

액상화 지반의 과잉간극수압 소산 모델링

Modeling of Dissipation of Excess Pore Pressure in Liquefied Sand Grounds

김성렬* 황재익** Ko, Hon-Yim*** 김명모****
Kim, SungRyul Hwang, Jae-Ik Ko, Hon-Yim Kim, MyoungMo

ABSTRACT

Recently, many researches on the dissipation of excess pore pressure in liquefied sand grounds have been performed to evaluate post-liquefaction behaviors of structures. In this paper, centrifuge tests were performed to simulate liquefaction behaviors of prototype soil. The evaluation model of solidified layer thickness was developed to simulate non-linear variation of solidified layer thickness with time. Also, the dissipation of excess pore pressure in liquefied sand was evaluated by applying the solidification theory and the consolidation theory. The developed model gives a good estimation of the solidified layer thickness and the time history of excess pore pressure.

1. 서론

지금까지의 액상화 연구는 대부분 액상화 발생가능성 및 액상화 발생이 지반 및 구조물에 미치는 영향 등에 대하여 연구되어 왔다. 그러나, 최근 성능에 기초한 설계개념(performance-based design)이 도입되면서 액상화 이후의 거동에 대하여도 관심이 높아지고 있다.

액상화 현상은 기본적으로 지반 내의 과잉간극수압 크기에 지배된다. 그러므로, 액상화 이후의 거동을 연구하려면 진동이 끝난 후 과잉간극수압 소산거동을 정확히 예측하는 것이 필수적이다. 현재까지 여러 연구자들이 소형토조를 이용한 모형실험을 수행하여 액상화된 지반내 과잉간극수압 소산과정을 분석하거나 흙의 입도분포가 과잉간극수압 소산특성에 미치는 영향을 연구하였다. (Florin과 Ivanov, 1961; Kokusho 등, 1999; 하익수 등, 2003).

본 연구에서는 실제지반의 응력-변형률 거동을 재현할 수 있는 원심모형실험을 수행하여 액상화 지반의 과잉간극수압 소산거동을 분석하고 이를 바탕으로 과잉간극수압 소산예측 모델을 개발하고자 한다.

* 정회원 · 동아대학교 토목공학부 전임강사
** 정회원 · 미국 버클리대학교 토목환경공학과 박사후 연구원
*** University of Colorado, Boulder, Colorado, USA
**** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

2. 액상화 지반의 과잉간극수압 소산 모델링

2.1 기존의 연구

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. 그림 1은 충격하중에 의해 전 깊이에 액상화가 발생한 이후의 과잉간극수압 소산거동을 보여준다. 진동이 끝나면 하부영역에서부터 흙입자들이 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.

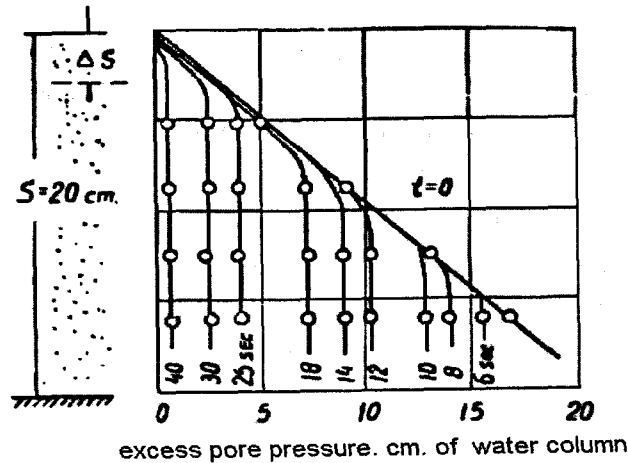


그림 1. 충격시험에 의한 과잉간극수압 발생과 소산거동(Florin과 Ivanov, 1961)

지반 구속압이 작아서 견고화된 층의 압축성의 영향이 작다면 그림 1에서 보인 바와 같이 견고층 내부의 과잉간극수압 크기는 동일할 수 있지만, 지반 구속압이 크다면 그림 2에 보인 것처럼 견고층이 형성된 후 자중압밀의 개념처럼 견고층의 자중과 압축성에 의해 추가적인 과잉간극수압($\overline{A'C'}$)이 토층 내에 존재한다. 흙은 투수계수가 유한하고 압축성을 지니고 있으므로 액상화 이후 견고화된 층의 흙자중과 압축성 등에 의해 견고층 내부에 추가적인 과잉간극수압이 존재할 수 있다. Scott(1986)는 액상화된 층의 과잉간극수압 소산을 모델링하기 위해 침강이론과 고전압밀이론을 복합한 이론을 제안하였으며 수평지반에 대한 원심모형실험 결과와 비교하여 제안된 모델의 유효성을 검증하였다. 그림 2는 견고층전면이 깊이 H에 도달하였을 때의 과잉간극수압 분포를 보여준다. 그러나, 그는 소산속도가 전 깊이에 일정하다고 가정하였고 전체 과잉간극수압 소산과정과 깊이별 과잉간극수압 분포를 정확하게 예측하지 못하여 압밀에 의한 소산과정을 정밀하게

