

대형 댐의 지진응답특성평가를 위한 원심모형시험 기법 연구

A Study on Geotechnical Centrifuge Testing Method for Seismic Performance Evaluation of Large Embankment Dams

김남룡^{1)*} · 임정열¹⁾ · 임은상¹⁾

Kim, Nam-Ryong¹⁾ · Lim, Jeong-Yeul¹⁾ · Im, Eun-Sang¹⁾

¹⁾K-water연구원 기반시설연구소

¹⁾Infrastructure technology research center, K-water Institute

/ A B S T R A C T /

Damages of large embankment dams by recent strong earthquakes in the world highlight the importance of seismic security of dams. Some of recent dam construction projects for water storage and hydropower are located in highly seismic zone, hence the seismic performance evaluation is an important issue. While state-of-the-art numerical analysis technology is generally utilized in practice for seismic performance evaluation of large dams, physical modeling is also carried out where new construction technology is involved or numerical analysis technology cannot simulate the behavior appropriately. Geotechnical centrifuge modeling is widely adopted in earthquake engineering to simulate the seismic behavior of large earth structures, but sometimes it can't be applied for large embankment dams due to various limitations. This study proposes a dynamic centrifuge testing method for large embankment dams and evaluated its applicability. Scaling relations for a case which model scale and g-level are different could be derived considering the stress conditions and predominant period of the structure, which is equivalent to previously suggested scaling relations. The scaling principles and testing method could be verified by modified modeling of models using a model at different acceleration levels. Finally, its applicability was examined by centrifuge tests for an embankment dam in Korea.

Key words: Physical modeling, Seismic performance evaluation, Embankment dam, Modeling of models, Generalized scaling relations

1. 서론

최근 중국, 일본, 뉴질랜드, 네팔 등의 사례와 같이 불시에 발생하는 대규모 지진은 수많은 인명피해와 막대한 경제적 손실을 야기한다. 특히 다목적 댐과 같은 중요 대형 사회기반시설은 그 특성상 손상과 붕괴가 발생할 경우 하류지역에 막대한 인명, 재산피해가 가중될 뿐 아니라 용수공급과 전력생산의 차질과 같은 부가적인 손실을 가져온다. 일반적으로 댐(embankment dam)은 지진에 대해 비교적 안전한 구조물로 인식되어 왔으나 2008년 중국 Wenchuan 지진 시 발생한 Zipingpu 댐의 대규모 손상, 2011년 동일본 대지진에 의한 Fujinuma 댐의 붕괴와 같이 최근의 심각한 피해 사례는 댐의 지진 시 안전에 대한 경각심을 높이고 있다[1, 2].

지진에 의한 댐의 손상은 사면 불안정에 의한 활동 파괴, 심벽부 또는 표면의 균열, 과도한 침하에 의한 여유고의 감소, 축조재료의 액상화에 의한 파괴 등 다양한 형태를 나타낸다. 일반적으로 댐의 설계와 시공 과정에서 댐의 구조적 형태와 축조재료의 선정은 이러한 댐의 거동 특성을 고려한 설계 기준에 따라 결정하며, 설계의 적정성을 검증하기 위한 구조해석을 수행하게 된다. 국내의 현행 내진설계기준에서는[3] 진도법을 내진설계와 내진성능평가의 기본으로 하며, 대댐과 같은 단면의 상세검토가 필요한 경우 동역학적 해석방법에 의한 검토를 수행한다. 동해석에 의한 대형 댐의 내진성능평가에서는 일반적으로 구조적 응답특성, 지진하중에 의한 상하류 사면의 안정성, 댐의 침하 및 변형, 축조재료의 액상화 등을 검토하는데, 이러한 해석 방법은 최근 수치해석분야의 기술적 진보에 힘입어 신뢰성과 활용도가 높아지고 있으며 대부분의 건설 프로젝트에서 일반화되어 있다. 그러나 중요도가 높은 대규모 건설 프로젝트나 새로운 개념의 설계, 시공기법이 시도되는 경우 해석의 불확실성을 해소하기 위한 방법으로 모형실험이 수행

*Corresponding author: Kim, Nam-Ryong

E-mail: namryong@kwater.or.kr

(Received February 24, 2016; Revised March 30, 2016; Accepted March 30, 2016)

되기도 한다.

국제적으로 댐의 지진 시 응답 및 변형특성과 파괴모드를 평가하기 위한 방안으로 진동대를 이용한 다양한 모형실험이 수행되어 왔으며, 특히 최근 대형 장비의 발달과 함께 동적 원심모형실험이 널리 활용되고 있다. 기존에 제시된 댐의 구조적 응답특성을 검증하거나 제체 또는 기초지반의 액상화에 의한 댐의 파괴 양상을 평가하기 위한 다양한 실험이 시도되었으며 [4-6] 최근에는 중심코어형 석괴댐의 응답특성과 표면차수벽형 석괴댐의 콘크리트 슬라브에 작용하는 동적 모멘트를 평가하기 위한 방안으로 원심모형실험이 이용되기도 하였다[7].

이러한 원심모형실험은 엄밀한 상사법칙에 따라 설계하는데, 현실적인 장비 규모와 성능의 한계에 따라 주로 비교적 작은 댐을 대상으로 진행되어 왔으며, 특히 제체 거동을 정성적으로 평가하는 연구가 주류를 이루었다. 그러나 건설 실무 차원의 안정성평가를 위한 실험 수요는 실제 대규모 댐의 응답과 변형에 대한 정량적 평가에 초점을 맞추고 있다. 특히 최근 국제적으로 기후변화에 따른 수자원 확보와 전력 생산을 위하여 추진되고 있는 댐 건설 프로젝트는 대형화되는 추세이며, 그 중요성을 고려할 때 모형실험이 이용한 실증적 내진성능평가의 중요성도 부각되고 있다. 예를 들어 대표 단면에서의 높이 100 m, 상하류방향 하부폭의 길이가 300 m인 댐에 대하여 동적 원심모형실험을 수행하는 경우, 최대 1:200의 축척의 모형을 제작, 200 g 조건에서의 실험을 수행하여야 하나, 현실적으로 이러한 조건에의 실험은 매우 어려운 실정이다. 특히 기존의 일반적인 상사법칙을 적용할 경우 이러한 대형 댐을 엄밀하게 모델링 하여 정량적인 동적 거동을 평가하기에는 어려움이 있으며, 따라서 기존의 한계를 극복하기 위한 적절한 실험기법이 요구된다.

