

상사법칙 검증을 위한 1-g 모형실험과 원심모형실험의 비교 연구

Comparison of 1-g and Centrifuge Model Tests for Similitude Laws

김 성 렬¹ Kim, Sung-Ryul

황 재 익² Hwang, Jae-Ik

김 명 모³ Kim, Myoung-Mo

Ko, Hon-Yim⁴

Abstract

The centrifuge and 1-g shaking table tests were performed simultaneously to compare the dynamic behaviors of loose sands of the 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.

요 지

동일한 흙으로 조성된 모형지반에 대하여 1-g 모형실험과 원심모형실험을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 원형지반은 10m 두께의 수평하고 느슨한 포화 사질토 지반으로 가정하였다. 1-g 모형실험은 1/20 축소모형, 원심모형실험은 1/40 축소모형을 이용하였다. 원심모형실험의 경우 점성유체를 사용하여 동적시간에 대한 상사비와 과잉간극수압 소산시간에 대한 상사비가 동일하도록 하였다. 원심모형실험의 계측결과는 원형지반의 거동으로 가정하였다. 그리고, 1-g 모형실험에 정상상태개념 및 두 가지 시간상사비 등을 적용하여 원형지반의 거동을 모사하고자 하였다. 동일한 위치에서의 과잉간극수압, 지반가속도 그리고 지표 침하량 등을 계측하여 비교하였다. 실험결과 지반의 투수계수가 작아서 진동 중 과잉간극수압 소산의 영향이 작고, 소산시간 상사비를 적절하게 결정하면 1-g 모형실험으로부터 원형지반의 과잉간극수압 거동을 모사할 수 있는 것으로 나타났다.

Keywords : 1-g model test, Centrifuge test, Liquefaction, Shaking table test, Similitude law, Steady state concept

1. 서 론

지반공학적인 동적 문제들을 해결하기 위해 많은 연구

자들이 1-g 진동대 모형실험을 수행하여 왔다. 1-g 모형 실험은 원심모형실험과 비교할 때 모형크기를 크게 제작할 수 있기 때문에 모형구조물 제작, 모형 지반의 밀

1 정희원, 동아대학교 토목해양공학과 전임강사 (Member, Full-time Lecturer, Dept. of Civil Engrg., DongA Univ., sungryul@dau.ac.kr, 교신저자)

2 정희원, 미국 버클리 대학 토목환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-doctoral Researcher, Dept. of Civil & Environment Engrg., Univ. of California, Berkeley)

3 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., The school of Civil, Urban & Geo-System, Seoul National Univ.)

4 Prof., Univ. of Colorado, Boulder, Colorado, USA

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

도 조절, 그리고 계측기 설치가 쉽다는 장점이 있다.

그러나, 이러한 실험들은 대기압(1-g) 하에서 작은 크기의 모형을 이용하여 수행되기 때문에 원형 구조물의 정량적인 거동을 모사하는 것은 어렵다. 원형과 모형의 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 가능한 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 계측하지 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 적용하고자 한다. 10m 두께의 액상화 발생 가능한 느슨한 사질토 포화 지반을 원형지반으로 가정한다. 1-g 모형실험은 기하학적 상사비=20을 적용하여 50cm 두께의 지반, 원심모형실험은 기하학적 상사비=40을 적용하여 25cm 두께의 지반을 제작한다. 원심모형실험에서 동적 시간상사비와 소산 시간상사비가 일치하도록 물보다 점성이 40배 더 큰 점성 유체를 간극수로 사용한다.

입도분포 특성이 다른 세 가지 모래를 사용하여 모래의 입도 특성이 지반의 거동에 미치는 영향을 살펴본다.

원심모형실험의 결과를 원형지반의 거동으로 가정하고, 이를 1-g 모형실험의 결과와 비교하여 1-g 모형실험에 적용된 상사법칙의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 1-g 모형실험을 위한 상사법칙

2.1 Iai의 상사법칙

Iai(1989)는 지반-구조물-유체 시스템에 대한 평행방정식, 구성법칙 그리고 변위-변형률 관계 등을 이용하여 1-g 진동대 모형실험에 적용할 수 있는 상사법칙을 표 1과 같이 제안하였다. 표 1은 3가지 형태의 상사비를 보여준다. 제 1형태와 제 2형태의 상사비는 지반의 변형이 진동하중이 가해지는 동안에만 발생하는 반복 유동성 거동(cyclic mobility)인 경우에 적용할 수 있으며, 제 3형태의 상사비는 진동이 멈춘 후에도 흙의 변형이 계속 발생하는 변형률 연화(strain softening) 거동에 적용할 수 있다. 본 연구에서는 1-g 모형실험에서 제 2형태와 제 3형태의 상사법칙을 이용한다.

