

진동대 시험을 이용한 콘크리트 댐의 동적거동 특성 연구

A Study on the Dynamic Behavior of Concrete Dam by Shaking Table Tests

황 성 춘†

Hwang Seong-chun

(2005년 3월 12일 접수 : 2005년 6월 25일 심사완료)

Key Words : Concrete Dam(콘크리트 댐), Ground Motion(지진동), Shaking Table Test(진동대시험), Similitude Law(상사법칙), Tension Crack(인장균열)

ABSTRACT

This paper addresses the shaking table tests with 1/100 scaled model followed similitude law for OO dam main designing section to understand nonlinear behavior characteristics of concrete dam body by ground motion. As earthquake wave, Hachinohe and El Centro waves were used and acceleration and displacements are measured to analyze behaviors of dam body. For maximum ground acceleration range (0.3~0.9 g), the results showed linear behavior regardless of maximum ground acceleration and secured safety of structure. To analyze the behavior of dam after tension cracking, 3 cm-notch was placed at the critical section of over-flowing section. As results of applying Hachinohe wave(0.8 g), Even though tension cracks were formed at over-flowing section by Hachinohe wave(0.8 g), it showed that the dam is stable for supporting upper stream part of water tank of dam.

1. 서 론

지진은 많은 인명 피해와 재산상의 손실을 가져다 주는 자연재해이다. 최근 지진규모가 7.4의 강진으로 1만 5천명의 사망자를 낸 터키지진(1999.8.17)과 2만 명 이상의 사망자를 낸 인도 대지진(2001.1.26 규모 7.7), 22만 명 이상의 사망자를 낸 인도네시아 대지진(2004.12.26 규모 9.0) 등 많은 인명피해를 유발하는 대규모 지진이 발생하였다. 이와 같이 최근의 지진은 규모가 증가할 뿐만 아니라 빈도도 증가하는 경향을 나타내고 있다. 우리나라에서도 지진계측 이후(1978년) 지진규모가 5.0 이상의 지진이 5회 관측되었고, 최근에는 규모 5.2의 경북 울진 지진(2004.5.29)이 발생하였으며, 그 외의 크고 작은 지진이 발생하고 있

다. 그에 따라 지진 발생의 우려가 높아지면서 댐의 내진설계에 대한 관심이 증대되었다.

따라서 기존의 댐뿐만 아니라 새로 건설되는 댐들의 지진 안정성 해석이 필요하게 되었고 이러한 해석들은 지진으로 인한 최대 지반운동의 예측 및 댐의 동적 응답 등을 포함하게 된다. 현재 활용되는 댐의 지진해석은 비선형 해석의 어려움으로 인하여 댐체 뿐만 아니라 댐과 저수지 그리고 기초의 상호작용을 선형탄성 거동으로 가정하고 있다. 이러한 선형해석은 실제 거동을 잘 표현하지 못할 뿐 아니라 선형해석의 결과를 이용하여 설계기준을 확립하는 데에도 그 한계를 갖게 된다. 또한, 진동현상이 복잡한 댐이나 중요도가 높은 구조물은 상세한 동적해석법이 요구된다.⁽¹⁾

따라서 이 연구는 OO댐의 지진동에 의한 콘크리트 댐체의 비선형 거동을 파악하고자 진동대 시험을 수행 하였다. 댐의 거동 특성을 파악하기 위해서 상사법칙을 적용한 축소된 모델 시험체에 가속도계 및 변위계 등을 활용하여 지진시 댐 구조물의 정량적 거

† 책임저자 : 정희원, 경주대학교 건설환경공학부
E-mail : schwang@yeons.co.kr
Tel : (054) 748-7555, Fax : (054) 748-7556

동분석 및 안정성을 평가하였다.

2. 연구 내용 및 시험 방법

콘크리트 댐의 지진에 대한 구조적 안정성 및 동적 거동 특성을 파악하기 위해서 상사법칙을 적용한 댐의 축소모형 1g 진동대 시험을 수행하였다. 콘크리트 댐의 동적 거동 특성을 정량적으로 모사하기 위해 Table 1과 같이 Scott 와 Iai의 상사 법칙을 적용한 모형 시험체 제작 방법을 적용하였다.

