

# 진동대시험을 이용한 댐의 내진성능평가

## The Evaluation of Seismic Performance of Dam By Shaking Table Tests

황성춘\*                      오병현\*\*                      심형섭\*\*\*                      강보순\*\*\*\*  
Hwang, Seong Chun      Oh, Byung Hyun      Sim, Hyung Seob      Kang, Bo Soon

### ABSTRACT

This paper deals the shaking table tests with 1/100 scaled model followed by Scott & Iai(1989)'s similitude law<sup>1),2)</sup> for OO dam main desging section to understand nonlinear behavior characteristics of concrete dam body by earthquake wave. As earthquake wave, Hachinohe and Elcentro waves were used and acceleration and displacements are measured to analyze behaviors of dam body. For ground maximum acceleration range (0.3~0.9g), the results showed linear behavior regardless of ground maximum acceleration and secured safety of structure. To analyze the behavior of dam after tension cracking, 3cm-notch was placed at the critical section of over-flowing section. As results of applying Hachinohe wave(0.8g), Even though tension cracks were formed at over-flowing section by Hachinohe wave(0.8g), it showed that the dam is stable for supporting upper stream part of water tank of dam.

### 1. 서론

본 연구는 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 거동분석 및 안정성을 평가하였다.<sup>3),4),5)</sup>

### 2. 연구 내용 및 시험 방법

콘크리트 댐의 지진에 대한 구조적 안정성 및 동적 거동 특성을 파악하기 위해서 상사법칙을 적

\* 정회원 · 경주대학교 건설환경공학부, 조교수

\*\* 한국수자원연구원, 수석연구원

\*\*\* 경주대학교 건설환경공학부, 조교수

\*\*\*\* 경주대학교 건설환경공학부, 조교수

용한 댐의 축소모형 1g 진동대 시험을 수행하였다. 콘크리트 댐의 동적 거동 특성을 정량적으로 모사하기 위해 표 1과 같이 Scott and Iai의 상사 법칙을 적용한 1/100scale 모형 시험체를 제작하였으며, 지진동의 영향을 고려하기 위해서 Hachionhe, Elcentro 지진파를 입력하여 응답가속도 및 응답변위를 계측하여 댐의 안정성을 평가하였다.<sup>6)</sup>

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

표1. 진동대 모형시험을 위한 주요상사법칙(Scott and Iai, 1989)

물리량	상사법칙(원형/모형)			
	일반화된 상사법칙	실제 사용되는 상사법칙		
		제 1형태	제 2형태	제 3형태
		$\lambda_p = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_p = 1$	$\lambda_\epsilon = 1, \lambda_p = 1$
길이	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$
밀도	$\lambda_p$	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
변위	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	$\lambda$
응력	$\lambda\lambda_p$	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$
변형률	$\lambda_\epsilon$	$\lambda_\epsilon$	$\lambda^{0.5}$	1
강성	$\lambda\lambda_p/\lambda_p$	$\lambda_p/\lambda_p$	$\lambda^{0.5}$	$\lambda$

표2. 실험에 적용된 상사비

구성	물리량	축소 스케일
댐	단위중량	$\rho = 1$
	길이	$L = 1/100$
	탄성계수	$E = 1/100$
	강도	$\sigma_c = 1/100$
	변형율	$\epsilon = 1$
	힘	$F = (L = 1/100)^3$
지진	변위	$\Delta L = 1/100$
	가속도	$a = 1$
	주기	$T = 1/\sqrt{100}$

### 3. 진동대 시험

#### 3.1 콘크리트 댐 단면

진동대 시험에 사용된 콘크리트 댐 단면은 댐의 월류부를 대표단면으로 설정하였으며, 길이의 상사비 1/100을 적용하여 기초 부분에서 댐 상면까지 85cm, 기초 폭 21cm, 기초 길이 58cm로 제

작하였다. 댐 모형의 자세한 제원은 그림 1과 같다.

콘크리트 댐의 가정된 콘크리트의 역학적 특성 및 모형의 목표값은 표 3과 같다.

