

대댐의 최근 지진 안전성 사례와 연구 시사점

K-water연구원 기반시설연구소 선임연구원 | 박동순
fulgent@kwater.or.kr



1. 서론

최근 개정된 댐설계기준(2011)에서 국내의 대댐은 그 사회적, 산업적 중요성을 감안하여 상세 지진 동해석시 2400년과 1000년 재현주기에 해당하는 최대 지반가속도를 적용하도록 명시하고 있다. 지진에 대한 위협성은 선제적인 예보가 불가능하고, 인명 손실 뿐만 아니라 짧은 시간에 사회기반시설에도 경제 생산능력의 막대한 손실을 입힐 수 있다는 점에서 경각심을 불러일으키고 있다. 실제로 최근 발생한 주변국 대형 지진의 직간접적인 영향을 통해 이러한 사실은 증명되고 있다. 특히 최근 발생한 일련의 초대형 지진들 - 수마트라 지진 (2004, M 9.1), 중국 Wenchuan 지진 (2008, M7.9), Haiti 지진 (2010, M7.0), 일본 Tohoku 지진 (2011, M9.0) 등은 USGS (미국 지질조사국)에 의해 공식 집계된 사망자 수만 네차례 지진으로 60만명이 넘었으며, 사회기반시설의 피해 역시 심각하여, 사전 대비와 철저한 내진설계 및 성능평가가 매우 중요한 화두라 하겠다.

기상청 자료에 따르면, 2000년 이후 현재(2013. 09)까지 국내에서 관측된 지진 규모 4.0 이상의 지진은 총 14회 기록된 바 있으며, 이 중 12회는 해역에서 발생함으로써 에너지 감쇠로 내륙 지역의 대댐에서는 별다른 관측을 하지 못하였다. 그러나 2007년 1월 20일, 규모 4.8의 오대산 지진이 강원도 평창군 도암면과 진부면 경계지역에서 발생하여 대관령과 강릉 등에서도 지진 관측이 된 바 있으며, 2009년 5월 2일에는 규모 4.0의 지진이 경북 안동시 서남서쪽 2km 지역에서 계측된 바 있다. 참고로 규모 변화 1.0의 차이는 에너지로 환산시 약 32배의 차이를 보이며, 지반운동(변위)의 차이는 약 10배가 된다. 따라

서 규모 차이 0.1만으로도 지진 에너지의 차이는 1.4배가 된다. 즉 규모 7.5의 지진은 규모 6.5 지진보다 약 10배의 지반운동이 발생함을 의미하며, 약 32배의 에너지를 방출함을 의미한다.

이와 같이 지진관측설비의 비약적인 발전과 설치규모 확대에 따라 우리나라도 대댐에서의 실시간 지진관측이 지속되고 있으나, 아직 실제 댐의 성능목표인 최대 지반가속도(PGA; Peak Ground Acceleration) 0.154g 이상의 지진은 관측 사례가 없어 실제 댐의 지진시 거동양상은 아직 모호한 실정이다.

중국이나 일본에 비해 상대적으로 지진에 대한 과거 사례와 관측 역사가 짧은 우리나라에서는 대댐의 지진 안전성을 검토하는 거의 유일한 대안이 수치해석적 모델링이었다. 특히 최근 많이 보편화되어 있는 시간이력 동해석은 구성모델의 다양성과 입력 물성의 불확실성, 그리고 해석 과정의 복잡성 등으로 해석 결과의 편차가 심한 편이며, 해석 결과에 대한 안전성 판단 기준 역시 명확하게 확립되어 있지 않은 실정이다.

따라서 실제 지진시 댐의 거동과 저항성 사례들을 살펴보는 일은 전반적인 대댐의 지진 안전성 판단에 귀중한 판단 근거가 될 수 있으며, 다양한 사례들을 바탕으로 현재 논의중인 대댐의 안전성 연구에 있어서의 시사점들을 고찰하는 것은 매우 유의미한 작업이 될 것이다.

따라서 본 기술기사에서는 2000년 이후 해외에서 발생한 주요 강진에 대해 댐의 거동 사례를 손상이나 붕괴 위주로 살펴보고, 최근 각종 지진공학 관련 국제 컨퍼런스 내용을 바탕으로 향후 댐 내진 안전성 연구의 시사점을 찾고자 하였다.

2. 최근 지진시 댐 거동

2.1 사례 일반

지진으로 인한 댐의 피해는 과잉간극수압의 발현에 따른 지반의 액상화 및 지진동의 증폭현상, 기초 지반의 단층 대 변위 발생 등을 원인으로 하여 다양한 사례들이 보고 되어 오고 있다. 지진시 댐의 피해 범위는 댐체 단면의 전파로부터 반파, 또는 경미한 손상에 이르기까지 다양 하며, 가장 위협적인 요인은 지진동으로 인한 댐체 변형 으로 여유고 손실에서 발생하는 저수지 물의 급작스런 유출이라 하겠다. 이러한 댐의 기능상실은 하류 지역의 대규모 인명 및 재산상의 피해를 초래할 수 있으므로 매우 중요한 검토대상이다.

현재 K-water 연구원에서는 국내 대댐의 지진 안전성을 재검토하기 위해 개정된 댐설계기준(2011)과 강화된 설계 성능목표에 따라 국내 주요 다목적댐 및 용수전용댐에 대한 내진성능평가 연구(2012. 05~2014. 12)를 수행 중에 있다. 이러한 연구의 일환으로서 해외에 최근 발생한 지진 시 댐의 성능발현 사례들을 고찰하고 중요한 연구방향을 정립, 공유하는 일은 매우 중요하다 하겠다.

Seed (1979)는 지진시 흙댐의 붕괴를 유발할 수 있는 손상의 형태를 다음과 같이 제시한 바 있다.