2.2 정상상태개념

1-g 모형지반의 응력상태는 원형지반과 다르기 때문에 1-g 실험으로 원형지반의 거동을 모사하기 어렵다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 정상상태개념이 도입되었다.

그림 1은 정상상태선(Steady state line)과 상태변수(State parameter; Been and Jeffries, 1985)를 보여준다. Castro(1969)에 의해 발견된 정상상태선은 한계상태선과 평행하며 약간 밑에 존재하지만 일반적으로 한계상태선

표 1. 1-g 진동대 실험을 위한 상사비(Iai, 1989)

구분	Scaling factors (prototype/model)			
	일반화된 상사비	제 1형태	제 2형태	제 3형태
		$\lambda_p = 1$	$\lambda_e = \lambda^{0.5}, \lambda_p = 1$	$\lambda_e = 1, \lambda_p = 1$
길이	λ	λ	λ	λ
밀도	λ_p	1	1	1
시간	$(\lambda \lambda_e)^{0.5}$	$(\lambda \lambda_e)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
가속도	1	1	1	1
속도	$(\lambda \lambda_e)^{0.5}$	$(\lambda \lambda_e)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
변위	$\lambda \lambda_e$	$\lambda \lambda_e$	$\lambda^{1.5}$	λ
응력	$\lambda \lambda_p$	λ	λ	λ
변형률	λ_e	λ_e	$\lambda^{0.5}$	1
수압	$\lambda \lambda_p$	λ	λ	λ

과 동일하게 취급된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 상태변수 ψ 는 흙의 초기 간극비 e 에서 그 흙의 유효구속압에 해당하는 정상상태선상에 있는 간극비 e_{ss} 를 뺀 값으로 식 (1)과 같이 정의된다. 상태변수 ψ 가 (+)이면 흙은 압축거동을 보이고 흐름액상화(flow liquefaction)가 발생할 가능성이 있으며, ψ 가 (-)이면 흙은 팽창거동을 보인다.

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} : 초기간극비가 정의된 유효구속압에서의 정상상태선상의 간극비

2.3 소산시간에 대한 상사비

시간에 대한 상사비는 진동 중 동적시간에 대한 동적 시간상사비와 진동 후 과잉간극수압 소산시간에 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.

Gibson(1997)은 압밀이론을 적용하여 모형지반과 원형지반 사이의 압밀시간계수를 비교하여 소산시간에 대한 상사비를 유도하였으며 소산시간에 대한 상사비는 압밀계수에 따라 $N \sim N^{1.5}$ 로 제안하였다(N =기하학적 상사비). 본 연구에서는 1-g 모형실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 소산결과를 비교하여 소산 시간상사

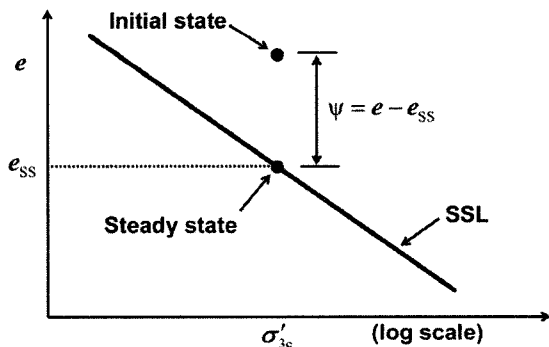


그림 1. 정상상태개념과 상태변수

비를 실험적으로 평가하였다.

3. 모형실험

3.1 실험절차

본 연구의 수행순서는 다음과 같다.

