

원심모형실험을 이용한 액상화 모래지반의 과잉간극수압 소산거동 분석

Evaluation of Dissipation Behavior of Excess Pore Pressure in Liquefied Sand Deposit Using Centrifuge Tests

김 성 렬¹ Kim, Sung-Ryul

Ko, Hon-Yim²

김 명 모³ Kim, Myoung-Mo

Abstract

Soil liquefaction occurs by complex dynamic interaction between soil particles and pore fluid. Therefore, experimental researches have been widely performed to analyze liquefaction phenomena. In this research, centrifuge tests were performed to analyze the liquefaction behavior of horizontal sand ground. Centrifugal acceleration was 40 g and the thickness of model ground was 25 cm, which simulates 10 m thickness in prototype scale. Viscous fluid was used as pore fluid to remove the time scaling difference between dissipation and dynamic shaking. Test results showed that the dissipation of excess pore pressure is the combined behavior of solidification and consolidation. In addition, the solidification rate, the ground acceleration amplitude, and the dynamic permeability during solidification were influenced by the confining pressure.

요 지

지반 액상화는 흙-유체간의 복잡한 동적상호작용에 의해 발생하므로 액상화 현상을 규명하고 액상화 모델링을 위한 데이터를 얻기 위하여 실험을 통한 액상화 연구가 널리 수행되고 있다. 본 연구에서는 원지반의 구속압을 모사할 수 있는 원심모형실험을 수행하여 수평지반의 액상화 거동을 분석하였다. 25cm 두께의 지반에 40g의 원심가속도를 가하여 10m 두께의 원지반을 모사하였는데, 동적진동과 소산의 시간상사비 차이를 제거하기 위해 점성유체를 사용하였다. 실험결과로부터 과잉간극수압 소산거동은 침강현상과 압밀현상의 복합적 작용결과임을 확인하였다. 또한, 침강 속도, 지반 가속도 진폭, 그리고 입자침강시의 동적 투수계수값은 지반 구속압의 영향을 크게 받음을 알 수 있었다.

Keywords : Centrifuge test, Dissipation, Earthquake, Excess pore pressure, Liquefaction

1. 서 론

지반 액상화 현상은 지반구조물의 내진설계를 수행할 때 가장 먼저 검토하고 중요시하는 항목이다. 액상화 현상은 포화된 모래지반에 급속한 진동하중이 가해질

경우 지반내 과잉간극수압이 흙의 유효응력과 같아져 지반이 강도와 강성을 상실하고 물과 같이 거동하는 현상이다. 과거 지진피해사례를 살펴보면 액상화로 인하여 많은 종류의 구조물들에 엄청난 피해가 발생하였다. 최근 지반내진분야 논문 중 약 50% 이상이 액상화 현

1 정회원, 동아대학교 토목해양공학부 전임강사 (Member, Full-time lecturer, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ., sungryul@dau.ac.kr)

2 미국 콜라라도 토목, 건축, 환경공학과 교수 (Prof., Department of Civil, Architecture, Environmental Engrg., Univ. of Colorado at Boulder)

3 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수 (Member, Prof., The School of Civil, Urban & Geo-Systems, Seoul National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

상과 관련되어 있을 정도로 액상화 현상에 대한 연구는 세계적인 관심분야이다.

국내에서는 1995년 일본 고베지진후 내진연구의 중요성을 깨닫고, 각종 내진관련 연구가 뒤늦게 시작되었다. 국내에서는 액상화 현상을 분석하기 위하여 대기압 상태(1-g)하에서 모형토조를 이용한 1-g 진동대 실험을 주로 수행하여 왔다. 그러나, 1-g 진동대 실험은 보통 소형 토조를 이용하여 수행되므로 흙의 응력-변형률 거동에 큰 영향을 주는 지반 구속압의 영향을 고려하지 못한다는 단점을 지니고 있다. 국내외에서 액상화 거동 및 액상화 이후의 과잉간극수압 소산 현상과 관련하여 1-g 진동대 실험을 수행하여 심도있게 연구가 수행된 바 있으나 원심모형실험으로는 수행된 사례가 적다.

그러므로 본 연구에서는 원심모형실험을 수행하여 지반 구속압이 액상화 지반의 거동에 미치는 영향을 분석하고, 액상화 지반의 과잉간극수압 소산거동 및 이와 관련된 침하거동을 살펴보고자 한다. 원지반의 액상화 거동을 구현하기 위하여 진동시간과 유체의 투수성에 대한 상사법칙을 엄격히 적용하여 원심모형실험을 수행하였고, 지반내 과잉간극수압, 지반 가속도, 그리고 지표 침하 등을 측정하여 그 결과를 분석하였다.

2. 액상화 지반의 과잉간극수압 소산연구

2.1 1-g 진동대 실험

Florin과 Ivanov(1961)는 1-g 하에서 충격하중시험과 진동시험을 수행하여 액상화 지반의 과잉간극수압 소산과 침하를 모델링할 수 있는 침강이론(theory of sinking

