 액상화가 발생하지 않았으며, 그 결과 매설구조물은 부상하지 않은 것을 알 수 있다.

그림 7의 CS2A에서 계측된 부상을 크게 세 구간으로 나눌 수 있으며, 이를 각각 구간 A, B 그리고 C라고 한다. 그림 8은 뒤채움에서의 간극수압(P1), 구조물 하부에서의 수압(P3)과 구조물의 부상량과의 관계를 보여준다. 구간 A는 뒤채움에서의 간극수압이 증가할 때 구조물이 부상하는 것을 알 수 있으며, 이와 동시에 구조물의 하부에서는 간극수압이 감소하는 것을 알 수 있다. 구간 B에서도 뒤채움의 간극수압이 증가할 때 부상량

이 증가하는 경향을 보이지만, 이 그림에서 P1과 P3가 일정간격으로 급격히 증가 하고 감소하는 구간이 규칙적으로 발생하고 있으며 이는 과잉 간극수압의 증가뿐만 아니라 액상화된 뒤채움의 구조물 하부로 이동함에 의해 부상량에 영향을 미치는 것이라고 생각할 수 있다. 그리고 마지막 C구간의 경우는 부상량의 기록에서 매설 구조물이 상하로 요동치면서 부상하는 것을 알 수

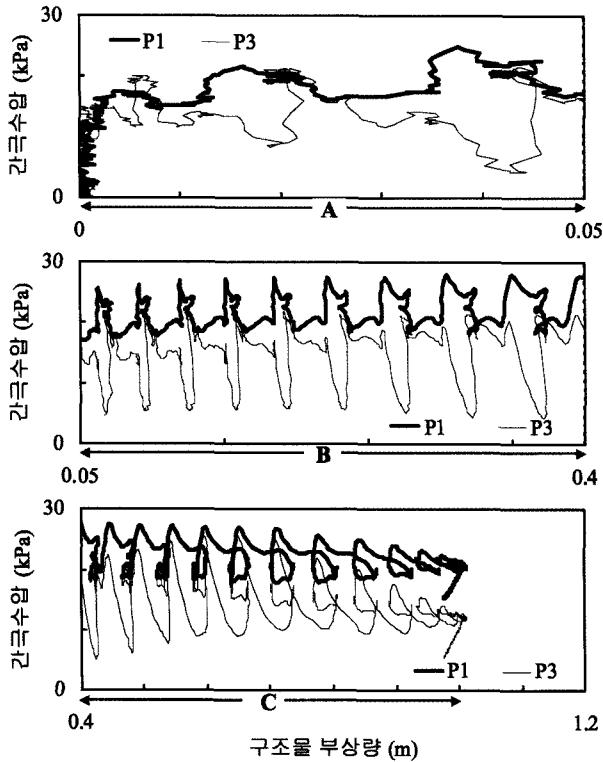


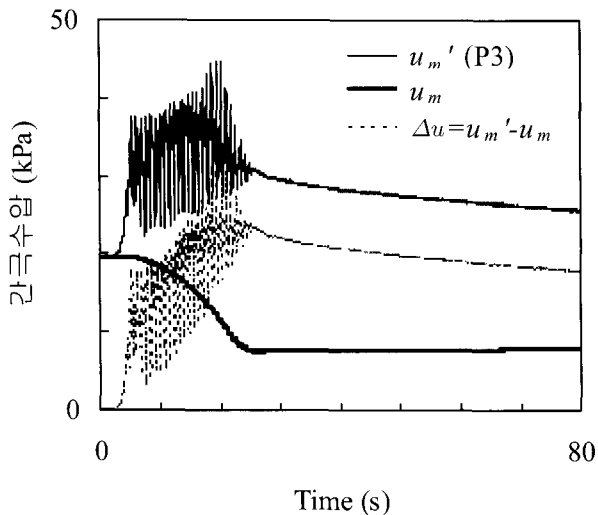
그림 8. 매설구조물의 부상과 간극수압과의 관계

있다. C구간에서는 액상화된 뒤채움의 이동과 더불어 지반에서 돌출된 구조물이 그 구속압에서 해방되어 입력 가속도에 따른 구조물의 상부와 하부의 진동차가 점점 커지는 것에 의해 구조물이 크게 요동치면서 부상하는 것으로 판단된다.

