

01

오로빌댐 여수로 붕괴위기와 복구현황

조성배 선임연구원 : K-water융합연구원
 신동훈 소장 : K-water융합연구원



1. 서론

2017년 2월 12일 미국 캘리포니아주 북부 오로빌댐(Oroville dam)에서는 갑작스런 폭우와 폭설로 유입량이 증가한데다가 댐에서 물을 방류하는 여수로에 커다란 손상이 생기면서 제 기능을 하지 못하면서 범람이 임박해졌다. 캘리포니아 주정부 수자원국(Department of Water Resources)은 이날 오후 하류지역 주민들에게 오로빌 북쪽 방향으로 이동하라는 긴급 대피령을 내렸다. 오로빌 시와 주변 지역에는 약 1만 6000명의 시민이 거주하고 있으며 댐하류 페더강(Feather River)을 따라 위치해 있는 유바카운티와 버트카운티에만 약 30만 명의 주민들이 살고 있었다. 이중 긴급대피 명령 대상이 된 주민 수는 약 180,000명에 달했다. 여수로 손상에도 불구하고 수문을 열고 지속적으로 방류를 하였으나 댐의 수위는 점점 상승하였고 비상여수로에서도 월류가 발생하였지만 다행히 댐 여수로 손상이 더 이상 진행되지 않았고 이를 후 강제 대피령이 해제되면서 우려하던 최악의 상황은 발생하지 않았다. 이번 오로빌댐의 범람위험은 방류 중 여수로 손상을 파악하면서 수위 조절에 실패하였고, 월류가 발생하면서 댐 붕괴까지 발생할 수 있는 전형적인 사례로 볼 수 있다.

본 기술기사에서는 오로빌댐이 범람위험까지 가는 상황

을 정리하여 그 원인을 분석하고 캘리포니아 수자원국의 대처, 복구상황 등을 검토하면서 댐 공학자들이 참고할 수 있는 중요 사례로 소개하고자 한다.

1. 오로빌댐 사고 및 복구 현황

가. 시설현황

오로빌댐은 캘리포니아 주 새크라멘토로부터 120km 북쪽에 있는 오로빌 지역의 페더강(Feather River) 동쪽에 위치하고 있으며, 1951년 캘리포니아 주정부의 수자원 프로젝트(California State Water Project; SWP)에 의해 제안되어 1961년에 건설을 시작하여 1968년에 공식적으로 댐 건설을 완료하였다.

오로빌댐은 다목적댐으로 높이 235m, 길이 2,109m 로 미국에서 가장 높은 댐이며 저수용량은 약 43.6억m³으로 소양강댐의 약 1.5배 수준이다. 8개의 수문으로 작동하는 여수로는 무려 915m의 길이를 갖고 있으며 그 외에도 폭 527m의 자연월류형 비상여수로를 갖추고 있다.

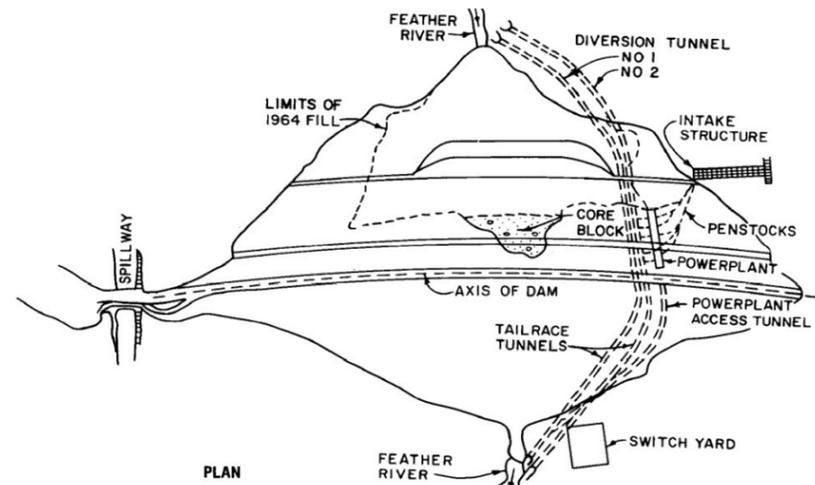
〈표 1〉 오로빌댐의 주요제원

건설목적	다목적댐(용수공급, 홍수조절, 전력생산, 레크레이션 등)
건설기간	1961 ~ 1968
소유자	캘리포니아 수자원국(DWR)
위치	캘리포니아주 Feather강 상류 새크라멘토에서 북쪽방향 약 120km 지역
댐형식	Zoned Earthfill (경사코어형 흙댐)
댐규모	높이 235m, 길이 2,109m, 댐마루폭 15.4m
저수용량	43.6억m ³ (소양강댐의 약 1.5배)
유역면적	9,340km ²
여수로	월류고 E, 248m, 방류능력 4,200m ³ /s, - 수문 8분 (5.4m×10.2m), 폭 55m, 길이 915m
비상여수로	자연월류형, 월류고 E, 283.5m, 방류능력 2,800m ³ /s 길이 527m - 콘크리트 웨어부 (최대높이 9m) 283.5m - 블록 및 광폭토사 웨어부 243.5m
발전소	Pumped-storage 타입의 지하발전소 - 발전용량 819MW, 연간발전량 1,490GWh - 유효낙차 211.5m, 최대방류능력 478m ³ /s