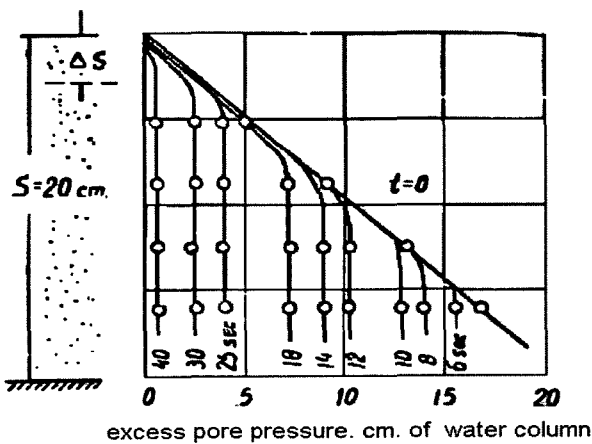


그림 1. 충격시험에 의한 과잉간극수압 발생과 소산거동(Florin과 Ivanov, 1961)

sand grains)을 제안하였다. 그림 1은 충격하중에 의해 전 깊이에 액상화가 발생한 이후의 과잉간극수압 소산 거동을 보여준다. 진동이 끝나면 하부영역에서부터 흙 입자들이 침강하면서 서로 접촉을 하게 되고 과잉간극수압이 감소하기 시작한다. 액상화가 유지되는 상부영역과 침강에 의해 견고화된 하부영역의 경계면을 견고층전면(solidification front)이라고 하며 견고층전면은 과잉간극수압의 소산이 진행됨에 따라 하부에서부터 지표면으로 이동하게 된다. Florin과 Ivanov는 견고층전면의 이동속도(침강속도)는 일정하고, 견고층전면이 지표면에 도달할 때 소산이 완료되며, 견고화된 영역이 비압축성이라는 가정 하에서 견고층 내부의 과잉간극수압 크기는 견고층전면에서의 과잉간극수압 크기와 동일하다고 제안하였다. 그 이후 많은 학자들이 침강이론을 이용하여 과잉간극수압의 소산거동을 분석하였으나 대부분 1-g 진동대 실험을 수행하여 원지반의 높은 구속압이 액상화 거동에 미치는 영향을 분석하지 못하였다 (Kokusho, 1999; Tsurumi 등, 2000; 하익수 등, 2003).

Florin과 Ivanov는 액상화 이후의 과잉간극수압 소산 속도 a 를 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$a = \frac{(\gamma')^2(1+e_1)k}{\gamma_w(e_1-e_2)} \quad (1)$$

여기서, e_1 : 액상화된 지반의 간극비

e_2 : 견고화된 지반의 간극비

γ_w : 물 단위중량

γ' : 수중단위중량

k : 액상화 지반의 투수계수

하익수 등(2003)은 다양한 입도분포를 가지는 흙을 이용하여 수평지반에 대한 1-g 진동대 실험을 수행한 후 흙의 입도분포가 액상화 현상에 미치는 영향을 분석하였다. 그는 식 (1)을 이용하여 액상화 이후의 동적 투수계수를 추정하였는데 액상화된 흙의 동적 투수계수는 입도분포에 따라 정적 투수계수의 1.4~5배 증가하며 주문진 표준사의 경우 5배 정도 증가한다고 제시하였다.

2.2 원심모형실험

사질토는 투수계수가 유한하고 압축성을 지니고 있으므로 액상화 이후 견고화된 층의 흙자중과 압축성

등에 의해 추가적인 과잉간극수압이 존재할 수 있다. Scott(1986)는 액상화된 층의 과잉간극수압 소산을 모델링하기 위해 침강이론과 압밀이론을 복합한 이론을 제안하였으며 수평지반에 대한 원심모형실험 결과와 비교하여 제안된 모델의 유효성을 검증하였다. 그림 2는 견고층전면이 깊이 z 에 도달하였을 때의 과잉간극수압 분포를 보여준다. 지반 구속압이 작아서 견고화된 층의 압축성의 영향이 작다면 그림 1에서 보인 바와 같이 견고층 내부의 과잉간극수압 크기는 동일하다. 그러나, 지반 구속압이 크다면 그림 2에 보인 것처럼 견고층이 형성된 후 자중압밀의 개념처럼 견고층의 자중과 압축성

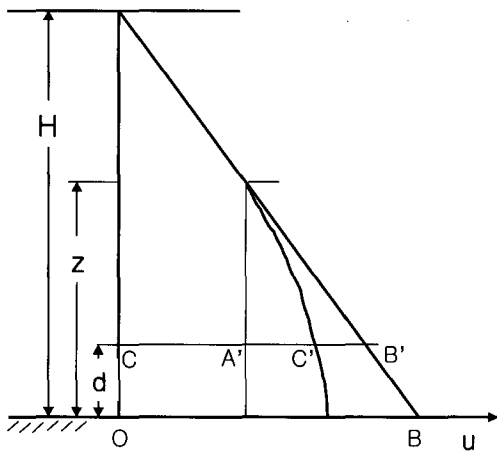


그림 2. 견고층의 압축성이 존재할 때의 과잉간극수압 분포도(Scott, 1986)

에 의해 추가적인 과잉간극수압(A'C')이 토층 내에 존재할 수 있다. 그러나, Scott가 인용한 원심모형실험(그림 3 참조)은 전체 과잉간극수압 소산과정과 깊이별 과잉간극수압 분포를 정확하게 예측하지 못하여, 소산속도가 전 깊이에서 일정하다고 가정하였고 압밀에 의한 소산과정을 정밀하게 분석하지 못하였다.

3. 원심모형실험 계획

본 연구에서는 상사법칙을 엄격히 적용한 원심모형실험을 수행하여 원지반의 액상화 거동을 구현하였다. 또한, 액상화 지반의 과잉간극수압 발생, 지속, 그리고 소산 등 전과정을 예측하고 깊이별로 총 5개의 간극수압계를 설치하여 깊이별 과잉간극수압 분포를 정밀 분석하였다.

3.1 원심모형실험 장치

미국 볼더 소재 콜로라도 주립대학에서 보유하고 있는 대형 원심모형실험기(그림 4)를 이용하여 수평지반에 대한 액상화 실험을 수행하였다. 콜로라도 대학에서 보유하고 있는 원심모형실험기는 토조를 설치하는 플랫폼의 크기가 1.2m×1.2m×0.9m(가로×세로×높이)이고, 회전중심에서 플랫폼까지의 거리가 약 5.4 m이며, 한계 용량은 400g·ton 이다.