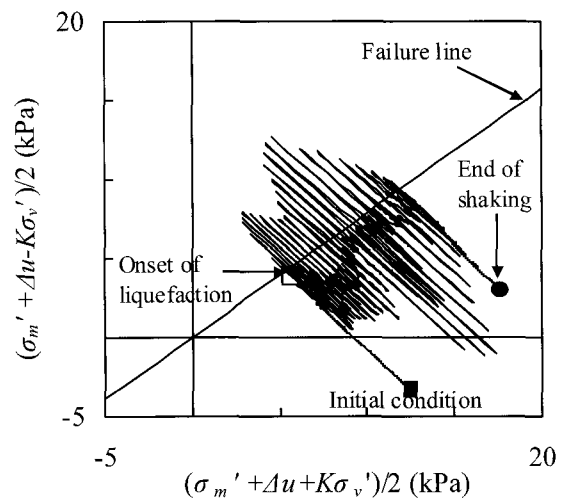
그림 9는 뒤채움과 구조물 하부에서 계측된 과잉간극수압을 이용하여 구조물 하부에서의 지반의 유효응력 경로를 도식한 것이다. 그림에서 Δu 는 구조물 하부에서 계측된 수압(u_m)에서 같은 깊이에서의 정수압(u_m)을 뺀 값으로써, 구조물의 부상에 따른 하부에 작용하는 순수한 수압으로 생각 될 수 있다(Kang 2010). 액상화 전에는 정지토압계수($K=0.5$)를 적용하였고 액상화 발생 시점에 K 는 1을 적용하였다. 정수압이 시간에 따라 감소하는 이유는 구조물의 부상으로 수압계의 위치가 지표면에 가까워지기 때문이다. 그림 9에서 보인바와 같이 초기 상태에서는 뒤채움에서의 수평방향의 유효응력이 구조물의 상재하중보다 상대적으로 크며, 액상화가 발생함과 동시에 유효응력 경로는 파괴선을 따라 이동하고 진동이 완료된 후에는 하부 지반은 다시 안정화 되는 것을 알 수 있다.

4. 과잉간극수압비의 증가에 따른 매설구조물의 부상과 뒤채움의 침하

일련의 계측 결과로부터 강한 진동에 의해 뒤채움 내에서 발생하는 과잉간극수압의 증가는 매설구조물의 부상현상과 큰 관계가 있음을 알 수 있었다. 본 절에서



(a) 구조물 하부에 작용하는 수압



(b) 구조물 하부에서의 뒤채움의 유효응력 경로

그림 9. 구조물 하부에서 작용하는 수압 및 유효응력 경로(CS2A)

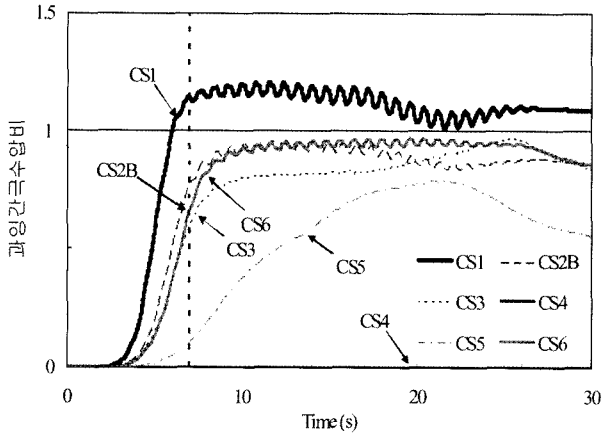


그림 10. 뒤채움에서의 과잉간극수압비(CS1~CS6)

