

콘크리트댐의 지진응답 해석 사례 Seismic Response Analysis of Concrete Dam

정우성* 오병현** 신동훈** 이종욱*
Jung, Woo-Sung Oh, Byung-Hyun Shin, Dong-Hoon Lee, Jong-Wook

ABSTRACT

Recently, as the number of earthquake event in Korean peninsula is getting increased, and its magnitude is also getting bigger, the need for revision of the seismic design standard related to dam facility is taken as a national wide issue of earthquake disaster prevention.

This study was made to check the seismic response of a concrete gravity dam subjected to a manmade earthquake wave. The manmade earthquake wave with the peak acceleration of 0.2G was generated using the SMSIM 11 provided publicly by USGS. For the dynamic analysis of a concrete dam, ADINA program was run under Rayleigh damping condition(damping ratio adapted is 10 %) and 2D-plane strain condition.

The results of analysis show about 3.8 times that of input wave at the dam crest, and maximum horizontal stress shows 66.67kg/cm².

1. 서론

최근에 국내의 지진발생 빈도가 증가하고 지진규모가 커지고 있어 가까운 장래에 인명과 사회-경제 시스템에 큰 피해를 초래할 수 있는 대규모 지진 발생이 우려되고 있다.

이러한 지진발생에 따른 지진재해에 대응하기 위하여 각종 주요시설물의 내진안정성 및 내진성능향상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

현재 한국수자원공사에서 보유하고 있거나 건설중인 댐들은 댐시설기준(건교부, 1993)에 의해 지진에 대한 안정성을 정역학적인 방법에 의해 고려하고 있다. 향후 건설될 댐에 대하여 요구되고 있는 새로운 내진설계기준을 위하여 본 수자원연구소에서는 댐 내진 안정성에 관한 연구를 계속적으로 수행하고 있다.

* 한국수자원공사 수자원연구소 연구원

** 한국수자원공사 수자원연구소 선임연구원

본 연구에서는 동역학적인 방법에 의한 기존댐의 내진성능 평가와 새로운 내진설계기준을 작성하기 위하여, 댐 종류별 동적해석에 의한 안정성 평가를 하고자, 먼저 콘크리트 댐의 동적 안정성 평가를 최대 수평 지진가속도가 0.2g까지 적용하여 최대 연직응력을 비교하여 댐설계시 적용된 허용응력과 비교하였고, 댐 안정성을 평가 하고자 한다.

콘크리트 댐의 동적해석을 위하여 범용 구조해석용 프로그램인 ADINA(Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis)를 이용하였으며, 감쇠(Damping)율은 Rayleigh 공식을 사용하였고, 모델은 2D-Plane Stain으로 해석을 하였다.

2. 콘크리트 댐의 동적해석

2.1 개요

콘크리트 댐의 거동해석에 있어서 유한요소법을 이용하여 신뢰할 수 있는 해석결과를 얻기 위해서는 해석대상이 될 실제의 현장상태에 대하여 기하학적 형상, 경계조건, 하중재하 및 축조재료의 특성을 합리적으로 모델링하여야 한다.

해석조건에 있어 콘크리트 댐은 균일한 기초위에 댐 길이가 매우 긴 경우를 제외하고는 3차원 구조물이다. 그래서 최근에는 댐에 대한 3차원 유한요소해석 기법까지 개발된 상태이나 경계조건이 복잡하여 계산시간이 많이 소요되는 관계로 중력식 댐에서는 횡방향 이음부에 Joint grouting으로 댐을 일체화한 경우 이외는 횡방향 이음으로 분리된 독립된 캔틸레버보의 집합체로 생각하여 평면변형 조건(plane strain)의 2차원 해석을 실시하는 것이 일반적이다. 경계조건의 설정에 있어서는 댐체 및 기초지반의 실제 거동을 고려하여 각 절점에 대한 변위 및 회전에 대한 자유도 및 구속조건을 가능한 실제와 가깝게 되도록 결정하였다.

2.2 평면응력-변형 모델

본 모델은 재료가 균질하고 등방성의 선형 연속체로써 재료의 응력-변형률관계가 선형을 나타내며 작용하중이 작거나 구조체가 상대적으로 강하여 미소변위가 발생하는 재료에 대하여 다음과 같이 탄성체의 기본적인 응력-변형률 관계를 이용하고 있다.

$$\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\} \quad (1)$$

여기서, $\{\sigma\}$, $\{\epsilon\}$ 는 각각 응력과 변형률이며, $[D]$ 는 탄성계수 E 와 포아손비 ν 로 표시되는 응력-변형률 매트릭스이다. 이 응력-변형률 관계는 탄성론으로부터 2차원 문제에 대하여 다음과 같은 평면변형(plane strain) 매트릭스 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{pmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

위와 같이 선형탄성 모델에서는 축조재료의 응력-변형 특성을 탄성계수 E와 포아슨비 ν 를 사용하여 모델링하였다.

