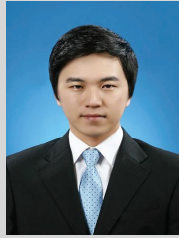


수변 보 구조물의 내진 설계

Seismic Design of Weir Structures



정우영(Jung, WooYoung) | 강릉원주대학교 토목공학과 교수 | woojung@gwnu.ac.kr
 김재상(Kim, JaeSang) | 강릉원주대학교 토목공학과 석사과정 | vans0001@naver.com

수변 보 구조물의 내진설계는 ‘하천설계기준2009’에 따라 수행되어야 하는데, 기본적인 내진설계 방법과 절차에 따르면 보 구조물은 기타 하천시설물로 구분되어 교량 설계기준이나 댐 설계기준을 준용할 수 있도록 규정하고 있다. 그리고 위에서 일반설계에서도 언급했듯이 보와 댐의 차이가 미미해지고 있어 댐 설계기준에 따라 적용해야 할 것으로 판단된다. 또한, 수변 보 구조물은 댐 설계기준에서 댐체, 여수로 및 부대시설물의 내진성능을 확보하기 위하여 필요한 기준을 규정하는 것으로서 신설되는 높이 15m 이상인 댐의 내진설계에 적용하고, 또한 높이 15m 미만인 소규모댐과 부대시설에 적용할 수 있다는 항목에 해당되는 것으로 보인다. 댐 설계는 “내진성능기준(1997)”에서 제시된 내진설계 성능기준을 기본으로 한다. 댐에 상당한 변형과 부분적 손상이 발생하는 것은 허용할 수 있으나 지진시 또는 지진경과 후에도 댐의 저수기능은 유지되어야 하며 통제 불가능한 저수량의 유출상태는 있어서는 안 된다. 내진등급은 내진특등급 댐, 내진 I등급 댐2개의 등급으로 분류하나 고려하는 설계지진의 재현주기는 각각 1000년, 500년이어서 내진성능기준의 내진 I 등급, 내진 II 등급에 해당한다. 댐의 붕괴시 엄청난 인명피해와 재산피해를 고려할 때 내진등급을 내진특등급, 내진

I등급으로 고려하는 것이 타당하나 댐의 거동특성으로 보아 완전한 소성설계를 할 수 없어 재현주기 2400년 지진에 대해 붕괴방지 수준으로 설계하는 것은 지나치게 지진하중을 크게 고려하게 된다. 따라서 이를 반영한 규정으로 생각할 수 있다. 지진하중은 설계진도로 산정하며 설계진도가 0.2g 이상이어서 우리나라보다 지진규모나 발생빈도가 훨씬 높은 나라에서 적용하는 진도보다 과다하다고 판단되는 경우에는 설계지는 적용설계진도를 0.2g이하로 조정할 수 있다.

1. 하천설계기준의 내진설계기준

1.1 기본적인 내진설계 방법과 절차

- ① 일반적으로 수평2축 방향과 수직 방향에 관한 지반운동의 영향이 고려되어야 한다.
- ② 지반운동의 공간적 변화특성이 고려되어야 한다.
- ③ 국지적인 토질조건, 지형조건이 지반운동에 미치는 영향이 고려되어야 한다.
- ④ 활성단층에 극히 인접한 지역이나 활성단층이 지나가는 지역에는 내진 I등급 하천시설물의 건설은 피한다.

- ⑤ 액상화 가능성이 현저한 곳은 가급적 피하고 부득이한 경우에는 지반을 개량하여 액상화 발생가능성을 저하시켜야 한다.
- ⑥ 지진시 하천시설물에 발생하는 응력과 변형을 평가할 때에는 시공절차와 방법에 따른 응력, 자중, 온도하중, 크리프 등의 영향이 적절히 고려되어야 한다.
- ⑦ 지진시에는 유체의 동압력뿐 아니라 수면과의 영향도 고려하여야 한다.

