

## 강진에 의한 댐 피해사례 및 댐 내진설계기준 동향



신동훈  
한국수자원공사 K-water연구원, 기반시설연구소장  
uwshin@yahoo.com



박동순  
한국수자원공사 K-water연구원, 선임연구원

### 1. 들어가는 말

지난 해 3월 11일 일본 동북부 지역에서 발생한 Tohoku 지진은 규모 9.0의 강진(strong earthquake)으로, 발생 직후 부터 기록적인 쓰나미로 인한 피해와 후쿠시마 원자력발전소 사고 소식 등이 전세계에 실시간으로 전해져 큰 충격을 주었다. 이번 지진으로 일본은 인명피해(사망=최소 15,703명, 실종=4,647명, 부상=5,314명, 이재민=130,927명), 시설피해(건물 손상 및 붕괴=332,395, 도로=2,126, 교량=56, 철도=26개소 등) 및 경제적 피해(총액=약3,090억달러=일본 GDP의 약 1/15)를 입은 것으로 알려졌다.

댐 분야에 있어서 흥미로운 것은 이번 Tohoku 지진이 1900년 이후 지진으로는 역대 4위에 해당하는 대형 지진이었고 수많은 중요 시설물이 붕괴되었음에도 불구하고 댐 구조물은 농업용댐 1개소가 붕괴되었을 뿐(8명 사망) 나머지 댐들은 손상조차 발생하지 않았거나 부분적인 보수보강이 가능한 정도의 경미한 손상에 그쳤다는 사실이다. 물론 일본 정부에서는 지진발생 직후 긴급점검을 실시한 후 하류지역의 안전을 위하여 손상이 확인된 댐들에 대해서는 저수위를 저하시키는 등의 긴급조치를 취하였을 뿐이다. 인접국가인 우리나라에는 진앙지로부터 충분히 먼 거리에 있기에 Tohoku 지진에 의해 직접적인 피해가 발생하지는 않았다. 그러나 이번 지진을 계기로

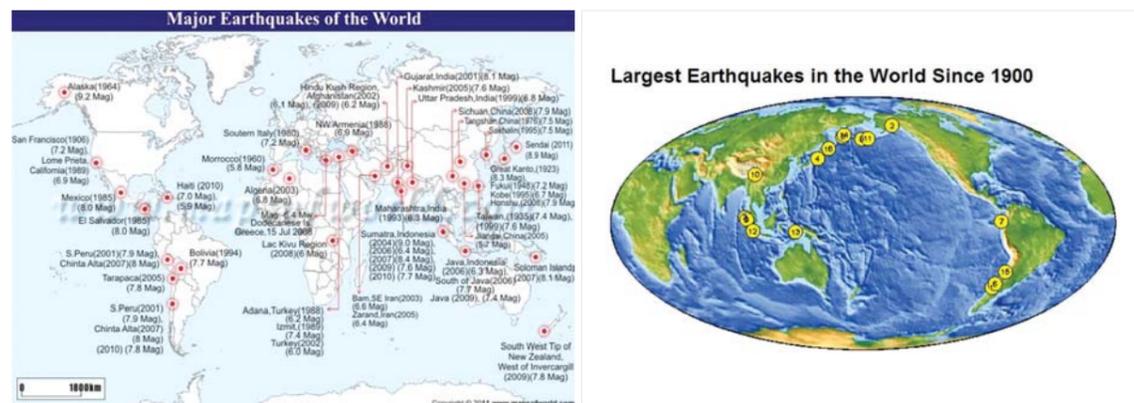


그림-1 1900년 이후 대지진 발생 현황(USGS자료)

표-1. 1900년 이후 대지진 발생 현황

순위	국가	발생지역	날짜(UTC)	규모	비고
1	칠레	Valdivia	1960.05.22	9.5	
2	미국	Prince William Sound	1964.03.28	9.2	
3	인도네시아	北Sumatra 서해연안	2004.12.26	9.1	
4	일본	일본 동북부 해역	2011.03.11	9.0	
5	러시아	Kamchatka	1952.11.04	9.0	
6	칠레	Maule 해안	2010.02.27	8.8	
7	에콰도르	Ecuador 연안	1906.01.31	8.8	
8	미국	Rat 열도	1965.02.04	8.7	
9	인도네시아	北Sumatra	2005.03.28	8.6	
10	중국	Assam (티벳)	1950.08.15	8.6	
11	미국	Andranof 열도	1957.03.09	8.6	
12	인도네시아	南Sumatra	2007.09.12	8.5	
13	인도네시아	Banda해	1938.02.01	8.5	
14	러시아	Kamchatka	1923.02.03	8.5	
15	칠레	칠레-아르헨티나 국경	1922.11.11	8.5	
16	러시아	Kuril 열도	1963.10.13	8.5	

백두산 분화가능성, 대지진의 발생 가능성 및 그로 인한 국가 전반에 미치는 영향에 대한 우려가 커진 것으로 보인다. 일부 관련 기준이나 대응체계 등에 대해서 재검토가 필요하다는 사회적 공감대가 형성되고 있다.