이 연구에서는 댐 대표단면의 특성과 진동대의 성능을 고려하여 Type 3의 상사법칙을 적용하여 1/100 scale을 적용하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 지진동의 영향을 고려하기 위해서 Hachionhe, El Centro 지진파를 입력하여 응답가속도 및 응답변위를 측정하여 댐의 안정성을 평가하였다.

Table 1 Similitude law for shaking table test (Scott and Iai, 1989)^(2~4)

Item	Prototype/scale model			
	Generalized scaling factor	Saling factors in practice		
		Type 1	Type 2	Type 3
		$\lambda_p = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}$ $\lambda_p = 1$	$\lambda_\epsilon = 1$ $\lambda_p = 1$
Length	λ	λ	λ	λ
Density	λ_p	1	1	1
Time	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda \lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
Acceleration	1	1	1	1
Displacement	$\lambda \lambda_\epsilon$	$\lambda \lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
Stress	$\lambda \lambda_p$	λ	λ	λ
Strain	λ_ϵ	λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	1
Stiffness	$\lambda \lambda_p / \lambda_p$	λ_p / λ_p	$\lambda^{0.5}$	λ

Table 2 Similitude ratio for test

Item	Scale	
Dam	Density	$\rho = 1$
	Length	$L = 1/100$
	Elastic modulus	$E = 1/100$
	Strength	$\sigma_c = 1/100$
	Strain	$\epsilon = 1$
	Force	$F = (L = 1/100)^3$
Wave	Displacement	$\Delta L = 1/100$
	Acceleration	$a = 1$
	Period	$T = 1/\sqrt{100}$

댐 모형의 균열 후 특성을 파악하기 위하여 댐의 위험단면에 notch를 두어 균열발생 후 댐의 구조적 안정성을 평가하였다.

3. 진동대 시험

3.1 콘크리트 댐 단면

진동대 시험에 사용된 콘크리트 댐 단면은 댐의 윗부분을 대표단면으로 설정하였으며, 길이의 상사비 1/100을 적용하여 기초 부분에서 댐 상면까지 85 cm, 기초 폭 21 cm, 기초 길이 58 cm로 제작하였다. 댐 모형의 자세한 제원은 Fig. 1과 같다.

콘크리트 댐의 축소 모형 제작에 사용되는 모든 재료들은 모형의 역학적 특성 값에 만족해야 한다.⁽⁵⁾ 콘크리트 댐의 가정된 콘크리트의 역학적 특성 및 모형의 목표값은 Table 3과 같다. Table 3의 목표값을 만족하기 위해서 반복시험을 거쳐 재료의 최적 배합비와 역학적 특성을 갖는 모형체를 제작하였으며, 재료의 배합비 및 역학적 특성은 Table 4와 같다.

Table 4는 압축강도 및 인장강도는 상사성을 만족하고 있으나 탄성계수에 대해서는 만족하지 못하고

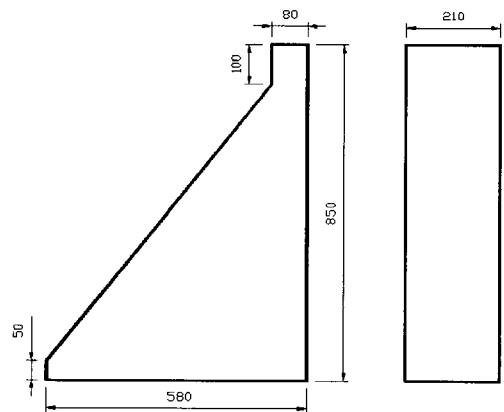


Fig. 1 Scale dam model

Table 3 Material properties of concrete between scale model and prototype

	Prototype	Scale model
γ_t (tf/m ³)	2.3	2.3
E (kgf/cm ²)	200,000	2000
σ_c (kgf/cm ²)	200	2
σ_t (kgf/cm ²)	20	0.2
ν	0.2	0.2

있다. 따라서 비선형 변형거동을 재현하기에는 미흡하지만 재료의 강도가 상사성을 만족하고 있고, 댐체의 켈틸레버 거동으로 인한 파괴는 압축파괴 보다는 인장균열로 발생하는 파괴가 지배적이라는 점을 고려하여, Table 4의 배합비를 이용하여 축소모형 댐체를 제작하였다.

