

진동대 시험을 통한 Fill Dam의 내진 안정성 평가

Evaluation of the Seismic Stability of Fill Dam by Shaking Table Tests

윤 원 섭¹ Yoon, Won-Sub
채 영 수^{2*} Chae, Young-Su
박 면 규³ Park, Myeon-Gu

ABSTRACT

In order to understand evaluation of the seismic stability of a fill dam, we made chambers of 1:100, 1:70, and 1:50 (the ratio of the miniature), considering the law of similarity based on drawings of three representative cross sections. And we measured an increase in acceleration, excess pore water pressure, and vertical/horizontal displacement after applying Hachinohe wave (long period), Ofunato wave (short period), and artificial wave, complying with the domestic standards, in order to evaluate the stability and interaction between the ground, the structure, and fluids based on the measurements. As a result, we could observe that displacement of the target cross section was relatively small compared to the allowed level of 30 cm, ensuring proper stability for an earthquake. Regarding the acceleration measurements, the increase rate was 20% for Hachinohe wave and Ofunato wave but 30% for the artificial wave. With respect to the excess pore water pressure, it was lower than 1 (which is the permissible ratio for liquefaction) ensuring proper stability as well.

요 지

본 연구에서는 흙 댐 구조물의 지진저항 특성을 파악하기 위하여 3가지 대표단면을 기초로 하여 축소모형의 비율에 해당하는 상사법칙을 고려하여 각각 1:100, 1:70, 1:50으로 토조를 제작하였다. 그리고 국내 설계기준에 준하여 장주기인 Hachinohe파, 단주기인 Ofunato파, 인공지진파를 가진하여 각 단면에 대해 가속도변화, 과잉간극수압, 수직 및 수평변위를 측정하고, 측정된 결과를 통하여 지반-구조물-유체의 상호작용에 따른 안정성을 평가하였다. 시험결과 시험 대상 단면의 변위는 지진 시 허용변위량 300mm에 비해 비교적 작은 변위로 지진 시 안정성을 확보하였다. 가속도 측정결과 Hachinohe파, Ofunato파는 할증률 20%정도로 평가되었지만 인공지진파는 할증률 30%정도로 평가되었다. 과잉간극수압비 측정결과 액상화 평가기준인 과잉간극수압비 1이하로 모형단면은 액상화에 대해 안정성을 확보하였다.

Keywords : Fill dam, Seismic stability, Shaking table tests

1. 서 론

최근 세계적으로 발생하는 지진으로 인하여 지반 및 구조물의 동적 메커니즘에 대한 관심이 높아지면서 이 분야에 대한 여러 가지 이론 및 해석적 기법이 연구, 개발되고 있다. 이런 영향으로 인하여 국내에서 발주된 여러 토목구

조물의 설계에서 내진설계의 접근이 급속히 진행되고 있다. 하지만 이에 따른 해석적 기법이나 관련 프로그램의 정확한 적용은 미흡한 실정이다. Meymand(1998)는 실내 시험에서 파악할 수 없는 지반-구조물 상호작용 같은 복합적인 메커니즘에 대해서 진동대 시험을 통하여 연구를 하였고, 국내에서는 진동대 시험을 통한 구조물의 내진특성

1 비회원, 수원대학교 토목공학과 공학박사 (Non-member, Ph.D, Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon)

2* 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Suwon, E-mail: yschae@suwon.ac.kr)

3 비회원, 청석엔지니어링 전문 (Non-member, Executive Director, Chung-Suk Engrg.)

연구로 박인준 등(2006)이 이 지반 및 구조물의 내진성능에 대한 다양한 고찰을 위하여 2차원 및 3차원 전응력 해석으로 변위와 응력을 검토하고, 중요지점에 대한 액상화 가능성 평가를 위하여 Finn and Byrne Model을 이용한 2차원 유효응력해석을 수행하였다. 신설되는 저수지 댐에 대하여 단주기파, 장주기파 및 인공지진파로 Shake 프로그램을 이용한 지진응답해석을 수행하여 그 결과를 활용해 저수지 댐의 지반 액상화에 대한 안정해석을 수행하였다. 전남수 등(2006)은 여러 가지 토목구조물에 대하여 다양한 축소비율로 진동대 시험과 전산해석을 실시하여 1:50 이하인 상사단면이 실제 현장에서의 거동을 모사하는데 더 높은 신뢰성을 제공하는 것으로 판단하였다. 황성춘(2005)은 진동대 시험을 이용하여 Hachinohe 지진 및 El Centro 지진의 2가지 설계 지진파를 이용하여 진동대 지반 최대 가속도에 0.3g~0.9g까지 적용하여 콘크리트 댐의 구조적 안정성을 판단하였다. 그리고 신은철 등(2011)은 지진하중에 의한 방수제 구조물의 내진성능 평가를 위한 실험적 연구에서 방수제 구조물 및 하부지반에 대하여 1/100 축소모형의 비율을 갖는 토조를 제작하여 설계지진 가속도 0.154g의 진동하중 적용시 진동대 모형 실험을 통하여 구조물의 거동특성과 내진 안정성을 평가하였다.

따라서 본 연구는 Fill Dam 대표단면에 대한 진동대 모형시험을 수행하여 지진하중 발생 시 축소모형의 가속도 증폭과 동적변위 등을 계측함으로써 지진하중에 대한 구조물-지반의 거동을 분석하여 내진 안정성을 분석하였다. 이를 위해 실제 현장의 현장상태 및 조건을 축소 비율에 따라 유사하게 구성하여 시험을 실시하였다. 시험을 실시한 단면은 3단면으로 각 단면의 표준단면도를 기반으로 축소모형을 제작하였으며, 모형단면의 형성을 보다 정확히 하고, 지진 후의 변화된 단면 형상을 쉽게 파악하기 위하여 토조 바깥쪽 측면에 테이프를 사용하여 상사율에 의거하여 축소한 단면 형상을 모사한 가이드 라인을 붙였다. 조성된 모든 모형지반에 대해 Hachinohe파(장주기), Ofunato파(단주기) 및 인공지진파에 대해 시험하였다. 각 단면에 대해 가속도변화, 과잉간극수압, 수직 및 수평변위를 측정하고, 측정된 결과를 통하여 지반-구조물-유체의 상호작용을 파악하여 안정성을 평가하였다.

2. Fill Dam의 내진설계 및 모형시험

2.1 내진설계기법

현재 우리나라에서의 댐에 대한 내진설계방법은 지진력을 지진계수에 의한 하중의 관성력과 동수압으로 대처하고, 정역학적 방법으로 해석하는 진도법을 기본으로 한다. 이 방법은 이미 경험적으로 안정적인 방법임이 입증되고 있다. 이 방법은 간편하고 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나 댐의 동적 특성을 고려하지 않고, 지반과 구조물의 상호작용관계인 설계진도와 최대응답가속도의 관계가 명백하지 않다. 한편 최근 선진국에서는 지진파에 의한 댐의 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법이 많이 개발되어 설계에 적용하고 있다. 그러나 이 방법도 댐 설계에 적용할 때 설계지진파형의 설정, 댐 축조재료의 동적인 응력왜곡 특성, 해석방법으로서의 3차원적 응답이나 지하 소산규정, 파괴규준 및 파괴현상의 모의와 같은 사항의 명확한 규명에 문제점이 있어 그 적용에 신중해야 한다.