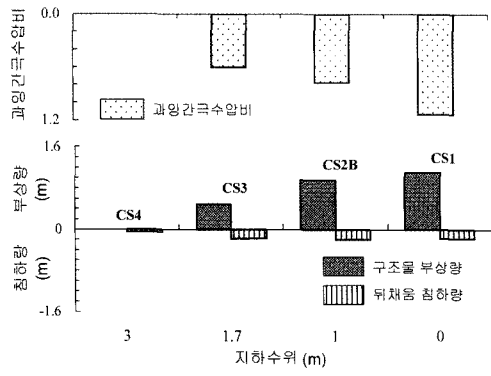
는 액상화 지반에서 지중 매설구조물의 부상현상과 관련하여 그 부상량에 영향을 미치는 인자에 대해 과잉간극수압과 부상량의 관계를 살펴보기 위해 모든 실험 케이스에 대하여 뒤채움에서 계측된 과잉간극수압에 대해 2초 이동평균법에 의해 각 파형의 스파이크를 제거한 뒤, 계측 후 7초 지점의 과잉간극수압비에 대해서 비교하였다. 과잉간극수압비는 뒤채움에서 계측된 과잉간극수압과 초기 유효수직응력에 대한 비로 나타난다. 그림 10은 지하수위와 입력 가속도의 변화에 따른 뒤채움 내에서의 과잉간극수압비를 나타내며, 동일한 시점에서 과잉간극수압비가 증가하기 시작한다. 이 그림에서 보듯이 지하수위가 지표면에 인접해 있을 때(CS1) 과잉간극수압비가 크게 증가하며 입력가속도가 2.05m/s^2 일 때(CS5)는 과잉간극수압비가 다른 실험과 비교해서 작은 것을 알 수 있다. CS4의 경우는 지하수위가 구조물 하부에 존재하기 때문에 과잉간극수압비는 증가하지 않았다.

4.1 직접요인

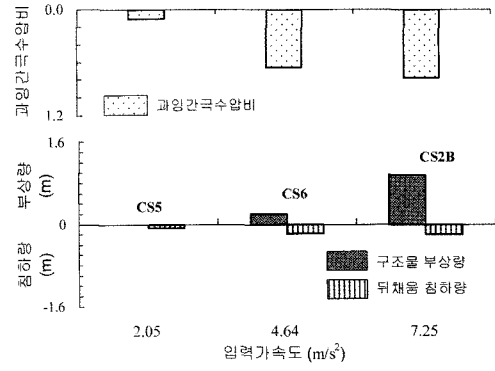
트렌치 내부에서 매설구조물의 부상량에 영향을 미치는 인자를 직접요인이라고 하며 그림 11은 직접요인에 따른 매설구조물의 부상량과 뒤채움의 침하량에 대해서 과잉간극수압비의 증가의 관계를 나타내고 있다. 그림 11(b)를 제외한 실험에서는 동일한 입력 가속도(6m/s^2)에 의해 실험이 실시되었지만 모형지반의 무게 등에 의해 발생하는 입력 가속도의 차는 무시되었다. 지하수위가 지표면에 가까울수록 과잉간극수압비가 증가하는 경향이 있으며, 이에 따른 매설구조물의 부상량과 뒤채움의 침하량도 증가한다. 입력가속도가 2.1m/s^2 일

경우에는 뒤채움이 액상화가 발생하지 않았으며, 입력가속도가 7.25m/s^2 까지 증가되었을 때는 과잉간극수압비가 더욱 증가하여 부상량이 0.958m 까지 증가하였다. 뒤채움의 상대밀도가 약 85%의 경우는 과잉간극수압비가 0.18까지 증가하여 액상화가 발생하지 않았으며, 상대밀도가 약 36%까지 감소하였을 때는 과잉간극수압비가 크게 증가하여 부상량이 0.958m 까지 증가하였다. 뒤채움의 침하량 또한 부상량의 증가와 함께 증가하는 경향을 보이고 있다. 반복재하 횟수가 15회인 경우는 부상량이 0.234m 이며, 60회까지 증가시켰을 경우는 부상량이 1.6m 까지 증가하였다. 하지만 과잉간극수압비는 일정한 크기를 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 11(e)에서 트렌치 단면이 5.3m^2 에서 13.5m^2 으로 약 2배 증가되었지만, 부상량은 단지 0.116 증가 되었으며, 이 경우 과잉간극수압비의 증가 역시 크게 증가되지는 않았다. 구조물의 단위 중량의 경우는 그 크기가 감소할수록 부상량이 증가하는 경향이 있지만 과잉간극수압비와는 무관한 관계를 보인다. 이 결과를 통해 직접요인 중 지하수위, 입력가속도 그리고 뒤채움의 상대밀도가 과잉간극수압비의 증가와 크게 관련이 있으며, 이는 매설구조물의 부상량에도 크게 영향을 미치는 것으로 간주된다.

