

콘크리트 중력식댐의 내진성능 평가에 관한 연구

A Numerical Analysis for the Seismic Capacity of Concrete Gravity Dams

소진호*

김용곤**

정영수***

So, Jin Ho

Kim, Yong Gon

Chung, Young Soo

ABSTRACT

The objective of this study is firstly to frame up the seismic safety of concrete gravity dams. It is necessary to analyze seismic response and evaluate seismic performance of concrete gravity dams during earthquake. In this study, seismic damage and dynamic analysis of concrete gravity dams using SAP2000 program are performed. Additional dynamic water pressure due to earthquake considered as additional mass for numerical seismic analysis. But, further research will be needed for the seismic stability of dams.

1. 서론

댐 시설물에 대한 지진 피해는 단순히 시설물의 피해뿐만 아니라 주변 지역에 위치한 주거 지역 등의 피해를 유발하여 심각한 인명, 재산상 피해가 발생할 수 있다. 최근 국내에서도 지진발생 빈도가 증가함에 따라 내진에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이에 대한 기준의 강화 및 적용은 바람직한 현상이라고 할 수 있다. 그러나 이와 같은 내진 측면의 접근은 대부분 신설 시설물의 설계에 국한되어 있으며, 내진 기준 강화 이전의 기존 시설물에 대한 관심 및 적용은 극히 미비한 실정이다. 따라서 체계의 지진 파괴에 의한 피해를 예방하기 위해서 기존 댐 시설물의 내진 성능에 대한 평가 기법 연구가 시급한 실정이다.

2. 연구목적

내진에 대한 관심이 미미했던 과거에 설계·시공되어 현재까지 이용되고 있는 기존 시설물의 경우에는 지진이 발생할 경우 사용 연수의 증가에 따라서 피해가 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 기존 댐 시설물에 대하여 지진 발생 시 구조물의 거동특성을 파악하여 기존 댐 시설물에 대한 안정성 및 내진 성능에 대한 평가를 기존의 프로그램을 이용한 해석을 통하여 댐 시설물의 동적인 거동을 파악하는 것을 목적으로 한다.

* 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 석사과정

** 정회원, 환경대학교 이공학부 안전공학과 교수

*** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

3. 지진에 의한 댐의 피해사례

3.1 Shih-Kang 댐

최근에 발생한 대규모 지진으로 대만에서 1999년 9월 21일에 규모 7.7의 강진이 발생되었다. 이 지진으로 인하여 많은 사상자가 발생되었고 Shih-Kang댐이 큰 손상을 입었다. Shih-Kang댐은 높이 25m, 길이 357m이고 18개의 수문으로 구성된 콘크리트 중력식댐으로 댐 상류부의 저류지의 물이 바닥이 드러났고, 댐의 양측으로 물길이가 이루어져 있었으며 댐의 좌측부분이 본래의 표고이고 나머지 200m에 달하는 댐 전체가 단층운동에 의해 지반이 10m 정도 융기되어 댐이 파괴되었다.

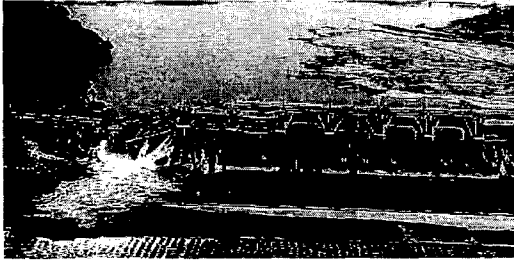


그림 1. Shih-Kang 댐 - 하류측

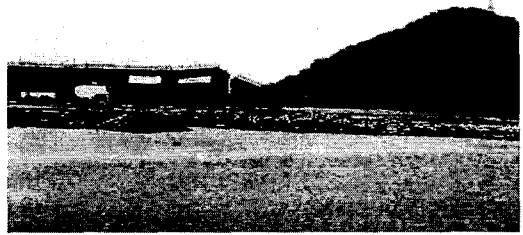


그림 2. Shih-Kang 댐 - 상류측

3.2 Koyna 댐

1967년 12월 11일 인도 서부지방의 지진시 Koyna댐이 손상되었다. 댐 높이 103m, 길이 853m의 콘크리트 중력댐으로 기초지반은 현무암이다. 지진의 규모는 7 이었고 댐 지점에서 MM VII내지IX인 강진이었다. 주요 피해로는 하류측에서의 제체단면이 급변하는 표고에서 수평 균열이 발생하였고 상류측 블록의 세로 이음에서는 서로 인접한 블록의 심한 충돌로 인하여 콘크리트의 누수현상이 일어났다. 지진 피해후 부벽을 댐체에 설치하여 보강하였다.