특히, 우리나라의 경우 빈약한 지진 해석자료 및 연구 미흡으로 여러 가지 불명확한 사항에 대한 가정이 불가피하여 설계기준으로 동적해석방법을 댐의 내진설계기준에 규정하기에는 무리가 따른다. 따라서 지진에 의한 동역학적 거동특성이 잘 반영된 신뢰성 있는 입력자료의 확보가 곤란한 경우 종래의 정역학적 설계 방법인 진도법을 내진설계의 기본으로 한다.

2.2 지진의 에너지

지진규모가 등급으로 측정되는 것과 같이 지진규모의 크기와 지진 시 방출되는 에너지의 상호관계를 찾는 것 또한 중요하다. 지진의 에너지는 크게 두 가지 방법으로 산정할 수 있다. 첫 번째 방법은 지진의 규모를 이용하여 개인적인 지진 에너지의 양을 산정하는 것이다. 지진의 규모는 지진의 상대적 크기를 측정하는 단위로 국지 규모(M_L), 표면파 규모(M_S), 실체파 규모(m_b), 모멘트 규모(M_W)가 있다(Kramer, 1996). 표면파 규모를 이용해 지진의 에너지를 산정하는 방법은 식 (1)과 같다. 그리고 식 (2)는 실체파 규모를 이용한 에너지 산정식이다. 에너지의 단위는 에르그(erg)이며, 지진규모가 1이 증가하면 에너지는 대략 30배 정도 증가한다(Gutenberg and Richter, 1956).

$$\log E = 11.8 + 11.5M_s \quad (1)$$

$$\log E = 5.8 + 2.4m_b \quad (2)$$

두 번째 방법은 지진이 발생하였을 때 지반의 흔들림은 지표면에 설치된 지진계에 의해 시간에 따라 가속도 값이 기록되고, 이를 이용해서 지진파의 에너지를 산정하는 것이다. 지진계에 의해서 기록된 가속도 시간이력을 이용하여 에너지를 구하며, 지진계에서 주어진 시간 t에서 지진계의 전체에너지(TE)는 식 (3)과 같다.

$$TE = \frac{1}{2} m \dot{y}(t)^2 + \frac{1}{2} k y(t)^2 \quad (3)$$

여기서 y(t) : motion relative to the ground

m : 지진계의 질량

k : 지진계의 stiffness

2.3 모형시험에 대한 상사법칙

모형시험을 통해 지반구조물의 동적 거동을 정량적으로 평가할 때에 중요한 점은 원형의 거동과 모형의 거동이

같아야 하고, 원형과 모형에서 평형방정식 등과 같은 기본 법칙이 만족되어야 한다는 것이다. Iai(1989)는 지반-구조물-유체 시스템에 대한 평형방정식, 구성법칙, 변위와 변형을 관계와 같은 기본방정식을 이용하여 지반-구조물-유체 시스템에 대한 상사법칙을 연구하였다. Iai(1989)가 제안한 상사법칙으로 건조한 흙입자와 대한 기본방정식은 식 (4), 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$\text{평형방정식 } L^T \sigma + \rho g = \rho \ddot{u} \quad (4)$$

$$\text{변위-변형률관계 } d\epsilon = L du \quad (5)$$

$$\text{구성법칙 } d\sigma = D d\epsilon \quad (6)$$

위의 기본방정식으로부터 Iai(1989)가 유도한 상사법칙은 표 1과 같다. 진동하중하에서 포화된 흙의 거동은 두가지 형태로 분류된다(Whitman and Liao, 1985). 첫째로 반복 유동성 거동(cycle mobility type)은 진동하중이 가해지는 동안에 흙의 변형이 계속되다가 진동이 멈추는 순간에 변형도 멈추는 거동형태이며, 둘째로 변형률 연화 거동(strain softening type)은 진동하중이 가해지는 동안에 흙의 변형이 계속되고, 진동이 멈춘 후에도 변형이 계속 발생하는 거동 형태이다.

표 1. 진동대 모형시험을 위한 주요 상사법칙(Iai, 1989)

물리량	원형과 모형사이의 크기관계			
	일반화된 원형과 모형사이의 크기관계	실제 적용하는 원형과 모형사이의 크기관계		
		제1형태 $\lambda_\rho = 1$	제2형태 $\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$	제3형태 $\lambda_\epsilon = 1, \lambda_\rho = 1$
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
강성도	$\lambda \lambda_\rho / \lambda_\epsilon$	$\lambda / \lambda_\epsilon$	$\lambda^{0.5}$	λ
투수계수	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5} / \lambda_\rho$	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
간극수압	$\lambda \lambda_\rho$	λ	λ	λ
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

흙의 변형이 반복 유동성 거동을 보이는 경우 지반-구조물 시스템의 동적거동을 이해하기 위해서는 변형률에 대한 상사비 λ_ϵ 을 고려하는 것이 매우 중요하다. 모형지반의 전단파 속도를 알 때에는 변형률에 대한 상사비 λ_ϵ 은 식 (7)에 의해 결정된다(제1형태). 그렇지 않다면 전단탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다는 가정 하에 변형률에 대한 상사비 λ_ϵ 을 식 (8)로 구할 수 있다(제 2형태).

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[\frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2 \quad (7)$$

여기서, $(V_s)_m$ 과 $(V_s)_p$ 은 각각 모형지반과 원형지반의 전단파 속도이다

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5} \quad (8)$$

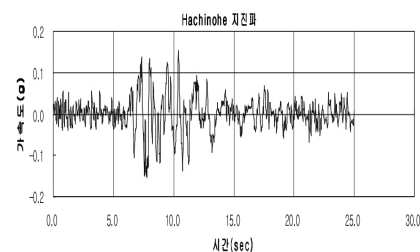
2.4 시험 입도의 조정 방법

시험입도의 조정은 시험기의 크기와 그에 따른 사용재료의 최대입경을 조정하고, 최대입경 변화에 따른 입도를 만들어 실제 축조재료의 물리적 특성 및 역학적 특성이 잘 반영되도록 하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 실험 입도의 조정 방법으로 “전두입도” 조정법을 사용하였다. 전두입도는 실내시험 입도에 있어서의 최대입경 이상의 재료를 원입도에서 선별 제거한 입도를 말하며 정의는 식 (9)와 같다.