해 기록으로는 BC780년 중국 Xian 서부 지역에서 발생한 지진, AD79년 이탈리아 Vesuvius 화산폭발 이전의 지진, 180,000명이 사망한 893년 인도에서 발생한 지진 등이 있으나 지진규모가 어느 정도였는지는 추정만 할 뿐 정확히 알 수 없다.

이에 본 논문에서는 전세계의 강진 발생현황, 비교적 최근에 발생한 Chi-Chi 지진(1999), Wenchuan 지진(2008)과 Tohoku 지진(2011)시 댐 시설물의 손상 발생현황 등을 살펴보고, 국내외의 관련 기준 동향 등을 고찰함으로써 국내 댐기술자들이 향후 우리나라 댐에 대한 내진안정성 확보와 지진재해 대응체계를 개선하는데 참고할 수 있도록 하였다.

지진동을 감지하여 기록하는 근대적 지진계(seismometer)는 1880년에 John Milne에 의해 발명되었으나 지진관측은 1900년대에 들어서서 본격화되었으며, 1900년 이후의 강진 발생현황은 그림-1 및 표-1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 대부분의 강진은 불의 고리(ring of fire)로 알려져 있는 환태평양 지진대에서 집중적으로 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 2. 강진(strong earthquake) 발생 현황 (1900년 이후)

Kramer(1996)에 따르면 최초의 신뢰할만한 지진피

한편, 최근 20여년(1990-2011년) 사이의 대지진 발생 현황을 요약하면 표-2와 같다.

기록상으로 지진규모가 가장 큰 것은 1960년 칠레의

표-2. 1990~2011년 사이의 대지진 발생 현황

년도	날짜	규모	사망자(명)	발생지역	비고
2011	03.11	9.0	28,050	일본 동북부 해역	Fujinuma댐 붕괴
2010	02.27	8.8	507	칠레 Maule해역	
2009	09.29	8.1	192	Samoa 열도 지역	
2008	05.12	7.9	87,587	중국 Sichuan	Zipingpu댐 손상
2007	09.12	8.5	28	인도네시아 南Sumatra	
2006	11.15	8.3	0	Kiril열도	
2005	03.28	8.6	1,313	인도네시아 北Sumatra	
2004	12.26	9.1	227,893	北Sumatra 서부해역	
2003	09.25	8.3	0	일본 Hokkaido	
2002	11.03	7.9	0	알래스카 중부	
2001	06.23	8.4	138	페루 인근해안	
2000	11.16	8.0	2	P.N.G의 뉴아일랜드 지역	
1999	09.20	7.7	2,297	대만 Chi-Chi	Shih-kang댐 붕괴
1998	03.25	8.1	0	Balleny열도	
1997	12.05	7.8	0	Kamchatka 동부연안	
1997	10.14	7.8	0	Fiji열도 남부	
1996	02.17	8.2	166	인도네시아 Irian Jaya지역	
1995	10.09	8.0	49	멕시코 Jalisco 인근해역	
1995	07.30	8.0	3	칠레 북부 해안지역	
1994	10.04	8.3	11	Kuril열도	
1993	08.08	7.8	0	Mariana열도 남부	
1992	12.12	7.8	2,519	인도네시아 Flores지역	
1991	12.22	7.6	0	Kuril열도	
1991	04.22	7.6	75	Costa Rica	
1990	07.16	7.7	1,621	필리핀 Luzon지역	

