01. 기후변화 및 노후화에 대비한 기존댐 안전성 강화
02. 재해환경 변화에 따른 노후 저수지(Fill Dam) 안전관리
03. 노후 댐의 내진 성능평가
04. 용수댐 안정성 강화를 위한 비상방류능력 확보방안

참고문헌

· 저수지 정량적 위험도 분석 및 보수보강 우선순위 평가기술 개발 (농어촌연구원 2015.5~2018.4)
· 댐 저수지 및 교량의 긴급 지진 안전성 평가기술 개발 (농어촌연구원 2017.4~2019.12)
· USN 급경사지 및 저수지 붕괴예경보 서비스 구축(국민안전처 농어촌연구원(2013.2~2015.2)
· 기능상실 및 저활용 저수지의 효율적 관리기법에 대한 연구(농어촌연구원 2015.1~2016.12)
· 저수지 댐 재해예측 및 붕괴예경보를 위한 복합위험 기준 연구(농어촌연구원 2016.1~2017.12)

노후 댐의 내진 성능평가

03

배정주 팀장 : 한국시설안전공단 수리시설안전실
정규정 실장 : 한국시설안전공단 수리시설안전실
권혁기 단장 : 한국시설안전공단 국가내진센타 설립추진단

1. 서론

최근의 경주지진과 포항지진에서 보듯이 이제 우리나라에서도 시설물의 내진성능확보가 당면과제가 되었으며 특히 지진에 의한 손상 시 피해가 여타 구조물에 비해 막대할 것으로 예상되기 때문에 댐은 내진에 대한 성능평가가 중요한 것으로 판단된다. 따라서 본고에서는 댐의 내진 성능평가의 정의, 외국의 동향 등을 살펴본 후 우리나라의 대처방안에 대해 논의하고자 한다..

2. 댐의 내진성능 평가

댐의 내진성능 평가 방법을 논하기 전에 댐은 지진시 어떤 성능을 발현해야 하는 가에 대한 고찰이 필요하다. 이를 위해 댐 설계기준 · 해설(2011년)을 보면 다음과 같이 댐의 지진시 필요한 성능에 대해 정의하고 있다.

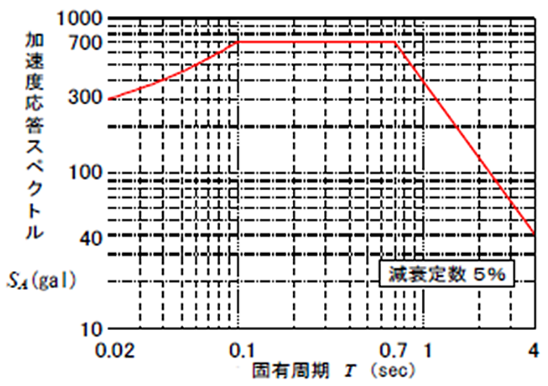
"우리나라 대부분의 큰 댐은 해당 지역의 주요 상수원으로 사용되고 있다. 따라서 지진이 발생되더라도 댐이 붕괴되지 않고 하류하천에 피해를 주지 않아야 하는 것은 물론이고 댐 손상이 거의 발생되지 않아 상수원으로서의 즉각적인 기능을 수행할 수 있어야 한다. 최근 외국의 지진 사례에서 나타났듯이 도시지역의 화재, 전염병 등에 의한 2차 재해를 방지하고 우리나라의 밀집화된 도시기능을 유지하기 위해서는 어떠한 지진이 발생되더라도 댐은 상수원으로서의 기능을 온전히 발휘할 수 있어야 한다."

2. 1 발생 가능한 최대 지진력

댐에 대한 내진 성능평가시 그간 국내에서는 설계 지진력(예 500년 빈도 지진력)을 사용하여 왔으나 외국에서의 내진 성능평가 시엔 댐에 작용할 수 있는 최대 지진력을 사용하고 있다. 최대 지진력은 댐 주변의 활성단층에서 댐까지 전파 가능한 최대 지진력 또는 지진재해도상 최대 지진력(ICOLD는 1만년 재현 지진력 권장, USBR은 10만년 재현 지진력 사용)을 사용하게 되는데 우리나라의 경우 정부에서 공인한 활성단층은 없는 상태이므로 지진재해도상 지진력을 사용해야 하는데 국민안전처에서 발표한 지진재해도상 최대 지진력은 4,800년 재현 지진력이므로 이를 향후 성능평가시 사용하여야 한다.

