

원심력 시험을 이용한 모래지반의 과잉간극수압 소산거동 분석

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

김성렬* · Ko, Hon Yim** · 김명모***

Kim, Sung Ryul · Ko, Hon Yim · Kim, Myoung Mo

1. 서론

국내외에서 액상화 거동 및 액상화 이후의 과잉간극수압 소산 현상과 관련하여 1- g 진동대 실험을 수행하여 심도있게 연구가 수행된 바 있으나 원심력 모형실험으로는 수행된 사례가 적다. 그러므로 본 연구에서는 원심력 모형실험을 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 원심력 실험을 수행하였고, 지반내 과잉간극수압, 지반 가속도, 그리고 지표 침하 등을 측정하여 그 결과를 분석하였다.

2. 액상화 지반의 과잉간극수압 소산연구

액상화 지반의 과잉간극수압 소산과 관련하여 많은 학자들이 연구하여 왔으나 1- g 진동대 실험을 수행하여 원지반의 높은 구속압이 액상화 거동에 미치는 영향을 분석하지 못하거나(Kokusho, 1999; Tsurumi 등, 2000; 하익수 등, 2003), 원심력 모형실험에서도 소산과정과 깊이별 과잉간극수압 분포를 정밀하게 분석하지 못하였다(Lamb 1981; Scott, 1986).

Florin과 Ivanov(1961)는 1- g 하에서 충격하중시험과 진동시험을 수행하여 액상화 지반의 과잉간극수압 소산과 침하를 모델링할 수 있는 침강이론(theory of sinking sand grains)을 제안하였다. 진동이 끝나면 하부영역에서부터 흡입자들이 침강하면서 서로 접촉을 하게 되고 과잉간극수압이 감소하기 시작한다. 액상화가 유지되는 상부영역과 침강에 의해 견고화된 하부영역의 경계면을 견고충전면(solidification front)이라고 하며 견고충전면은 과잉간극수압의 소산이 진행됨에 따라 하부에서부터 지표면으로 이동하게 된다. Florin과 Ivanov는 액상화 이후의 과잉간극수압 소산속도 a 를 식 (1)과 같이 정의하였다. 이 식의 입력값은 액상화된 지반의 간극비 e_1 , 견고화된 지반의 간극비 e_2 , 물 단위중량 γ_w , 수중단위중량 γ'_w , 액상화 지반의 투수계수 k 이다.

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

하익수 등(2003)은 1- g 진동대 실험을 수행한 후 식 (1)을 이용하여 액상화 이후의 동적 투수계수를 추정하였는데, 동적 투수계수는 흙의 입도분포에 따라 정적 투수계수의 1.4~5 배 증가하며 주문진 표준사의 경우 이 비율이 5배 정도라고 제시하였다.

3. 원심력 모형실험 계획

표 1은 본 실험에 적용된 상사법칙을 보여준다. 원심가속도는 40 g 이며 모형지반의 두께는 25 cm이므로, 본 실험에서 모사하는 원지반의 두께는 10 m가 된다. 입력가속도는 sin파형이며 진폭, 진동수, 그리고 지속시

*정회원 · 동아대학교 토목해양공학부 전임강사 · 공학박사 · E-mail:sungryul@dau.ac.kr - 발표자

**University of Colorado at Boulder, 토목, 건축, 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail:ko@colorado.edu

***정회원 · 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수 · 공학박사 · E-mail:geotech@snu.ac.kr

간은 원형스케일로 각각 0.2 g 1 Hz, 그리고 10 초이다. 본 실험에서는 물보다 40배 점성이 큰 점성유체를 사용하여 동적 시간상사비와 소산 시간상사비를 일치시켰다.

표 2. 실험에 적용된 상사법칙(원심가속도 = 40 g)

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

원심력 모형실험에 이용된 토조의 내부크기는 길이 40.6 cm×폭 21.6 cm×높이 34.3 cm이며 두께 12.7 mm의 알루미늄 판을 이용하여 제작하였다. 또한, 진동중 흡과 토조간의 충돌에너지를 흡수하기 위하여 진동 방향 토조벽면에 1 cm 두께의 코르크판을 부착하였다. 그림 1은 계측기 배치를 보여준다. 본 실험에서 이용한 계측기는 LVDT, 가속도계, 그리고 간극수압계이다. 가속도계는 총 6개를 사용하였는데 2개는 진동대의 수평, 수직가속도를 측정하였고 4개는 지반 내(깊이 : 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm)에 설치하여 깊이별 가속도를 측정하였다. 간극수압계는 지반내 5개(깊이 : 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 24 cm)를 설치하였다.