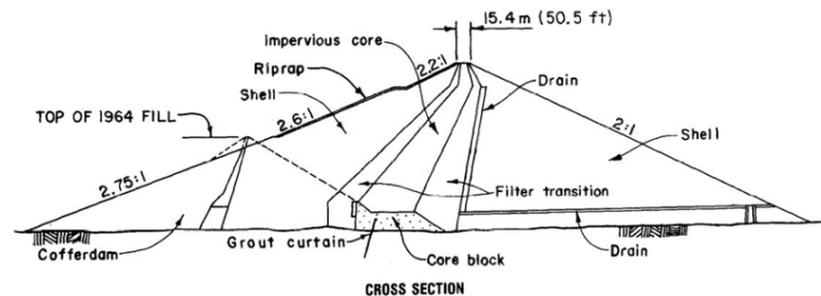


〈그림 1〉 오로빌댐 위치 (출처 : www.thesun.co.uk)

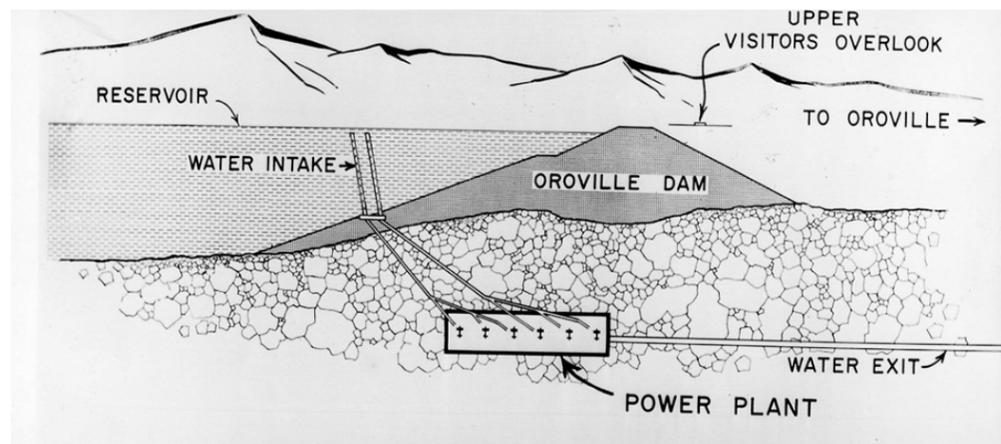
- 01. 오로빌댐 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하카 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때



〈그림 2〉 오로빌댐의 평면도



〈그림 3〉 오로빌댐의 대표단면도



〈그림 4〉 오로빌댐의 지하 발전소(Edward Hyatt powerplant)

나. 사고경위

먼저 이번 오로빌댐 사고는 캘리포니아 지역의 강우특성과 이상 집중호우, 그리고 따뜻한 기후로 인한 용설이 더해져서 급증한 유입량을 주원인으로 볼 수 있다. 오로빌 지역은 10월~5월까지 우기에 해당하며, 대부분의 강수량은 이때 확보된다. 그런데, 금년의 경우에는 2016년 10월~2017년 2월까지 집중강우가 내려 저수위가 급상승하였다(그림 6-7). 수위 상승으로 인하여 여수로 2월 7일 오전에 여수로의 수문을 열어 1415m³/s의 양으로 방류를 하던 중 여수로 바닥 콘크리트 파손을 발견하였으며, 그 이후의 발생경과를 정리하면 다음과 같다.(표 2)

〈표 2〉 오로빌댐 붕괴위험 사고 발생경위

발생일자	진행사항
2017. 2. 7.	<ul style="list-style-type: none"> · 이상 집중호우(2017.2.10이후 247mm) 및 용설에 따른 유입량과 저수위의 증가 · 여수로 수문방류 (1,415 m³/s) 중 여수로 바닥콘크리트 파손(공동) 발견 · 방류량 대폭 감소(141 m³/s)
2017. 2. 8 ~ 2017. 2. 9.	<ul style="list-style-type: none"> · 여수로 시험방류 (930 m³/s) 및 공동 상태점검 2회 · 2017.2.9. 19:00 최대유입량(5,393 m³/s) 발
2017. 2. 10 ~ 2017. 2. 11.	<ul style="list-style-type: none"> · 여수로 바닥 공동 확대 · 수문방류 재시작(1,800 m³/s → 1,600m³/s)
2017. 2. 11	<ul style="list-style-type: none"> · 수위상승에 따른 비상여수로 월류(최대 360m³/s) 시작(8:00), 36시간 동안 지속 · 1968년 댐 건설 이후 최초 비상여수로 월류
2017. 2. 12	<ul style="list-style-type: none"> · 댐 하류 3개 도시에 대해 강제대피령 발령 (16:30) 및 비상여수로 하류부 세굴방지를 위해 수문방류 증가 (18:00), 비상여수로 월류 중지 (20:00) ※ 최대 2,830 m³/s 방류
2017. 2. 13	<ul style="list-style-type: none"> · 긴급복구 시작(헬기, 덤프트럭 이용 사석 및 콘크리트 투입)
2017. 2. 14	<ul style="list-style-type: none"> · 강제대피령 해제(14:45) · 대피주의령 (Evacuation Watch) 유지 · 연방재난지역으로 선포
2017. 2. 28	<ul style="list-style-type: none"> · 방류 중단, 하류 퇴적물 제거 작업

