

콘크리트 중력식댐의 내진 안전성에 관한 연구

Seismic Stability 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 was considered as additional mass for numerical seismic analysis. But, further research will be necessary for the seismic stability of dams.

1. 서론

최근 대만 및 미국에서 발생한 지진으로 수많은 시설물의 피해와 인명의 손실이 발생되어 세계의 이목이 집중되었으며 이로 인하여 우리 나라에서도 지진피해에 대한 대비가 시급하다는 사실을 환기시키는 계기가 마련되었다. 국내에서도 이러한 이유로 시설물에 대한 내진 기준의 강화 및 적용이 활발히 진행되고 있으나 이와 같은 내진 측면의 접근은 대부분 신설 시설물의 설계에 국한되어 있고 내진 기준 강화 이전의 기존 시설물에 대한 관심 및 적용은 극히 미비한 실정이다. 따라서 지진 발생 시 시설물의 파괴에 의한 피해를 예방하기 위해서 기존 시설물의 내진 안전성에 대한 연구가 시급한 실정이다.

국내의 중요 시설물 중 특히 댐의 지진 피해는 단순히 시설물의 피해뿐만 아니라 주변 지역에 위치한 주거 지역 및 인명 피해를 유발하여 심각한 피해가 발생할 수 있다. 내진에 대한 관심이 미미했던 과거에 설계·시공되어 현재까지 이용되고 있는 댐의 경우에는 지진이 발생할 경우 사용 연수의 증가에 따라서 피해가 클 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 국내의 현행 댐 내진 설계 기준 및 안전성 기준을 검토 후 기존 댐 시설물에 적용함으로써 지진 발생 시 구조물의 거동특성 및 안정성을 기존의 프로그램을 이용한 해석을 통하여 파악하는 것을 목적으로 한다.

2. 작용하중

콘크리트 중력댐의 설계 및 안전성을 검토하기 위해 고려해야 할 하중 및 수위 조건에 따른 하중의 조합은 다음 표 1과 같다.

표 1 작용하중과 하중 조합

수 위	작 용 하 중
상시만수위 및 서차지 수위	자중, 정수압, 퇴사압, 양압력, 지진시 관성력, 지진시 동수압
설 계 홍 수 위	자중, 정수압, 퇴사압, 양압력

* 정회원, 중앙대학교 토목공학과 석사과정
** 정회원, 한경대학교 이공학부 안전공학과 교수
*** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

2.1 관성력(진도법)

콘크리트 중력댐과 같이 탄성변형이 적은 강체로 간주할 수 있는 구조물에서는 관성력을 도입하여 정력학적으로 취급하며 체체에 작용하는 관성력은 체체의 자중에 설계진도를 곱한 값으로 하고, 수평으로 작용하는 것으로 한다. 연직진도는 진원지 부근이 아니면 수평진도의 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{2}$ 이하로 산정 한다.

$$I = W_c \cdot K_h \quad (1)$$

여기서, I : 지진시 댐체에 작용하는 관성력, W_c : 댐체의 단위중량, K_h : 설계 수평진도(표2 참조) 이며 본 해석에서는 수평진도만을 고려하여 등가정적해석을 수행하였다.

표 2 댐 시설물의 내진등급별 성능목표에 따른 설계수평진도 (지역구역 I)

재현주기	기능수행수준	붕괴방지수준	지역 I	위험도계수	설계진도 (g)
100년 ^U	I 등급		0.11g (500년 기준)	0.57	0.063
200년 ^U	특 등급			0.73	0.08
1000년 ^U		I 등급		1.4	0.154
2400년 ^U		특 등급		2.0	0.22

2.2 동수압

지진력 작용시 댐 상류면에 작용하는 추가 수압으로서 일반적으로 Westerggard에 의한 동수압의 근사해와 부가질량의 개념의 도입하여 해석에 적용한다. 다음은 동수압을 구하기 위한 기본가정이다.

- (1) 댐 체체와 저수지의 상류측은 수직이다.
- (2) 저수지는 수평인 저면을 가진 2차원의 반무한체이다.
- (3) 저수의 점성은 무시하고 압축성 유체이다.
- (4) 댐의 상류면에서 댐 체체의 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 원역에서 동수압은 0이다.

동수압의 기본방정식으로써 다음과 같은 파동방정식이 유도된다.