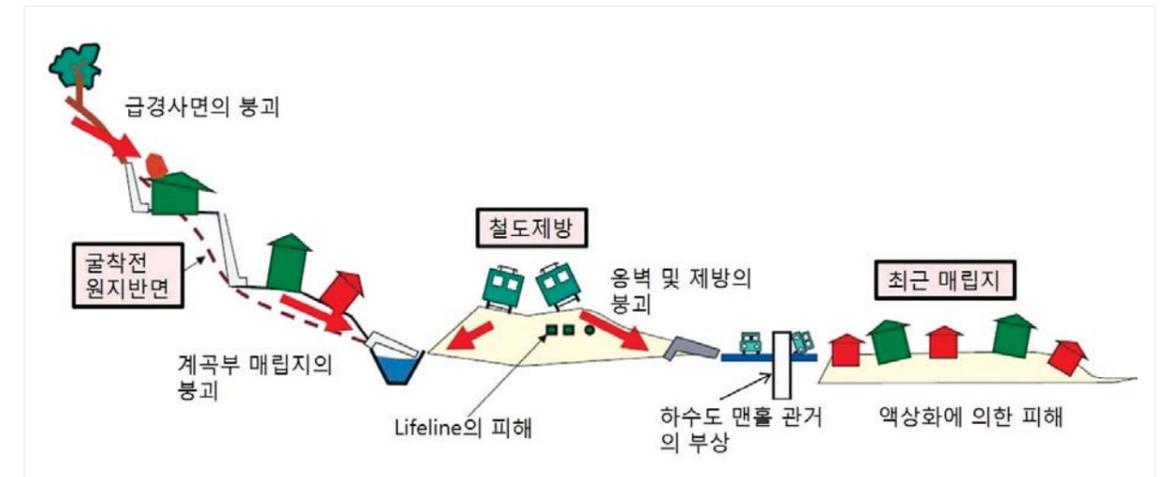
Valdivia에서 발생한 규모 9.5의 지진으로 1,655명이 사망하고 미화 5.5억달러의 재산피해가 발생하였다. 인명피해가 가장 컸던 지진은 1976년에 중국 Tangshan에서 발생한 규모 7.8의 지진으로, 242,419명이 사망했다.

3. 지진시 지반 및 구조물의 거동

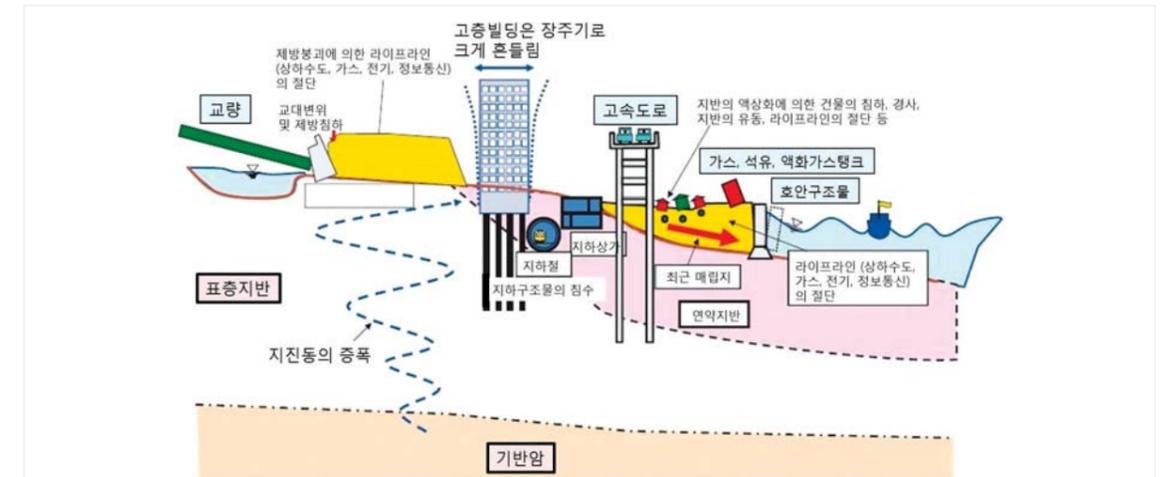
지진이 발생하면 땅속의 진원으로부터 지진파(seismic waves)가 사방으로 빠르게 퍼져나가 지표에 도달되어 진동(shaking)을 일으킨다. 이때의 지진동은 수초에서 수분 동안 지속되며, 여러 차례 반복되어 발생한다. 특정 지역에서의 진동의 세기와 지

속시간은 지진의 규모와 발생위치, 진동이 발생하는 지역의 지질 및 지형 특성 등에 따라 다르다. 실제로 2011년 3월에 일본 동북부 지역에서 발생한 Tohoku 지진의 경우 지속시간(지진에너지의 95%이상이 발휘되기까지 걸린 시간)은 최대 90-180초로서 매우 오랜 시간 동안 지속되었고, 여진의 누적횟수(M)5.0)도 300회 이상 발생하는 특이한 지역적 특성을 나타내었다.