본 연구에서는 대형 댐의 내진성능평가를 위한 원심모형실험 방법을 제안하고 그 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 실험대와 원심모형 실험 중 모형 댐 구조물 사이의 제체 내 응력분포와 이론적인 동적거동특성의 비교 분석을 바탕으로 합리적인 실험 방법을 제시하였으며, 이러한 방법은 기존에 제시된 확장상사비(generalized scaling relations)와 비교하여 타당성을 확인하였다. 또한 동일한 제체 모형에 대하여 다른 원심가속도를 적용하는 변형된 modeling of models [8] 방법을 활용, 실제 실험조건에서의 타당성을 검증하였으며, 실제 대형 댐에 대한 실험 결과를 바탕으로 그 적용성을 확인하였다.

2. 원심모형실험

2.1 상사법칙

지반공학분야의 축소모형실험은 대개 실제와 동일한 재료 및 기하학적 특성에 따라 제작한 모형구조물을 이용하여 원형구조물의 거동특성을 평가하고자 수행된다. 지반재료는 응력 수준에 의하여 강도와 변형 특성이 달리 나타나는데, 모형 지반구조물 내부의 자중응력분포(self-weight stress distribution)는 축척에 따라 감소하며, 이는 전체적인 구조물의 거동의 차이로 나타난다. 원심모형실험은 축소모형에 인공적으로 증가한 가속도를 작용함으로써 원형과 동등한 응력분포를 재현, 지반재료의 응력에 따른 공학적 특성을 동일하게 구현함으로써 실제 구조물의 거동을 보다 사실적으

로 모사할 수 있는 장점을 갖는다. 원심모형실험은 이러한 전제조건을 바탕으로 유도한 상사법칙에 따라 설계하는데, 특히 실험에서 모사하고자 하는 거동에 지배적인 영향을 미치는 지반공학적 변수와 이에 대한 상사법칙은 실험 결과의 분석에 중요한 요소이므로, 상사법칙의 타당성과 적용성에 대한 면밀한 검토가 필요하다.

일반적인 원심모형실험의 상사법칙은 가속 중 모형구조물 내부의 응력 분포가 원형과 동일하다는 가정에서 출발하여 유도된다. 동일한 재료(동일 밀도, ρ)로 구성된 원형과 모형구조물의 깊이(h) 및 가속도 조건(g)에 따른 수직응력(σ_v)은 다음과 같이 표현되며

$$\sigma_{vp} = \rho g_p h_p \tag{1}$$

$$\sigma_{vm} = \rho g_m h_m \tag{2}$$

1:N 축척에 대하여 원형과 모형의 응력상태를 동일하게 구현하기 위해서는 다음의 관계가 성립하여야 한다.

$$\frac{h_p}{h_m} = N, \quad \frac{g_p}{g_m} = \frac{1}{N} \tag{3}$$

여기서 첨자 p 와 m 은 각각 원형(prototype)과 모형(model)을 의미한다. 이와 같이 원심모형실험에서는 원형과 동일한 응력상태를 구현하기 위하여 축척에 상응하는 원심가속도를 적용하게 되며, 지반공학적 물리량에 대한 대부분의 상사비는 동일한 재료 특성, 축척 및 응력조건을 바탕으로 유도할 수 있다. 다양한 지반공학적 문제에 대한 원심모형실험의 상사비는 해당분야 기술위원회가 정리한 문헌자료를 참고할 수 있다[10].

2.2 대형 구조물에 대한 원심모형실험 - 제약사항

원심모형실험은 다양한 지반공학문제에 폭넓게 활용되나, 특수한 장비에 의존적인 특성으로 인하여 실험 조건의 제약사항이 발생하기도 한다. 예를 들어 상하류방향 대표단면의 높이가 100 m이고 기초면의 길이가 300 m인 대형 사력댐의 지진응답을 모사하는 동적 원심모형실험을 가정해 보자. 길이 1,500 mm의 토조에 모형을 제작할 경우, 축척은 1:200이므로 상사법칙에 따라 200 g의 원심가속도 조건의 실험을 계획하게 된다. 이와 같이 큰 모형을 이용하려면 회전반경 7~8 m 이상의 대형 원심모형시험기가 필요한데, 이러한 장비를 이용하여 200 g까지 가속할 수 있는 경우는 전 세계적으로 극히 드물다. 특히 지진하중을 모사하기 위한 진동대는 대부분 50 g 이하의 원심가속도에서 사용할 수 있으며 [11], 따라서 기존의 일반적인 상사비 조건을 충족하여 실험하기는 매우 어렵다.

이러한 물리적 제약에도 불구하고 대형 구조물의 거동특성을 평가하고자 하는 경우, 시험기의 규모에 맞추어 원형구조물 모형을 제작, 실험을 수행함으로써 대형 구조물의 거동을 간접적으로 유추하기도 한다. Kim 등은 [7] 원심모형실험을 수행하여 지진에 대한 사력댐의 거동을 모사하였는데, 40 g 가속 조건이 모사하는 높이 5.2 m, 6.4 m의 두 댐에 대한 실험 결과를

바탕으로 지진 시 댐의 응답, 증폭비 및 변형특성 등을 평가한 바 있다. 이러한 방법은 구조물의 일반적인 거동 특성을 정성적으로 이해하는 데 유용하지만, 특정 구조물의 거동을 정량적으로 평가하는 데에는 한계가 있다. 예를 들어, 댐의 주파수응답특성은 구조물의 규모에 따라 달라지며, 응답 또한 입력진동의 주파수 특성에 따라 달리 나타나므로, 실험형의 댐을 원심모형시험의 통상적인 상사법칙을 준용하여 모사할 수 없는 경우 실제와 다른 현상을 모사하는 결과를 낳게 된다. 따라서 대형 구조물의 지진응답을 정량적으로 평가하기 위해서는 보다 엄밀한 모사 기법이 필요하다.

3. 대형 지반구조물의 동적 실험을 위한 모델링 기법

3.1 응력분포와 고유주기를 고려한 상사법칙의 유도

구조물의 동적응답을 모사하는 모형실험의 설계에서 가장 중요한 요소는 구조물의 기하형상과 재료의 강성에 의하여 결정되는 주파수응답특성, 그리고 입력하중의 주파수 성분이다. 따라서 일반적인 상사법칙에 따라 원심모형실험을 수행할 수 없는 대형 구조물의 경우, 실험 가속도 또는 응력조건에 의하여 결정되는 구조물의 고유진동수를 고려하여 실험을 계획하는 것이 합리적이라 할 수 있다.