01. 기후변화 및 노후화에 대비한 기존댐 안전성 강화
02. 재해환경 변화에 따른 노후 저수지(Fill Dam) 안전관리
03. 노후 댐의 내진 성능평가
04. 용수댐 안정성 강화를 위한 비상방류능력 확보방안

4,800년 재현 지진력 중 가장 큰 값은 0.25g이며 이 값은 산업부에서 신규 화력 및 수력발전소에 적용하고 있는 0.286g보다 적은 값이며 일본에서 댐의 내진성능평가 시 사용하고 있는 지진력의 하한값인 300gal 보다 작은 값이므로 과대한 값이라 할 수 없다.



〈그림 1〉 일본 댐 내진성능 평가시 하한 응답스펙트럼

2.2 댐이 지진 중 및 지진 후 발휘해야 할 성능

댐 설계기준에 의하면 댐은 발생 가능한 최대 지진하에서 지진 중 붕괴되지 않아야 하고 지진 후 상수원으로서의 기능을 발휘해야 한다. 따라서 댐은 지진 중 붕괴되지 않는 성능을 확보(성능1 : 지진 중 안전성확보 성능)해야 하며 이를 위해 댐체, 여수로 구조물, 수문, 취수탑, 수로 터널 등 붕괴시 하류로의 통제 불가능한 방류가 발생 가능한 시설들에 대해 성능1을 확보하고 있는 지 평가해야 한다.

〈그림 2〉 댐 파괴에 따른 하류로의 통제 불가능한 방류

또한 지진 후 지진에 의해 발생한 댐체 등의 손상에 가해지는 저수지 물의 작용으로 인한 지체된 파괴에 저항하는 성능(성능 2-1)과 지진후 댐체 등의 이상 징후 시 신속방류성능(성능 2-2)을 확보하고 있는지 평가하여야 한다(성능2 : 지진 후 안전성확보 성능). 이를 위해 댐체, 여수로 구조물, 수문, 취수탑, 수로 터널 등 지체된 파괴에 저항해야 하는 시설 및 신속방류를 위한 시설들 대해 성능2을 확보하고 있는 지 평가해야 한다.

더불어 지진 후 상수원으로서의 기능을 발휘하기 위해서는 취수탑, 발전터널, 발전소 등이 즉시 정상 작동 가능해야 하며 이들 시설이 정상 작동할 수 있는 성능(성능3 : 상수원 기능 보존 성능)을 확보하고 있는지 평가해야 한다.

2. 3 댐의 각 시설별 발휘해야 할 성능

댐에는 수많은 시설들이 존재하며 이들이 지진 중 또는 지진 후 발휘해야 하는 성능은 다양하며 이들 시설들의 요구되는 성능과 성능의 판정기준을 살펴보면 아래와 같다

〈표 1〉 댐 시설별 요구되는 성능과 성능의 판정기준

시설 구분	필요 성능	1번 성능 판정기준	2번 성능 판정기준	3번 성능 판정기준
콘크리트 댐체	1,2	댐체 저면을 상하류방향으로 관통하는 균열발생 여부	발생된 균열에 작용하는 수압으로 인한 추가적인 손상발생여부	–
필 댐체	1,2	댐체 높이를 1m 낮추는 활동 영구 변형량 발생여부	활동면을 따른 침투파괴발생여부	–
여수로 구조물	1,2,3	철근변형이 파단 변형치 이내 전도, 활동 등이 미 발생	발생된 균열에 작용하는 수압으로 인한 추가적인 손상발생여부	지진 후 잔류변위로 인한 수문의 작동에 지장여부
여수로 수문	1,3	강재변형이 허용변형치 이내 (주요부재 항복변형 2배 이내)	–	지진 후 잔류변형으로 인한 작동에 지장여부
여수로 권양기 및 조작반	1	지진력이 앵커내하력 이내	–	–
여수로 공도교	1	지진 중 소성변형에 따른 낙교가능성, 피어와 충돌가능성 지진력이 고정부 앵커내하력 이내	–	–
취수탑 구조물	1,3	철근변형이 파단 변형치 이내 전도, 활동 등이 미 발생	–	지진 후 잔류변위로 인한 수문의 작동에 지장여부
취수탑 수문	1,3	강재변형이 허용변형치 이내 (주요부재 항복변형 2배 이내)	–	지진 후 잔류변형으로 인한 작동에 지장여부