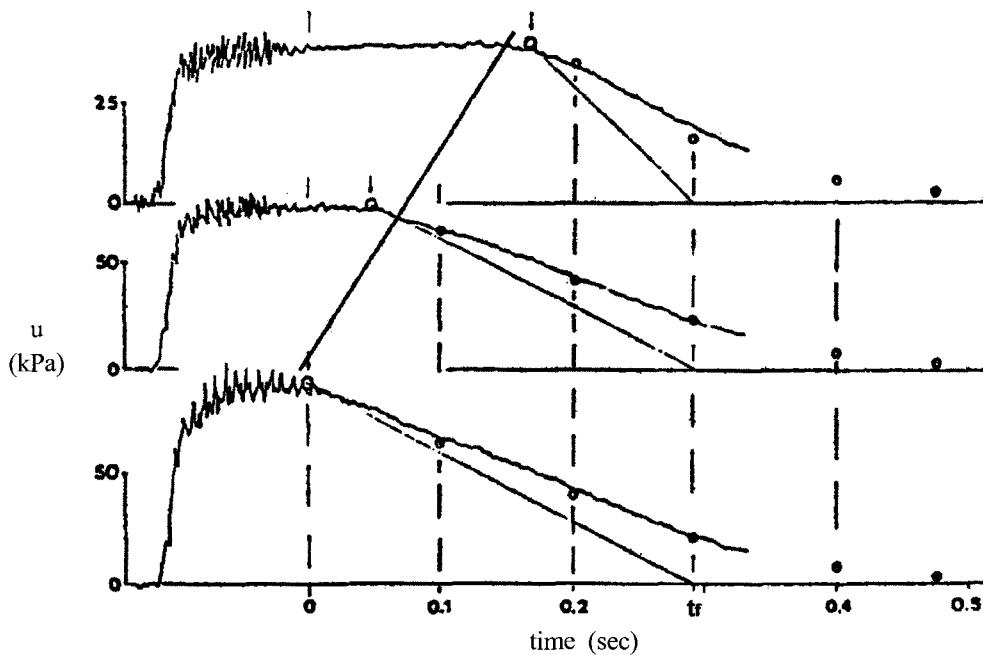


그림 3. 원심모형실험 결과로부터 얻어진 깊이별 과잉간극수압 시간이력(Lambe, 1981)

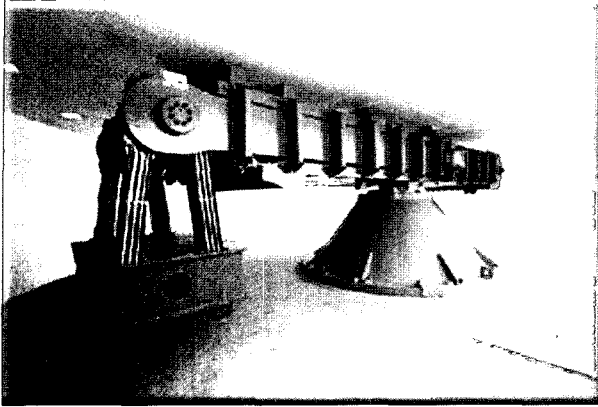


그림 4. Colorado 대학의 대형 원심모형실험 장치

3.2 상사법칙

표 1은 원심가속도가 중력가속도(1-g)의 n배일 때 원심모형실험에 적용되는 상사법칙을 보여준다. 포화된 흙에 대한 원심모형실험을 수행할 때 주의할 것은 물을 간극수로 이용할 경우 입력진동과 관련되는 동적 시간상사비는 n이고 흙의 투수성과 관련되는 소산 시간상사비는 n²으로 시간상사비들이 서로 다르다는 것이다. 시간상사비간의 불일치 문제를 해결하기 위해서는 물보다 점성이 n배 큰 점성유체를 간극수로 이용하여 소산 시간상사비를 n으로 만드는 방법이 이용되고 있다.

표 2는 본 실험에 적용된 상사법칙을 보여준다. 원심

표 1. 원심모형실험에 이용되는 상사법칙(Ko, 1988)

물리량	상사비 (원심가속도 = n-g)
변위	n
시간(동적)	n
시간(소산)	간극수로 물을 이용 : n ² 간극수로 n배 점성유체 이용 : n
속도	1
가속도	n ⁻¹
힘	n ²
진동수	n ⁻¹
응력	1
변형률	1

표 2. 실험에 적용된 상사법칙(원심가속도=40g)

	상사비(원형/모형)	모형	원형
지반두께	40	25cm	10m
진동시간	40	0.25초	10초
입력가속도 진폭	1/40	8g	0.2g
입력가속도 진동수	1/40	40Hz	1Hz

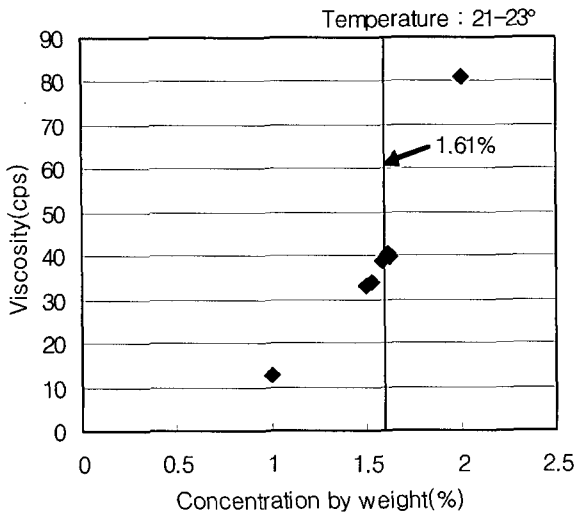
가속도는 40g이며 모형지반의 두께는 25cm이므로, 본 실험에서 모사하는 원지반의 두께는 10m가 된다. 입력 가속도는 sine파형이며 진폭, 진동수, 그리고 지속시간은 원형스케일로 각각 0.2g, 1Hz, 그리고 10초이다.