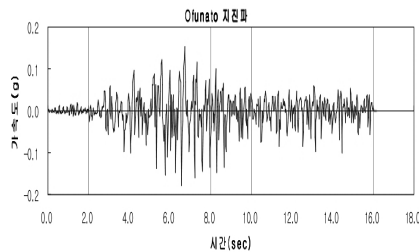
$$P_{D1} = \frac{P_{DB1}}{(1-\beta)} \quad (9)$$

표 2. 실지진 기록에 의한 지진가속도

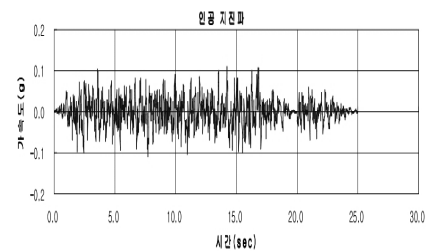
지진형태	제 원	진도	최대가속도
Hachinohe	1968년 3월 16일에 Tokachi 앞바다에서 발생	7.9	0.170g
Ofunato	1978년 6월 12일에 Miyagi 현의 앞바다에서 발생	7.4	0.161g



(a) Hachinohe Type 지진기록



(b) Ofunato Type 지진기록



(c) 인공지진기록

그림 1. 가속도 이력곡선

여기서, P_{D1} : 전두입도에 있어서의 통과율

P_{DB1} : 최초로 생각되는 입도에 있어서의 입경 통과율

β : 전두입도 최대입경 보다 큰 부분이 최초 입도로 생각되는 입도에 포함되는 비율

2.5 가속도 시간이력 산정

구조물의 동적해석을 위한 가속도 시간이력은 “내진설계기준연구(II)”에서 정의하고 있는 가속도 시간이력의 기본요건(국토해양부, 1997)을 갖추어야 한다. 지반가속도, 속도나 변위의 시간이력으로 지반운동이 표현될 수 있고, 공간적인 모형이 필요할 때 지반운동은 동시에 작용하는 3개의 가속도 성분으로 구성되어야 한다. 구조물의 내진 설계 시 사용할 수 있는 실제의 지진기록으로는 1968년 Tokachi-Oki와 1978년 Miyagi-Ken-Oki 지진발생 시 Hachinohe항과 Ofunato항에서 조사된 가속도 시간이력을 들 수 있다. 상기의 지진기록은 일본에서 구조물의 내진설계에 가장 많이 이용되는 기록이다. 내진설계 시 상기의 지진기록과 같은 실제의 기록을 이용하여 동적해석에 사용할 수 있다. 그러나 구조물을 시공하고자 하는 지역의 실제 지진기록이 존재하지 않는 상황에서 타 지역에서의 지진기록으로 설계를 하는 것은 무리가 있다. 따라서 해당 부지의 지역적인 특성을 반영하는 인공적인 지진기록을 작성하여 내진설계에 반영하는 것이 필요하다. 표 2는 실지진 기록에 의한 지진가속도 제원이고, 그림 1은 지진의 가속도 이력곡선이다.

3. 상사법칙을 적용한 진동대시험

3.1 시험장치 및 조건

3.1.1 진동대시험장치

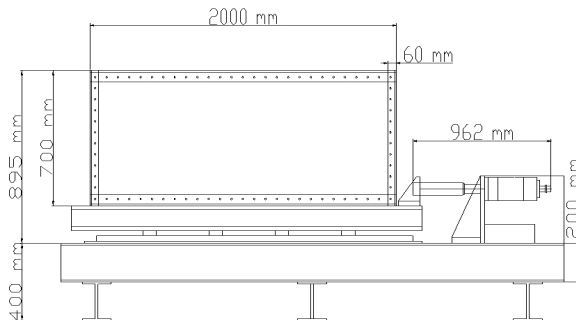
본 연구에서는 최근 댐체 높이기 사업과 관련되어 실제 시공계획된 Fill Dam 대표단면에 대해 지진하중을 발생시켜 진동대 모형실험을 수행하였다. 시험을 통해 축소모형의 가속도 증폭과 동적변위 등을 계측함으로써 지진하중에 대한 구조물-지반의 상호작용을 정량적으로 분석하여 구조물의 안정성을 평가하였다. 이를 위하여 실제 적용된 현장상태 및 조건을 축소 비율에 따라 유사하게 구성하여 시험하였다. 본 연구에 사용한 시험기는 GEO TM사의 진동대시험장치를 사용하였으며, 유압식 일축 실린더방식으로 최대시험하중 50kN, 최대가속도 1g로 가진할 수 있는 시험장치이다. 표 3과 그림 2는 시험에 사용된 시험기의 제원과 시험장치이다.

3.1.2 계측기

진동대시험은 지진하중 발생 시 구조물의 수평 및 연직 변위량과 가속도의 변화를 측정하기 위해 수평 및 수직 변위계, 가속도계를 설치하여 거동분석을 실시하였으며, 과

표 3. 진동대시험장치 제원

구 분	내 용
최대시험하중	50kN
최대가속도	1g
최대주파수	10Hz
토조 길이	2000mm
토조 높이	700mm
토조 폭	600mm



(a) 진동대시험장치 단면

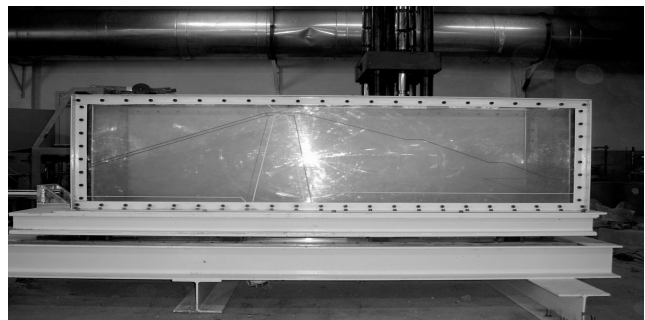
잉간극수압 발생으로 인한 영향을 검토하기 위해 간극수압계를 설치하여 지진동 발생 시 간극수압의 변화를 분석하였다. 이 연구에 사용한 간극수압계는 최대 50kPa의 수압까지 측정이 가능하며, LVDT는 KYOWA사의 제품으로 최대변위 50mm까지 측정이 가능하다. 또한, 가속도계는 최대 1g의 가속도를 측정할 수 있는 PCB사의 제품이고, data acquisition system은 GEO TM사에서 제작하였으며, 각각의 계측센서와 연결하여 계측 값들을 측정하였다.

3.1.3 진동대 시험조건

축소모형을 제작하여 진동대 시험에서 작용 지진력의 크기 및 주파수 성분을 합리적으로 정하는 것이 필요하다. 대상구조물은 내진 1등급~2등급 구조물로서 붕괴방지수준에서 단면에 따른 설계최대 가속도를 기반암 운동으로 de-convolution하여 얻은 기반암 최대 가속도 크기의 지진력을 정현파의 형태로 재하한다. 그러나 Yoshimi and Oh-oka(1973)는 지진파의 주파수특성에 대해서는 세립분을 포함하지 않는 모래가 비교적 낮은 구속압에서 입자파쇄를 일으키지 않고, 전단되는 경우는 전단탄성계수, 감쇄정수, 내부마찰각 등의 역학적 성질은 진동수 혹은 변형률 속도에 의해 큰 영향은 받지 않는다는 것을 실내시험에 의해 밝혔다. 더욱이 지진하중과 같이 문제가 되는 진동수 범위가 한정되어지면 진동수의 영향은 무시해도 상관없다. 따라서 모래의 액상화 저항에 대해서도 진동수의 영향은 작다고 유추되어 진동대시험 시에는 최대 가속도 크기의 지진력을 가지는 정현파를 재하하였다.