분석하지 못하였다.

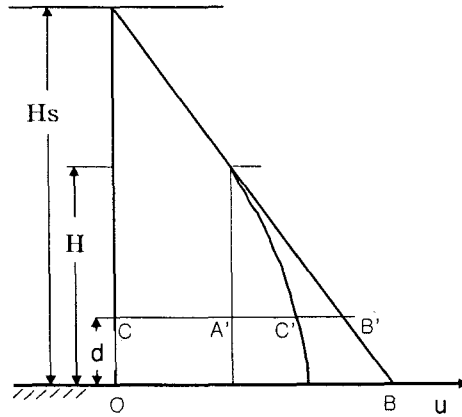


그림 2. 견고층의 압축성이 존재할 때의 과잉간극수압 분포도(Scott, 1986)

2.2 제안된 모델

1) 견고층 두께 증가모델

지금까지의 침강이론은 견고층의 두께 증가속도가 깊이에 따라 일정한 것으로 가정하였다. 그러나, 본 연구에서 원심모형실험을 분석해 본 결과 그림 3과 같이 견고층의 두께 증가속도는 지반의 구속압 크기에 따라 다른 것으로 나타났다(김성렬 등, 2006). 즉, 깊이가 깊은 곳에서는 견고층 두께 증가속도가 빠르고 깊이가 얕아질수록 견고층 증가속도가 점점 느려지는 것으로 나타났다. 그러므로, 본 논문에서는 비선형적인 견고층 두께증가 속도를 고려하기 위해 hyperbolic 모델을 바탕으로 식 (1)을 제안하였다.

$$H = \frac{t}{a + b \cdot t} + c \cdot t \quad (1)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{a}{(a + bt)^2} + c; t=0 \text{ 이면 } \frac{dH}{dt} = \frac{1}{a} + c, t=\infty \text{ 면 } \frac{dH}{dt} = c \quad (2)$$

여기서, H : 바닥면으로부터 견고층의 두께

a, b : 바닥에서의 초기 견고층 증가속도를 나타내는 계수

c : 지표면에서의 최종 견고층 증가속도를 나타내는 계수

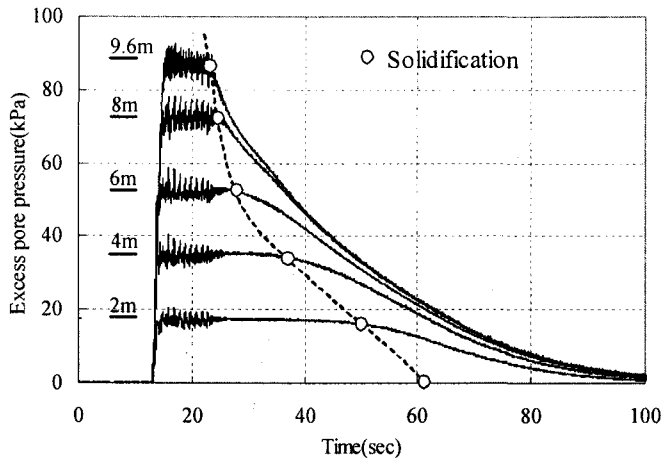


그림 3. 깊이에 따른 견고화 시점의 변화(J-sand)

2) 과잉간극수압 소산모델

Scott(1986)가 제안한 방법을 적용하여 고전압밀이론과 침강이론을 함께 적용하여 과잉간극수압 소산을 모델링하였다. 그림 2에서 견고층전면이 바닥면으로부터 높이 H에 도달하였을 때 높이 d 위치에서의 과잉간극수압 u는 식 (3)과 나타낼 수 있다.

