제당 PIPING 결궤 원인분석

- 성암제 붕괴 중심으로 -

Cause Analysis of Dam Body piping Failure

-Centering on the Example of Seungam Reservoir Failure-

이 인 형 (대지산업기술연구소)

Lee, In Hyung

Abstract

Piping is a phenomenon where seeping water progressively erodes or washes away soil particles, leaving large voids (Pipes led to the development of channels) in the soil.

Piping failure caused by heave can be expected to occur on the downstream side of a hydraulic structure such as fill dams when the uplift forces of seepage exceed the downward forces due to the submerged weight of the soil.

The way to prevent erosion and piping and to reduce damaging uplift pressures is to use a protective filter or to construct cutoff wall/imperious blanket.

Therefore, all the hydraulic structures faced/with soil materials should be taken the safety against piping into consideration.

Ⅰ. 서 론

1.1. 조사개요

본 조사보고서는 전남 무안군 무안읍 성암리 소재 무안읍민의 생활용수원으로 사용중인 성암제 저수지(1980년 완공된 상수도 수원지)가 사고발생기준 약 2년전에 저수량을 배증시키기 위해 숭상공사후 만수상태에서 1991. 8. 13일 장마철 강우기에 제당 바닥(저폭 약 60m 구간)이 완전 세굴유실 붕괴되어 이에 따른 제당결궤 원인을 도출하기 위해 제반 조사·설계·시공 기술자료를 근거로 하여 현장조사 시험을 하였고, 현장조건과 조사자료를 근거로 하여 분석 검토한 제당 붕괴 조사보고 자료이다.

○ 성암제 공사개요는 다음과 같다.

구 분	당초 구저수지	숭 상 공 사	비 고
저수지명	성 암 제	성 암 제	
제당길이	L_1 = 120m	L_2 = 134m	
제당높이	H_1 = 20m	H_2 = 25m	
설계홍수량	Q_1 = 17.50㎥/sec	Q_2 = 27,617㎥/sec	
여수토길이	M_1 = 84m	M_2 = 125m	
저 수 량	V_1 = 25.6ha/m	V_2 = 56.7ha/m	2배로 증가
제당 숭상고	0	h = 5m	
공사(준공)기간	1980. 12. 30 준공	'80.9.16 ~ '90.9.25	
제당시공이력	10년	12개월	

2001년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (2001년 10월 12일)

1.2. 조사범위

본 조사의 목적을 위한 조사범위 및 조사내용은 다음과 같다.

1) 조사범위 : 제당 결궤에 따른 설계기준자료 및 시공관리자료와 시공 상태 및 제당 붕괴 현황 조사시험

2) 조사내용 : 저수지의 설계시공 관련자료와 현장조사시험으로 구분 조사하였다.

가. 자료조사(당초 구저수지와 숭상공사 저수지의 설계 및 시공자료)

① 설계기준 자료조사

② 시공관련자료 조사

③ 유지관리자료

나. 현장조사·시험

① 기초지반 조사 ② 지 질 조 사

③ 공사재료조사 ④ 댐 단면조사

⑤ 시공상태조사 ⑥ 투수성 조사

1.3. 사고현황

성암제는 상수도 수원으로 1980년 12월 준공되어 사용해 오던중 준공후 10년이 경과후에 저수량을 배로 확대하기 위해 당초 저수지를 숭상하여 당초 저수량 256천톤 보다 숭상 공사후 저수량 567천톤을 얻을 수 있도록 당초 제당을 숭상 및 확장하였다.

제당 숭상공사는 1990년 2월부터 착공하여 1990년 9월 30일 준공하였고, 숭상공사는 계속 담수상태 하에서 공사를 하였다.

숭상공사 준공후 만수면까지 담수하면서 장마철에 만수 상태하에서 1991년 8월 13일 1시 30분경 여수토 방수로와 제당접속 부위에서 갑자기 큰 굉음을 내면서 기초 바닥면까지 완전 세굴상태로 붕괴되었다. 이 사고로 인하여 건설공사 부실의 사회적 물의를 일으켰고 제당 하류부 배후지에 농경지 침수와 유실, 가옥 및 가축막사 부지가 침수로 수해피해를 입어 하류부 마을 지선민에게 약 3억5천만원의 경제적 긴급피해 보상을 하였다.