2.3 Rayleigh Damping

동적인 유한요소해석에서는 damping matrix C가 질량 mass[M]과 강성 stiffness[K] 매트릭스에 비례하는 성분으로 구성된다.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3)$$

여기서, α : mass-proportional damping constant

β : stiffness-proportional damping constant

다 자유도 시스템에서 각 진동수(angular frequency : ω_i)에 의해 한계 damping 비(ξ_i)는 다음 식으로 유도된다.

$$\begin{aligned} \alpha + \beta \omega_i^2 &= 2\omega_i \xi_i \\ \xi_i &= \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \omega_i \right) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, ξ_i 는 damping 비 ω_i 는 각 진동수

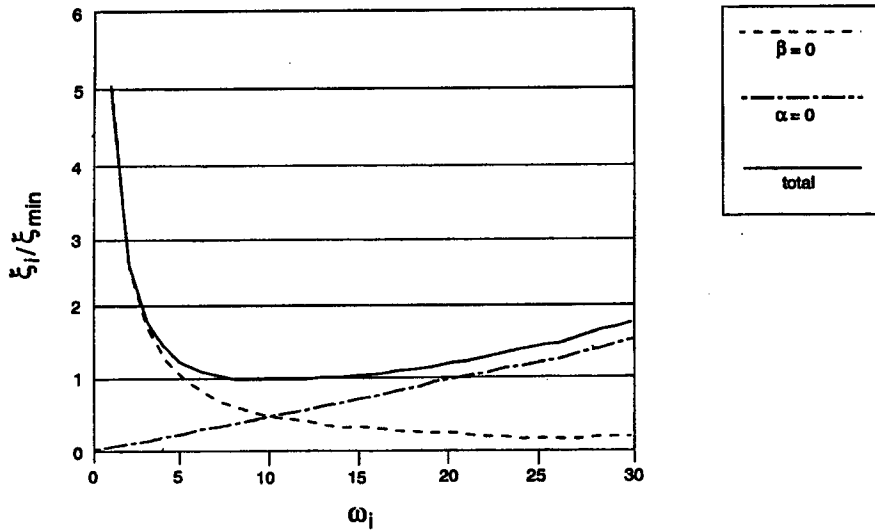


그림 1 일반화된 한계 감쇠비와 각진동수와 관계

그림 1로부터 두 곡선의 한성분 곡선은 다음일 때 최소에 도달한다.
 α 는 각 진동수가 낮은 범위에서 지배적이고, β 는 각진동수 큰 범위에서 지배적이다.

$$\xi_{\min} = \sqrt{\alpha\beta} \quad (5)$$

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$$

$$\alpha = \xi_{\min} \cdot \omega_{\min}$$

$$\beta = \frac{\xi_{\min}}{\omega_{\min}} \quad (6)$$

따라서 고유진동수(natural frequency : f)는 다음과 같다.

$$f_{\min} = \frac{\omega_{\min}}{2\pi} \quad (7)$$

여기서 고유진동수는 다음과 같이 구하였다.

댐의 고유진동은 연직 캔틸레버요소의 휨을 주로 하는 진동과 수평단순보 요소의 휨을 주로 하는 진동이 있는데 공진상태에서 특히 큰 진폭을 나타내는 것은 전자이다. 저수지가 비어

있을 때 캔틸레버요소의 휨진동의 고유주기는 이론적으로 다음과 같다.

$$T=1.183 \frac{H^2}{B} \sqrt{\frac{12\gamma}{Eg}} \quad (8)$$

저수지가 만수인 경우는 부가중량을 고려하면

$$T=(1.695\sim 1.637) \frac{H^2}{B} \sqrt{\frac{12\gamma}{Eg}} \quad (9)$$

여기서, H : 댐높이(m)

B : 댐의 저폭(m)

E : 콘크리트의 탄성계수 (t/m²)

γ : 콘크리트의 단위체적 중량(t/m³)

2.4 Westergaad 공식

지진시 저수에 의하여 댐은 동수압을 받는다. 이 힘은 댐에 작용하는 지진하중으로서 체체의 관성력과 같다. Westergaad는 댐의 가요성이 아니라는 가정에서 지진시 동수압을 계산하였다.

지진시 탁월 진동주기가 1sec 전후일 때 근사식이 성립하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P=kmg \quad (10)$$

$$m = \frac{7}{8} \cdot \frac{\gamma_w}{g} \sqrt{Hy} \quad (11)$$

여기서,

P : 지진시 동수압(kg/m²)

m : 저수의 등가질량

k : 수평지진계수

3. 콘크리트댐의 동적해석(H 댐)

3.1 해석모델

해석단면은 콘크리트 댐부의 비월류부분중 최저의 기초지반을 갖는 최대 단면을 선택했으며 횡단면은 내부 및 외부 콘크리트와 댐체, 기초암반으로 구성하였다(그림 2). 댐의 체원은 높이 89.5m이고 저폭은 76.84m이다.

