

- 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

3. 결론

지난 2월에 미국 캘리포니아주 오로빌댐에서 여수로 및 비상여수로의 손상으로 인해 댐붕괴에 가까운 상황이 발생하여 약 19만명의 주민이 대피했던 사고에 대하여 원인 및 보강 현황에 대하여 정리해 보았다.

오로빌댐 사고의 경우 설계시부터 갖고있는 문제점도 원인이 되었지만 그 이후 유지관리시에 충분히 보완, 검토할 수 있는 사항이었으며 이에 대해 적절한 조치가 이뤄지지 않음으로 해서 발생한 사고로 볼 수 있다. 이번 사고를 바탕으로 노후 인프라 관리를 위해서는 인프라의 관리 실태조사 및 분석을 철저히 할 필요가 있으며, 노후 인프라를 평가할 수 있는 시스템 및 제도 개선이 필요하다. 또한 제도적으로 인프라의 성능개선 및 장수명화를 위한 재원 확보와 자산관리 개념으로 유지관리 체계를 마련할 필요가 있으며, 마지막으로 유지관리 기술 및 전문가를 지속적으로 양성해야 한다.

최근“시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법(2018.1.18.)”이 시행되면서 기존의 상태평가, 안전성평가에 국한되었던 안전점검을 안전성능, 내구성, 사용성능을 평가하는 성능평가중심의 유지관리로 패러다임 전환을 시도하였다. 이와 같이 현재의 상태 뿐만 아니라 장래의 성능변화를 진단하여 지속가능한 기반시설 성능 유지를 위해서는 정부차원의 지속적인 투자와 관심도 함께 해야 그 효과가 클 것으로 기대한다.



참고문헌

1. Oroville Dam Spillway Incident Forensic Investigation Team, "Memorandum on Preliminary Findings Concerning Candidate Physical Factors Potentially Contributing to Damage of the Service and Emergency Spillways at Oroville Dam," California Department of Water Resources, May 5, 2017.
2. Oroville Dam Spillway Incident Forensic Investigation Team, "Interim Status Memorandum," California Department of Water Resources, September 5, 2017.
3. Oroville Dam Spillway Incident Forensic Investigation Team, "Independent Forensic Team Report : Oroville Dam Spillway Incident" California Department of Water Resources, January 5, 2018.
4. 신동훈 (2017), "오로빌댐 여수로 붕괴위기의 지반공학적 검토", 한국수자원학회지 제50권 제3호, pp.8-20.



푸에르토 리코 과타하카 댐 여수로 구조적 손상 사례

김남룡 선임연구원 : K-water통합연구원

02

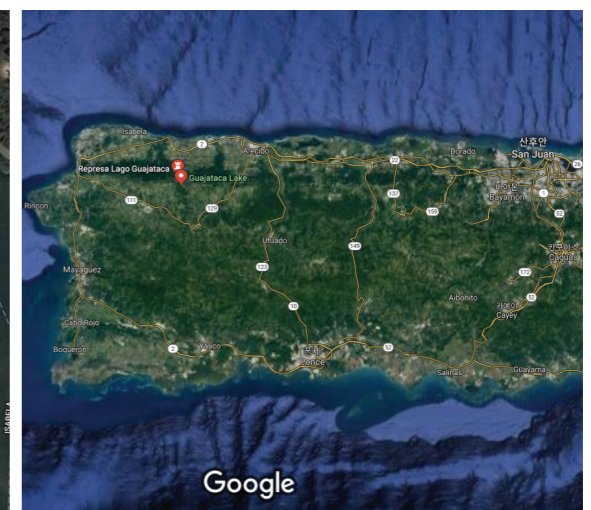
개요

2017년 9월 22일 오후 2시 10분 경, 푸에르토리코 북서부 Quebradillas에 위치한 과하타카(Guajataca) 댐에서 여수로 하단부와 인접한 제체의 일부가 유실되는 손상이 발견되었다. 현지 자치정부에서는 제체의 손상이 진전될 경우 댐의 붕괴에 의한 막대한 피해가 우려됨에 따라 하류지역 주민 70,000여명에 대한 긴급 대피령을 발효하였다.

1929년 준공된 과하타카 댐은 푸에르토 리코 전력국(Puerto Rico Electric Power Authority, PREPA)의 주관 하에 홍수방어와 용수공급을 위하여 건설되었다. 푸에르토 리코 정부의 용수공급 정책에 의하여 1919년 건설 계획이 승인되어 1928년 착공하였으며, 높이 36.5m, 길이 300m의 본댐은 흙댐(earth dam) 형식으로 건설되었다. 저수지의 유역면적은 80km², 총 저수용량은 48.5백만톤으로 계획되었으나, 1999년 수행된 유사퇴적량 조사 연구결과에 따라 총 저수용량은 42.3백만톤으로 감소하였다 (Solar-Lopez, 2000). 1995년 기준 총 용수공급량은 하루 182천톤이며 이 중 52%가 생활용수, 48%가 농업용수로 공급되었으며(USGS), Aguadilla, Isabela, Moca, Aguada, Quebradillas 등 인접 지역 주민 179천명의 주요 상수도원으로서의 기능을 담당하고 있다. 현재는 지역의 중요한 관광자원으로도 활용된다.