- 기초부에서 주요 단층 운동에 의한 댐의 파손
- 지반의 구조적 부등 이동으로 인한 여유고 상실
- 지반운동에 의한 사면 활동
- 사면 활동 또는 제체 다짐으로 인한 여유고 손실
- 연약 기초지반 재료에서의 댐의 활동
- 지반 변위에 의한 균열로 내적침식 발생
- 저수지 수면 진동으로 인한 댐체 월류
- 사면활동 또는 암석 붕락으로 인한 댐체 월류
- 여수로 또는 유출부 구조물 파괴

이에 대해 Fell (2005)은 “Geotechnical Engineering of

Dams”에서 댐의 지진 안전성에서 고려할 주요 항목을 다음과 같이 정리하였다.

- 댐의 지진 방어대책으로서 댐과 기초부 내적침식을 방지하거나 억제하기 위한 필터와 양호한 성능을 가진 배수층 설계 및 시공 (예, 자유배수재로서 락필존)
- 지진 동안과 직후의 제체 안정성
- 지진으로 인한 변형(즉, 침하와 균열)과 댐 여유고
- 기초부와 제체에서 포화된 모래질 및 실트질 지반, 그리고 모래와 실트 매트릭스를 가진 일부 자갈층의 액상화 가능성

위 사항들은 향후 국내 대댐에 대한 내진 안전성 연구 방향을 바로 정립하는 데에 소중한 통찰력을 제공해 준다. 해외 댐들의 실제 지진시 거동 사례는 Swaisgood (2003)의 자료를 참고할 수 있다. 현재 국내 댐 형식과 견줄만한 유사한 사례들이 다수 포함되어 있어 유용한 자료가 될 것으로 사료된다. Figs 1-2에서 일반적으로 최대 지반가속도가 증가할수록 정부 침하량 역시 대체로 증가하는 것으로 나타났다. Swaisgood (2003)의 통계자료(Figs. 1-2)로 볼 때, 댐 높이의 1% 침하가 발생하는 경험적인 PGA 값은 대략 최소 0.4g를 초과할 때이다.

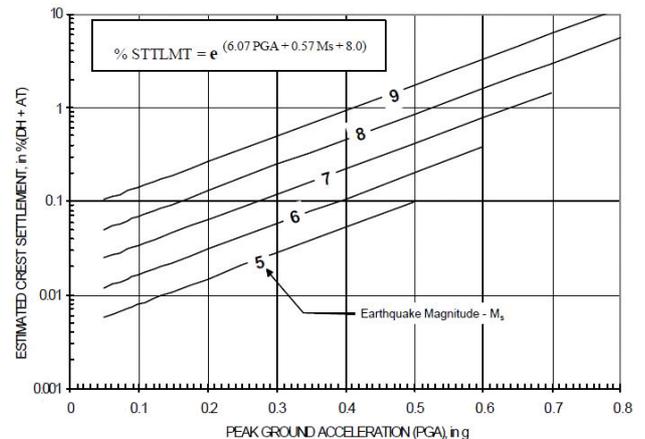


Fig. 1. PGA에 따른 댐마루 침하 사례 데이터베이스에서 지진 규모별 통계 분석 (Swaisgood 2003). 여기서 PGA는 최대 지반가속도, Ms는 표면파 스케일의 지진 규모

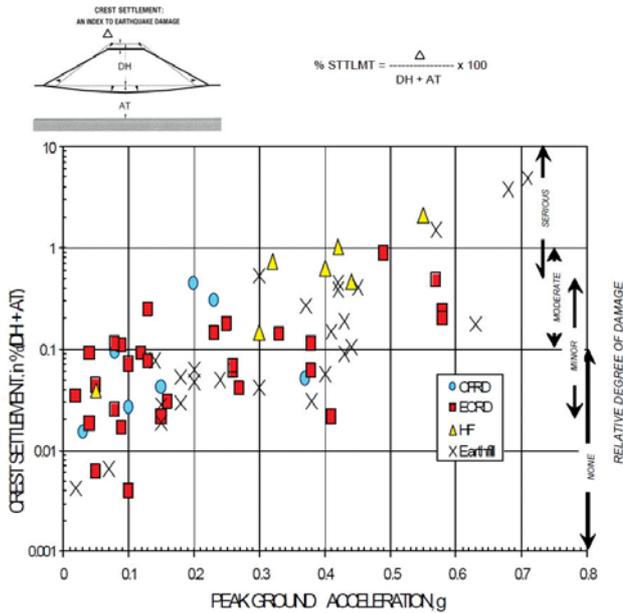


Fig. 2. PGA에 따른 댐마루 침하 경향 (Swaisgood 2003)

결론적으로 적절한 다짐과 설계에 의해 시공된 락필댐들은 강진 하에서 매우 우수한 성능을 보여주고 있다. 여기서 시사점은 댐의 여유고 또는 댐체의 코어부 정부에서 실제 댐마루까지의 높이가 손실될 수 있는 정부 침하량 이상 확보된다면 댐의 변형과 침하에 의한 월류 위험성

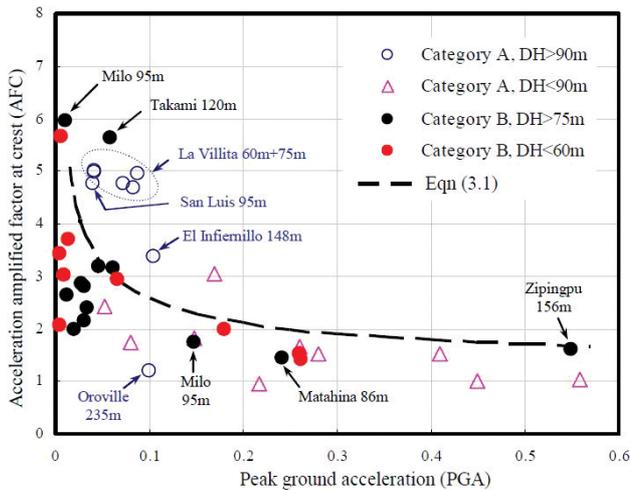


Fig. 3. 지진관측 사례로부터 정리된 PGA 별 가속도 증폭계수 변화 (Yu et al. 2012)

을 막을 수 있다는 점이다.

