

액상화 지반에 대한 1-g 모형실험과 원심모형실험의 비교 연구 Comparison of 1-g and Centrifuge Model Tests on Liquefied Sand Grounds

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

ABSTRACT

The centrifuge and 1-g shaking table tests were performed simultaneously to compare the dynamic behaviors of loose sands of same geotechnical properties. The prototype soils were 10 m thick liquefiable loose sands. The geometric scaling factors were 20 for 1-g and 40 for centrifuge tests. The excess pore pressure, surface settlement, and acceleration in the soil were measured at the same locations in the 1-g and centrifuge tests. The total excess pore pressure from development to dissipation was measured. In the centrifuge test, viscous fluid was used as the pore water to eliminate the time scaling difference between dynamic time and dissipation time. In the 1-g tests, the steady state concept was applied to determine the unit weight of the model soil, and two different time scaling factors were applied for the dynamic time and the dissipation time. It is concluded that the 1-g tests can simulate the excess pore pressure of the prototype soil if the permeability of the model soil is small enough to prevent dissipation of excess pore pressure during shaking and the dissipation time scaling factor is properly determined.

1. 서론

지반공학적 동적 문제들을 해결하기 위해 많은 연구자들이 1-g 진동대 모형실험을 수행하여 왔다. 그러나, 이러한 실험들은 대기압 (1-g) 하에서 작은 크기의 모형을 이용하여 수행되기 때문에 원형 구조물의 정량적인 거동을 모사하는 것은 어렵다. 원형과 모형의 이러한 크기차이를 극복하기 위하여 1-g 진동대 모형실험을 위한 상사법칙이 제안되었지만(Iai, 1989; Iai와 Sugano, 1999) 아직까지 그 유효성이 완전히 검증되지 않은 상태이다.

Gibson(1997)은 1-g 모형실험을 위한 상사법칙의 유효성을 검증하기 위하여 액상화 발생 가능

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

한 모래지반에 대해 1-g 모형실험을 수행하여 그 결과를 VELACS 프로젝트(Hushmand et al., 1997)의 원심모형실험의 결과와 비교하였다. 그는 1-g 모형 실험의 모형지반의 단위중량을 결정하기 위하여 정상상태개념을 적용하였다. 그러나, 인용된 원심모형실험은 점성유체를 사용하지 않아 원지반의 과잉간극수압 거동을 재현하지 못하였고, 과잉간극수압의 발생과 소산 등의 전체과정 또한 예측하지 못하였다.

본 연구에서는 1-g 모형실험에 이용되어왔던 상사법칙(Iai, 1989; Iai와 Sugano, 1999)을 보완·향상시키기 위해 정상상태개념과 두 가지 시간상사비(진동 중: 동적 시간상사비, 진동 종료 후: 소산 시간상사비)를 적용하였다. 10m 깊이의 액상화 발생 가능한 느슨한 사질토 포화 지반을 원형지반으로 가정하였다. 1-g 모형실험은 기하학적 상사비=20을 적용하여 50cm 두께의 지반, 원심모형실험은 기하학적 상사비=40을 적용하여 25cm 두께의 지반을 제작하였다. 입도분포 특성이 다른 세 가지 모래를 사용하여 모래의 입도 특성이 지반의 거동에 미치는 영향을 살펴보았다. 원심모형실험의 결과를 원형지반의 거동으로 가정하고, 이를 1-g 모형실험의 결과와 비교하여 1-g 모형실험에 적용된 상사법칙의 유효성을 검증하였다.

2. 1-g 모형실험을 위한 상사법칙

2.1 정상상태개념

상태변수 ψ 는 흙의 초기 간극비 e 에서 그 흙의 유효구속압에 해당하는 정상상태선상에 있는 간극비 e_{ss} 를 빼 값으로 식 (1)과 같이 정의된다. Castro (1969) 에 의해 발견된 정상상태선은 한계상태선과 평행하며 약간 밑에 존재하지만 일반적으로 한계상태선과 동일하게 취급된다. 정상상태개념이란 유효구속압이 서로 다른 두 흙에 대해 상태변수가 서로 같으면 두 흙은 서로 같은 거동을 보인다는 것이다. 1-g 모형실험에서 모형지반의 상태변수가 원심모형실험의 상태변수와 같다면 구속압의 차이에도 불구하고 두 개의 모형지반은 동일한 거동을 보일 것으로 예상할 수 있다.

$$\psi = e - e_{ss} \quad (1)$$

여기서, e =초기간극비, e_{ss} = 흙의 유효구속압에 해당하는 정상상태선에서의 간극비

2.2 소산시간에 대한 상사비

시간에 대한 상사비는 진동 중 동적시간에 대한 동적 시간상사비와 진동 후 과잉간극수압 소산 시간에 대한 소산 시간상사비로 나눌 수 있다. 동적 시간상사비는 동적 평형방정식으로부터 유도되었기 때문에 진동 중에만 적용할 수 있으며, 소산 시간상사비는 진동 후 과잉간극수압 소산을 모사하기 위해 사용할 수 있다. 본 연구에서는 1-g 모형실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 소산결과를 비교하여 소산 시간상사비를 실험적으로 평가하였다.

