

모형의 모형화 기법을 이용한 1g 진동대 실험을 위한 상사법칙의 유효성 검증

Verification of Similitude Law for 1g Shaking Table Tests through Modeling of Models

황 재 익¹ Hwang, Jae-Ik

김 성 렬² Kim, Sung-Ryul

장 인 성³ Jang, In-Sung

김 명 모⁴ Kim, Myoung-Mo

Abstract

A series of shaking table model tests were performed to verify the validity of similitude law, which is suggested by Iai (1989) to simulate the dynamic behavior of soil-fluid-structure system for 1g shaking table tests. In the tests, the similitude law suggested by Iai was applied to determine the length and the time scaling factors. Also, the steady state concept was used in determining the density of model backfill soil, which is a key factor in simulating the development of excess pore pressure during shaking. The similitude law was verified by checking whether three different sizes of quay walls show the identical behavior or not. The similar responses of acceleration, excess pore pressure and horizontal displacement of walls were obtained for the small and large models. However, the medium model showed larger responses than those of the small and large models because of the resonance between the frequency of input acceleration and the natural frequency of the wall system. In addition, the vertical displacement and rotational angle of the walls became larger with the increase of model size.

요 지

지반-유체-구조물 시스템에 대한 1g 진동대 실험을 위한 상사법칙의 유효성을 검증하기 위하여 일련의 모형실험을 수행하였다. 크기가 서로 다른 3가지의 모형에 대한 실험결과 분석에는 Iai가 제안한 상사법칙뿐만 아니라 과잉간극수압 발생을 위한 정상상태개념도 적용하여 각 크기의 모형이 예측하는 안벽시스템의 거동을 서로 비교하였다. 그 결과, 가속도와 과잉간극수압, 그리고 변위 응답의 경우, 가장 작은 모형벽체와 가장 큰 모형벽체는 비슷한 값을 예측한 반면, 중간크기의 모형벽체는 공진현상으로 인해 영똥하게 큰 값을 예측하였다. 또한 벽체의 수직침하와 회전각은 모형의 크기와 관계없이 모형벽체시스템의 크기가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다.

Keywords : Gravity quay wall, Modeling of models, Shaking table tests, Similitude law, Steady state concept

1. 서 론

최근 1g 진동대 모형실험을 이용하여 복잡한 지반-유

체-구조물의 동적 상호작용 문제에 대한 정량적인 결과를 얻기 위해 원형과 모형의 크기관계를 규정하는 상사법칙에 대한 연구가 진행되고 있다. Kagawa(1978)

1 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사후 연구원 (Member, Post-Doc. School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., jorba71@snu.ac.kr)
2 정회원, 서울대학교 공학연구소 박사후 연구원 (Member, Post-Doc. Engrg., Research Institute Seoul National Univ.)
3 정회원, 한국해양연구원 연안항만공학연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Coastal and Harbor Engrg., Research Lab. Korea Ocean Research and Development Institute)
4 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ.)

는 힘의 비를 이용하여 동적 하중을 받는 지반구조물에 대한 상사법칙을 연구하였고, Kokusho와 Iwatate(1979)는 Buckingham's π -theorem을 이용하여 지반의 비선형 동적 응답에 대한 상사법칙을 연구하였다. 특히 Iai(1989, 1990)는 지반-구조물-유체 시스템의 평형방정식, 구성법칙, 그리고 변위와 변형률 관계 등의 기본방정식을 이용하여 이 시스템에 대한 1g 진동대 모형실험을 위한 상사법칙을 제안한 바 있으나 현재 그 유효성은 검증되어 있지 않은 상태이다.

지반-유체-구조물 시스템의 하나인 중력식 안벽의 동적 거동은 일반적으로 진동 중 벽체의 관성력과 벽체의 앞·뒷면에 작용하는 동적 수압, 그리고 벽체 뒷면의 동적 토압과의 상호작용에 영향을 받는다. 이때 동적 수압과 벽체의 관성력은 안벽시스템의 고유진동수에 영향을 받는 벽체의 가속도 크기에 의해 결정되며, 동적 토압은 뒤채움 지반에서 발생하는 과잉간극수압의 크기에 크게 영향을 받는다. 따라서 1g 진동대 모형실험에서 진동 중 벽체의 가속도와 뒤채움 지반에 발생하는 과잉간극수압의 응답은 상사법칙의 유효성을 검증하는 중요한 인자이다.

본 연구에서는 지반-유체-구조물 시스템을 위한 Iai의 상사법칙의 유효성을 검증하기 위하여 여러 크기의 모형구조물에 대해 1g 진동대 모형실험을 수행하였다. 이렇게 수행한 여러 크기의 모형실험 결과에 대하여 상사법칙을 적용하여 이들이 동일한 거동을 예측하는가를 확인함으로써 제안된 상사법칙의 유효성을 검증하고자 하였는데, 이 때 Iai가 제안한 상사법칙만으로는 벽체의 거동에 크게 영향을 주는 뒤채움 지반에서 발생하는 과잉간극수압에 대한 상사성을 고려할 수 없다고 판단되어 본 연구에서는 이를 보완하기 위하여 모형 뒤채움 지반의 상대밀도를 결정할 때 정상상태개념을 도입하였다. 지반-유체-구조물 시스템 중 중력식 안벽시스템을 대상구조물로 선택하였으며, 상사법칙의 검증을 위하여 벽체의 가속도, 모형 뒤채움 지반에서의 과잉간극수압, 벽체에 작용하는 동적 추력(dynamic thrust), 그리고 벽체의 변위 등을 비교하였다.

2. 상사법칙(Similitude Law)

2.1 동적 모형실험을 위한 상사법칙

진동대 모형실험을 통해 지반구조물의 동적 거동을

정량적으로 평가할 때 중요한 점은 상사법칙을 적용하여 예측한 모형의 거동이 원형의 거동과 닮아야 하고, 원형과 모형에서 평형 방정식 등과 같은 기본법칙이 만족되어야 한다는 것이다. Iai는 지반-구조물-유체 시스템에 대한 평형방정식, 구성법칙, 변위와 변형률 관계와 같은 기본방정식을 이용하여 지반-구조물-유체 시스템에 대한 상사법칙을 제안하였다. 표 1은 Iai가 제안한 1g 진동대 모형실험을 위한 주요한 상사비를 보여준다.

진동하중 하에서 포화된 흙의 거동은 다음 두 가지 형태로 분류된다(Whitman, 1985). 첫째는 반복성 유동(cyclic mobility)으로 진동하중이 가해지는 동안에 흙의 변형이 계속되다가 진동이 멈추는 순간에 변형도 멈추는 거동 형태이며, 둘째는 변형률 연화(strain softening) 거동으로 진동하중이 가해지는 동안에 흙의 변형이 계속되고, 진동이 멈춘 후에도 변형이 계속 발생하는 거동 형태이다. 흙의 변형이 반복성 유동을 보이는 경우, 지반-구조물 시스템의 동적 거동을 이해하기 위해서는 변형률에 대한 상사비, λ_ϵ 을 고려하는 것이 매우 중요하다. 모형 지반의 전단파 속도를 알 때에는 변형률의 상사비, λ_ϵ 는 식 (1)에 의해 결정된다(표 1의 제 1형태).

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[\frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2 \quad (1)$$

여기서 $(V_s)_m$ 과 $(V_s)_p$ 는 각각 모형지반과 원형지반에서의 전단파 속도를 나타내며, λ 는 길이에 대한 상사비로 원형과 모형의 기하학적 크기의 비이다.

모형지반과 원형지반의 전단파 속도에 대한 자료가 없는 경우에는 전단탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다는 가정 하에 변형률에 대한 상사비, λ_ϵ 을 식 (2)으로부터 구한다(표 1의 제 2형태).

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5} \quad (2)$$

흙의 변형이 변형률 연화거동을 보일 경우에는 큰 변형 때문에 변형률에 대한 상사비, λ_ϵ 을 도입할 수 없다. 이때에는 모형지반의 상대밀도가 원형지반의 상대밀도보다 낮은 경우에만 모형지반의 거동이 원형지반의 거동을 모사할 수 있다(Roscoe 1968, Schofield 1980, Scott 1989). 이 경우 표 1의 제 3형태의 상사비를 사용할 수 있다.