3.2 설계지반운동수준 결정

설계지반운동수준은 시험대상 단면의 중요도, 성능수준에 따라 지진재해도를 이용하는 방법과 지진구역을 이용



(b) 진동대시험장치 사진

그림 2. 진동대시험장치

표 4. 각 단면에 적용된 지반운동수준

구 분	지진재현 주 기	구역계수에 의한 기반암 노두 가속도			지진재해도에 의한 기반암 노두 가속도	적 용 가속도
		구역계수 (1)	위험도계수 (2)	기반암 노두 가속도 (1)×(2)		
CASE-I	1000년	0.11g	1.4	0.154g	0.120g	0.154g
CASE-II	1000년	0.11g	1.4	0.154g	0.120g	0.185g
CASE-III	500년	0.11g	1.0	0.110g	0.090g	0.096g

표 5. 실제 구조물-진동대 모형시험에서의 상사법칙

물 리 량	상사비(제2형태)	1/100모형의 상사비 (CASE-I)	1/70모형의 상사비 (CASE-II)	1/50모형의 상사비 (CASE-III)
길이	λ	100	70	50
시간	$\lambda^{0.75}$	31.6	24.2	18.8
가속도	1	1	1	1
변위	$\lambda^{1.5}$	1000	585.6	353.5
응력/간극수압	λ	100	70	50
변형률	$\lambda^{0.5}$	10	8.36	7

하여 결정하는 방법으로 결정하였다. 시험대상 단면은 모두 지진구역 I에 해당되는 구역으로 구역계수 0.11g를 적용하였다. 위험도계수는 CASE-I 단면과 CASE-II단면은 내진 1등급 붕괴방지수준의 1.4를 적용하였으며, CASE-III 단면은 내진 2등급 붕괴방지 수준의 1.0을 적용하였다. CASE-I 단면과 CASE-II단면은 구역계수에 의한 기반암 노두 가속도를 적용하였고, CASE-III단면은 지진재해도를 이용한 방법으로 지반운동수준을 결정하였다. 한편, CASE-II단면은 CASE-I 단면보다 규모가 크고, 중요한 구조물로 평가되어 할증을 20%를 적용하였다. 표 4는 시험에 적용한 지반운동수준 결과이다.

3.3 상사율을 고려한 시험모델 설정

본 연구에서는 실제의 구조물에 대한 축소모형을 제작하여 동적거동을 분석하므로 축소모형과 원형사이의 크기 관계(상사법칙)를 합리적으로 정리하는 것이 필요하다. Iai(1989)가 제안한 상사법칙을 적용한 진동대시험을 실시하여 구조물의 지반-구조물-유체 상호작용을 파악하였다.

상사법칙은 시험대상 지반의 동적 거동특성상 반복 유동성 거동의 특성을 띠고, 모형의 전단파 속도를 판단할 수 없기 때문에 제2형태를 사용하였다. 진동대 모형시험에서는 실제 시공계획된 단면으로 적용현장에 따라 구조물의 크기가 다르기 때문에 이러한 단면크기와 진동대의 제원 및 제반 시험조건을 고려하여 CASE-I 단면은 원형

의 1/100 크기로 모델링하였고, CASE-II단면은 원형의 1/70 크기로 모델링 하였으며, CASE-III단면은 원형의 1/50 크기로 모델링하였다.

각 단면에 대하여 시험한 항목은 변위, 가속도, 간극수압이므로 표 1에 주어진 상사법칙의 물리량 중 길이, 시간, 가속도, 변위, 응력/간극수압, 변형률만을 고려하였다. 축소된 단면의 크기에 영향을 받는 물리량은 가속도를 제외하고, 모든 항목에서 영향을 받는 것을 알 수 있다. 표 5는 각 단면의 실제 구조물-진동대 모형시험에서의 상사법칙이다.

3.4 축소 모형 토조의 구성

3.4.1 시험순서

본 연구는 진동대 시험결과와 정량적인 분석보다는 지진으로 인한 구조물의 거동경향에 대한 분석을 주목적으로 한다. 따라서 진동대 시험순서는 제작된 모형을 진동대 상에 거치하여 표면에 가속도계 및 변위계 등의 계측기를 부착한 후 Hachinohe파와 Ofunato파 그리고 인공지진파를 모형에 가진하고, 가속도계와 변위계의 반응결과를 분석하여 안정성 분석 및 동적해석 결과와 상호 비교하는 자료로 사용하였다. 연구에 사용된 단면은 최근 댐체 높이기 사업 등의 Fill Dam에 대한 설계시공이 늘어나고 있어 국내에서 Fill Dam으로 시공계획된 3종류 대표단면을 선정하였다.

시험에 사용된 시료는 상사입도를 적용하였으며, 성토층은 실트질 모래(SM), 불투수층은 저소성점토(CL), 사석층은 0.5mm~2mm정도의 골재, filter층은 표준사와 사석 시료로 이루어져 3가지 대표단면에 사용하였다.

3.4.2 CASE-I단면의 모형 토조 구성

CASE-I단면은 상사율 1/100으로 축소한 구조물 모형을 제작하였다. 모형 단면은 성토층, 불투수층, 투수층, filter층, 사석층의 형식으로 적용하였고, 모형토조 설치과정은 먼저 댐체 외측 성토층은 흙을 조밀하게 다짐하여 조성한 후, filter층을 사석으로 조성, 불투수층은 점성토층로 다짐하여 조성, filter층 조성, 댐체 내측 성토층 조성, 댐체 내측 상류사면의 사석층은 쇄골방지용 사석이어서 사석층에서 일반적으로 사용되는 재료들로 포설하여 단면을 완성하는 과정으로 수행하였다. CASE-I단면에서 계측기 측정은 지진하중 발생 시 과잉간극수압 발생으로 인한 영향

을 검토하기위해 성토층의 상부, 중심부, 하부에 간극수압계를 설치하였고, 발생하는 수평 및 수직 거동을 파악하기 위해 불투수층과 투수층 상단에 수평 및 수직변위계를 설치하였다. 또한, 지진파에 대한 지표면 가속도를 측정하기 위해 성토층의 상부, 중심부, 하부에 가속도계를 설치하였다. 그림 4는 CASE-I단면의 설치 과정과 계측기 설치위치이다.