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

여기서, $p(x, y, t)$ 는 동수압이고 $C_0 = \sqrt{\frac{gK}{W_0}}$ 로써 수중에서의 탄성과 전파속도이다. 입력진동에 의한 댐 상류면에서의 경계조건은 가정(4)을 고려하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial p(x, y, t)}{\partial x} = -\frac{W}{g} a_0 e^{i\omega t} \quad (3)$$

여기서, a_0 는 입력가속도진폭, ω 는 조화진동의 각 진동수이다. 가정(5)에서 저수표면의 경계조건은 다음 식으로 표시된다.

$$p(x, H, t) = 0 \quad (4)$$

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

$$\frac{\partial p(x, 0, t)}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

저수지 원역에 대한 경계조건인 가정(7)로부터 다음 식이 성립된다.

$$p(\infty, y, t) = 0 \quad (6)$$

동수압의 파동방정식(식(2))은 위의 진동시 경계조건(식(3)~(6))을 적용하여 변수분리법을 이용하여 풀 수 있으며 동수압 $p(x, y, t)$ 는 입력진동과 같은 진동수의 조화진동이므로 결국 파동방정식의 해는 다음과 같이 된다.

$$p(x, y, t) = \sum_r \frac{2W_0}{gH} \frac{(-1)^{r+1}}{\lambda_r \cdot J_r} \cos(\lambda_r y) e^{-J_r x} a_0 e^{i\omega t} \quad (7)$$

여기서, $\lambda_r = \frac{(2r-1)\pi}{2H}$ ($r=1, 2, 3, \dots$), $J_r = \sqrt{\lambda_r^2 - \frac{\omega^2}{C_0^2}}$ (J_r 은 실수) 이다.

Westergaard의 가정을 기본으로 얻어진 동수압의 해는 위의 파동방정식의 해 (식(7))로 표시되지만 $J_r = \sqrt{\lambda_r^2 - \frac{\omega^2}{C_0^2}}$ 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.

$$P_w = \frac{7W_0}{8g} a_0 \sqrt{H \cdot h} \quad (8)$$

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

동수압의 근사해로부터 지진력 작용시 유체가 댐에 부가하고 댐과 같이 거동하는 것처럼 유체의 관성력을 계산하여 댐에 주는 동수압의 영향을 고려할 수 있다. 이때의 부가질량은 댐 체체 상류면의 각 절점에 합산하여 해석을 수행한다. 다음 식(9)에서 m_w 는 동수압 근사식으로 부터 유도된 유체의 부가질량(Added Mass)이다.

$$m_w = \frac{7W_0}{8g} \sqrt{H \cdot h} \quad (9)$$

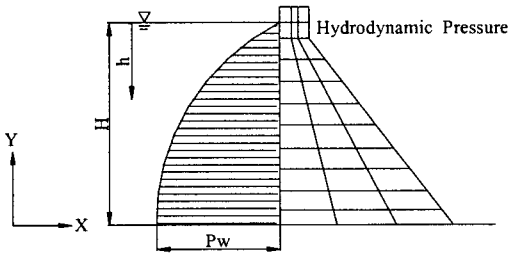


그림 1 동수압 (Hydrodynamic Pressure)

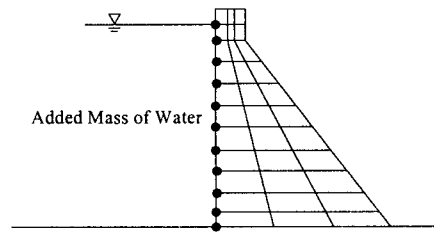


그림 2 부가질량 (Added Mass)

3. 외적안정성 검토

콘크리트 중력댐의 설계와 안정성 검토에서는 댐의 수평단면 및 댐과 기초암반과의 접촉면에 대하여 외력과 자중에 대한 평형조건을 검토한다. 즉, 댐 전체에 대하여 활동(Sliding) 및 전도(Over Turn)에 대한 안정성을 검토한다.