- ① 원심모형실험을 수행하여 원형지반의 거동을 구한다.
- ② 사용 모래에 대해 삼축실험을 수행하여 이들의 정상상태선을 구한다. 1-g 실험과 원심모형실험의 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 가정 한 후, 1-g 모형실험 결과와 원심모형실험 결과를 비교하여 상사법칙의 유효성을 검증한다.

원심모형실험은 University of Colorado at Boulder에 있는 400 g-ton의 원심모형실험기를 이용하여 수행하였다. 원심모형실험의 기하학적 상사비는 40으로 10m 두께의 원형지반을 1/40로 축소한 25cm 두께의 모형지반에 대해 40g의 원심가속도를 가하였다. 원심모형실험에 이용된 토조의 크기는 가로 41cm, 세로 22cm, 그리고 높이 34cm이다. 진동방향 토조벽면에는 1cm 두께의 코르크판을 부착하여 토조강성 때문에 발생하는 전달파의 반사를 감소시켰다.

1-g 모형실험은 기하학적 상사비가 20으로 10m 두께의 원형 지반을 1/20으로 축소한 50cm 두께의 모형지반에 대해 수행하였다. 1-g 실험에 사용된 토조는 가로

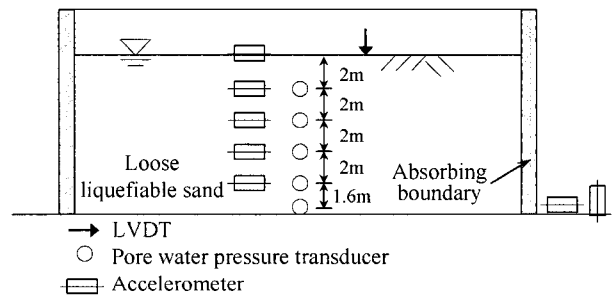


그림 2. 실험 단면과 설치된 계측기(원형크기)

82cm 세로 44cm, 그리고 높이 60cm로써 원심모형실험 토조의 두 배 크기이므로 토조 크기 또한 1-g 실험과 원심모형실험의 기하학적 상사비의 비율과 일치한다.

그림 2는 1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 단면과 설치된 계측기를 보여준다. 계측기는 1-g 모형실험과 원심모형실험에서 동일한 위치에 설치되었다. 1-g 모형실험과 원심모형실험에 사용된 입력 가속도는 원형 크기로 볼 때 크기가 0.2g, 진동수가 1Hz, 그리고 지속 시간이 10초인 사인파를 사용하였다.

3.2 모형지반

그림 3은 실험에 사용된 세 가지 모래(J-sand, I-sand, 그리고 U-sand)의 입도분포 곡선을 보여주며, 표 2는 세 가지 모래의 입도 특성을 보여준다.

3.3 1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 상사비

1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 상사비는 표 3에 나타나 있다. 1-g 모형실험에서 사용된 상사법칙은 I_{ai} 의 상사비 중 흙의 거동이 반복성 유동(cyclic mobility)일 때 사용할 수 있는 제 2형태와 변형률 연화(strain softening)일 때 사용할 수 있는 제 3형태를 모두 적용하

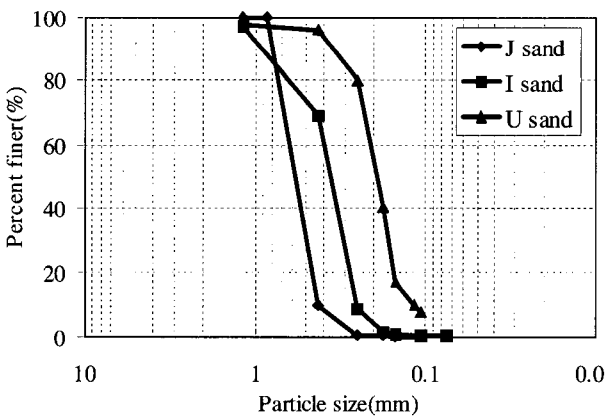


표 4. 모형지반의 단위중량, 상대밀도, 그리고 간극비

	J-sand			I-sand			U-sand			
	r_{sat} (kN/m ³)	Dr (%)	e	r_{sat} (kN/m ³)	Dr (%)	e	r_{sat} (kN/m ³)	Dr (%)	e	
원심모형실험	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
	제 2형태	18.9	37.6	0.848	18.9	30.5	0.850	18.6	22.0	0.919
	제 3형태	19.0	39.2	0.841	18.8	24.9	0.873	18.7	27.2	0.894