$$u = CA' + A'C' = \gamma'(H_s - H) + u_G \quad (3)$$

여기서, CA' = 견고층전면에서의 과잉간극수압 = $\gamma'(H_s - H)$

γ' = 흙의 수중단위중량

$A'C'$ = 견고층 내부의 압밀현상에 의한 추가 과잉간극수압 = u_G

견고층 내부의 추가적인 과잉간극수압 u_G 는 견고층의 두께가 점차 증가하고 견고층 내부의 과잉간극수압이 흙의 유한한 투수계수와 압축성 때문에 완전히 소산하지 못하기 때문에 발생한다. 이것은 시간에 따라 두께가 점차 증가하는 점토층의 압밀현상과 동일하다. Gibson(1958)은 이러한 현상을 모사하기 위해 식 (4)와 같은 압밀 지배방정식을 제안하였다.

$$c_v \frac{\partial^2 u_G}{\partial z^2} = \frac{\partial u_G}{\partial t} - \gamma' \frac{dH}{dt} \quad (4)$$

여기서, c_v = 압밀계수

Scott는 견고층두께의 증가속도 $\frac{dH}{dt}$ 가 일정하다고 가정하였으므로 이 경우에 대하여 Gibson이 제안한 이론해를 적용하여 u_G 를 산정하였다. 그러나, 본 논문에서 제시한 식 (1) 및 식 (2)와 같이 층두께 증가속도가 비선형적으로 변하면 이론적인 해를 산정할 수 없으므로 수치해석적 기법을 적용하여 식 (4)를 풀어야 한다. 그러므로, 본 연구에서는 식 (5)의 유한차분식을 적용하여 u_G

를 산정하였다. 이 식에서 시간 t 에서의 u_G 를 산정하면 시간 $t+dt$ 에서의 u_G 값을 알 수 있다.

$$u_G(z,t+dt) = u_G(z,t) + \beta (u_G(z+dz,t) + u_G(z-dz,t) - 2 u_G(z,t)) + \gamma' dH \quad (5)$$

여기서, $\beta = c_v dt / (dz)^2$

dH : 시간 dt 동안 증가되는 총두께

3. 원심모형실험 개요

원심모형실험은 University of Colorado at Boulder에 있는 400 g-ton의 원심모형실험기를 이용하여 수행하였다. 원심모형실험의 기하학적 상사비는 40으로 10m 깊이의 원형지반을 1/40로 축소 한 25cm의 모형지반에 대해 40g의 원심가속도를 가하였다. 원심모형실험에 이용된 토조는 크기가 가로 41cm, 세로 22cm, 그리고 높이 34cm이다. 입력 가속도는 원형크기로 볼 때 크기가 0.2g, 진동수가 1Hz, 그리고 지속시간이 10초인 사인파를 사용하였다. 그림 4는 원심모형실험 단면과 설치된 계측기 배치를 보여준다. 그림 5는 실험에 사용된 4가지 모래(J-sand, I-sand, U-sand, N-sand)의 입도분포 곡선을 보여준다. 각 모래에 대하여 진동을 5번 가하여 상대밀도 변화에 따른 거동특성을 분석하였다. 간극수는 점성유체를 사용하여 진동중의 동적 시간상사비와 소산 시간상사비를 일치시켜 원형지반의 과잉간극수압 거동을 재현하였다.

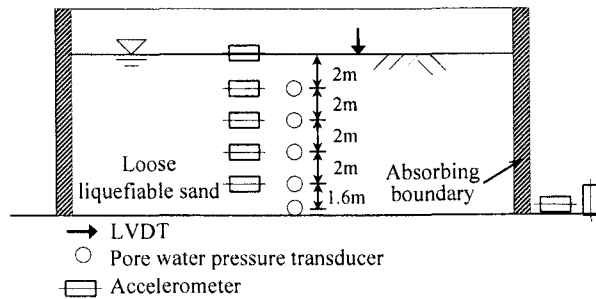
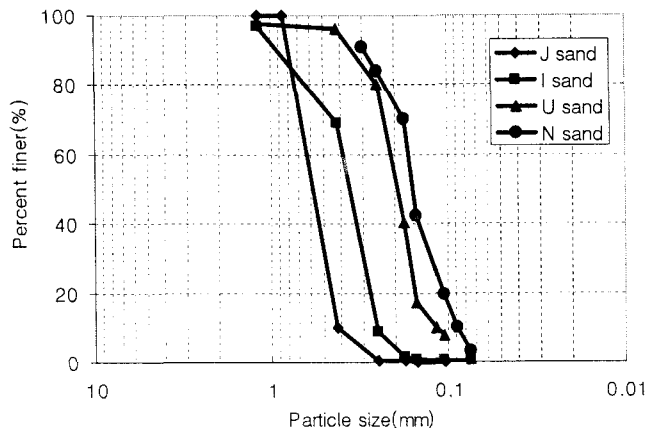