- 01. 오로빌댐 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하가 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때

2/7 여수로 공동발생

여수로 추가손상 방지 위해 방류량 감소 → 저수위 상승



2/11 비상여수로 월류

비상여수로 월류 → 세굴과 손상 유발 → 사면침식이 예상보다 심각 → Weir 붕괴 우려 증대



2/12
16:00
약19만명에
대해
강제주민대피령
발령

2/13 긴급복구 작업

비상여수로 하부 세굴부 → 사석과 콘크리트 스텔리로 보강
여수로 방류량 증가 → 추가 강우에 대비 저수위 저하



2/14
약48시간 만인
14:45
약19만명에
대한
강제주민대피령
해제



〈그림 5〉 오로빌댐 사고 발생경과



〈그림 6〉 오로빌댐 여수로 및 비상여수로 방류 모습 (www.mercurynews.com)



〈그림 7〉 비상여수로 월류 모습 (출처 : 캘리포니아 수자원국)

다. 비상여수로 침식 및 전도위험

이번 사고에서 캘리포니아주 수자원국(DWR)이 가장 우려했던 부분은 최대 높이 9m의 웨어부가 월류시 기초부분이 세굴되어 전도파괴 되었을 때 하류지역의 3개 도시를 침수시킬 위험이었다(그림-8). 이러한 우려에 대해서는 이미 12년 전인 2005년에 캘리포니아주 수자원국이 댐사용허가권 재획득을 위한 심의과정에 캘리포니아주의 3개 환경단체(강의 친구들, Sierra클럽, 남Yuba강 시민리그)가 상세히 문제제기와 대안(토사로 구성되어 세굴 위험성이 높은 하류 비상여수로 하류사면을 콘크리트로 시공하여 보호하는 방안)을 제시한 바 있으나 미국 연방에너지규제위원회(FERC) 및 수자원국에 의해 거절된 바 있다.

여수로의 손상 없이 정상적인 댐운영이 이루어졌다면 비상여수로의 월류상황은 발생하지 않았겠지만 결과적으로 여수로의 방류기능이 상실되거나 저하되었을 경우, 비상여수로까지 사용해야 한다는 점을 다소 간과했다고 볼 수 있다. 결국 여수로 손상에도 불구하고 방류량을 증가시켰고 비상여수로 월류는 발생 36시간만에 멈추어 최악의 상황은 막을 수 있었다.

또한, 블록+광폭의 지반 웨어부(244m)는 월류시 침식이 일어나기는 하였으나 월류 정부 폭이 충분히 넓어 붕괴까지 발생하지 않았던 것으로 판단되며, 이는 비상여수로 설계가 적절하게 된 것으로 볼 수 있다.

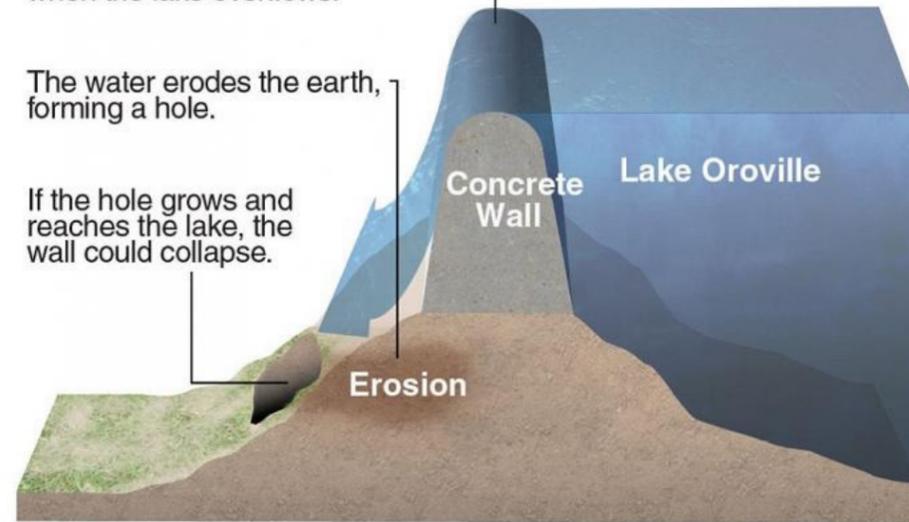
- 01. 오로빌댐 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하가 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때

The erosion that could lead to a collapse at Lake Oroville

Water pours over a concrete wall that forms an emergency spillway when the lake overflows.

The water erodes the earth, forming a hole.

If the hole grows and reaches the lake, the wall could collapse.