3.1 활동

콘크리트 중력댐의 활동에 대한 안정계산시 기초 암반과 체체 사이의 전단저항을 크게 하도록 시공하기 때문에 단순한 활동계수 문제만을 취급하는 것은 적당하지 못해서 전단 안전율을 사용하여 활동 안전율을 계산하는 것이 합리적이다. 체체와 기초의 접촉면에서의 전단마찰 안전율은 다음 식(10)으로 계산하고 안전율의 값은 4이상으로 사용하고 있다.

$$F_s = \frac{f \cdot \sum V + r \cdot S \cdot A}{\sum H} > 4.0 \quad (10)$$

여기서, f : 내부 마찰계수, r : 이음매에서의 전단 저항강도에 대한 평균 응력과의 비, S : 전단강도,

$\sum V$: 전수직력, $\sum H$: 전수평력, A : 전단저항을 고려한 면적 이다.

콘크리트 내부마찰계수 (f)의 값은 일반적으로 0.65~0.80이며 전단 강도 (S)는 시험에 의한 값을 사용해야 되는데 실제 이음매에서의 평균응력에 대한 허용비율 (r)의 값을 1/1.5~1/2.0 정도로 보고 허용값 $r \cdot S$ 을 적용하며, 시험에 의하지 않고 허용전단강도를 결정하는 경우는 안전을 위해

200~300tonf/m² 정도에서 콘크리트 배합과 압축강도를 참고하여 결정한다. 아래 표 3와 4는 본 해석 시 적용한 구조물의 작용하중과 전단에 대한 안정해석 결과이다. 본 구조물의 경우 아래 표 4의 결과와 같이 전단에 대해 4.0이상의 안전율을 확보하고 있으므로 전단에 대해 안전하다.

3.2 전도

설계하중의 합력은 기본삼각형의 수평단면의 중앙 1/3내에 있어야 하며 다음의 식(11)을 적용하여 전도에 대한 안전율을 검토한다.

$$n = \frac{L}{6 \cdot e} \geq 1.0 \quad (11)$$

여기서, L :상류단에서 하류단까지의 수평거리, e :단면의 중앙점에서 합력 작용점까지의 수평거리 이다. 표 4의 작용하중에 대한 안전성 검토를 수행한 결과 $L=53.312m$, $e=5.9m$ 로 전도에 대한 안전율 1.5로 전도에 대해서도 안전하다.

표 3 작용하중 (①②③④ 는 표2 설계수평진도 참조)

작용하중	작용하중 (tonf)		비고
자중 (V)	4,697.4		콘크리트 단위중량 2.36tonf/m ³
수압	V	89.9	상시 만수위: 60.4m
	H	2,008.9	
퇴사압	V	5.6	토사의 단위중량: 1.8tonf/m ³ 퇴사높이: 16.70m
	H	111.6	
양압력 (V)	943.5		양압력 계수: $\mu=0.5$
관성력 (H)	295.9 ^㉔ , 375.8 ^㉔ , 723.4 ^㉔ , 1033.4 ^㉔		
동수압 (H)	148.2 ^㉔ , 188.2 ^㉔ , 362.2 ^㉔ , 517.5 ^㉔		
합력	$\sum V$ 3,849.4		자중, 수압(V), 퇴사압(V), 양압력
	$\sum H$ 2,564.6 ^㉔ , $\sum H$ 2,684.5 ^㉔ , $\sum H$ 3,206.1 ^㉔ , $\sum H$ 3,671.4 ^㉔		수압(H), 퇴사압(H), 관성력, 동수압

표 4 내진등급별 성능목표에 따른 전단마찰안전율

구분	등급	설계진도(g)	안전율 (F_s)	비고
기능수행수준	I 등급	0.063 ^㉔	6.8 > 4.0	내부마찰계수: $f=0.65$
	특 등급	0.08 ^㉔	6.5 > 4.0	
붕괴방지수준	I 등급	0.154 ^㉔	5.4 > 4.0	허용전단강도: 250tonf/m ²
	특 등급	0.22 ^㉔	4.7 > 4.0	

3.3 콘크리트 허용응력

지진하중 작용시 발생된 응력과 제체의 허용응력을 비교하기 위하여 「콘크리트 표준시방서」를 기준을 적용하였다. 콘크리트 댐에서는 제체내 임의 지점에서 발생하는 압축응력은 4이상의 안전율을 가져야 하며 특히 지진시에는 콘크리트의 변형률 속도가 매우 커서 압축응력도 크게 되므로 표준허용응력의 30%이내의 값을 증가시킨 값을 기준으로 하며 콘크리트 중력댐의 경우는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_{ck} &\geq f_{ca} \times 4 && (\text{정하중 작용시}) \\ f_{ck} &\geq f_{ca} \times 4 \div 1.3 && (\text{지진하중 작용시}) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, f_{ck} :설계기준강도, f_{ca} :제체허용응력 이며 표 5는 본 구조물의 허용응력 기준이다.