표 5. 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. - No Liquefaction
D.S. - Dissipation during Shaking

4. 실험 결과

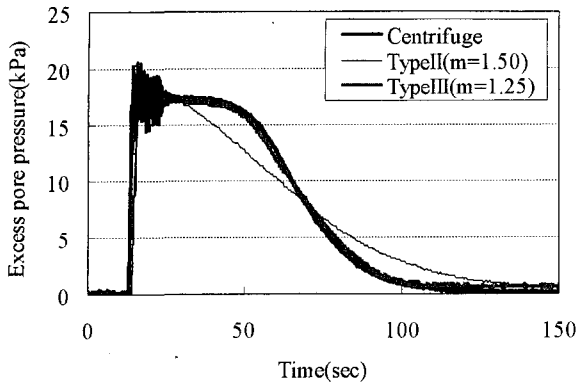
4.1 과잉간극수압 응답

본 연구에서는 1-g 실험에 대해 2가지 시간 상사비를 적용하였다. 진동 중에는 표 2의 동적시간 상사비를, 진동이 끝난 후에는 Gibson(1997)이 제안한 형태의 소산 시간 상사비를 적용하였다. 소산시간에 대한 상사비의 형태는 N^m 으로 정의하고, 1-g 모형실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 결과를 비교하여 계수 m 값을 결정하였다. 여기서 N은 기하학적 상사비를 나타낸다.

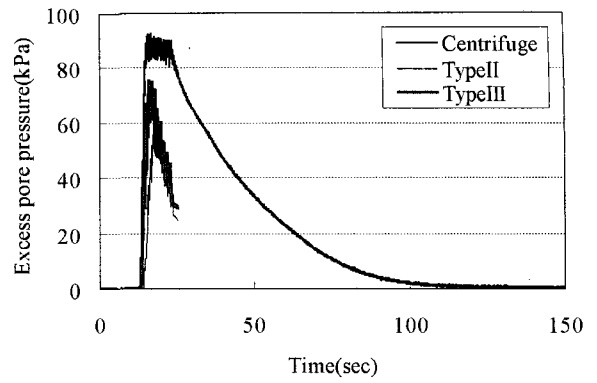
표 5를 보면 계수 m은 1.11~1.50의 범위를 가지며, 이 범위는 Gibson이 제시한 결과와 일치한다. J-sand와 I-sand의 경우 깊은 곳에서 진동 중에 과잉간극수압이 소산되거나 액상화 되지 않는 경우가 발생하였는데 이 경우에는 계수 m을 결정하지 못하였다. 계수 m은 지반 깊이, 흙의 종류, 그리고 상사법칙의 종류에 영향을 받는다. 이 값은 지반 깊이가 깊어짐에 따라, 모래의 입경이 커짐에 따라 증가하였다. 이러한 결과는 과잉간극수압의 소산이 지반의 구속압과 모래의 유효입경, 즉 투수 계수에 영향을 받는다는 것을 의미한다. 현재까지 1-g 모형실험만으로 계수 m을 결정하는 합리적인 방법이 존재하지 않으며 이에 대한 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

그림 4, 5, 그리고 6은 깊이 2.0m와 9.6m의 위치에서 측정한 1-g 모형실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 시간이력 결과를 보여준다. 그림 4(b)의 제 2형태와 제 3형태, 그리고 그림 5(b)의 제 3형태의 과잉간극수압 시간이력은 앞에서 설명한 것처럼 액상화가 발생하지 않았거나 진동 중 과잉간극수압이 소산되어 계수 m을 구할 수 없었기 때문에 나타내지 못하였다. 그림 4(b)의 J-sand에서 과잉간극수압이 작게 발생하고 액상화가 일어나지 않은 이유는 표 4에서 알 수 있듯이 모형지반이 목표상대밀도보다 조밀하게 조성되었고, J-sand의 유효 입경이 크기 때문에 과잉간극수압이 진동 중에 빨리 소산되었기 때문으로 판단된다. 그림 5(b)의 결과를 보면 제 3형태의 과잉간극수압이 진동 중 소산된 반면 제 2형태의 과잉간극수압은 진동 중 소산되지 않았다. 이 결과는 제 3형태의 전체 진동시간(약 2.2초)이 제 2형태의 전체 진동시간(약 1.1초)보다 약 두 배 더 길었기 때문에 진동 중 소산의 영향이 크게 나타났기 때문이다.