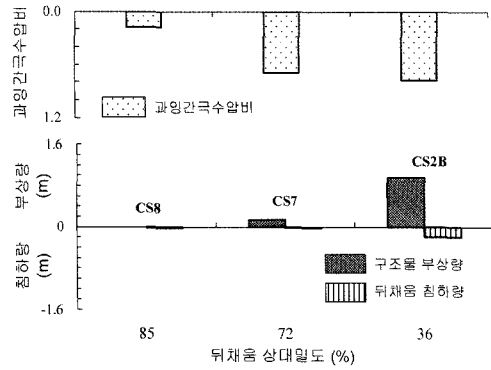
그림 12는 반복재하 횟수와 구조물 부상량의 관계를 보여주고 있으며, 반복재하 횟수는 15에서 60으로 증가에 대해서 입력가속도는 $6.87\sim 7.15\text{m/s}^2$ 로 비교적 큰 차이는 없다. 이 그림에서 보듯이 뒤채움의 액상화가 발생하는 시점은 거의 일치하며, 1의 과잉간극수압비가 지속적으로 유지됨에 의해 부상량이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 12(a)와 그림 12(b)에서 입력 지진파가 끝나는 시점에서 구조물의 부상도 정지하는 것을 알 수 있으며, 그림 (c)의 경우는 구조물의 부상량이 반복재하의 증가로 인하여 크게 증가하여 레이저변위계의 허용범위를 초과하였다. 트렌치 크기는 과잉간극수압의 증가에 약간의 영향을 미치지만 다른 인자와 비교했을 때 그 영향의 크기는 작은 것으로 간주 된다. 구조물의 단위중량은 과잉간극수압의 증가와는 무관하며, 액상화가 발생하였을 때 매설구조물 하부에 작용하는 부상력에 대한 저항력의 증가에 의해 부상량이 감소한 것이다. 하지만 지하수위, 입력가속도 그리고 뒤채움의 상대밀도를 제외한 다른 요인들 또한 높은 과잉간극수압비의 발생에 의해 그 부상량이 증가하는 것을 알 수 있으며 이는 매설구조물의 부상량은 과잉간극수압비와 깊은 관계가 있음을 나타낸다.