표 1. 1g 진동대 모형실험을 위한 주요 상사관계(lai, 1989)

물리량	개념적 상사비	실제 사용되는 상사관계		
		제 1형태	제 2형태	제 3형태
		$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = 1, \lambda_\rho = 1$
길이	λ	λ	λ	λ
밀도	λ_ρ	1	1	1
시간	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
가속도	1	1	1	1
속도	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
변위	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
응력	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
변형률	λ_ϵ	λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	1
간극수압	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ
강성	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	λ/λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	λ
투수계수	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}/\lambda_\rho$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
휨강성	$\lambda^5\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	$\lambda^5/\lambda_\epsilon$	$\lambda^{4.5}$	λ^5
축강성	$\lambda^3\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$	$\lambda^3/\lambda_\epsilon$	$\lambda^{2.5}$	λ^3
모멘트	$\lambda^4\lambda_\rho$	λ^4	λ^4	λ^4
전단력	$\lambda^3\lambda_\rho$	λ^3	λ^3	λ^3
축력	$\lambda^3\lambda_\rho$	λ^3	λ^3	λ^3

2.2 정상상태개념(Steady State Concept)

1g 진동대 모형실험은 원심모형실험과 비교할 때 모형크기를 크게 할 수 있기 때문에 모형구조물 제작이 쉬우며, 모형지반의 밀도를 조절하기 쉽고 계측기를 설치하기 쉽다. 반면 모형지반은 원형지반의 응력상태와는 다른 응력상태를 갖고 있기 때문에 원형지반의 거동을 모사하기 어렵다. 1g 모형실험의 이러한 단점을 극복하기 위하여 한계상태 토질역학의 정상상태개념이 사용되었다.

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 한계상태선과 동일하게 취급된다. 그림 1에서 알 수 있듯이 상태변수 ψ 는 흙의 초기 간극비에서 그 흙의 유효구속압에 해당하는 정상상태선상에 있는 간극비를 뺀 값으로 식 (3)과 같이 정의된다.

$$\psi = e - e_{ss} \tag{3}$$

여기서, e 는 흙의 초기 간극비이며, e_{ss} 는 정상상태선

위의 간극비이다.

상태변수 ψ 가 (+)일 때에는 높은 압축거동을 보이며 이때 흐름액상화가 발생할 가능성이 있으며 (-)일 때에는 팽창거동이 일어난다. 정상상태개념이란 유효구속압이 서로 다른 두 흙에 대해 상태변수가 서로 같으면 두 흙은 서로 같은 거동을 보인다는 것이다. 그림 2는 Verdugo(1992)의 실험결과로 매우 낮은 유효구속압 하의 매우 느슨한 모래의 거동이 높은 유효구속압 하의 조밀한 모래의 거동과 유사하다는 것을 보여준다. Scott(1989)와

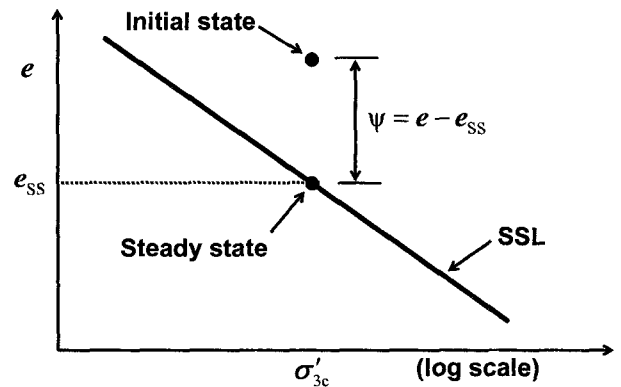


그림 1. 정상상태선과 상태변수

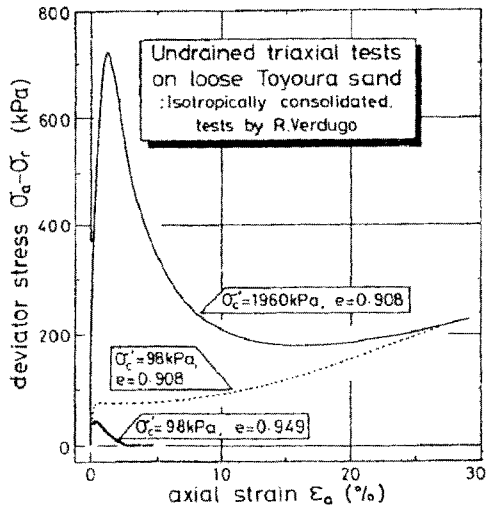


그림 2. 원형과 모형 흙의 거동 모사(Verdugo, 1992)

Gibson(1995)은 이러한 개념을 적용한 1g 진동대 모형 실험을 수행하여 현장지반의 거동을 모사한 바 있다.

3. 진동대 모형실험

3.1 실험개요

정상상태개념과 Iai가 제안한 상사법칙의 유효성을 검증하기 위하여 모형의 모형화 기법을 이용하였다. 지반-유체-구조물 동적 상호작용을 고려하기 위하여 모형의 모형화 기법의 대상구조물로 중력식 안벽구조물을 선택하였다.

기하학적 상사비가 1, 2 그리고 3인 세 개의 모형 안벽시스템을 각각 대형, 중형 그리고 소형 안벽시스템이라고 명명하였으며, 대형벽체를 원형으로 가정하였다. 모형벽체는 강재로 제작하였고, 단위중량은 20 kN/m^3 이며 모형벽체의 기본정보는 표 2에 나열되어 있다.

실험단면의 크기와 입력지진의 진동수와 지속시간 등을 결정하기 위하여 표 1의 제 2형태의 상사관계를 적용하였다. 본 실험에서 제 2형태의 상사관계를 적용한 이유 중력식 안벽구조물에 대한 과거의 실험결과로부터 모형지반의 거동이 지진하중이 가해지는 동안에만 변형이 하는 반복성 유동(cyclic mobility) 형태임을 알 수 있다. 본 실험에 적용된 상사비는 표 3과 같다.

3은 진동대 모형실험의 대상구조물인 모형안벽 개략도이다. 일반적으로 중력식 안벽시스템에 있는 기초치환모래, 자갈마운드 그리고 뒤채움 모래를 모형실험의 간편화를 위하여 모형벽체시스템

표 2. 모형의 모형화 기법에 이용된 세 가지 모형벽체의

	소형벽체	중형벽체	대형
길이 (cm)	11	16.6	33
높이 (cm)	16.7	25	50
폭 (cm)	32	32	32
질량밀도 (kg/m^3)	2000	2000	2000
총 질량 (kg)	11.76	26.56	105.92

표 3. 모형의 모형화 기법을 위한 진동대 모형실험에 이용된 주요 상사비

물리량	상사비	안벽시스템		
		대형	중형	소형
길이	λ	1	2	3
시간	$\lambda^{0.75}$	1	1.68	2.28
가속도	1	1	1	1
변위	$\lambda^{1.5}$	1	2.83	5.20
진동수	$1/\lambda^{0.75}$	1	0.60	0.44
압력	λ	1	2	3
힘	λ^3	1	8	27

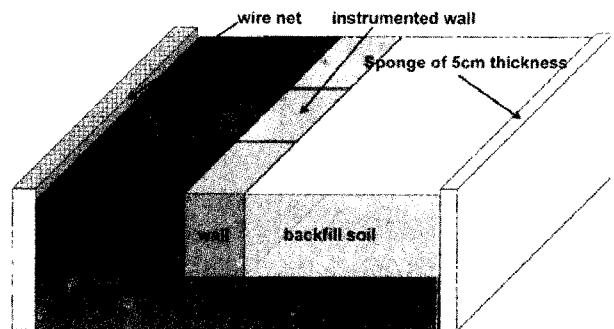


그림 3. 실험모형의 개략도

에서 제외시켰다. 그림 3과 같이 세 개의 모형벽체를 만들어서 뒤채움 지반과 토조의 옆면과의 마찰의 영향이 가장 적은 가운데 벽체에서 가속도, 변위 그리고 동적 토압 등을 측정하였다. 진동 중 강체 토조의 옆면효과를 줄여주기 위해서 벽체 배면 쪽 토조 옆면에 5cm 두께의 스펀지를 부착하였으며, 벽체 전면 쪽의 토조 옆면에는 수파감식장치를 부착하여 수파의 반사를 억제하였다.