표3. 원형 및 모형 재료의 역학적 특성

	$\gamma_t$ $tf/m^3$	E $kgf/cm^2$	$\sigma_c$ $kgf/cm^2$	$\sigma_t$ $kgf/cm^2$	$\nu$
댐원형 콘크리트	2.3	200,000	200	20	0.2
댐 모형재료	2.3	2000	2	0.2	0.2

표 4는 압축강도 및 인장강도는 상사성을 만족하고 있으나 탄성계수에 대해서는 만족하지 못하고 있다. 따라서 비선형 변형거동을 재현하기에는 미흡하지만 재료의 강도가 상사성을 만족하고 있고, 댐체의 캔틸레버 거동으로 인한 파괴는 압축파괴 보다는 인장균열로 발생하는 파괴가 지배적이라는 점을 고려하여, 표4의 배합비를 이용하여 축소모형 댐체를 제작하였다.

표4. 댐 축소모형에 사용된 재료의 배합비 및 역학적 특성(\* 중량비)

물/석고	규조토/ 석고	모래/석고	동슬래그/ 석고	E $kgf/cm^2$	$\sigma_c$ $kgf/cm^2$	$\sigma_t$ $kgf/cm^2$	$\gamma_t$ $tf/m^3$
6.0*	3.0*	12.0*	20.0*	500	2.0	0.19	1.9

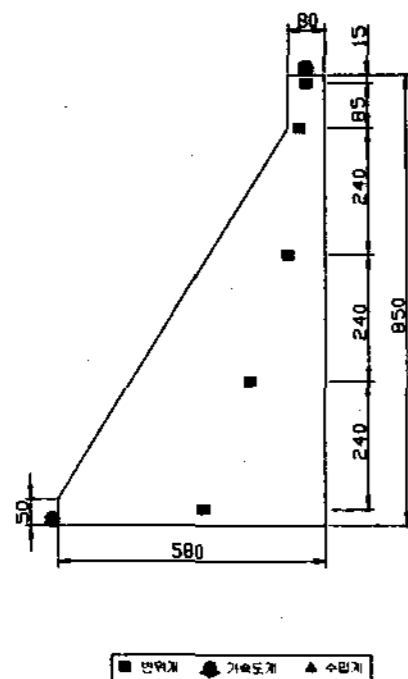


그림 1. 진동대 시험 단면도

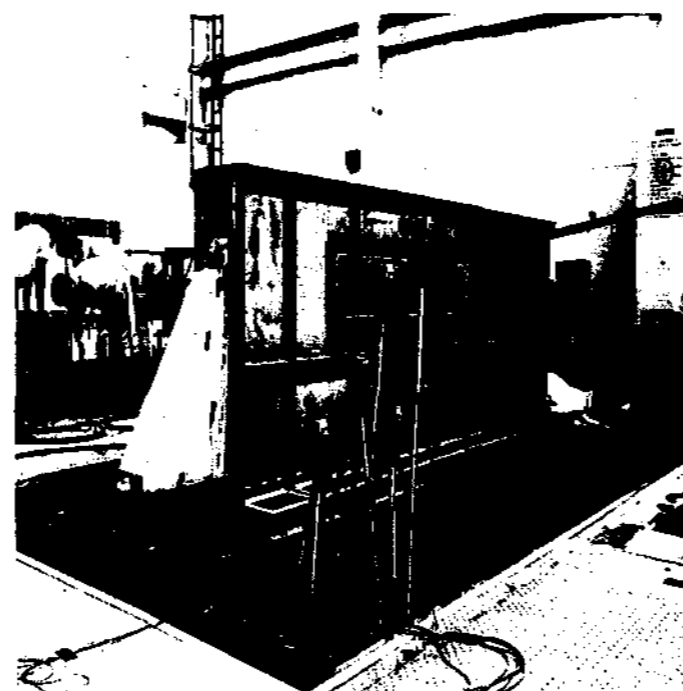
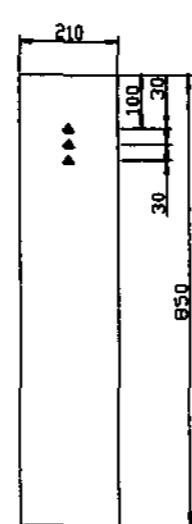