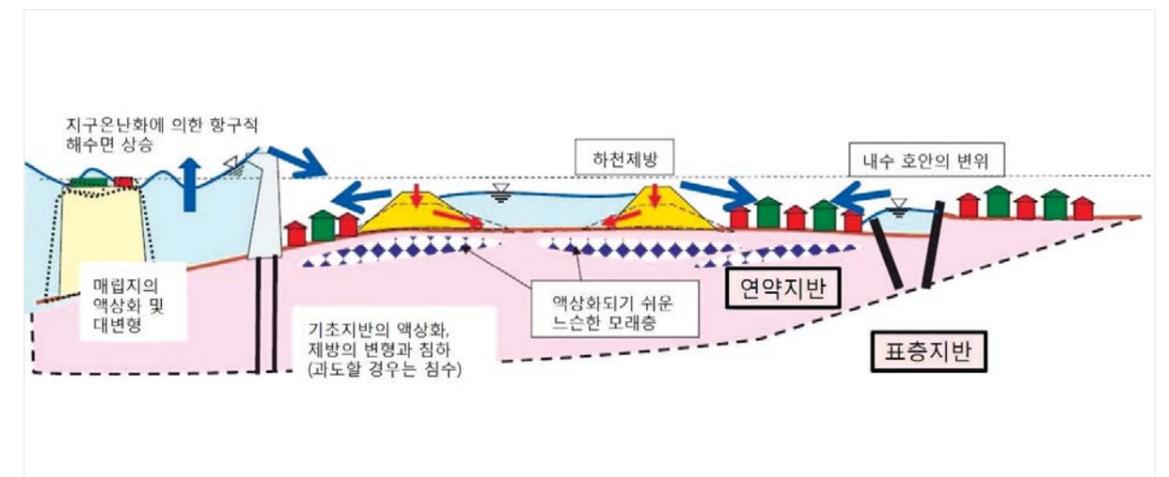
지진시 구조물의 거동은 지진동의 특성, 구조물 자체의 진동특성, 구조물 하부 지반의 동적특성 등에 의해 영향을 받으며, 주요 거동 및 피해유형을 개념적으로 나타내면 그림-2와 같다.



(a) 내륙지역



(b) 도심지 및 연안지역



(a) 내륙지역

그림-1 지진시 지반 및 구조물 피해 유형(일본지반공학회, 2011)



(a) 지진 직후의 붕괴된 모습



(a) 지진 직후의 붕괴된 모습

그림-2 Shih-Kang 댐

#### 4. 강진에 의한 댐 피해 사례

##### 4.1 Chi-Chi 지진 (대만)

1999년 9월 21일 01:47에 발생한 Chi-Chi 지진(또는 '921 지진'으로 불리움)은 진원이 지표로부터 불과 6.99km 깊이인 천발지진으로 규모는 M=7.6으로서 2,415명의 사망자와 1,305명의 부상자가 발생하였고, 수많은 시설물 파괴 등으로 인해 약 100억달러의 피해가 발생하였다.

Shih-Kang(石岡)댐은 높이 21.4m, 길이 357m, 저수용량 338만톤, 용수전용의 중력식 콘크리트댐으로 18개의 수문형 여수로 구조물이다. 이 댐은 지진에 의해 붕괴된 최초의 댐이며, 지진이 발생한 주단층(main fault) Che-Lung-Pu 단층으로부터 불과 약 300m 떨어진 위치에 있었다. 단층작용에 의해 Shih-Kang댐은 우안측(수문 16번~18번)이 약 2m, 나머지 우안측 댐체가 약 11m 상승하여 결과적으로 수직방향으로 9m의 단차와 수평방향으로 약 7m의

이격이 발생하면서 댐체가 절단되는 사고가 발생하였다. 그러나 Shih-Kang댐은 댐체의 변위와 손상이 매우 매우 컷으나 엄밀한 의미의 댐붕괴(저수지 물이 완전히 빠져나갈 정도의 붕괴)는 아니었다. 왜냐하면 상류측의 지형적 조건, 탈락한 수문 및 주저앉은 피어 등이 물이 빠져나가는 것을 막아 방류량이 약 100~200 CMS에 불과하였기 때문이다.

##### 4.2 Wenchuan 지진 (중국)

쓰촨성(Sichuan)지진으로도 불리고 있는 Wenchuan 지진은 2008년 5월 12일에 발생한 Richter 규모 7.9의 대형지진으로 69,187명이 사망하고, 480만명이 집을 잃었다. 중국 정부에서는 그 지진 이후 3년간 1,465억달러의 재건비를 투입하기로 한 바 있다. ([http://en.wikipedia.org/wiki/2008\\_Sichuan\\_earthquake](http://en.wikipedia.org/wiki/2008_Sichuan_earthquake))

Wenchuan 지진에 의해 1,803개의 콘크리트 및 필댐, 저수지, 403개의 수력발전설비가 피해를 입었다.(Wieland, 2010) 높이 100m 이상의 대댐(large dam)은 총 4개만이 피해를 입은 것으로 보고되었다(콘크리트댐 2개소, 중앙심벽형 댐 1개소 및 CFRD 댐 1개소). 그러나 콘크리트댐의 경우에는 손상은 균열 또는 이음부 열림 등 뿐이었다. 현대적 방법으로 시공된 필댐의 경우에 손상도 주로 댐마루의 변형과 균열 등이었지 붕괴에 이른 것은 없었다.