그림 4는 실험모형의 단면과 계측기 및 부착위치를 보여준다. 8개의 간극수압계(pore pressure transducer)와 6개의 가속도계(accelerometer), 3개의 변위계(LVDT) 그리고 3개의 하중계(Load cell)를 설치하였다. 간극수압계를 이용하여 벽체전면에 작용하는 동적 수압과 지반 내 과잉간극수압을 측정하였으며, 가속도계를 이용하여 벽체의 가속도와 입력가속도, 그리고 뒤채움 지반에서

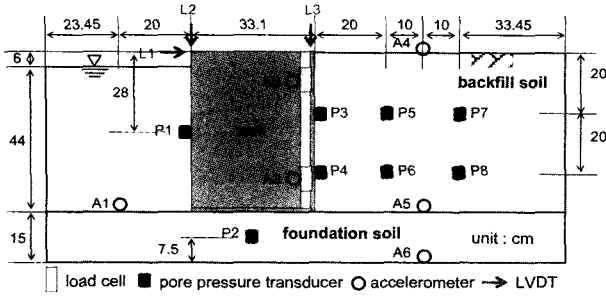


그림 4. 실험단면과 계측기위치 (대형벽체)

의 가속도를 계측하였다. 변위계를 이용하여 벽체의 수평변위와 수직변위, 그리고 회전각을 계측하였으며, 하중계를 이용하여 벽체배면에 작용하는 뒤채움 지반과 물에 의한 동적 배면력을 계측하였다.

모형실험의 불확실성을 제거하기 위하여 소형, 중형, 대형안벽시스템에 대해 두 번 이상 실험을 수행하였다.

3.2 사용 모래

본 실험에서 사용한 모래는 세립질 성분이 적고, 입도 분포가 균등한 주문진 표준사이다. 그림 5는 주문진 표

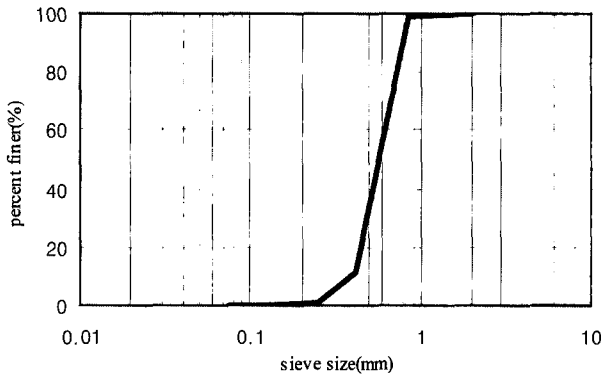


그림 5. 주문진표준사의 입도분포곡선

준사의 입도분포곡선을 보여주며, 기본 물성값은 표 4에 정리되어 있다. 그림 6은 주문진표준사의 정상상태선(한계상태선)으로 정상상태개념을 적용하기 위하여 변형률제어 배수 등방압밀 삼축실험을 통하여 구하였다. 이 때 연직변형률 속도는 5%/hour를 적용하였으며, 유효구속압은 17, 80 그리고 197kPa이었다.

3.3 실험조건

3.3.1 모형지반

기초지반이 안벽의 거동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 기초지반은 변형이 가능한 안 작게 발생 할 수 있도록 조밀하게 조성하였다. 본 연구에서는 세 개의 모형 안벽시스템의 기초지반을 상대밀도 80% 이상 조밀하게 조성하기 위하여 과거에 수행한 실험을 근거로 10Hz, 0.4g 사인파를 이용하여 1분 동안 진동다짐을 하였다.

뒤채움 지반은 정상상태개념에 따라 모형벽체의 크기가 증가할수록 더 조밀하게 조성하였다. 그림 7은 모형벽체 크기에 따른 뒤채움 지반을 조성하는 방법을 보

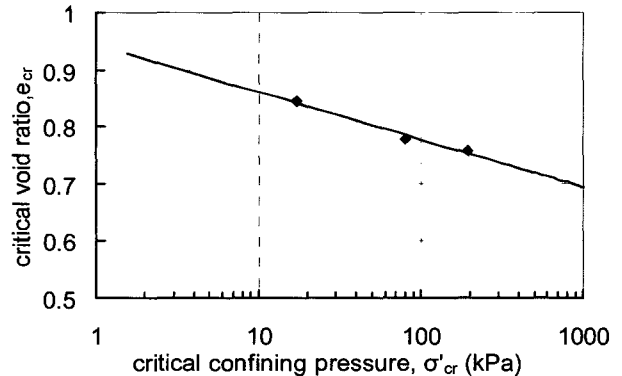


그림 6. 주문진표준사의 정상상태선(한계상태선)

표 4. 주문진표준사의 기본 물성값

유효입경, D_{10} (mm)	평균입경, D_{50} (mm)	균등계수	비중	최대건조단위중량 (kN/m^3)	최소건조단위중량 (kN/m^3)
0.40	0.57	1.53	2.64	16.3	13.1

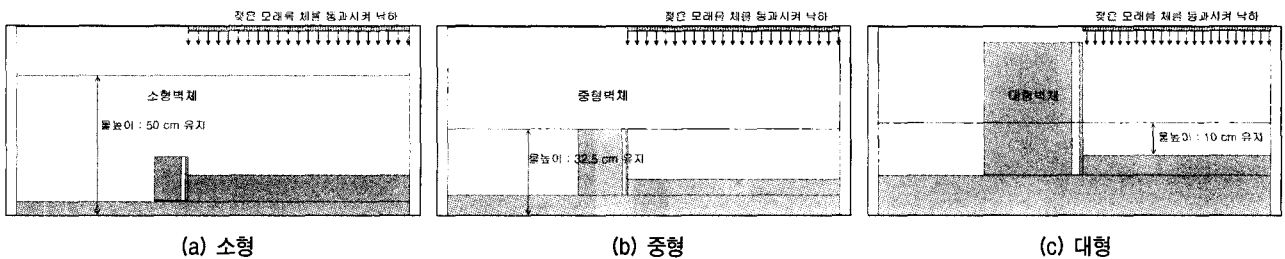


그림 7. 모형크기에 따른 뒤채움 지반의 조성방법

여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 소형과 중형안벽시스템의 경우 물의 높이를 50cm와 32.5cm로 각각 유지하면서 젖은 모래를 체를 통과시켜 낙하하여 뒤채움 지반을 조성하였으며, 대형안벽시스템의 경우 수면에서 뒤채움 지반 표면까지의 물의 높이가 10cm를 유지하도록 한 채 젖은 모래를 낙하하여 조성하였다.

그림 8은 모형벽체 크기에 따른 뒤채움 지반의 초기 상대밀도와 정상상태선을 함께 보여준다. 각각의 모형

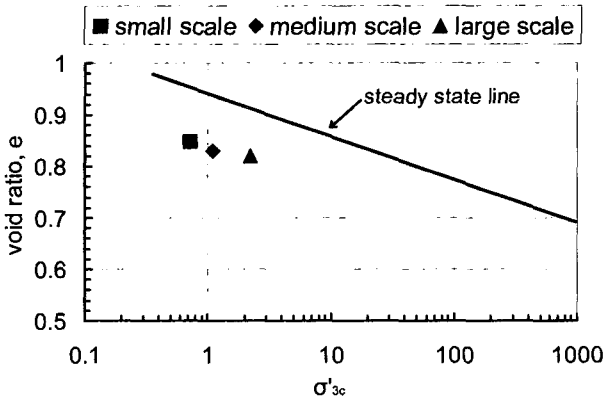


그림 8. 모형벽체 크기에 따른 뒤채움 지반의 초기 간극비

표 5. 모형안벽시스템 크기에 따른 뒤채움 지반 조건

	안벽시스템		
	소형	중형	대형
상대밀도 (%)	34.9	39.3	41.6
습윤단위중량 (kN/m ³)	18.52	18.60	18.65
간극비	0.85	0.83	0.82
상태변수	-0.108	-0.110	-0.094

안벽시스템의 뒤채움 지반의 초기 간극비는 모두 정상 상태선 밑에 존재하며, 소형, 중형, 대형안벽시스템의 상태변수는 각각 -0.108, -0.110, 그리고 -0.094로 각 모형안벽시스템의 뒤채움 지반에서의 과잉간극수압은 비슷한 응답을 보일 것으로 예상할 수 있다. 참고로 대형안벽시스템의 뒤채움 지반의 상태변수를 기준으로 볼 때 소형안벽시스템의 경우 14.8%, 중형안벽시스템의 경우 17.0% 정도의 오차가 발생하였다. 표 5에서 모형안벽시스템의 크기에 따른 뒤채움 지반의 조건을 보여 주고 있다.