높이 H_p 인 원형구조물에 대하여 $1:N_0$ 축척의 지반구조물 모형을 N_0g 의 가속도에서 실험하는 경우와, 보다 작은 $Ng(= \frac{N_0}{k}g, k>1)$ 의 가속도 조건에서 실험하는 경우를 가정하여 보자. 모형 지반구조물의 높이를 h_m 라 할 때, 원심모형실험에 의하여 각각의 경우가 모사하는 구조물의 높이는 각각 식 (4), (5)와 같다.

$$H_p = N_0 h_m = kN h_m \tag{4}$$

$$H_{vp} = N h_m \tag{5}$$

식 (5)의 H_{vp} 는 Ng 조건의 실험이 모사하는 가상의 원형구조물(virtual prototype)의 높이로 생각할 수 있다. 예를 들어 높이 100 m의 석괴댐을 1:200 축척으로 축소된 모형을 이용하여 200 g와 50 g 조건에서 실험을 수행하는 경우, $N=50, k=4$ 이며, 이는 각각 높이 100 m의 실험형 댐과 높이 25 m인 가상의 댐을 모사하는 경우가 된다. 지반구조물의 고유 응답 주기 T_n 은 구조물의 높이 H 와 평균 전단파속도 \bar{V}_s 에 대하여 식 (6)과 같이 일반화하여 표현할 수 있다.

$$T_n = c \frac{H}{\bar{V}_s} \tag{6}$$

여기서, 상수 c 는 구조물의 응답모드에 의하여 결정되는 상수이며, 수평지반의 1차모드 고유주기는 4, 댐의 경우 약 2~2.6 사이의 값을 나타낸다 [9, 12]. 이와 같이 지반구조물의 응답특성은 구조물의 크기와 구성재료의 강성(전단파속도)에 의하여 결정되는데, 지반재료의 전단파속도 V_s 는 평균유

효율력 σ_m 의 함수로 식 (7)과 같이 표현된다.

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma_m}{1kPa} \right)^\beta \tag{7}$$

여기서 α 는 1 kPa 평균유효율력에 대한 전단파속도, β 는 구속압 영향계수이며 재료에 따라 약 0.2에서 0.3 사이의 값을 나타낸다[13]. 원심모형시험 중 지반구조물 내부의 응력 분포는 원심가속도에 비례하므로, 식 (4)와 (5)가 나타내는 각각의 경우에 대한 응력분포의 관계와 이를 고려한 구조물 전체의 평균 전단파속도의 관계는 식 (8)과 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{m,kN} = k \sigma_{m,N} \tag{8}$$

$$\bar{V}_{s,kN} = k^\beta \bar{V}_{s,N} \tag{9}$$

두 가지 실험 조건에서 모형의 형상은 동일하므로, 구조물의 고유주기 T 또는 공진주파수 f_m 의 관계는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$T_{kN} = k^{-\beta} T_N \text{ 또는 } f_{n,kN} = k^\beta f_{n,N} \tag{10}$$

즉, 원심가속도가 k 배 증가할 때 1차모드의 공진주파수는 k^β 만큼 증가한다. 일반적인 원심모형실험의 상사비 1:kN을 적용하는 경우 원형의 고유주기 T_p 는 실험 결과의 kN배이므로, Ng 조건에서의 실험으로 획득하는 고유주기 T_N 과는 다음의 관계를 갖는다.

$$T_p = kN T_{kN} = k^{1-\beta} N T_N \tag{11}$$

이와 같이 1:kN(N_0) 축척의 구조물을 Ng 의 원심가속도 조건에서 실험하는 경우, 실험에서 획득하는 구조물의 고유주기는 실험형 구조물의 $1/k^{1-\beta}N$ 이라 할 수 있다. 모형실험을 바탕으로 실제 구조물의 응답을 모사하기 위해서는 이러한 고유주기로부터 도출한 상사비를 적용하여야 하며, 실험에 사용하는 지진하중의 주파수 또한 동일한 방법으로 $k^{1-\beta}N$ 의 상사비를 적용하여 변환하여야 한다.

3.2 확장상사비 (generalized scaling relations)

앞선 상사비의 타당성은 기존에 제시된 확장 상사법칙(generalized scaling relations)과 비교하여 확인할 수 있다. Iai 등[11]은 일반적인 원심 모형실험의 상사비를 적용하여 동적 실험을 수행할 수 없는 대형 지반구조물의 경우, 1 g 진동대실험과 원심모형실험에 대한 두 가지 상사비를 결합하여 사용하는 방법을 제안하였다. 원심가속도에 의하여 대표되는 가상의 원형(virtual prototype)과 모형 사이의 축척을 $\eta(=N)$, 실험형과 가상의 원형 사이의 축척을 $\mu(=k)$ 라 할 때, 특정 물리량에 대한 상사비는 축척 η 에

Table 1. Generalized scaling relations for major quantities of physical modeling by lai et al. [11]

Quantity	Conventional	Partitioning		Generalized
	(Ng)	Virtual 1g field (Prototype/Virtual)	Centrifugal field (Virtual/Physical)	(Partitioned)
Length	N	μ	η	$\mu\eta$
Density	1	$\mu\rho$	1	$\mu\rho$
Time	N	$(\mu\mu_\epsilon)^{0.5}$	η	$(\mu\mu_\epsilon)^{0.5}\eta$
Frequency	$1/N$	$(\mu\mu_\epsilon)^{-0.5}$	$1/\eta$	$(\mu\mu_\epsilon)^{-0.5}/\eta$
Acceleration	$1/N$	1	$1/\eta$	$1/\eta$
Displacement	N	$\mu\mu_\epsilon$	η	$\mu\mu_\epsilon\eta$
Stress	1	$\mu\mu_\rho$	1	$\mu\mu_\rho$
Strain	1	μ_ϵ	1	μ_ϵ
Stiffness	1	$\mu\mu_\rho/\mu_\epsilon$	1	$\mu\mu_\rho/\mu_\epsilon$

대한 원심모형실험 상사비와 축척 μ 에 대한 1 g 진동대실험의 상사비의 곱으로 표현할 수 있다.