Yu et al. (2012)은 실제 강진시 계측된 댐들의 가속도 기록을 바탕으로 PGA별로 지반 가속도의 증폭현상을 그래프로 나타내었다 (Fig. 3). 0.1g 미만의 PGA에서 댐들은 대체로 2배에서 6배까지의 높은 지진파 증폭현상을 보이고 있다. 그러나 PGA가 대략 0.2g 이상일 경우에는 댐마루에서 가속도 증폭비는 약 2배 이내로 수렴하려는 경향을 관찰할 수 있다. 따라서 향후 댐 내진 안전성 평가를 수치해석적으로 연구할 때에는 최대 지반가속도 (PGA)에 따른 댐체 지진응답특성에 대한 민감도 분석이 필요할 것으로 판단된다.

2.2 2008 중국 Wenchuan 지진시 댐 피해사례

2008년 중국 Wenchuan 지진은 규모 7.9 (일부 학자들의 경우 규모 8.0으로 보고)의 대형 지진으로서 서부 Sichuan 지방의 Longmenshan 단층대에서 발생하였다. Shannon (2009)에 의하면, 2008년 5월 12일 발생한 규모 7.9의 Wenchuan 지진은 2,600여 댐과 저수지에 손상을 유발하였고, 특히 피해가 심하였던 Sichuan 지역은 약 30%에 해당하는 1,996개 댐에 피해를 입혔다. 당시 Sichuan 지역의 1,996개 댐 중 69개 댐은 댐 붕괴 위험 상황으로 분류되었고, 310개 댐은 고 위험군으로, 1,617개 댐은 차순위 위험군으로 분류된 바 있다. 댐의 주요 손상 형태로는 1,425개 댐에 균열이 발생하였고, 687개 댐에 침하와 변형이, 354개 댐에 사면활동이, 428개 댐에 누수와 침투수 문제를, 161개 댐에 권양설비 피해가, 그리고 422개 댐에서 여수로와 유출부 구조물, 관리동에 피해가 발생하였다고 보고하였다. 이들 댐 중 가장 중요한 수자원 시설로 Zipingpu CFRD, Shapai RCC 아치댐, Bikou 사력댐, Baozhusi 중력식 댐을 들 수 있으며, 이 네 개의 댐에서 겪은 지진 진도는 VIII - X에 달하였다.



전체적으로 경미한 피해를 입었지만, 진앙지에서 17km 떨어진 Zipingpu 댐(H 156m)은 PGA 0.65 - 0.8g를 기록하였고, 강진으로 인해 진도 IX - X의 진동이 있었다. 주요 손상으로 댐마루 최대 침하량은 81cm에 이르렀고, 수평변위는 하류측으로 18cm에 달하였다. 침투수량은 10리터/초에서 20리터/초로 증가하였고, 연직과 수평방향으로 조인트 파단변형량이 각각 35cm와 17cm를 기록하였다. 정상부에서 보도 가이드레일과 다른 보조 시설들이 심각하게 손상을 입었고, 하류측 보호사석이 위로 들리고 느슨해졌다 (Fig. 4)(Zhang et al. 2012).



Fig. 4. 2008 중국 Wenchuan 지진시 Zipingpu CFRD에서의 (a) 콘크리트 차수벽 조인트 파단 및 이동, (b) 댐마루 펜스 지지대 손상 (Zhang et al. 2012)

132m 높이의 Shapai RCC 댐은 진앙지에서 36km 떨어진 곳에 위치하였으며, 지진 발생시 저수지 수위는 만수 위 상태였다. 당초 이 댐의 설계 PGA는 0.138g였으나 지진동의 진도는 VIII - IX에 이르렀다. 그러나 댐은 별다른 균열없이 보존되었다. 단지 penstock이 암반 붕락으로 파괴되었고, 발전소에 심각한 홍수로 범람을 초래하였다 (Fig. 5) (Zhang et al. 2012).



Fig. 5. 2008 중국 Wenchuan 지진시 Shapai RCC 댐에서의 Penstock 파괴와 발전소 범람 (Zhang et al. 2012)

높이 101.8m의 Bikou 흡-락필댐의 피해는 댐마루 하류

측벽의 붕괴, 상류측 보호벽의 신축이음부 개도 증가, 최대 242mm에 이르는 댐마루 침하량과 154mm의 수평방향으로의 변형량을 들 수 있다.

Sichuan 지방의 댐들이 지진시 경험한 가장 일반적인 손상들의 유형은 균열과 사면활동, 누수량 증가, 댐마루 침하 등 댐 변형, 방류시설의 손상 등을 들 수 있다. 이러한 손상 유형들 중 대표적인 현상이 댐의 종방향을 따라 발생하는 길이방향 균열이다. Dasongshu 댐과 Fengshou 댐등이 그 좋은 예이다 (Wen and Zhang 2012) (Fig. 6).



Fig. 6. 2008 중국 Wenchuan 지진시 (a) Fengshou 댐의 종방향 균열, (b) Dasongshu 댐의 종방향 균열 (Wen and Zhang 2012)

이러한 댐의 직접적인 피해 외에 Wenchuan 대지진에서 심각하게 제기된 문제 중 하나가 대규모 산사태 현상이었다 (Wieland 2012, Fig. 7). 댐 저수지 내의 대규모 산사태로 인해 저수용량의 감소와 사태댐의 형성, 그리고 암반 붕락으로 인한 진입로 접근 불가 등은 2차적인 문제를 야기하였다.



Fig. 7. 2008 중국 Wenchuan 지진시 Zipingpu 저수지로의 대규모 산사태 (Wieland 2012)

암반 붕락 등 대형 석괴로 인한 피해는 산악지역에 건설된 댐 시설물에 심각한 피해를 줌으로써, 지진으로 인한 댐 피해는 단지 댐 본체에 국한되지 않으며, 발전 및 취

수설비 등 부속시설까지도 그 영향권 하에 있음을 보여 주었다.