또한 공사 관련자들의 법적 책임을 묻도록 고소상태 하였다.

Ⅱ. 현장조사 및 시험

2.1. 조사의 착안점

가. 기본조사의 착안점

1) 제당 붕괴상태 2) 댐터기초지반 조건 3) 제정의 균열상태

4) 공사재료 5) 제당시공상태 6) 기초처리 시공자료

7) 수밀성 시공자료 8) 제체지중 배수시설 9) 제당월류상태

10) 제당안정조건 11) 제당기초지질조건 12) 유지관리상태

나. 현장조사중 착안사항

1) 제당붕괴의 주원인

2) 제당 숭상공사전 구제당의 제체의 안정성

3) 제당결궤 구간이 여수토 접속부 부근에서 일어난점

4) 제당세굴상태가 제당 기초저부(댐터)까지 완전히 세굴된 이유

5) 제당 종단상의 수직균열이 순차적으로 크게, 많이 일어난 이유

6) 여수토 기초부위가 공동화된 이유
7) 강우직후마다 여수토 기초암반의 절리부위에서 간헐적으로 침출수가 표출되는 원인
8) 여수토 상류부의 제정내사면 성토 부위가 침식함몰된 이유
9) 제체횡단 중심부의 관수로 복통의 누수흔적과 Grout 보강시공한 이유
10) 제당의 성토 시공상태와 지수벽 설치 및 기능
11) 제당에 작용하는 내용적 및 수압강도
12) 제당 하류부 지단에서 관공작용(Piping)의 발생여부
13) 제당붕괴시 큰 굉음이 생긴이유
14) 제당 결궤 피해현황과 제당하류부 지층상태
15) 사고상황 목격자(저수지 관리자와 주민) 참고인의 증언

2.2 조사방법

본 성암제 저수지의 제당붕괴에 대한 현장조사는 댐터를 중심으로 반경 300m범위를 정밀 답사한후 제당결궤 원인 도출용 제반시공 기술자료를 수집 및 분석하기 위해 설계도서, 준공도서와 시공자료를 기준하여 현장조건과 연계 검토할 수 있도록 기초지반, 지질, 토질, 시공자료 조사와 제체와 여수토의 시공 상태 및 결궤 상황까지 확인조사 하였다.

2.3. 현장시험

① 현장투수시험 : 제체의 성토부위별, 재료별, 표고별로 현장밀도시험 및 현장 투수시험 실시
② 현장 밀도시험 : 제당 성토부의 측점별로 실시
③ 현장투수시험분석 : 제체 성토부위와 댐터 기초지반에서 현장투수시험과 다짐시(D=95%) 실내 투수시험을 병행하였으며, 그 시험결과는 사고부위는 투수성과 반투수성, 제체안정부위는 불투수성을 나타내고 있다.

2.4. 토질시험

현장에서 채취한 실내 토질시험용 시료는 제당 성토재로 사용된 흙의 기본적 성질과 공학적 특성을 규명하기 위해 시험실에서 한국공업규격 시험법에 의한 제반 물리성 및 역학시험을 실시하였다.

Ⅲ. 현장조사 · 시험결과

3.1. 제당붕괴현황

1) 현장조사 관찰내용

① 제당이 결궤된 성암제의 제당 붕괴위치는 제당 중심선 기준 측정 No.0+2~No.2+13이고 결궤구간은 연장길이 ℓ = 51.0m이다.

② 제당붕괴현황은 제당 제정에서 댐터 기초지반(원지반)까지 (상폭 B_1=51.0m, 저폭 B_2=4.0m, 높이 H=21.7m)깊게 결궤되어 있고, 파괴종단 사면 구배는 1:2이며, 댐터 기초지반 횡단구배는 1/130 정도이고, 유실된 제체 제정부근에서 부등침하와 균열이 심하고 제당 사면보호용 사석재가 제당 하류부까지 어지럽게 유실 이동되어 산재되어있다.

③ 저수지 제당 표면은 중심선(댐축)과 직각 방향으로 균열이 심하게 발생되어 있으며, 그 균열이 심한 구간은 제당 우안측길이 ℓ_1 = 37m, 제당좌안 좌측길이 ℓ_2 = 6.0m이고, 사고중심점에서 제당 양안으로 멀어 질수록 수직균열의 크기(폭 · 길이)가 현저히 작아진 상태이며 제당 종단표 면상의 수직 균열구간은 총 L = 94.0m이다.