1 g 모형시험 조건에서 주파수에 대한 상사비는 식(12)와 같다. 여기서, μ_ϵ 는 변형율에 대한 상사비를 나타낸다.

$$\mu_f = (\mu\mu_\epsilon)^{-0.5} \tag{12}$$

미소변형 최대전단탄성계수가 평균유효응력의 제곱근에 비례하는, 즉 $G_{max} = K\sigma_m^{0.5}$ 으로 표현되는 조립토의 경우 [14], μ_ϵ 는 $\mu^{0.5}$ 이므로 [15] 위의 상사비가 보다 단순하게 표현될 수 있다. 한편, 원심모형시험의 주파수에 대한 상사비 η_f 는 η^{-1} 이므로, 주파수 또는 구조물 고유주기에 대한 확장 상사비는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{GS} = (\mu_f \eta_f) f_{ng} = (\mu^{-0.75} \eta^{-1}) f_{ng} \tag{13}$$

$$T_{GS} = \mu^{0.75} \eta T_{ng} \tag{14}$$

식(13)과(14)는 $\beta=0.25$ 인 조립토의 경우 식(11)과 동일하게 나타나며, 따라서 본 연구에서 구조물의 주기와 재료의 강성을 바탕으로 유도한 상사비의 적합성을 확인할 수 있다. Table 1은 주요 물리량에 대한 원심모형 실험의 상사비와 Iai 등이 제시한 확장상사비를 나타낸다. 이러한 상사비를 적용함으로써 대형 구조물에 대한 일반적인 원심모형실험의 상사비를 적용할 수 없는 경우 대안적인 방법으로 구조물의 응답, 변형 등을 합리적으로 평가할 수 있다.

4. 원심모형실험에 의한 검증

4.1 원심모형시험기

앞서 제시된 모델링기법의 검증실험은 회전반경 8.0 m, 최대용량 800 g-ton의 K-water 원심모형시험기를 이용하여 수행하였다(Fig. 1). 원심모



Fig. 1. 800g-ton geotechnical centrifuge

Table 2. Major specifications of the geotechnical centrifuge equipment

800 g-ton geotechnical centrifuge	
Platform radius	8.0 m
Payload dimensions	2.0 m(L) × 2.0 m(W) × 2.0 m(H)
Max. centrifugal acceleration	150 g
Max. payload	8,000 kg
Max. capacity	800 g-ton
Earthquake simulator (in-flight shaking table)	
Payload dimensions	1.8 m(L) × 0.8 m(W) × 0.8 m(H)
Max. payload	1,500 kg
Max. shaking acceleration	60 g (0.5g in prototype scale)
Frequency range	20 to 350 Hz
Operation environment	10 to 100 g centrifugal acceleration

형실험은 모형의 크기가 작고 축척이 클수록 재료적 특성과 실험 조건에 의한 오류 또는 오차의 가능성이 크며, 또한 소형 장비를 이용하여 회전반경이 작은 경우 비선형 인공중력장 분포로 인한 부정확성이 크게 나타날 수 있다 [16]. 본 연구에 사용한 장비는 2 m×2 m×2 m의 모형적재공간에 최대 8000 kg의 하중 적재가 가능한 세계적으로 가장 큰 시험기 중 하나로, 대형 지반구조물의 효과적인 모사가 용이한 장점을 갖는다.

모형담 하부에 지진하중을 작용하기 위한 서보-유압식(servo-hydraulic) 지진모사장치는 길이 1.8 m, 폭 0.8 m의 실험체 적재 공간을 보유한 대형 실험장치로서, 100 g 이하의 원심가속도 조건에서 원형 기준 0.5 g 이상의

단방향 수평지진하중을 모사가 가능하다. 진동하중은 정현파, 계측지진의 시간이력 등 다양한 종류를 사용할 수 있으며, 동적 균형제어(dynamic self balancing) 방식으로 정밀한 지진하중의 모사가 가능하다[17].

본 연구에 사용된 실험장비의 주요 사양은 Table 2와 같다.

4.2 변형된 Modeling of models 방법에 의한 검증

4.2.1 Modeling of models

모형실험기법의 적용성을 평가하기 위해서는 실제 구조물의 거동과 이를 모사하는 실험 결과의 적합성을 검증하여야 하며 원심모형실험에서는 상사비와 실험기법의 검증을 위하여 modeling of models 방법이 널리 이용된다. Modeling of models는 동일한 원형구조물을 모사하는 서로 다른 축척($1/N_1$, $1/N_2$)의 모형에 대하여 각각의 축척에 상응하는 원심가속도(N_1 , N_2)를 적용한 실험 결과를 비교, 원형으로 환산된 결과의 부합성을 판단함으로써 실험 기법과 상사비의 타당성을 검증할 수 있다[8]. 본 연구에서는 변형된 modeling of models 방법을 차용하여 제안된 실험 기법을 검증하고자 하였다. 실험 방법은 하나의 모형에 대하여 두 가지 원심가속도를 적용하고, 각각의 가속도 수준에서 측정되는 구조물의 고유주기의 비를 계산, 식 (10)의 타당성을 검증함으로써 확장상사비의 적합성을 평가하고자 하였다.

4.2.2 입력 진동 하중

확장상사비의 검증을 위하여 변형된 modeling of models 방법을 적용하고자 할 때 두 실험 조건의 원심가속도에 따라 입력하중의 주파수 특성 또한 변환하여야 한다. 일반적인 지진하중이력을 이용하는 경우 기초지반의 하중이력과 댐 정상부의 하중이력을 비교, system identification에 의한 고유진동특성을 산출하여야 하는데, 이러한 방법에 의하여 산정된 댐의 고유주기 측정은 경우에 따라 불분명할 수 있다[18]. 반면 전체 주파수 범위에서 일정한 진폭을 나타내는 white noise 형태의 하중을 적용할 경우, 정상부의 응답은 구조물의 주파수 응답특성을 직접적으로 나타내므로 별도의 계산 없이 구조물의 고유주기를 산정할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구에서는 특정 주파수 대역에서 band limited white noise와 같이 일정한 진폭을 나타내는 Ormsby wavelet을 입력 하중으로 이용하였다. Ormsby wavelet은 임의로 설정이 가능한 특정 주파수 밴드 내에서 동일한 푸리에 진폭(Fourier amplitude)를 나타내는 특성을 나타낸다[19]. Fig. 2는 본 연구에서 사용된 100 Hz에서 250 Hz까지의 주파수 밴드와 30 Hz의 ramp 구간을 갖는 Ormsby wavelet의 시간이력과 사다리꼴로 나타나는 주파수 특성을 나타낸다. 이러한 하중은 실험 과정에서 동일한 시간 이력에 대하여 원심가속도에 따라 진폭을 조정하여 적용하였다.

