

# 성암제 제당붕괴 사례분석

## (성암제 붕괴원인과 관공작용)

Technical Inspection of Seung-Am Dam Failure  
(Cause of Seung-Am Dam Failure and Piping Action)

이 인 형 (In-Hyung Lee) 농어촌진흥공사 전북지사 부지사장  
Vice Manager, JeonBuk Branch Office, Rural Development Corporation

### ● SYNOPSIS

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. These voids simply continue to erode and work their way backwards under the structure or they may collapse.

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

Either way, if piping is not stopped promptly, failure is imminent. The critical place for piping is usually right at the corner of the toes of a dam or at any place where seepage water exits.

The way to prevent erosion and piping and to reduce potentially damaging uplift pressures is to use a protective filter.

How is seepage against piping controlled?

- i) To construct cutoff wall/slurry trench.
- ii) To use a protective filter.
- iii) To lengthen a drainage path.
- iv) To instalate relief wells / toe drains.
- v) To cover impervious blanket.

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

### 1. 서 언

#### 1-1. 조사개요

본 조사보고서는 전남 무안군 무안읍 성암리 소재 무안읍민의 생활용수원으로 사용중인 무안군 시행 성암제 저수지 (상수도 수원지)가 1991. 8. 13일 장마철 강우기에 붕괴되어 이에 따른 제당 결계 원인의 도출 및 기술진단 자료용으로 활용키 위한 지질·기초 및 재료조사와 현장조사 및 토질시험을 실시 제반 조사·시공 기술자료를 근거로 하여 분석 검토한 제당붕괴 기술진단 보고서이다.

○ 성암제공사 개요는 다음과 같다.

- 공 중 : 성 암 제 (저수지)
- 용 도 : 무안군 무안읍 상수원 (수원지)
- 위 치 : 전남 무안군 무안읍 성암리
- 제 원 : 아래표와 같다.
- 표준도 : Fig. 1; 제당 표준단면도 참조

구 분	당초구저수지	승 상 공 사	비 고
저수지명	성 암 제	성 암 제	
제당길이	$L_1 = 120 \text{ m}$	$L_2 = 134 \text{ m}$	
제당높이	$H_1 = 15 \text{ m}$	$H_2 = 20 \text{ m}$	
설계 홍수량	$Q_1 = 17.50 \text{ m}^3/\text{sec}$	$Q_2 = 27.617 \text{ m}^3/\text{sec}$	
여수토 길이	$M_1 = 84 \text{ m}$	$M_2 = 125 \text{ m}$	
저 수 량	$V_1 = 25.6 \text{ ha.m}$	$V_2 = 56.7 \text{ ha.m}$	2배로 증가
제당 승상고	0	$h = 5 \text{ m}$	
공사(준공)기간	1980.12.30 준공	1989.9.16~1990.9.25	
제당이력	10 년	12 개월	
공 사 비		224,800천원	

#### 1-2. 조사범위

본 조사의 목적을 위한 조사범위 및 조사내용은 다음과 같다.

- 1) 조사범위 : 제당결계에 따른 설계기준자료 및 시공관리자료와 시공상태 및 제당붕괴 현황 조사시험
- 2) 조사내용 : 저수지의 설계시공 관련자료와 현장조사시험으로 구분조사 하였다

가. 자 료 조 사 (당초 구저수지와 승상공사 저수지의 설계 및 시공자료)

- ① 설계기준 자료조사 : 설계도서, 공사시방서, 설계서, 지질, 토질, 재료, 기초지반 조사시험 보고서, 기초처리공법, 준공도서, 준공정산서, 준공보고서
- ② 시공관리자료 조사

- 공정관리자료 : 공정표, 성토시공 관리도, 투취장 관리자료, 시공장비 사용실적, 여수토 시공관리자료, 공사재료, 공사기간, 기초처리, 기타 시공 관련자료

③ 유지관리자료

- 관리 체계 : 관리규정, 유지관리 점검실적, 정기점사, 관리인배치, 관리자능력, 조작기구 작동상태

나. 현장 조사

- ① 기초지반조사 : 지형, 지세, 토질 및 지질, 기초특성조사, 댐터 및 코아상굴선, 지지력, 무수도, 지하수위, 암반침출수, 피압용출수, 유기물, 용해성광물, 연약지층, 암질상태(절리, 풍화도), 여수토 구조물 기초지반상태, 지층구조, 단층, 파쇄대, 지질구조, 댐터 양안경사도 및 암질상태
- ② 지 질 조 사 : 지층구조·암질상태, 투수성, 지질구조, 지층의 퇴적 및 분포상황, 단층, 습곡, 절리, 균열상태, 지하수위, 용해성 광물, 기초처리
- ③ 공사재료조사 : 점토재, 성토재, Filter재, 토취장, 석재, 콘크리트재료 및 토질성토재의 물리성 및 공학적 특성 (다짐, 압축성, 투수성, 전단강도·입도)
- ④ 댐 단면조사 : 제당시공 단면조사(설계도와 준공도면), 제당구조도, 기초처리, 지수처리, 수리적인정성, 사면구배, 역학적 안정성, 댐형식, 재료적 안정성,
- ⑤ 시공상태조사 : 점토 및 성토시공 상태, Filter시공, 지중배수공, 지수처리공, 구조물 접합부시공, 여수토구조물 시공 상태, 붕괴구간현황, 다짐밀도, 누수, 침하, 팽동, 균열, 변형, 율류, 지진, 여수토주변지층, Core trench (기초터파기), 수밀성 시공상태, 기초처리실적, 투수성
- ⑥ 투수성 조사 : 기초지반의 투수성, 기반암의 투수성(댐터, 여수토기초, 복통구조, 제당양안부), 구조물과 성토접촉부 지수처리, 제당지중 배수처리, 댐터기초처리, 제당하류부(지단) 지층구조

다. 현장 시험

제체 및 여수토의 시공상태와 제당 붕괴요인으로 추정된 제반 요소를 조사하기 위한 기초자료로 우선 댐터주변 조사와 기초지반 조건, 성토재료와 제당의 성층상태 조사를 제당결계 양측단면에서 육안관찰과 병행하여 시굴과 오가 보링으로 현장 시공상태를 확인하면서 현장 조사·시험과 시료채취 및 현장 주변을 조사하였다.