3. 모형실험

3.1 개요

본 연구를 수행한 순서는 다음과 같다.

- ① 원심모형실험을 수행하여 원형지반의 거동을 구한다.
- ② 사용 모래에 대해 삼축실험을 수행하여 이들의 정상상태선을 구한다. 1-g 실험과 원심모형 실험의 상태변수가 동일해지도록 1-g 실험 모형지반의 목표 단위중량을 결정한다.
- ③ 목표 단위중량을 갖는 모형지반을 조성하여 1-g 모형실험을 수행한다.
- ④ 1-g 모형실험과 원심모형실험 결과를 각각의 상사법칙을 적용하여 원형크기의 결과들로 변환한다. 원심모형실험 결과를 원형의 거동으로 가정한 후, 1-g 모형실험 결과와 원심모형 실험 결과를 비교하여 상사법칙의 유효성을 검증한다.

원심모형실험은 University of Colorado at Boulder에 있는 400 g-ton의 원심모형실험기를 이용하여 수행하였다. 원심모형실험의 기하학적 상사비는 40으로 10m 깊이의 원형지반을 1/40로 축소한 25cm의 모형지반에 대해 40g의 원심가속도를 가하였다. 원심모형실험에 이용된 토조는 크기가 가로 41cm, 세로 22cm, 그리고 높이 34cm이다. 1-g 모형실험은 기하학적 상사비가 20으로 10m 깊이의 원형 지반을 1/20으로 축소한 50cm의 모형지반에 대해 수행하였다. 1-g 실험에 사용된 토조는 원심모형실험에 사용된 토조의 두 배 크기이므로 토조 크기 또한 1-g 실험과 원심모형실험의 기하학적 상사비의 비율과 일치한다. 1-g 모형실험과 원심모형실험에 사용된 입력 가속도는 원형 크기로 볼 때 크기가 0.2g, 진동수가 1Hz, 그리고 지속시간이 10초인 사인파를 사용하였다. 그림 1은 1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 원형크기로 환산된 실험 단면과 설치된 계측기를 보여준다. 계측기는 1-g 모형실험과 원심모형실험에서 동일한 위치에 설치되었다.

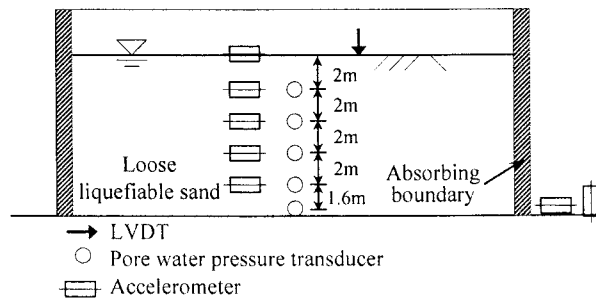


그림 1. 원형크기로 환산된 실험 단면과 설치된 계측기

3.2 모형지반

그림 2는 실험에 사용된 세 가지 모래(J-sand, I-sand, 그리고 U-sand)의 입도분포 곡선을 보여 준다.

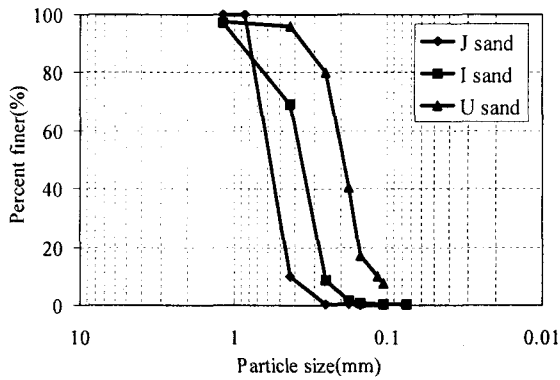


그림 2. 실험에 사용된 모래의 입도분포 곡선

3.3 1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 상사비

1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 상사비는 표 1에 나타나 있다. 1-g 모형실험에서 사용된 상사법칙은 흙의 거동이 반복성 유동(cyclic mobility)일 때 사용할 수 있는 제 2형태와 변형물 연화(strain softening)일 때 사용할 수 있는 제 3형태를 각각 사용하였다. 원심모형실험에서는 Ko (1988)가 제안한 상사법칙을 이용하였다. 원심모형실험에서는 실험에 사용된 유체의 점성을 조정하여 동적시간과 소산시간에 대한 상사비를 일치시켰다.