그림 2. 진동대 및 댐체 모형

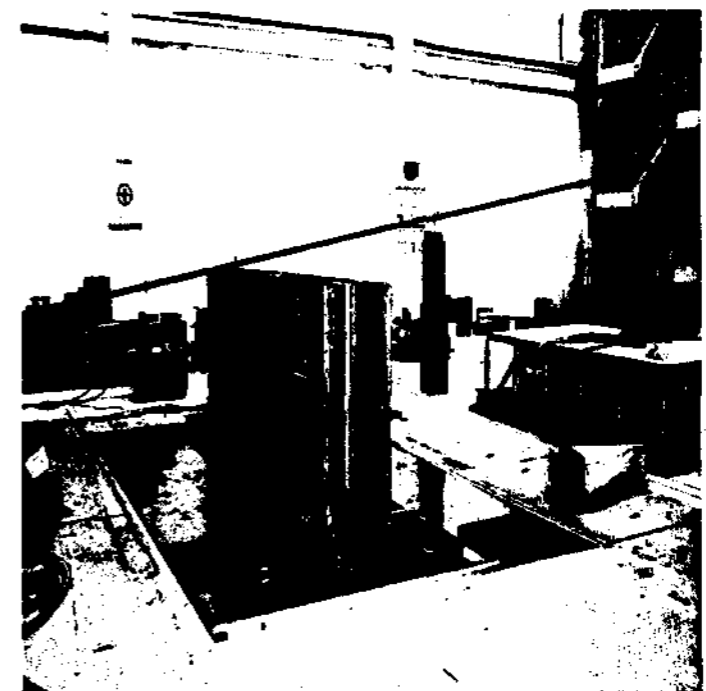


그림 3. 진동대 수조

### 3.2 진동대 및 수조

본 시험에 사용된 진동대는 그림 2와 같고 크기는 가로x세로가 5mx3m로서 최대 시험하중은 30tf, 최대 가속도는 1.0g이며, 시험 가능한 진동 주기의 특성은 30Hz이다.

본 시험에 사용된 모형수조의 크기는 그림 3과 같이 길이 400cm, 폭 25cm, 높이 150cm이며, 두께는 0.3mm의 철판으로 제작하였다. 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 압력게이지 3개, 가속도계 3개, 광학 변위계 5개이다. 동 압력게이지는 정격용량이 200kPa이며, 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.

### 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 측정한 가속도 값을 Fourier변환 실시한 후 댐 모형의 주파수 응답 곡선을 산정한 결과 댐 모형의 기본 진동수는 약 43Hz로 나타났으며 댐 모형의 감쇠계수는 0.01로 산정되었다.

Hachinohe파 및 Elcentro파를 적용한 시험결과 진동대 지반의 진동수는 30Hz이하의 영역이 지배적으로 나타났다. 따라서 댐 모형과의 공진현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

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, Elcentro 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

#### 3.5.1 Hachinohe 지진파

Hachinohe 지진파를 적용한 결과 댐 모형의 응답 가속도 및 변위이력곡선이 그림 4~11과 같다.

진동대의 최대가속도가 0.3g인 경우와 0.8g 인 경우 진동대의 최대 가속도에 관계없이 가속도 및 변위 이력곡선은 매우 비슷한 경향으로 나타났다. 이러한 결과는 댐모형이 선형거동을 하기 때문으로 판단된다. 댐 상면에서의 최대 변위는 0.3g 의 경우 0.45mm, 0.8g의 경우 2mm가 발생하였다. 댐 모형의 저면에서의 가속도와 상면에서의 가속도를 비교 할 경우 지반 최대가속도가 0.3g의 경우 주파수성분의 변화 없이 2.6배, 0.8g의 경우 3.6배 증가하였다.

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

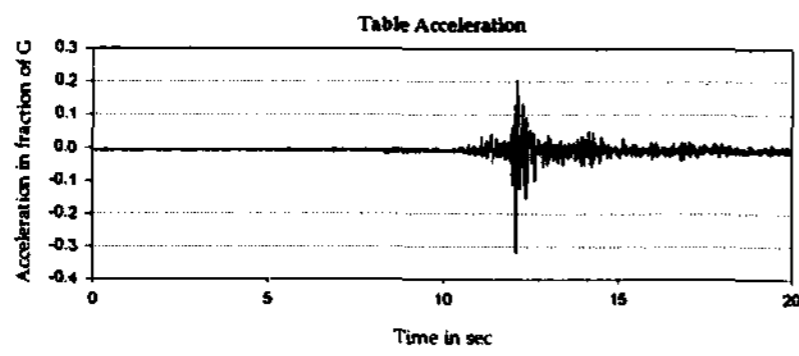


그림 4. 진동대의 지반 가속도 (0.3g)