④ 결궤된 댐터의 바닥기초는 지지력이 양호한 암반 기초로 절리가 불규칙하게 발견되며 부분적으로 협재된 풍화암의 균열절리를 통해서(위치 No. 1에서 돌출 암반의 절리)저수지 좌안 산측으로부터

강우시마다 암반절리를 통하여 지하수가 미세하게 침출되고 있다.

⑤ 본 저수지의 결궤 사고로 인하여 하류부의 농경지 침수 및 매몰, 침수된 가축막사와 가옥 파괴등으로 사회적 물의와 재산피해의 민원이 발생되었다.

⑥ 성암제 관리인에 의하면 제당 결궤 당시 1991. 8. 13일 밤 1시 30분경 광하는 굉음 소리후에 여수토 배수 암거수로 방향에서 물이 소리내면서 갑자기 누수량이 많이 흘러 내려가는 것을 목격하고 즉시 관리청에 연락한 후 급히 마을주민을 대피시켰다고 함. 또한, 사고당일 밤중에 저수지 하류부 마을 주민 4명이 꽝! 굉음 소리에 놀라서 밤중에 저수지 관리인 숙소까지 찾아와서 저수지 붕괴사고 발생을 확인하고 사고 대피하였다고 함. 한편, 1991. 7월 장마철 우기중에 저수지 좌측산과 연결된 제당 사면부(여수토 좌단)에서 계속해서 누수현상이 발견되어 군에 보고된 상태이다.

2) 제당결궤의 특징

① 제당붕괴 지점의 기초지반이 중심점토벽의 잔재없이 제당기초 지반까지 완전히 침식 세굴된 점(① 댐 기초지반까지 중심벽이 완전세굴된 점)

② 제당 붕괴지점의 제정종단상에 양안쪽으로 수직균열이 크게 여러 지점에서 생겼으며, 붕괴지점에서 양안쪽으로 수직균열이 점점 적어지면서 거의 전 구간에 생긴점(② 제정종단상에 수직균열이 크게 생긴점)

③ 여수토 방수로 기초지반이 경암지층이나 돌출암 하층부 균열 부위로 강우시 저수지 좌안산으로부터 강우의 지하수 누수가 간헐적으로 표출되고 있는점.
(③ 여수토 기반암 절리부 누수 발생되고 있는점)

④ 저수지 제당 좌안부 산의 층리상의 퇴적층 기반암층은 두껍고 수평절 리가 발달된 투수성, 풍화된 연암층임.
(④ 제당 좌안부 누수층 층리 기반암 존재한 점)

⑤ 제당 결궤전부터 제당하류에 누수 발생 및 제당 결궤 사고순간 광소리 굉음이 발생한점.(⑤ Piping 결궤시 굉음과 진동충격 발생)

3.2. 기초지반조사

붕괴구간내 댐터 제당 기초지반의 표층은 구하상의 사력질 지반이고 그 하부지층은 양질의 암반지반으로 지지력이 양호하여 침하와 기초 투수에 위험성이 없는 암반 기초지반 조건이나 제당 좌안부와 여수토 방수로 기초 지반은 화산성 퇴적암(응회암)으로 수평층리를 이루고 있고 여수토 방수로 기초 돌출암은 경암이나 절리가 발달한 급경사 노두암으로 제당 좌안부 산측에서 발원된 암반 지하수가 이들 절리를 통해 여수토 방수로 기초부까지 지속적으로 침출수가 누출되고 있으며, 침출수는 강우기나 저수지의 저수량이 풍부할수록 누수량이 많을 것으로 추정된다. 더욱이 제당 숭상공사에 의한 저수량의 배중에 의한 침투수압이 배로 증가하여 이미 구제당에서 형성된 침투 유로를 통해 Piping (관공작용)을 발전시키는 원인이 되고 있었다고 판단된다.

3.3. 축조재료 조사

제당의 붕괴부위 양측면과 제체에서 측점별, 지수벽(점토)과 외벽토(성토)별 및 표고별로 숭상공사 및 토질시험결과 당초 제당과 숭상공사 제당용 점토 및 성토재료는 공히 사용가능한 재료이다.