그러므로, 진동 중 과잉간극수압의 소산영향이 작고 지반 액상화가 발생하면 1-g 모형실험의 과잉간극수압 거동이 원심모형실험의 결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 본 연구에서 적용한 정상상태개념과 두 가지 시간 상사비, 즉 동적 시간상사비와 소산 시간 상사비를 적용할 경우 1-g 진동대 모형실험을 통해 액상화 지반의 과잉간극수압을 재현할 수 있다는 것을 보

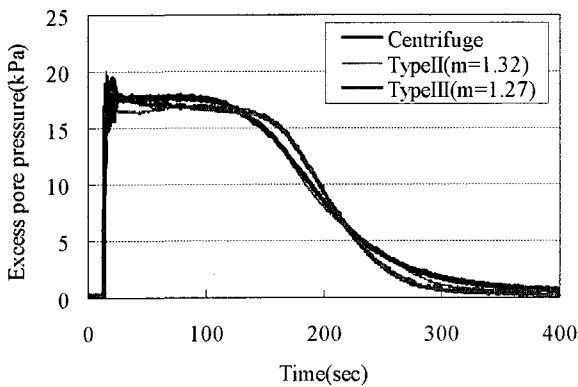


(a) 2.0m

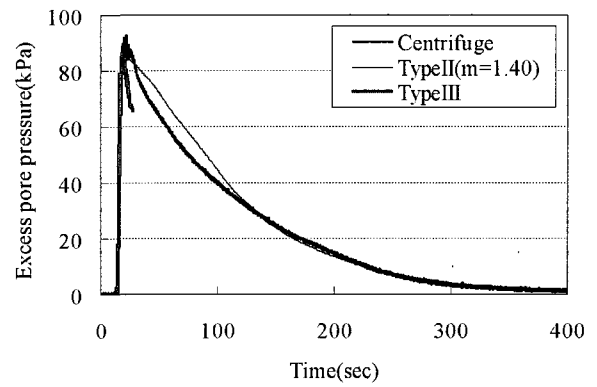


(b) 9.6m

그림 4. 과잉간극수압 시간이력 비교(J-sand, 원형크기)

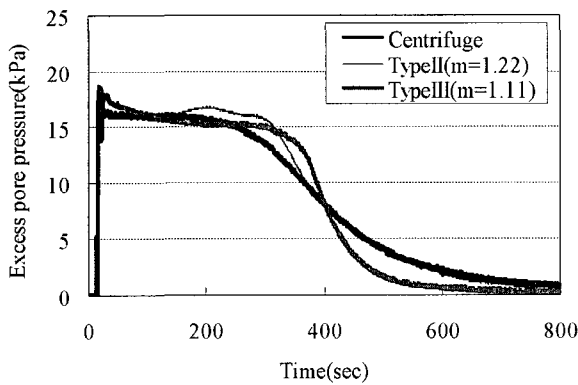


(a) 2.0m

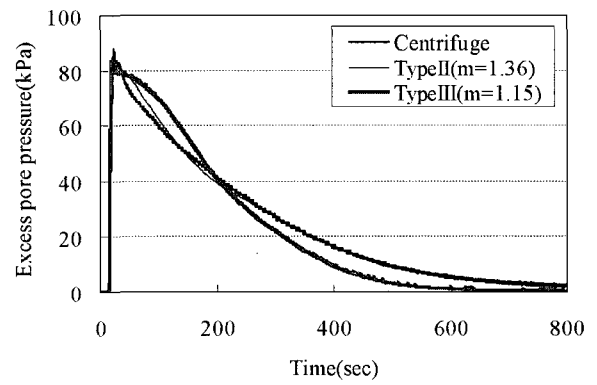


(b) 9.6m

그림 5. 과잉간극수압 시간이력 비교(I-sand, 원형크기)