3.3 간극유체의 선정

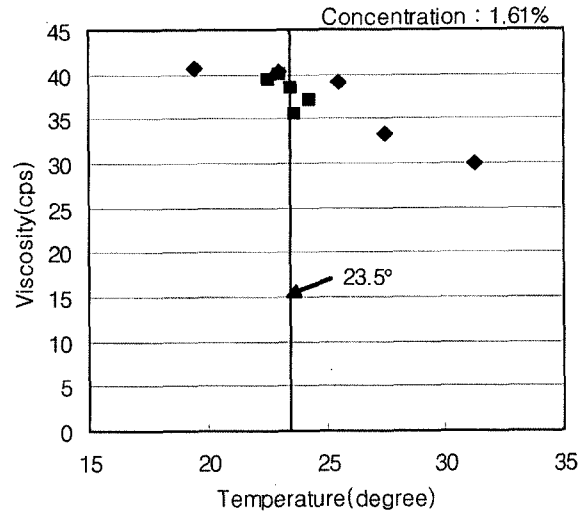
본 실험에서는 점성유체를 사용하여 동적 시간상사비와 소산 시간상사비를 일치시켰다. 일반적으로 원심모형실험에 사용되는 점성유체는 다음의 특성을 가져야 한다.

- ① 물과 동일한 밀도, 압축성, 그리고 화학적 특성을 가져야 한다.
- ② 원심가속도 크기에 맞도록 점성을 잘 조절할 수 있어야 한다.
- ③ 환경적으로 안전해야 한다.
- ④ 시료포화가 쉬워야 한다.
- ⑤ 제작이 쉬워야 하고 가격이 저렴해야 한다.

원심모형실험에 이용되는 점성유체의 경우 예전에는 실리콘 오일(silicone oil) 또는 글리세린-물 혼합물(glycerin and water mixture)을 주로 사용하여 왔다. 그러나, 실리콘 오일의 경우 밀도가 물보다 10% 작고 환경적으로도 유해하며 사용 후 흙으로부터 제거하기 어렵다는 단점이 있다. 글리세린-물 혼합물은 밀도가 실리콘 오일보다도 작다는 단점이 있다. 본 실험에서는 메토로즈(metolose)를 이용하여 점성유체를 제작하였다. 메토로즈의 화학적 명칭은 메틸셀룰로오스(methylcellulose)로서 물에 용해되는 셀룰로오스 매체의 일종이며 흰 분말형태로 되어있다. 메토로즈 분말을 물에 용해시키면 농도에 따라 점성이 증가하게 된다. 메토로즈는 물에 용해되기 때문에 기본적으로 물과 동일한 성질을 가지게 되며 환경적으로도 안전하다. 그림 5는 점성계를 이용하여 메토로즈 용액의 점성을 측정된 결과이다. 그림에서 1cps는 물의 점성을 의미한다. 메토로즈 용액의 점성은 농도가 증가하거나 온도가 감소함에 따라 증가하는 경향을 보여준다. 본 실험에서의 원심가속도는 40g이기 때문에 40cps에 해당하는 농도를 측정된 결과 1.61%로 나타났다. 또한 콜로라도 대학의 원심모형실험 장치는 온도유지장치에 의해 방의 온도가 23.5° 정도로 일정하게 유지되기 때문에 온도변화가 점성에 미치는 영향은 고려하지 않았다.



(a) 농도의 변화



(b) 온도의 변화

그림 5. 메토로즈 용액의 점성 측정 결과

원심모형실험에 이용된 토조의 내부크기는 길이 40.6cm× 폭 21.6cm×높이 34.3cm이며 두께 12.7mm의 알루미늄판을 이용하여 제작하였다. 또한, 진동중 흡과 토조간의 충돌에너지를 흡수하기 위하여 진동방향 토조벽면에 1cm 두께의 코르크판을 부착하였다. 원심모형실험에 이용되는 충격흡수재는 큰 압력에서 부피변형이 작아야 하고, 강성이 토조강성보다는 작아서 충격을 흡수할 수 있어야 하며, 물 속에 설치할 경우 물의 흡수성이 낮아야 한다. 코르크판의 경우 이 모든 조건을 충족시키는 것으로 나타났다.

그림 6은 계측기 배치를 보여준다. 본 실험에서 이용한 계측기는 LVDT, 가속도계, 그리고 간극수압계이다. 본 시험에 이용된 LVDT는 최대 2.54cm 변위를 계측할 수 있으며 지표면 수직침하계측에 사용하였다. 진동중 LVDT의 침하봉이 지표면 아래로 침하되지 않도록 침하봉에 구멍이 뚫린 침하판을 부착하였다. 침하판은 진동중 물에 부유하거나 지반에 근입되지 않도록 실험을

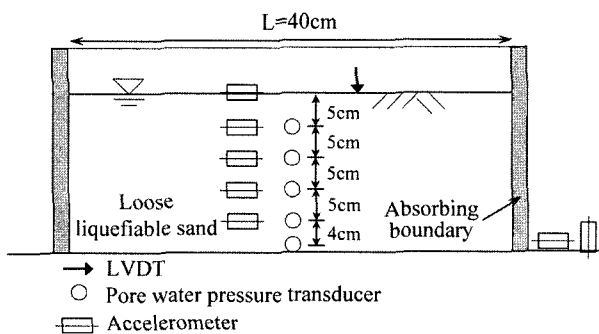


그림 6. 토조내 계측기 배치도

통해 구멍크기와 적합한 무게를 결정하였다. 가속도계는 총 6개를 사용하였는데 2개는 진동대의 수평, 수직가속도를 측정하였고 4개는 지반 내(깊이 : 5cm, 10cm, 15cm, 20cm)에 설치하여 깊이별 가속도를 측정하였다. 간극수압계는 지반내 5개(깊이 : 5cm, 10cm, 15cm, 20cm, 24cm)를 설치하였다. 가속도계는 지름 6mm, 길이 12.5mm, 무게 2gram이고, 간극수압계는 지름 5.8mm, 길이 11.4mm, 무게 2gram의 초소형으로서 계측기의 크기 및 무게에 의한 지반교란영향을 최소화하였다.