3.3.2 입력가속도

그림 9는 입력가속도의 시간이력으로 크기가 0.2g인 사인파이다. 모형벽체 크기에 따른 입력지진의 진동수와 지속시간은 시간에 대한 상사비와 반복횟수에 따라 조정하였다. 표 6은 모형벽체 크기에 따른 입력가속도에 대한 정보이다.

3.4 실험결과

실험결과는 벽체 가속도, 벽체전면에 작용하는 동적 수압, 뒤채움 지반에서의 과잉간극수압, 벽체에 작용하는 전체 배면력, 그리고 벽체 변위 응답에 대해 정리하였으며, 모든 경우에 대해 상사비를 적용하여 원형크기로 환산하여 비교하였다.

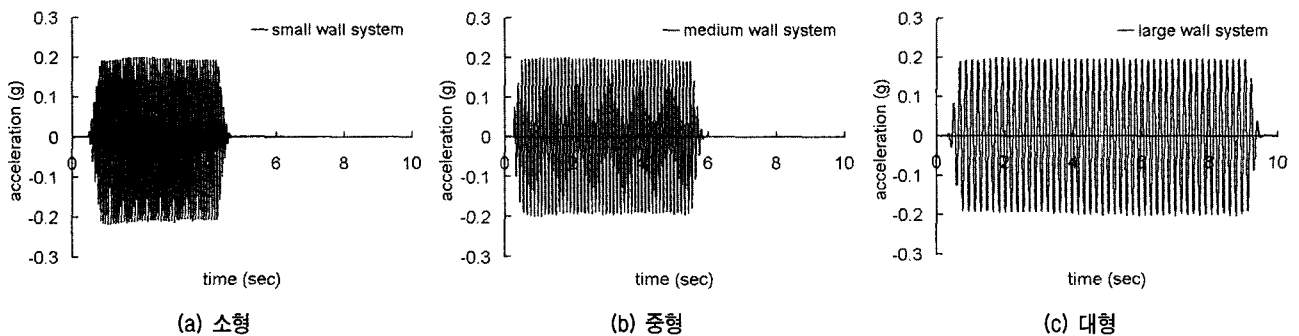


그림 9. 모형벽체 크기에 따른 입력가속도의 시간이력

표 6. 모형벽체 크기에 따른 입력가속도의 기본정보

안벽시스템	진폭 (g)	진동수 (Hz)	지속시간 (sec)	반복횟수
소형	0.2	12.82	3.90	50
중형	0.2	9.46	5.29	50
대형	0.2	5.62	8.89	50

3.4.1 가속도 응답

그림 10은 모형크기에 따른 토조 바닥에서의 가속도 응답을 나타낸 것이다. 비교를 쉽게 하기 위하여 극한점의 포락선(그림 10(b))을 함께 제시하였다. 본 그림으로부터 세 개의 모형에 사용된 입력가속도의 진폭과 지속시간이 거의 동일하다는 것을 알 수 있다.

그림 11은 모형크기에 따른 벽체의 가속도 응답을 보여준다. 이때 벽체의 가속도응답은 벽체의 상부(A2)와 하부(A3)에서 측정된 값의 평균값이다. 본 그림으로부터 소형과 대형의 벽체 가속도 크기는 비슷한 반면 중형 벽체의 가속도는 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 경향을 보이며 소형과 대형보다 더 크게 발생하였다. 중형 벽체의 가속도가 점차 증가하는 형태는 공진현상과 관련되어 있으며, 이러한 공진이 발생하면 가속도 응답의 크기는 시간에 따라 계속 증가하게 된다.

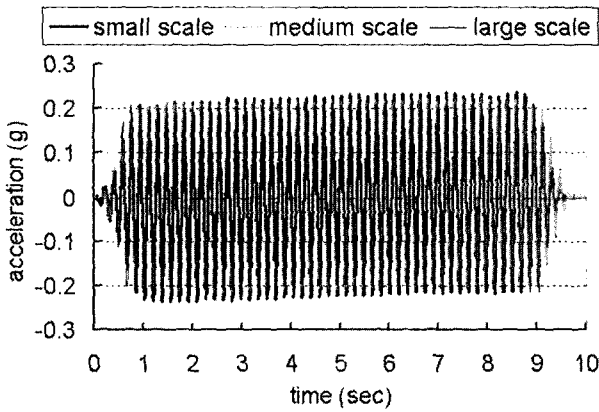
3.4.2 과잉간극수압

벽체에 작용하는 동적 수압

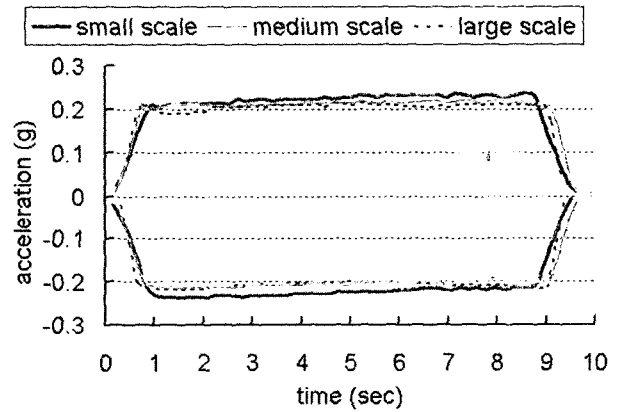
그림 12는 벽체 전면에 작용하는 동적 수압 응답을 나타내고 있다. 동적 수압을 비진동성분과 진동성분으로 분리하여 나타내었다. 비진동성분은 진동 중 여러 가지 이유로 소산되지 않고 축적되는 성분이다. 진동성분은 전체에서 비진동성분을 뺀 값으로서 일반적으로 벽체가속도의 진폭에 비례하여 변하는 것으로 알려져 있다.

그림 12(e)의 진동성분의 경우, 소형과 대형안벽시스템의 응답은 서로 비슷한 반면에 중형안벽시스템의 경우 시간이 지남에 따라 계속 증가하여 다른 벽체보다 더 크게 발생한다.

그림 13에서 Westergaard의 해(1993)를 이용하여 해석적으로 구한 벽체에 작용하는 동적 수압과 실험결과를 비교하였다. 본 그림으로부터 동적 수압의 진동성분은 Westergaard의 해로부터 적절히 평가할 수 있음을 확인하였다.