지반암은 지반의 강성이 댐체에 미치는 영향을 고려하기 위하여 기초 아래 50m까지 포함시켜 모델링하였다. 본 유한요소망은 8절점 2차원 평면변형요소를 사용하였다. 경계조건은 기초지반의 수평 및 연직방향의 변위를 완전히 구속하였다. 재하중은 자중과 동수압을 작

용하였다.

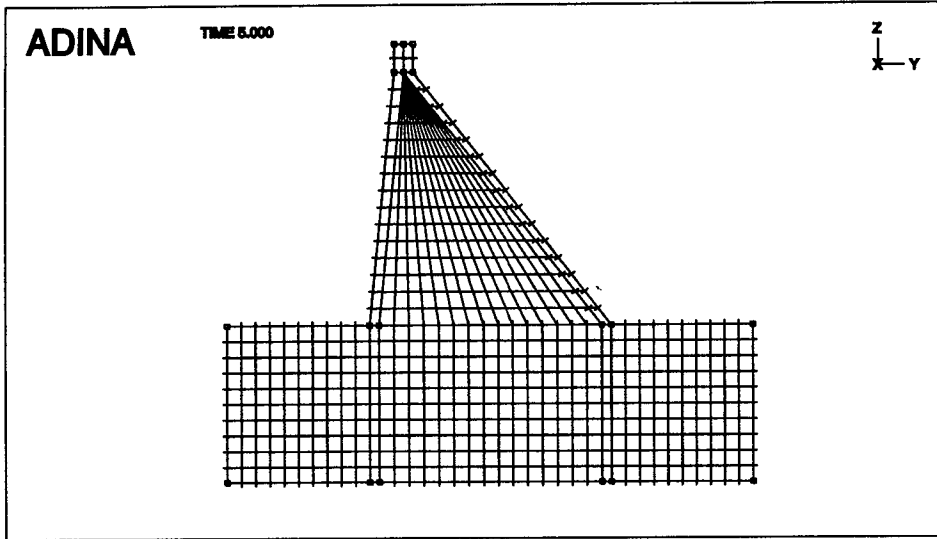


그림 2 유한요소 모델

3.2 입력물성치

입력물성치는 다음과 같이 3가지로 구성되었다.

표 1 입력물성치

Materials	Mat. of No.	Elasticity Modulus (t/m ²)	Poisson's Ratio	Unit Weight (t/m ³)	비 고
Outer Concrete $\sigma_{ck} = 180 \text{ kg/cm}^2$	3	2.01E06	0.17	2.3	
Inner Concrete $\sigma_{ck} = 120 \text{ kg/cm}^2$	2	1.64E06	0.17	2.3	
Foundation Rock	1	2.30E06	0.17	2.3	

3.3 입력지진파의 선정

입력 지진파는 SMSIM 11으로 생성된 최대 응답가속도가 0.2g를 5초동안 작용시켜 동적해석을 하였다. 입력지진파는 다음 그림 3과 같다.

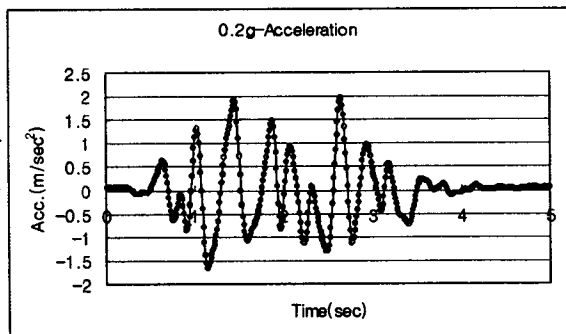


그림 3 최대 지반가속도가 0.2g인 인공지진파

4. 해석결과

이상과 같은 조건으로 해석한 결과 콘크리트댐은 최대지반가속도 0.2g를 5초간 작용시킨 인공지진파를 이용하여 해석하였고, 하중은 자중과 상시 만수위시 동수압을 사용하였다. 해석결과에서 최대 수평변위는 2.10sec에 5.2cm정도 발생였다. 최대 연직응력은 댐상부 변곡점에서 2.10sec에 66.67kg/cm^2 으로 나타났고, 댐 설계시 허용압축응력인 80kg/cm^2 보다 적은 값으로 안정함을 타나냈다. 최대 전단응력은 댐 바깥쪽 사면 상부에서 2.1sec일 때 68.67kg/cm^2 로 나타났다. 응답가속도는 입력최대 지진파가 2.64sec일 때 최대 1.97m/sec^2 을 적용했을 때 댐 상부(그림 4 ①), 댐 변곡부(그림 4 ②), 댐 중간부(그림 4 ③), 및 댐 저면(그림 4 ④)에서 각각 2.64sec 일 때 각각 7.55m/sec^2 , 4.24m/sec^2 , 1.19m/sec^2 및 1.11m/sec^2 로 나타나 처음 입력파에 비하여 최대 3.8배로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지진재해대응기술 개발사업중 특수구조물의 내진설계 및 내진성능향상 기법 개발 연구의 일환으로 수행된 것으로 과학기술부에 감사드립니다.