과하타카 댐 (위성사진, Google Maps)



과하타카 댐 위치 (푸에르토 리코 북서부, Google Maps)

〈그림 1〉 과하타카 댐 (푸에르토 리코 Isabela / Quebradillas 지방)

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

피해 발생 현황

과타타카 댐의 피해는 2017년 9월 카리브해를 강타한 허리케인 마리아(Maria)의 집중호우 이후 저수지 방류 과정에서 발생하였다. 허리케인 마리아는 역대 열 번째 규모의 강력한 허리케인으로 기록되었으며 카리브해 지역과 미국 남부에 막대한 피해를 유발한 것으로 보고되었다. 최고 5등급까지 발달하였던 허리케인 마리아는 9월 20일 푸에르토 리코에 상륙할 당시 4등급으로 다소 약화되었으나 대규모 홍수 발생에 따라 공식적으로 58명의 사상자와 80억달러 이상의 재산피해가 발생한 것으로 보고되었다. 최고 풍속 180km의 강력한 허리케인은 푸에르토 리코 남동부 지역에 최고 900mm의 비를 뿌렸으며, 과타타카 댐 유역에는 약 400mm의 강우량을 기록한 것으로 보고되었다.

과타타카 댐의 피해는 허리케인이 지나간 10월 22일 18시 10분 댐 관리 당국의 긴급대피명령 발효를 통해 공개되었다. 발표 당시 댐의 심각한 손상으로 급격한 붕괴위험에 노출되었으며, 붕괴 시 과타타카 강에 인접한 동부 Isabela와 서부 Quebradillas 지역이 급격히 침수될 것이 우려되었다. 공개된 언론자료 등에 의하면 허리케인 마리아에 의한 강우가 과타타카 호수로 유입, 수위 상승에 따라 제체 좌안측에 위치한 월류형 여수로를 통하여 방류되던 중, 제체 하류측 중앙 방향으로 위치한 감세지로부터 흙이 노출되기 시작하고 주변 지반으로 침식이 확대되는 현상이 발견되었다(그림 2). 방류가 지속됨에 따라 제체 하류측 지반의 침식이 가속화되고 여수로 상부로 역행침식이 발생함에 따라 댐 안전관리 당국은 심각한 위해요소로 판단한 것으로 보인다. 이 사고로 인접 지역 70,000명의 주민에게 긴급 대피 명령이 내려졌으나 강력한 허리케인에 의해 국가 전체 주요 통신망이 손상되어 실제로는 대다수의 주민들이 대피하지 못한 것으로 보고되었다.



여수로 하부 침식 현황



여수로 상부로의 침식 확대



과타타카 댐 하류 교량 파괴

〈그림 2〉 과타타카 댐 피해 현황 (17. 9. 23. 언론사 보도 내용)

댐 손상의 세부사항과 안전성 논란

과타타카 댐의 피해는 허리케인 마리아에 의한 호우 이후 급격히 늘어난 방류량에 의하여 유발되었다. 여수로의 정확한 설계방류량과 사고 발생 당시의 방류량 정보는 확인할 수 없으나, 주요 댐 정보와 사고 전·후 위성사진 등을 살펴보면 여수로 하부 감세지의 구조적 특성으로 인하여 손상이 발생한 것으로 판단된다.

기본적으로 과타타카 댐의 구조는 좌안측에서 시작되는 여수가 하류측 중앙 방향으로 건설되었고, 여수로 하단부에는 대규모 사석이 넓게 분포하는데 이것은 감세공 역할을 하는 것으로 파악된다(그림 3). 여수로 월류 시 방류수는 감세공을 통하여 댐 우안 하류측의 과타타카 강으로 흘러들어간다. 일정 수준 이하의 방류량에 대해서는 감세공의 효과를 기대할 수 있으나, 그림 2의 사진과 같이 대규모 집중호우에 따라 방류량이 늘어날 경우 감세공의 손상과 수충격 및 소류력에 의한 원지반의 침식까지도 발생하는 것으로 보인다. 결과적으로 여수로와 감세공의 한계성능 이상의 방류량이 직접적인 원인이라 할 수 있으며, 이러한 방류량은 하류측의 교량 손상을 야기할 정도의

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

큰 수준이었던 것으로 보인다.