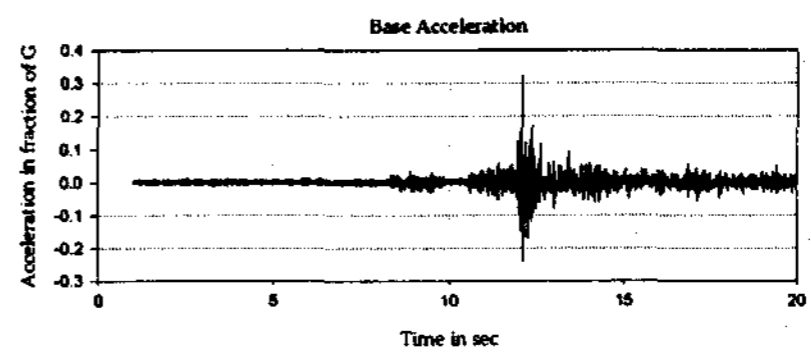


그림 5. 저면에서의 측정 가속도 (0.3g)

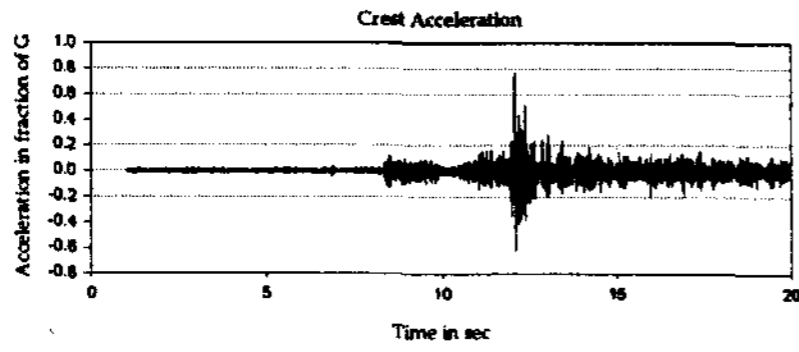


그림 6. 상면에서의 측정 가속도 (0.3g)

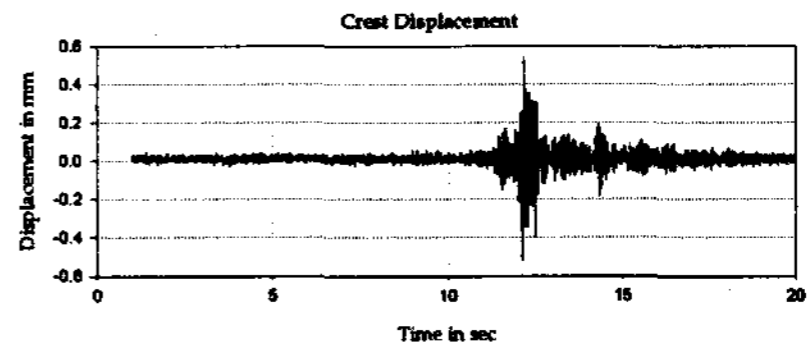


그림 7. 상면에서의 변위 (0.3g)

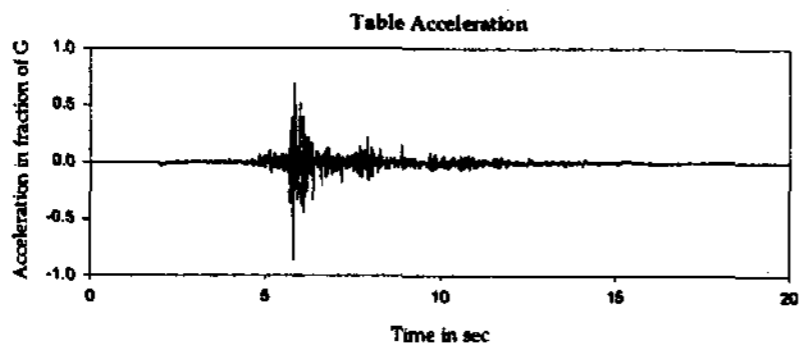


그림 8. 진동대의 지반 가속도 (0.8g)

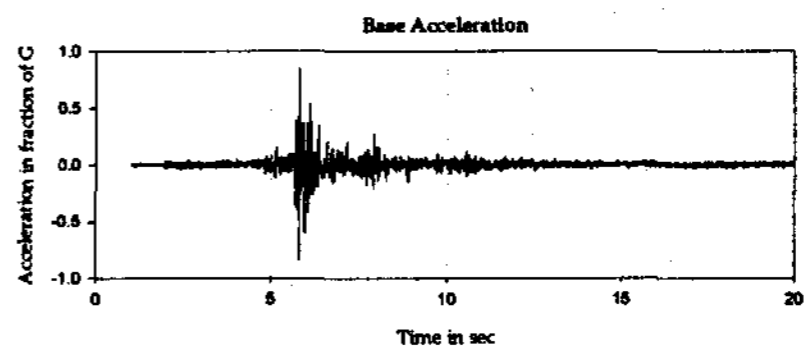


그림 9. 저면에서의 측정 가속도 (0.8g)