Source: DWR

Graphic: Los Angeles Times/TNS

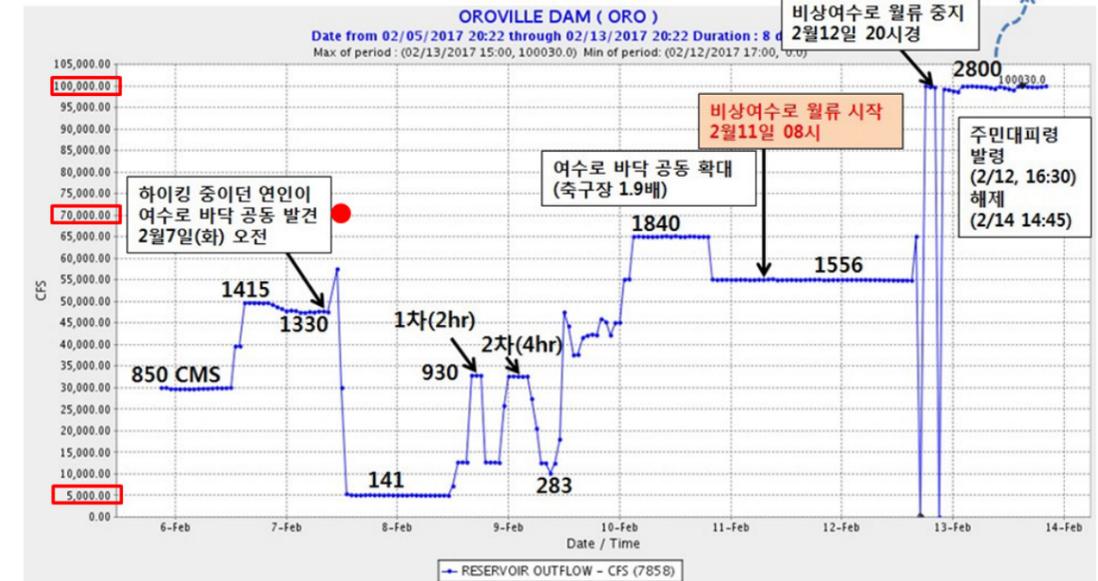
〈그림 8〉 비상여수로 붕괴 위험 개념도

라. 사고발생 원인조사

사고발생 후 연방에너지규제위원회(FERC)의 지시에 의해 구성된 오로빌댐 여수로 손상 원인조사를 위한 독립조사반(Independent Forensic Team, 이하 IFT)의 두 차례(5월 및 9월)에 걸친 조사보고에 따르면 서비스 여수로 슬라브의 파손되기 시작한 것은 2월 7일 오전에 방류량을 늘려서 방류를 시작한 지 오래되지 않은 오전 10시경에 방류수 흐름에 의해 Station 33+50 지점의 하류측 슬라브가 증가된 양압력에 의해 떨어져 나가면서 부터인 것으로 보인다. (그림-9 및 그림-10 참조)

IFT에서는 이밖에 서비스 여수로와 비상 여수로의 손상 원인에 대해 ① 서비스 여수로 및 비상 여수로 손상의 물리적 요인, ② 설계 및 시공상의 요인, ③ 인적 및 조직적 요인 등을 조사분석하여 보고하였으며, 여기서는 물리적 요인과 설계 및 시공상의 요인을 중심으로 요약정리해보면 다음과 같다.

Oroville댐 방류량 기록 (2017.2.6 ~ 2017.2.13)



〈그림 9〉 오로빌댐의 주여수로 방류 기록 (2월 6일~14일)



〈그림 10〉 여수로 파손이 시작된 위치에 대한 분석

- 01. 오로발댐 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하가 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때

(1) 예비 조사결과 보고 (2017년 5월)