4.2.3 실험 모형

실험용 모형은 Fig. 3 과 같이 사력재료 축조된 가상의 제체를 가정하여 제작하였다. 해당 모형은 실험에 사용된 지진모사장치에서 이용 가능한 최대 크기의 강성 토조 내에 제작되었다. 모형 댐의 높이는 496 mm, 상하류

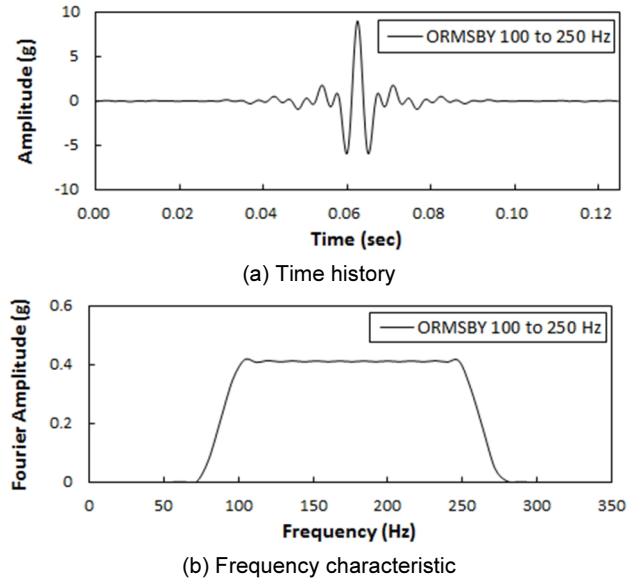


Fig. 2. Input motion for verification of modeling method (Ormsby wavelet)

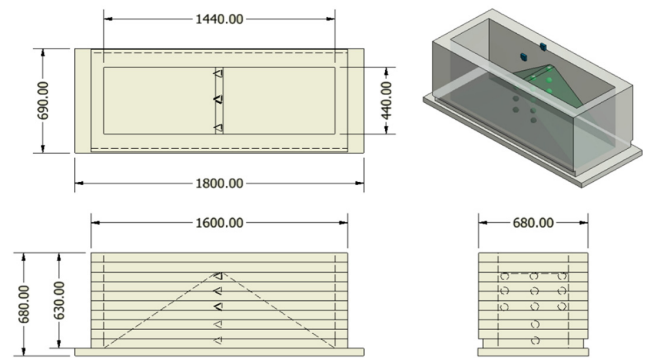


Fig. 3. Design of testing model

방향 길이는 1440 mm이며, 상하류 사면의 경사는 1:1.4로 비교적 가파르게 제작되었다. 이와 같이 가파른 사면으로 조성한 이유는 구조물의 고유진동수를 원심모형시험용 지진모사장치에서 구현 가능한 주파수 대역에 맞추기 위함이다. 댐의 응답은 제체 내에 총 13개의 가속도계를 매설하여 측정할 수 있도록 계획하였으며, 정상부 높이 H 를 기준으로 저면부 $0H$ 로부터 각각 $0.25H$, $0.5H$, $0.75H$, $1.0H$ 높이에서 응답을 측정하였다. Table 3는 모형 제작에 사용한 지반재료의 주요 특성을 나타낸다. 해당 재료는 콘크리트 배합용 자갈질 골재 중 최대입경 15 mm 이하의 재료만을 선별하여 준비하였으며, 최적함수비에 의한 최대건조단위중량에 대하여 다짐도 95%를 적용, 20.76 kN/m^3 의 건조단위중량으로 다짐하여 제체를 축조하였다. 실험용 제체는 가속도계의 매설깊이에 따라 전체 높이의 1/4 간격으로 구간을 나누고 각 구간의 부피를 계산, 이에 상응하는 무게의 재료를 다짐하여 축조하였다.

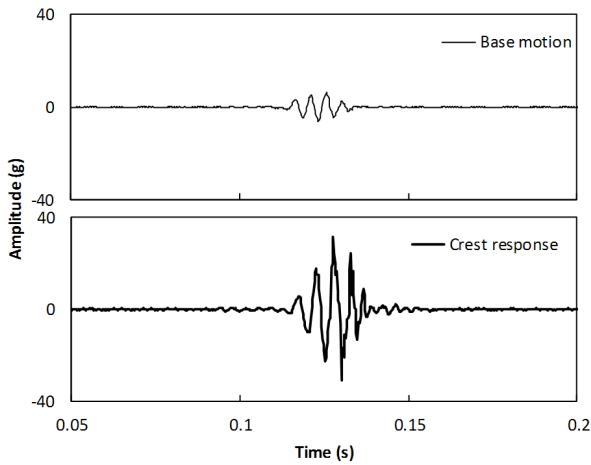
동적 원심모형실험은 15 g와 30 g 조건에서 수행하였으며, 각각의 실험에 의한 공진주파수를 비교함으로써 확장상사비의 적용성을 검증할 수 있다. 실험 시 입력진동하중의 최대가속도는 원심가속도의 40%, 즉 지진의 최대가속도(peak ground acceleration, PGA)를 0.4 g로 설정하였다. 실험

Table 3. Material properties of granular material used for the embankment model

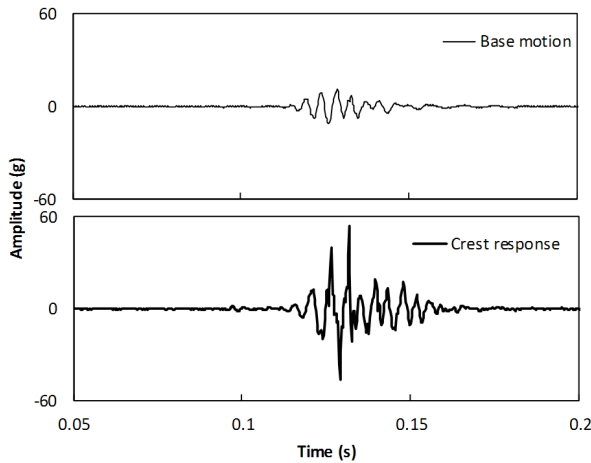
D_{50}	C_U	G_S	USCS	$\gamma_{d,max}$	w (OMC)	γ_d
3.09 mm	29.22	2.70	SP	21.86 kN/m^3	6.3	20.76 kN/m^3

Table 4. Material properties of granular material used for the embankment model

ID	g-level	Shaking level (g_c/g_s)	Shaking acceleration	1:30 scale	
				k	N
Test #1	15 g	0.4	6 g	2	15
Test #2	30 g	0.4	12 g	1	30



(a) 15 g



(b) 30 g

Fig. 4. Input motion and crest response at different g-levels

조건은 Table 4에 정리하였으며, 해당 모형실험이 축척 1:30의 원형구조물을 모사한다고 할 경우 각각의 조건에 적용되는 확장상사비의 변수 k 와 N 을 표시하였다.