그림 4. 원형크기로 환산된 실험 단면과 설치된 계측기(원형 크기)



4. 개발모델의 적용결과

4.1 견고층 두께 증가속도

원심모형실험 결과로부터 시간에 따른 견고층 두께 증가속도 자료를 얻은 후 이 값을 모사할 수 있는 a, b, c 값들을 결정하였다. 변수 c값은 지표면에서의 최종적인 견고층 두께 증가속도이므로 그림 6에서 보는 바와 같이 지표면에서의 측정된 두께증가속도를 입력하였고, 변수 a, b값은 측정된 곡선과 예측곡선이 가장 근접할 때의 값으로 결정하였다. 그림 6은 견고층 두께의 측정값과 예측값을 비교한 것으로 변수값들을 적절히 선택할 경우 견고층 두께증가를 정확하게 예측할 수 있었다.

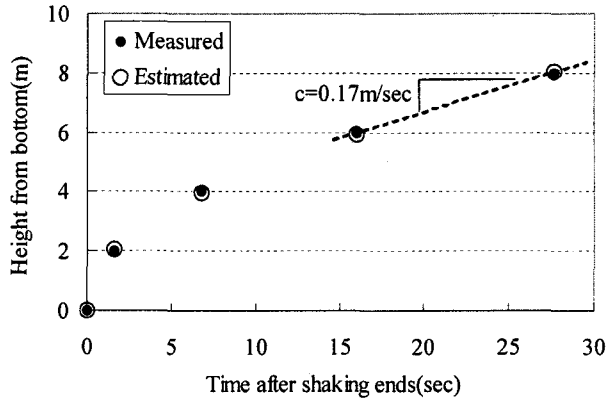


그림 6. 견고층 두께증가 예측(J-sand, 9.6m, a=0.44 sec/m, b=0.29 1/m, c=0.17 m/sec)

4.2 과잉간극수압 소산

그림 7은 진동이 끝난 후의 과잉간극수압 소산을 모사하기 위하여 압밀계수 c_v 값을 결정한 결과 $c_v = 2 \text{ m}^2/\text{sec}$ 인 경우 측정된 과잉간극수압을 정확하게 모사할 수 있었다. 그림 8~10은 각 깊이에서의 과잉간극수압 소산 시간이력의 측정값과 예측값을 비교하였다. 깊은 곳의 과잉간극수압은 정확히 예측할 수 있었지만(그림 8, 그림 9) 지표 근처에서는 약간의 오차가 발생하였다. 이것은 압밀계수값을 전 깊이에 대하여 일정하게 가정하는 등 고전압밀이론의 한계 때문에 발생한 것으로 판단된다.

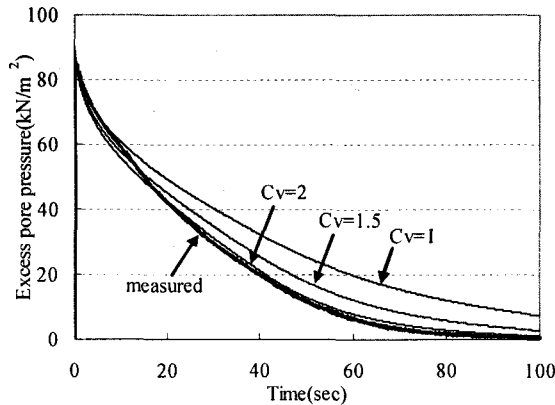


그림 7. 압밀계수 추정(J-sand, 깊이=9.6m, a=0.44 sec/m, b=0.29 1/m, c=0.17 m/sec)

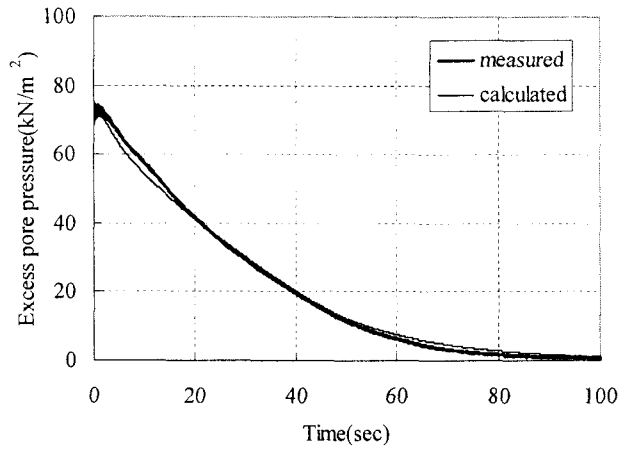


그림 8. 과잉간극수압 예측(J-sand, 깊이=8.0m)