주) 성능1 : 지진 중 안전성확보, 성능2 : 지진 후 안전성확보, 성능3 : 상수원 기능보존

01. 기후변화 및 노후화에 대비한 기존댐 안전성 강화
02. 재해환경 변화에 따른 노후 저수지(Fill Dam) 안전관리
03. 노후 댐의 내진 성능평가
04. 용수댐 안정성 강화를 위한 비상방류능력 확보방안

〈표 1〉 댐 시설별 요구되는 성능과 성능의 판정기준(계속)

시설 구분	필요 성능	1번 성능 판정기준	2번 성능 판정기준	3번 성능 판정기준
취수탑 권양기 및 조작반	1	지진력이 앵커내하력 이내	–	–
취수탑 공도교	1	지진 중 소성변형에 따른 낙교가능성, 피어와 충돌가능성 지진력이 고정부 앵커내하력 이내	–	–
수로터널 갱구부 구조물	1	철근변형이 파단 변형치 이내	–	–
수로터널 터널본체	1	라이닝 응력이 허용치 이내	–	–
발전소 본체	1	콘크리트응력이 허용치 이내	–	–
발전소 건축물	1	철근변형이 파단 변형치 이내	–	–
발전소 기계설비 및 조작반	1	지진력이 앵커내하력 이내	–	–
야외 변압기	1	지진력이 앵커내하력 이내	–	–

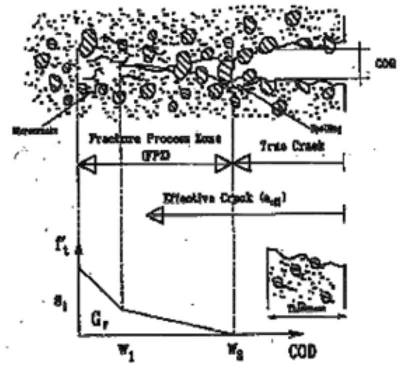
상기는 계산을 통해 입증이 필요한 최소성능을 기술한 것이고 모든 개별시설은 1~3 성능을 만족시켜야 한다. 이를 위해 책임기술자는 공학적 판단을 실시하며 시설물상황에 맞추어 필요시 성능만족을 입증하기 위한 계산을 추가적으로 실시할 필요가 있다.

2.4 시설별 발휘해야 할 성능의 입증

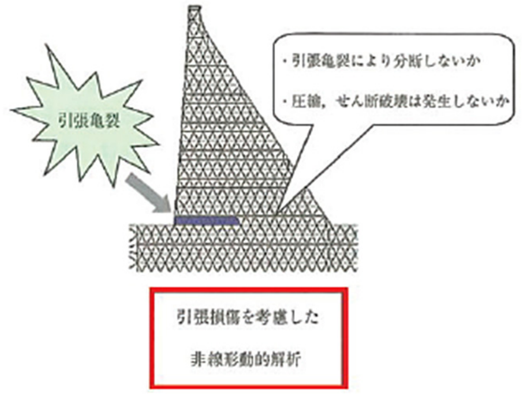
댐에 있는 시설들이 성능을 확보하고 있는지를 상기 표를 통해 판정하기 위해서는 각 시설물에 대한 동적 소성해석을 하여야 한다. 그간 댐 시설물들에 대한 동적 소성해석기법에 대한 연구가 미진하여 이러한 동적 소성해석을 실시하지 못하고 유사정정해석법, 동적 탄성해석법 등 댐 시설물의 성능을 정확히 표현할 수 없는 기법들을 사용하여 왔으나 최근의 기술진보에 따라 동적 소성해석법이 사용 가능하게 되었다.