실험에 이용한 모래는 주문진 표준사로서 평균 유효입경은 0.57mm, 균등계수는 1.48 그리고 최대 건조밀도(γ_{max})와 최소 건조밀도(γ_{min})는 각각 16.6kN/m³과 13.3kN/m³이다. 모형지반은 메토로즈 용액을 토조에 채운 후 모래를 수증강사하여 느슨하게 조성하였으며 이렇게 조성된 지반의 포화단위중량과 상대밀도는 각각 19.2kN/m³와 49%로 나타났다.

4. 실험결과

원심모형실험에서 얻어진 과잉간극수압, 침하량, 그리고 가속도 측정결과를 분석하였다. 본 절에서 나타낸 결과는 모두 원형스케일로 표시하였다.

4.1 과잉간극수압 반응

그림 7은 간극수압계에서 측정된 각 깊이별 과잉간극수압 시간이력을 보여준다. 과잉간극수압은 진동중 급

격히 증가하여 액상화에 도달한 후 크기가 일정하게 유지되다가 하부에서부터 소산이 시작된다. 침강이론에서는 침강속도가 깊이와 상관없이 일정하다고 가정한다. 그러나, 그림에서 각 깊이별로 견고화 시점을 표시해 본

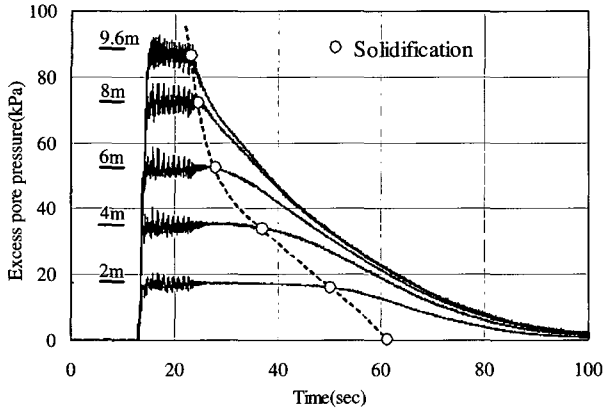


그림 7. 시간에 따른 과잉간극수압 측정결과

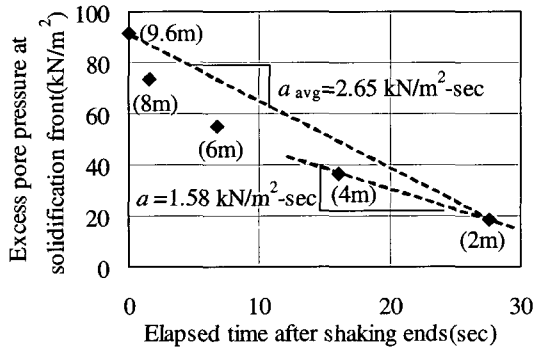
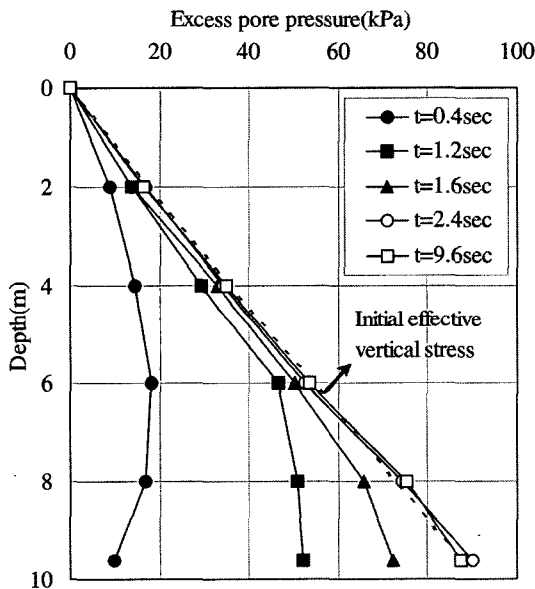


그림 8. 소산속도의 산정

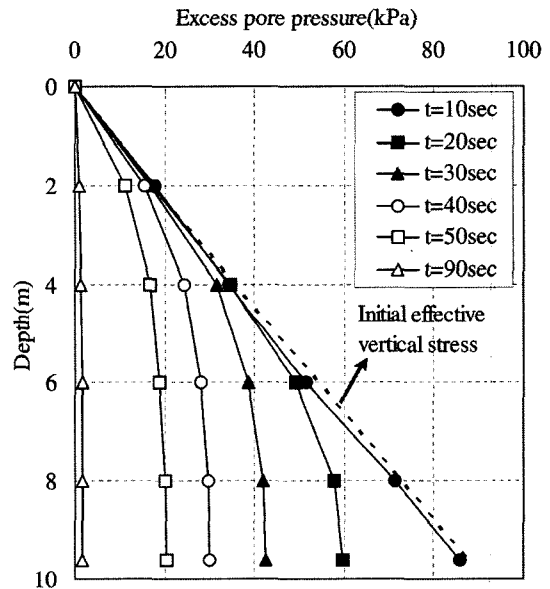
결과 견고층전면의 이동속도는 깊이에 따라 비선형적으로 변화하며 견고층전면은 약 60초에 지표면에 도달하는 것으로 나타났다.