표 1. 1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 상사비

물리량	상사비 (원형/모형)		
	1-g* (제 2형태)	1-g* (제 3형태)	원심모형실험** (사용 유체의 점성 = 40×물의 점성)
길이	N	N	N
변위	N ^{1.5}	N	N
가속도	1	1	N ⁻¹
진동수	N ^{0.75}	N ^{-0.5}	N ⁻¹
동적시간	N ^{0.75}	N ^{0.5}	N
소산시간	Not Available	Not Available	N

* Iai (1989, 1999), ** Ko (1988)

3.4 모형지반의 상대밀도 비교

표 2는 1-g 모형실험과 원심모형실험에 사용된 모형 모래지반의 단위중량, 상대밀도, 그리고 간극비를 보여준다. 1-g 모형실험에서의 목표값은 1-g 실험의 상태변수가 원심모형실험의 상태변수와 같도록 설정한 단위중량, 상대밀도, 그리고 간극비를 나타낸다. 1-g 모형실험에서 모형지반을 조성할 때에 이러한 목표값에 근접하도록 조성하였다. 1-g 모형실험에서 실제 조성된 지반은 목표값에 대해 단위중량의 경우 1% ~ 2%, 상대밀도의 경우 17% ~ 70%의 오차가 발생하였다. 상대밀도의 경우 단위중량의 변화에 민감하기 때문에 목표값에 맞추어 모형지반을 조성하기 매우 어려웠다.

표 2. 1-g 실험과 원심모형실험에 이용된 모형지반의 단위중량, 상대밀도, 그리고 간극비

		J-sand			I-sand			U-sand		
		γ_{sat} (kN/m ³)	D _r (%)	e	γ_{sat} (kN/m ³)	D _r (%)	e	γ_{sat} (kN/m ³)	D _r (%)	e
원심력 실험		19.2	49.3	0.790	19.4	52.2	0.759	19.3	52.2	0.763
1-g 모형실험	목표값	18.6	22.0	0.898	19.1	37.0	0.821	18.9	37.0	0.848
	2형태	18.9	37.6	0.848	18.9	30.5	0.850	18.6	22.0	0.919
	3형태	19.0	39.2	0.841	18.8	24.9	0.873	18.7	27.2	0.894

4. 실험 결과

4.1 과잉간극수압 응답

본 연구에서는 소산시간에 대한 상사비를 N^m 으로 정의하였고, 1-g 모형실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 결과를 비교하여 계수 m 을 결정하였다. 여기서 N 은 기하학적 상사비를 나타낸다. 표 3을 보면 계수 m 은 1.11~1.50의 범위를 가지며, 지반 깊이가 깊어짐에 따라, 사용모래의 입경이 커짐에 따라 증가하였다. 이러한 결과는 과잉간극수압의 소산이 지반의 구속압과 모래의 유효입경, 즉 투수계수에 영향을 받는다는 것을 의미한다.

표 3. 1-g 모형실험의 과잉간극수압 소산시간 모사를 위한 계수 m 값

깊이	J-sand (D ₁₀ =0.43mm)		I-sand (D ₁₀ =0.25mm)		U-sand (D ₁₀ =0.12mm)	
	제 2형태	제 3형태	제 2형태	제 3형태	제 2형태	제 3형태
2m	1.50	1.25	1.32	1.27	1.22	1.11
4m	D.S.	1.40	1.34	1.35	1.28	1.11
6m	N.L.	D.S.	1.36	1.36	1.30	1.11
8m	N.L.	N.L.	1.38	1.37	1.34	1.15
9.6m	N.L.	N.L.	1.40	D.S.	1.36	1.15

N.L. - 액상화가 발생하지 않은 경우

D.S. - 진동 중 과잉간극수압이 소산된 경우

그림 3은 깊이 2.0m와 9.6m의 위치에서 1-g 모형실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 시간이력 결과를 보여준다. 본 실험으로부터 모형지반이 액상화가 일어났을 때, 1-g 모형실험으로부터 얻은 과잉간극수압의 발생 속도, 최대값, 그리고 소산 속도가 원심모형실험의 결과와 유사하다는 것을 알 수 있으며, 이 결과는 정상상태개념과 두 가지 시간상사비를 적용하면 1-g 진동대 모형실험이 액상화 지반의 과잉간극수압의 발생 현상을 재현할 수 있다는 것을 보여준다.