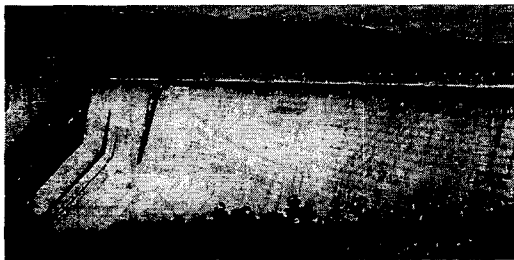


그림 3. Konya 댐

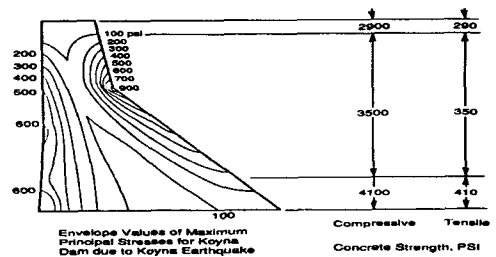


그림 4. 지진시 발생된 최대 응력과 콘크리트 강도

4. 댐에 작용하는 하중

콘크리트 중력식댐의 안전성을 검토하기 위해 고려해야 할 하중은 다음과 같다.

4.1 제체의 자중

제체는 무근콘크리트로 단위중량이 큰 콘크리트일수록 유리하며 양질의 골재 사용시에는 $2.3\text{tonf}/\text{m}^3$ 을 넘기도 하지만 일반적으로 $2.3\text{tonf}/\text{m}^3$ 으로하며 제체의 체적을 곱하면 연직방향으로 작용하는 제체의 자중을 구할 수 있다.

4.2 정수압

정수압 계산을 위한 수위는 상시만수위에 과의 높이를 더한 수위로 계산하도록 하며 댐에 작용하는 정수압은 댐의 상류면에 수직으로 작용하고 수압은 수심에 비례한다.

$$P_h = W_w \cdot h \quad (1)$$

여기서, P_h : 정수압($tonf/m^2$), W_w : 물의 단위중량($tonf/m^3$), h : 수위(m) 이다.

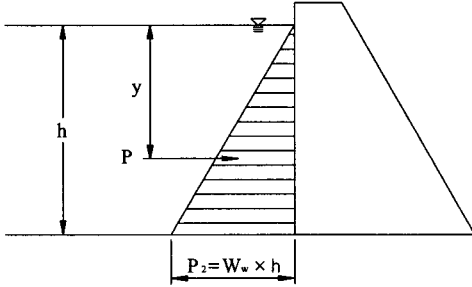


그림 5. 댐에 작용하는 정수압

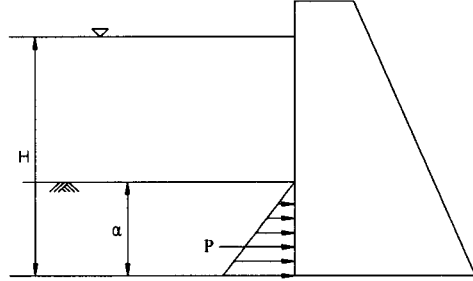


그림 6. 댐에 작용하는 퇴사압

4.3 퇴사압

댐에 유입되는 저수는 상당한 양의 토사를 운반하기 때문에 토사의 퇴적을 고려하여야 하며 일반적으로 댐의 설계시에는 100년간의 퇴사량을 기준으로 한다.

$$P_s = K_a \cdot \gamma_{sub} \cdot d \quad (2)$$

여기서, P_s : 퇴사압($tonf/m^2$), K_a : 수평토압계수(0.4~0.6), γ_{sub} : 퇴사의 수중단위중량($0.95 \sim 1.1 tonf/m^3$), d : 퇴사 깊이(m) 이다.

4.4 동수압

지진력 작용시 발생하는 수압으로 Westergaard의 근사해를 적용한다. 동수압은 다음의 5. Westergaard에 의한 동수압의 일반해를 참고한다.

4.5 관성력

콘크리트댐과 같이 탄성변형이 적은 강체로 간주할 수 있는 구조물에서는 지진에 의한 동력학적 해석이 매우 복잡하므로 관성력을 도입하여 정력학적으로 취급할 수 있으며 댐체에 작용하는 관성력은 제체의 자중에 설계진도를 곱한 값으로 하고, 수평으로 작용하는 것으로 한다. 그리고 연직진도는 일반적으로 진원지 부근이 아니면 수평진도의 1/3~1/2이하로 산정한다.

$$I = W \cdot K_D \quad (3)$$

여기서, I : 지진시 댐체에 작용하는 관성력(t/m^3), W : 댐체의 단위중량(t/m^3), K_D : 제체의 설계진도 이다.

$$K_D = A \cdot S \cdot r_2 \quad (4)$$

여기서, A : 지역별 지반진도(지진구역도 이용 Zone I = 0.11, Zone II = 0.07),

S : 지반 조건에 따른 정수 (1.0~2.0),

r_2 : 댐 종류에 따른 정수 (중력댐: 1.0, 아치댐: 2.0) 이다.