2.4 - ① 콘크리트 구조물

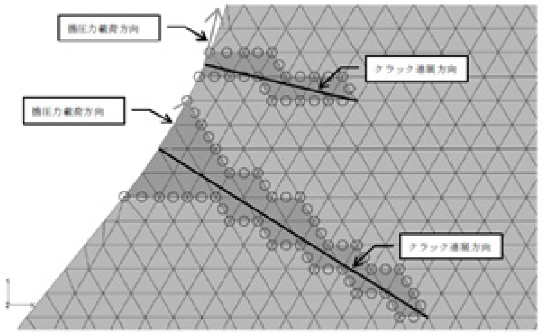
콘크리트 댐은 상하류방향 지진시 "댐체 저면을 상하류방향으로 관통하는 균열발생 여부"가 판정기준이며 이를 판정하기 위해서는 파괴역학에 근거한 Smeared crack 모델을 사용하여 콘크리트 댐체에 대한 동적 소성해석을 실시한다. 또한 지진시 발생된 균열에 지진 후 작용하는 저수지 수압에 의한 지체 파괴에 대해서도 검토하게 된다.



〈그림 3〉 파괴역학에 근거한 균열발생 메커니즘



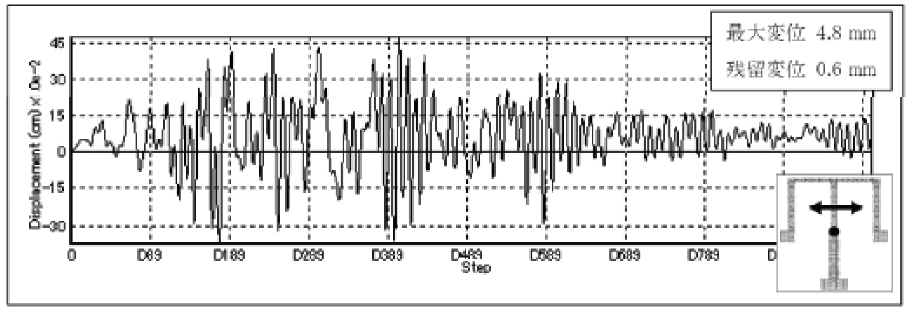
〈그림 4〉 Smeared crack 모델링



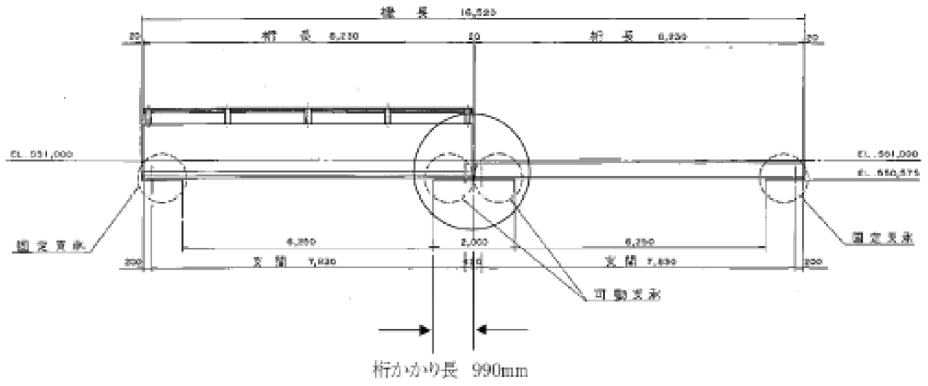
〈그림 5〉 발생된 균열에 작용하는 수압에 의한 지체파괴 검토

또한 콘크리트 댐은 댐 축방향의 지진력 작용시 월류부의 철근콘크리트 구조물인 여수로 구조물에서 필요한 성능을 확보하고 있는지 확인해야 하며 이를 위해 여수로 구조물과 수문의 지진 중 최대 변위량과 지진 후 잔류 변위량을 계산하여야 한다. 지진 중 최대 변위량의 계산결과에 근거해 여수로 피어부의 거동에 지배되는 공도교의 이웃 피어와의 충돌가능성 및 낙교 가능성을 검토하여야 한다. 또한 지진 후 잔류 변형량을 계산하여 수문의 작동성이 확보되고 있는지 확인해야 한다.