(ICOLD 2010; Wieland 2012, Fig. 8)



Fig. 8. 2008 중국 Wenchuan 지진으로 인한 Shapei 발전소 압괴 붕락 피해 및 압괴 붕락으로 인한 Minjiang 강의 Futan 위에 피어의 전단 손상 (ICOLD 2010)

2.3 2011 일본 Tohoku 지진시 댐 피해사례

일본 Tohoku 대지진은 규모 9.0의 초대형 지진으로서 2011년 3월 11일 발생하여 공식적으로 기록된 사망자가 15,867명에 달하며, 15m 높이의 대규모 쓰나미로 인해 엄청난 재산 피해를 입혔다. 지진 이후에는 약 400여개 댐에 대한 즉각적인 조사를 시행하였으며, 결과적으로 완전 붕괴된 관개용 흙댐 1개소(후지누마)를 제외하고 대부분 큰 피해없이 댐 기능을 양호하게 유지하였다.

계측된 지진가속도의 경우 대부분 암반에 설치된 지하 지진계에서 0.4g 이상의 PGA 값이 광범위하게 분포하였다 (Fig. 8). Matsumoto(2012)에 의하면, 당시 약 70개 이상의 댐에서 강진 기록이 확인되었으며, 후쿠시마 현의 댐 기초에서의 PGA 값은 대체로 0.1 - 0.5g 를 기록하였다. 특이한 점은 조사대상 댐 기초에서의 지진동 지속시간이 200초 이상에 달하였다는 점이다. 지진동의 주기는 장주기 성분을 많이 포함하지 않았으며, 주로 0.07 - 0.7초의 주기가 지배적이었다. 규모 7.0을 넘는 여진이 6차례, 규모 6.0 이상의 지진은 96차례나 기록되었다.

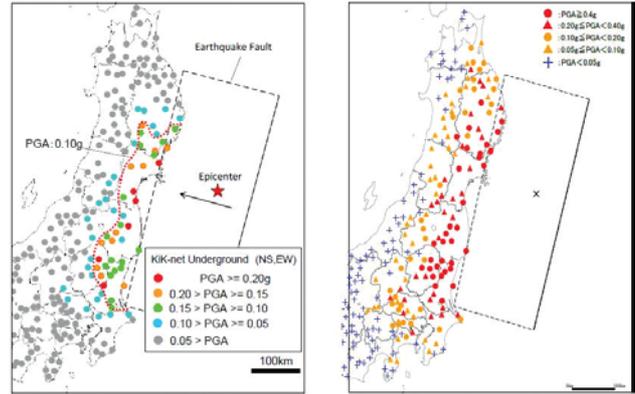


Fig. 9. Tohoku 대지진(M9.0)시 계측된 지표와 지하에서의 PGA 분포 (Matsumoto 2012)

약 400여개에 달하는 댐에 대한 피해 조사 결과, 약 12% 정도의 댐에서 균열, 누수량 증가 등과 같은 현상이 발견되었다. 주요 피해사례에 대한 조사 결과는 아래 Table 1 과 같다 (Matsumoto 2012).

아스팔트 콘크리트 차수벽에서의 균열은 Minamikawa 부댐외에도 높이 38m의 Numappara 댐에서도 발견되었다 (기초 PGA = 0.21g, 댐마루 PGA = 0.3g).

위 표에서 완전 붕괴된 후지누마 저수지(Fukushima현 Sukagawa시 Ebana의 Tamukaichi에 위치)는 Sunoko(策子)강 상류의 우측 지류에 위치한 관개용 저수지이며, 도수로로 Sunoko강 본류에서 물을 취수한다. 우안측 계곡에 보조 댐이 축조되어 있다. 후지누마 댐과 부댐, 그리고 도수로 건설은 1937년 4월 시작되었으나 2차 세계대전 중에 중단되었다가 1949년에 완공되었다. 후지누마 댐은 높이 18.5m, 댐마루 길이 133.2m의 흙댐이며(Fig. 10), 부댐은 높이 10.5m, 정부 연장 72.5m의 흙댐이다. 완전 붕괴된 후지누마 댐은 높이 18.5m의 농업용 댐으로서 단층으로부터 최단거리는 약 80km 였으며, 동일한 단층거리에서 지표면 PGA는 약 0.2 - 0.7g 로 계측되었다. 지진 발생 당시 저수지 수위는 만수상태였으며, 지진 발생 20 - 25분 사이, 저수지 물이 월류하기 시작하였다(Matsumoto 2012). 패널 조사단의 보고



Table 1. 2011 일본 Tohoku 대지진 후 댐 피해조사 결과 (Matsumoto 2012)

댐 명	준공년도	형식	높이(m)	주요 영향
Takou	2006	PG	77.0	정상부 콘크리트 구조물 균열
Ryourigawa	2000	PG	43.0	피해 없음
Ishibuchi	1953	CFRD	53.0	정상부 난간의 기초콘크리트에 작은 균열
Koromokawa No. 1	1963	TE	35.5	댐의 표면 및 댐마루 균열
Naganuma	2012	TE	15.3	부댐 표면에서 종방향 균열
Kejonuma	1995	ER	24.0	댐마루 포장재에서 작은 횡단 균열
Fujinuma-ike	1949	TE	18.5	본댐 붕괴, 부댐 활동
Hatori	1956	TE	37.1	댐마루 포장재에서 종방향 균열
Nishigou	1955	TE	32.5	댐마루 종방향 균열, 상류사면에서 균열
Akasaka	1965	TE	18.3	댐마루 종방향 균열
Hokkawa	2000	ER	57.0	댐마루 포장재에서 횡단 균열
Yanome	1990	TE	29.0	댐마루 포장재에서 종방향 및 횡단 균열

서 상으로 분석한 결과로 볼 때, 댐 마루에서의 최대 가속도는 442cm/s^2 이었으며, 50cm/s^2 이상의 지진동이 100초 정도 지속되었던 것으로 판단하였다. 다짐의 불량 또한 붕괴의 원인을 제공하였다. Fig. 11은 지진 후 후지누마 본댐과 부댐 전경이다.