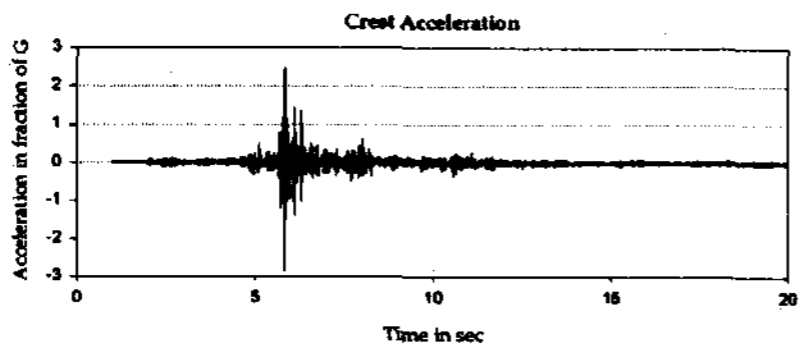


그림 10. 상면에서의 측정 가속도 (0.8g)

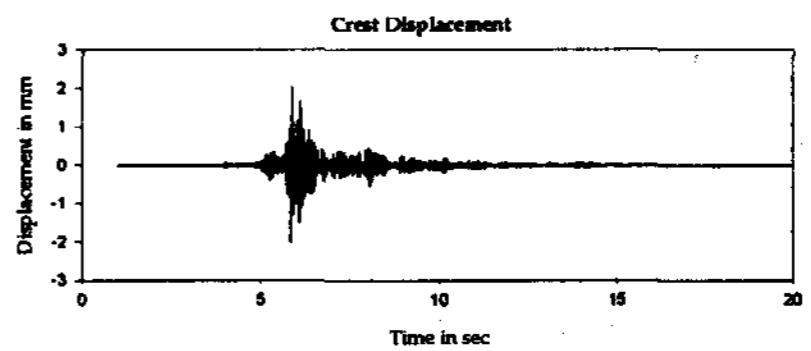


그림 11. 상면에서의 변위 (0.8g)

### 3.5.2 Elcentro 지진파

Elcentro 지진파를 적용한 결과 그림 12~18은 지반의 응답가속도 및 변위 이력곡선이다. Hachinohe 지진파와 같이 이력곡선은 지반최대 가속도에 관계없이 매우 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 댐 상면에서의 최대 변위는 0.3g 의 경우 0.7mm, 0.8g의 경우 1.8mm가 발생하였다.

Elcentro 파 역시 매 진동 후 균열검사를 실시하였으며, Hachinohe 지진파에서와 마찬가지로 댐 모형에서의 균열은 발생하지 않았다.

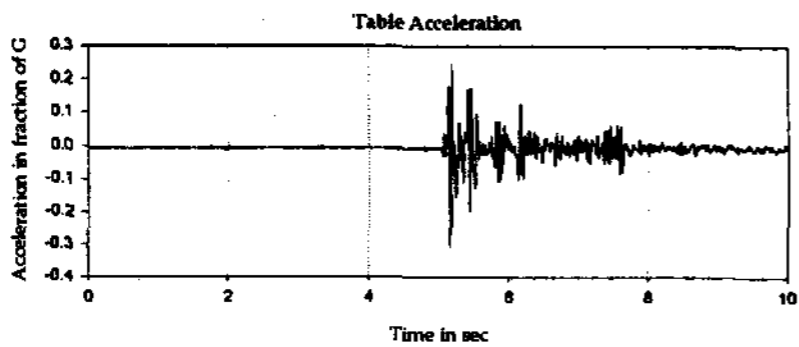


그림 12. 진동대의 지반 가속도 (0.3g)