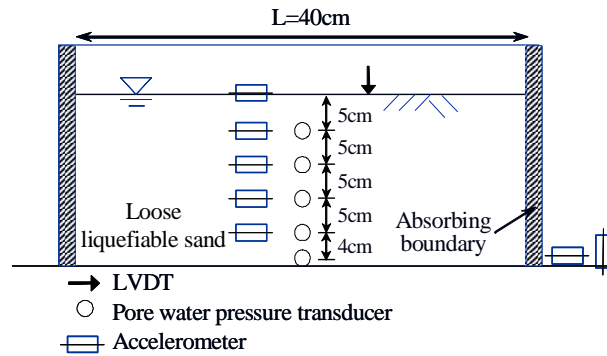


그림 1. 토조내 계측기 배치도

실험에 이용한 모래는 주문진 표준사로서 평균 유효입경은 0.57 mm, 균등계수는 1.48 그리고 최대 건조 밀도(γ_{max})와 최소 건조밀도(γ_{min})는 각각 16.6 kN/m³과 13.3 kN/m³이다. 모형지반의 포화단위중량과 상대밀도는 각각 19.2 kN/m³ 와 49 %로 나타났다.

4. 실험결과

4.1 과잉간극수압 반응

그림 2는 간극수압계에서 측정된 과잉간극수압 시간이력(그림 2(a))와 소산과정에서의 깊이별 분포도(그림 2(b))를 보여준다. 그림에서 각 깊이별로 견고화 시점을 표시해 본 결과(그림 2(a)) 견고층전면의 이동속도는 깊이에 따라 비선형적으로 변화하며 견고층전면은 약 60 초에 지표면에 도달하는 것으로 나타났다. 액상화 발생과정을 보면 전체깊이에서 과잉간극수압 크기가 일정하게 증가하여 지표에서부터 과잉간극수압이 지반 유효응력에 도달하므로 액상화 영역은 하부방향으로 전이된다. 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 진동이 끝난 이후 과잉간극수압 소산은 하부에서부터 발생하기 시작하며, 흙 자중과 압축성 등에 의해 견고층 내부에 추가적인 과잉간극수압이 존재하다가 압밀현상에 의해 점차 소산하게 된다. 그러므로, 액상화 후의 과잉간극수압 소산과정은 침강현상과 압밀현상의 복합적 작용결과임을 알 수 있다. 그림 3은 견고층전면에서의 과잉간극수압 크기를 진동이 끝난 후의 경과시간에 대하여 나타낸 것으로 점들을 이은 직선의 기울기는 과잉간극수압 소산속도를 의미한다. 소산속도는 과잉간극수압이 큰 하부에서 빠르게 지표면에 가까워질수록 점차 감소하여 약 4 m 깊이 이하에서는 일정한 값에 수렴하였다. 소산속도 α 의 전체깊이에 대한 평균값은 2.65 kN/m²·sec 였지만 지표면 근처에서 수렴된 값은 1.58 kN/m²·sec 으로 나타났다.