표 5 콘크리트 허용응력 기준

구분	허용압축응력 : $f_{ca} = 0.25f_{ck}$	허용인장응력 : $f_{ta} = 0.42\sqrt{f_{ck}}$
$f_{ck} = 308\text{kg/cm}^2$	정하중	77.00kgf/cm ²
	지진하중	100.10kgf/cm ²

4. 해석 예제 및 결과

콘크리트 중력댐의 동해석은 지진의 영향을 등가의 정적하중으로 환산하여 정적인 방법에 의거하여 해석이 수행되어 왔으나 이 방법은 하중산정의 편리함, 해석의 간편성, 경제성 등에서 유리하지만 지진의 동적인 특성을 제대로 고려할 수 없기 때문에 해석결과에 대한 신뢰도가 떨어진다. 본 해석에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 댐의 동적거동특성 파악을 위하여 시간이력 해석법을 적용하였다. 시간이력해석법은 높은 안정성이 요구되는 해석을 필요로 하는 구조물에 주로 사용하는 방법이며 시간이력해석을 수행하기 위해서는 입력파형으로 실측된 파형이나 인공지진 파형을 사용하여 해석을 수행한다. 구조물의 진동에 따른 표준 모드 중첩은 Eigenvector(고유치 벡터)를 사용하였다.

구조물은 8절점 육면체 Solid 요소를 적용한 3차원으로 모델로 전체 구조물 중 1개의 블록을 선정하여 해석을 수행하였다. 댐의 상세 제원과 적용 물성값은 다음 표 5와 같다.

표 6 구조물 제원 및 물성값

구분	내용	용
단면 제원	높이	62.8 m
	기초폭	53.312 m
	상시만수위	60.4 m
	퇴사고	1 m (퇴사압 무시)
	절점	2742개
	요소	체체(Solid): 2077개, 수문(Shell): 24개
	탄성계수	$2.89 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$
체체 물성값	단위중량	2.36 tonf/m^3
	포아송비	0.13
	감쇠비	5 %
지반 물성값	탄성계수	$2.75 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$
	단위중량	2.65 tonf/m^3
	포아송비	0.333
	감쇠비	10 %
지반반력계수	$k_s = \frac{E}{B(1-\nu^2)} = 58,016.528 (\text{tonf/m}^3)$	

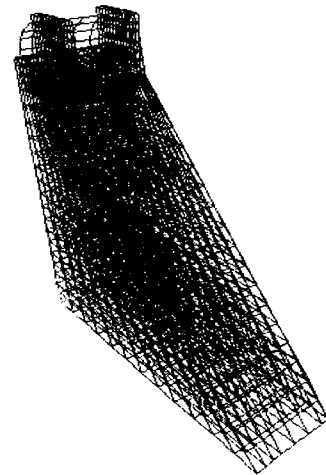


그림 3 FEM 모델

해석 방법은 정적해석, 등가정적해석, 동적해석의 3가지 경우로 나누어 해석하였으며 정적해석시 퇴사의 영향이 매우 작아 퇴사의 영향은 고려하지 않았으며 등가정적해석시에는 지진력은 관성력을 동수압은 Westergaard의 근사식을 적용하였다. 동적해석(시간이력해석)시에는 지진력은 T2 인공지진(한국도로공사)을 동수압은 Westergaard의 근사식으로부터 유도된 부가질량을 계산하여 체체와 같이 진동하는 것으로 하여 해석을 수행하였다. 동적해석시 모드 수는 유효모드 질량(Effective Modal Mass)의 합이 90% 이상이 되는 모드인 10으로 정하였다. 해석 조건에 따라 체체내 발생된 응력과 댐 마루부 변위의 결과는 다음 표 8과 같다.

표 7 해석 조건에 따른 하중조합

해석 조건	하중 조합
정적 해석	자중, 정수압, 양압력
등가정적해석	자중, 정수압, 양압력, 동수압, 관성력
동해석	공수위
	상시만수위 (정하중)

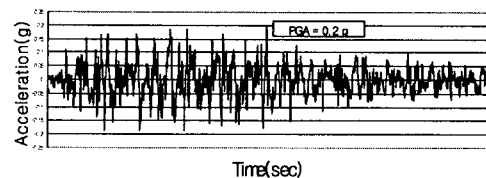


그림 4 T2인공지진 (경암지반, PGA=0.2g, 지속시간 24sec)

표 8 해석 조건에 따라 제체내 발생된 응력과 댐 마루부 변위 결과

해석 조건	수평변위 (mm)		응력 (kgf/cm ²)		비고
	월류부	피어부	압축응력	인장응력	
정적 해석	2.196	2.413	10.4	3.9	
등가정적해석	7.193	8.142	19.2	4.9	
동해석	-7.813 (10.13sec)	-9.113 (10.13sec)	40.0	11.3	공수위
	+7.398 (6.87sec)	+8.689 (6.87sec)			
	13.366 (12.08sec) -10.404 (11.95sec)	15.343 (12.09sec) -12.307 (11.95sec)	40.0	18.8	만수위+정하중

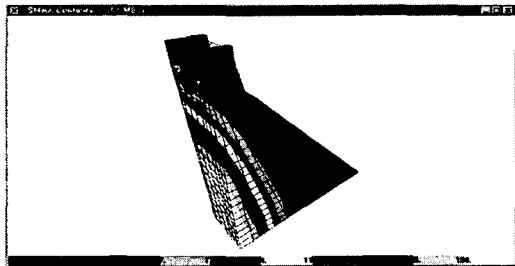


그림 5 제체의 응력분포 (동해석, 상시만수위, 인장)

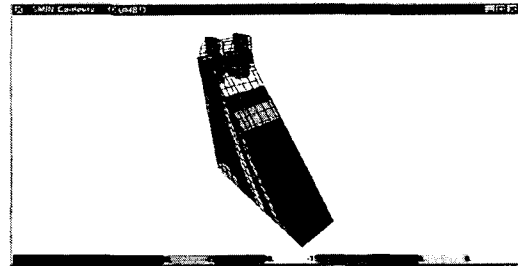


그림 6 제체의 응력분포 (동해석, 상시만수위, 압축)

표 9 구조물의 고유주기

구조물의 고유주기 (Period : sec)	Mode	Value
	Mode 1	0.191617
	Mode 2	0.084986
	Mode 3	0.061254
	Mode 4	0.035459
	Mode 5	0.032537
	Mode 6	0.026249
	Mode 7	0.025657
	Mode 8	0.024873
	Mode 9	0.021534
	Mode 10	0.020008

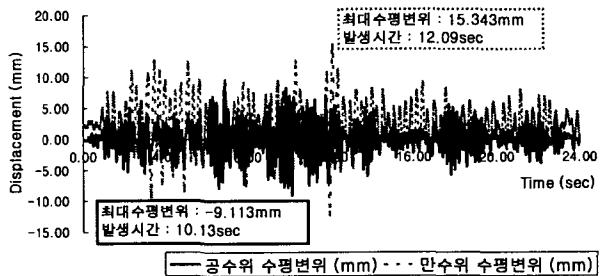


그림 7 피어부 수평변위 (동해석)

5. 결론

- (1) 외적 안전성 검토결과 활동과 전도에 대해 안전한 결과를 보이고 있으나 동해석 결과 댐 상류면에서의 인장부의 응력이 허용기준을 초과하는 것으로 나타났다.
- (2) 기존의 등가정적해석 해석보다는 동해석을 통한 정확한 댐의 설계와 해석이 수행되어야 한다고 사료된다.
- (3) 댐 마루부의 수평변위 결과 현행 기준에서는 특별히 허용변위에 대한 규정은 없으며 동해석시 변위와 응력이 반드시 정비례하지는 않았으며 정하중과 진동에 의한 구조물의 변위는 최대 16mm 이내였다.

참고문헌

1. 日本建設省 土木研究所, ダム構造研究室, “コンクリートダムに作用する地震時動水壓に関する實驗的検討”, 1991. 3.
2. 농림수산부, 농업진흥공사, “농지개량사업계획설계기준(콘크리트댐편)”, 1989. 10.
3. 건설교통부, 한국지진공학회, “내진설계기준연구(II)” 1997.
4. 건설교통부, “댐 시설 기준”, 1993
5. 소진호, 김용곤, 정영수, “콘크리트 중력식댐의 내진성능 평가에 관한 연구” 2000년도 가을 학회 논문집, 제12권 2호, 2000. 11, pp325-330