4.2.4 실험 결과

Fig. 4는 두 가지 가속도 조건에서 수행한 실험 중 모형 저면에 작용된 입력하중과 이에 의한 구조물 정상부 응답의 계측 결과를 나타낸다. 가속도의

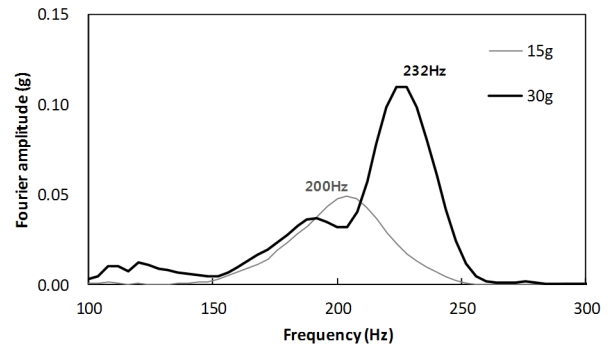


Fig. 5. Frequency responses of crest motions at different g-levels

최대 진폭을 기준으로 증폭 특성을 살펴보면 15 g 가속도 조건에서는 최대 6.6 g (원형 기준 0.44 g)의 입력하중에 대하여 정상부 최대응답이 31.4 g로 약 4.7배, 30 g 조건에서는 11.0 g (원형 기준 0.37 g)의 입력하중에 대하여 54.3 g로 약 4.9배의 비슷한 증폭비를 나타낸다. 한편 정상부의 응답을 살펴보면 최대진폭이 나타나는 부분에서 신호의 왜곡 현상이 발생하는데, 이는 정상부의 증폭으로 인한 응답이 원심가속도보다 큰 상황에서 발생하는 자갈 입자의 운동(rolling)이 진동 형태로 계측된 것으로 판단된다.

Fig. 5는 두 실험 조건에서의 정상부 응답에 대한 spectral density를 비교하여 나타낸다. 입력 하중은 band limited white noise 특성을 나타내므로 정상부의 응답은 모형 댐의 주파수응답특성을 직접 나타낸다. 실험 모형의 고유주파수는 15 g 상태에서 200 Hz, 30 g 상태에서 232 Hz를 나타내며 두 고유주파수의 비는 1.16이다. 원심가속도가 두 배로 증가할 때 구조물의 고유주파수는 이론적으로 식 (10)과 같이 $2^{0.25}$ (=1.19)배로 증가하는데 이는 실험 결과와 약 2.5% 수준의 차이를 나타낸다. 따라서 본 연구에서 제시한 모델링 방법 또는 상사비는 제한된 원심가속도 조건에서 실제 구조물의 거동을 정량적으로 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

4.3 사력댐에 대한 실험 방법의 적용

4.3.1 실험 모형

앞서 제시한 실험방법의 실제 구조물에 대한 적용성을 살펴보기 위하여 본 연구에서는 현재 운영중인 국내 사력댐의 모형을 제작, 실험을 수행하였다. 대상 댐은 1965년 준공된 높이 46 m, 상하류 방향 길이 300 m의 중앙

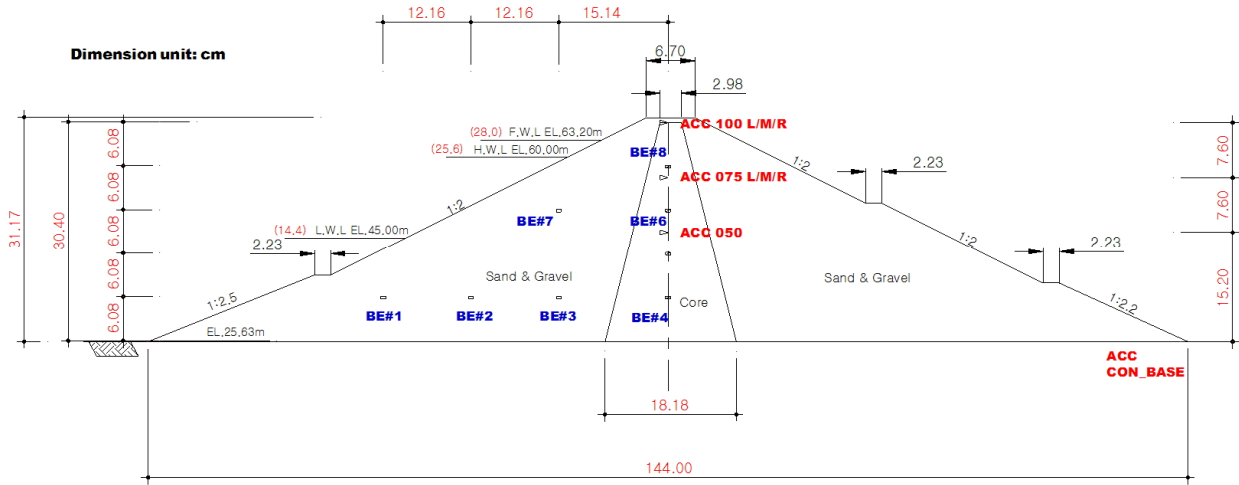


Fig. 6. Design of an ECRD testing model for seismic test

차수벽형 록필댐이며 상류와 하류 사면의 경사는 1:2.0으로 건설되었다. Fig. 6은 해당 댐에 대한 1:135 축척의 모형 제작을 위한 단면도를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 지진모사장치는 100 g 이하의 원심가속도에서 사용 가능하고 낮은 가속도 조건일수록 기계진동에 의한 잡음의 영향이 적으므로, 45 g 가속도에서 $k(\mu) = 3, N(\eta) = 45$ 에 상응하는 상사비를 고려하여 실험을 계획하였다. 해당 실험은 댐의 고유주기를 바탕으로 동적응답특성을 분석하여 실험방법의 적합성을 평가하고자 계획되었으므로, 구조물의 거동을 단순화하고 모형 제작의 용이성을 고려하여 중앙 차수벽과 록필존만을 모사하였다. 중앙 차수벽은 소성지수 14.5의 점토질 재료를 함수비 18.2%, 15.2 kN/m³의 건조단위중량으로 다짐하여 제작하였고, 록필존은 최대입경 9.5 mm 이하의 통일분류법상 SW로 분류되는 자갈섞인 모래를 건조단위중량 19.8 kN/m³(최적함수비 6.3%)에 맞추어 조성하였다. 체체의 축조 및 다짐은 내부에 매설되는 계측기의 위치를 고려하여, 총 4개 층으로 나누어 시공하였다. 실험 중 모형댐 기초에 작용하는 하중과 댐의 응답을 계측하기 위하여, Fig. 6과 같이 총 8기의 가속도계를 설치하였으며, 체체 내부의 위치별 전단파속도 측정을 위한 벤틀리엘리먼트, 정상부의 침하량 계측을 위한 레이저 변위센서 등을 설치하였다. 입력 지진은 국내 건설분야 실무에서 널리 이용되는 장주기 특성의 Hachinohe 지진파와 단주기 특성의 Ofunato 지진파를 확장상사비에 따라 변형, 원형 기준 최소 0.08 g에서 국내 내진설계기준의 2배에 해당하는 0.44 g까지 PGA 수준을 변화하며 실험을 진행하였다.