제당 붕괴 주변조사를 위한 제체성토 부위 및 여수토 설치주변, 제당붕괴 지점 및 그 부근에서 현장 밀도시험, 현장 투수시험, 오가보링에 의한 성토재 조사를 하였고, 콘크리트, 석재, 기초지반의 지지력, 압축성, 무수도, 지수처리등 현장조사는 경험에 의한 육안판정을 하였으며, 대표지점에서 성토재, 점토재의 물리성 및 역학적 특성을 규명기 위한 실내시험용 토질시료를 채취하였다.

또한, 여수토 기초기반암의 지질구조 및 절리상태, 제당 좌안부의 층리상태와 절리부의 누수상태를 조사기 위해 강우직 후 여수토 방수로 기초암반 댐터에서 침출수 조사를 확인 촬영하였다.

1-3. 사고현황

성암제 제당은 1980년 12월 준공되어 무안 읍민의 상수도 수원으로 사용해 오던중 준공후 10년이 경과하여 무안 읍민의 인구 증가와 일일 용수량의 증가에 따라 필연적으로 상수원의 용량 부족현상이 일어나므로 경제적 대응책으로 당초 저수지를 승상(승상고 5m)하여 당초 수원지의 저수량(256천톤)보다 배증효과(승상공사후 저수량 567천톤)를 경제적으로 얻을 수 있도록 당초 제당을 확장 계획하였다.

제당 승상공사는 1990년 2월부터 착공하여 1990년 9월 30일 준공하였고 승상공사 시공중에도 불가피하게 계속 담수상태 하에서 무안읍민에게 수도물을 공급하였다.

승상공사 준공후 만수면까지 수개월 내에 일시에 담수하면서 장마철에 접하였고 만수상태 하에서 1991년 8월 13일 1시 30분 경 여수토 방수로와 제당 접속부위에서 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 수해 피해를 입어 하류부 마을 지선민에게 약 3억5천만원의 경제적 긴급 피해보상을 하였다.

Fig. 2 ; 제당 붕괴현황도 참조

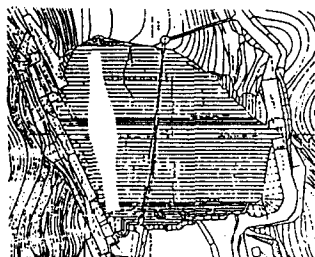


Fig 1-1. 평면도



Fig 1-2. 종단면도



Fig 1-3. 제당 표준단면도

## 2. 현장조사 및 시험

### 2-1. 조사의 착안점

1. 제당 붕괴상태 : 붕괴위치, 구간, 심도, 방향, 변형, 주변영향, 댐터지반의 중심점토 존재여부, 기초 세굴상태, 제당 침식상태
2. 댐터 기초지반 : 지질구조, 토성, 지지력, 투수성, 압축상태, 터파기, 기초처리, 복통 및 여수토기초조건, 양안접합부지질구조
3. 제정의 균열상태 : 균열구간, 범위, 심도, 방향, 길이, 폭.
4. 공사 재료 : 점토재, 성토재, 압축성, 다짐특성, 투수성, 다짐도, 성층상태,
5. 제당 시공상태 : 설계단면, 시공단면, 준공단면, 사면구배, 다짐도.
6. 기초처리 자료 : 암밀 Grout, Curtain Grout, 지수처리, Grout 위치와 범위, 댐터기초
7. 수밀성 시공자료 : 지수벽, Core Trench, 점성토다짐관리도, 구조물접합부 지수처리(복통, 여수토, 취수합), 양압력과 침투수압.
8. 제체지중배수시설 : 수평 Filter, 수직 Filter, 지중배수대, 감압정
9. 제당 월류상태 : 강우량, 수위관리, 유지관리, 기상자료.
10. 제당 안정조건 : 활동, 월류, 사면구배, 압축성, 침하, 누수, 양압력
11. 유지관리 상태 : 관리체제, 관리규정, 관리실적, 점검실적, 관리자능력

### 2-2. 조사 방법

본 성암제 저수지의 제당 붕괴에 대한 현장조사는 댐터를 중심으로 반경 300m 범위권 정밀 답사한 후 제당결계 원인 도출용 제반시공 기술자료를 수집 및 분석하기 위해 설계도서를 기준으로 현장조건과 연계 검토할 수 있도록 제체와 여수토의 시공상태 및 결계상황까지 확인조사 하였으며,

댐터 기초지반의 지표조사(지형, 지세, 암상), 지질조사와 축제 재료조사는 물론 성토 시공상태 및 공사재료의 적부판정을 위한 시굴, 오가보령으로 현장 밀도시험 및 현장 투수시험을 시행하였고, 토질의 공학적 특성을 규명하기 위하여 교란 및 불교란 시료를 위치별, 표고별, 재료별로 총 15점을 채취하였다. 현장에서 채취한 토질시료는 소정의 토질시험을 실시하였다.

### 2-3. 지질 조사

댐터 기초지반의 기반암은 화산암류인 용회암으로 절리가 상당히 발달된 연암, 보통암으로 구성되어 있으며, 특히 여수토 방수로 기초암반은 저수지 내측(구여수토 기초) 노두암으로부터 제당 하류부 암반까지 층리와 절리가 발달된 (균열) 암이며, 절리를 통해 암반수가 현재 갈수기 임에도 저수지 좌안부 산측 지반을 통하여 비가 온후에는 간헐적으로 지하수가 침출되고 있고, 우수기에는 암반 침출수가 제당 좌안산측에서 증가되었을 것으로 추정된다. 그러나, 침출수가 나오는 부위의 기반암은 약간 풍화가 진행중이며 주변암은 반심성암 형태로 강도는 크나 절리가 발달되어 있고 표면요철이 심하다.