Zipingpu 댐은 Min강에 홍수조절, 용수공급 및 수력발전의 목적으로 건설(건설기간:2001~2006)된 높이 156m, 댐마루길이 663m, 총저수용량 11.2억톤의 CFRD 댐으로서 진양지로부터 17km 떨어져 있고, 진도 VIII(설계 최대지진가속도 0.26g, 100년에 2%의 초과확률)로 설계되었다. 2008년 5월 12일에 댐 지점에서의 진도는 IX~X로서 설계진도를 크게 초과한 것으로 보고되었다.

Zipingpu 댐은 당시 강한 지진동에 의해 피해를 입었으나 전체적으로 보아 안정한 상태를 유지하고 있다. 댐체 피해의 내용은 그림-3과 같이 콘크리트 슬라브의 압출과 겹침, 댐마루 구조물의 부분적 파손, 하류



(a) 콘크리트 슬라브의 압출 (b) 콘크리트 슬라브의 겹침 (c) 하류 사면의 느슨해짐 (d) 댐마루 구조물의 손상

그림-3 Zipingpu 댐의 피해 유형 (Yan-Fen Wen 등, 2011)

사면의 부분적 느슨해짐, 80~90cm의 댐마루 침하(댐높이의 약 0.6%), 누수량의 일시적 증가 등이었으나 대부분 보수가 가능한 것들이었다.

##### 4.3 San Fernando 지진 (미국)

San Fernando 지진(일명 Sylmar 지진)은 미국 캘리

포니아주 San Fernando 계곡지역에서 1971년 2월 9일에 규모 M=6.6의 크기로 발생하여 약 60초간 지속되었다.

이 지진으로 65명이 사망하였고, Lower Van Norman 댐, 병원, 학교 등이 붕괴 또는 손상되었고, 곳곳에서 산사태 등이 발생하여 약 5억달러의 재산 피해가 발생하였다.



Lower Van Norman 댐은 그림-4와 같이 물다짐(hydraulic fill)공법으로 축조된 댐이었으며, 지진동에 의해 댐체 내부에서 액상화가 발생하면서 댐마루를 포함한 사면활동이 상류측으로 발생하여 댐높이가 약 6m 정도 낮아졌으나 다행히 완전붕괴에 이르지 않았다.

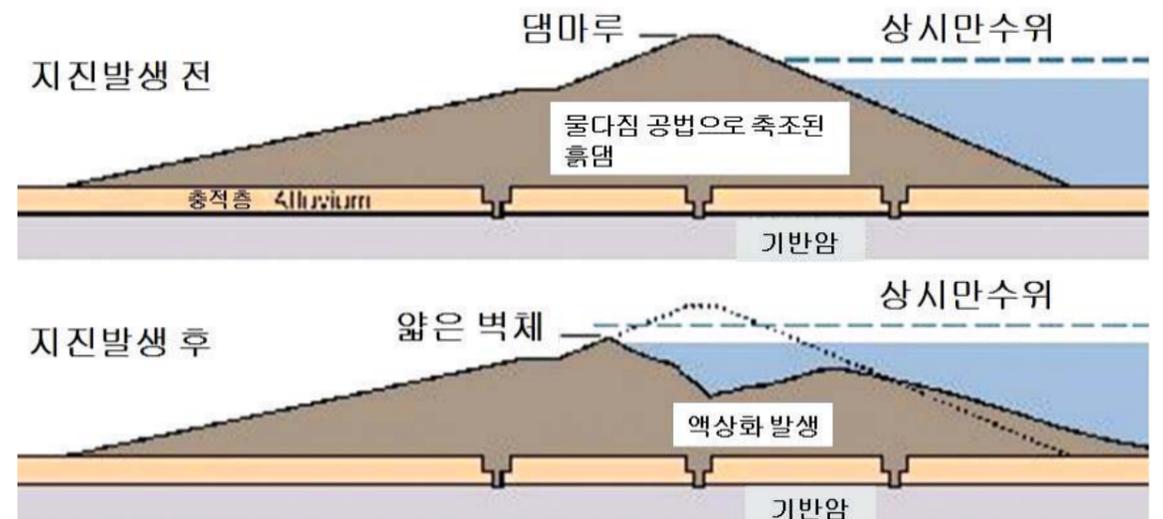
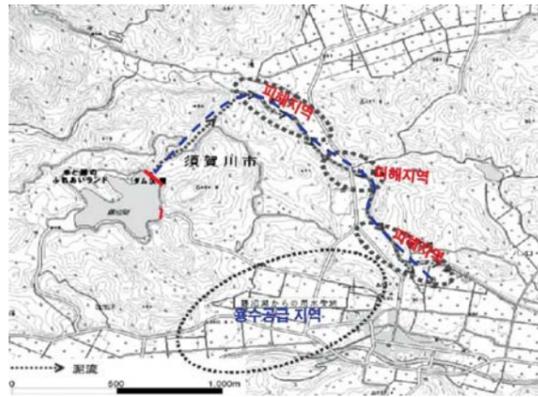