□ 서비스 여수로 손상의 물리적 요인 후보

1. 헤링본 배수관(생선뼈 형태로 배치된 배수관) 위의 슬래브의 얇아짐; 이러한 위치는 균열을 촉진시킬 수 있음
2. 슬래브 두께의 큰 변화.
3. 슬래브 상단에 단철근으로만 보강된 슬래브
4. 슬래브 조인트를 가로지르는 연속적인 인장철근 보강 부족
5. 균열을 가로지르는 철근의 부식 및 파손
6. 슬라브 조인트부에 키(keys)가 부족하거나 불충분함
7. 슬래브의 타설 크기가 균열을 제어하기에 너무 컸음
8. 슬래브 조인트에 지수판(water stop)이 부족했음
9. 유체압력과 흐름이 open cracks와 joints를 통해 슬래브 하부로 전달되었음
10. 슬래브 파손 직전에 여수로의 방류량이 증가함
11. 배수관 또는 집수관의 막힘 또는 파손 (나무뿌리에 의한 잠재적인 막힘을 포함)
12. 슈트에 인접한 지역으로부터의 가능한 흐름을 포함하여 배수관의 용량을 초과하는 흐름이 기초암반으로 유입.
13. 집수관의 여유분량(redundancy) 부족.
14. 필터기능이 되지 않은 배수구; 자갈덮개는 필터역할을 하지 못할 수 있음
15. 헤링본은 배수관들이 슬래브의 joints를 횡단
16. 슬래브 기초암반이 토양과 같은 풍화암과 완전풍화암이었으나 슈트 슬라브 설계시 적절한 개량이 되지 않음. 그로 인해 슬래브 하부 기초의 재료는 잠재적으로 침식성을 갖고 있었으며, 콘크리트와의 결합력의 부족이 초래됨; 풍화암과 완전풍화암은 전단대와 같은 지질적 특성에 관련되어 있으며, 슈트 슬래브의 일부 지역 사이에서는 상대적으로 풍화속도가 빠르게 진행됨
17. 불충분한 기초처리로 인해 콘크리트와의 기초암반의 결합이 부족해짐
18. 장기간 이어진 가뭄에 의해 기초 재료에 영향이 확대됨.
19. 불충분한 앵커기능. 사유: 콘크리트 안의 앵커 발달 제한, 짧은 앵커길이, 불충분한 그라우팅이나 그라우트 강도, 연약한 기초암반에 설치
20. 많은 여수로 방류시 하류측 슈트에서 상대적으로 빠른 유속의 흐름 발생
21. 슬래브 수리(repairs)부의 내구성과 효과성 부족
22. 슬래브 조인트에서 콘크리트의 파쇄/또는 박리.
23. 지하수 압력; 현재의 증거들은 이것이 중요한 요소가 아닐 수도 있음을 시사함
24. 캐비테이션; 예비분석에 따르면 이것이 중요한 요소는 아닐 수도 있음

□ 비상여수로 손상의 물리적 요인 후보

1. 월류 웨어 구조물 쪽으로 신속하게 침식되는 것을 가능하게 하는 방향의 침식성 암석 및 토양의 깊이; 이 물질들은 또한 전단대와 같은 지질학적 특징과 관련이 있는 것처럼 보임.
2. 흐름이 집중되고 침식성이 증가한 구릉 지형. 침식 형성을 용이하게 함.
3. 비상여수로 구조물 하부에서 불충분한 에너지 소산.
4. 비상여수로 구조물 하류의 침식방지공 부재.

(2) 중간 조사결과 보고 (2017년 9월)

IFT는 예비조사결과 발표 이후 여수로 기초의 지질 및 지표면 조건과 관련된 광범위한 자료들을 상세하게 검토했다. 즉, 여수로의 설계 및 건설, 여수로의 점검과 평가, 유지관리 및 보수, 캘리포니아 수자원관리국 (DWR) 댐 안전 프로그램 관리, 댐사업 관련 규정 체계 등을 살펴보았으며, 여수로의 사진과 비디오 및 손상, 손상 후 상황과 관련된 사고 후 포렌식 현장 조사 보고서 등을 검토했다. 또한 지질조사, GPR (ground penetrating radar) 탐사, 서비스 여수로의 잔존 배수 시스템에 대한 비디오 검사, 국부적 나무와 나무뿌리의 성장상태 평가, 서비스 여수로의 탈락 지점에 대한 현장검사, 그리고 파손 후 남아있는 여수로 슬래브에 대한 부분 감식(forensic)을 위한 굴착 및 제거 등을 수행하고 그 분석결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

□ 주 여수로 파손의 물리적 요인

IFT에 따르면, Station 33+50의 하류측 슬래브 단면의 초기 용기와 탈락은 슬래브의 충분히 넓은 영역 아래에 있는 물의 양압력에 의해 야기되었을 가능성이 높으며, 그 특정 부분의 양압력을 초과하는 용기력을 생성한 것으로 보고 있다. 양압력에 대한 저항력은 슬래브의 무게, 슬래브 위의 물 무게, 슬래브의 구조 및 기초 앵커 시스템에 의해 제공되는 저항력의 합이다. 슬래브 단면의 상류측 끝부분이 방류흐름에 의해 들리자 슬래브 하부의 양압력이 빠르게 증가하여 슬래브의 갑작스러운 파손이 일어난 것으로 분석되었으며, 그동안의 조사결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 새로운 슬라브 손상과/ 또는 보수부위의 열화가 잠재적인 흐름 교란 위치들을 더 많이 발생시켰고 과거의 여수로 방류시 보다 기초부로 침투해 들어가는 물의 양을 증가시킴
2. 슬래브 아래에서의 장기간 침식으로 인해 슬래브 아래에 있던 상대적으로 얇은 공동(들)이 확장되었을 수 있음. IFT는 이용 가능한 증거로부터 기초 침식으로 인해 흘러내리는 틈 아래서 깊은 틈이 형성되어 슬래브 붕괴가 발생했다는 것을 입증하지는 않았지만 얇은 공동(들)이 존재했다는 가설은 가능하다는 것을 발견했음.
3. 콘크리트 균열 또는 조인트를 가로 지르는 철근의 부식이 사후 조사 및 이전 수리 사진에 의해 확인됨.
4. 슬래브 아래의 앵커 주위의 침식으로 인한 앵커 저항력의 감소 또는 앵커가 그라우트로 제대로 충전되지 않아 앵커 자체가 부식됨

- 01. 오로빌담 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하카 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때

일부에서 우려한 캐비테이션, 지하수 및 지진동에 의한 영향에 대해서는 IFT는 다음과 같은 분석결과를 근거로 우려할 만한 사항이 아니었음을 밝혔다.