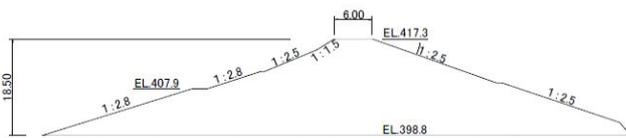


Fig. 10. 후지누마 댐 단면도 (H = 18.5m, L = 133m) (Matsumoto 2012)

Pradel et al. (2013)은 규모 9.0의 Tohoku 대지진으로 인해 붕괴된 후지누마 댐의 붕괴 원인을 정리하고, 동적 수치해석을 수행하여 댐의 붕괴 메커니즘을 파악하고자 하였다. 수치해석 결과, 후지누마 본댐은 지진동으로 인한 하류 사면에서 약 5m의 횡방향 변위가 발생하여 댐마

루 표고를 저하시킴으로서 월류에 의한 댐의 붕괴를 가능하게 하였다. 추가적인 수치해석 결과에 의하면 부댐이 수위 급강하에 취약하여 본댐이 파괴되었을 때 저수지 물이 신속히 유출된 것으로 나타났다.



Fig. 11. 후지누마 주댐과 부댐의 지진후 전경 (Matsumoto 2012)

JCOLD에서 Sakamoto, T. (2012)의 보고에 의하면, 후지누마 댐 붕괴의 주원인이 체체 상부와 중간부의 특성에 기인하였고(Fig. 12), 붕괴촉발 원인은 지진동의 강한 세기와 긴 지속시간 때문이었던 것으로 파악하였다. 지진응답해석 결과 댐 정부에서의 최대 가속도는 442

cm/s²였으며, 50cm/s²을 초과하는 지진동의 지속시간은 한번도 경험해 본적이 없었던 지진으로 100초 동안 지속되었다. 제체의 다짐은 현재 시공기술에 의한 다짐에 비해 낮은 수준이었으며, 댐체 강도 또한 지진시 비배수 조건에서 작은 값을 보였다. 특별히 모래질 성분이 지배적인 상부 제체는 포화된 구역이 있었고, Tohoku 지진과 같은 지진하중 하에서 강도손실을 경험하는 것으로 나타

났다. 부딪에 발생한 슬라이딩 역시 본댐 상부 제체와 유사한 재료를 사용하여 파괴 원인중 하나가 모래질이 지배적인 성토 재료의 특성에 있었음을 알게 되었다. 부딪에 발생한 활동의 경우, 활동면은 각기 다른 건설 시기의 축조 경계면에 의해 제한되었다. 본댐에서 각각 다른 건설 시기에 따른 다짐 정도의 차이가 활동 발생의 원인을 제공하였을 것으로 보인다.

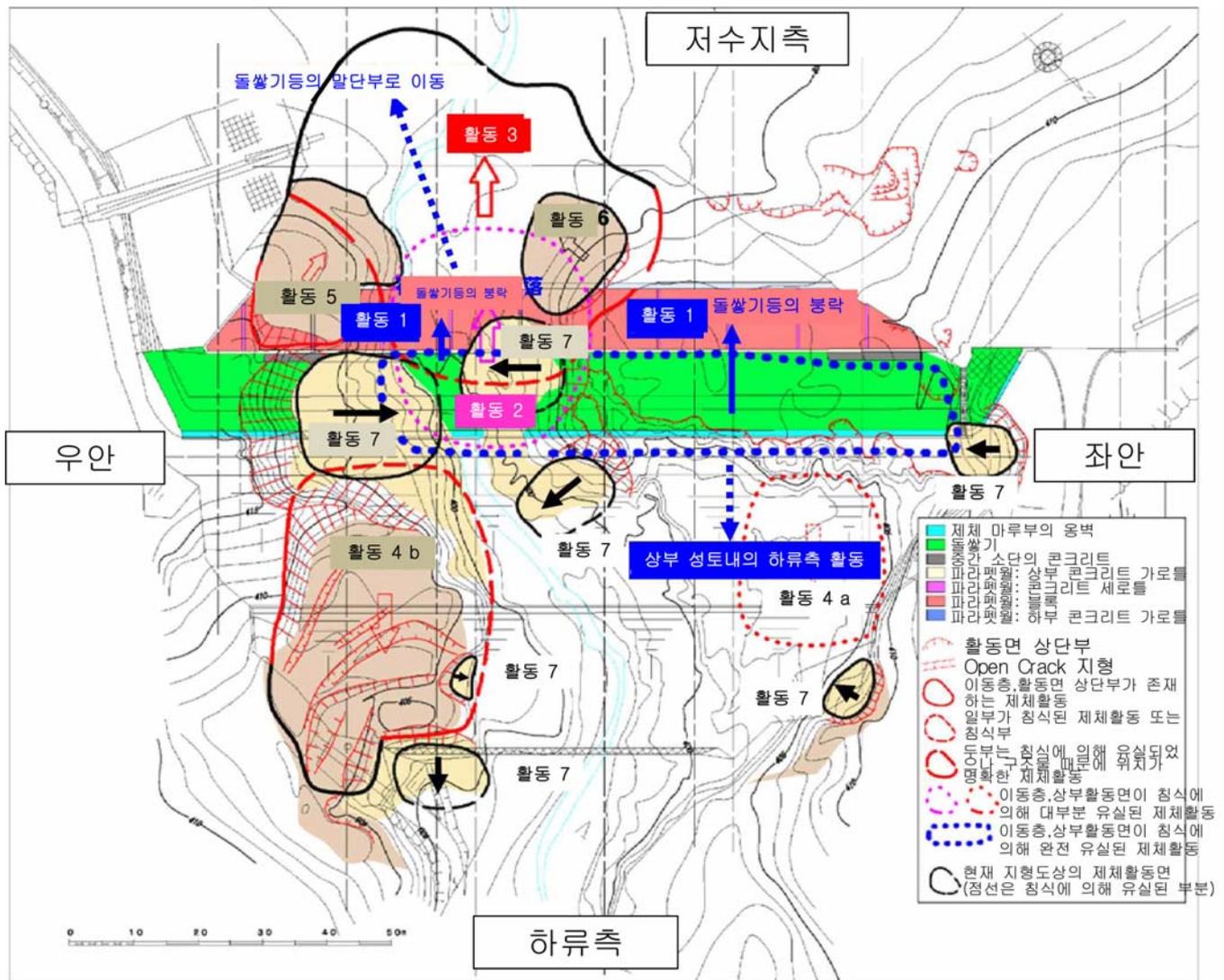


Fig. 12. 후지누마 본댐의 슬라이딩 종합 현황
 주) 제체 활동번호는 추정되는 발생선서



2.4 기타 지진시 댐 피해사례

사면 활동 또한 지진시 파괴유형의 전형적인 예로서, 알바니아의 Sharredushk 댐은 높이 24m로서 2009년 3월 18일 규모 4.1의 지진으로 피해를 입었다(Hinks et al. 2012). 추정된 현장 PGA는 0.07g에 불과하였지만, 여유고는 당초 1.5 - 2.0m에서 겨우 0.1m만을 남겨놓게 되었다 (Fig. 13).