3.2 진동대 및 수조

이 시험에 사용된 진동대는 Fig.2와 같이 직사각형의 일축 2자유도의 진동대가 사용되었다. 진동대의 크기는 가로×세로가 5m×3m로서 최대 시험하중은 30tf, 최대 가속도는 1.0g이며, 시험 가능한 진동 주기의 특성은 30 Hz이다.

실제 댐 체에 작용하는 유체의 영향을 파악하기 위

Table 4 Material properties and mixed ratio for scale model

Water/plaster	6.0*	E (kgf/cm ²)	500
Kieselguhr/plaster	3.0*	σ_c (kgf/cm ²)	2.0
Sand/plaster	12.0*	σ_t (kgf/cm ²)	0.19
Copper slag/plaster	20.0*	γ_t (tf/m ³)	1.9

* Weight ratio

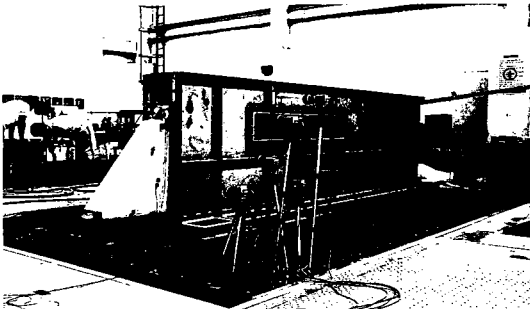


Fig. 2 Shaking table and scale dam model

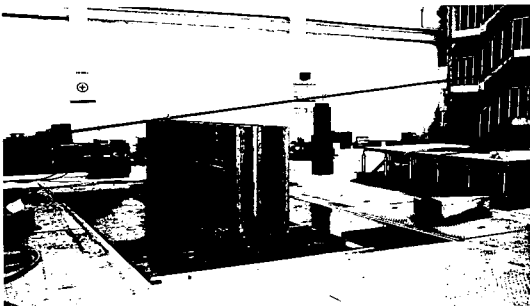


Fig. 3 Water tank for shaking table test

하여 이 시험에 사용된 모형수조의 크기는 Fig. 3과 같이 길이 400 cm, 폭 25 cm, 높이 150 cm이며, 두께는 0.3mm의 철판으로 제작하였다. 유체의 수위는 O O뎀 지역의 계획홍수위로 설계하여 상부에서 10 cm 높이까지 위치하였다. 양쪽 벽면에는 진동대 시험시 유체의 거동을 파악하기 위하여 아크릴 판을 부착하였으며 수압 및 동적 거동에 따른 충격을 댐 모형에 원활하게 전달하기 위하여 수조 전면에 멤브레인을 설치하였다.

3.3 계측기

시험에 사용된 계측기는 동 압력계이지 3개, 가속도계 3개, 광학 변위계 5개이다. 동 압력계이지는 정격용량이 200 kPa이며, 댐모형과 유체의 경계부에 부착하여 정수압 및 진동으로 발생하는 부가적 압력을 측정하는데 이용된다. 댐의 저면과 상면에 설치된 가속도계는 진동시 구조물에서 증폭되는 가속도 측정에 이용된다. 그리고, 광학 변위계는 지진시 댐 체체의 좌우 변위량을 측정하는데 이용된다.

이 시험에서 사용된 각종 계측기의 설치 위치는 Fig. 4와 같다.