1. 캐비테이션 : 과거의 방류에 대한 계산과 나머지 하류측 슈트의 육안관찰결과 (그곳에서는 캐비테이션 시작에 대한 증거가 되는 요소가 발견되지 않음) 등을 볼 때 슬래브 손상의 근본 원인으로 보기 어려움
2. 지하수 : 지하수 흐름의 지질학적 특징 및 육안관찰 증거 등을 볼 때 지하수 흐름의 양이 미미하여 슬래브 하부 배수 시스템에 영향을 미친 것으로 보기 어려움
3. 지진 피해 : 오로빌담 지역의 지진 활동을 검토한 결과 여수로 슈트의 안정성이나 상태에 큰 영향을 미칠 만큼 큰 지반운동은 없었음

□ 설계 및 시공상의 요인

1. (하부배수관 설치로 인한 슬라브 두께 부족) 슬라브 단면 내부에 설치된 하부배수관은 그 위쪽 슬라브 콘크리트의 두께를 7인치 이하로 감소시켰고 (다른 곳의 설계 최소두께인 15 인치에 비해), 그로인해 헤링본 배수관의 대부분 위에 균열을 유발시켰다; 그러한 균열들은 물이 슬래브를 통과하도록 허용하고 콘크리트가 파쇄되는 경향을 유도함.
2. (수축이음부의 지수판 미설치) 수축이음부(contraction joints)에서의 지수판(water stop)이 없었고, 전단키 구성은 적합하지 않았음.
3. (불량한 기초처리) 여수로의 기초에 대한 시방서에 따른 준비와 처리는 (본담 공사와 비상여수로 월류웨어 구조물 공사 후에 이루어졌음) 여수로 슈트 슬래브 건설 중에 느슨해졌음. 일부 영역에서는 기초의 최대 50 % 이상이 풍화된 물질을 제거하고 표면에서 토양과 같은 물질의 제거가 이루어지지 않았음.
4. (앵커 근입장 부족) 슬라브가 최소 15 인치보다 두꺼운 곳에서는 앵커가 부적절하게 발달했을 뿐 아니라 5 #의 rock anchorage는 짧았다. 게다가, 파손된 부위에서 발견된 일부 앵커는 설계인발강도가 발휘되지 않았을 가능성이 높은 고도로 풍화되고 파쇄암에 설치되었다.
5. (많은 오류가 있는 배수시스템) 필터가 없거나, 설치방법의 잘못으로 인해 파손되거나 연결되지 않은 배수관, 슬라브를 관통하여 흐르는 물에 대한 용량이 부족한 부적절한 집수구 등과 같은 많은 결점이 있는 배수 시스템이었음.
6. (철근보강 부족) 슬래브의 단철근 보강
7. (배합설계의 부적절) 상대적으로 큰 콘크리트 골재 크기로 인해 키와 배수관에서 균열과 파열이 발생되고, 배수관이 손상되었음.

□ 비상여수로의 손상 원인

IFT는 비상 여수로 손상에 대해 다음과 같은 4 가지 물리적 요인이 있었을 것으로 분석했다.

1. 비상여수로 웨어 구조물 쪽으로의 급속침식을 가능하게 하는 매우 두꺼운 깊이의 침식성 암석과 토양이

- 존재하였음. 이러한 지반조건은 전단대(shear zones)와 같은 지질적 특징과 관련이 있음
- 2. 흐름을 집중시키고 침식력을 증가시켜서 상류측으로의 침식이 전이되기 쉬운 지형이었음.
- 3. 비상여수로 구조물 기초부에서 에너지 소산이 불충분하게 이루어짐.
- 4. 비상여수로 구조물 하류측에 침식방지공이 없었음

(3) 최종 조사결과 보고 (2018년 1월)

독립조사반(IFT)는 2018년 1월에 사고원인조사결과를 최종발표하였으며, 이번의 사고원인은 결코 어느 한 가지 또는 어느 개인이나 조직의 문제가 아니라 설계와 시공과정은 물론, 운영 및 유지관리, 댐 소유자 및 감독기관, 관련기술과 제도 등에 있어서 문제점들이 상호 연결되어 발생한 것으로 보고하였으며, 여기서는 그 내용을 간략히 소개하고자 하며, 향후 우리의 댐안전관리자들은 오로빌담 사고사례를 반면교사로 삼아 댐안전 관리에 만전을 기하여야 할 것이다.

□ 설계와 시공이 본질적으로 취약

오로빌담의 설계와 시공은 1960년대의 댐 설계 및 시공의 일반적 수준에도 미달한 것으로 확인되었는데, 그 이유 중 하나는 여수로 분야의 설계자가 이 분야에 관한 경험과 지식이 거의 없는 기술자였으며, 그는 지질전문가 및 시공자와도 거의 소통을 하지 않았던 것으로 확인되었다. 실제로 기초지반의 지질상태 평가 및 적용오류, 배수관 직경 변경, 지질조건에 따른 기초처리 미흡, 앵커길이 부족, 조인트 지수판 미설치, 철근 단층배근 등 설계와 시공이 본질적으로 취약했고, 그로 인하여 여수로 바닥슬라브의 노후화가 세월이 지나면서 심화되어 왔다.