특히, 제당 좌안부의 암질은 여수토 기초지반암까지 동일한 암질의 지질구조대로 화산성 퇴적암(용회암)으로 거의 수평층리를 이루고 있고 절리가 발달되어 누수의 원인이 될 수 있다. 댐 좌안부 기반암(여수토 방수로 기초)의 절리의 주방향은 No. 20°40W, 경사도는 70SW로 매우 심한 급경사 돌출암이며, 노두암 표면은 매우 신선하다. 여수토 방수로 기초바닥의 공동화 현상으로 보아 당초 저수지 공사시 기초지반내 Grouting 공사의 효과가 의문시된다.

### 2-4) 현장시험

#### ① 현장 투수시험

저수지 제당시공상태를 조사하기 위하여 현장에서 제체의 성토 부위별, 재료별, 표고별로 현장밀도 시험 및 현장 투수시험을 실시하였고, 그 시험결과는 다음표와 같다.

(시험표1) 현장 투수시험 결과표

구 분	조사공	측 점	현장밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	현장투수 (cm/sec)	시료채취 (점)	비 고	
중심점토	구	TP-6	No. 1+11	1.769	2.18 × 10 <sup>-6</sup>	2	
	신	TP-1-3	No. 4+10	1.693	2.156 × 10 <sup>-5</sup>	3	
		TP-5	No. 2+ 5	1.459	6.98 × 10 <sup>-7</sup>		
		TP-7	No. 2	1.675	3.84 × 10 <sup>-5</sup>		
내계성토	구	-	No. 1+11	1.764	-	1	
	신	TP-1-2	No. 4+10	1.493	1.974 × 10 <sup>-6</sup>	1	
외계성토	구	TP-4	No. 2+12	1.535	2.19 × 10 <sup>-6</sup>	1	
	신	TP-2	No. 3+ 6	1.643	1.93 × 10 <sup>-6</sup>	2	
계정부성토	신	TP-1-1	No. 4+10	1.481	2.83 × 10 <sup>-5</sup>	1	
여수토부성토	신	-	No. 0+ 3	1.458	-	1	
여수토취부성토	신	TP-8	No. 0+ 6	-	3.27 × 10 <sup>-4</sup>	1	라이닝끝사석 피복성토
여수토시점 (력질토)	신	TP-9	-	-	5.52 × 10 <sup>-2</sup>	1	여수토 시점 용벽
여수토부성토	신	-	No. 0+ 3	1.459	-	1	
계						15 점	

② 현장 밀도시험

제당 성토부의 다짐상태를 조사하기 위하여 측정별로 실시하였고 그 시험결과는 다음표와 같다.  
(시험표 2) 현장 밀도시험 결과표

조사공	구분	측점	지반고 (m)	기준 다짐사항			현장밀도 (건밀도) $\gamma_d(g/cm^3)$	다짐도 D(%)	기준 (%)	판정
				$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	Wopt (%)	$\gamma_{tmax}(g/cm^3)$				
TP1-1	내제성토	No. 4+10	57.40	1.663	20.30	2.001	1.481	89.06	'95	불량
TP1-2	"	"	56.49	1.680	20.10	2.018	1.493	88.9	"	불량
TP1-3	"	"	54.79	1.745	17.60	2.025	1.693	96.96	"	양호
TP2	외제성토	No. 3+6	47.80	1.850	15.05	2.128	1.643	89.03	"	불량
TP4	"	No. 2+12	53.19	1.812	14.80	2.080	1.535	84.7	"	불량
TP5	신제방 점토	No. 2+5	51.69	1.615	20.70	1.949	1.459	90.3	"	불량
TP6	구제방 점토	No. 2+11	50.69	1.803	15.90	2.090	1.769	98.1	"	양호
TP7	신제방 점토(II)	No. 2	51.20	1.815	14.80	2.084	1.675	92.3	"	불량
여수토쪽 (성토)	성토	No. 0+3	54.80	1.812	14.80	2.080	1.459	80.5	"	불량
여수토쪽 (점토)	점토	No. 0+3	54.80	1.615	20.70	1.949	1.458	90.2	"	불량

③ 현장 투수시험 분석

제당 성토부 및 원지반상태의 투수도를 조사하기 위하여 측정별, 위치별로 시공상태의 현장 투수시험과 다짐시(D=95%) 실내 투수시험을 병행하였으며, 그 시험결과는 다음표와 같다.

(시험표 3) 투수도 분석표

조사공	측점	지반고 (m)	실내투수시험 (cm/sec)다짐시	현장투수시험 (cm/sec)자연상	구분	판정
TP1-1	No. 4+10	57.40	$8.5 \times 10^{-7}$	$2.83 \times 10^{-5}$	제정	반투수
TP1-2	No. 4+10	56.49	$5.01 \times 10^{-7}$	$1.974 \times 10^{-6}$	신제당 내제성토	불투수
TP1-3	No. 4+10	54.79	$1.23 \times 10^{-5}$	$2.156 \times 10^{-5}$	신제당 점토	반투수
TP2	No. 3+6	47.80	$6.24 \times 10^{-7}$	$1.93 \times 10^{-6}$	외제점토	불투수
TP4	No. 2+12	53.19	$8.66 \times 10^{-7}$	$2.19 \times 10^{-6}$	외제점토	불투수
TP5	No. 2+5	51.69	$4.98 \times 10^{-7}$	$6.98 \times 10^{-7}$	신제방점토	불투수
TP6	No. 1+11	50.69	$8.1 \times 10^{-5}$	$2.18 \times 10^{-6}$	구제방점토	불투수
TP7	No. 2	51.20	$1.36 \times 10^{-6}$	$3.84 \times 10^{-5}$	신제방점토(II)	반투수
TP8 다	No. 0+6	54.60	$2.25 \times 10^{-6}$	$3.27 \times 10^{-4}$	라이닝끝 사석 피복성토	투수성
TP9 나	여수토시점 (자갈층)	54.80	-	$5.5 \times 10^{-2}$	여수토시점 용벽 날개	투수성

\* ① 제당 진동 균열로 성토부 침하균열에 의한 교란의 영향으로 성토부가 느슨하게 되어 투수계수가 크게 증대된 것으로 추정됨  
② 여수토시점 용벽 날개 부위는 사력질 투수지반임.