Fig. 13. 2009 Albania 지진으로 인한 Sharredushk 댐 사면 슬라이딩 (Hinks et al. 2012)

암반 붕락과 댐의 종방향 인장균열 또한 전형적인 지진시 댐의 손상 사례로 다양한 보고자료들이 소개되고 있다 (Fig. 14).



Fig. 14. 2001 인도 Bhuj 지진(M7.5)으로 인한 필댐의 손상 (ICOLD 2010)

최근 일련의 대형 지진시 댐 시설물의 손상은 비단 댐 본체뿐만 아니라 발전시설, 수문 기계 전기 설비 등, 포괄적인 손상을 동반하였으며, 향후 댐의 내진 안정성 설계와 평가를 위해서는 이러한 부속시설들에 대한 다양한 검토가 필요함을 교훈으로 얻게 되었다.

2.5. 지진시 댐 거동 특성 요약

위 사례들은 Seed et al. (1978)의 연구결과와 대체로 일치하는 댐의 지진시 거동 특성을 보여주고 있다. Seed et al (1978)은 미국, 일본, 남아메리카 및 러시아의 롤러다짐(Rolled fill) 및 물다짐공법(hydraulic fill)에 의해 축조된 흙댐의 지진에 의한 파괴사례를 조사하였는데, 조사 결과는 다음과 같이 요약된다.

- 물다짐공법(hydraulic fill)으로 축조된 댐은 강진시등의 불리한 조건시 파괴가 발생하기 쉽다.
- 적당한 사면경사와 조건이 좋은 기초지반에 건설된 댐들은 보통수준의 지진(규모 6.5~7의 지진가속도 0.2까지)에 피해를 입지 않았다.
- 시공이 잘된 댐의 경우 최대가속도가 대략 0.2g까지의 보통수준의 지진에 의해 피해를 입지 않고 내진성능을 확보한다.
- 점토 또는 암반기초상에 점성토로 축조된 댐은 규모 (M) 8.5의 지진가속도 0.35~0.8g의 강진에도 피해를 입지 않고 내진성능을 확보한다.
- 포화된 사질토로 축조된 댐에 강진이 발생시, 피해 또는 파괴의 주된 원인은 제체내의 간극수압의 증가이며 이로 인해 전단강도의 감소가 발생할 수 있다.
- 지진동이 끝나고 24시간 후에 발생하는 여러 파괴사례들은 지진에 의한 균열부에 파이핑이 발생되어 파괴되는 것으로 판단할 수 있다.

CFRD의 경우, 제체가 건조한 상태이므로 지진동시에도 간극수압이 작용치 않는다. 따라서 제체강도가 감소하지 않으며 제체 배면에 약간의 변형이 일어날 수 있다. 강도가 크고 규모가 큰 지진의 경우 차수벽에 균열을 일으킬 수 있다. 물론 이로 인해 누수량이 증가할 수 있으나 차수벽 지지존과 선택존을 통해 누수가 안전하게 처리됨으로서 댐의 안전에 직접적인 영향을 미치는 것은 아니다. 댐

의 기초부에 0.5g의 높은 지진가속도를 미치는 강진의 경우에도 동역학적 분석에 의하면 댐 상류부 변형량은 거의 모든 댐지점에서 50cm 미만인 것으로 계산되고 있다.

3. 최신 댐 내진 기술 동향

본 절에서는 상기 사례들에 기초하여 최근 국제적으로 저명한 일련의 Conference (15th World Conference on Earthquake Engineering 2012, ICOLD 일본 연차회의 2012, 미국 ASCE GeoCongress 2013)에서 발표되고 논의된 최신 내진 기술동향들을 거시적으로 파악하고 요약하여 제시하였다. 또한 향후 국내 내진기술을 선진화하기 위해 필요한 요소들을 이러한 해외 기술동향 분석작업을 통해 규명해 보고 국내 내진성능평가 연구개발이 향후 나아가야 할 전략적 시사점들을 고찰하였다.

3.1 제15차 국제 지진공학 컨퍼런스 (2012) 연구동향

광범위한 내용의 최신 연구개발 논문들이 2012년 9월 24일부터 28일까지 포르투갈 리스본에서 개최된 국제 지진공학회 컨퍼런스에서 소개되었다. 필댐의 수치해석을 이용한 내진평가 부분에서는 우선 흙댐에 대한 내진 해석 기법이 정교화되고 고도화되는 추세에 있음을 확인하였다. 또 하나의 트렌드로 CFRD에 대한 세계적인 시공량 증가로 내진 해석 기술 역시 정교화 추세에 있다는 점이다. 따라서 단순한 정적 사면안정해석 이외의 동해석 기술, 콘크리트 차수벽에 대한 변형 및 응력특성 연구가 필요하다 하겠다.

콘크리트댐의 내진해석시 댐-저수지-기초의 상호작용을 고려한 향상된 해석기법의 적용사례가 증가 추세에 있음을 파악하였다. 이는 상대적으로 새로운 기술로서 국내 전문가가 많지 않아, 향후 연구개발이 필요한 부분일 것으로 판단된다. RCC 댐의 내진해석 기술 또한 발전

하는 추세여서 비선형 지진응답 해석 등 내진성능평가 기술의 전반적인 향상을 주목할만 하였다.

3.2 ICOLD 일본 연차회의 동향분석

2012년 6월 5일, ICOLD (국제 대담회) 연차회의가 일본 Kyoto에서 열렸으며, International Symposium on Dams for a Changing World라는 주제를 중심으로, Tohoku 지진으로 인한 댐 조사결과가 상당수 진전을 보인 상태여서 다양한 댐 내진분야 관련 논문들이 발표되었다.