(a) 2.0m



(b) 9.6m

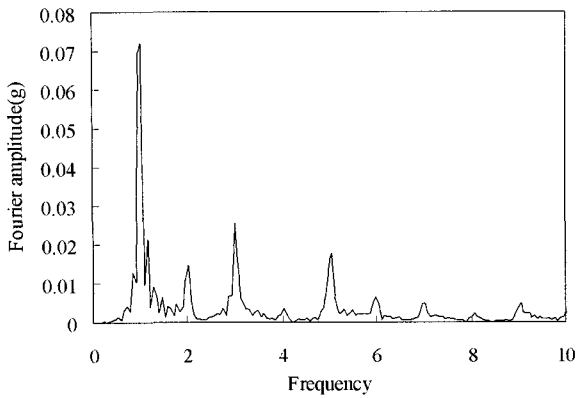
그림 6. 과잉간극수압 시간이력 비교(U-sand, 원형크기)

여준다.

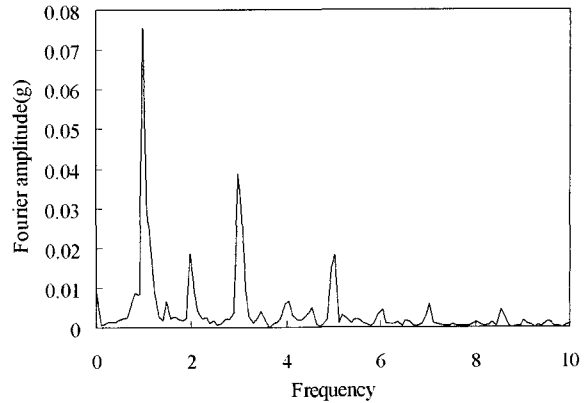
4.2 가속도 응답

가속도 응답은 흙의 강성이나 입력진동의 주파수, 과잉간극수압의 크기 등 여러 인자에 의해 영향을 받는다.

그림 7(a)와 (b)는 1-g 모형실험과 원심모형실험에 이용된 입력가속도의 푸리에 스펙트럼을 보여준다. 1-g 모형실험과 원심모형실험에 사용된 입력가속도는 푸리에 스펙트럼의 크기와 주파수 성분이 서로 잘 일치하며, 1Hz, 3Hz, 그리고 5Hz의 주파수 성분이 지배적이라는 것을 알 수 있다.



(a) 원심모형실험

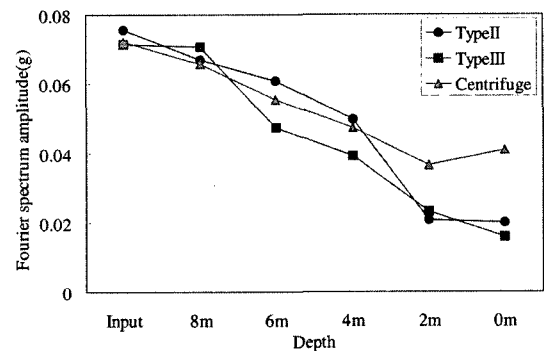


(b) 1-g 모형실험

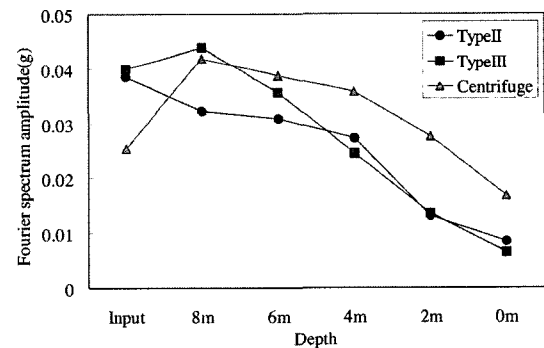
그림 7. 입력가속도 푸리에 스펙트럼 비교(원형크기)