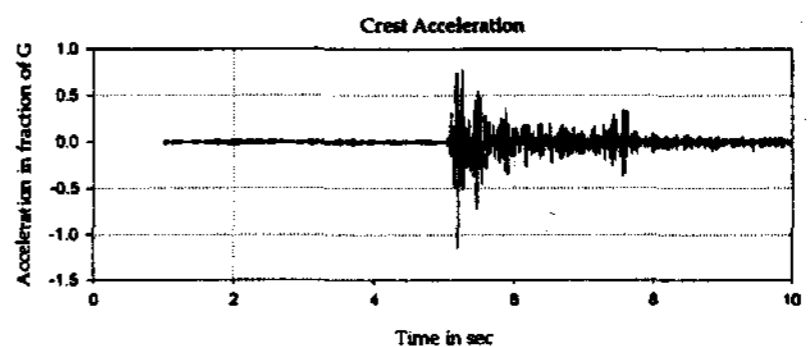


그림 13. 상면에서의 측정 가속도 (0.3g)

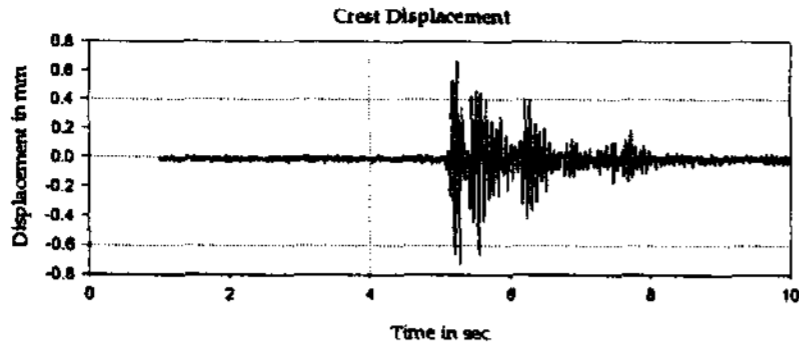


그림 14. 상면에서의 변위 (0.3g)

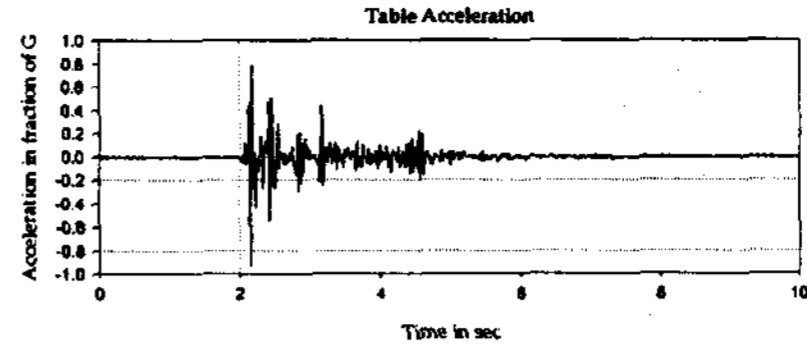


그림 15. 진동대의 지반 가속도 (0.9g)

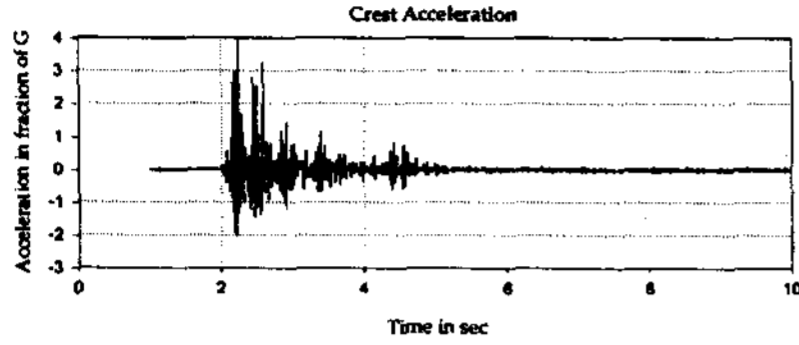


그림 16. 상면에서의 측정 가속도 (0.9g)

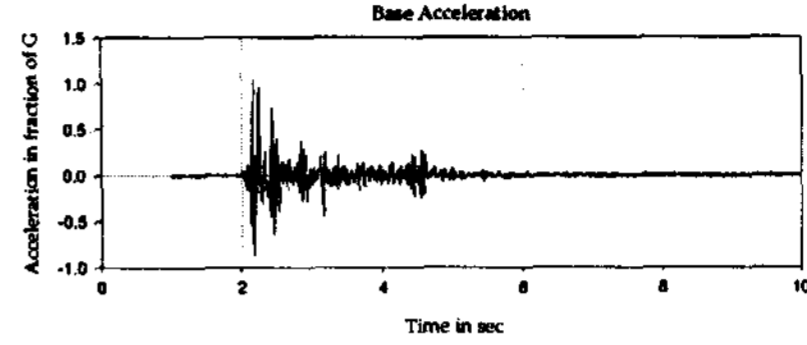


그림 17. 저면에서의 측정 가속도 (0.9g)