또한, 축재재료의 다짐시험, 투수시험, 역학시험 결과 축재재료로서 다짐밀도, 수밀성, 안정성, 전단강도를 충분히 갖는 사용가능한 재료이다.

한편, 투수시험결과 성토재료인 외벽토와 심벽토(지수존용, 중심점토)의 투수성(K1/K2<1/10)으로 보아 본 제당은 중앙심벽형 제당으로 볼 수 없고 시공상태를 기준하면 균일형 제당으로 보는 것이 타당하다.

3.4. 시공상태 조사

1) 재료선정상태 : 사용가능한 재료이며 성토기능상 균일형 댐으로 시공되어 있음
2) 성토 다짐상태 : 대체로 양호하나 일부 사고 조사지점은 불량함
3) 투수도 : 현장 투수시험 결과 불투수성 및 반투수성으로 확인되었고 제당의 균열 및 부등침하 부근에서는 투수성임
4) 사면구배 : 사면구배(내사면 1:2.3, 외사면 1:2.0)는 설계도면과 일치하게 시공되어 있음
5) 지중배수대 : 지중배수대(Filter)가 누락됨
6) 기초지반(댐터)과 제당과의 접촉부 밀착시공 : Core Trench 굴착심도(d>0.3m)가 낮아 저수량 증가시 수밀성(지수) 기능이 부족함
7) 여수토 방수로와 기초암반과의 밀착시공 : Grouting 지수처리가 불충분함
8) 여수토 방수로 측벽과 제당과의 수밀성 시공 : 지수벽 설치 및 지수용 Grout 처리가 부족함
9) 제당 여수토 시공상태 : 지수용 Grout 처리가 부족하여 만수시 지중 누수의 우려됨
10) 제당의 양안부 시공상태 : 제당 우안부는 시공상태가 양호하나 제당좌안부는 (투수성 암반지반)으로 지수용 Grout 처리가 부족하여 지중 누수의 원인이 됨

3.5. 수밀성 시공조사

제당의 수밀성 시공상태의 미흡한 점은 다음과 같다.

1) 댐터 기초지반의 Core Trench 굴착심도 부족
2) 여수토 방수로 기초 층리암반의 차수용 Grout 처리 누락
3) 제당 좌안부와 여수토 접속부에 지수용 옹벽 날개벽의 단면이 부족
4) 여수토 방수로 측벽부와 제당 접합부에 지수벽 설치가 부족
5) 댐터 기초암반의 절리구조에 Curtain Grout 처리가 누락
6) 여수토 방수로 기초암반의 절리를 통한 침출수는 기초지반에 집수되어 제체 하류부를 포화 연약화시켜 기초지반에 연하는 침투 누수의 유로발생(Piping)의 원인이 될 수 있다.(숭상공사에 의한 저수량의 2배 증가로 양압력과 침투수압의 급증은 제당 기초의 Piping 작용의 결정적 위험 초래)

3.6. 유지관리 실적조사

유지관리의 체계, 유지관리 실적, 유지관리규정등의 관계자료는 전혀 없으나, 비전문가의 유지관리 요원이 현장을 관리하고 있다.

Ⅳ. 제당붕괴의 원인분석

현장조사, 제당 성토재의 시험, 시공관리자료, 참고인의 면담, 유지관리 자료등을 종합하여 보면 다음과 같은 사고원인을 분석할 수 있다.

4.1. 원인분석

1) 댐터 기초암반 기존 누수로와 Piping 작용에 기인
2) 숭상공사의 누수량 배증으로 Piping 촉진 원인
   (저수량 배증에 기인된 침투수압 배증으로 Piping 작용 촉진)
3) 기초처리 누락으로 양압력 상승 초래
   (저수량 배증에 의한 수압배증과 양압력 상승)
4) 지중배수대 누락으로 제당 지단 연약화
   (제당내 지중배수대 부재로 제당침윤선 상승과 제당 지단부 포화 연약화)
5) Key Trench 굴착심도 부족으로 기초지반 누수 초래

(제당기초의 Key Trench 굴착심도 부족의 지수처리 미흡)