3.4 시험 방법

먼저 댐 모형과 수조를 진동대위에 설치하고 수조의 적절한 수위를 유지한 후 주파수 영역 시험 (frequency sweep tests)을 실시하여 댐 모형의 지배적인 주파수 영역을 파악하였다. 주파수가 점차적으로 변화하는 정현(sine)파를 진동대에 입력하여 댐 모형의 상면에서 측정된 가속도 값을 Fourier변환 실시한 후 댐 모형의 주파수 응답 곡선을 산정하였다. Fig. 5는 댐 모형의 주파수 응답 곡선으로 댐 모형의

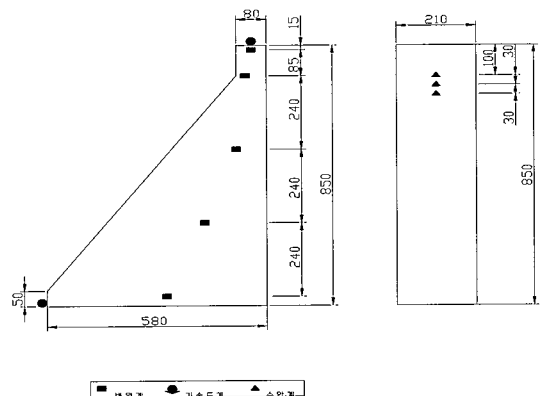


Fig. 4 Measuring points of scale dam model

기본 진동수는 약 43 Hz로 나타났으며 댐 모형의 감쇠계수는 0.01로 산정되었다.

이 시험에서는 Hachinohe파 및 El Centro파를 적용하였으며 각파에 대한 진동대 지반의 주파수 응답 곡선은 Fig. 6, 7과 같다. 두 지진파 모두 진동수 30 Hz 이하의 영역이 지배적인 지진파로서 공진현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

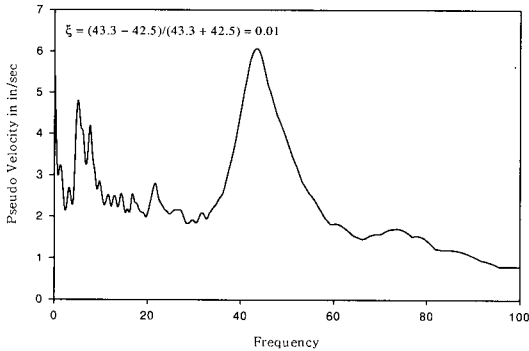


Fig. 5 Frequency response curve of scale dam model

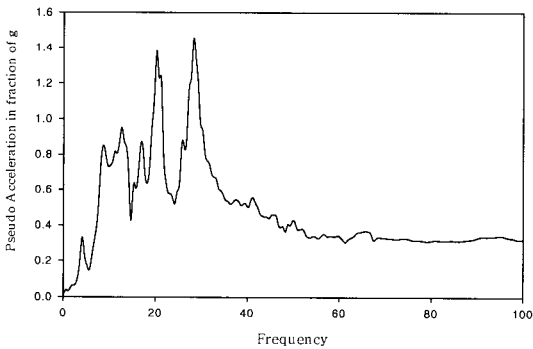


Fig. 6 Frequency response curve by Hachinohe wave

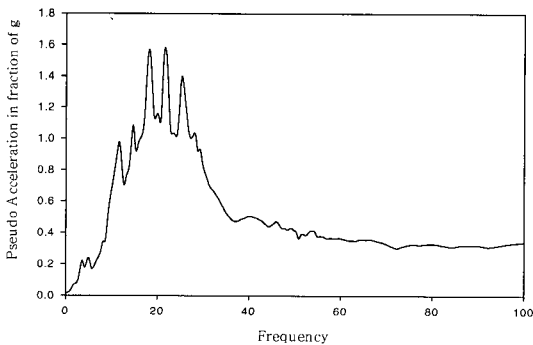


Fig. 7 Frequency response curve by El Centro wave

시험은 두 지진파 모두 최대 지반 가속도의 크기가 0.3g에서부터 진동대 최대 가속도의 한계까지 점진적으로 가속도의 크기를 높여가며 수행하였고, 매 시험 후 댐 모형의 균열발생 여부를 면밀히 관찰하여 균열 발생시 시험 종료 시기를 계획하였다. 진동대의 가능 지반 최대가속도를 고려하여 Hachinohe는 0.8g, El Centro 파는 0.9g에서 시험을 종료하였다.