그림 8은 견고층전면에서의 과잉간극수압 크기를 진동이 끝난 후의 경과시간에 대하여 나타낸 것으로 점들을 이은 직선의 기울기는 과잉간극수압 소산속도를 의미한다. 소산속도는 과잉간극수압이 큰 하부에서 빠르며 지표면에 가까워질수록 점차 감소하여 약 4m 깊이 이하에서는 일정한 값에 수렴하였다. 소산속도 a 의 전체깊이에 대한 평균값은 $2.65 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{sec}$ 였지만 지표면 근처에서 수렴된 값은 $1.58 \text{ kN/m}^2 \cdot \text{sec}$ 으로 나타났다. 여기서 얻어진 소산속도 값은 4.4절에서 동적 투수계수를 산정할 때 이용하였다.

그림 9는 깊이에 따른 과잉간극수압 분포도를 액상화 발생과정(그림 9(a))과 소산과정(그림 9(b))으로 나누어 시간경과에 따라 나타낸 것이다. 액상화 발생과정(그림 9(a))을 보면 전체깊이에서 과잉간극수압 크기가 일정하게 증가하여 지표에서부터 과잉간극수압이 지반 유효응력에 도달하므로 액상화 영역은 하부방향으로 전이된다. 진동이 끝난 이후 과잉간극수압 소산은(그림 9(b)) 하부에서부터 발생하기 시작한다. 침강이론에 의하면 특정깊이에서 과잉간극수압이 초기유효응력보다 작아지기 시작할 때 그 깊이 하부의 층이 견고화되었음을 의미한다. 그림을 보면 하부에서부터 입자의 침강이 발생하면서 견고층의 두께가 두꺼워진다. 구속압이 작



(a) 액상화 발생과정



(b) 소산과정

그림 9. 시간경과에 따른 과잉간극수압 분포도

은 1-g 실험의 경우 그림 1에서 본 바와 같이 견고층 내부의 과잉간극수압 크기가 동일한데 비하여 본 실험의 경우 그림 2에 나타난 바와 같이 흙 자중과 압축성 등에 의해 견고층 내부에 추가적인 과잉간극수압이 존재하고 압밀현상에 의해 점차 소산하게 된다. 그러므로, 액상화 후의 과잉간극수압 소산과정은 침강현상과 압밀현상의 복합적 작용결과임을 알 수 있다.

4.2 침하 반응

그림 10은 지표면의 침하 시간이력을 나타낸 것으로

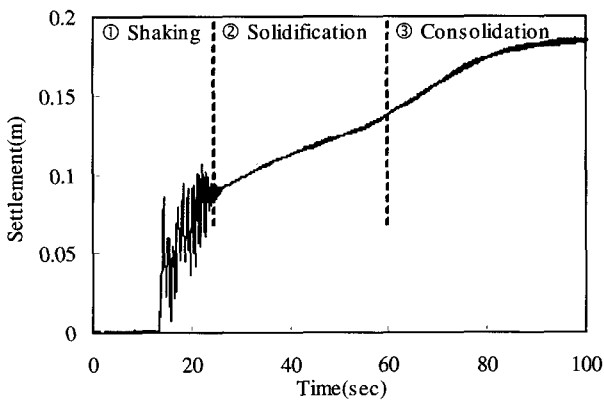
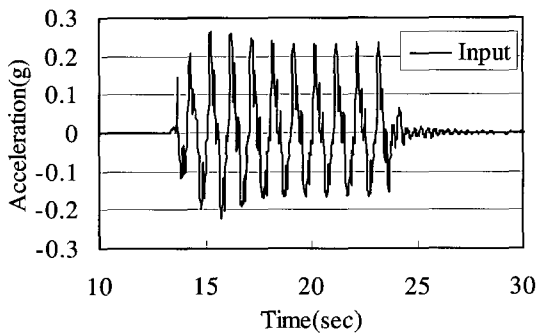


그림 10. 지표면 침하 시간이력

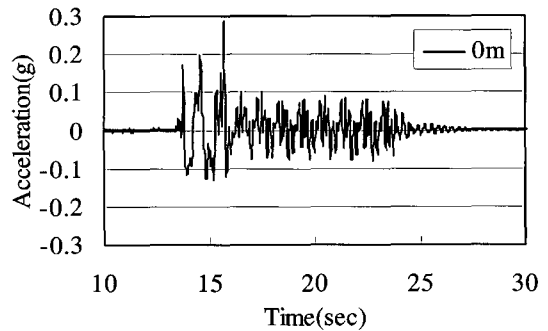
서 최종적으로 약 19cm의 침하량이 발생하였다. 총 침하량을 구성하는 성분은 크게 ① 진동중의 침하, ② 침강에 의한 침하 그리고 ③ 견고층의 압밀에 의한 침하의 3가지로 구분할 수 있다. 진동중의 침하는 진동중 급격하게 발생하며, 침강에 의한 침하는 견고층전면이 하부에서부터 지표면에 도달하기까지 선형적으로 발생한다. 그림 7에서 침강이 완료된 시점으로 판단되는 약 60초 근처에서 침하량의 증가기울기가 약간 증가하면서 견고화된 층에서 압밀침하가 발생한다. 전체 침하에서 각 단계가 차지하는 비율은 진동중의 침하가 약 48%, 침강에 의한 침하가 약 26%, 그리고 압밀에 의한 침하가 약 26%로서 침강이 완료된 이후에도 압밀현상에 의해 큰 침하가 발생하였다.