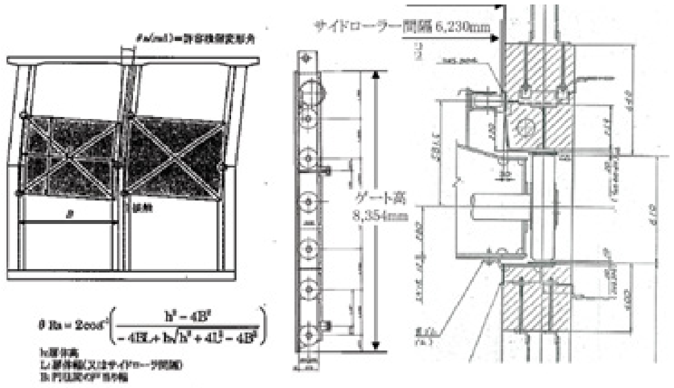
01. 기후변화 및 노후화에 대비한 기존댐 안전성 강화
02. 재해환경 변화에 따른 노후 저수지(Fill Dam) 안전관리
03. 노후 댐의 내진 성능평가
04. 용수댐 안정성 강화를 위한 비상방류능력 확보방안



〈그림 6〉 지진중 및 지진후 여수로 구조물의 변형량 계산 예

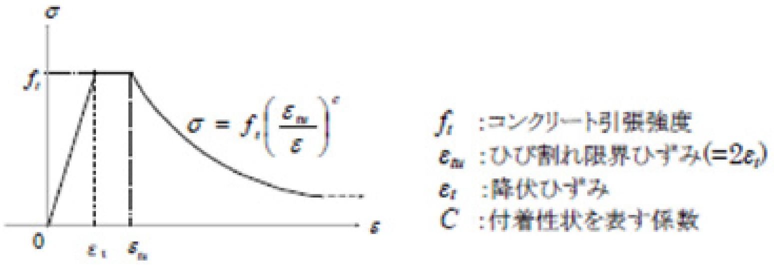


〈그림 7〉 지진 중 공도교의 충돌 및 낙교 가능성 검사 예

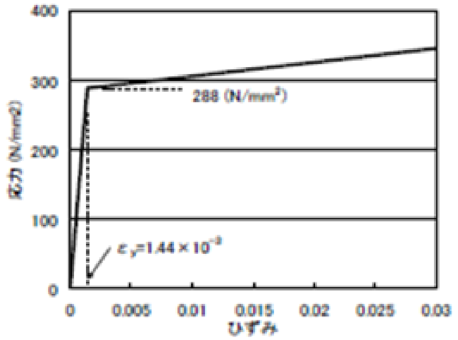


〈그림 8〉 지진 후 수문의 작동성능 검사 예

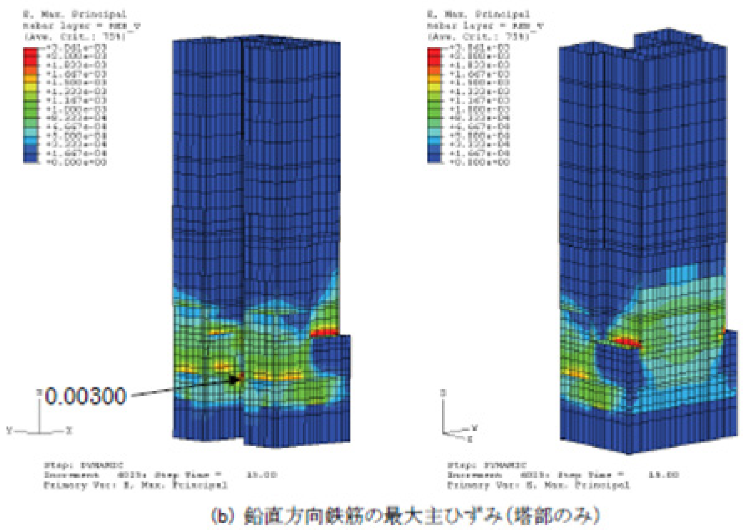
철근콘크리트 구조물인 여수로 구조물의 동적 소성해석을 위해서는 일본 콘크리트 표준시방서(2012년)에서 권장하고 있는 평균 응력–평균 변형율 이론이 사용가능하며 이는 인장을 받는 철근콘크리트의 소성해석에 적합한 이론이다.