특히 논문 내용중에 Tanaka et al. (2012)은 지진으로 인한 후지누마 댐의 붕괴에 대해 결과적으로 평상시 점검에서 이상징후가 발견되지 않았더라도, Tohoku 지진과 같은 강진과 긴 지속시간을 겪는다면, 건설 재료와 다짐 정도에 따라서 붕괴 가능성이 여전히 존재함을 확인할 수 있었다.

ICOLD 연차회의 (2012) 논문 자료를 분석한 결과, 국내 연구에 있어 다양한 시사점을 제시하고 있었다. 우선 외국의 최신 연구와 기술력을 반영한 다변화되고 향상된 기법을 적용한 수치해석 내진성능평가가 필요함을 알 수 있었다. 예를 들어, 기존에는 일본의 실 지진파 또는 인공지진파만을 입력 지진파로 활용하였으나, 향후 입력 지진파형의 다변화 및 수치해석시 민감도 분석도 추가할 필요가 있으며, 지진 후 안정성 측면에서 현재는 동해석시 지진동 지속시간 동안만 댐체 거동 해석을 수행하나, 지진동이 종료된 후 간극수압 소산에 따른 지진 후 댐체 안정성 연구도 향후 필요할 것이다. 또한 기존의 안전성 평가는 내진성능평가 규정의 개정에 따라 지진가속도 및 해석방법을 달리하여 검토하고 있으나, 향후에는 특정 댐체의 지진 저항능력의 가속도별, 해석방법별 성능한계를 종합적으로 검토하는 연구가 필요하다.

해외의 연구개발은 특별히 수치해석의 제한사항을 보완



할 수 있도록 최신편 물리모델 실증 실험(Physical Modeling) 연구를 병행하는 사례가 많았다. 물리모델 실험(Physical Modeling)은 최근 해외 연구사례를 반영하여 수치해석 모델의 한계를 극복할 수 있는 최신 토목시험시설, 대형 원심모형시험기 등을 이용한 댐체 취약부 안정성 및 내진 실증실험 등의 분야에 필요할 것으로 사료된다.

3.3 ASCE GeoCongress 컨퍼런스 (2013) 연구 동향

2013년 미국 토목학회(ASCE)의 Geo-Institute에서 개최하는 Annual Geo-Congress가 3월 3일부터 7일까지 캘리포니아의 San Diego에서 열렸다. 주목할 만한 점은 성능기반의 설계 (PBD; Performance based design)가 허용 변위 기준에 기초하며 점점 더 지반 지진공학에 실무적으로 적용되고 있다는 사실이다. 특별히 지진하중 아래 액상화에 취약한 기초를 가진 필댐에 대한 보수보강 계획을 수립할 때에 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 성능기반의 설계에 있어 두 가지 중요한 필요조건이 있는데, 바로 허용가능한 성능 기준과 신뢰할만한 해석 기법이 그것이다. 현재까지 필댐에 있어 허용가능한 성능기준은 주로 댐마루에서의 허용 변위량이었다. 댐 사면의 안전성에 있어 댐마루 침하량에 대한 기준은 충분한 여유고를 확보하는 데에 절대적으로 중요하다. 상대적으로 큰 댐마루 침하량이 활용가능한 여유고를 고려할 때 받아들일 수 있는 수준이더라도, 큰 침하량은 댐체 응력과 변형율을 유발하여 필터나 코어 또는 보조적인 매수 시스템과 같은 내부 구조물에 어떠한 작용을 할 수도 있다. 만족할만한 성능은 오직 해석 결과의 전체적인 스펙트럼에 기초하여 판단되어야만 한다.

비선형해석은 흙이 강진 하에서 비선형적으로 거동하기 때문에 필수적이다. 만약 지진으로 인한 간극수압이 상당하다면 해석은 유효응력으로 수행되어야 한다. 비선형

유효응력 동해석은 많은 형태를 띠고 있으며, 그것의 안전한 사용을 위해서는 선택한 구성 모델에 대한 온전한 기술적 이해를 필요로 하며, 어떻게 계산절차가 적용되는지에 대한 충분한 이해를 필요로 한다.

4. 결론 및 시사점

지진다발지역의 댐건설은 전세계적으로 상당히 많은 사례가 있으며, 전반적으로 강진에도 비교적 양호한 성능을 발휘하고 있다. 세계적으로 강진이 자주 발생하는 환태평양 지진대(페루, 칠레, 멕시코, 미국 캘리포니아, 일본 등)에도 대규모 댐을 건설·운영중에 있으며, 일본의 경우 연간지진발생 횟수가 우리나라의 약 16배 임에도 불구하고 석회암, 사암 및 세일층 위에 축조된 30여개 이상의 대규모댐을 운영중에 있다. 캘리포니아도 1,395개 댐을 건설·운영중에 있는 실정이다 (Earth Dam 1,000개, Gravity Dam 110개, Earth and Rockfill Dam 72개, 기타 213개).

그러나 지속적인 댐 내진안전성 연구개발이 필요한 것은 최근 주요 지진들이 과거와 다르게 많은 면에서 대댐에 영향을 미치는 복합적인 위험을 보여주고 있기 때문이다 (Wieland 2012). 즉,

- 댐, 부속 구조물과 설비, 기초에 진동을 일으키는 지반 진동
- 구조적 뒤틀림을 유발하는 주변의 강진시 활성화될 수 있는 주요 단층대 근처의 댐 기초부 불연속면이나 댐 기초에서의 단층 운동
- 저수지 물의 파동 또는 여유고 부족을 유발하는 저수지 하부 단층의 변위
- 수문, 여수로 피어 (균열), 옹벽 (전도), 발전소 (균열 및 관통), 기전 설비, 수압관, 조차장, 송전선로 등에 피해를 유발하는 암석 붕락
- 순간적인 충격파와 댐의 월류를 일으키는 대량 토괴의

저수지로의 이동 (산사태와 붕락)

- 강을 막고 산사태 댐과 호수를 형성시키는 대량 토괴의 이동, 붕괴시 하류부 유입식 발전소의 월류 또는 발전소 및 기전설비의 범람을 초래하게 됨
- 댐 부지 및 부속 구조물로의 접근로를 가로막는 대량 토괴의 이동
- 액상화 또는 지반의 조밀화로 인한 지반 변형과 침하로 댐 및 부속 구조물 등에 뒤틀림을 일으키는 것

위에 열거한 대부분의 위험은 2008년 중국 Wenchuan 지진과 2011년 일본 Tohoku 지진시 관찰된 현상들이었다.