댐 모형의 균열 후 특성을 파악하기 위하여 댐의 위험단면인 월류부에 각각 2cm 및 3cm의 notch를 두어 진동대 최대가속도로 시험하였다.

3.5 시험 결과

(1) Hachinohe 지진파

Hachinohe 지진파를 적용한 결과 댐 모형의 응답 가속도 및 변위이력곡선이 Fig. 8~17와 같다.

진동대의 최대가속도가 0.3g인 경우와 0.8g인 경우 진동대의 최대 가속도에 관계없이 가속도 및 변위 이력곡선은 매우 비슷한 경향으로 나타났다. 이러한 결과는 진동대의 최대 가속도에 따른 거동 특성이 댐

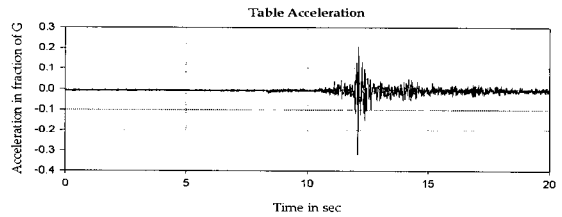


Fig. 8 Acceleration at ground (0.3g)-Hachinohe

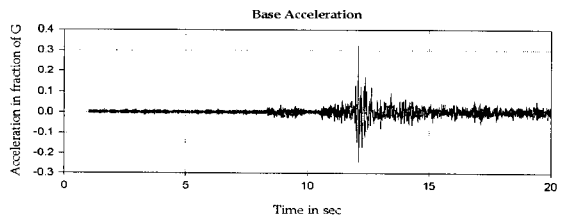


Fig. 9 Acceleration at dam bottom (0.3g)-Hachinohe

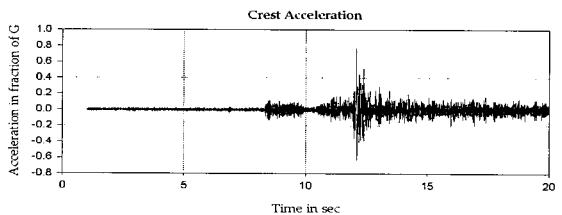


Fig. 10 Acceleration at dam crest (0.3g) - Hachinohe

모형에 사용된 재료의 선형범위를 초과하지 않았기 때문에 판단된다. 댐 상면에서의 최대 변위는 0.3g의 경우 0.45mm, 0.8g의 경우 2mm가 발생하였다. 0.8g의 경우 변위가 크게 발생한 원인은 콘크리트 탄성계수의 상사비가 1/100이 아닌 1/400 정도 적용되었으며 측정에 이용한 광학 변위계의 삼각대가 측정시 진동된 것으로 사료된다. 그러나 상면 변위의 전체적인 이력형상은 입력된 지반진동과 비교할 때 유사한 상호 관계를 나타낸다. 댐 모형의 저면에서의 가속도와 상면에서의 가속도를 비교 할 경우 지반 최대 가속도가 0.3g의 경우 주파수성분의 변화 없이 2.6배, 0.8g의 경우 3.6배 증가하였다.

Hachinohe 지진과의 최대 지반가속도를 0.3g에서 0.8g까지 변화하여 댐 모형을 진동시킨 결과 댐 모형의 균열은 발생하지 않았다.

(2) El Centro 지진파

El Centro 지반파를 적용한 결과 Fig. 16~22은 지반의 응답가속도 및 변위 이력곡선이다. Hachinohe 지진파와 같이 이력곡선은 지반최대 가속도에 관계없이 매우 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 댐 상면에서의 최대 변위는 0.3g의 경우 0.7mm, 0.8g의 경우 1.8mm가 발생하였다.

El Centro파 역시 매 진동 후 균열검사를 실시하

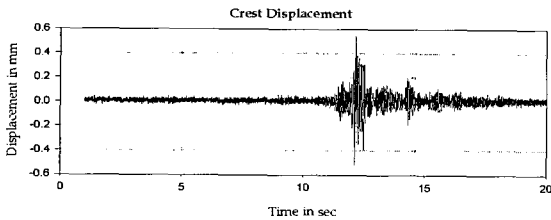


Fig. 11 Displacement at dam crest (0.3g) - Hachinohe

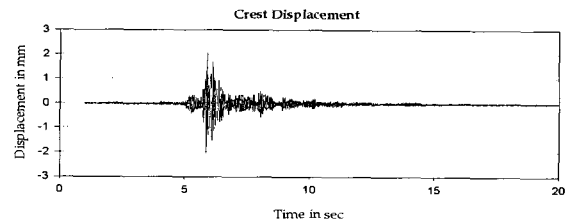


Fig. 15 Displacement at dam crest (0.8g)-Hachinohe

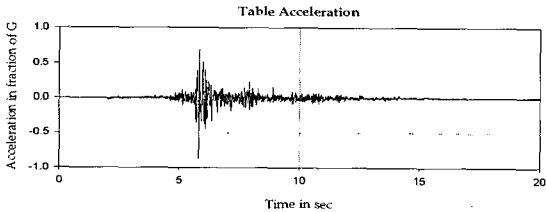


Fig. 12 Acceleration at ground (0.8g)-Hachinohe

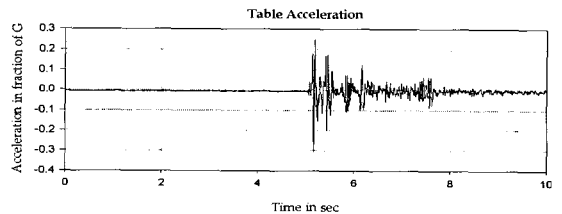


Fig. 16 Acceleration at ground (0.3g)-El Centro

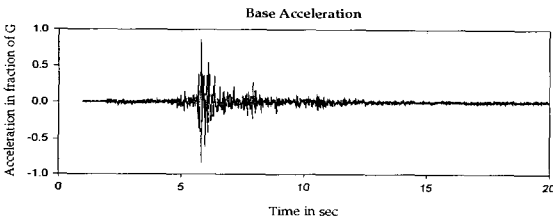


Fig. 13 Acceleration at dam bottom (0.8g) - Hachinohe

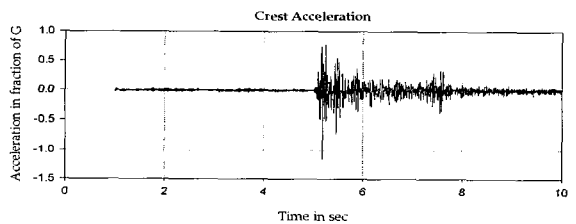


Fig. 17 Acceleration at dam crest (0.3g)-El Centro

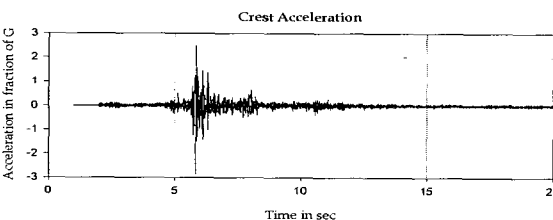


Fig. 14 Acceleration at dam crest (0.8g) - Hachinohe

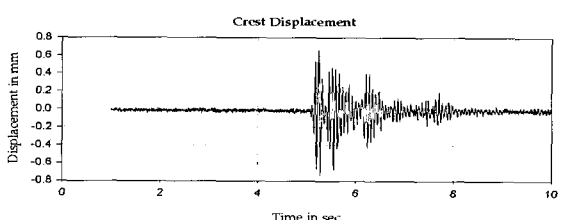


Fig. 18 Displacement at dam crest (0.3g)-El Centro

였으며, Hachinohe 지진파에서와 마찬가지로 댐 모형에서의 균열은 발생하지 않았다.