그림-4 San Fernando 지진시 액상화에 의해 붕괴된 Lower Van Norman 댐

#### 4.4 Tohoku지진 (일본)

Tohoku지진은 2011년 3월 11일 14:46 Sendai로부터 131km 떨어진 태평양 연안에서 발생한 규모 M=9.0의 대지진이다. 이 지진으로 394,583 개의 건물이 전부 또는 일부 파괴된 것으로 보고되었으며, Iwate현의 해안지역에서는 최대높이 40.5m에 이르고, Sendai지역에서는 내륙으로 10km 까지 도달하는 사상 초유의 대형 쓰나미가 밀어닥쳐 피해가 더욱 가중되었다.

지진동 관측결과, 지진동은 매우 길게 지속되었고, 최대지반가속도는 2,933gal(Miyagi현의 관측소)로 Kobe지진시 측정된 최대지반가속도의 약 3.5배였으



며, M>6.0이상의 여진이 96회, M>7.0이상의 여진이 6회 발생하였다.

한편, 지진발생 직후 부터 약 400여개 댐에 대해 안전도 조사가 이루어져, 대부분 경미한 손상(소규모 사면활동, 콘크리트 탈락, 약간의 균열 등)만 입고 긴급복구 공사가 이루어졌으나 Fukushima현에 있는 Fujinuma댐(농업용댐)은 완전히 붕괴되었고, 8명의 사망자도 발생하였다. 한편, 약 50개의 댐에서 관측된 최대지반가속도(PGA)의 크기는 0.02~ 0.3g로 보고되었다.

이 지진에 의해 붕괴된 Fujinuma댐(그림-5)은 1949년 완공된 농업용 흙댐으로서 높이 18.5m, 길이 133m, 댐마루폭은 6m, 저수용량은 150만톤, 자유유후형 여수로를 갖춘 노후된 댐이었다. 진앙지로부터는 약 240km, 단층으로부터의 최단거리는 약 80km이었다. 붕괴원인은 (1) 댐마루에서의 최대지반가속도 442gal, 50gal 이상의 지진동이 100초 이상 지속, (2) 다짐불량(현대적 축조기술 미적용) 및 댐체 상부가 모래질이 포함된 흙재료로 축조되어 있었다는 점 등으로 밝혀졌다.

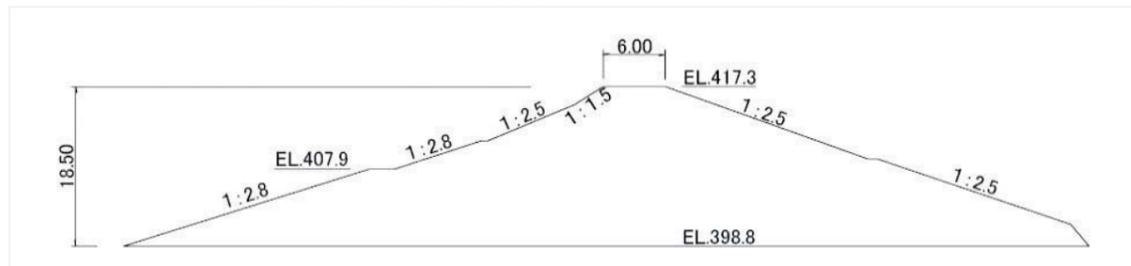


그림-5 Tohoku지진시 붕괴된 Fujinuma댐 (Matsumoto, 2012)

#### 5. 댐의 내진설계기준 동향

인류가 구조물을 건설해온 지는 수 천년 이상 경과되었으나, 이론적 근거를 토대로 내진설계를 하기 시작한 것은 불과 100년이 채 안 된다. 재미있는 것은 내진설계 개념이 도입된 최초의 구조물이 댐이었다는 것이다. 즉, 1923년, 1925년에 일본의 Mononobe박사와 Okabe박사 등이 콘크리트댐 설계에 등가정적하중을 고려하기 위하여 지진계수를 도입한 것(진도법)이 전세계 내진설계의 시초라고 할 수 있다. 그 이후 지진에 대한 이해, 구조물의 응답에 대한 연구, 컴퓨터의 출현 이후 수치해석 기술이 현저하게 발달하면서 지진동 및 댐구조물의 비선형적 동적 응답거동까지 정밀하게 해석할 수 있는 기술들이 등장하면서 동적해석이 이루어지기 시작했으며, 그에 따라서 내진설계기준도 점점 세분화되고 고도화되어 왔다고 할 수 있다.