2-5. 토질시험

현장(제당상류부, 제당중심부, 제당하류부, 구조물 접합부)에서 채취한 실내 토질시험용 시료는 제당 성토재로 사용된 흙의 기본적성질과 공학적 특성을 규명하기 위해 실내 시험실에서 한국공업규격 시험법에 의한 제반 물리성 및 역학시험을 다음과 같이 실시하였으며 그 시험결과는 다음 토질 시험성과표와 같다.

가. 물리성 시험

- ① 입도 시험 ( KSF - 2302 )
- ② 액성한계 ( KSF - 2303 )
- ③ 소성한계 ( KSF - 2304 )
- ④ 함수비측정 ( KSF - 2306 )
- ⑤ 비중 ( KSF - 2308 )
- ⑥ #200제 통과량 ( KSF - 2309 )
- ⑦ 단위체적중량 ( KSF - 2311 )

나. 역학시험

- ① 직접전단시험 ( KSF - 2343 )
- ② 현장무수시험 ( KSF - 2322 )
- ③ 삼축압축시험 ( KSF - 2346 )
- ④ 실내무수시험 ( KSF - 2322 )
- ⑤ 현장밀도시험 ( KSF - 2311 )
- ⑥ 다짐시험 ( KSF - 2312 )

[시험표 4] 토 질 시험 성과 표

시 료 번 호		중심(상단)	중심(중단)	중심(하단)	승상제방	구제방
자연함수비 Wn(%)		8.44	13.55	10.57	13.70	12.20
비 중 (Gs)		2.661	2.672	2.671	2.666	2.671
Atterberg Limit (%)	액성한계 LL	37.7	36.5	38.2	36.0	31.2
	소성한계 PL	28.0	23.4	26.0	24.0	22.0
	소성지수 PI	9.7	13.1	12.2	12.0	90.20
Sieve analysis (%) Passing Sieve size	NO 4	84.98	86.60	89.90	86.48	72.85
	NO 10	72.04	75.90	78.19	75.54	61.84
	NO 40	53.79	55.22	60.94	55.44	44.82
	NO 100	47.08	46.90	53.80	47.22	37.40
	NO 200	42.83	42.28	51.90	43.98	32.98
	유효입경(mm)	0.0012	0.0024	0.0030	0.0040	0.0070
U S C S (통일분류)		SM	SM	SC	SC	SM
Compaction Test	$\gamma_d \text{ max(g/cm}^3\text{)}$	1.70	1.74	1.70	1.70	1.72
	Wopt(%)	16.40	15.80	14.40	14.80	15.50
	시공함수비(%)	11.0-21.0	11.0-19.8	10.0-18.5	10.0-18.8	11.0-19.8
투 수 계 수 (cm/sec)		$2.44 \times 10^{-8}$	$6.76 \times 10^{-8}$	$8.0 \times 10^{-8}$	$2.6 \times 10^{-8}$	$5.9 \times 10^{-8}$

### 3. 현장 조사 · 시험 결과

#### 3-1. 제당 붕괴 현황

1. 성암제 저수지 제당 결체 사고일은 1991. 8. 13 01:30 시경이다.
2. 제당 붕괴위치는 제당 중심선 기준 측점 No.0+2 ~ No.2+13 이고(중심 측점 No. 1) 결체 구간은 연장 길이  $l=51.0m$  이다.
3. 제당 붕괴현황은 제당 상부(제정)에서 댐터 기초지반(원지반)까지 (상폭  $B_1=51.0m$ , 저폭  $B_2=4.0m$ , 높이  $H=21.7m$ ) 깊게 결체(유실)되어 있고, 파괴 종단 사면구배는 1:2이며, 댐터 기초지반 횡단구배는 1/130 정도이고, 유실된 제체 부근에서 부분적 부동침하와 균열이 심하고 상류부 저수지 내 사면보호용 사석재가 제당 하류부까지 유실 이동되어 있다.
4. 저수지 제당 중심선(댐축)과 직각 방향으로 균열이 심하게 발생되어 있으며, 그 균열이 심한 구간은 붕괴구간 양측 시점을 중심으로 우측길이  $l_1=37m$ , 좌측 길이  $l_2=6.0m$ 이고, 결체 구간을 합하여 총  $L=94.0m$ 이다.
5. 결체된 댐터의 바닥기초는 지지력이 양호한 암반 기초로 질리가 불규칙하게 발견되며 부분적으로 협채된 풍화암(파쇄암)의 균열부위(절리)를 통해서 (위치 No.1 에서 댐축기준 상하류 0.6~3.5m 구간내 돌출 암반의 절리) 저수지 좌안 산측으로부터 암반 지하수가 미세하게 침출되고 있다.
6. 댐축과 직각방향으로 설치된 여수토 방수로 급류부( Box형 암거로 시공되어 있음) 하류측 기초지반은 과대역굴된 암반기초로 깊이 0.5~1.0m 정도로 세굴되어 공동화된 상태이고, 암반기초의 절리로부터 미세한 암반수가 저수지 바닥 기초로 흐르고 있고, 노출된 암반 표면은 매우 깨끗한 상태이다.
7. 여수토 방류공 (배수암거) 좌측 콘크리트 측벽은 붕괴시 성토부의 유실로 저수지의 상류부에서 하류부까지 완전히 노출되어 있고, 구 여수토 측벽 지수벽 하부에 당초 시공된 점토가 부착되어 있으며, 여수토 바닥 기초는 심하게 공동화되어 기초 절지면까지 표출되어 있다.
8. 여수토 방수로 급류부 Box 암거 상부는 성토부위가 완전히 유실되어 슬래브 콘크리트가 깨끗하게 노출되어 있다.
9. 제당 좌안(여수토 좌측 산측)의 제당 성토부위는 원상태 형태로 존재하나 댐축과 직각으로 균열이 심하며, 부동침하가 생겼고, 하류부 제당사면의 일부가 유실되어 방수로 측벽이 상당히 노출되어 있다.
10. 여수토 방수로 급류공 배수암거는 기존 여수토 측구 측벽을 거푸집으로 이용하여 상자형 암거로 설치되어 있고, 붕괴사고로 인하여 신,구 콘크리트 벽체가 크게 벌어져 있다.
11. 저수지 내부의 저수상태는 저수지 바닥 기초보다 낮은 사수위 심도의 내용적만큼 저류되어 있고 댐터의 암반기초가 상류부측으로 틈을 이루고 있다.
12. 제당붕괴 하류부(여수토 방수로 말단과 인접 지단)는 자갈섞인 사질토가 퇴적되어 구하상과 연결된다.
13. 본 저수지의 결체 사고로 인하여 하류부의 농경지 침수 및 매물 가축막사와 가옥 파괴등으로 사회적 물의와 재산피해의 민원이 발생되었다.
14. 성암제 관리인에게 제당 결체 당시 상황을 개략 청취한 바, 1991. 8. 13일 밤 1시 30분경 광하는 굉음소리에 놀라 여수토 방수로 측으로 가던중 여수토 배수 암거탐토구 수로 방향에서 물이 돌면서 갑자기 누수량이 많이 흘러 내려가는 것을 목격하여 저수지 붕괴를 예측하고 즉시 무안군청에 연락한 후 급히 마을 주민들을 대피시켰다고 함. 또한, 사고당일 밤중에 저수지 하류부 마을주민 4명이 광! 굉음소리에 놀라서 밤중에 저수지 관리인 숙소까지 와서 저수지 붕괴사고 발생을 확인하고 사고 대피하였다고 함.  
한편, 1991. 7월 초순경부터 장마철 우기중에 저수지 좌측산과 연결된 제당 사면부(여수토 좌단)에서 계속해서 누수현상이 가시적으로 발견되어 군에 보고된 상태이다.