그림 8은 사용모래가 1-sand인 경우 입력가속도의 지배 주파수인 1Hz, 3Hz, 그리고 5Hz 에서의 깊이 에 따른 푸리에 가속도 스펙트럼의 크기를 보여준다. 주파수가 1Hz인 경우(그림 8(a)) 상사비 형태에 관계없이 1-g 모형실험과 원심모형실험의 결과가 잘 일치하였으며, 지표면에 가까워질수록 진폭이 감소하였다. 3Hz(그림 8(b)) 및 5Hz(그림 8(c)) 주파수의 경우 상사비 형태에 의해 실험결과가 영향을 받았다. 제 3형태의 상사비를 적용한 결과는 원심모형실험의 결과와 같이 진폭이 8m 깊이에서 약간 증가하며 지표면으로 갈수록 빠르게 감소하였다. 그러나, 제 2형태의 상사비를 적용한 경우 지표면으로 갈수록 진폭이 계속적으로 감소하였다. 이 이유는 제 3형태의 상사비가 지반 액상화와 같은 흙의 변형률 연화거동을 모사하기 위해 제안되었으므로 제 2형태의 상사비보다 신뢰할 만한 결과를 주었기 때문이다.

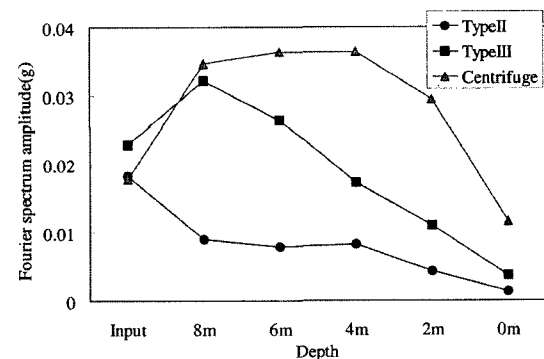
주파수가 1Hz인 경우 1-g 모형실험과 원심모형실험의 결과가 잘 일치하지만, 주파수가 3Hz, 5Hz로 증가할수록 차이가 커졌다. 그 이유는 낮은 주파수에서는 지반의 단위중량과 관계 있는 관성력이 가속도 응답을 지배하지만, 높은 주파수에서는 지반의 강성이 가속도 응답을 지배하기 때문이다. 1-g 모형실험과 원심모형실험의 흙 단위중량은 서로 비슷하여 낮은 주파수에서의 응답이 서로 비슷하였지만, 지반의 강성은 과잉간극수압의 크기에 민감하게 변화하고 1-g 모형실험의 흙의 강성이 매우 작기 때문에 주파수가 증가할수록 그 차이가 크게 발생한 것으로 판단된다. 그러나, 주파수가 증가할수록 응답에 대한 주파수의 기여도는 낮아진다. 응답에 대한 기여도가 높은 1Hz 와 3Hz의 결과가 비슷하므로 1-g 모형실험으로부터 원형지반의 가속도 응답을



(a) 1Hz



(b) 3Hz



(c) 5Hz

그림 8. 주파수 성분에 따른 깊이별 푸리에 가속도 스펙트럼의 크기 비교(1-sand, 원형크기)

비교적 정확하게 예측할 수 있다고 판단되며, 응답에 대한 기여도가 낮은 5Hz 주파수의 차이는 무시할 수 있다. 다른 모래의 경우도 I-sand의 가속도 결과와 유사한 경향을 보였다.

4.3 지표면 침하 응답

그림 9는 지표면 침하량 시간이력을 나타낸 그림이다. 1-g 모형실험의 지표면 최종 침하량은 원심모형실험의 결과에 비해 제 3형태의 경우 약 65%~82%, 제 2형태의 경우 약 240%~520% 크게 발생하였다. 시험을 수

행한 모든 경우에서 1-g 모형실험의 지표면 침하량이 원심모형실험보다 크게 발생하였다.

이 원인은 지반 구속압과 상대밀도 차이 때문으로 판단된다. 1-g 모형지반의 구속압이 낮아 지반강성이 원심 모형실험보다 작고, 1-g 실험의 지반상대밀도가 22%~39%로 원심모형실험의 지반상대밀도인 49%~52%보다 작기 때문에, 1-g 실험의 침하량이 크게 발생하였다.

제 2형태의 상사비를 적용한 경우가 제 3형태의 상사비를 적용한 경우보다 원심모형실험 결과에 근접한 결과를 주는 것은 변형을 연화 거동 등을 모사하기 위해 제안된 제 3형태의 상사비가 액상화가 발생한 본 실험의 분석에 보다 적합하였기 때문이다.