3.6 댐 모형의 균열후 거동

이 시험에 사용된 진동대의 최대가속도는 1.0 g로서 댐 모형에 균열을 발생시키기에는 그 한계를 가지고 있으므로 Fig. 24에서 보이는 것과 같이 댐 모형의 위험단면에 notch를 두어 최대가속도 0.8 g의 Hachinohe파를 이용하여 진동대 시험을 실시하였다. 이와 같은 시험의 목적은 지진으로 인하여 댐체에 인장균열이 발생한 경우 지진경과 후에 저수능력의 유지 및 댐체의 보수 가능성을 평가하기 위한 것

이다.^(6~9)

Fig. 23은 월류부의 위험단면에 3 cm의 notch를 설치한 것이며, Fig. 24는 시험 후 발생한 균열의 형태를 나타낸 것이다. 균열은 댐 상면의 위험단면에 설치한 notch에서 발생된 인장균열로 시작되었으며 댐 측면에 전반적으로 발전하였다. 댐 상면(crest)에서

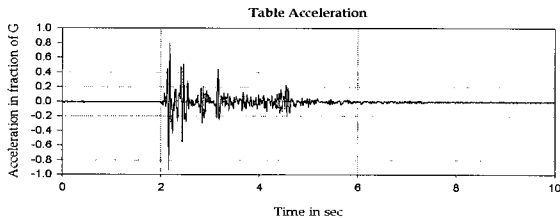


Fig. 19 Acceleration at ground (0.9 g) - El Centro

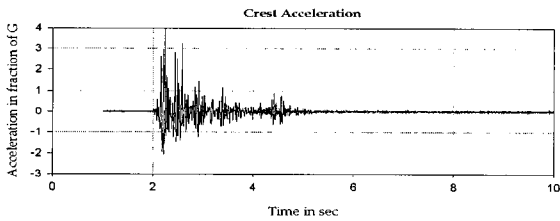


Fig. 20 Acceleration at dam crest (0.9 g) - El Centro

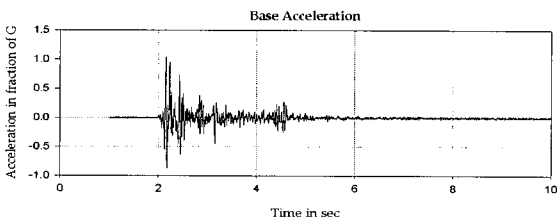


Fig. 21 Acceleration at dam bottom (0.9 g) - El Centro

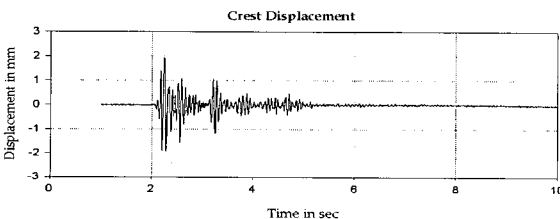


Fig. 22 Displacement at dam crest (0.9 g) - El Centro

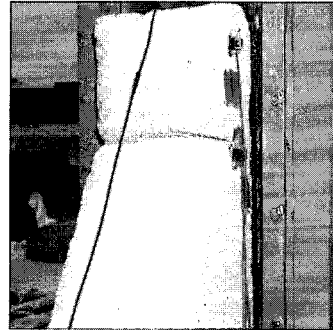


Fig. 23 The notch at dam crest

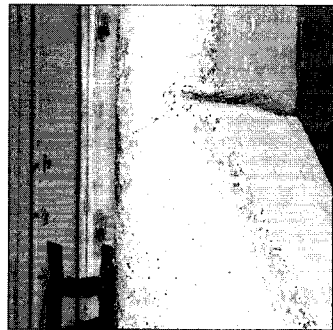


Fig. 24 The crack at dam crest

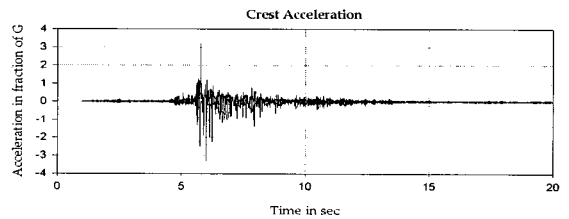


Fig. 25 Acceleration at dam crest (Hachinohe, severe intensity with 3 cm notch)