#### 3-2. 기초지반조사 (댐터 기초지반, 여수토 기초지반, 양안부 기초지반)

붕괴구간내 댐터 기초지반은 양질의 암반지반으로 지지력이 양호하여 침하와 기초 무수에 위험성이 없는 암반 기초지반 조건이나 제당 좌안부와 여수토 방수로 기초지반은 화산성 퇴적암(용회암)으로 수평층리를 이루고 있고 여수토 방수로 기초 돌출암은 경암이나 섬록질의 절리가 발달한 급경사 노두암으로 제당 좌안부 산측에서 발원된 암반지하수가 이들 절리를 통해 여수토 방수로 기초부까지 지속적으로 침출수가 누출되고 있으며, 침출수는 강우기나 저수지의 저수량이 풍부할수록 누수량이 많을 것으로 추정된다. 당초 여수토 기초와 저수지 좌안부의 기초에 지수형 기초처리가 누락되어 있었다.

댐터 기초지반 내의 지하수위는 제당 하류부 하상수면의 정제 수위로 보아 댐터 상굴면에서 2~3m 이상 깊은 곳으로 추정되므로 지하수의 영향은 없음.

#### 3-3. 축조재료 조사

제당의 붕괴부위 양측면과 제체에서 측점별, 지수벽(점토)과 외벽토(성토)별 및 표고별로 승상공사 및 토질시험 결과 당초 제당과 승상공사 제당용 점토 및 성토재료는 공히 사용가능한 재료(흙 분류상 SC, SM, ML)이다. 중심점토(심벽토)재는 주로 사질점토로 중심점토 재료로 사용가능한 것으로 판단된다.

또한 축조재료의 다짐시험, 무수시험, 역학시험 결과 축조재료로서 다짐밀도, 수밀성, 전단강도를 충분히 갖는 사용가능한 재료이며, 그 시험결과는 토질시험 결과표와 같다.

한편, 무수시험 결과(실내 무수시험과 시공상태의 무수시험과는 다소 차이가 있음) 성토재료인 외벽토와 심벽토(지수준용, 중심점토)의 무수성( $K1/K2 < 1/10$ )으로 보아 본 제당은 중앙심벽(지수준, 중심코아)형 제당으로 볼 수 없고 시공상태를 기준하면 균열형 제당으로 보는 것이 타당하다.

### 3-4. 시공상태 조사

#### 1) 재료선정상태

제체의 성토단면은 지수성(불투수성), 투수성, 반투수성 구분이 불분명하며 심벽부 지수용 점토재와 외벽부 성토재가 거의 동일재료로서 혼용성토 되어 있어 설계상 중심심벽(Core)형 댐이나 시공상태는 재료 성토기능상 균일형 댐으로 시공되어 있다.

#### 2) 성토 다짐상태

제당 성토부의 현장 밀도시험 결과 대체로 양호하나 일부 조사지점은 표준 다짐기준값 이하로 발견된다. 이는 사고당시 제체의 진동 충격의 영향으로 성토부가 교란될 수 있으며 성토 다짐시공 관리자료가 없어 정확한 비교판단이 곤란하다. 그러나, 제체 사면부의 일부구간은 다짐 불량으로 추정된다.

#### 3) 투수도

사용된 점토 및 성토재는 공히 불투수성 재료이며 현장 투수시험 결과 불투수성 및 반투수성으로 확인되었다. 제당의 균열 및 부등침하 부근에서는 투수성으로 확인되었으나 이는 붕괴사고로 인한 지반교란의 영향으로 추정된다.

한편, 여수로 시점부위는 투수성 지반이며 지수처리가 누락되어 있다. 또한, 제당 하부 복통(통관) 토구에 물이 포화되어 있고 통관 내부벽에 미세한 누수가 침출되고 있으며 승상시공중 Grout 흔적이 보인다.