3.4.3 CASE-II단면의 모형 토조 구성

CASE-II단면은 상사율 1/70으로 축소한 구조물 모형을 제작하였다(그림 5). 모형 단면은 기반암, 토사층, 점성토층, filter층(모래), 사석층의 형식으로 적용하였고, 모형토조 설치과정은 기반암 조성은 입도분포가 고른 흙을 최적함수비로 다짐하여 시공한 후 점성토층 조성, filter층 조성, 성토층 조성, 사석층 조성의 순으로 단면을 완성하였다. CASE-II단면에서 계측기 측정은 지진하중 발생 시 과

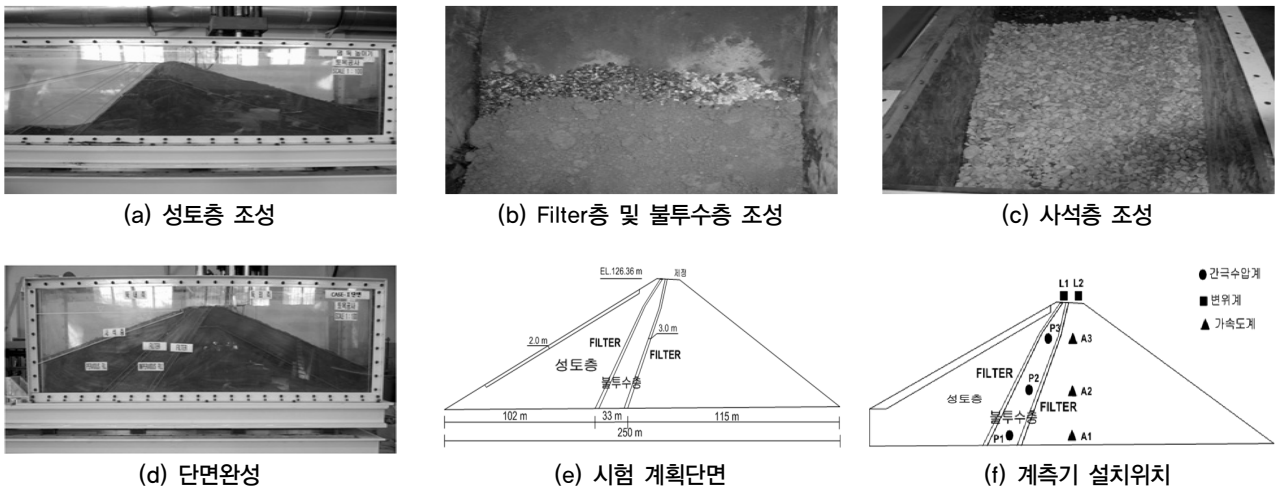


그림 4. CASE-I단면의 설치 과정 과 계측기 설치위치

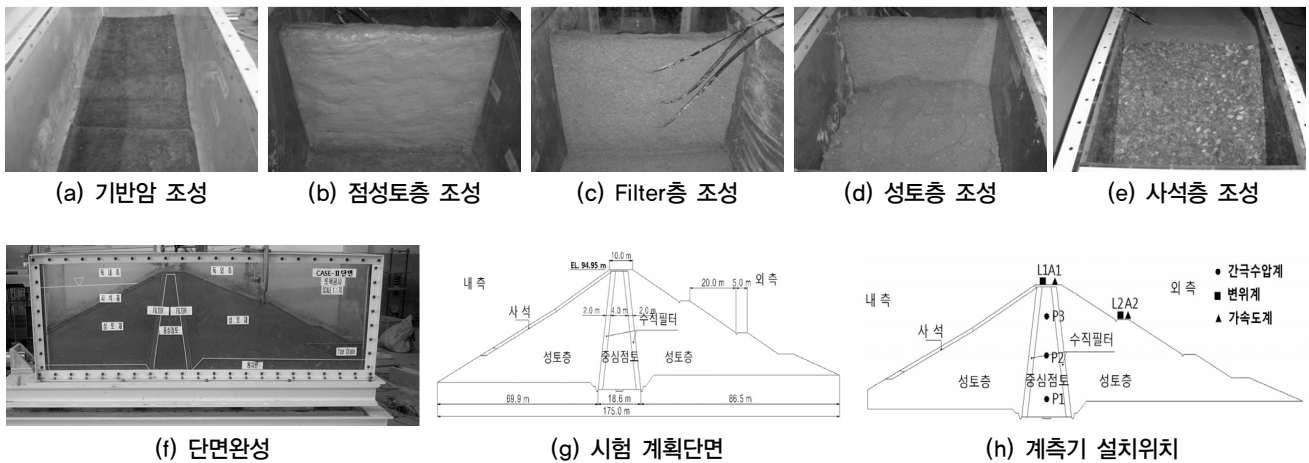


그림 5. CASE-II단면의 설치 과정과 계측기 설치위치

간극수압 발생으로 인한 영향을 검토하기 위해 점성토층의 상부, 중심부, 하부에 간극수압계를 설치하였고, 발생하는 수평 및 수직 거동을 파악하기 위해 댐체 상부와 소단 상부에 수평 및 수직변위계를 설치하였다. 또한, 지진파에 대한 지표면 가속도를 측정하기 위해 댐체 상부와 소단 상부에 가속도계를 설치하였다. 그림 5는 CASE-II단면의 설치 과정과 계측기 설치위치이다.

3.4.4 CASE-III단면의 모형 토조 구성

CASE-III단면은 상사율 1/50으로 축소한 구조물 모형을 제작하였다. 모형 단면은 기반암, 토사층, filter층, 사석층의 형식으로 적용하였고, 모형 토조 설치 과정은 기반암 조성, filter층 조성(모래), 성토층 조성, 사석층 조성, 단면 완성 과정으로 수행하였다. CASE-III단면에서 계측기 측정은 지진하중 발생 시 과잉간극수압 발생으로 인한 영향을 검토하기 위해 댐체 내측, filter층, 댐체 외측에 간극수압계를 설치하였고, 발생하는 수평 및 수직 거동을 파악하기 위해 댐체 상부와 소단에 수평 및 수직변위계를 설치하였다. 또한, 지진파에 대한 지표면 가속도를 측정하기 위해 댐체 상부와 소단에 가속도계를 설치하였다. 그림 6은 CASE-III단면의 설치 과정과 계측기 설치위치이다.

3.5 지진파 입력

내진설계 시 실제의 기록을 이용하여 동적해석에 사용할 수 있으나 구조물을 시공하고자 하는 지역의 실제 지진 기록이 존재하지 않는 상황에서 타 지역에서의 지진 기록으로 설계를 하는 것은 무리가 있다. 따라서 해당 부지의

지역적인 특성을 반영하는 인공적인 지진기록을 작성하여 내진설계에 반영하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 조성된 모든 모형지반에 대해 Hachinohe파, Ofunato파 및 인공지진파를 가진하였다. CASE-I단면은 Hachinohe 파, Ofunato파 및 인공지진파를 0.154g로 가진하였고, CASE-II단면은 0.185g, CASE-III단면은 0.096g의 지진 가속도로 가진하였다.