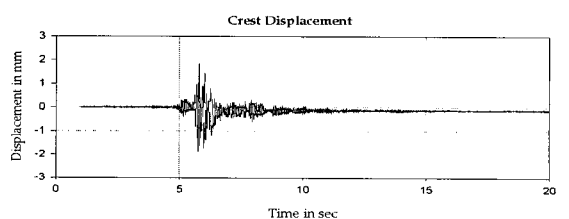


Fig. 26 Displacement at dam crest (Hachinohe, severe intensity with 3 cm notch)

측정한 가속도와 변위이력곡선은 Fig. 26, 27과 같다. Fig. 15와 Fig. 25를 비교한 결과 댐의 위험단면에 발생한 균열로 인하여 가속도가 더욱 증폭되었으며, Fig. 26과 Fig. 16을 비교한 결과 균열로 인하여 영구적 변위가 나타났다. 이 시험 결과 댐 모형은 균열 발생 후에도 댐 상류의 수조를 지지하고 있으므로 구조적인 안정성은 이상이 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

상사법칙을 적용한 콘크리트 댐의 축소모형 진동대 시험을 수행하여 댐 체의 구조적 안정성을 정량적으로 평가한 결과, 결론은 다음과 같다.

(1) Hachinohe 지진 및 El Centro 지진의 2가지 설계 지진파를 이용하여 최대 지반 가속도의 세기가 0.3g에서부터 진동대 최대 가속도의 한계까지 점진적으로 가속도의 크기를 높여가며 시험한 결과, 댐 모형의 균열은 발생하지 않았으므로 댐 단면은 안전성이 확보된 것으로 판단된다.

(2) Hachinohe 지진 및 El Centro 지진파를 진동대 지반 최대 가속도에 0.3g~0.9g까지 적용하여 시험한 결과 진동대의 최대 가속도에 관계없이 가속도 및 변위 시간 이력곡선은 유사한 경향으로 분석되었다. 이러한 결과는 진동대의 최대 가속도에 따른 거동 특성이 댐모형에 사용된 재료의 선형범위를 초과하지 않았기 때문으로 판단된다.

(3) 콘크리트 댐 대표단면의 균열 후 거동특성을 평가하기 위하여 댐의 위험단면에 2cm 및 3cm의 notch를 두어 최대가속도 0.8g의 Hachinohe파를 이용하여 진동대 시험을 재 실시한 결과, 댐의 위험단면에 3cm의 notch를 설치한 경우 최대 지반가속도 0.8g에서 균열이 발생하였으나, 균열 발생 후에도 댐 상류의 수조를 지지하고 있으므로 구조적 안정성을 확보한 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 현대 건설(주)의 연구지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) 김정철, 2001, "내진설계를 위한 모형옹벽의 진동대 시험에 대한 연구", 석사, 서울산업대학교.
- (2) Iai, S., 1989, "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-structure-fluid Model in 1g Gravitational Field," Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 29, No. 1, pp. 105~118.
- (3) Scott, R., 1989, "Centrifuge and Modeling Technology: A Survey," Rev. Franc. Geotech., No. 48, pp. 15~34.
- (4) 황재익 등 3명, 2001, "1g 진동대 모형시험에서의 상사법칙 적용성 평가", 한국지진공학회 춘계 학술대회논문집.
- (5) 건설교통부, 댐설계기준.
- (6) 이지원, 이경성, 2001, 댐의 설계와 시공편람, 신기술.
- (7) Saini, S. S. and Krishna, J., 1974, "Overturning of Top Profile of the Koyna Dam During Severe Ground Motion," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 2, No. 3, pp. 207~217.
- (8) Oberti, G., 1979, "Contribution of Models to the Modern Design and Safety Control of Large Concrete Dams," ISMES Report, No. 116, Bergamo, Italy.
- (9) 황성춘, 오병현, 2005, "진동대시험에 근거한 댐의 내진 설계시 해석 방법의 비교", 한국소음진동 공학회 춘계학술대회논문집, pp. 732~737.