#### 4) 사면구배

제당의 사면구배(내사면 1:2.3, 외사면 1:2.0)는 설계도면과 일치하게 시공되어 있으나 시공된 균일형 댐 형식상 소요 사면구배 기준보다 다소 부족한 상태임.

#### 5) 지중배수대

제체 중앙부 중심점토 외측에 지중배수대(Filter)가 누락되어 있어 포화시 침윤선 상승으로 인한 지중유도 배수기능이 없어 제체 하류부가 포화 연약화될 수 있다.

#### 6) 기초지반(댐터)과 제당과의 접촉부 밀착시공

제당이 중앙심벽부 기초지반(댐터 기초 터파기)의 Core Trench 굴착심도( $d > 0.3m$ )가 낮아 저수량 증가에 의한 침투압 상승시 기초바닥에서 수밀성 기능이 어려울 것으로 판단됨

#### 7) 여수로 방수로와 기초암반과의 밀착시공

제당 중앙 뿔단부의 방수로 기초에는 제한적으로 소구간만 Grouting 지수처리의 흔적이 보이나 소요기능상 불충분하며 하하류측 방수로기초는 암반이 여굴된 상태에서 사석재로 성토 시공되었고 댐터 기초암반까지 Grout 기초처리는 하지 않았음

#### 8) 여수로 방수로 측벽과 제당과의 수밀성 시공

여수로 방수로 측벽과 제당 중심선 성토재 접합부에 연하는 지수벽 설치 및 지수용 Grout 처리가 부족한 상태로 수밀성이 결여됨

#### 9) 제당 여수로 시공상태

여수도는 좌안부 산측에 인접되어 시공되어 있고 기초지반은 사력질토의 투수성 지반과 층리 암반상에 연결되어 있어 제당과 여수로 접합부 및 여수로 바닥에 지수용 Grout 처리를 하였다.

그러나, 좌측산비탈에 연결된 여수로 상류부 좌단의 용벽날개(지수벽)는 단면이 부족(길이, 높이)하고 지수용 Grout 처리가 누락되어 있어 만수시 누수의 우려가 크다. 또한 신설 여수토의 위치는 현장 지형조건 및 승상공사 시공 조건상(시공중 급수공급, 발파 제한, 급경사 지반, 기존 유로, 공사비) 타당하다고 사료됨

#### 10) 제당의 양안부 시공상태

제당 우안부는 기초지반이 불투수성 암반으로 시공상태가 양호하나 제당 좌안부는 기초지반이 불량(투수성 암반지반)하고 지수용 Grout 처리가 부족하여 기초암반의 절리를 통해 지중 누수의 원인이 될 수 있다.

### 3-5. 수밀성 시공조사

제당의 수밀성 시공상태의 미흡한 점은 다음과 같다.

- 1) 댐터 기초지반의 Core Trench 굴착심도가 댐 규모에 비해 너무 낮아 수압증가에 따라 침투수압 증가시 누수의 원인이 될 수 있다.
- 2) 여수로 방수로 기초암반 돌출암의 균열상태는 제당부 좌측산 층리암반과 연결되어 있으나 차수용 Grout 처리가 누락되어 있다.
- 3) 제당 좌안부와 여수로 접속부에 지수용 용벽 날개벽의 단면이 부족하여 누수의 우려가 된다.
- 4) 여수로 방수로 측벽부와 제당 접합부에 지수벽 설치가 부족하다.
- 5) 댐터 기초암반의 절리구조에 Curtain Grout 처리가 누락되어 저수량이 클 경우 양압력이 크게 작용할 수 있다.
- 6) 여수로 방수로 기초암반의 절리를 통한 침출수는 기초지반에 침수되어 제체하류부를 포화 연약화시켜 기초지반에 연하는 침투 누수의 유로발생의 원인이 될 수 있다. 저수량의 2배 증가에 따라 양압력의 증가와 침투수압의 급증은 제당 하류부에 Piping 작용을 촉진하는 결정적 위험을 초래할 수 있다.

### 3-6. 유지관리 실적 조사

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

※제당 붕괴조사도 : Fig. 3 ; 제당 붕괴현황 조사도 참조

## 4. 제당 붕괴의 원인 분석

현장조사, 제당성토재의 시험, 시공관리자료, 참고인(관리인, 지역주민)의 면담내용, 유지관리 자료등을 종합하여 보면 다음과 같은 사고 원인을 분석할 수 있다.

### 4-1) 원인 분석

#### 1) 기초압반 누수와 Piping 작용에 기인

(기초압반의 절리를 통한 누수와 Piping 작용)

제당 기초압반 침출수(제당 기초 좌안부 여수로 방수로 기초 절경사 돌출 압반과 좌측산의 층리 및 여수로 직하부 기초 층리 암의 절리구조)는 상시 침출(누수)되었을 것으로 보이며 이곳 압반 침출수의 장기간 누수에 의한 제체 하류부의 포화, 열화 및 누수로 자연적 지중유로 형성과 승상공사 후 담수시 저수량 증가에 따른 양압력 증가와 침투수압(누수량) 급증에 기인되어 장기적 내부 침식과 유로확대 발전 및 부압증가로 관공작용이 점진적으로 계속 발전하여 결정적인 제당붕괴의 원인이 되었다고 추정됨

#### 2) 누수량 배증으로 Piping 촉진 원인

(저수량 배증에 기인된 침투수압 배증으로 Piping 작용 촉진)

제당 기초압반의 투수성 절리구조와 차수용 기초처리 누락으로 인하여 제당 승상공사전(당초 제당)부터 이미 누수발생으로 유로가 형성되었으나 저수량이 적어 누수량(침투수압)이 극소로 제당은 안전상태이었으며, 제당 승상 공사 후 저수량이 배증되어 침투수압(누수량)의 배증에 기인되어 관공작용(Piping)이 급속히 발전하여 제제기초 내부에 지중세굴을 촉진 제당 붕괴 유발시킴.