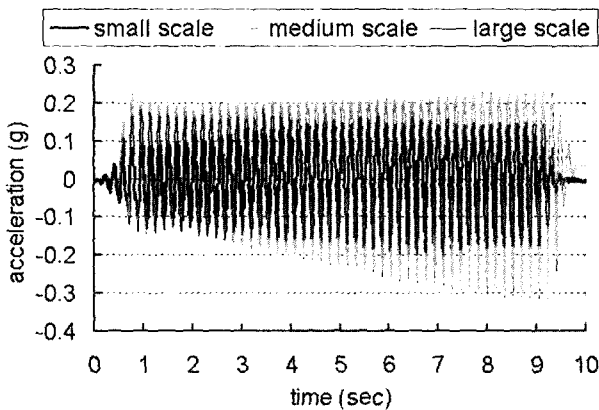


(a) 시간이력

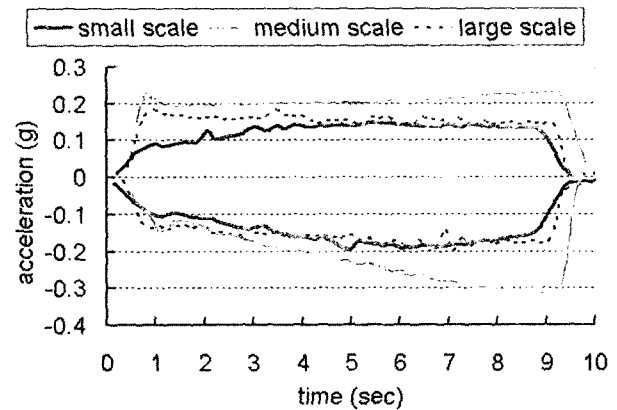


(b) 극한점의 포락선

그림 10. 모형크기에 따른 토조 바닥에서의 가속도 응답 비교(A6)

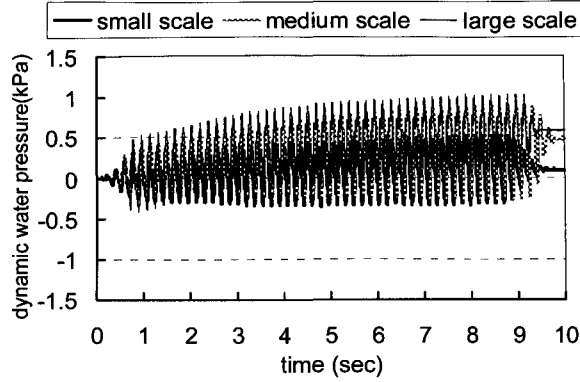


(a) 시간이력

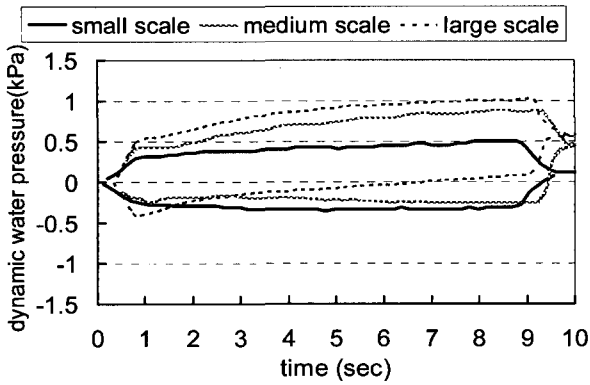


(b) 극한점의 포락선

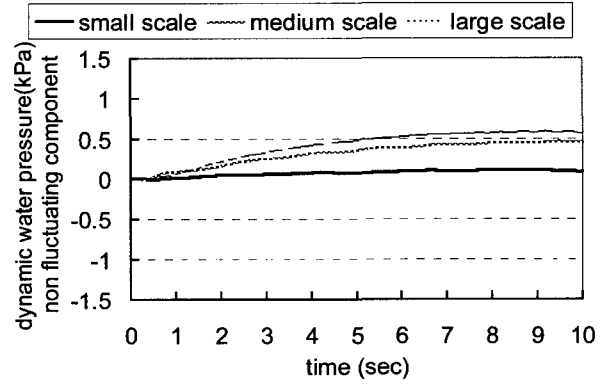
그림 11. 모형크기에 따른 벽체의 가속도 응답 비교(A2와 A3의 평균)



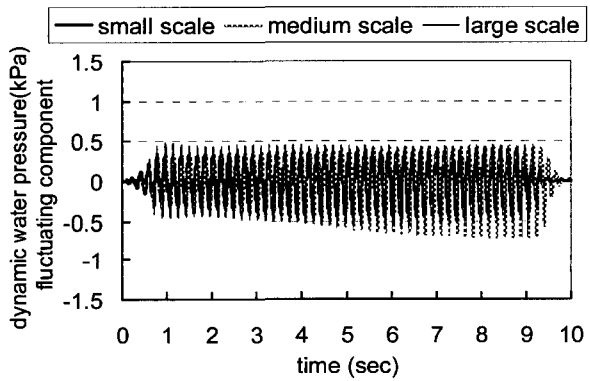
(a) 시간이력 - 전체성분



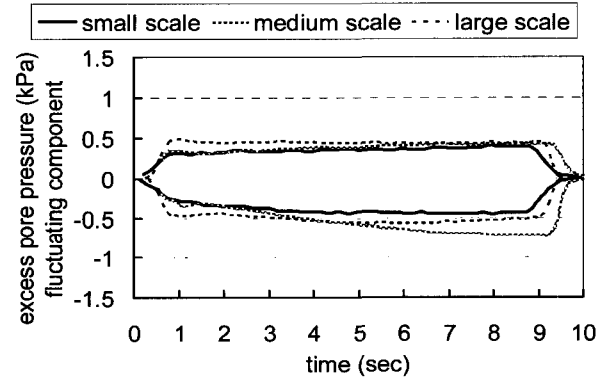
(b) 극한값 포락선 - 전체성분



(c) 비진동성분



(d) 시간이력 - 진동성분



(e) 극한값 포락선 - 진동성분

그림 12. 모형크기에 따른 벽체전면에 작용하는 동적 수압 비교(P1)

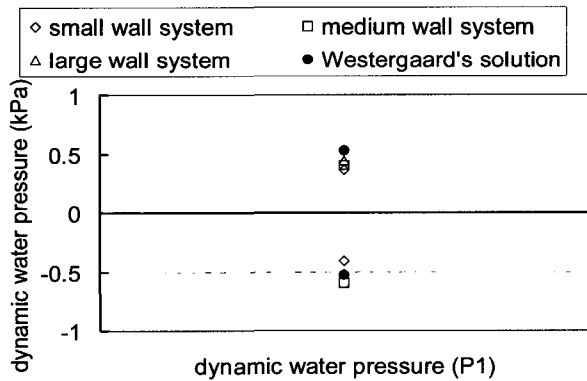


그림 13. Westergaard 해로부터 구한 동적 수압과 실험결과(P1)의 비교

뒤채움 지반에서의 과잉간극수압 응답

안벽시스템의 동적 거동은 뒤채움 지반에서 발생한 과잉간극수압의 크기에 의해 크게 영향을 받는다. 특히 축적되는 비진동성분의 영향이 크기 때문에 해석결과 분석을 과잉간극수압의 비진동성분에 초점을 맞추었다.

그림 14는 뒤채움 지반에서 발생한 간극수압비를 보여준다. 벽체와 뒤채움 지반 사이의 상호작용이 크게 나타나는 벽체에서 가까운 뒤채움 지반(그림 14(a), (b))에서는 중형벽체의 간극수압비가 소형과 대형벽체에서 보다 약 2배 정도 크게 발생하였으며 소형과 대형벽체

에서는 서로 비슷하게 발생하였다. 또한 벽체와 뒤채움 지반의 상호작용의 영향을 적게 받는 벽체에서 멀리 떨어진 뒤채움 지반(그림 14(c), (d))에서는 세 개의 모형에서 비슷한 결과를 보였다. 그림 15는 뒤채움 지반에서의 최대간극수압비 분포를 등고선으로 보여준다. 소형과 대형안벽시스템에서의 최대간극수압비의 크기와 분포는 서로 비슷하지만, 중형에서는 아주 다른 크기와 다른 분포양상을 보였다. 중형벽체에서 이렇게 큰 과잉간극수압이 발생한 원인은 공진에 의해 벽체가속도가 크게 발생하였기 때문으로 판단되며, 중형벽체에서 발생한 공진의 발생 메커니즘에 대해서는 뒤에서 토의하였다.