한편 댐 손상과 붕괴 위험성에 대해서는 현재까지도 논란이 이어지고 있는 것으로 보인다. ASDSO(Association of State Dam Safety Officials)가 미국 공병단, 미국 연방재난관리청(FEMA, Federal Emergency Management Agency) 관계자들의 조사에 따르면 당국의 조치에는 댐의 안전에 대한 기술적 이해 부족이 있었던 것으로 판단하고 있다. 현장에서는 여수로의 손상이 있으나 허리케인 마리아와 같은 대규모 재해가 즉시 재발하여 제체로 직접 월류하지 않는 한 제체의 안전성에 문제를 일으킬 정도로 판단되지 않는다. 실제 댐의 구조를 살펴보면 제체와 손상된 여수로 하단 사이에는 상당한 이격 거리가 있으며, 유실된 토사는 원지반 또는 성토(berm)으로 판단된다. 결과적으로 여수로 방류로 인한 하류지역의 하천 수위는 올라갈 수 있으나 제체의 급격한 붕괴로 인한 비상상황 발생은 매우 희박한 상황이었다.



피해발생 전 여수로 (Google Maps 등록 사진)



피해발생 후 여수로 (Google Maps 스트리트 뷰)
 <그림 3> 과타타카 댐 여수로 및 감세공의 피해 전·후 사진 비교

복구 노력

2과타타카 댐의 여수로를 통한 방류는 약 20일 이상 지속되었으며, 동시에 미국 공병단을 중심으로 복구작업이 진행되었다. 10월 1일 미국 공병단은 손상된 여수로의 복구 및 보강계획을 발표하였다. 참고로 이는 캘리포니아 오로빌(Oroville) 댐에 이어 2017년 미 당국이 관리하고 있는 댐에 대한 두 번째 복구작업이었다.

복구작업은 우선 약 350개의 콘크리트 블록을 헬리콥터를 이용하여 운반, 손상부위에 배치하고 (그림 4) 수백개에 달하는 모래주머니(플레컨백 또는 톤백)를 채우는 임시보강방안이 제시되었다. 해당 작업은 여수로를 통한 방류가 지속되는 중에 시공될 계획이었으며, 9월과 같은 폭우가 재현되지 않는 한 여수로의 손상이 확대되지는 않을 것으로 판단하였다. 이후 여수로의 정상화를 위한 방안 또는 감세공의 개선과 관련된 계획 등은 확인되지 않았다.



'17. 9. 27. 현재 손상 현황



복구작업 진행 사항 (17. 10. 9)

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



복구작업 진행 상황 (17. 10. 9)



콘크리트 블록 반입 (17. 10. 9)



과타타카 댐 여수로 복구용 콘크리트 블록(17. 10. 9)

<그림 4> 과타타카 댐 여수로 및 감세공의 피해 전·후 사진 비교

시사점

과타타카 댐은 준공 후 90년간 비교적 안정적으로 운영된 시설로 평가되고 있다. 금회 사고는 허리케인에 의한 강우가 여수로와 감세공이 감당할 수 있는 한계방류량 이상의 방류를 유발함에 의하여 발생하였으며, 여수로의 손상, 지반 침식, 인접한 하류측 교량의 붕괴 등 피해를 일으켰다. 미 공병단 자료에 의하면 과타타카 댐은 3년 주기로 주요 점검을 실시하도록 되어있으나 2013년 이후의 점검 기록은 없는 상황이었으며, 관리 당국의 댐 운영에 있어서도 전문성이 다소 부족한 것으로 보인다. 댐의 방류 상황은 수문학적 관점에서 구조적 안전에 문제는 없으나, 여수로와 감세공의 구조는 해당 방류량을 소화하기에 적절치 않았다. 또한 교량과 같은 하류 시설물의 피해 가능성에 대한 고려도 부족했던 것으로 판단된다.

향후 국내 댐의 정밀안전진단과 같은 안전관리 과정에서도 수문학적 평가, 제체의 안전성 중심의 관리에서 확대하여, 댐 부속시설의 형태와 기능, 인접시설에 대한 영향 등을 검토하여 세심한 안전관리가 이루어질 수 있는 방안을 모색해야 할 것으로 생각한다.



참고문헌

- Wikipedia, Guajataca Lake, https://en.wikipedia.org/wiki/Guajataca_Lake
- USGS, Water Resources in Caribbean https://pr.water.usgs.gov/public/rt/pr_lakes/lake_50010800.html
- Soler-López, L.R., 2000, Sedimentation survey of Lago Guajataca, Puerto Rico, January 1999: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 00-4044, 20 p., 1 pl
- Google Maps, <http://maps.google.com>
- Hydro Review, "Corps releases details on Guajataca Dam spillway mitigation efforts in Puerto Rico," <http://www.hydroworld.com> 2017. 10. 5.
- ASDSO, "Puerto Rico's Guajataca Dam" <http://damsafety.org> 2017. 9. 26