6) 균일형 댐시공으로 침윤선 상승 초래
(성토재 불충분한 선정 및 시공관리 차이로 침윤선 상승 초래)

7) 여수토 방수로와 제당의 수밀성 및 시공 결여
(여수토와 제당 접촉부위의 수밀성 및 시공결함)

4.2. 보충자료 분석

1) 복통침하로 원제당 연약화
2) 제당 지단에 누수량 발견 곤란
3) 제당 수직균열 발생과 Piping 징조
4) 제당 수직균열 발생과 Piping 징조
5) 사고시 큰 굉음발생과 Piping 징조
6) 제당 좌안부 암반기초의 침출수 입증
7) 댐터 기초면의 중심점토벽 잔재없음

V. 결 론

5.1. 제당붕괴의 직접적인 원인은 기존 제당의 사고지점(댐터 경계면) 저부에 미세한 유로가 이미 생긴 상태에서 제당 숭상공사로 인하여 저수량이 배증됨 에 따라 침투수압의 배증과 양압력의 증가 및 기존 제당의 기초지수처리 미흡에 기인되어 제당기초의 장기적 누수(여수토 방수로 기초암반 절리를 통한 침출수)로 인한 제체저부의 장기간 관공작용(Piping)의 발달로 제체하부에 생긴 지중유로가 침식, 세굴, 확대되어 제당이 완전 붕괴된 것으로 판단됨.

즉, 제당 숭상공사후 저수량의 배증에 따라 숭상공사 전 제당에 상대적으로 기존 유로가 형성된 댐터 기초암반 누수부위에 침투수압(누수량)의 배증과 양압력의 증가로 Piping작용이 급진전되어 제당의 저항력 감소와 제당 하류부의 포화, 연약화, 열화의 촉진으로 기존 지중유로의 확대, 침식, 세굴작용의 발달에 의한 제당 Piping 붕괴가 유발됨.

한편, 기존 제당 누수는 숭상공사전(당초 제당 사용시)부터 누수되고 있었으나 그 누수량(침투수압)은 허용치 이내로 적어서 제당은 안전하였고, 제당 하류부 기초지반이 투수성 사력토 지반으로 지중누수되었으나, 그 누수량이 쉽게 지표면에 발견되지 않았을 것으로 사료됨.

5.2. 숭상공사전 당초 제당의 좌안부에서 여수토 방수로 기초에 연하는 댐터인 투수성 기초암반의 기초처리 누락에 기인되어 Piping 작용이 발전되었다고 사료됨.

5.3. 또한, 여수토 방수로 주변의 지수처리 미흡 및 수밀성 시공의 불량, 유지관리 소홀로 제체붕괴의 원인을 가중시켰음.

결론적으로 제당 숭상전 "당초 저수지의 기초지반 결함(지수처리 미흡)"으로 생긴 미세한 누수로 형성에 의한 관공작용(Piping 붕괴)으로 제당이 결궤됨. 즉, 숭상공사후 저수량 배증에 따라 기존 제당 암반기초의 절리를 통한 침출수에 의해 형성된 미세한 유로에서 누수량(침투수압이 큰 압력수)의 급증에 의한 Piping 작용으로 제당이 완전히 붕괴되었다고 판단됨.

Ⅵ. 제 안

6.1. 저수지 숭상공사용 기본조사 설계에 누수 현장조사 수리안정 검토필요(제당의 누수 및 포화도(연약화)조사와 저수량 증가에 따른 수리안정 검토)
6.2. 설계 기본자료 검토와 설계심의 강화
6.3. 적정 조사비 반영과 합리적 설계유도
6.4. 수리구조물 공사의 전문가 시공관리 시행
6.5. 유지관리기준 설계서 반영
6.6. 장기적 안정관리기법 및 국고절감법 검토

< 참 고 문 헌 >

1) Serge Lelivasky · Design of Dams For Percolation Arid Erosion. (Volume Three)
2) V.N.S Murthy · Soil Mechanics and Foundation Engineering.
3) United States Government Printing Office (1977). Disign Of Small Dam.
4) Joseph E.Bowles. Foundation Analysis And Disign (4th Edition)
5) Wayne C.Teng. Foundation Design (1980)
6) Foundation design and Construction (1986) by M.J.Tomlinson (5th Edition)
7) Soil Mechanics by Lambe-Whitman