ICOLD의 내진기술위원회 위원장인 M. Wieland 박사는 Chi-Chi지진 및 Wenchuan지진, Tohoku지진시 댐 구조물의 피해내용에 대한 면밀한 고찰을 근거로 앞으로 댐의 안전 또는 내진성을 확보하기 위해서는 댐 기초부 및 저수지 단층대의 이동, 암반 붕락, 산사태, 산사태로 인한 댐들, 액상화, 저수지에서의 물의 파동 등 복합적인 위험요소들에 대한 심층적 고려가 필요함을 지적하였다. 그가 지적한 주요 지진이 대댐에 영향을 미치는 복합적인 위험들(Multi-Hazard)은 다음과 같다.

- 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 등

- 에 피해를 유발하는 암석 붕락
- 순간적인 충격파와 댐의 유후를 일으키는 대량 토괴의 저수지로의 이동 (산사태와 붕락)
- 강을 막고 산사태 댐과 호수를 형성시키는 대량 토괴의 이동, 붕괴시 하류부 유입식 발전소의 유후 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

한편, ICOLD(2010)에 따르면 댐체와 안전에 관련된 시설물과 구조물들에 대한 내진성능기준을 다음과 같이 권고하고 있다.

- 댐 본체 OBE(기능기반지진): 댐의 운영에 영향을 주는 구조적인 피해 (균열, 변형, 누수 등) 혹은 저수지가 허용할 수 있는 수준을 넘어서는 피해가 없어야 함.
- 댐 본체 SEE(안전성평가지진): 댐의 안전이 보장되는 한 구조적 피해 (균열, 변형, 누수 등)는 허용이 되지만, 댐 하류 지역에 홍수를 일으킬 수 있는 저수지 물의 통제 불가능한 대량 방출은 없어야 함
- 안전 관련 시설물과 구조물 (safety-relevant components and equipment) OBE: 이 구조물과 시설물들은 OBE 동안과 후에도 온전한 기능이 보장되어야 하며, 뒤틀림은 허용되지 않음
- 안전 관련 구조물 및 시설물 SEE: 구조물과 시설물의 적절한 기능에 영향을 주지 않는다면 경미한 뒤틀림이 허용됨

성능기준은 SEE의 정의와 연결되어 있다. 예를 들어 사면 활동에 대한 안전율이 1.0보다 큰 조건이 재현 주기 2500년에 해당하는 SEE에 대해 필요하거나 (독일), 재현주기 5000년에 상응하는 SEE에 대해 콘크리트 댐의 수문(water stops)이 피해를 입지 않아야 한다 (중국). 이러한 조건들은 ICOLD (2010)에서 제시된 것보다 더 엄격한 것이며, 이는 특히 최대 지

진 지반운동 파라미터들이 이미 재현주기 10,000년 이내 이벤트들에 도달한 높은 지진대 지역에서 적용되었다.

안전에 관련된 구조물 및 시설물은 하부 방류부(outlets)와 여수로, 그리고 모든 관련된 설비(주로 수문), 조작 패널, 전원 공급장치, 소프트웨어 등이며, SEE 지진 이후 저수지 수위를 낮추고 조절이 가능하여야 한다. 피해를 입은 댐의 보수는 어느 정도 시간이 필요하기 때문에 지진 후에도 보통 재현주기 약 200년 빈도 홍수량이 안전하게 여전히 방류될 수 있어야 한다.

이 조건은 콘크리트 댐에는 보다 작은 문제가 되는데, 이는 극한 상황에서 제한된 정상부 월류가 허용되기 때문이다. 그러나 월류가 허용될 수 없는 필댐의 경우에는 지진 후에 콘크리트 댐보다 더 큰 홍수량에 대해 검토되어야 한다.

필댐에서 SEE 조건의 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 존의 초기 두께의 최소한 50%는 유지되어야 한다. (3) 간극수압의 축적과 댐 체체 재료의 잔류강도정수를 고려한 사면의 활동에 대한 안전율은 지진 후 1보다는 커야 한다.

두 번째 기준은 또한 댐 기초가 강진시 이동이 발생할 수 있는 단층대나 불연속면에 축조된 중심 코어형 락필댐에 적용한다. 더욱이 그러한 부지에서는 오직 보수적으로 설계된 중심 코어형 락필댐만 축조되어야 한다.

한편, 우리나라에서는 1993년 댐에 대한 내진설계기준이 제정된 이래로 2001, 2005년 개정에 이어 2011년 말에 부분적 개정이 이루어졌으며, 최근 개정내용

은 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 위한 충분한 안전율의 확보되어야 한다.
- ③ 이 기준에 따르지 않더라도 창의력을 발휘하여 보다 발전된 설계를 할 경우에는 이를 인정한다.