공진현상이 발생한 중형벽체를 제외하면 소형벽체와 대형벽체 배면지반에서 발생한 과잉간극수압 발생크기와 양상이 비슷하다. 따라서 정상상태개념을 적용하여 뒤채움 지반의 상대밀도를 결정하고 공진현상을 피할 수 있다면 1g 진동대 실험을 실시하여 과잉간극수압발생을 정량적으로 모사할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4.3 벽체에 작용하는 전체 힘

진동 중 벽체에 작용하는 힘에는 벽체의 관성력, 벽체 전면에 작용하는 동적 수압, 그리고 벽체배면에 작용하는 동적 배면력이 있다. 벽체의 관성력은 벽체의 가속도

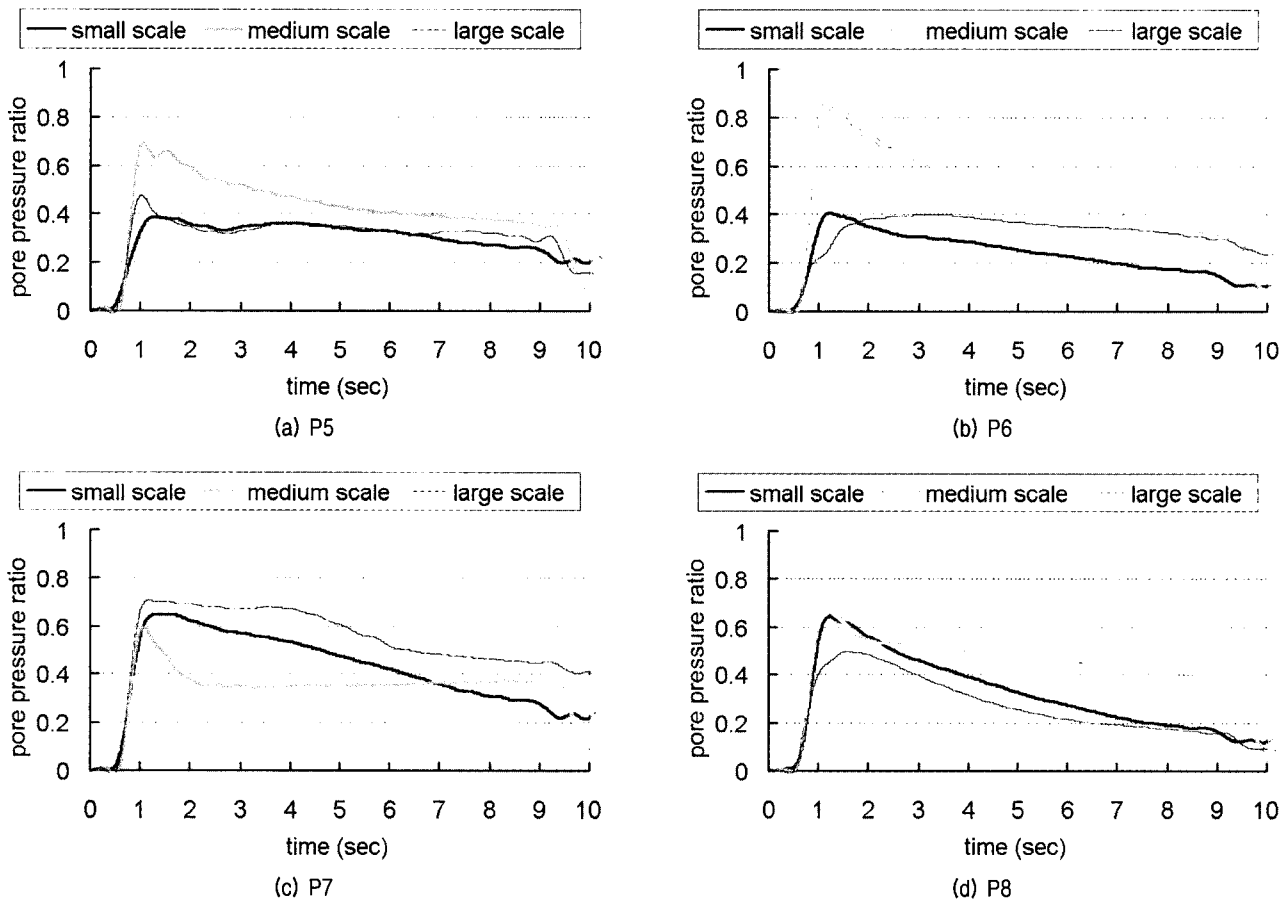


그림 14. 모형크기에 따른 뒤채움 지반에서 발생한 간극수압비 비교

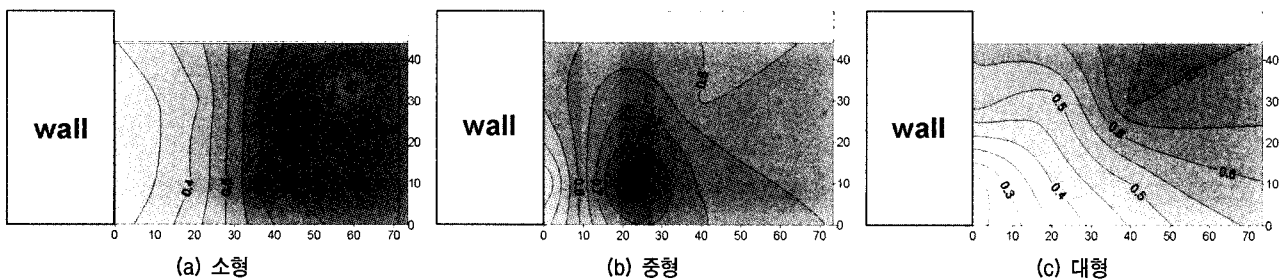


그림 15. 모형크기에 따른 뒤채움 지반에서의 최대간극수압비 분포

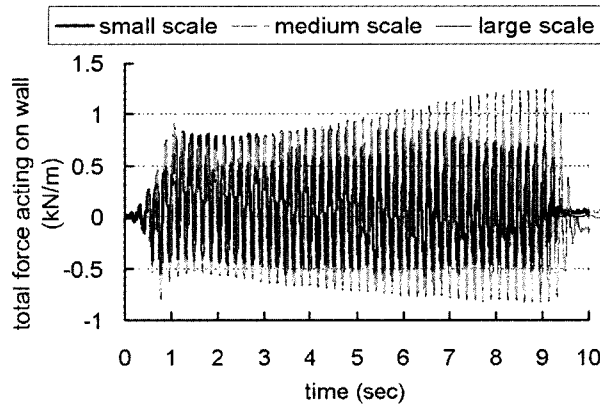
와 벽체의 질량을 곱하여 계산할 수 있으며, 벽체전면에 작용하는 동적 수압은 Westergaard의 해에 벽체의 가속도 시간이력을 대입하여 계산할 수 있다. 이때 벽체관성력은 벽체 가속도의 부호와 반대이며, 벽체관성력과 동적 수력은 항상 같은 위상을 갖는다.

그림 16은 모형크기에 따른 벽체에 작용하는 전체 횡방향 힘을 보여준다. 전체 횡방향 힘은 벽체관성력, 동적 수력, 그리고 동적 배면력 사이의 위상관계를 고려한

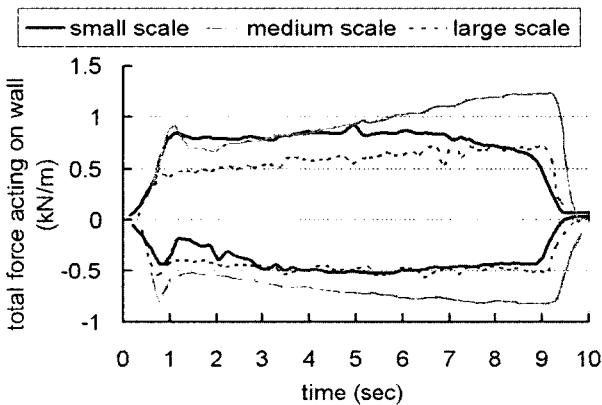
이들 힘들의 합으로 정의된다. 본 그림으로부터 중형벽체의 전체 힘이 가장 크며, 다른 두 벽체의 전체 힘은 서로 비슷함을 알 수 있다.