4. 상사법칙을 적용한 진동대

4.1 CASE-I단면

CASE-I단면은 상사율 1/100으로 축소한 구조물 모형을 제작하여 진동대시험을 수행하였다. 단면에 적용한 지진파는 0.154g로 가진하였다. 진동대 시험결과 각각의 지진파로 가진하여 발생된 변위를 상사법칙을 적용하여 실제단면의 값으로 환산한 최대수평변위는 투수층의 인공지진파에서 147.49mm로 나타났으며, 최대수직변위는 불투수층의 Ofunato파, 인공지진파에서 52.44mm로 나타났다. 각각의 지진파에서 발생한 변위는 지진 시 허용변위량 300mm(국토해양부, 2005)에 비해 비교적 작은 변위로 지진 시 구조물은 안정하였다. 가속도 측정결과 최대응답가속도값은 성토층 상부의 인공지진파에서 0.20g로 할증을 30%정도였고, 성토층 하부에서의 할증율은 가진가속도와 비슷하였다. 댐설계기준의 경우 댐의 위험도를 고려하여 설계가속도를 계산된 적용가속도에 20% 할증을 주어 시험을 실시하지만 적용가속도에 할증을 주지 않은 상태에서 실시한 본 연구의 경우 할증이 30%정도 크게 나타나

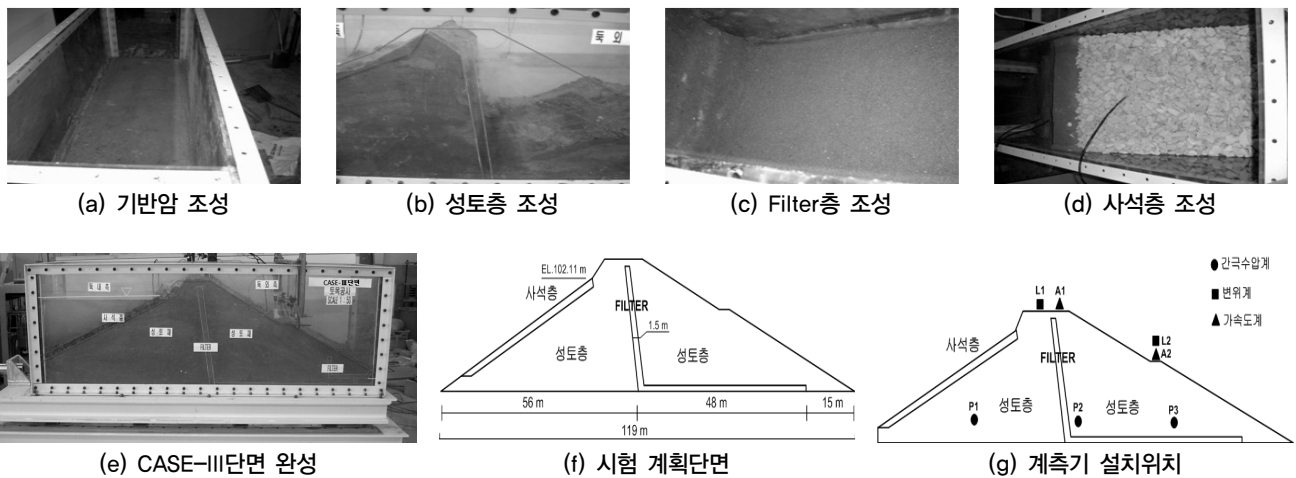
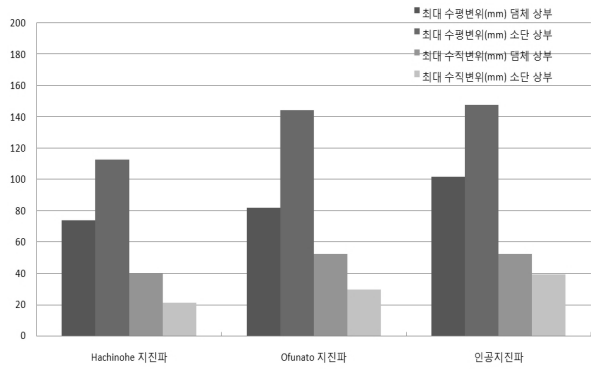
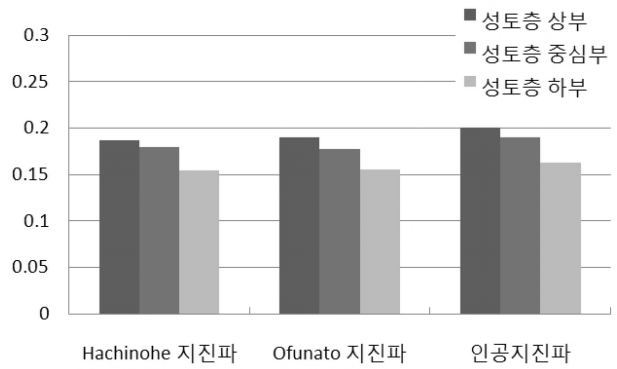


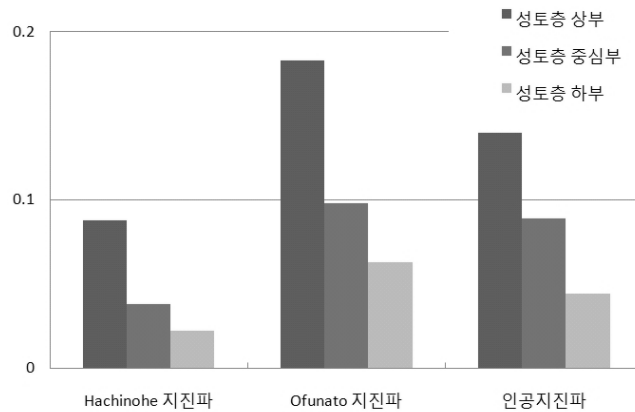
그림 6. CASE-III단면의 설치 과정과 계측기 설치위치



(a) 최대변위



(b) 가속도



(c) 과잉간극수압비

그림 7. CASE-I 단면의 지진파 형태에 따른 시험결과

표 6. 지진파에 대한 최대변위 측정결과

구 분	최대수직변위(mm)		최대수평변위(mm)	
	LVDT #1(불투수층)	LVDT #2(투수층)	LVDT #1(불투수층)	LVDT #2(투수층)
Hachinohe파	39.84	21.10	73.72	112.78
Ofunato파	52.44	29.50	81.94	144.21
인공지진파	52.44	39.33	101.61	147.49

표 7. 지진파에 대한 가속도 측정결과

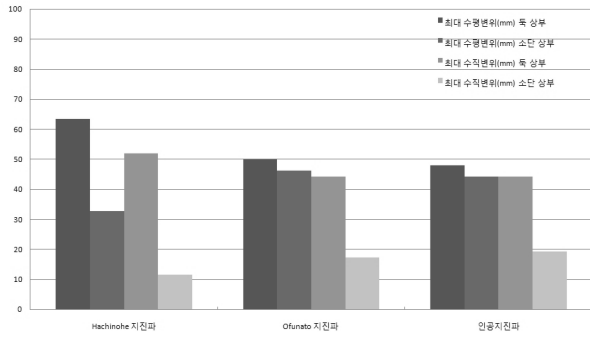
구 분	가속도(g)		
	Hachinohe파	Ofunato파	인공지진파
성토층 상부	0.187	0.190	0.201
성토층 중심부	0.180	0.177	0.190
성토층 하부	0.154	0.155	0.163