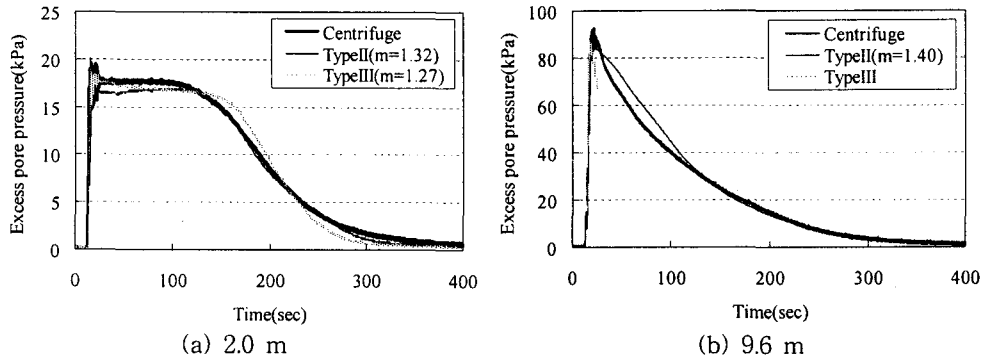


그림 3. 1-g 모형실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 비교 (I-sand, 원형크기)

4.2 가속도 응답

그림 4(a), (b), 그리고 (c)는 사용모래가 I-sand의 경우 입력가속도의 지배 주파수인 1 Hz, 3 Hz, 그리고 5 Hz 에서의 깊이 에 따른 푸리에 가속도 스펙트럼의 크기를 보여준다. 주파수가 1 Hz 인 경우 1-g 모형실험과 원심모형실험의 결과가 잘 일치하였으며, 비교 주파수가 3 Hz, 5 Hz로 증가할 수록 두 실험의 결과 차이가 증가하였다. 그러나, 응답에 대한 기여도가 높은 1 Hz 와 3 Hz의 결과가 유사하므로, 1-g 모형실험으로부터 원형지반의 깊이에 따른 가속도 응답을 비교적 정확하게 예측할 수 있다고 판단된다. 다른 모래에 대한 실험결과도 I-sand의 결과와 유사한 경향을 보였다.

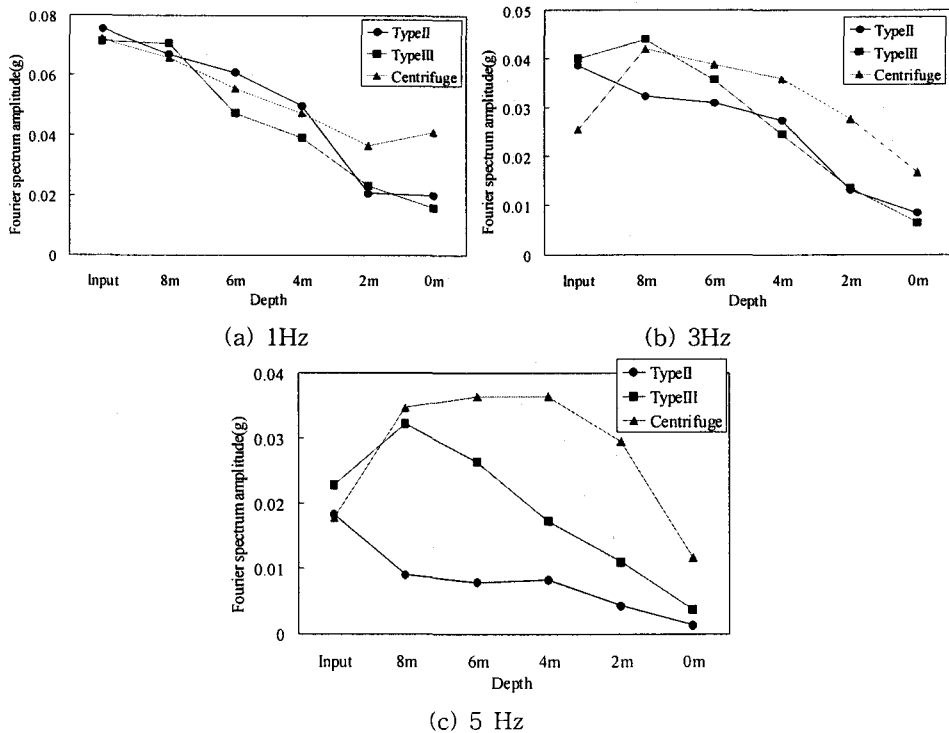


그림 4. 주파수 성분에 따른 푸리에 가속도 스펙트럼 크기 비교(I-sand, 원형크기)