4.3 가속도 반응

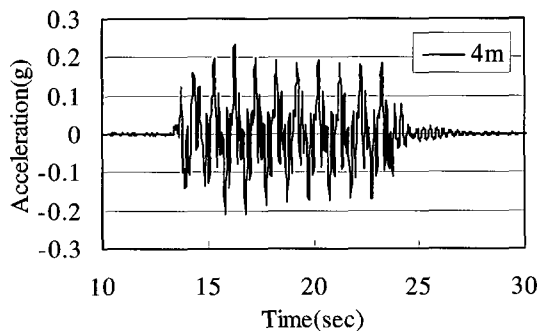
그림 11은 입력가속도와 깊이별 가속도 시간이력을 보여준다. 지표면 가속도를 살펴보면(그림 11(b)) 액상화 발생 후 흙의 강성이 상실되어 진폭이 매우 작아짐을 알 수 있다. 그러나, 4m(그림 11(c))와 8m 깊이(그림 11(d))에서의 결과를 살펴보면 깊이가 깊어지면서 구속압이 증가할수록 액상화 이후의 진폭 감소폭이 작아지



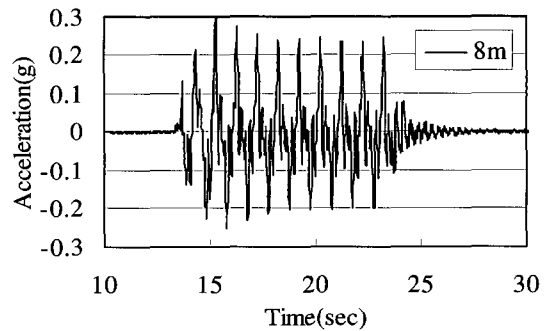
(a) 입력가속도



(b) 지표면



(c) 깊이 4m



(d) 깊이 8m

그림 11. 깊이에 따른 가속도 시간이력

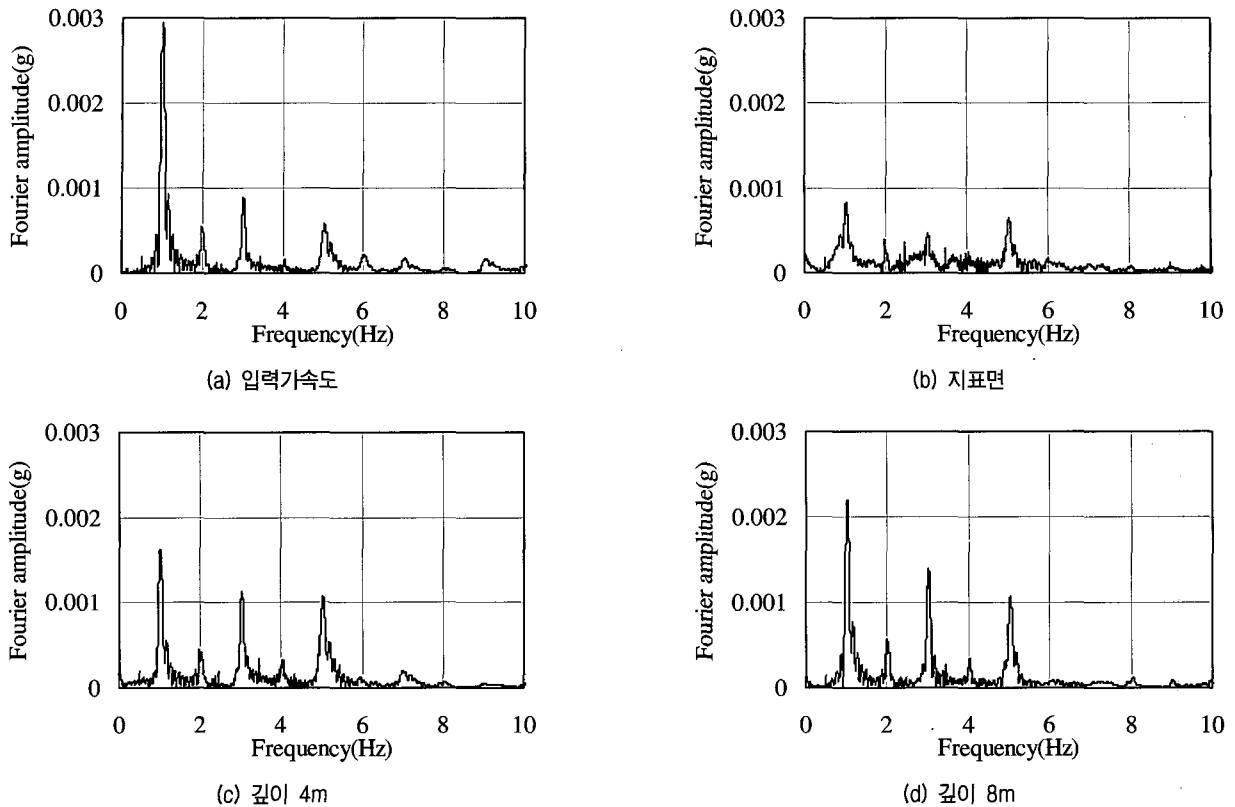


그림 12. 깊이에 따른 가속도 푸리에 스펙트럼 진폭

는 것으로 나타났다. 그림 12는 가속도 푸리에 스펙트럼의 진폭을 보여준다. 입력진동의 주성분인 1Hz 성분의 가속도 진폭은 토조 바닥면에서 지표면에 가까워질수록 점차 감소하지만, 3Hz와 5Hz 성분의 진폭은 토조 바닥면(깊이 8m)에서 커졌다가 지표면에 가까워질수록 점차 감소하였다. 이 현상은 큰 구속압에 의해 강성이 큰 하부깊이에서 고주파수 성분의 크기가 증폭되었기 때문으로 판단된다.