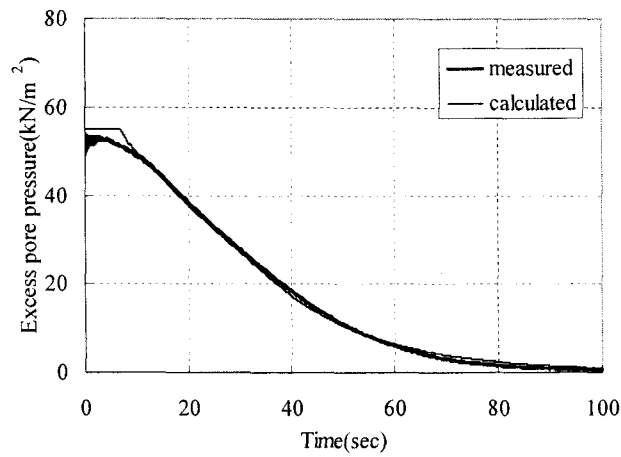


그림 9. 과잉간극수압 예측(J-sand, 깊이=6.0m)

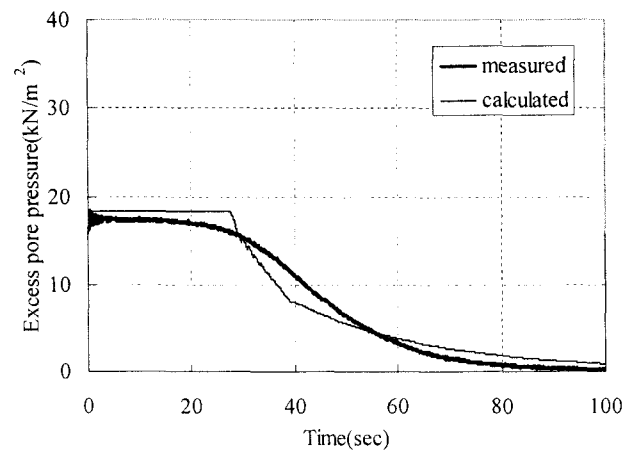


그림 10. 과잉간극수압 예측(J-sand, 깊이=2.0m)

5. 결론

본 연구에서는 실제지반의 응력-변형률 거동을 재현할 수 있는 원심모형실험을 수행하여 액상화된 지반의 과잉간극수압 소산거동을 분석하고 과잉간극수압 소산예측 모델을 개발하였다. 본 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 견고층의 두께증가속도는 깊이가 깊은 곳에는 빠르고 지표에 가까워질수록 느려지는 것으로 나타났다. 그러므로, 이러한 견고층 두께 증가속도를 예측하기 위해 hyperbolic 모델을 바탕으로 견고층 두께 예측식을 제안하였다.
- 2) 과잉간극수압 소산을 묘사하기 위해 압밀이론과 침강이론을 함께 적용하였다. 기존의 방법은 견고층 두께증가속도를 일정하다고 가정하였으나, 본 연구에서는 비선형 모델을 적용한 후 유한차분법을 통해 압밀방정식의 해를 산정하였다.
- 3) 본 연구에서 제안된 모델들을 적용한 결과 견고층 두께증가 및 과잉간극수압 소산시간이력을 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2005년도 한국 학술진흥재단의 신진교수 연구사업(KRF-2005-D00389)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. 김성렬, Ko, Hon-Yim, 김명모(2006), "원심모형실험을 이용한 액상화 모래지반의 과잉간극수압 소산거동 분석", 한국지반공학회지, 2006년 1월, Vol.22, No.1, pp. 53-61.
2. 하익수, 김명모 (2003), "1-g 진동대시험을 이용한 진동하중을 받는 포화된 모래지반의 투수계수 변화 추정", 한국지반공학회 논문집, Vol.19, No.6, pp. 363-369.
3. 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.
4. Gibson, R.E. (1958), "The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time," Geotechnique, 18, pp.171-182.
5. 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.
6. Scott, R.F., (1986), "Solidification and Consolidation of A Liquefied Sand Column," Soils and Foundations, Vol.26, No.4, pp.23-31.