결론적으로 지진시 댐 피해사례 조사 결과, 내진설계 개념이 포함된 댐의 지진 저항성은 우수한 편이나, 올바른 내진설계 및 성능평가 방법이 잘 정립된 경우에 한한다. 일부 댐 기능을 잃어버린 댐 붕괴사례의 경우, 액상화, 다짐불량, 활성단층의 존재 등 댐 본체에 대한 위험요인과 더불어 산사태 댐, 암반붕락 등 대규모 유동으로 인한 기능 손실 등 종합적인 지진 대응체계 확립이 중요한 개념임을 교훈으로 주고 있다. 실제 댐의 지진시 피해 사례들이 증명하듯이 이는 향후 내진관련 연구가 지속적으로 필요하다는 것을 보여준다.

대부분의 댐 형식에서 댐 기초부(footprint) 단층대의 움직임은 가장 중요한 지진 위험 요소이다. 만약 다른 부지를 선정할 수 없다면 Wieland(2012)는 보수적으로 중심 코어형 락필댐(earth core rockfill dam)으로 설계하는 것이 유일한 해답이라고 하였다.

ICOLD 내진분과 위원회에서 추천하는 필댐에서 사용성에 기반한 최근 내진 안전 기준은 (1) 여유고 손실, 다시 말해 지진 후 저수지 수위는 댐의 불투수 코어 상단 아래여야 한다. (2) 내적 침식(internal erosion), 즉 지진 후 최소한 필터와 트랜지션 존 초기 두께의 최소한 50%는 유지되어야 한다. (3) (간극수압의 축적과 댐 제체 재료의 잔류강도정수를 고려한) 사면의 활동에 대한 안전율은 지진 후 1보다는 커야 한다.

현재 국내 댐 내진 안전성 평가 연구는 최근 발생한 지진시 댐 거동사례와 ICOLD 등 연구성과들을 적극 반영하여 다음과 같은 사항들에 대한 인식과 반영이 필요하다고 하겠다.

- 현대적 방식으로 설계 축조된 다짐식 필댐은 강진에서도 매우 양호한 내진 성능을 보여주고 있으나, 낮은 지진대에서 보통 지진대 지역에서조차 지진하중의 사례는 대부분 임계하중(critical load)으로 변화해 오고 있으며, 이에 대한 기존 대댐들의 내진 안전성 재평가가 필요하다.
- 내진설계 기준과 설계 개념의 변화로 인해 대댐의 긴 경제적 생애주기 동안 여러차례의 내진 안정성 검토를 수행할 필요가 있다.
- 강한 지반진동시 대댐의 거동에 대한 우리의 지식 수준은 아직도 매우 제한되어 있다.
- 댐에 영향을 미치는 각각의 파괴적인 지진은 새로운 특징을 보여주고 있으며, 그 특성들은 최근까지도 많이 간과되어 왔으며, 지속적인 연구개발이 필요하다.

〈참고문헌〉

- 1) 한국수자원학회 (2011). 댐설계기준.
- 2) Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G. (2005). "Geotechnical Engineering of Dams." CRC Press.
- 3) Hinks, J., Wieland, M., and Matsumoto, N. (2012). "Seismic behaviour of dams." International Symposium on Dams for a Changing World Kyoto, Japan.
- 4) ICOLD (2010). Selecting seismic parameters for large dams, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams, Paris.
- 5) JCOLD (Sakamoto, T.). (2012). "Fujinuma-ike 붕괴 원인에 관한 고찰 보고서."



- 6) Matsumoto, N. (2012). "Seismic performance and analysis of dams in Japan." The 6th International Conference for Safety of Infrastructure, Korea Infrastructure Safety Corporation, Seoul, Korea.
- 7) Pradel, D., Wartman, J., Tiwari, B. (2013), "Failure of the Fujinuma Dams during the 2011 Tohoku Earthquake." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 - 7, San Diego, California
- 8) Seed, H. B. (1979). "Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams." *Geotechnique*, 29(3), 215-263.
- 9) Seed, H. B., Makdisi, F. I., and De Alba, P. (1978). "Performance of earth dams during earthquakes." *Journal of Geotechnical Engineering*, 104(GT7), 967-994.
- 10) Shannon, D. A. (2009). "Dam Damage: Evaluating and Learning from the Wenchuan Earthquake's Impact to China's Dams." *TCLÉE 2009*, 1-12.
- 11) Swaisgood, J. R. (2003). "Embankment dam deformations caused by earthquakes," *Proc., 2003 Pacific Conference on Earthquake Eng., Christchurch, New Zealand.*
- 12) Tanaka, T., Tatsuoka, F., Mohri, Y., (2012) "Earthquake induced failure of Fujinuma dam" International Symposium on Dams for a Changing World, June 5, Kyoto, Japan, ICOLDVrymoed, J. (1981). "Dynamic FEM model of Oroville dam." *Journal of Geotechnical Engineering*, 107(8), 1057-1077.
- 13) Wen, S., and Zhang, W. (2012). "Study on Mianyang city reservoir's seismic damage phenomena and crack occurrence mechanism in the Wenchuan earthquake." International Symposium on Dams for a Changing World, ICOLD Annual Meeting, Kyoto, Japan.
- 14) Wieland, M. (2012). "Seismic design and performance criteria for large storage dams." 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- 15) Yu, L., Kong, X., and Xu, B. (2012). "Seismic response characteristics of earth and rockfill dams." The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.
- 16) Zhang, C. H., Xu, Y. J., Lin, S., Wu, M. X., and He, C. H. (2012). "The performance of high dams in Wenchuan 5-12 Earthquake and follow-up analysis of the Shapai Arch dam during the event." The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal.