

KDS 54 17 00 : 2016

댐 내진설계

2016년 6월 30일 제정
<http://www.kcsc.re.kr>



국토교통부

건설기준 제·개정에 따른 경과 조치

이 기준은 발간 시점부터 사용하며, 이미 시행 중에 있는 설계용역이나 건설공사는 발주기관의 장이 필요하다고 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 기준을 그대로 사용할 수 있습니다.

건설기준 제·개정 연혁

- 이 기준은 건설기준 코드체계 전환에 따라 기존 건설기준(설계기준, 표준시방서) 간 중복·상충을 비교 검토하여 코드로 통합 정비하였다.
- 이 기준은 기존의 댐 설계 시 내진 설계 관련 사항에 해당되는 부분을 통합 정비하여 기준으로 제정한 것으로 제·개정 연혁은 다음과 같다.

건설기준	주요내용	제·개정 (년.월)
댐 설계기준	• 댐 설계기준 제정	제정 (1979.09)
댐 설계기준	• 댐 시설기준의 설계편을 중점적으로 보강 및 댐 건설에 따른 환경문제에 대응할 수 있도록 환경친화적인 개념을 추가	개정 (2001.02)
댐 설계기준	• 필댐의 여유고 산정 및 관련부분 개정	개정 (2005.01)
댐 설계기준	• 신기술, 신공법, 건설 시 단계별 환경 배려사항 제시, 부속수리구조물 추가	개정 (2011.12)
KDS 54 17 00 : 2016	• 건설기준 코드체계 전환에 따라 코드화로 통합 정비함	제정 (2016.6)

제 정 : 2016년 6월 30일

개 정 : 년 월 일

심 의 : 중앙건설기술심의위원회

자문검토 : 국가건설기준센터 건설기준위원회

소관부서 : 국토교통부 수자원개발과

관련단체 (작성기관) : 한국수자원학회(한국수자원학회)

목 차

1. 일반사항	1
1.1 목적	1
1.2 적용범위	1
2. 조사 및 계획	1
3. 재료	2
4. 설계	2
4.1 내진설계 기법	2
4.2 설계지반운동	2
4.3 내진등급별 설계지진 수준	4
4.4 기초지반의 영향	4
4.5 댐 형식의 영향	4
4.6 지반조사	5
4.7 입지조건	5
4.8 지진하중	5
4.9 댐 형식별 내진설계 조건	5
4.10 필댐의 내진설계	6
4.11 콘크리트 중력댐의 내진설계	9
4.12 아치댐의 내진설계	12
4.13 지진응답계측	14

댐 내진설계

1. 일반사항

1.1 목적

- (1) 이 기준은 국토교통부의 연구과제 내진설계기준 연구(1997.12)에서 제시된 내진설계 성능 기준 및 기타 연구결과를 참고하고 기존의 설계 체계를 정리하여 제정한 것이다.
- (2) 내진설계기준 연구(1997.12)에서 제시된 내진설계 개념의 특징은 지진의 발생빈도와 지반 운동의 세기, 시설의 중요도에 따라 요구되는 내진성능을 기능수행 수준과 붕괴방지 수준으로 구분하여 만족시키도록 규정하고 있다. 따라서 이 기준에서 제시된 방법으로 내진설계를 할 경우에는 기능수행 수준과 붕괴방지 수준을 만족하는 것으로 본다.
- (3) 이 내진설계기준은 다음과 같은 기본개념에 기초를 두고 있다.
 - ① 댐에 미소한 변형과 부분적 손상이 발생하는 것은 허용할 수 있으나, 지진이 발생되더라도 통제 불가능한 저수의 유출이 없어야 하며, 댐의 저수기능이 유지되어 용수공급에 지장이 없어야 한다.
 - ② 어떤 경우에도 댐이 붕괴되지 않도록 댐체의 활동이나 전도의 방지를 위해 충분한 안전율이 확보되어야 한다.
 - ③ 이 기준을 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

1.2 적용범위

- (1) 이 기준은 댐체, 여수로 및 부대시설물의 내진성능을 확보하기 위하여 필요한 기준을 규정하는 것으로서 신설되는 높이 15 m 이상인 댐의 내진설계에 적용한다. 또한 높이 15 m 미만인 소규모댐의 내진설계에도 준용할 수 있다.
- (2) 댐의 부대시설물은 취수탑, 발전소, 댐 관리동, 수로터널 등을 말하며 이들 시설에 설치된 수문, 권양기, 현장조작반, 관리교, 전기 및 계측제어설비 등을 포함한다.

2. 조사 및 계획

내용 없음.

3. 재료

내용 없음.

4. 설계

4.1 내진설계 기법

- (1) 현재 우리나라에서 댐에 대한 내진설계 방법은 지진력을 지진계수에 의한 하중의 관성력과 동수압으로 대치하고 정역학적 방법으로 해석하는 진도법을 기본으로 하고 있다. 이 방법은 이미 경험적으로 안정적인 방법임이 입증되고 있다.
- (2) 정역학적 방법은 간편하고 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 댐의 동적 특성을 고려하지 않고 지반과 구조물의 상호작용 관계인 설계진도와 최대응답 가속도의 관계가 명백하지 않다.
- (3) 최근 미국 등 일부 국가에서는 지진파에 의한 댐의 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법을 설계에 적용하고 있다.
- (4) 동역학적 안정해석 방법도 댐 설계에 적용할 때 다음과 같은 사항의 명확한 규명에 문제점이 있어 그 적용에 신중해야 한다.
 - ① 설계 지진파형의 설정
 - ② 댐 축조재료의 동적인 응력 왜곡 특성
 - ③ 해석 방법으로서의 3차원적 응답이나 지하 소산 규정
 - ④ 파괴 기준 및 파괴 현상의 모의
- (5) 우리나라의 경우에는 빈약한 지진 해석자료 및 연구 미흡으로 여러 가지 불명확한 사항에 대한 가정이 불가피하여 설계기준으로 동적 해석 방법을 댐의 내진설계기준에 규정하기에는 무리가 따른다.
- (6) 따라서 종래의 정역학적 설계 방법인 진도법을 내진설계의 기본으로 한다. 그러나 진도법으로 설계된 댐체 단면에 대한 상세검토가 필요한 경우(댐 높이가 매우 높은 경우 등)에는 동역학적 해석 방법에 의한 검토를 수행한다.

4.2 설계지반운동

4.2.1 일반사항

- (1) 설계지반운동은 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다.
- (2) 설계지반운동은 수평 2축 방향 성분으로 정의되며 그 세기와 특성은 동일한 것으로 가정한다.

- (3) 지진에 의한 수직방향의 영향이 댐 안정에 영향을 주게 되는 경우에는 이 방향의 지진력을 고려하며 그 크기는 수평방향의 지반운동의 1/2로 본다.
- (4) 댐의 내진설계를 할 때 댐 상류의 저수지 수위 및 수위의 변화상태에 따라 댐 안전에 가장 불리한 방향으로 가진(加震)되는 경우를 상정하고 안정해석을 한다. 이때 해당 저수지 수위의 발생빈도가 특히 낮은 경우에는 그때의 적용 지진력을 조정할 수 있다.

4.2.2 설계진도(震度)

- (1) 지진재해도 해석결과에 따라 우리나라의 지진구역을 표 4.2-1과 같이 설정한다. 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 각 지진구역별 지진구역계수는 표 4.2-2와 같이 구역 I 은 0.11, 구역 II는 0.07이다.

표 4.2-1 지진구역 구분

지진구역	행정구역	
I	시	서울특별시, 인천광역시, 대전광역시, 부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 광주광역시
	도	경기도, 강원도남부(1), 충청남도, 충청북도, 경상북도, 경상남도, 전라북도, 전라남도 북동부(2)
II	도	강원도북부(3), 전라남도 남서부(4), 제주도

- 주 1) 강원도 남부(군, 시): 영월군, 정선군, 삼척시, 강릉시, 동해시, 원주시, 태백시
 2) 전라남도 북동부(군, 시) : 장성군, 담양군, 곡성군, 구례군, 장흥군, 보성군, 여천군, 화순군, 광양시, 나주시, 여천시, 여수시, 순천시
 3) 강원도 북부(군, 시): 홍천군, 철원군, 화천군, 횡성군, 평창군, 양구군, 인제군, 고성군, 양양군, 춘천시, 속초시
 4) 전라남도 남서부(군, 시): 무안군, 신안군, 완도군, 영광군, 진도군, 해남군, 영암군, 강진군, 고흥군, 함평군, 목포시

표 4.2-2 지진구역계수(재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

- (2) 평균재현주기별 최대 유효 지반가속도의 중력가속도에 대한 비를 의미하는 위험도계수는 표 4.2-3과 같다. 이 표에서 기준은 평균재현주기 500년 지진이다.
- (3) 댐이 위치할 지점의 설계진도는 해당지역의 지진구역계수에 4.3에서 규정하는 내진등급별 설계지진의 평균재현주기에 따른 위험도계수, 4.4의 지반계수 및 4.5의 댐 형식별 할증계수와 중력가속도를 곱한 값으로 한다. 단, 지진구역 II에 위치한 다목적댐 및 동역학적 검토가 필요한 100 m 이상의 높이를 가진 댐은 지진구역 I의 구역계수를 채택한다.
- (4) 그러나 위의 방법으로 산출된 설계진도가 0.1 g 이하이면 0.1 g을 취한다.

댐 내진설계

표 4.2-3 위험도계수

재현주기	500년	1,000년	2,400년
위험도계수	1.0	1.4	2.0

4.3 내진등급별 설계지진 수준

- (1) 댐의 내진등급은 표 4.3-1과 같이 댐의 중요도에 따라 내진 I 등급 및 내진 특등급의 두 가지 등급으로 분류한다.
- (2) 댐은 표 4.3-1에서 내진 등급별로 규정된 평균재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 설계된다.

표 4.3-1 댐의 내진등급별 설계지진

내진등급	구분	설계지진의 평균재현주기
내진 특등급댐	• 사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 댐으로 발주처가 지정하는 댐 • 법에 의하여 다목적댐으로 분류한 댐 • 높이 45m 이상이고 총 저수용량 50백만m^3 이상 댐	1,000년
내진 I 등급댐	• 내진 특등급 댐 이외의 모든 댐	500년

4.4 기초지반의 영향

지반의 영향은 댐의 지진하중을 결정하는데 고려된다. 표 4.4-1은 기초지반의 구분과 이에 상응하는 지반계수를 나타내고 있다. 이 표는 보통암의 기초를 기준으로 작성된 것이다.

표 4.4-1 기초지반 분류에 따른 지반계수

지반의 종류	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균값			지반계수	
	전단파속도 (m/s)	표준관입시험 (N치)	비배수 전단강도 (kPa)	I 구역	II 구역
경암지반(S_A)	1,500 이상	-	-	0.8	0.7
보통암지반(S_B)	760~1,500	-	-	1.0	1.0
연암지반 및 매우 조밀한 토사지반(S_C)	360~760	> 50	> 100	1.2	1.1
단단한 토사지반(S_D)	180~360	15 ~ 50	50 ~ 100	1.5	1.6

4.5 댐 형식의 영향

- (1) 지진의 영향은 댐 형식에 따라 달라진다. 일반적으로 록필댐(표면차수벽형 석괴댐 포함)과 콘크리트 중력댐(롤러다짐콘크리트댐 포함)은 상대적으로 지진에 안전한 댐으로 평가되나, 균일형 흙댐은 지진에 취약한 것으로 알려져 있다.

- (2) 따라서 균일형 흙댐으로 설계할 때는 설계진도를 20% 크게 하고, 아치댐은 정역학적 방법으로 해석할 때 설계지반진도의 2배를 적용한다.

4.6 지반조사

- (1) 댐의 내진 안정성 평가에 필요한 지반물성을 파악하기 위하여 지반조사를 실시한다. 지반조사는 지층구성, 지하수위, 각 지층의 역학적 특성과파악 및 실내시험을 위한 시료의 채취 등을 위한 현장시험과 채취된 시료를 이용한 실내에서의 역학적 시험을 포함한다.
- (2) 필요한 경우 전단파 속도주상도 등을 얻을 수 있는 동적 현장시험을 실시하며, 지진에 취약한 지반은 액상화 특성과 다양한 변형률 크기에 대한 변형계수와 감쇠비 특성을 얻을 수 있는 시험을 실시한다.

4.7 입지조건

- (1) 지표면 전단파파괴 잠재성이 있는 활성단층에 극히 인접해서 또는 그 단층을 가로지르는 댐을 건설하지 않는다.
- (2) 댐 지점 주변 사면의 붕괴로 인하여 댐의 안정성이 위협받을 수 있는 지점에 댐을 건설하지 않는다.
- (3) 액상화 잠재성이 현저한 곳은 가급적 피하고 부득이한 경우에는 지반을 개량하여 액상화 발생 가능성을 저하시킨다.

4.8 지진하중

- (1) 지진 시 댐에 발생하는 응력과 변형을 평가할 때 댐에 작용하는 고정하중에 설계진도를 곱한 지진 관성력을 고려한다.
- (2) 지진 관성력은 댐 안정에 불리한 방향으로 작용하는 것으로 해석한다. 즉, 댐 본체는 상·하류 방향의 수평지진력만을 고려하여 설계하며, 여수로 및 부대시설물은 구조물의 특성에 따라 상·하류 방향 또는 댐축 방향의 지진력을 선별적으로 고려하여 설계한다.
- (3) 지진 시에는 유체의 동압력뿐만 아니라 파랑고의 영향도 고려할 수 있다.

4.9 댐 형식별 내진설계 조건

- (1) 댐은 그 형식에 따라 내진설계에 반영할 지진하중의 종류 및 적용 범위가 조금씩 다르므로 필댐(콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 포함), 콘크리트 중력댐(몰러다짐 콘크리트댐 포함), 아치댐 세 가지 형식으로 구분한다.
- (2) 댐 형식에 따른 일반적인 내진설계 조건은 다음 표 4.9-1과 같다.

댐 내진설계

표 4.9-1 댐 형식별 내진설계 조건

댐형식	설계모형	일반적 설계조건
필댐	2차원	절편법에 의한 원호활동 안전율이 최소안전율 이상일 것
콘크리트 중력댐	2차원	- 합력이 제체 수평단면의 중앙 허용치 이내에 들것 - 전단마찰 안전율이 최소안전율 이상일 것 - 제체내 응력이 허용응력 이내일 것
아치댐	3차원	- 전단마찰 안전율이 최소안전율 이상일 것 - 제체내 응력이 허용응력 이내일 것

4.10 필댐의 내진설계

4.10.1 설계거동한계

필댐은 다음과 같은 조건이 충족되어 지진이 발생해도 붕괴되지 않아야 한다.

- (1) 재료의 미소한 항복과 영구변형은 허용될 수 있으나, 댐의 강도에는 큰 영향이 없어야 한다.
- (2) 제체 및 기초에 액상화가 발생해서는 안 된다.
- (3) 댐체의 사면활동이나 기초의 활동이 발생하지 않아야 한다.
- (4) 댐체에 균열이 발생하더라도 댐의 저수기능이 저하되지 않아야 한다.
- (5) 댐체나 기초에 과도한 침하가 발생되지 않아야 한다.
- (6) 지진 시 발생하는 파랑고에 의해 댐체가 월류되거나 여수로 및 부대시설물이 붕괴되지 않아야 한다.
- (7) 지진으로 인해 댐체 또는 여수로 및 부대시설물과의 경계, 기초와 양안(Abutment)을 통해 제어 불가능한 누수가 발생하여 댐의 기능이 손상되어서는 안 된다. 누수가 발생하는 경우에는 댐의 안전을 위해 배수시설을 통해 신속히 저수지 수위를 낮추어야 한다.
- (8) 여수로 및 취수탑의 구조재료는 탄성변형 한계 내에 있어야 하며, 수 시간 내에 정상작동 회복이 가능해야 한다. 이들 구조물에 대한 설계는 콘크리트 중력댐의 내진설계를 참조한다.
- (9) 콘크리트 표면차수벽형 석피댐에 대한 내진해석을 할 경우에는 표면차수벽은 모델링에 포함하지 않는다.

4.10.2 정역학적 설계기준

(1) 일반사항

- ① 설계에 적용하는 지진력은 작용 정하중에 대한 지진 관성력만 고려하고 동수압은 그 영향이 미미하므로 제외한다. 지진에 의한 파랑고는 필요시 따로 고려한다.

② 과거 지진피해 사례를 감안해 볼 때 필댐의 내진설계를 위한 유의사항은 다음과 같다.

- 가. 지진동의 최대변위는 견고한 지반에서는 연약지반의 수분의 1에 지나지 않기 때문에 가급적 기초지반이 견고한 지점을 선정한다. 그러나 지반이 견고하지 않아도 필댐 형식이 선정되는 경우가 많은데, 이 경우에는 지진 시 기초지반의 안정에 대하여 충분히 검토한다.
- 나. 코어형 필댐에서 사력부(셀부)를 퇴적지반 위에 설치하거나 코어를 깊은 기초암반에 설치할 때, 축조재료의 강성 차이로 균열이 발생할 우려가 있으므로 지진동에 저항하기 위해서는 셀과 코어 사이에 최소 2~4 m의 필터층을 둔다.
- 다. 내진적인 관점에서 중심코어형이 경사코어형보다 유리하다.
- 라. 필댐 중 지진 저항력이 가장 높은 댐은 표면차수벽형 석괴댐이다.
- 마. 댐의 지진동은 상부가 하부보다 크기 때문에 상부에서 활동과 파괴가 일어나기 쉬우므로 상부의 활동 가능성에 대한 세밀한 검토가 필요하다.
- 바. 댐의 비탈면에 소단이 있을 경우에는 사면의 안정은 크게 증가한다.
- 사. 강진이 예상되는 지점에서는 불투수성 블랭킷(Blanket)에 의한 차수공법은 가급적 피한다.
- 아. 지진동으로 인한 축조재료의 액상화를 피하기 위해서는 적절한 흙의 선정과 충분한 다짐이 필수적이다.
- 자. 서로 다른 종류의 댐이 복합된 댐(필댐과 콘크리트댐의 접속 등)의 접속부에는 차수성이 보장되어야 하며, 이들 접촉면에서의 지진저항은 각 댐 형식의 진동특성을 고려하여 평가한다.
- 차. 매설 관류는 댐과 다른 진동을 하기 때문에 쉽게 파손되므로 매설 위치는 가능한 한 자연지반으로 하는 것이 좋으며, 기초지반과 제체의 접속부는 피한다.

(2) 지진력

- ① 진도법에 의한 정역학적 설계에서 필댐에 작용하는 지진력은 활동면 상의 제체 자중에 설계진도를 곱한 지진 관성력이다.
- ② 지진 관성력의 작용점은 활동면의 중심이며 작용방향은 수평방향으로 하되 안정에 불리한 쪽으로 정한다. 단, 동수압은 아주 작으므로 무시한다.

(3) 활동면법에 의한 지진 시 사면안정 검토

- ① 필댐의 내진설계에 있어 가장 중요한 부문이 사면안정 검토로 내진설계의 거의 전부라 할 수 있다.
- ② 활동면 위의 제체가 활동하도록 하는 힘은 정수압, 해당 제체의 자중, 활동면을 따라 작용하는 간극수압 및 수평지진 관성력이고, 이들 외력에 저항하는 힘은 활동면에 연직으로 작용하는 반력과 활동면의 접선방향으로 작용하는 점착력과 마찰력이다.
- ③ 활동원의 중심에 대하여 외력의 모멘트에 설계 최소안전율을 곱한 값이 저항 모멘트를 초과하지 않는 한 댐은 활동에 대하여 안전하다고 판단한다.

댐 내진설계

- ④ 사면안정 검토에 적용하는 지진 관성력은 저수지의 수위 상태와 그 수위의 발생빈도 등을 고려하여 차등 적용한다.
- ⑤ 지진 관성력 계산을 위한 체체의 자중은 KDS 54 30 00의 계산방법에 의한다.
- ⑥ 지진이 발생할 때 간극수압은 분명히 변화하지만 현재 상태에서는 그 변화의 증감 폭을 정량적으로 평가하기 어렵다. 그러므로 설계자의 적절한 판단에 의한다. Bishop의 원호법에 의한 사면안정해석에서는 대체로 간극수압에 설계진도를 곱한 값을 적용하고 있다.
- ⑦ 일반적으로 설계진도는 댐 상부에서 저면까지 같다고 가정한다.

4.10.3 동역학적 검토

(1) 동적 검토법의 필요성

- ① 최근에 건설되는 땔댐은 해당 공학의 발전과 시공장비의 발달 등에 따라 점차 대형화 되고 있는 추세이다.
- ② 과거 경험적 방법인 진도법은 보수적으로 채택되어 왔으나 적정 지진 규모와 기술적 조건이 충분히 고려되지 못했기 때문에 보다 과학적이고 이론적인 동적 해석 기법의 적용이 필요하다.
- ③ 동적 해석법은 아직 연구 중인 기법으로 댐의 내진성능을 충분히 정량적으로 판단하기는 어렵지만 100 m 이상의 높은 댐과 특수한 구조의 댐에서 현행 설계법의 보조적 수단으로 사용될 수 있다.

(2) 지진해석 방법과 절차의 일반

- ① 동역학적 검토 시 적용기준 및 검토 사항은 다음과 같다.
 - 가. 진도법으로 설계된 댐체 단면이 내진설계기준연구(1997.12)에서 제안한 극대지진(MCE)하에서의 붕괴방지 수준을 만족하는 지를 검토한다.
 - 나. 극대지진(MCE)은 내진 I 등급 댐 및 내진 특등급 댐에 대해 위험도계수를 각각 1.4 및 2.0 으로 취한다. 이때, 산출된 진도가 0.14 g 이하이면 0.14 g을 검토 진도로 취한다.
 - 다. 설계지반운동은 수평지반운동 뿐만 아니라 수직지반운동을 고려할 수 있다.
 - 라. 지진하중은 시간이력하중을 적용한다. 시간이력하중은 댐 지역 인근에서 발생된 지진 또는 인공지진을 활용하며, 3개의 시간이력하중을 채택한다.
 - 마. 상시만수위를 검토 수위로 하며 필요시 기타 낮은 수위 조건에서도 검토한다. 댐체에 대한 모델링은 2차원 모델링을 원칙으로 한다. 기초압반은 점탄성모델 등을 사용하되 적절한 해석범위를 취한다.
- ② Newmark 방식에 의한 댐 사면의 소성활동량을 계산하여 내진 안전성을 검토한다. 계산된 소성활동량이 0.3 m 이내이면 댐 안전에 문제가 되지 않으며, 소성활동량 0.6 m는 상당한 손상을 동반하는 허용 가능한 소성변형량이다. 이때, 댐 전체 높이를 포함하는 활동면 및 댐체 상부에서의 활동면을 포함하여 검토한다. 만일, 소성활동량이 0.6 m 이상이면 좀 더 정밀한 동적 소성해석을 실시하여 그 결과를 분석한다.

- ③ 수치해석에 사용되는 댐체의 각종 동적계수는 동적 삼축압축시험 등을 통해 구하는 것이 바람직하다. 하지만 여건상 곤란한 경우에는 댐체의 최대전단탄성계수 및 포아슨비는 Sawada 공식 등을 활용하여 추정할 수 있고, 전단변형율에 따른 전단탄성계수 및 감쇠정수는 Vucetic 곡선 등을 활용하여 추정할 수 있다.
- ④ 중심코어형 필댐이나 균일형 흙댐의 경우, 상류면에서 시작되어 하류면으로의 활동 가능성이 있을 때 상류측에서의 활동면의 시점이 저수지 수위보다 낮은 경우 침투파괴에 대한 검토가 필요하다.
- ⑤ 댐체 사면경사가 완만하여 유체와 댐의 상호작용이 작으면 상호작용을 고려하지 않아도 된다.
- ⑥ 비선형 모델링 방법을 사용하거나 타당성이 입증된 단순화된 방법으로 해석한다.
- ⑦ 여수로 및 부대시설물에 대해서는 콘크리트 중력댐의 경우를 준용한다.
- ⑧ 동적 해석에서 면밀한 검토를 위하여 단계적 해석을 실시하며, 흙의 소성적 성질과 동적 간극수압을 고려한다.

4.11 콘크리트 중력댐의 내진설계

4.11.1 설계거동한계

콘크리트 중력댐은 다음과 같은 조건이 충족되어 지진이 발생해도 붕괴되지 않아야 한다.

- (1) 콘크리트댐의 해석은 2차원 해석을 원칙으로 하지만 월류부 피어, 엘리베이터 또는 수압관 (Penstock) 등이 포함된 특이 단면부에는 필요시 3차원 해석을 실시하여 상세부재의 응력을 검토한다.
- (2) 콘크리트댐은 지진이 발생되더라도 저수기능이 유지되어야 하며 보수 및 용수공급이 가능해야 한다. 이를 위해 여수로 및 부대시설물에 대해서도 내진설계가 이루어져야 한다. 이때, 권양기 및 현장조작반은 강체 거동하는 것으로 가정하여 기초앵커의 응력을 검토하며, 관리교는 낙교의 가능성에 대해 검토한다.
- (3) 콘크리트에 발생한 변형은 탄성한계를 현저히 초과하지 않아야 한다.
- (4) 이음부의 열림 또는 국부적 파괴로 인해 통제 불가능한 유출이 발생하지 않아야 한다.
- (5) 댐체는 들림을 고려한 미끄러짐과 전도에 대하여 소정의 안전율을 유지한다.
- (6) 지진 시 발생하는 파랑고에 의해 댐체가 월류되거나 여수로 및 부대시설물의 기능이 장시간 정지되어서는 안 된다.
- (7) 댐 기초에는 액상화가 발생해서는 안 된다.
- (8) 여수로 및 취수탑의 재료는 탄성거동 한계 내에 있도록 설계하며, 강재구조물의 발생 응력은 허용응력 이내여야 하고 콘크리트 구조물의 발생 외력은 내하력보다 작아야 한다.

4.11.2 정역학적 설계기준

(1) 지진력

① 설계에 적용하는 지진력은 작용 정하중에 대한 지진 관성력과 동수압이며 지진에 의한 저수지의 파랑고를 따로 고려할 수 있다.

② 수평지진 관성력

가. 제체의 수평지진 관성력은 제체의 자중에 설계진도를 곱한 값으로 한다.

나. 관성력 작용점은 단면형상에 관계없이 질량의 중심이며 작용방향은 수평방향으로 하되, 댐 안정에 불리한 방향으로 작용하는 것으로 한다.

다. 만수 시의 안정해석에서는 지진 관성력이 상류측에서 하류측으로, 댐축에 직각방향으로 수평으로 작용하는 것으로 한다.

라. 저수지가 비어있을 경우에는 반대로 하류측에서 상류측으로 작용하는 것으로 하되, 설계진도는 소정 설계진도의 1/2을 적용해도 무방하다.

마. 댐축 방향으로 지진 관성력을 작용할 때도 설계진도는 댐축 직각방향과 같다.

바. 수평지진에 의한 수압 증가량은 Westergaard의 공식에 의하여 구할 수 있다.

③ 수직지진 관성력

가. 콘크리트 중량에 설계진도의 1/2로 가정한 수직설계진도를 곱한 값인 수직 관성력을 고려할 수 있다.

나. 관성력은 상하 방향 중 불리한 쪽으로 작용하는 것으로 한다.

④ 지진에 의한 동수압

가. 지진력이 작용할 경우에 발생하는 수평방향 동수압은 댐을 강체로 가정한 Westergaard의 공식에 의하여 계산하며, 동수압은 댐의 연직면에 관성력 방향으로 수평으로 작용하는 것으로 한다.

나. 수문 등 강재구조물에서도 댐체와 같이 동수압이 작용하는 것으로 한다.

다. 수직방향 동수압은 댐체에 작용하는 물 무게에 수직 설계진도를 곱한 값으로 하여 물 무게 중심에서 관성력 방향으로 작용하는 것으로 한다.

라. 댐축 방향의 지진력이 작용할 때 월류부 교각(Pier)의 상류측은 교각 좌·우 측면에 동수압을 모두 관성력 방향으로 작용하는 것으로 한다.

마. 동수압 계산 시 적용하는 수심은 상시만수위에서 퇴사부의 저면의 기초지반의 지반고까지로 하여 퇴사부위에서도 지진에 의한 동수압이 작용하는 것으로 하되, 퇴사압에 대한 지진의 영향은 고려하지 않는다.

(2) 응력해석

① 댐의 수평단면에 대한 휨응력의 분포는 선형적이며 댐의 응력은 정적 외팔보(캔틸레버) 이론으로 산정한다.

② 허용응력은 정적 허용응력에 비해 30% 증가해도 된다.

③ 상류측 선단에서 인장응력이 발생하지 않도록 엄격히 제한하며, 하류측 선단의 인장응력

은 콘크리트의 허용인장응력까지 허용된다.

- ④ 허용인장응력은 허용압축응력의 10%로 하며, 발생하는 압축응력은 허용압축응력(압축강도의 25%) 이내이어야 한다.

(3) 활동에 대한 안정

- ① 활동에 대한 안정계산은 Henny의 공식에 의하여 안전율 F_S 를 구하며, 그 값은 4 이상이어야 한다.
- ② 댐과 기초암반과의 접촉면, 기초암반내의 강도 또는 변형성이 크게 다르게 작용하는 단층 등이 있는 경우, 기초암반의 안전율을 확보하기 위해 국부적인 활동 안전율을 검토하며 어떤 경우도 안전율은 2.0 이상이어야 한다.

(4) 전도에 대한 안정

- ① 전도에 대한 안정은 지진력을 포함한 모든 외력의 합력의 작용점이 댐 저면 중앙 1/3에 들면 안정한 것으로 판단한다.
- ② 단, 지진력이 상류방향으로 작용할 때는 합력의 작용점이 댐 저면 중앙 1/3을 벗어날 수 있으며, 이 경우에는 하류측 선단에서의 인장응력이 허용인장응력보다 작으면 안정한 것으로 판단한다.

(5) 댐마루 시설의 설계

- ① 댐마루의 진도는 기초부의 진도보다 크므로 댐마루부에 있는 여러 가지 구조물, 특히 수문의 설계에 유념해야 한다.
- ② 댐마루에 있는 중요 시설물에 적용하는 진도는 설계진도의 2배를 취하는 것이 보통이다.

(6) 여수로 교각(Pier)의 설계

- ① 여수로 교각을 설계할 때 상·하류 방향 및 댐축 방향에 대해 각각 지진력이 작용하는 것으로 한다.
- ② 여수로 교각 설계 시 저수지 수위는 상시만수위(NHWL)인 경우를 적용하고, 수문은 모두 닫혀 있는 것으로 한다.

4.11.3 동역학적 검토

(1) 동적 검토법의 필요성

- ① 댐의 정적 설계 방법은 주로 경험을 토대로 하여 타당성이 입증되고 있으나, 본질적으로 지진 시 댐의 거동을 정확히 해석할 수 없으며 지반운동과 댐체와의 거동특성이 분명하지 않다.
- ② 반면, 동적 응답 해석법은 높은 댐의 안정성이나 기초암반의 거동특성을 가장 과학적으로 해석할 수 있는 방법이라 할 수 있다.
- ③ 동적 해석법은 아직 연구 중인 기법으로 댐의 내진성능을 충분히 정량적으로 판단하기는 어렵지만 100 m 이상의 높은 댐과 특수한 구조의 댐에서 현행 설계법의 보조적 수단으로 사용될 수 있다.

댐 내진설계

(2) 지진해석 방법과 절차의 일반

- ① 콘크리트 중력댐의 동역학적 검토는 필댐과 동일한 적용기준 및 검토 사항에 따라 실시하되, 기초압반은 비질량모델 및 점탄성모델 등을 사용한다.
- ② 댐 저면에 작용하는 수평 및 수직반력의 시간이력을 분석하여 Henny식에 의한 댐 전체의 활동에 대한 안전성(안전율 = 1.0)을 평가할 수 있다. 또한 댐체에 발생하는 최대 전단응력을 확인하여 동적 전단강도와 비교함으로써 국부 전단파괴 가능성을 검토할 수 있다.
- ③ 댐 저면에 작용하는 외력 합력의 작용점의 시간이력을 분석하여 댐 전체의 전도에 대한 안전성을 평가할 수 있다(합력의 작용점이 저면 내에만 존재하면 안전). 또한 댐체에 발생하는 최대인장응력을 확인하여 동적 인장강도와 비교함으로써 국부 인장파괴 가능성을 검토할 수 있다.
- ④ 댐 저면에 발생하는 최대압축응력을 분석하여 지지력에 대한 안전성을 평가할 수 있다. 또한 지반의 허용지지력의 1.3배 또는 콘크리트 동적 압축강도와 비교하여 댐체에 발생하는 압축응력에 대한 안전성을 평가할 수 있다.
- ⑤ 콘크리트의 동적 탄성계수는 정적 탄성계수에 15%를 할증하여 적용하며, 동적 포아슨비는 정적 포아슨비의 0.7배와 같다. 또한, 콘크리트의 동적 전단탄성계수는 동적 포아슨비와 동적 탄성계수와 관계식으로 구하며, 감쇠비는 5%를 적용한다. 댐의 지반은 보통암 이상이므로 지진 시 변형이 극히 작아 정적인 상태와 동적인 상태에서의 물성치 차이가 거의 없다.
- ⑥ 콘크리트 동적 전단강도는 정적 전단강도의 1.0배를 적용한다. 정적 인장강도는 정적 쪼갬 인장강도를 채택하며, 동적 인장강도는 정적 인장강도의 1.5배를 적용한다. 동적 압축강도는 정적 압축강도의 1.15배를 적용한다.
- ⑦ 만일, 상기의 댐체의 안정과 응력에 대한 안전 조건들이 만족되지 않으면 좀 더 정밀한 동적 소성해석을 실시하여 그 결과를 분석한다.
- ⑧ 유체-구조물-지반 상호작용 해석 시 유체의 압축성, 구조물의 유연성과 지반의 변형성을 고려한다. 이때, 보수성이 입증된다면 유체는 비압축성으로 모델링될 수 있다.
- ⑨ 지반을 통한 지진파의 방사조건을 반영하며, 지반매질의 변형도 의존 특성을 고려한다.
- ⑩ 여수로 및 부대시설물의 응답은 선형 및 비선형 거동특성을 고려할 수 있는 해석법을 사용하여 해석하고, 입력지반운동에는 댐의 지진응답 영향을 고려한다.

4.12 아치댐의 내진설계

4.12.1 설계거동한계

(1) 아치댐의 설계거동한계는 콘크리트 중력댐을 따른다.

(2) 아치댐의 내진설계는 다음 두 가지를 중점목표로 한다.

- ① 지진력을 포함한 모든 외력에 의한 댐체 내의 응력이 콘크리트의 허용응력을 초과하지 않도록 댐 단면을 결정한다.

- ② 댐체와 기초암반의 접촉면 특히, 양안 접촉면에서의 기초암반이 지진 시에도 전단에 대하여 안정하여 활동하지 않도록 댐 위치와 형상을 결정한다.

(2) 아치댐의 내진설계에 대한 일반적인 사항은 다음과 같다.

- ① 아치댐도 다른 형식의 댐과 같이 정역학적 해석 방법인 진도법에 의해 설계하고 동역학적 해석 방법으로 검토한다.
- ② 동역학적 해석 방법을 적용할 때 입력 지진과 댐의 응답진도 및 댐체와 기초지반 재료의 동적 강도를 정확히 평가한다.
- ③ 각종 물성치와 신뢰할 수 있는 가정 조건의 결정이 어려울 때에는 진도법으로 해석해도 된다.
- ④ 아치댐은 중력댐보다 쉽게 변형되나, 세계적으로 다수의 아치댐이 건설됨에 따라 그 특성이 점점 명확해지고 있으므로 외국의 사례를 면밀히 검토하고 동역학적 해석 결과와 비교하여 안전하고 경제적인 설계가 되도록 한다.

4.12.2 정역학적 설계기준

(1) 지진력

- ① 응력해석에 사용하는 지진력은 댐체의 자중에 설계진도를 곱한 지진 관성력과 동수압이다.
- ② 지진 관성력
 - 가. 아치댐은 기초지반과 일체로 거동하는 구조이므로 지진 관성력은 체체자중에 설계진도를 곱한 관성력과 기초지반의 가상활동면 내의 압과 자중에 설계진도를 곱한 관성력을 모두 고려한다.
 - 나. 지진 관성력의 작용점은 질량의 중심이며 작용방향은 안정에 가장 불리한 방향으로 수평으로 작용하는 것으로 한다.
 - 다. 저수지가 비어 있는 상태의 응력해석에서 지진 관성력의 작용방향은 하류측에서 상류측으로 작용하는 것으로 하되, 적용진도는 설계진도의 1/2만 취한다.
- ③ 동수압
 - 가. 지진 발생 시 아치댐에 작용하는 동수압의 크기는 콘크리트 중력댐과 같이 Westergaard의 공식에 의하여 계산한다.
 - 나. 동수압의 작용방향은 댐 상류면의 직각방향(곡률중심 방향)으로 적용하는 것이 더 정확한 방법이다.

(2) 댐체 내의 응력해석

- ① 아치댐의 응력해석은 캔틸레버 요소와 수평아치 요소로 해석한다.
- ② 적용 설계진도는 상세한 이론적, 실험적 연구결과에 따라 예측한다.
- ③ 댐을 하류측으로 만곡시키면 캔틸레버 요소의 자중응력에 의해 지진응력이 상쇄되고 아치 요소에도 자중에 의한 아치응력(축 압력)을 일으킨다.

댐 내진설계

- ④ 콘크리트의 설계 허용응력은 4배 이상의 안전율을 가져야 하며, 허용응력은 정적 허용응력에 비해 30% 증가해도 된다.

(3) 기초암반의 안정해석

- ① 지진 시 기초암반에 작용하는 지진력은 제체에 작용하는 지진력에 의해 일어나는 추력(推力)과 기초암반 자체에 작용하는 지진력이다.
- ② 기초암반의 지진력은 가상 활동면 내의 압괴 자중에 설계진도를 곱한 지진 관성력으로 하며, 작용점은 압괴의 중심(重心)이고 작용방향은 하류방향이다.
- ③ 활동에 저항하는 힘은 활동시키는 외력의 합보다 4배 이상이 되도록 한다.

4.12.3 동역학적 검토

- (1) 아치댐의 지진에 의한 동적 거동을 해석하는 방법은 해석적 방법, 실험적 방법 및 수치적 방법이 있다.
- (2) 아치댐은 가요성이어서 지진을 받으면 댐체는 처짐을 동반한 탄성진동을 일으키므로 정역학적 방법으로는 지진시의 거동을 정확히 해석할 수 없다. 따라서 높은 아치댐을 설계할 경우에는 응력과 변형은 동적 해석에 의해 검토한다.
- (3) 동적 해석법은 아직 연구 중인 기법으로 댐의 내진성능을 충분히 정량적으로 판단하기는 어렵지만 100 m 이상의 높은 댐과 특수한 구조의 댐에서 현행 설계법의 보조적 수단으로 사용될 수 있다.
- (3) 아치댐을 설계할 때 경계조건이 복잡하기 때문에 가장 간단한 방법이면서도 해석결과의 신뢰도가 상대적으로 높은 것으로 알려진 유한요소법을 사용하는 것이 일반적이다.
- (5) 아치댐의 동적 해석 방법의 기본적인 단계는 다음과 같다.
 - ① 아치댐의 동역학적 검토는 필댐과 동일한 적용기준 및 검토 사항에 따라 실시한다.
 - ② 댐체에 대해서 3차원 모델링을 실시하고 2축의 수평지반운동과 수직지반운동을 조합하여 작용시킨다. 기초암반은 비질량모델, 점탄성모델 등을 사용한다.
 - ③ 아치댐의 전도, 활동, 지지력 등에 관한 동적 안전성 검토의 세부사항, 재료특성, 강도 등은 콘크리트 중력댐을 준용한다.
 - ④ 유한요소의 집합으로서 기초암반의 깊이는 댐 높이의 1~2배를 취한다.

4.13 지진응답계측

4.13.1 일반사항

- (1) 내진 특등급 댐의 경우, 지진응답 계측기기를 설치하고 정상상태가 유지될 수 있도록 관리한다.
- (2) 내진 I 등급 댐에 대해서는 유지관리, 내진설계 기술개발 및 개선에 필요한 자료를 확보하기 위하여 관할기관은 지진계를 설치하고 운영할 수 있다.

4.13.2 계측기기의 설치와 관리

- (1) 댐의 지진응답을 계측하기 위한 계측기기의 설치 위치와 종류, 개수 및 관리방법은 이 설계기준의 목적을 달성할 수 있도록 지진공학 전문가와 협의하여 결정한다.
- (2) 지반운동과 댐의 응답을 계측할 수 있도록 댐의 기초부, 최대단면 정상부, 양안부 등에서 계측하며, 댐의 기초부에 계측기기의 설치가 곤란할 경우에는 기초 갤러리 또는 인근 암반에 설치한다.



댐 내진설계

집필위원	분야	성명	소속	직급
	하천댐	이재응	아주대학교	교수
	내진	박세훈	한국시설안전공단	팀장
	내진	배정주	한국시설안전공단	차장

자문위원	분야	성명	소속
	하천댐	이경기	(주)도화엔지니어링
	하천댐	양현모	(주)도화엔지니어링
	하천댐	신희범	(주)삼안
	하천댐	노진수	제일엔지니어링

건설기준위원회	분야	성명	소속
	하천댐	전세진	(주)도화엔지니어링
	하천댐	장봉석	한국수자원공사
	하천댐	김형수	인하대학교
	하천댐	오규창	(주)이산
	하천댐	이상렬	(주)이산
	하천댐	이상만	동부엔지니어링(주)
	하천댐	최성욱	연세대학교
	하천댐	이준근	한국수자원공사

중앙건설기술심의위원회	성명	소속
	김영환	한국시설안전공단
	이지원	(주)한국종합기술
	조경준	(주)대경이앤씨
	윤여승	평화엔지니어링
	신영호	한국수자원공사
	임건묵	한국수자원공사
	심명섭	그룹K

국토교통부	성명	소속	직책
	우정훈	국토교통부 수자원개발과	서기관
	오세찬	국토교통부 수자원개발과	사무관

설계기준
KDS 54 17 00 : 2016

댐 내진설계

2016년 6월 30일 발행

국토교통부

관련단체 한국수자원학회
06671 서울특별시 서초구 효령로 237, 302호(서초동, 서초한신리빙타워)
☎ 02-561-2732 E-mail : master@kwra.or.kr
<http://www.kwra.or.kr>

국가건설기준센터
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)
☎ 031-910-0444 E-mail : kcsc@kict.re.kr
<http://www.kcsc.re.kr>