참고문헌

한국수자원공사, 1992, "유한요소에 의한 콘크리트댐의 거동해석"

도덕현, 고재만, 1992, "내진공학", 도서출판 효성

일본국수자원개발공단, 1998, "제15회 기술교류회의 자료"

Bate, K.J., and E.L. Wilson.(1976) *Numerical Methods in Finite Element Analysis*.
Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

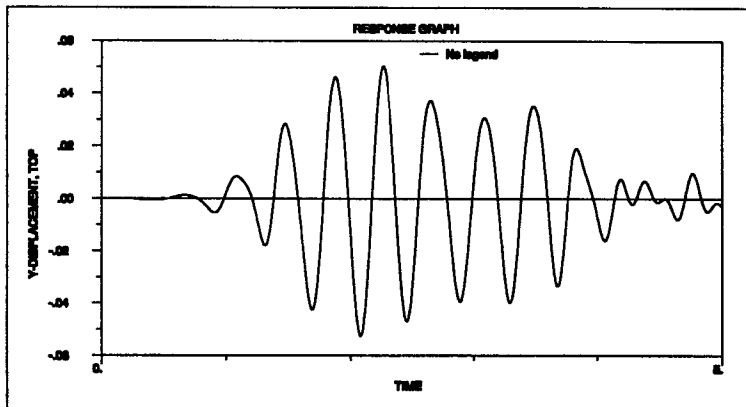


그림 4 댐 정상부에서 수평 변위도

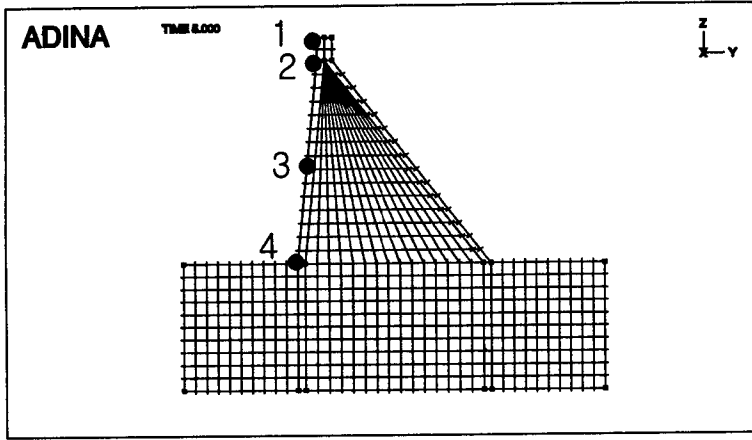


그림 5 지진응답 가속도 해석 위치도

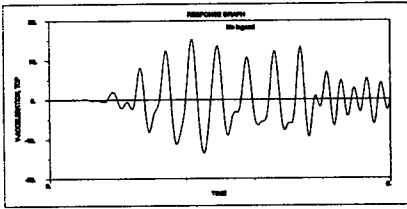


그림 6 댐 정상부에서 응답가속도(①)

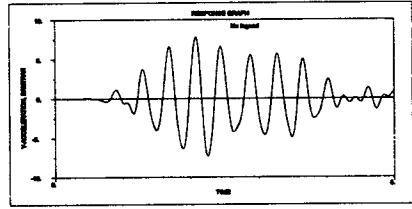


그림 7 댐 상부 변곡부에서 응답가속도(②)

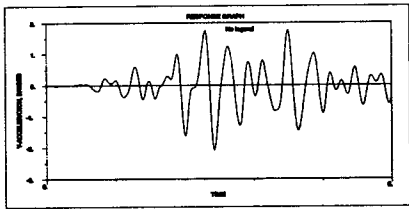


그림 8 댐 중간부에서 응답가속도(③)

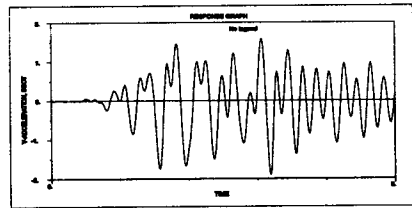


그림 9 댐 저면에서 응답가속도(④)