□ 안전 및 유지관리의 부실 + 안전불감증

50여년간 안전점검을 해왔으나 취약한 시공상태, 보수부위의 내구성 저하, 앵커의 지지력 손실, 배수시스템의 성능저하 등의 심각성에 대한 인식이 부족했다. 즉, 건설직후 부터 Herringbone배수관 부위의 균열의 심화와 과도한 배수량 발견되었으나 곧“정상적”인 것으로 간주되어 왔으며, 이는 결과적으로 안전불감증, 안전무감각화가 지속되어 2017년 여수로 사고의 원인이 되었다.

□ 사고대응 의사결정의 부적절성

예상되는 Risk들에 대한 최적의 Balance를 찾기 위한 Tradeoff(의사결정)의 어려움을 겪었으나 댐의 안전에 관한 정확한 데이터의 수집과 분석결과에 근거하지 않은채로 의사결정을 함에 따라서 결과적으로“sweet spot”을 찾는 데 실패하였다. 독립조사반의 조사에 따르면 캘리포니아 주정부의 수자원국(DWR)은 발전소를 구하기 위해 메인여수로의 방류량을 늘리지 않기로 결정하였으나, 그 당시 댐하류 발전소 부근의 tailwater 수위는 저하되고 있었으므로

- 01. 오로빌댐 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하가 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때

메인여수로의 방류량을 늘려도 되는 상황이었다. 따라서 이로 인하여 저수위가 상승하여 비상여수로가 월류되었고 대피명령 발령되었다.

□ DWR의 조직 및 안전문화의 문제성

미국 내 최대의 수자원 프로젝트를 건설-운영해옴에 따라 댐 인프라시설의 안전에 관해 지나친 자신감과 자만감이 팽배해 있었다. 이 밖에 캘리포니아 수자원사업(SWP)이 29개 댐사업자(SWC)에 의해 운영됨에 따라 비용에 대한 부담감 및 투자우선순위 결정시 댐안전은 후순위로 밀려나게 되었으며, 수자원국(DWR) 내에 댐공학 및 댐안전 관련 기술조직 및 인력이 부족한 것도 사고발생의 간접적 원인으로 분석되었다.

이 밖에도 독립조사반은 다양한 분석과 교훈을 제시하고 있으므로 보다 상세한 내용은 독립조사반의 최종보고서를 참고하기 바란다.(Oroville Dam Spillway Incident Forensic Investigation Team, 2018.1)

마. 복구상황

이번 오로빌댐 붕괴위험은 매우 긴박하게 진행되었음에도 불구하고 주정부의 대응이 매우 신속하게 이루어졌다. 여수로 손상이 감지된 직후 방류를 멈춘 후 여수로 손상 부위를 곧바로 점검하였으며(그림-11), 여수로의 손상진행을 파악하면서 방류량을 계속적으로 조절하였다. 또한, 비상여수로 월류부 침식 진행을 막기 위하여 월류가 멈춘 13일부터 24시간 비상근무로 비상여수로 긴급복구를 진행하였고, 에너지규제위원회(FERC)는 캘리포니아 수자원국(DWR)에 독립적으로 활동할 수 있는 사고조사위원회(BOC)의 구성과 운영을 지시하였다.

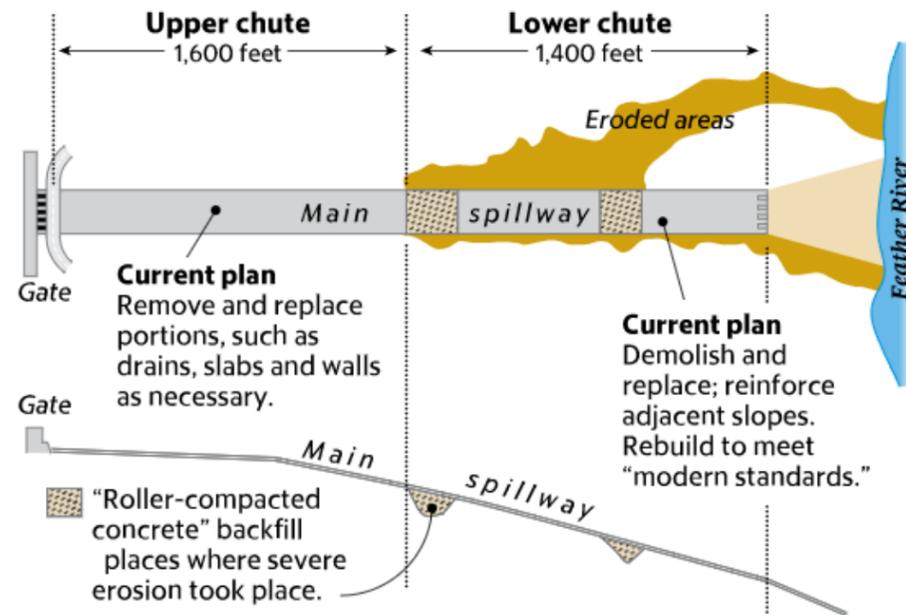


〈그림 11〉 여수로 긴급 점검 (2017.2.7., 출처 : 캘리포니아 수자원국)