4.3.2 실험 결과의 분석

Fig. 7은 동적 원심모형실험 중 모형 댐 구조물의 저면에 작용한 두 종류의 입력지진하중과 이에 대한 정상부의 응답 이력을 나타낸다. 기초지반의 지진하중 대비 정상부의 증폭특성을 PGA의 증가비로 살펴보면 Fig. 7 (a)의 Hachinohe 지진파의 경우 약 1.69배 증가하는 것으로 나타났으며, Fig. 7 (b)의 Ofunato 지진파의 경우 약 1.87배 증가하는 것으로 나타난다. 이러한 증폭특성은 댐의 구조적 응답특성에 기인하는데, 구조물의 응답특성을 대표하는 고유응답주기는 기초에서 계측된 입력지진하중과 정상부 계측이

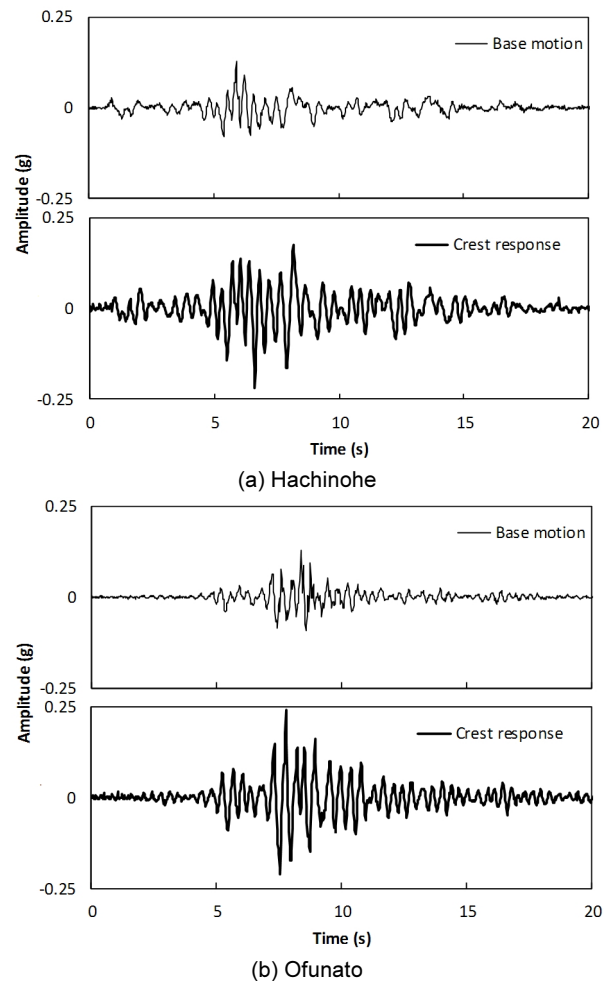


Fig. 7. Acceleration history at base and response at crest subjected to different earthquake input motions

력에 대한 응답스펙트럼의 비율이 나타내는 침투값을 바탕으로 신뢰성있게 산정할 수 있다[18]. Fig. 8은 Fig. 7의 계측 데이터를 활용하여 두 종류의 지진하중에 대한 기초지반과 정상부 응답 사이의 응답스펙트럼비를 나

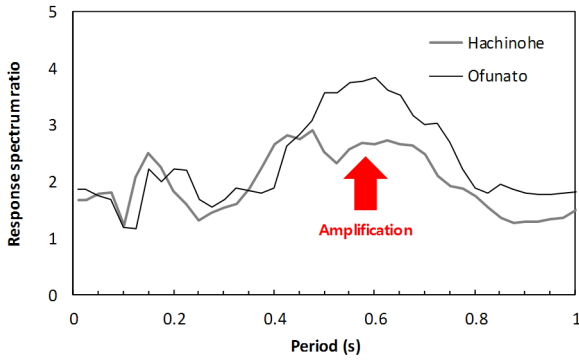


Fig. 8. Ratio of response spectra between base input motion and crest response

타낸다. 해당 결과에서는 지진하중의 장주기(Hachinohe) 혹은 단주기(Ofunato) 특성과 관계 없이 유사한 응답스펙트럼의 증폭 특성을 나타내는데, 0.56초 주기에서 최대의 응답스펙트럼비가 나타남을 알 수 있다. 기존에 일본 사력댐과 국내 사력댐에 대하여 미소지진 계측기록을 활용한 댐의 고유주기를 분석한 연구 결과를 살펴보면, 실험 대상 구조물과 유사한 높이 50 m의 사력댐의 경우 고유주기가 약 0.3초에서 0.5초 사이에 분포한다 [18, 20]. 일반적으로 조립질 지반재료의 경우 최대입경이 감소함에 따라 재료의 강성 또한 작아지고[21], 실험 시 작용한 하중이 기존 연구결과에서 이용한 미소지진 데이터에 비해 커 재료의 비선형 거동이 고려될 수 있음을 감안할 때, 해당 실험 결과는 실제 구조물에 비하여 축조재료의 강성을 작게 평가할 수 있다. 이러한 특성을 고려할 때, 이러한 실험 결과는 실제 댐의 고유주기와 동적응답특성의 평가에서 의미있는 결과를 나타낸 것으로 보이며, 따라서 본 연구에서 제시한 모델링 및 실험 방법은 실험 댐의 지진응답특성 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 실험적 기법에 의한 지반구조물의 지진응답특성을 평가하고자 할 때, 일반적인 상사법칙을 활용하여 동적 원심모형실험을 수행할 수 없는 대규모 사력댐과 같은 경우 활용 가능한 대안적 실험 방법을 제시하였다. 이에 대한 이론적 적합성을 확인하고 실제 실험에 대한 적용성을 검증하고자 일련의 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 대형 사력댐의 지진응답특성을 평가하고자 원심모형실험을 수행하는 경우, 구조물의 규모 또는 실험장비 사양의 한계로 일반적인 상사법칙을 적용한 실험이 어려울 수 있으므로 대안적 실험기법의 적용이 필요하다. 실제와 동등한 기하적, 재료적 특성에 따라 제작한 모형을 이용하여 축척보다 작은 원심가속도 조건에서 지진모사실험을 수행할 때, 구조물 내의 응력분포를 바탕으로 구조물의 응답 특성을 이론적으로 분석한 결과, 실제 축척과 원심가속도를 동시에 고려하는 상사법칙의 적용이 필요하며, 결과적으로 기존 연구에서 제시한 확장상사비와 동등한 방법으로 실험을 설계하는 것이 합리적이다.
- 2) 이러한 모델링 방법의 검증을 위하여 균질한 사력댐 모형을 이용하여 변형된 modeling of models 방법에 따라 검증실험을 실시하였다. 두