4.3 지표면 침하 응답

그림 5는 대표적인 지표면 침하 시간이력을 나타낸 그림이다. 시험을 수행한 모든 경우에서 1-g 모형실험의 지표면 침하량이 원심모형실험보다 크게 발생하였다. 이것은 1-g 모형실험의 낮은 구속압에 의해 지반의 강성이 원심모형실험보다 더 작았기 때문에 발생한 것으로 판단한다. 그리고 제 2형태의 상사법칙을 적용한 1-g 모형실험이 제 3형태의 실험보다 차이가 더 큰 것은 제 2형태의 상사법칙은 흙의 거동이 반복성 유동(cyclic mobility) 거동일 경우에 대해 유도된 상사법칙이기 때문에 본 실험과 같이 흙의 거동이 변형률 연화(strain softening) 거동이면 적용성이 떨어지기 때문으로 판단된다.

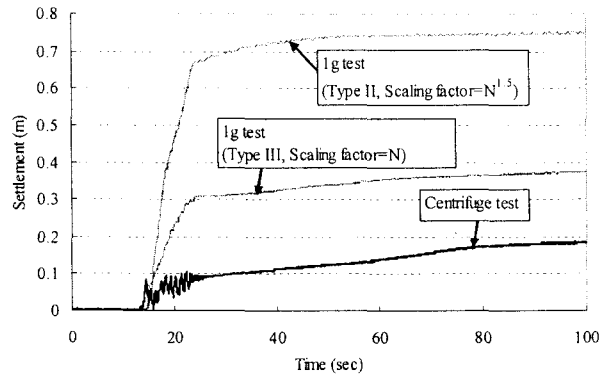


그림 5. 1-g 모형실험과 원심모형실험의 지표면 침하 비교 (J-sand, 원형크기)

5. 결론

느슨한 포화 사질토 수평지반에 대해 1-g 모형실험과 원심모형실험을 수행한 후 그 결과를 비교하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1-g 모형실험으로부터 재현된 과잉간극수압의 발생 속도, 최대값, 그리고 소산 속도는 원심 모형실험의 결과와 잘 일치하였다. 따라서 정상상태개념과 동적시간과 소산시간의 두가지 시간상사비를 적용한 1-g 모형실험을 수행하면 액상화 지반의 과잉간극수압의 발생 양상을 모사하는 것이 가능하다고 판단된다.
- 1-g 모형실험에 대해 소산 시간상사비 N^m 을 적용한 후 1-g 실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 소산 결과를 비교하여 m 값을 결정하였다. m 값은 사용 모래의 입경이 커질수록, 지반의 깊이가 깊어질수록 증가하였으며, 그 값의 범위는 1.11~1.50 이었다.
- 1-g 모형실험과 원심모형실험의 가속도 푸리에 스펙트럼을 비교한 결과, 낮은 주파수에서는 두 결과가 잘 일치하지만 주파수가 증가할수록 두 결과의 차이가 증가하였다. 그러나, 높은 주파수는 가속도 응답에 대한 기여도가 작기 때문에 1-g 모형실험을 통해 지반 깊이에 따른 가속도 응답을 모사할 수 있을 것으로 판단한다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국 학술진흥재단의 박사후 해외연구사업(KRF-2004-D00173) 및 2005학년도 동아대학교 학술연구비(신진과제)의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Castro, G. (1969), "Liquefaction of sands", Harvard Soil Mechanics Series 87, Harvard University.
2. Gibson, A.D. (1997), Physical scaling modeling of geotechnical structures at one-g, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, USA.
3. Hushmand, B., Scott, R.F. and Rashidi, H. 1994. "VELACS model No. 3: Liquefaction in dense and loose sand columns", Verification of Numerical Procedures for the Analysis of Soil Liquefaction Problems, Arulanandan, K. and Scott, R.F. eds., Balkema, Rotterdam, pp. 1415-1442.
4. Iai, S. (1989), "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field", Soils and Foundations, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118.
5. Iai, S. and Sugano, T. (1999), "Soil-structure interaction studies through shaking table tests", Proc. of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, P.S. Seco e Pinto ed., Lisbon, Portugal, Vol.1, pp.365-370.
6. Ko, H.Y. (1988), "Summary of the state-of-the-art in centrifuge model testing", Centrifuges in Soil Mechanics, Craig W.H., James R.G. & Schofield A.N. eds., Balkema, Rotterdam, pp. 11-18.