표 8. 지진파에 대한 과잉간극수압비 측정결과

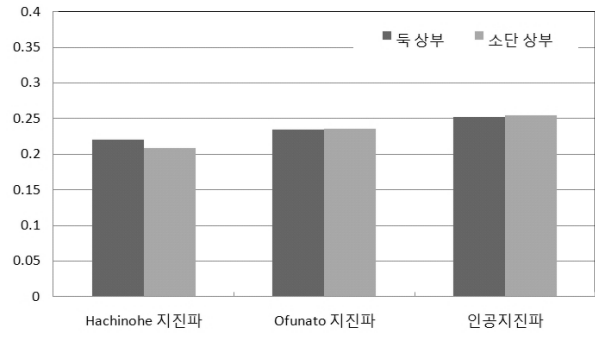
구 분	과잉간극수압비($\Delta u/\sigma'$)		
	Hachinohe파	Ofunato파	인공지진파
성토층 상부	0.088	0.183	0.140
성토층 중심부	0.038	0.098	0.089
성토층 하부	0.022	0.063	0.044

적용가속도를 사용하더라도 설계기준의 가속도 기준에 포함되는 가속도로 가진될 것으로 평가되었다. 또한, Hachinohe 파와 Ofunato파의 경우 가속도의 크기차이는 크지 않았는데 이는 가속도계가 지중에 매설되어 가속도의 증가가 크지 않아 나타난 결과라 사료된다. 간극수압 측정결과 최대 과잉간극수압비는 성토층 상부의 Ofunato파에서 0.18으로

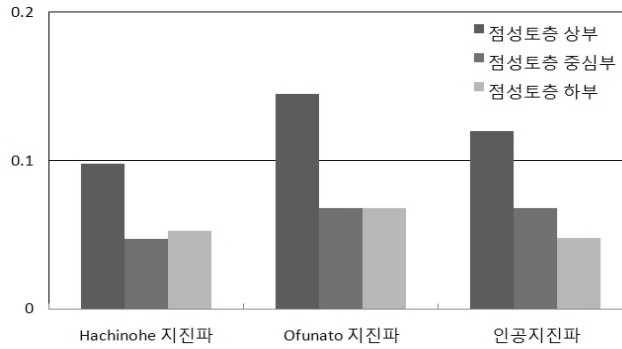
나타났다. 과잉간극수압비는 성토층 상부에서 큰 값을 보였으며, 이는 침투수압의 영향을 받은 것으로 사료된다. 각각의 지진파에 대한 과잉간극수압비가 0.02~0.18으로 액상화 평가기준인 1.0이하로 액상화에 대해 안정성을 확보하였다. 지진파에 따른 시험결과는 그림 7과 표 6~8과 같다.



(a) 최대변위



(b) 가속도



(c) 과잉간극수압비

그림 8. CASE-II단면의 지진파 형태에 따른 시험결과

표 9. 지진파에 대한 최대변위 측정결과

구 분	최대수직변위(mm)		최대수평변위(mm)	
	LVDT #1(댐체 상부)	LVDT #2(소단 상부)	LVDT #1(댐체 상부)	LVDT #2(소단 상부)
Hachinohe파	51.83	11.52	63.35	32.63
Ofunato파	44.15	17.28	49.91	46.07
인공지진파	44.15	19.20	47.99	44.15

표 10. 지진파에 대한 가속도 측정결과

구 분	가속도(g)		
	Hachinohe파	Ofunato파	인공지진파
댐체 상부	0.220	0.235	0.252
소단 상부	0.208	0.236	0.255

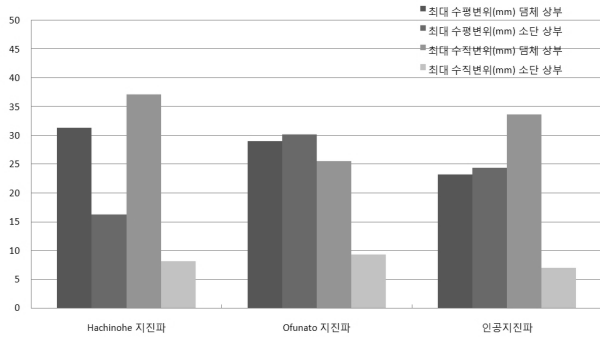
표 11. 지진파에 대한 과잉간극수압비 측정결과

구 분	과잉간극수압비($\Delta u/\sigma'$)		
	Hachinohe파	Ofunato파	인공지진파
점성토층 상부	0.098	0.145	0.120
점성토층 중심부	0.047	0.068	0.068
점성토층 하부	0.053	0.068	0.048

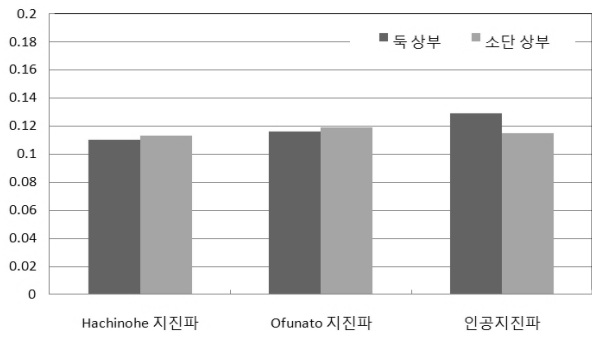
4.2 CASE-II단면

CASE-II단면은 상사율 1/70으로 축소된 구조물 모형을 제작하여 진동대 시험을 수행하였다. 단면에 적용한 지진파는 0.19g로 가진하였으며, 지진파에 대한 최대수평변위는 댐체 상부의 Hachinohe파에서 63.35mm, 최대수직변위는 댐체 상부의 Hachinohe파에서 51.83mm였다. 각각의 지진파에서 발생한 변위는 지진 시 허용변위량 300mm에 비해 비교적 작은 변위로 지진 시 안정성을 확보하였다. 가속도 측정결과 최대응답가속도 값은 소단 상부의

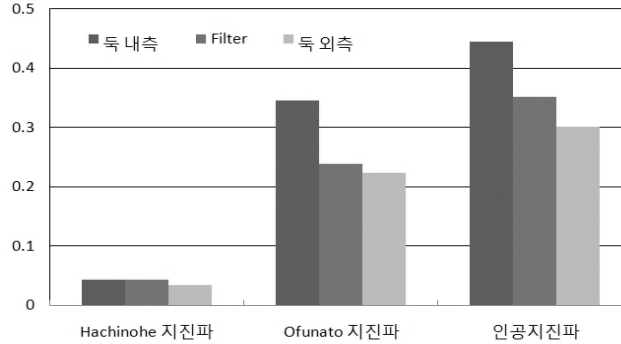
인공지진파에서 0.26g로 할증율 37%정도로 나타났다. 댐체 상부의 응답가속도 값은 1.19배~1.36배 정도 높았으며, 소단 상부의 응답가속도 값은 1.12배~1.38배 정도 높게 나타나 적용가속도에 비해 큰 가진력으로 구조물에 지진력이 가해졌다. 최대과잉간극수압비는 점성토층 상부의 Ofunato파에서 0.15였다. 각각의 지진파에 대한 과잉간극수압비가 0.05~0.15로 액상화 평가기준인 1.0이하로 액상화에 대해 안정성을 확보하였다. 지진파에 따른 시험결과는 그림 8과 표 9~11과 같다.