〈그림 9〉 인장을 받는 콘크리트의 소성거동



〈그림 10〉 인장을 받는 철근의 소성거동



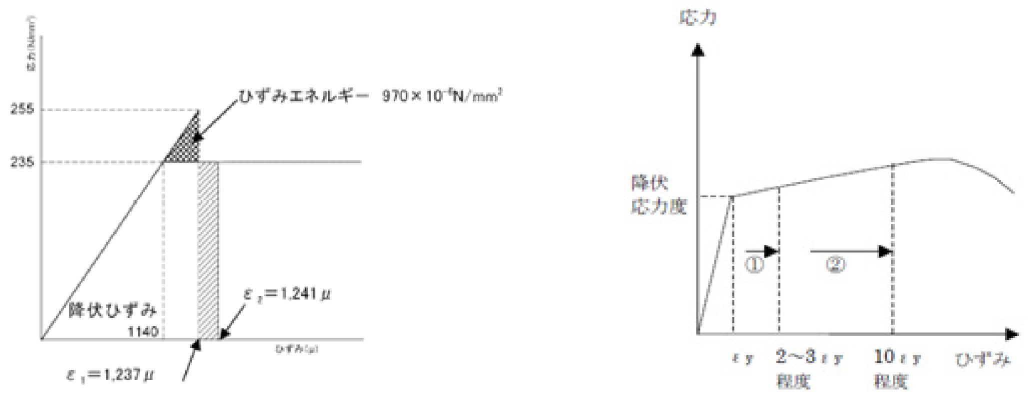
〈그림 11〉 철근콘크리트 부재의 동적 소성해석 예

2.4 - ② 강재 구조물

강재 구조물인 수문 등의 경우엔 지진시 여수로 등의 구조물 거동에 지배되므로 여수로 피어에 발생되는 응답

01. 기후변화 및 노후화에 대비한 기존댐 안전성 강화
02. 재해환경 변화에 따른 노후 저수지(Fill Dam) 안전관리
03. 노후 댐의 내진 성능평가
04. 용수댐 안정성 강화를 위한 비상방류능력 확보방안

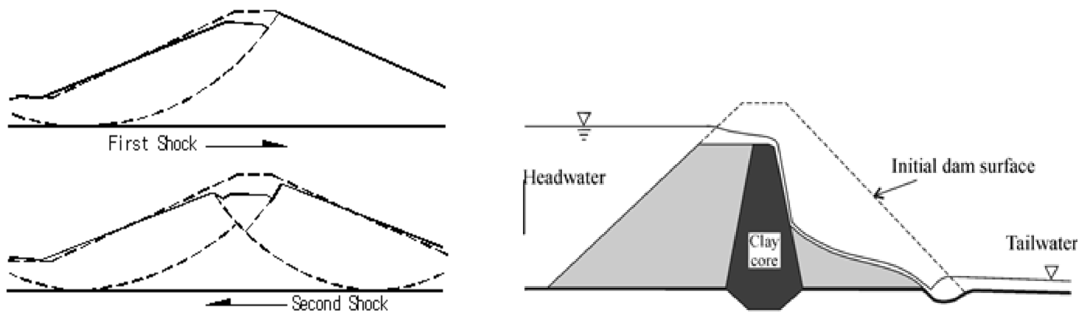
지진력을 작용시킨 후 지진중 수문의 변형량을 계산하여 피어와의 충돌가능성, 문틀에서의 탈락가능성과 저수지 물의 누수가능성을 파악한다. 또한 발생응력과 강재 강도를 비교 후 발생응력이 강재강도를 초과하면 발생되는 소성변형량을 구한다. 이를 위해 Von mises 응력을 검토하여 강재강도를 초과한 부재에 대해서는 소성변형량을 에너지 일정칙에 따라 계산한다. 이때, 발생된 소성 변형량은 주요부재의 경우 항복 변형량의 2배 이내, 보조부재의 경우 항복 변형량의 10배까지를 허용한다. 이를 통해 지진 후 수문의 작동 성능을 확인한다.