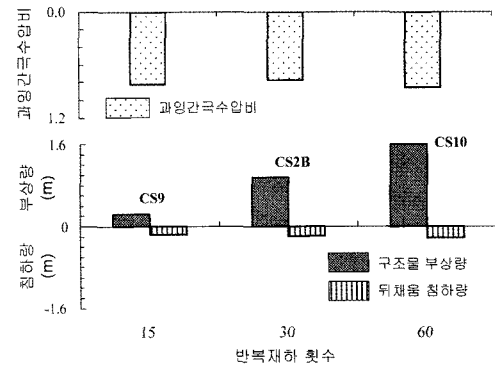
(a) 지하수위



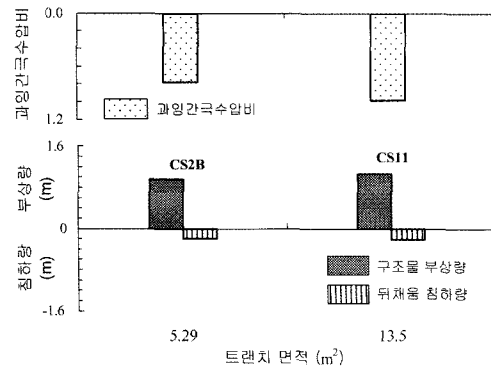
(b) 입력가속도의 크기



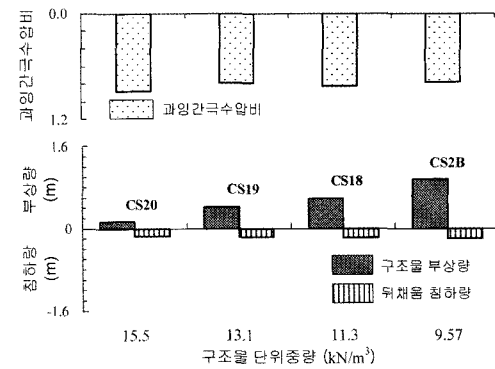
(c) 뒤채움의 상대밀도



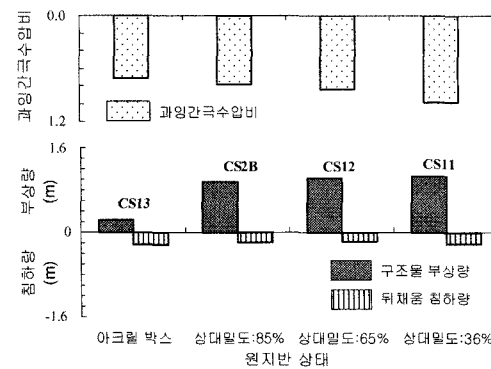
(d) 반복재하 횟수



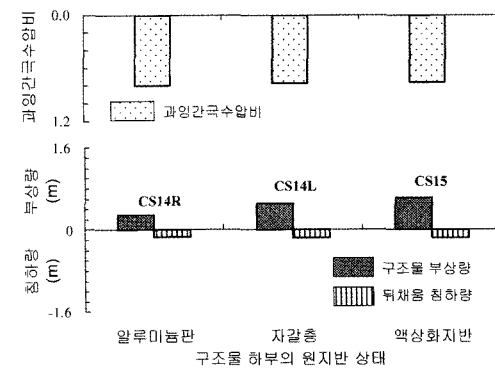
(e) 트랜치 크기



(f) 구조물의 단위중량



(g) 원지반 상태



(h) 구조물 하부의 원지반 상태

그림 11. 직접요인[(a)~(f)]과 간접요인[(g)~(h)]에 대한 과잉간극수압비와 구조물의 부상량 및 뒤채움의 침하량과의 관계

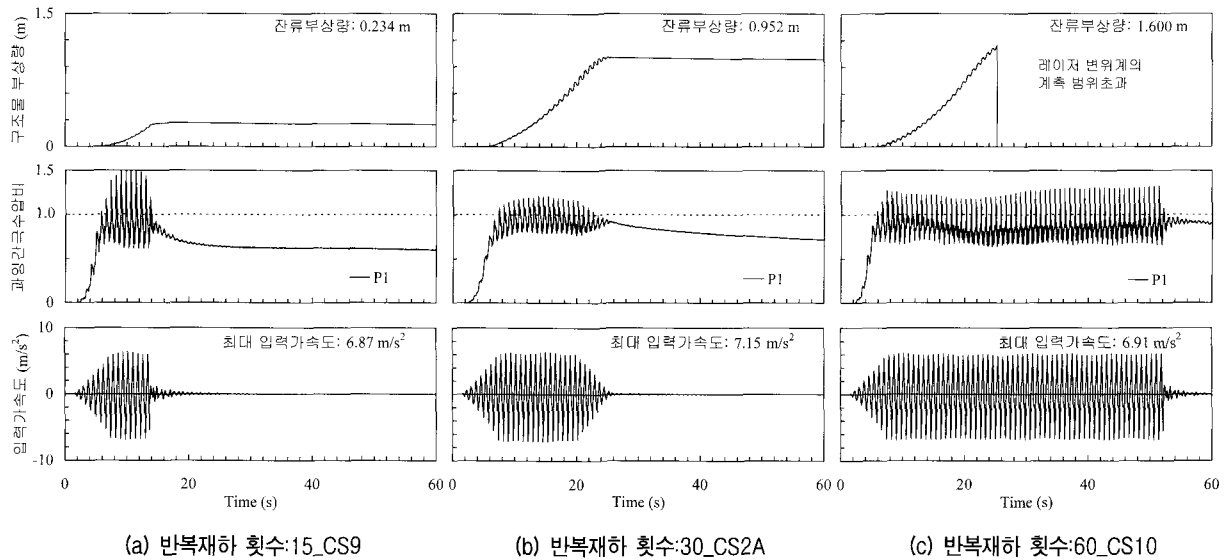


그림 12. 반복재하 횟수와 구조물 부상량과의 관계

4.2 간접요인

간접요인으로써 트랜치 외부의 원지반의 상대밀도와 트랜치 하부(구조물 하부)의 원지반의 상태에 대한 실험 결과는 그림 11(g)~(h)에 나타나 있다. 비교된 실험에 대한 뒤채움의 상대밀도는 36%로 동일하다. 그림 11(g)에서 보는바와 같이 최대 부상량은 원지반의 상대밀도가 36%(CS11)일 때 관측되었고, 상대밀도가 65%(CS12)와 85%(CS2B)로 증가할 때 부상량이 점점 감소하는 경향을 보인다. 그리고 원지반과 뒤채움 사이에 아크릴 박스에 의한 완전 비배수 및 강성의 경계조건(CS13)일 때 0.231m의 최소 부상량이 관측되었다. 이는 원지반의 변형에 의해 발생하는 트랜치의 전단변형이 최소화되었기 때문에 발생한 것으로 간주되며, 이는 트랜치의 전단 변형 또한 매설구조물의 부상현상에 영향을 미치는 요소로 여겨진다. 과잉간극수압비의 경우는 원지반의 상대밀도가 감소할수록 약간 증가하는 경향을 보이지만 직접요인의 지하수위, 입력가속도 그리고 뒤채움의 상대밀도와 비교해서 그 영향이 미미한 것으로 나타난다.