3.4.4 벽체의 변위

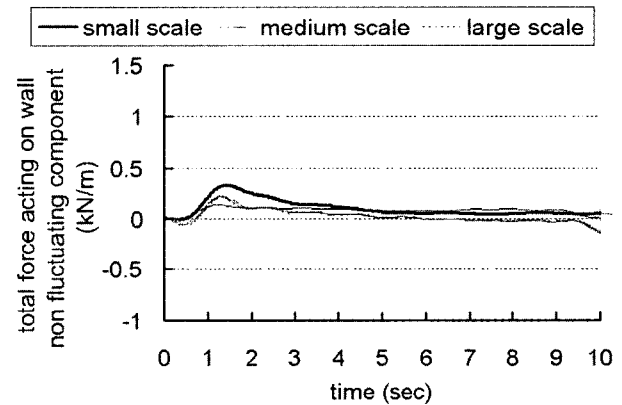
벽체의 최종변위는 지반-유체-구조물 동적 상호작용의 결과이며 상사법칙의 유효성을 검증하는데 있어서 중요한 인자이다. 그림 17은 모형벽체 크기에 따른 벽체



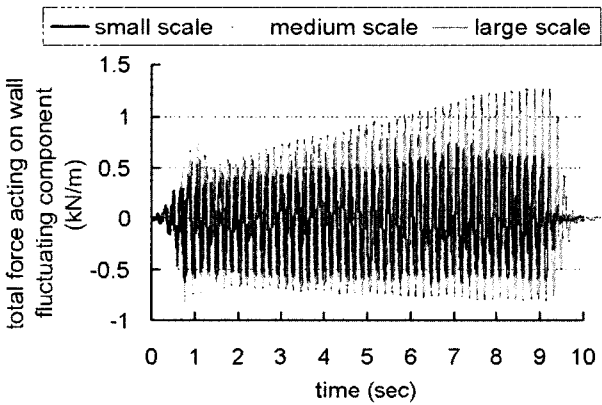
(a) 시간이력 - 전체성분



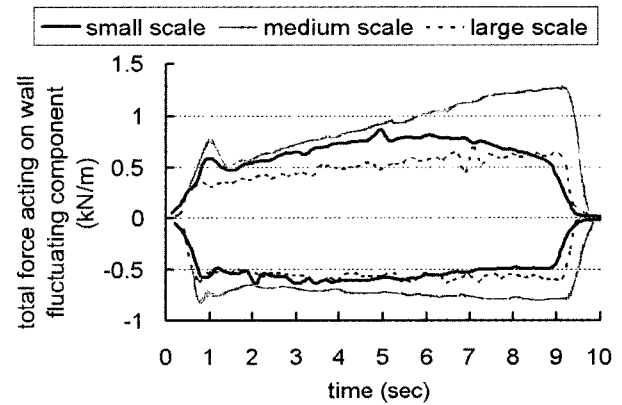
(b) 극한값 포락선 - 전체성분



(c) 비진동성분



(d) 시간이력 - 진동성분



(e) 극한값 포락선 - 진동성분

그림 16. 모형크기에 따른 벽체에 작용하는 전체 힘

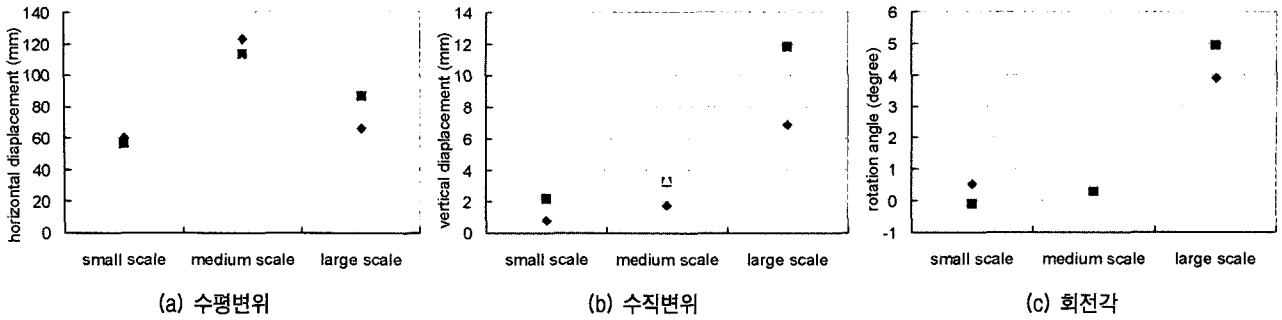


그림 17. 모형벽체크기에 따른 벽체의 최종변위 비교

의 수평변위, 수직변위 그리고 회전각을 보여준다. 그림을 보면, 소형과 대형 벽체에서의 수평변위는 서로 비슷한 반면, 중형벽체에서는 가장 큰 변위를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이, 중형벽체에서는 공진현상에 따른 벽체 가속도 증가로 인해 전체 작용력이 커지기 때문이다.

벽체의 수직침하와 회전각은 모형벽체시스템의 크기가 증가할수록 증가하였다. 그 이유는 수직침하의 경우 벽체에 작용하는 전체 힘보다 기초지반의 지지능력에 의해 더 크게 영향을 받는데, 본 실험에서는 배면지반과는 달리 기초지반의 경우 모형크기에 관계없이 지지력을 동일하게 조성하였기 때문으로 생각된다. 따라서 벽체의 변형형상을 모사하기 위해서는 기초지반의 지지력에 대한 상사비를 고려하여 기초지반의 상대밀도를 조정해야 할 것으로 판단된다.

3.4.5 과잉간극수압 발생에 따른 안벽시스템의 고유진동수 변화 분석

앞서 수행된 진동대실험에서 발견된 중형벽체에서의 공진현상의 발생 메커니즘을 설명하기 위하여 그림 18과 같은 랜덤파를 이용한 진동대실험을 수행하였다. 중형안벽시스템에서 공진이 일어난 원인을 뒤편에서 발생한 과잉간극수압에 의한 지반의 강성감소로 판단하여 뒤편에서 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따른 벽체시스템의 고유진동수 변화를 살펴보았다.

랜덤파를 이용한 진동대 실험으로부터 시간에 따른 안벽시스템의 고유진동수의 변화를 구하기 위하여 먼저 진동대실험으로부터 획득한 입력가속도와 벽체응답가속도의 시간이력을 여러 개의 구간으로 나눈 후, 각각의 구간에 해당하는 입력가속도와 벽체응답가속도의 데이터를 이용하여 주파수응답함수를 구한 다음, 주파

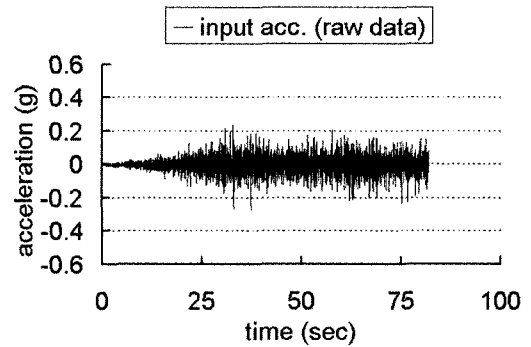
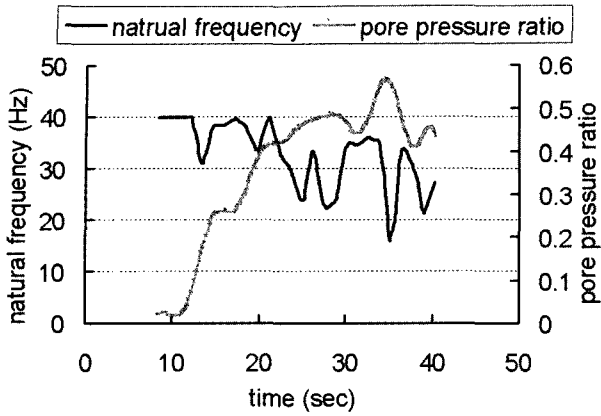


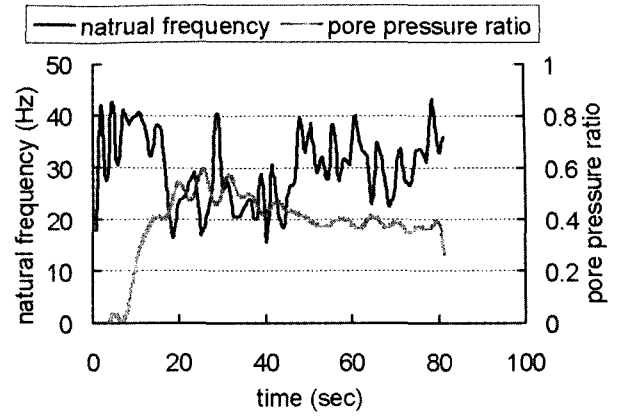
그림 18. 입력가속도로 사용된 랜덤파

수응답함수의 최대값에 해당하는 진동수를 안벽시스템의 고유진동수로 결정하였다. 그런 다음 각각의 구간에서 결정한 고유진동수를 시간에 대해 나타내어 시간에 따른 안벽시스템의 고유진동수의 변화를 구하였다.