가지 원심가속도 조건에서 band-limited white noise와 동등한 주파수 특성을 나타내는 Ormsby wavelet을 적용하여 동적 실험을 실시한 결과, 원심가속도에 따른 구조물의 고유주기는 확장상사비를 고려할 때 동등한 결과를 나타내었다. 이를 바탕으로 제안된 실험 및 모델링 방법의 적합성을 검증하였다.

- 3) 이러한 연구 성과를 활용한 대형 사력댐의 내진성능평가 방법의 실무적 적용성을 검증하기 위하여 현재 국내에 운영중인 사력댐을 대상으로 1:135 축척의 모형을 제작하여 동적 실험을 수행하였다. 장주기, 단주기 특성을 나타내는 두 가지 지진하중에 대한 모형구조물의 증폭 특성을 응답스펙트럼비에 의한 댐의 고유주기 산정 방법을 바탕으로 평가한 결과, 하중 종류에 상관 없이 일정한 고유주기 특성을 나타내었으며, 이는 기존 연구결과에서 제시한 사력댐의 고유주기 특성과 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 모델링 방법은 실제 댐의 응답특성을 모사, 정량적 거동 특성의 평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 대형 댐에 대한 합리적인 동적 원심모형실험 방법을 제시하기 위하여 기초적인 상사법칙을 중점적으로 다루었다. 실무 차원에서의 지진에 대한 실제 댐의 거동특성 평가에서는 변형량과 주요 파괴모드에 대한 안정성을 중점적으로 검토하는데, 이는 축소모형실험에서 이용하는 상사재료의 강도와 강성에 큰 영향을 받는다. 따라서 대형 사력댐의 정량적 내진성능평가를 위한 원심모형실험의 적용성을 높이기 위해서는 현장조건과 모형실험의 제약 등을 고려한 합리적인 분석기법 등의 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.[MPSS-자연-2015-78]

/ REFERENCES /

1. Zhang JM, Yang Z, Gao X, Zhang J. Geotechnical aspects and seismic damage of the 156-m-high Zipingpu concrete-faced rockfill dam following the Ms 8.0 Wenchuan earthquake. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2015;76:145-156.
2. Matsumoto N, Sasaki T, Ohmachi T. The 2011 Tohoku earthquake and dams, Proc. Int. Symp. On Dams and Reservoirs under Changing Challenges, c2011.
3. Korean Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Dam design code, c2011.
4. Ng CWW, Li XS, Van Laak PA, Hou DYJ. Centrifuge modeling of loose fill embankment subjected to uni-axial and bi-axial earthquake, *Soil Dyn Earthq Eng.* 2004;24(4):305-318.
5. Peiris LMN, Madabhush SPG, Schofield AN. Centrifuge modeling of rock-fill embankments on deep loose saturated sand deposits subjected to earthquakes, *J Geotech Geoenviron.* 2008;134(9):1364-1374.
6. Sharp MK, Adalier K. Seismic response of earth dam with varying

- depth of liquefiable foundation layer. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2006; 26(11):1028–1037.
7. Kim MK, Lee SH, Choo YW, Kim DS. Seismic behaviors of earth–core and concrete–faced rock–fill dams by dynamic centrifuge tests. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2011;31(11):1579–1593.
 8. Ko HY. Summary of the state–of–the–art in centrifuge model testing. *Centrifuges in Soil Mechanics*. Craig, James and Schofield Eds, Balkema, Rotterdam, c1988: p. 11–18.
 9. Gazetas G. Seismic response of earth dams: some recent developments. *Soil Dyn Earthq Eng.* 1987;6(1):2–47.
 10. Garnier J, Gaudin C, Springman SM, Culligan PJ, Goodings D, König D, Kutter B, Phillips R, Randolph MF, Thorel L. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modelling. *Int. J. Phys. Modelling Geotech.* 2007;7(3):1–23.
 11. Iai S, Tobita T, Nakahara T. Generalized scaling relations for dynamic centrifuge tests. *Geotechnique.* 2005;55(5):355–362.
 12. Bray JD, Travasarou T. Simplified Procedure for Estimating Earthquake–Induced Deviatoric Slope Displacements. *J Geotech Geoenviron.* 2007;133(4):381–392.
 13. Cho GC, Doods J, Santamarina JC. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands. *J Geotech Geoenviron.* 2006;132(5):591–602.
 14. Seed HB, Idriss IM. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. Report No. EERC 70–10. Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California Berkeley, California. c1970; p. 1–43.
 15. Iai S, Sugano T. Soil–structure interaction studies through shaking–table tests. *Proc. 2nd Int. Conf. on Earthquake Geotech. Engrg.* Lisbon, c1999. p. 927–940.
 16. Taylor RN. *Geotechnical centrifuge technology*. Blackie Academic, London, UK, c1995.
 17. Kim DS, Lee SH, Choo YW. Self–balanced Earthquake Simulator on Centrifuge and Dynamic Performance Verification. *KSCE Journal of Civil Engineering.* 2013;17(4):651–661.
 18. Ha IS. Evaluation for Fundamental Periods of Domestic Rockfill Dams with Micro–earthquake Records. *Journal of the Korean Geoenvironmental Society.* 2011;12(6):53–60.
 19. Ryan, H, Ricker, Ormsby, Klauder, Butterworth – A Choice of Wavelets. *CSEG Recorder.* 1994;19(7):8–9.
 20. Okamoto S. *Introduction to Earthquake Engineering*. 2nd Edition. University of Tokyo Press. c1984. p. 466–477.
 21. Ha IS, Kim NR. Dynamic Deformation Properties of Coarse Granular Materials with Respect to Gradation Characteristics. *Journal of the Korean geotechnical society.* 2013;29(8):5–14.