5. Westerggaard에 의한 동수압의 일반해

5.1 기본가정

Wasterggaard는 동수압의 해를 구하기 위하여 다음의 가정을 사용하였다.

- (1) 댐제체와 저수지의 상류측은 수직이다.
- (2) 저수지는 수평인 저면을 가진 2차원의 반무한체이다.
- (3) 저수의 점성은 무시한다.
- (4) 댐의 상류면에서 댐 제체의 수평방향 변위와 유체의 수평방향 변위는 서로 같다.
- (5) 수면에서는 응력이 작용하지 않는다.(표면파의 파고 영향을 무시)
- (6) 저수지 바닥에서의 유체의 수직방향 변위는 0이다.
- (7) 저수지의 무한원방에서 동수압은 0이다.

동수압의 기본방정식으로써 다음과 같은 파동방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{1}{C_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (5)$$

여기서, $p(x, y, t)$ 는 동수압이고 $C_0 = \sqrt{\frac{gK}{W_0}}$ 로써 수중에서 탄성파의 전파속도이다.

입력진동에 의한 댐 상류면에서의 경계조건은 가정 (4)을 고려하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial(\phi, y, t)}{\partial x} = -\frac{W}{g} a_0 e^{i\omega t} \quad (6)$$

여기서, a_0 는 입력가속도진폭, ω 는 조화진동의 각진동수이다.

또, 가정 (5)에서 저수표면의 조건은 다음 식으로 표시된다.

$$p(x, H, t) = 0 \quad (7)$$

같은 방법으로 가정 (6)에서 얻을 수 있는 저수지의 저면에 대하여 다음의 경계조건이 설정된다.

$$\frac{\partial p(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

또한, (7)의 경계조건으로부터 다음 경계조건이 성립된다.

$$p(\infty, y, t) = 0 \quad (9)$$

5.2 동수압의 급수해

파동방정식은 변수분리법을 이용하여 풀 수 있다. 즉, 동수압 $p(x, y, t)$ 는 입력진동과 같은 진동수의 조화진동이므로 결국 파동방정식의 해는 다음과 같이 된다.

$$p(x, y, t) = \sum_r \frac{2W_0}{gH} \frac{(-1)^{r+1}}{\lambda_r \cdot J_r} \cos(\lambda_r y) e^{-J_r x} a_0 e^{i\omega t} \quad (10)$$

여기서,

$$\lambda_r = \frac{(2r-1)\pi}{2H} \quad (r=1, 2, 3, \dots) \quad (11)$$

$$J_r = \sqrt{\lambda_r^2 - \frac{\omega^2}{C_0^2}} \quad (J_r \text{은 실수}) \quad (12)$$

이다.

5.3 동수압해의 성질

Westergaard의 가정을 기본으로 얻어진 동수압의 해는 위의 파동방적시의 해로 표시되지만 식(12)의 필요 조건에서 $\omega < \frac{\pi C_0}{2H} = \omega_0$ 의 경우에만 해가 존재한다. 그리하여 댐 상류면의 동수압은 간단한 근사식으로 나타낼 수 있고, 특히 동수압의 분포를 포물선으로 근사한 경우에는 입력진동의 주기에 관계없이 다음과 같은 근사식으로 표시될 수 있다.

$$p = \frac{7W_0}{8g} a_0 \sqrt{H(H-h)} \quad (13)$$

여기서, W_0 : 유체의 단위중량, g : 중력가속도, a_0 : 입력 가속도 진폭 이다.

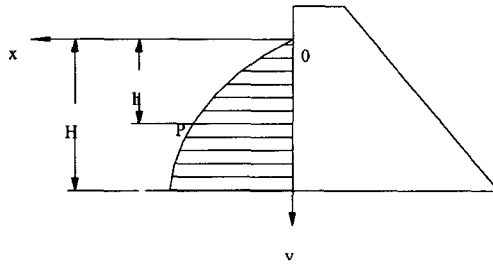


그림 7. 댐에 작용하는 동수압

6. 해석 예제 및 결과

댐의 동적거동특성 파악을 위하여 입력지반운동은 국내인공지진인 T2 (도로공사, PGA=0.2g)와 심진강댐을 2차원 유한요소로 모델링(높이: 64m, 기초 폭: 54m, 절점: 170개, 요소: 144개 기초지반: 경암 - 그림8 참조)하였고, 댐의 재원과 물성값은 다음 표 1, 2와 같다.