구조물 하부의 원지반 상태의 경우는 그림 11(h)에 나타난바와 같이 최대 부상량(0.617m)은 구조물 하부 원지반의 상대밀도가 36%(CS15)로 액상화가 발생하였을 때 관측되었다. 그리고 구조물 하부에 알루미늄 판을 설치하여 지반내의 간극수가 구조물 하부로 자유로이 이동하지 못하게 한 경우(CS14R)에 최소 부상량(0.258m)이 발생하였다. 일반적으로 매설구조물을 설치 할 때에는 구조물 하부에 자갈층이나 목재에 의한 격자를 설치

함으로써 구조물 하부에서는 부분적으로 지반내의 간극수의 이동이 자유로운 상태로 되어 있다. 본 실험에서는 구조물 하부가 자갈층인 경우의 부상량이 0.518m로 기록 되었다. 그리고 그림 11(h)에서 보듯이 구조물 하부의 원지반 상태의 경우도 뒤채움 내의 과잉간극수압비의 증가와는 무관한 결과를 보이지만 매설구조물의 부상은 큰 과잉간극수압의 발생과 관계가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 지진이 발생하였을 때 지중 매설구조물-지반 상호작용의 거동을 조사하기 위해 동적 원심 모형실험이 실시되었고, 지중 매설구조물의 부상현상에 영향을 주는 인자로서 직접 요인과 간접요인으로 구분하여 실험을 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 지중 매설구조물은 강진에 의해 주변 뒤채움이 액상화 되었을 때 부상하기 시작하며 이는 주변 뒤채움의 과잉간극수압비의 증가에 의한 것으로 나타났다.
- (2) 지중 매설구조물이 부상하는 동안에는 과잉간극수압비의 증가와 함께 액상화된 주변 뒤채움이 구조물 하부로 이동함에 의해 부상량의 증가를 가속시키며 이와 함께 뒤채움은 침하하는 거동을 보였다. 지중 매설구조물 부상의 후반부에는 구조물 자체의 좌우 진동에 의해 그 부상량이 가속되는 것을 알 수

있었다.