사고조사와는 별도로 강우량이 증가하는 겨울이 오기 전까지 댐 운영을 정상화하기 위하여 빠른 복구에 중점을 두었으며 예산지원이 빠르게 이루어졌다. 4월 2일 미국 대통령은 복구를 위하여 연방예산 274백만\$를 지원하였고 4월 17일 Kiewit Infrastructure West 사와 복구 작업에 대한 계약을 마쳤다. 그러나 복구공사비는 2017년 12월 현재 당초 보다 약 3배 이상 증가한 약 870백만\$로 증액된 것으로 보고된 바 있다.

복구 계획은 상부의 경우 필요한 부분만 보수하고, 손상이 심한 하부의 경우 기존 구조물을 해체한 후 지반부터 보강한 후 다시 재건하는 형태이다. 여수로 하부지반의 경우 손상이 심한 부분에 대해서는 RCC(Roller-Compacted Concrete) 공법으로 보강작업이 진행되었다. (그림-12)

- 01. 오로빌댐 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하가 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때



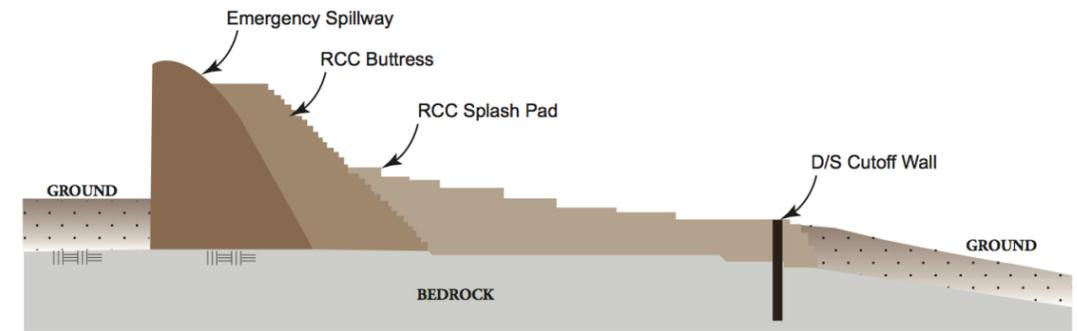
〈그림 12〉 여수로 복구 계획 (출처 : 캘리포니아 수자원국)

이번 오로빌댐 붕괴위기에 있어서 가장 중요시 여겨졌던 비상여수로 보강은 하류측에 RCC 공법으로 부피를 확장하여 월류 위어부의 안정성을 향상시키고 침식을 막기 위하여 바닥면을 콘크리트로 보강한 후, 상류측으로 침식이 확장되는 것을 방지하기 위하여 콘크리트 보강부가 끝나는 지점에 차수벽을 설치할 계획이다(그림-13). 현재는 지난 비상여수로 월류후 긴급하게 보강한 콘크리트 보강부를 계속 유지한 상태(그림-14)이며 여수로 보수를 마친 후, 2018년 보강 예정이다.

또한, 여수로 바닥면 시공은 50여년의 기술과 달리 부식에 강한 철근 재료를 사용하였으며 액화 질소를 사용하여 콘크리트 타설 전 수화열을 조절하였다. 한편, 여수로 바닥면 하부에서 발생하는 침투수로 인한 공동현상을 방지하기 위하여 배수관을 철저히 시공하였으며 이전보다 더 많은 수의 배수관을 설치하여 하부지반 침식으로 인한 공동현상을 방지하였다.

Emergency Spillway Remediation Concepts

The following graphic provides a profile view of an emergency spillway recovery concept including the RCC buttress and splash pad and the downstream cutoff wall.



ONLINE: Oroville Spillway Incident • Page 6 of 7

〈그림 13〉 비상여수로 보강계획 (출처: 캘리포니아 수자원국)



〈그림 14〉 비상여수로 현재 상황 (출처 : Capital Public Radio News)

- 01. 오로빌댐 여수로 붕괴위기와 복구현황
- 02. 푸에르토 리코 과타하가 댐 여수로 구조적 손상 사례
- 03. 울산 약사동 제방
- 04. 한국 고대의 수리시설
- 05. 댐 주변의 친환경 보전과 활용을 준비할 때



〈그림 15〉 Cut off wall 설치 모습 (출처 : Capital Public Radio News)



〈그림 16〉 여수로 재간설에 사용한 에폭시 코팅된 철근 (출처 : Capital Public Radio News)



〈그림 17〉 여수로 하부 배수시설 설치 장면 (출처 : Capital Public Radio News)



〈그림 18〉 여수로 보수공사 진행 상황 (출처 : 캘리포니아 수자원국)