#### 3) 기초처리 누락으로 양압력 상승 초래

(저수량 배증에 의한 수압배증과 양압력 상승)

댐터 기초압반의 절리구조발달과 Curtain Grout 처리 누락으로 저수량 배증에 따른 양압력 배가로 제당의 안정성 격감과 제당 기초처부가 부상, 열화 연약화되어 Piping 작용시 토립자 유실과 팽리현상을 촉진시킴.

#### 4) 지중배수대 누락으로 제당 지단 연약화

(제당내 지중배수대 부재로 제당침윤선 상승과 제당 하류부 지단포화 연약화)

승상제당 단면내에 지중배수대(Filter, 수평배수대)가 누락되어 제체내 유도배수로의 기능부재로 침윤선이 상승되어 제체하류부가 포화열화되어 연약화 됨.

#### 5) Key Trench 굴착심도 부족으로 기초지반 누수 초래

(제당기초의 Key Trench 굴착심도 부족으로 지수처리 미흡)

당초 제당 압반기초의 Core Trench(Key Trench)의 굴착심도가 부족하여 수밀성 시공이 결여되므로 침투수압이 클 경우(승상공사 후) 댐터 기초 지반면을 통한 침투수에 의해 누수증가 Piping 원인 제공

#### 6) 균일형 댐시공으로 침윤선 상승 초래

(설계 및 시공의 댐형식 차이로 침윤선 상승 초래)

축제재료의 수급균형 불만족과 시공관리의 미흡으로 설계댐형식은 중심코아 형식이나 균일형 댐으로 시공되어 침윤선 상승 초래와 제당 Filter의 누락으로 침윤선 강하 유도 기능 부족현상과 균일형 댐기준의 단면 (확대)부족으로 제체 하류부의 포화 및 지지력 감소

#### 7) 여수로 방수로와 제당의 수밀성 시공 결여

(여수로와 제당 접촉부위의 수밀성 시공결여로 제당 하류부 유실 초래)

여수로 방수로 축벽과 제당 접촉부에 Concrete의 지수형 날개벽 설치의 부족과 수밀성 지수처리(Grout)의 부족으로 제당 하류부 성토재 유실 초래됨

### 4-2) 보충자료 분석

#### 1) 복통침하로 원제당 연약화

(시공중 복통 침하로 원제당 기초부에 Grout 보강 처리함)

승상공사중 복통부위가 침하 누수되어 복통의 제당 평단 구간주변에 Grout 보강 처리하여 지수처리 및 지지력을 확보한 실적이 있음.

이는 기존 제당의 복통 기초부가 오래동안 포화로 누수되어 지반의 연약화로 지지력 부족과 침하현상이 발생된 증거임.



2) 제당지단에 누수량 발견 곤란

(제당 하류부의 투수성 지반으로 누수량 발견 곤란)

제당 기초지반은 당초 구하천의 하상지반으로 표토층은 투수성 사력토 지반이고 지중하부는 화산성 용회암으로 제당 좌안부는 질리가 발달된 투수성 지반이므로 소량의 누수량은 지중배수되어 발견되지 않으나 제당 하류부 지단 끝과 제당 하류부 토공배수로는 항상 포화상태임.

3) 제당 수직균열 발생과 Piping 징조

(제당 제정부에 심한 균열 발생으로 Piping 붕괴 징조 표출)

제당의 제정부에서 붕괴지점을 중심으로 멀어질수록 균열의 상태(폭, 심도, 두께, 길이)는 작아지고 있으나 모든 균열상태는 댐측에 직각이며 붕괴지점 부근에서 제정 내외측에 길게 수평균열도 보이므로 이는 Piping 작용의 특징과 흔적을 잘 나타내고 있음.

4) 사고시 큰 평음 발생과 Piping 징조

(제당붕괴 사고시 큰 평음발생으로 인근 주민의 대피소동 발생)

제당붕괴시 비가 내린 밤중으로 큰 평음에 놀라 인근주민과 댐 관리인이 댐 붕괴진행과 제당 누수가 심한 것을 확인하고 주민에 비상연락 및 긴급 대피한 실적이 있었다.

이는 Piping 작용으로 저수지 내부의 장기간 세굴작용에 의한 지중관로에 생긴 부압상승 압력과 제당 지중관로가 상류 내사면까지 확대 발전하여 관통시 수면의 상온기압과 제체 내부 관로내의 부압과의 상쇄 동압관계에서 순간적인 평음이 발생한 다. 평음 발생은 침투수 압력이 클수록 제당 기초의 저부에서 Piping이 일어났음을 입증하는 증거이다.

5) 제당 암반기초의 침출수 입증

(제당 기초암반의 침출수 누수 확인 입증)

제당 붕괴지반의 기반암(여수토 방수로 기초 돌출암)의 질리로부터 강후직후 2~3일 후에 암반침출수가 수차례 발견되어 사진 촬영하였음.

이는 지형, 지질구조로 보아 제당안좌부 산측에서 스며든 강우량이 제당여수토 방수로 지하기초 암반의 질리를 따라 침출 누수된 것으로 사고부위 제당 기초 질리구조대는 지중으로 좌측산 기초암과 연결되어 누수되고 있는 것임을 입증 시켜주는 것임 (사진 참조)

6) 댐터 기초면의 중심점토벽 잔재 없음

댐터 기초지반의 수밀성 시공이 완전하면 수압과 토압 및 제당의 구조와 수리공학적 특성상 댐터 기초지반에 중심점토 벽의 잔재가 존재하여야 하나, 본 지구 사고부위에는 기초바닥까지 완전 세굴되어 있다.

5. 결 론

5-1. 제당붕괴의 직접적인 원인은 제당 승상공사로 인하여 저수량이 배증됨에 따라 침투수압의 배증과 양압력의 증가 및 기존 제당의 기초 지수처리 미흡에 기인되어 제당기초의 장기적 누수(여수토 방수로 기초암반 질리를 통한 침출수)로 인한 제체 저부의 장기간 관공작용(Piping)의 발달로 제체 하부에 생긴 지중유로가 침식, 세굴, 확대되어 제당이 완전 붕괴된 것으로 판단됨.