(3) 직접요인으로써 지반의 지하수위, 입력가속도, 그리고 뒤채움의 상대밀도는 과잉간극수압비의 증가에 영향을 미치는 요인이며, 이는 부상량에도 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 입력 가속도의 반복 재하 횟수는 비교적 높은 과잉간극수압비가 지속적으로 작용하는 것에 의해 지중 매설구조물의 부상을 증가시켰고 트랜치의 크기는 과잉간극수압비에 약간 영향을 미치는 것으로 나타났지만 위에서 언급한 요인들과 비교했을 때 그 영향은 작은 것으로 나타났다. 구조물의 단위중량은 과잉간극수압비의 증가와는 무관하며, 트랜치 내에서의 1차원적 평형 방정식을 고려했을 때 부상력에 대한 저항력의 증가에 따른 부상량의 저감 효과가 나타났다.

(4) 간접 요인으로써 원지반의 상대밀도가 감소할수록 그리고 지중 매설구조물 하부의 원지반이 액상화가 발생하였을 때 지중 매설구조물의 부상량이 증가하는 경향이 보였으며, 지중 매설구조물 하부에 알루미늄 판을 설치하여 간극수가 구조물 하부의 유입을 억제시킨 경우 지중 매설구조물의 부상이 감소하는 경향을 보였다.

이상의 결과로부터 지중 매설구조물은 뒤채움내에 과잉간극수압이 증가로 인한 지반 액상화에 의해서 발생하며 그 부상량은 과잉간극수압비의 증가와 크게 관련이 있는 것을 알 수 있고 이러한 메커니즘을 통하여 과잉간극수압비를 억제 할 수 있는 방법(다짐에 의한 상대밀도 증가 또는 간극수압의 소산)에 의해 액상화 지반에서 지중 매설구조물의 부상을 억제 시킬 수 있는 대책 공법이 제안 될 수 있다(Kang et al., 2011).

참 고 문 헌

1. Hall, W. J. and O'Rourke, T. D. (1991), "Seismic behavior and vulnerability of pipelines", *Proc 3 USConf Lifeline Earthquake*, pp.761-73.
2. Hamada, M. (1991), Report of damage reconnaissance for the 1990 Philippine, Luzon Earthquake, *Association for Development of Earthquake Prediction*, pp.89.
3. Honda, A., Nakase, H., Yasuda, S. and Suehiro, T. (2002), "Study on permissible uplift of buried structures", *Proceedings of Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, pp.1439-1440.
4. Kang, G.-C., Tobita T., Iai, S., and Ge, L. (2011), "Centrifuge Modeling and Mitigation of Manhole Uplift due to Liquefaction", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Submitted for publication, March 3.
5. Kang, G.-C. (2010), Assessing uplift displacement of buried geotechnical structures in liquefied ground during earthquakes, *Ph.D. thesis, Kyoto University, Japan*.
6. Koseki, J., Matsuo, O., and Koga, Y. (1997a), "Uplift behavior of underground structures caused by liquefaction of surrounding soil during earthquake", *Soils and Foundations*, Vol.37, No.1, pp.97-108.
7. Koseki, J., Matsuo, O., Ninomiya, Y., and Yoshida, T. (1997b), "Uplift of sewer manhole during the 1993 Kushiro-Oki earthquake", *Soils and Foundations*, Vol.37, No.1, pp.109-121.
8. Taniguchi, E. and Morishita, T. (1985), "Uplift failure of underground structures during the 1983 Nihonkai-Chubu Earthquake", *Research Report of Public Works Research Institute*, No. 2235.
9. Tobita, T., Kang, G.-C, and Iai, S. (2011), "Centrifuge modeling of manhole uplift in a liquefied trench", *Soils and Foundations*, Accepted, July.
10. Tokimatsu, K., Suzuki, Y. and Tamura, S. (1994), Preliminary report on geotechnical aspects of Hokkaido-Nansei-Oki Earthquake, *Research Report of Public Works Research Institute*, No. 2235.
11. Yasuda, S. and Kiku, H. (2006), "Uplift of sewage manholes and pipes during the 2004 Niigataken-Chuetsu earthquake", *Soils and Foundations*, Vol.46, No.6, pp.885-894.

(접수일자 2011. 5. 27, 심사완료일 2011. 7. 18)