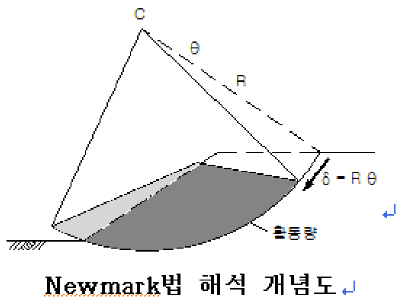
〈그림 12〉 에너지 일정칙의 적용 예 및 부재 중요도에 따른 허용 소성 변형량

2. 4 - ③ 흙 구조물

강흙 구조물인 필댐 제체의 지진에 의한 파괴는 사면활동에 의한 파괴와 액상화에 의한 파괴로 나눌 수 있다. 사면활동에 의한 파괴는 사면활동에 의한 댐체의 높이저하 및 이에 따른 저수지 물의 월류에 따른 세굴파괴를 말하는 것이며 사면활동에 의한 소성 변형량이 여유고 이내인지를 판정하여 지진 중 붕괴방지에 대한 성능을 확인하게 된다. 필댐의 사면활동에 의한 소성 변형량은 Newmark법에 의해 계산할 수 있다.



〈그림 13〉 사면활동에 의한 댐체의 높이 저하 및 세굴파괴 모식도



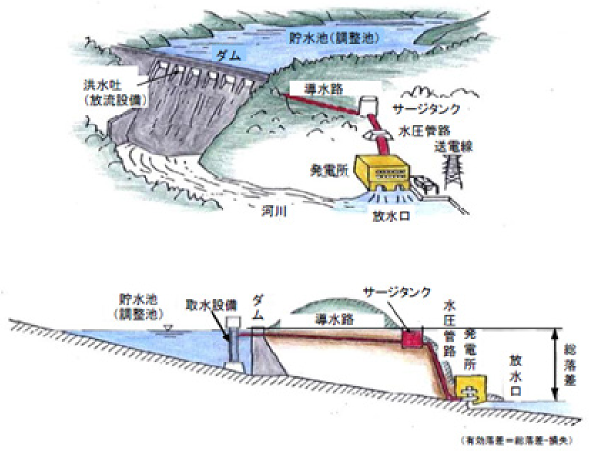
〈그림 14〉 Newmark법 해석 개념도

지진 중 활동면이 상류에서 하류로 발생하면서 활동면의 시점이 저수지 수위보다 낮은 점에서 시작되면 지진 후 저수지 물이 활동면을 따라 하류로 침투하면서 파이핑 파괴를 유발할 수 있다. 이러한 경우의 파이핑 발생여부는 제체의 필터층과 코어층 등의 단면규격과 활동량 등을 감안하여 공학자가 판단하게 되며 이를 통해 지진 후 지체파괴방지에 대한 성능을 판정하게 된다.

제체 액상화는 제체 중 액상화가 유발 가능한 부재(필터층 등)에 대해 액상화 판정을 하게 되며 이를 위해서는 항만 및 어항설계기준 등에 나와 있는 Seed방법 등을 활용하거나 댐 설계기준의 액상화 발생가능 조건 등을 참조하여 액상화의 판정을 실시한다. 이를 통해 지진 중 붕괴방지에 대한 성능을 평가한다.

3. 외국의 사례

미국의 경우 주로 지진 중 붕괴방지개념하의 내진성능평가를 실시하고 있으며 일본의 경우는 본고에서 논한 바와 같은 지진 중 및 지진 후를 망라한 종합적인 내진성능평가 기준을 수립하여 주요 댐에 대한 내진성능평가를 활발히 진행하고 있다 (大規模地震に對するダム耐震性能照査指針(案)·同解說 : 國土省, 2005、水力発電設備の耐震性能照査マニュアル :經済産業省、平成24)



〈그림 15〉 일본의 종합적인 내진성능평가 대상 시설