5. 결론

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

- (1) 1-g 모형실험으로부터 재현된 과잉간극수압의 발생 속도, 최대값, 그리고 소산 속도는 원심모형실험의 결과와 잘 일치하였다. 그러므로, 정상상태개념과 두가지 시간상사비를 적용한 1-g 모형실험을 수행하면 액상화 지반의 과잉간극수압의 발생 양상을 모사하는 것이 가능하다고 판단된다.
- (2) 1-g 모형실험에 대해 소산 시간상사비 N^m 을 적용한 후 1-g 실험과 원심모형실험의 과잉간극수압 소산 결과를 비교하여 m 값을 추정하였다. 계수 m 값은 모래의 입경이 커질수록, 지반의 깊이가 깊어질수록 증가하였으며, 그 값의 범위는 1.11~1.50 이었다.
- (3) 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.
- (4) 1-g 모형실험의 지표면 침하량은 모든 경우에서 원심모형실험보다 크게 발생하였다. 그 이유는 1-g 모형지반의 구속압이 낮아서 흙의 강성이 더 작았고, 정상상태개념의 적용으로 지반밀도가 원심모형실험의 지반보다 낮았기 때문이다.

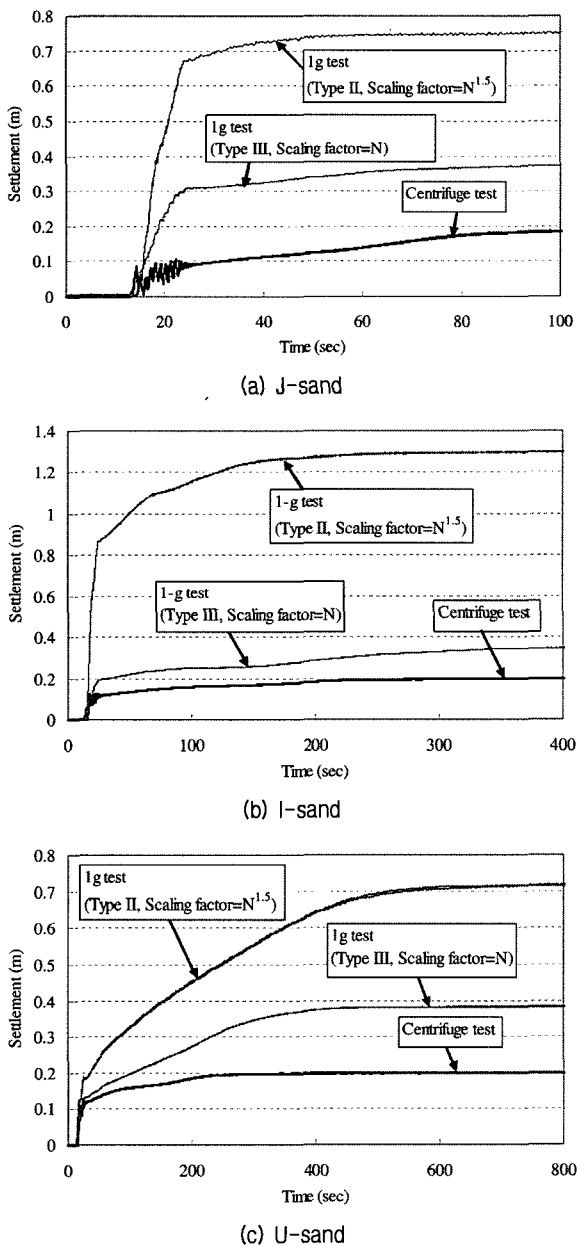


그림 9. 지표면 침하량 시간이력 비교(원형크기)

감사의 글

이 논문은 2005년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(M01-2005-000-10372-0).

참고 문헌

1. Been, K. and Jeffries, M.G. (1985), "A state parameter for sands", *Geotechnique*, Vol.35, No.2, pp.99-112.
2. Castro, G. (1969), "Liquefaction of sands", *Harvard Soil Mechanics Series 87*, Harvard University.
3. Gibson, A.D. (1997), *Physical scaling modeling of geotechnical structures at one-g*, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, USA.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

(접수일자 2006. 2. 2, 심사완료일 2006. 5. 8)