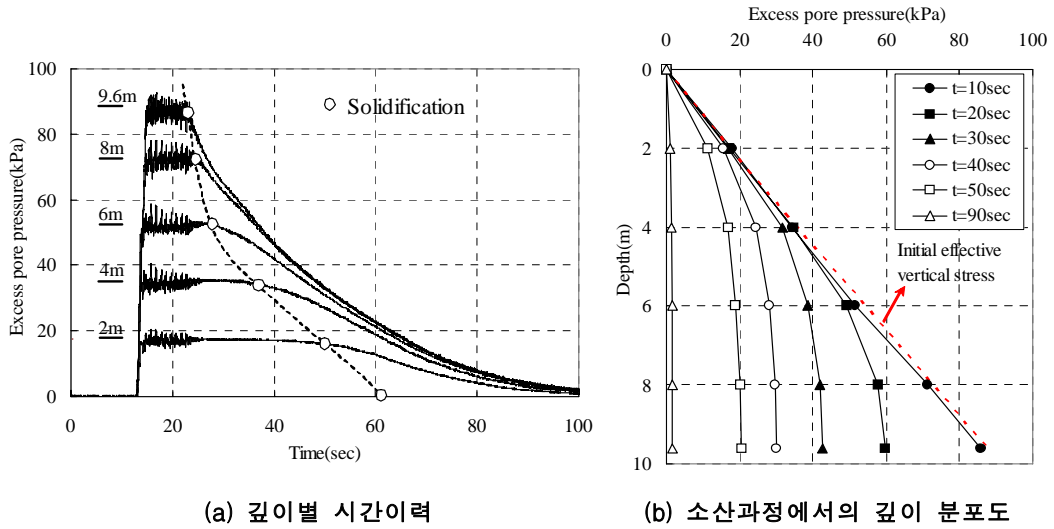


그림 2. 과잉간극수압 측정결과

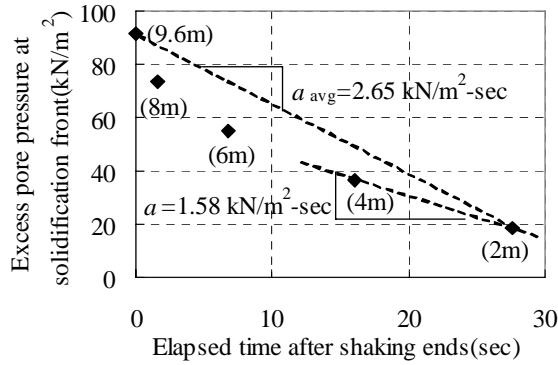


그림 3. 소산속도의 산정

4.2 침하 반응

그림 4는 지표면의 침하 시간이력을 나타낸 것으로서 최종적으로 약 19 cm의 침하량이 발생하였다. 총 침하량은 ① 진동중의 침하, ② 침강에 의한 침하 그리고 ③ 견고층의 압밀에 의한 침하의 3가지로 구분할 수 있으며, 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.

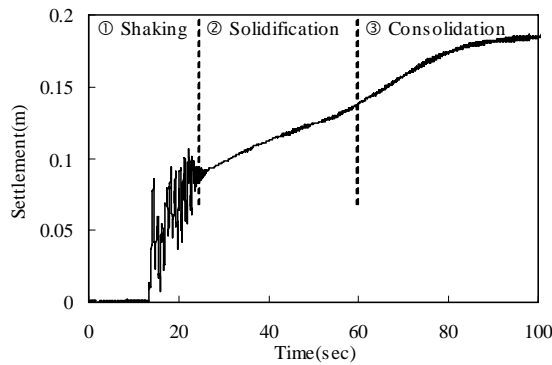


그림 4. 지표면 침하 시간이력

4.4 동적 투수계수의 추정

동적 투수계수 k_d 는 식 (1)을 변형한 아래의 식을 이용하여 산정하였다. 소산속도 a 값은 그림 3에서 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. 이 식에서, e_1 은 액상화된 지반의 간극비(지반의 초기 간극비= 0.79)이며, e_2 는 견고화된 지반의 간극비(약 60초 후 침강 종료시점 간극비=0.765)이다.

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

주문진 표준사의 상대밀도에 따른 정적 투수계수의 변화에서(하익수 등, 2003), 초기 상대밀도 49 %에 해당하는 정적 투수계수 $k_s=0.049 \text{ cm/sec}$ 이다. 그러므로, 입자 침강시의 동적 투수계수는 지표면 근처 수렴된 소산속도 값을 적용한 경우 정적 투수계수의 약 5배로서, 하익수 등(2003)이 수행한 40 cm두께의 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

- 1) 입자가 침강하여 지반이 견고화되면서 일어나는 과잉간극수압 소산의 속도는 깊이가 깊은 곳에서 크고 지표면에 가까워질수록 비선형적으로 감소하여 지표면 근처에서는 일정한 값에 수렴하는 경향을 보여준다.
- 2) 액상화 발생 이후의 과잉간극수압 소산은 입자간의 접촉이 발생하여 일어나는 침강현상과 침강으로 견고화된 지층내의 과잉간극수압이 소산되는 압밀현상 등 복합적인 이유로 발생한다.
- 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) 본 실험조건에서 입자침강시의 동적 투수계수는 정적 투수계수보다 약 9배 컸으며, 동적 투수계수값은 액상화 지층 두께가 커질수록 증가하는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2004년도 한국 학술진흥재단의 박사후 해외연구사업 지원(KRF-2004-D00173)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

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. 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.
4. 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.
5. Scott, R.F., (1986), "Solidification and Consolidation of A Liquefied Sand Column," Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.23-31.
6. Tsurumi, T., Mizumoto, K., and Okada, S. (2000), "Experimental Consideration on the Mechanism of Liquefaction," 12th WCEE, paper No. 2405.