(a) 최대변위



(b) 가속도



(c) 과잉간극수압비

그림 9. CASE-III단면의 지진파 형태에 따른 시험결과

표 12. 지진파에 대한 최대변위 측정결과

구 분	최대수직변위(mm)		최대수평변위(mm)	
	LVDT #1(댐체 상부)	LVDT #2(소단 상부)	LVDT #1(댐체 상부)	LVDT #2(소단 상부)
Hachinohe파	37.08	8.11	31.29	16.22
Ofunato파	25.49	9.27	28.97	30.13
인공지진파	33.61	6.95	23.18	24.34

표 13. 지진파에 대한 가속도 측정결과

구 분	가속도(g)		
	Hachinohe파	Ofunato파	인공지진파
댐체 상부	0.110	0.116	0.129
소단 상부	0.113	0.119	0.115

표 14. 지진파에 대한 과잉간극수압비 측정결과

구 분	과잉간극수압비($\Delta u/\sigma'$)		
	Hachinohe파	Ofunato파	인공지진파
댐체 내측	0.044	0.345	0.444
Filter층	0.044	0.238	0.352
댐체 외측	0.035	0.224	0.301

4.3 CASE-III단면

CASE-III단면은 상사율 1/50으로 축소된 구조물 모형을 제작하여 진동대 시험을 수행하였다. 단면에 적용한 지진파는 0.10g로 가진 하였으며, 시험결과 지진파에 대한 최대수평변위는 31.29mm, 최대수직변위는 37.08mm로 댐체 상부에서 가장 높았으며, 각각의 지진파에서 발생한 변위는 지진 시 안정성을 확보하였다. 가속도 측정결과 최대 응답가속도 값은 댐체 상부의 인공지진파에서 0.13g로 나타났다. 각각의 지진파에 대한 응답가속도값은 댐체 상부

의 인공지진파에서 할증율 30%정도가 도출되지만, 대체적으로 20%정도의 할증율이 나타나 설계기준에 부합되는 할증율로 가진되었다. 최대과잉간극수압비는 댐체 내측, filter층의 인공지진파에서 0.44로 나타났다. 각각의 지진파에 대한 과잉간극수압비는 0.04~0.44로 액상화 평가기준인 1.0이하로 액상화에 대해 안정성을 확보하였다. 지진파에 따른 시험결과는 그림 9와 표 12~14와 같다.

본 논문의 연구결과 모형시험에 의한 Fill Dam안정성 평가 시 중요한 것은 합리적이고, 풍부한 지반특성 및 지

진에 대비한 내진설계 데이터를 확보하는 것으로 이러한 자료습득 및 체계적인 분석기술이 구조물 피해 감소에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다. 또한, 본 연구결과를 토대로 향후 체계적인 안정성 평가를 위해 현장 계측 및 수치 해석을 통해 지반거동을 파악한 후 모형시험과 비교한 내진에 대한 안정성 평가가 필요하였다.

5. 결론

본 연구에서는 상사법칙을 적용하여 축소한 3가지 대표 단면의 모형 Fill Dam에 대해 국내 지반운동수준에 부합하는 지진가속도를 가진하여 진동대 토조시험을 실시하였다. 시험을 통해 구조물에서 발생하는 가속도 증폭과 동적 변위를 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 발생변위 측정결과 각 단면의 지진파에서 최대수직변위는 52.44mm, 최대수평변위는 147.49mm로 나타났으며, 상사비가 비교적 클수록 변위도 크게 발생되어 1/100으로 축소한 CASE-I단면에서 최대 큰 변위를 보였으나 발생변위는 지진 시 허용변위기준을 벗어나지 않아 안정한 것으로 판단된다.
- (2) 각 단면의 가속도 계측결과 0.110g~0.255g의 범위를 보였으며, 계측된 결과는 Hachinohe파, Ofunato파는 할증률 약 20%, 인공지진파는 할증률 30%정도 평가되었다. 이는 댐설계기준에서 제안한 적용지진파에 20% 할증을 주어 가진을 하는 설계기준에 부합되는 결과로 본 연구에서 실시된 시험 방법으로 Fill Dam에 가진할 경우 적용지진파에 의한 추가적인 할증이 필요 없을 것으로 판단된다.
- (3) 과잉간극수압비의 측정결과 0.022~0.444범위의 과잉간극수압비를 보여 액상화 평가기준인 과잉간극수압비 1이하로 평가되어 액상화에 대해 안전하였다.
- (4) 또한, 과잉간극수압비는 CASE-III단면에서 0.444로 가장 크게 나타났으나 가속도와 변위는 CASE-I단면과 CASE-II단면보다 작게 발생되었다. 이는 가속도와

변위는 적용가속도가 큰 변수로 작용되지만, 지반의 액상화는 지진가속도뿐만 아니라 지반의 구성상태가 더 큰 영향을 미치는 변수로 확인되었다.

참고문헌

1. 국토해양부 (1997), *내진설계기준연구(II)*. 2장 내진설계 성능기준.
2. 국토해양부 (2005), *댐 시설 기준*, 11장 내진설계.
3. 박인준, 김승욱, 장윤희, 김현태, 유찬호 (2006), “국내 저수지 댐의 내진 성능 평가”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제7권, 제6호, pp.89-100.
4. 신은철, 강현희, 김태진, 채영수, 박정준 (2011), “지진하중에 의한 방수제 구조물의 내진성능 평가를 위한 실험적 연구”, *한국토목섬유학회 논문집*. 제10권, 제3호, pp.53-62.
5. 전남수, 최명진, 권오균, 김동수 (2006), “1g 진동대실험과 전산해석에 의한 모형실험의 Size Effect에 관한 연구”, *대한토목학회 정기학술대회 논문집*, pp.4116-4119.
6. 황성춘 (2005), “진동대 시험을 이용한 콘크리트 댐의 동적거동 특성 연구”, *한국소음진동공학회 논문집*, 제15권, 제7호, pp.806-812.
7. Gutenberg, B. and Richter, C. F. (1956), “Earthquake Magnitude: Intensity, Energy, and Acceleration”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.46, pp.104-145.
8. Iai, S. (1989), “Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field”, *Soils and Foundations*, JGS, Vol.29, No.1, pp.105-118.
9. Kramer, S. L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, pp.46-50.
10. Maymand, P. J. (1998), *Shaking table tests of nonlinear soil-pile-superstructure interaction in soft clay*, Ph.D Thesis, University of California, Berkeley.
11. Whitman, R. V. and Liao, S. (1985), *Seismic design of retaining wall*, Miscellaneous paper GL-85-I, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
12. Yoshimi, Y. and Oh-oka, H. (1973), “Ring Torsional Apparatus for Simple Shear Tests”, *Proc. 8th ICSMFE*, Vol.1, pp. 501-506.

(논문접수일 2011. 11. 14, 심사완료일 2011. 12. 18)