그림 19는 시간에 따른 뒤편 지반에서의 간극수압비와 벽체시스템의 고유진동수 변화를 보여준다. 그림으로부터 간극수압비가 증가하면 고유진동수는 감소하고, 간극수압비가 감소하면 고유진동수는 증가하는 경향을 알 수 있다. 그림 20은 뒤편 지반에서의 간극수압비와 벽체시스템의 고유진동수와의 관계를 보여주는 데 간극수압비가 작을 때에는 고유진동수가 일정하게 유지되다가 간극수압비가 0.35이상으로 증가하면 고유진동수는 큰 변화폭을 가지며 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 최대 약 43Hz의 고유진동수는 간극수압비가 0.6까지 증가함에 따라 약 15Hz 까지 감소하였다. 실험에서 사용된 랜덤파의 특성상 뒤편 지반에서 과잉간극수압이 잘 축적이 되지 않기 때문에 뒤편 지반에서의 최대간극수압비의 크기가 약 0.6 정도 밖에 발생하지 않았다. 따라서 그림 14와 그림 15로부터 알 수 있듯이 중형벽체시스템의 뒤편 지반에서 최대간극수압비가 약 0.8로 그림 20으로부터 중형안벽시스템의 고유진



(a) test - 1



(b) test - 2

그림 19. 시간에 따른 뒤택음 지반에서의 간극수압비와 벽체시스템의 고유진동수 변화

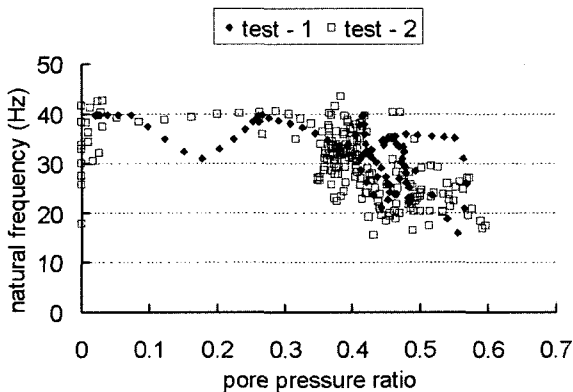


그림 20. 뒤택음 지반에서의 간극수압비와 벽체시스템의 고유진동수와의 관계

동수가 입력가속도의 진동수인 9.46Hz 근처까지 작아져서 공진이 일어났다고 판단된다.

4. 요약 및 결론

모형의 모형화 기법을 이용하여 지반-유체-구조물 시스템에 대한 상사법칙의 유효성을 검증하기 위하여 1g 진동대 모형실험을 수행하였다. Iai가 제안한 상사법칙 뿐만 아니라 정상상태개념 또한 진동대 모형실험에 적용하였다. 여기서 모형벽체시스템의 크기에 따른 가속도응답, 간극수압 응답 그리고 변위응답 등을 비교함으로써 상사법칙의 유효성을 검증하고자 하였다. 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 가속도와 과잉간극수압 응답의 경우 소형과 대형안벽시스템은 비슷하고, 중형안벽시스템에서는 큰 응답을 보였다. 특히 중형안벽시스템에서 벽체의 가

속도와 벽체에 작용하는 동적 수압은 시간이 지남에 따라 점점 더 증가하는 경향을 보였는데, 이것은 중형안벽시스템의 고유진동수와 입력가속도의 진동수가 일치하는 공진현상 때문이다. 중형안벽시스템에서의 공진은 뒤택음 지반에서 발생하는 과잉간극수압의 크기가 증가함에 따라 지반의 강성이 낮아져서 벽체시스템의 고유진동수가 감소하기 때문에 발생한 것으로 판단되었다. 모형벽체 크기에 따른 벽체의 횡방향 변위를 살펴보면 소형과 대형벽체의 횡방향 변위는 서로 비슷하였으나 공진의 영향으로 중형벽체의 횡방향 변위는 크게 발생하였다. 결론적으로 공진현상이 발생한 중형안벽시스템을 제외하면 소형과 대형안벽시스템에서 벽체의 횡방향 변위, 벽체의 가속도 그리고 뒤택음 지반에서의 과잉간극수압의 응답은 매우 비슷하게 나타났다. 이 결과로부터 공진현상이 발생하지 않는 경우 뒤택음 지반의 상대밀도를 결정하는데 적용된 정상상태개념과 Iai의 상사법칙의 유효성이 검증되었다고 판단된다.

- (2) 벽체의 수직침하와 회전각은 모형벽체시스템의 크기가 커질수록 증가하였다. 그 이유는 수직침하의 경우 벽체에 작용하는 전체 힘보다 기초지반의 지지능력에 의해 더 영향을 받는데, 본 실험에서는 관행대로 모형크기에 관계없이 기초지반을 지지력이 동일하게 조성하였기 때문으로 생각된다. 따라서 벽체의 변형양상을 모사하기 위해서는 기초지반의 지지력에 대한 상사비를 고려하여 기초지반의 상대밀도를 조정해야 할 것으로 판단된다.
- (3) 정상상태개념과 Iai의 상사법칙을 적용한 1g 진동대

모형실험을 통하여 원형 구조물의 동적 거동을 정량적으로 평가하기 위해서는 실험 후 벽체의 가속도나 벽체에 작용하는 동적 수압의 시간이력으로부터 공진의 발생여부를 확인해야 하며, 모형크기를 결정하는 과정에서 미리 공진 가능성 여부를 확인할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원의 창의과제인 “항만구조물의 정량적 거동 분석을 위한 상사법칙 연구” 사업의 지원을 받았으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

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. and Scott, R. F. (1995), “Comparison of a 1g and centrifuge model dynamic liquefaction test: preliminary results”, *First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol.2, pp.773-778.
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. (1990), “Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field (closure)”, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.2, pp.153-157.
6. Kagawa, T. (1978), “On the Similitude in Model Vibration Tests of Earth Structures”, *Soil Mechanics and Foundation Engineering, Proc. of Japanese Society of Civil Engineering*, pp.69-77.
7. Kokusho, T., and Iwatate, T. (1979), “Scaled model tests and numerical analyses on nonlinear dynamic response of soft grounds”, *Proc. of Japan Society of Civil Engineers*, No.285, pp.57-67. (in Japanese)
8. Roscoe, K.H. (1968), “Soils and model tests”, *Proc. of Instruction of Mechanical Engineers, Journal of Strain Analysis*, Vol.3, No.1, pp.57-64.
9. Schofield, A.N. (1980), “Cambridge geotechnical centrifuge operations”, *Geotechnique*, Vol.30, No.3, pp.227-268.
10. Scott, R.F. (1989), “Centrifuge and modelling technology : a survey”, *Rev. Franc. Geotech.*, No.48, July, pp.15-34.
11. Verdugo, R.L. (1992), *Characterization of sandy soil behavior under large deformation*, Ph.D.Thesis presented to University of Tokyo, Japan.
12. Westergaard, H.M. (1933), “Water pressures on dams during earthquakes”, *Trans. of ASCE*, Vol.98, pp.418-432.
13. Whitman, R.V. and Liao, S. (1985), *Seismic design of retaining walls*, Miscellaneous Paper GL-85-1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.

(접수일자 2004. 9. 13, 심사완료일 2004. 11. 25)