표 1. 심진강댐의 재원

구 분	재 원	비 고
형 식	콘크리트 중력식	
위 치	진라북도 임실군	구역계수 : Zone I = 0.11 g
높 이	64 m	위험계수: 6 (>45 m)
길 이	344.2 m	
저 수 용 량	466 hm ³	위험계수: 6 (>120 hm ³)
상시 만수위	61.7 m	
내 진 등 급	특등급	위험계수 : 36 (>7)

표 2. 심진강댐의 물성값

댐체의 탄성계수	$2.3 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$
콘크리트 단위중량	2.3 tonf/m^3
포아송비	0.2

해석의 방법은 정적해석, 등가정적해석, 동적해석의 3가지 경우로 나누어 해석하였으며 등가정적해석시에는 물의 동수압은 Westergaard의 이론해를 이용하여 수심에 따라 최대값을 입력하고 관성력을 도입하여 해석하였고 동적해석시(Time History해석)에는 수치적분을 이용하여 체체에 작용하는 동수압을 부가질량의 개념으로 댐체와 같이 진동하는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 동적해석시 이용한 T2 인공지진은 그림9에 표시하였으며 PGA는 0.2g 이다. 해석법에 따른 응력과 변위의 결과는 다음 표 3과 같다. 동적해석시 거동에 영향을 주는 모드를 분석하기 위해 모드의 중첩에 따른 변위의 관계를 구하였고 공수위와 상시만수위일 때의 모드에 따른 주기의 변화를 표 4에 나타내었다.

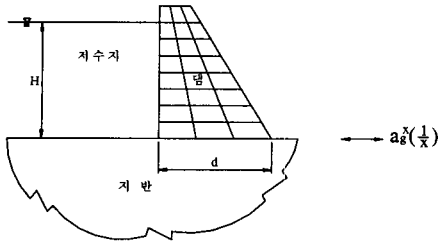


그림 8. 유한요소 모델

T2 인공지진

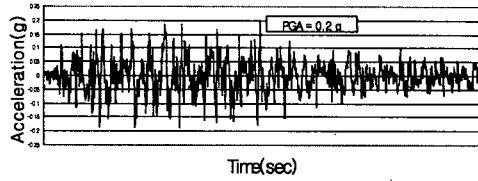


그림 9. T2 인공지진파(Horizontal)

표 3. 해석방법에 따른 응력(상류면하단)과 변위(댐마루부) 변화

구 분	최대 응력 (상류면하단)	최대 변위 (댐마루부)	비 고
정 적 해 석	9.23 kgf/cm ²	0.189 cm	
등가정적해석	28.18 kgf/cm ²	0.899 cm	
동 적 해 석	54.62 kgf/cm ²	2.088 cm	

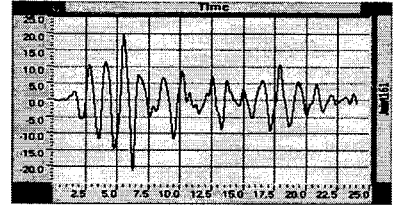


그림 10. 동적해석시 댐마루부의 변위

표 4. 모우드의 변화에 따른 최대변위와 저수에 따른 주기 변화

Mode 중첩	상 시 단 수 위		공 수 위
	댐마루부 변위	주 기 (T)	주 기 (T)
1	1.732 cm	1.3892 sec	0.1651 sec
2	2.059 cm	0.5073 sec	0.0739 sec
3	2.089 cm	0.3208 sec	0.0499 sec
4	2.089 cm	0.2569 sec	0.0407 sec

7. 결 론

(1) 해석의 방법을 다음 같이 정적해석, 등가정적해석, 동적해석으로 나누어 분석한 결과 각 방법에 따라 변위와 응력에서 차이를 보이고 있으며 댐의 지진시 거동 해석은 동적해석법을 이용한 해석이 보다 합리적이라 생각된다.

(2) 동적해석시 구조물의 거동에 영향을 주는 모우드는 1번째에서 3번째 모우드라는 것을 모우드의 중첩에 따른 변위의 변화를 이용한 분석에서 알 수 있다.(표 4 참조)

(3) 저수를 고려하면 유체로인한 구조물의 각 모우드에 따른 주기가 빨라짐을 알 수 있었다.

(4) 위의 결과는 Plane Stress 해석 결과이며 Plane Strain 해석 결과와 큰 차이를 보이지 않았다.

참고문헌

1. 日本建設省 土木研究所, 댐구조연구소, “콘크리트댐에 작용하는 지진시 동수압에 관한 실험적 검토”, 1991. 3.
2. 농림수산부, 농업진흥공사, “농지개발사업계획설계기준(콘크리트댐편)”, 1989. 10.
3. J. Lee, G. Fenves, “A plastic damage concrete model for earthquake analysis of dam”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No.27, pp.937-956, 1998
4. 건설교통부, “댐 시설 기준”, 1993