4.4 동적 투수계수의 추정

본 절에서는 침강시의 소산속도를 이용하여 동적 투수계수를 산정한 후 같은 밀도에서의 정적 투수계수와 비교하였다. 동적 투수계수 k_d 는 식 (1)을 변형한 아래의 식을 이용하여 산정하였다. 소산속도 a 값은 그림 8에서 얻어진 값을 적용하였으며 지표면 근처의 수렴된 값 ($=1.58\text{kN/m}^2 \cdot \text{sec}$)을 입력한 경우 $k_d=0.263\text{cm/sec}$ 이며, 평균값($=2.65\text{kN/m}^2 \cdot \text{sec}$)을 적용한 경우 $k_d=0.441\text{cm/sec}$ 로 나타났다.

$$k_d = \frac{\gamma_w (e_1 - e_2) a}{(\gamma')^2 (1 + e_1)}$$

여기서, e_1 : 액상화된 지반의 간극비(지반의 초기간극비=0.79)
 e_2 : 견고화된 지반의 간극비(약 60초 후 침강 종료시점 간극비=0.765)

그림 13은 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 정적 투수계수의 변화를 보여주며 여기서 초기 상대밀도 49%에 해당하는 정적 투수계수 $k_s=0.049\text{cm/sec}$ 이다. 그러므로, 입자 침강시의 동적 투수계수는 지표면 근처 수렴

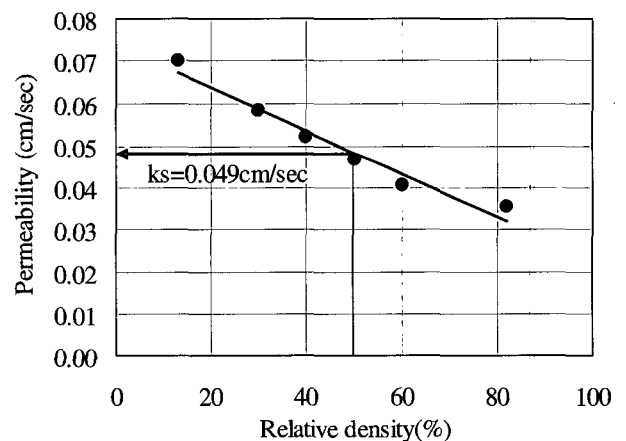


그림 13. 주문진 표준사의 상대밀도에 따른 정적 투수계수의 변화(하익수 등, 2003)

된 소산속도 값을 적용한 경우 정적 투수계수의 약 5배로서, 하익수 등(2003)이 수행한 40cm두께의 액상화 지반에 대한 1-g 진동대 실험결과와 일치한다. 그리고 액상화 지층 전체의 소산속도 평균값을 적용한 경우 동적 투수계수값은 정적 투수계수의 약 9배로 커지는 것으로 나타났다. 즉, 과잉간극수압의 소산속도는 얇은 곳보다 깊은 곳에서 더 크며, 식 (1)로부터 계산되는 동적 투수계수값은 소산속도에 비례하므로 전체깊이에 대한 동적 투수계수의 평균값은 층의 두께에 비례하여 증가할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 실험에서는 수평지반의 액상화 거동을 분석하기 위해 원심모형실험을 수행한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 입자가 침강하여 지반이 견고화되면서 일어나는 과잉간극수압 소산의 속도는 깊이가 깊은 곳에서 크고 지표면에 가까워질수록 비선형적으로 감소하여 지표근처에서는 일정한 값에 수렴하는 경향을 보여 준다.
- (2) 액상화 발생 이후의 과잉간극수압 소산은 입자간의 접촉이 발생하여 일어나는 침강현상과 침강으로 견고화된 지층내의 과잉간극수압이 소산되는 압밀현상 등 복합적인 이유로 발생하는 것을 확인하였다.
- (3) 액상화 지반의 총 침하는 진동에 의한 침하와 액상화후 침강에 의한 침하, 그리고 압밀에 의한 침하 등 3가지로 나눌 수 있으며 전체 침하에서 차지하는 비율은 이 논문에서 수행한 실험의 경우 각각 48%, 26%, 26%로서 침강이 완료된 이후에도 압밀현상에 의해 상당한 침하가 발생하였다.

- (4) 액상화가 발생한 이후 지반내 가속도 진폭의 변화를 살펴보면 구속압이 작은 지표면 근처에서는 가속도 진폭이 크게 감소하였지만 깊이가 깊어지면서 구속압이 증가하면 할수록 가속도 진폭의 감소폭이 작아지는 것으로 나타났다.
- (5) 본 실험조건에서 입자침강시의 동적 투수계수는 정적 투수계수보다 약 9배 컸으며, 동적 투수계수값은 액상화 지층 두께가 커질수록 증가하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국 학술진흥재단의 박사후 해외연구사업 지원(KRF-2004-D00173)에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

1. 하익수, 김명모 (2003), "1-g 진동대시험을 이용한 진동하중을 받는 포화된 모래지반의 투수계수 변화 추정", *한국지반공학회 논문집*, Vol.19, No.6, pp.363-369.
2. Florin, V.A. and Ivanov, P.L. (1961), "Liquefaction of Saturated Sandy Soils", *Proceedings of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 1, 1961, pp.107-111.
3. Ko, H.Y. (1988), "Summary of the state-of-the-art in centrifuge model testing", in W.H. Craig, R.G. James & A.N. Schofield, eds, 'Centrifuges in Soil Mechanics', Balkema, Rotterdam, pp.11-18.
4. Kokusho, T. (1999), "Water Film Effect on Lateral Spreading of Liquefied Sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125, No.10, pp.817-826.
5. Lambe, P.C. (1981), "Dynamic centrifuge modeling of a horizontal sand stratum", Sc. D. Thesis, Dep. of Civil Engineering, Mass. Inst. Technology, Cambridge, Mass. USA.
6. Scott, R.F. (1986), "Solidification and Consolidation of A Liquefied Sand Column", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.4, pp.23-31.
7. Tsurumi, T., Mizumoto, K., and Okada, S. (2000), "Experimental Consideration on the Mechanism of Liquefaction", 12th WCEE, paper No. 2405.

(접수일자 2005. 7. 8, 심사완료일 2005. 9. 29)