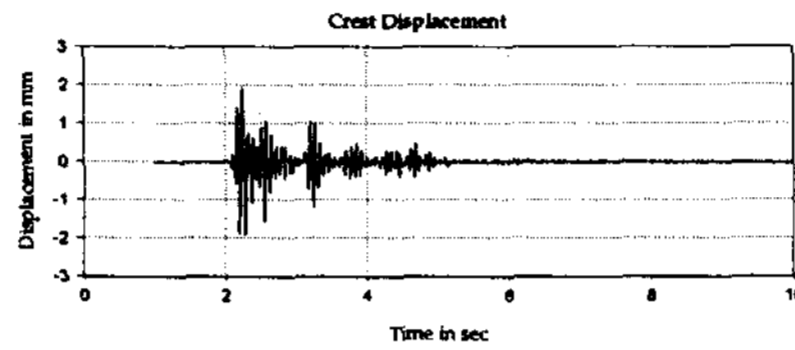


그림 18. 상면에서의 변위 (0.9g)

### 3.6 댐 모형의 균열후 거동

본 시험에 사용된 진동대의 최대가속도는 1.0g로서 댐 모형에 균열을 발생시키기에는 그 한계를 가지고 있으므로 그림 19에서 보이는 것과 같이 댐 모형의 위험단면에 notch를 두어 최대가속도 0.8g의 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 것이다.<sup>7)</sup>

그림 20은 월류부의 위험단면에 3cm의 notch를 설치한 것이며, 시험 후 발생한 균열의 형태를 나타낸 것이다. 균열은 댐 상면의 위험단면에 설치한 notch에서 발생한 인장균열로 시작되었으며 댐 측면에 전반적으로 발전하였다. 댐 상면(crest)에서 측정한 가속도와 변위이력곡선은 그림 21, 22와 같다. 그림 11과 그림 21을 비교한 결과 댐의 위험단면에 발생한 균열로 인하여 가속도가 더욱 증폭되었으며, 그림 22과 그림 12를 비교한 결과 균열로 인하여 영구적 변위가 나타났다. 본 시험 결과 댐 모형은 균열 발생 후에도 댐 상류의 수조를 지지하고 있으므로 구조적인 안정성은 이상이 없는 것으로 나타났다.

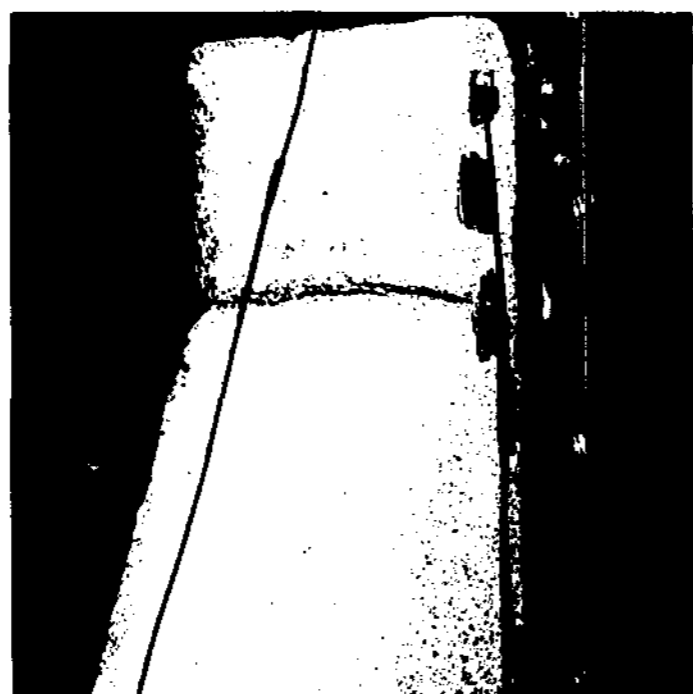


그림 19. 댐 모형 상면에서의 notch



그림 20. 댐 모형 상면에서의 균열

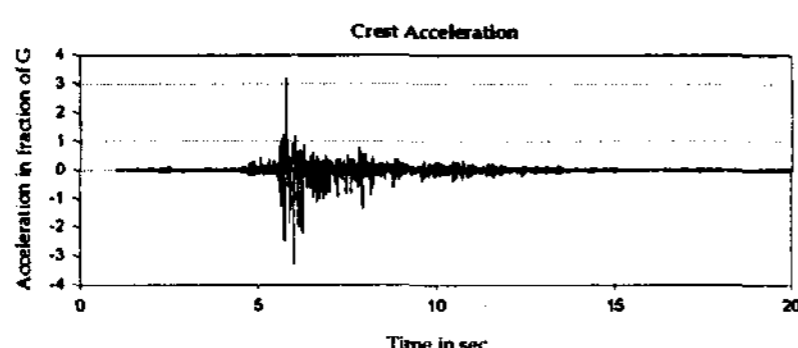


그림 21. 상면에서의 가속도  
(Hachinohe, 3cm notch)

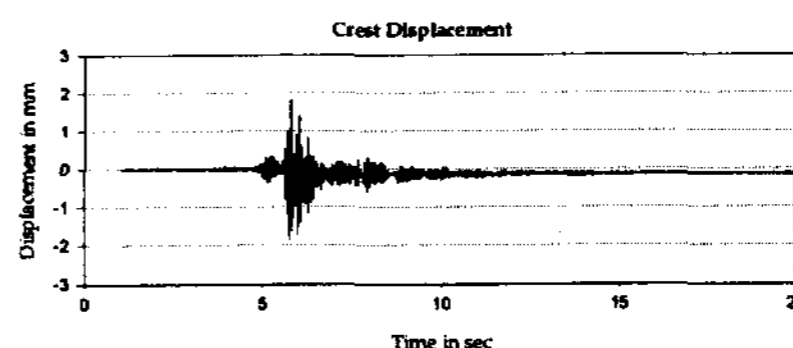


그림 22. 상면에서의 변위  
(Hachinohe, 3cm notch)

#### 4. 결론

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

- (1) 상사법칙을 적용하여 만들어진 댐의 축소모형은 그 재료가 석고-규조토-모래-동슬래그일 경우에는 콘크리트와 비교할 때 적절한 역학적 성질을 갖는다. 탄성계수는 시험에 적용한 상사비 보다 4배 과대 축소되었으나, 재료의 강도가 상사성을 만족하고 있고, 댐 체체의 켄틸레버 거동으로 인한 파괴는 압축파괴 보다는 인장균열로 발생하는 파괴가 지배적 이라는 점을 고려할 때 댐 원형의 파괴모드 분석 및 구조적 안정성 평가에는 적합할 것으로 사료된다.
- (2) Hachinohe 지진 및 Elcentro 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.
- (3) Hachinohe 지진 및 Elcentro 지진파를 진동대 지반 최대 가속도에 0.3g~0.9g까지 적용하여 시험한 결과 진동대의 최대 가속도에 관계없이 가속도 및 변위 시간 이력곡선은 유사한 경향으로 분석되었으며, 이는 콘크리트 댐 구조물이 선형 거동을 하는 것으로 판단된다.

(4) 콘크리트댐 대표단면의 균열 후 거동특성을 평가하기 위하여 댐의 위험단면에 2cm 및 3cm의 notch를 두어 최대가속도 0.8g의 Hachinohe과를 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

본 연구는 (주) 현대 건설의 연구지원으로 수행되었음을 밝히며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. Iai, S., 1989, "Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field," Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 29(1), pp. 105-118.
2. Scott, R., 1989, "Centrifuge and Modeling Technology: A Survey," Rev. Franc. Geotech., No. 48., pp. 15-34.
3. Saini, S. S. and J. Krishna., 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.
4. Oberti, G., 1979, "Contribution of Models to the Modern Design and Safety Control of Large Concrete Dams," ISMES Report, No. 116, Bergamo, Italy.
5. Hansen, K. D. and Roehm, L. H., 1979, "The Response of Concrete Dams to Earthquakes," Water Power and Dam Construction, Vol. 31, No. 4, pp.27-31.
6. 황재익 외 3명, "1g 진동대 모형시험에서의 상사법칙 적용성 평가", 한국지진공학회 2002년도 춘계 학술대회 논문집
7. 건설교통부, 댐설계기준, 2001
8. 이지원, 이경성, 댐의 설계와 시공편람, 신기술, 2001