또한, 금번 내진설계기준에는 적용시설물에 댐의 부대시설물인 취수탑, 발전소, 댐 관리동, 수로터널 등을 말하며 이들 시설에 설치된 수문, 권양기, 현장조작반, 관리교, 전기 및 계측제어설비 등을 포함하고 있다. 그러나 2012년 말 현재까지 이들 부대시설물들에 대한 세부적인 내진성능평가 방법이 제시되거나 확립되어 있지 않아 당분간 해당 시설물 관리기관들은 어려움을 겪을 수밖에 없는 실정으로 이에 대한 연구개발이 시급하다.

## 6. 결론

전세계의 강진 발생현황, 비교적 최근에 발생한 Chi-Chi지진(1999), Wenchuan지진(2008)과 Tohoku지진(2011)시 댐 시설물의 손상 발생현황, 국내외의 관련 기준 동향 등에 대한 검토 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 2011년 Tohoku지진과 같은 초대형 지진(M=9.0)시에도 댐구조물은 댐 형식에 구분 없이 대부분 붕괴되지 않고 미미한 손상만 입었을 뿐 안전에 문제가 발생한 댐은 없었다.

- 지진에 의해 붕괴된 댐은 Chi-Chi지진에 의해 붕괴된 Shih-Kang댐이 최초이나 엄밀한 의미의 완전

붕괴(저수된 물이 완전히 배제되는 경우는) 아니며, Tohoku지진시 완전붕괴된 Fukushima댐은 높이 18.5m의 건설된지 70년이 경과한 노후된 낙후된 건설기술로 축조된 댐이고, 현대적인 기술을 바탕으로 내진설계되어 축조된 댐의 붕괴사례는 아직 없다.  
- 최근의 댐안전 개념은 댐 안전이 주로 구조적 안전에 관련되었으나, 오늘날 댐 안전은 구조적 안전성, 댐 안전의 모니터링, 기능수행의 안전성, 비상 대처 계획 등을 포괄하는 개념으로 변화되었다.

- 내진성능 확보를 위해서는 댐 기초부 및 저수지 단층대의 이동, 암반 붕락, 산사태, 산사태로 인한 댐

들, 액상화, 저수지에서의 물의 파동 등 복합적인 위험요소들에 대해 심층적으로 고려하는 추세임을 감안하여 관련분야의 연구개발을 확대할 필요가 있다.

- 다만, 내진설계기준이 점차 강화되고, 적용대상 시설물이 확대됨으로써 댐 시설물의 내진안전성은 물론 사회기반시설의 전반적 안전성이 향상되는 것은 바람직하겠으나 이들 기준을 만족시키기 위해서는 막대한 사회적 비용이 수반될 뿐만 아니라 높은 수준의 기술적 개발이 뒷받침되어야 하는 바, 향후 개정 및 보완시에는 이러한 현실을 감안하여 추진할 필요가 있다.

## 참고문헌

국토해양부(2011), 개정 댐설계기준 (제12장 내진설계)

Chen-Shan Kung, Wei-Pin Ni and Yun-Jen Chiang(2001), "Damage and Rehabilitation Work of Shih-Kang Dam", Seismic Fault-induced Failures, pp.33-48, January, 2001.

ICOLD (2010). Selecting seismic parameters for large dams. Guidelines, Revision of Bulletin 72, Committee on Seismic Aspects of Dam Design, International Commission on Large Dams, Paris.

Larry K. Nuss, Norihisa Matsumoto, and Kenneth D. Hansen(2012), "Shaken, but not stirred-earthquake performance of concrete dams", Proceedings of 2012 ICOLD(Innovative Dam and Levee Design and Construction)

Norihisa Matsumoto(2012), "Seismic performance and evaluation of dams in Japan," Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference for Safety of Infrastructure (Sustainable Infrastructure Maintenance: Present and Future), September 14, 2012.

Shiegeyuki Okada and Nobuo Takai(2000), "Classifications of Structural Types and Damage Patterns of Buildings for Earthquake Field Investigation," 12<sup>th</sup> WCEE, 2000.

Steven L. Kramer(1996), Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice-Hall Inc.

Wieland, M. (2012). "Seismic design and performance criteria for large storage dams," 15 WCEE (15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering), Sep. 24 - 28, Lisbon, Portugal.

Yan-Fen Wen, Jian-ming Zhao, Guo-bin Zhou and Jin-sheng Jia(2011), "Inspiration from '5.12 Seismic Damage of Zipingpu Dam for Aseismic Measures of CFRD," The Second International Symposium on Rockfill Dams, 2011.

日経コンストラクション(1998), 土木が遭遇した阪神大震災(被害現場が教える地震防災へのヒント).

2011 Committee for Geo-Hazards during Earthquakes and Mitigation Measures(2011), Geo-Hazards during Earthquakes and Mitigation Measures-Lessons and Recommendations from the 2011 Great East Japan Earthquake, Japanese Geotechnical Society.