2. 내진설계 기법

- 현재 우리나라에서 보에 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.
- 정역학적 방법은 간편하고 안정적인 해석결과를 얻을 수 있는 장점이 있으나, 보의 동적 특성을 고려하지 않고 지반과 구조물의 상호작용 관계인 설계진도와 최대응답 가속도의 관계가 명백하지 않다.
- 최근 미국 등 일부 국가에서는 지진파에 의한 응답을 구하여 동적인 파동으로 해석하는 동역학적 안정해석 방법을 설계에 적용하고 있다.
- 동역학적 안정해석 방법도 보 설계에 적용할 때 다음과 같은 사항의 명확한 규명에 문제점이 있어 그 적용에 신중해야 한다.
 - ① 설계 지진파형의 설정
 - ② 보 축조재료의 동적인 응력 왜곡 특성
 - ③ 해석 방법으로서의 3차원적 응답이나 지하 소산 규정
 - ④ 파괴 기준 및 파괴 현상의 모의
- 우리나라의 경우에는 빈약한 지진 해석자료 및 연

구 미흡으로 여러 가지 불명확한 사항에 대한 가정이 불가피하여 설계기준으로 동적 해석 방법을 보의 내진설계기준에 규정하기에는 무리가 따른다. 따라서 종래의 정역학적 설계 방법인 진도법을 내진설계의 기본으로 한다. 그러나 진도법으로 설계된 보 단면에 대한 상세검토가 필요한 경우(보 높이가 매우 높은 경우 등)에는 동역학적 해석 방법에 의한 검토를 수행한다.

2.1 설계지반운동

2.1.1 일반사항

- 설계지반운동은 지표면에서의 자유장 운동으로 정의한다.
- 설계지반운동은 수평 2축 방향 성분으로 정의되며 그 세기와 특성은 동일한 것으로 가정한다.
- 지진에 의한 수직방향의 영향이 보 안정에 영향을 주게 되는 경우에는 이 방향의 지진력을 고려하며 그 크기는 수평방향의 지반운동의 1/2로 본다.
- 보의 내진설계를 할 때 보 상류의 저수지 수위 및 수위의 변화상태에 따라 보 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.

2.2.2 설계진도

지진재해도 해석결과에 따라 우리나라의 지진구역을 <표 1>과 같이 설정한다. 평균재현주기 500년의 지진지반운동에 해당하는 각 지진구역별 지진구역계수는 <표 2>와 같이 구역 I 은 0.11, 구역 II 는 0.07이다.

표 1. 지진구역 구분

지진 구역	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

- ※ (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 2. 지진구역계수 (재현주기 500년에 해당)

지진구역	I	II
구역계수	0.11	0.07

- 평균재현주기별 최대 유효 지반가속도의 증력가속도에 대한 비를 의미하는 위험도계수는 <표 3>과 같다. 이 표에서 기준은 평균재현주기 500년 지진이다.
- 보가 위치할 지점의 설계진도는 해당지역의 지진구역계수에 “내진등급별 설계지진 수준” 에서 규정하는 내진등급별 설계지진의 평균재현주기에 따른 위험도계수, “기초지반의 영향의 지반계수 및 보 형식

의 영향”의 보 형식별 할증계수와 증력가속도를 곱한 값으로 한다. 단, 지진구역 II 에 위치한 다목적 보 및 동역학적 검토가 필요한 100m 이상의 높이를 가진 보는 지진구역 I 의 구역계수를 채택한다.

- 그러나 위의 방법으로 산출된 설계진도가 0.1g 이 하이면 0.1g을 취한다.

표 3. 위험도계수

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

2.2 내진등급별 설계지진 수준

- 보의 내진등급은 <표 4>와 같이 보의 중요도에 따라 내진 I 등급 및 내진 특등급의 두 가지 등급으로 분류한다.
- 보는 <표 4>에서 내진 등급별로 규정된 평균재현주기를 갖는 설계지진에 대하여 설계된다.

표 4. 보의 내진등급별 설계지진

내진 등급	구분	설계지진의 평균재현주기
내진 특등급	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 사회, 안보, 경제적인 측면에서 특별한 보로 발주처가 지정하는 보 ◦ 법에 의하여 다목적보로 분류한 보 ◦ 높이 45m 이상이고 총저수용량 50백만³ 이상 보 	1,000년
내진 I 등급	◦ 내진 특등급 보 이외의 모든 보	500년

2.3 기초지반의 영향

지반의 영향은 보의 지진하중을 결정하는데 고려된다. <표 5>는 기초지반의 구분과 이에 상응하는 지반계수를 나타내고 있다. 이 표는 보통암의 기초를 기준으로 작성된 것이다.

표 5. 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	1500이상	-	-	0.8	0.7
보통암지반	760~1500	-	-	1.0	1.0
연암지반 및 매우 조밀한 토사지반	360~760	>50	>100	1.2	1.1
단단한 토사지반	180~360	15~50	50~100	1.5	1.6

2.4 설계 지진값

현재 콘크리트 보의 설계 지진 값에 대한 개념은 교량 및 건물의 내진설계에서와 같은 것을 사용한다. 설계 지진 값은 설계지진스펙트럼에 의하여 각주기에 대한 값으로 결정되며 다음과 같은 인자가 영향을 미친다.

- 1) 위험계수 : 보의 중요도 및 규모, 붕괴 시 파급 정도에 따라 결정
- 2) 지진구역계수 : 보가 위치한 지역의 지질학적 특성에 따른 지진발생 가능 및 규모
- 3) 지반계수 : 보의 기초와 인접한 지반의 성질

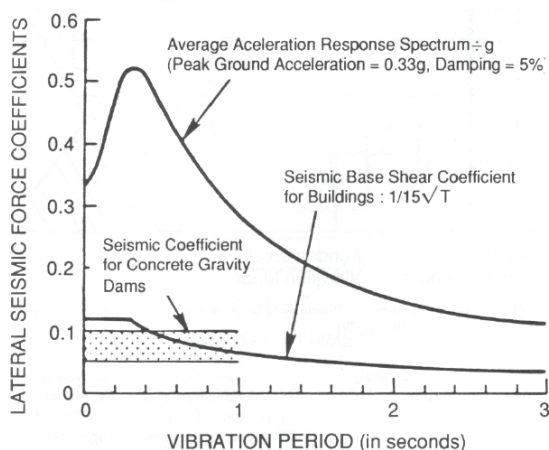


그림 1. 설계지진계수와 Response Spectrum

2.5 정적설계법

지진지역과 지반상태를 고려하여 산정한 등가의 정하중을 가하는 탄성설계방법으로 지금과 같이 동적내진해석기법이 발달하지 않았던 시기에 사용되던 방법이다. 이 방법으로 설계된 콘크리트 댐에서 중요한 결함이 발견되었다고 볼 수는 없으나 최근의 동적해석이론과 실험에 의한 검증 결과 문제점이 발견되어 현재는 소규모 댐이나 간단한 계산을 위한 경우에 사용하도록 권장된다.

2.6 동적설계법

동적해석을 사용하여 보에 작용하는 하중을 계산하여 설계하는 방법이다. 해석상의 편이와 아직 완전히 검증된 비선형해석모형이 없는 관계로 주로 탄성해석을 이용하며, 비선형해석은 설계된 또는 기존의 보의 지진 안정성 검증에 이용된다.

지진해석: 지진력을 등가의 정하중으로 해석하는 정해석법과 동해석법이 있으며 동해석법은 크게 두 가지로 분류된다.

- ① 응답스펙트럼해석법(Response Spectrum Analysis Method): 각 진동모드에 대한 변위, 내력 등에 대한 스펙트럼 값(각 주기별 절대최대값)을 구한 후 이를 SRSS, CQC 등의 방법으로 합산하여 구조물의 최대 변위 및 내력을 구하는 방법이다.

- ② 시간이력해석법(Time History Analysis Method):
 시간이력해석법은 매 시간증분(Time Step)에 대하여 운동방정식의 해를 구하는 것으로 다시 구조물의 고유 진동모드를 이용한 모드해석법(Modal Analysis Method)과 Wilson- θ , Newmark 법과 같은 직접적분법(Direct Integration Method)으로 분류된다.

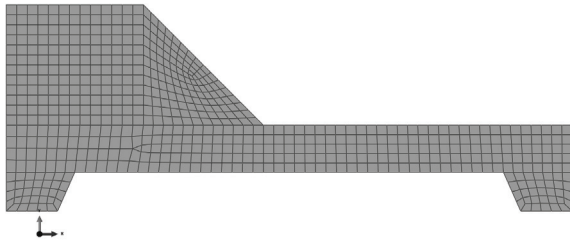


그림 2. 콘크리트 보 구조물의 유한요소망

참고문헌

1. 내진설계기준연구 I (1996)
2. 내진설계기준연구 II (1997)
3. 하천설계기준 2009
4. 건축구조기준 (KBC2009)
5. 댐 설계기준 2011
6. 박광순, 서형열, 김익현, 김동수, “국내 시설물 내진설계기준의 개선방향에 대한 고찰”, 한국지진공학회 (2013)
7. 김익현, “주요 토목시설물의 내진설계기준 현황”, 대한토목학회지 (2010)
8. 이지호, “콘크리트 댐의 내진설계”, 한국지진공학회 (2001)