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

한편, 기존 제당 누수는 승상공사전(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. 승상공사전 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 승상공사 후 저수량 배증에 따라 제당 암반기초의 질리를 통한 누수량(침투수압이 큰 압력수)의 급증에 의한 Piping 작용으로 제당이 완전히 붕괴되었다고 판단됨.

## 6. 처리대책

본 성암제의 제당은 현 붕괴상태 하에서 붕괴부위만 구간 보수하여 재사용하기에는 제당 안전도의 신뢰성과 안전성 면에서 불안하므로 기존 제당을 완전히 제거하여 전 구간을 완전 복구 재시공함이 타당하다고 사료됨.

그 이유로는

- 1) Piping(관공작용) 발생시 큰 진동(큰 굉음)에 의한 제당 전체가 충격을 받아 교란되었고,
- 2) 장기간 포화 누수에 의해 제체 하류부 지단이 포화 열화된 상태이며,
- 3) 제당 붕괴상태가 제당 전체에 비해 과대하며,
- 4) 댐 터 기초바닥의 Core Trench 굴착심도가 매우 얕아 양압력, 침투압에 저항성이 적고,
- 5) 기존 제당의 제체 단면에 지중 배수대가 누락되어 있어 침윤선이 높아 제체 안정성이 불안하며,
- 6) 균일형 댐으로 시공되어 있어 제당 단면이 부족하며,
- 7) 기존 제당의 복통 부위가 부분 침하 및 누수되고 있고
- 8) 제당 좌안부와 여수로 방수로 기초 암반까지 지수용 기초처리가 요구되기 때문이다.

본 저수지의 조사, 설계 및 시공은 설계 전문기관(용역회사)에서 전문기술자의 기술자문과 병행하여 유지관리의 대책도 강구함이 필요함.

만일 붕괴된 현 상태의 저수지를 보완 재이용코져 할 경우에는 제체내의 누수경로를 추적 보완, 기초의 수밀성 시공, 물넘이 재시공, 복통보수와 제당 성토보수, 내사면 누수방지등 충분한 조사, 시험자료(재료, 기초지반, 시공법)를 근거로 댐 기초처리에 유의하여 보완설계 처리대책을 면밀히 강구함이 필요함.

참고적으로 복구단면은 1) 단면확대 2) 지중배수대 설치 3) 기초지수처리 4) 지수벽 확대 5) 중심점토형 댐 형식 선정등이 요구된다.

## 7. 교훈 및 고찰

- 1) Piping(관공작용)의 정의는 투수성 지반에서 수두차에 의한 양압력과 침투수압이 작용하면 침투수에 의한 지중의 세립토를 침윤, 세굴시켜 지중에 물통로(관로)가 생기는 현상이다.
- 2) Piping 작용은 댐(토언제)를 결체시키는 주요원인이 된다.
- 3) Piping 원인은 양압력과 침투수압에 기인된다.
- 4) Boiling 현상은 Piping의 전단계 징조이다
- 5) Boiling 현상은 침수상태의 저수압 누수이고 Piping은 탁수상태의 고수압(고속 압력수) 누수이다.
- 6) Piping 작용은 지중관로의 흐름으로 지중관로를 확대, 침식, 세굴 시킨다.
- 7) Piping 작용중 침출수 속도에 따라 내부부압이 비례 상승한다.
- 8) Piping 작용시 상하류 지중관로가 관통할 때 큰 굉음(부압의 등압상관관계)을 발생한다.
- 9) Piping에 의한 굉음의 크기는 지중관로 내부의 부압강도에 비례한다
- 10) Piping에 의한 댐 붕괴는 제정 표면을 수직균열 시킨다
- 11) Piping 방지대책은
  - ① 지수벽 설치
  - ② 배수대 설치
  - ③ 침투로장 확대
  - ④ 감압정 설치
  - ⑤ 블랑킷 설치등이다.
- 12) 토언제 승상공사 시에는 저수량 증가에 따른 Piping의 안전검토가 요구된다.
- 13) 수리 구조물의 안전관리는 준공 후 시설물의 자체 안정기간까지 과학적인 유지관리가 요구된다.

## 8. 제안 의견

- 8-1. 주요 수리구조물(댐) 설계는 충분한 조사시험 분석과 공사 시공법이 가장 중요하므로 계획, 조사, 설계, 시공 및 유지관리 면에서 전문기술자에 의한 설계 검토 및 시공관리가 구조물의 안정성과 내구성은 물론 장기적 국가예산 절감면에서도 절실히 요구된다.
- 8-2. 공사감독과 현장 기술자의 자질도 중요하지만 공사중 시공관리의 기술자료 수집도 매우 중요하므로 선진국처럼 전문기술자의 시공감리를 병행하여 공정관리, 품질관리 및 원가관리에 특별대책이 요구된다.
- 8-3. 주요 구조물의 시공관리 자료는 공정 단계별로 시공 기술자료, 품질관리자료, 재료 수급자료, 기타 공사 관련 중요자료 및 공사 준공보고서등이 유지관리 자료로 활용될 수 있도록 제도적으로 기록 보관되어야 한다.
- 8-4. 건설기술 분야처럼 자연과학 기술은 기술선진화를 위하여 장기간 실험적, 경험적, 통계적 자료에 의거 기술개발(공법개발)이 되므로 관, 민, 학계와 연계 산학협력체 또는 국가기술관리 전문 연구기관에서 세부적 설계기준이 지속적으로 개발 정립되어야 한다.

Fig. 1 : 성암제 제당 표준단면도

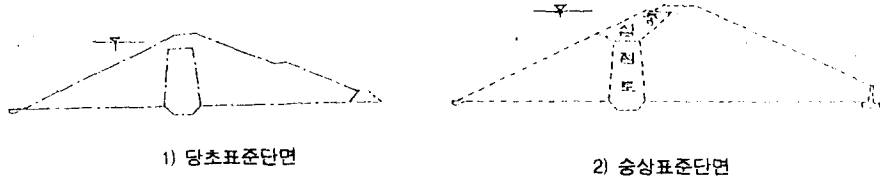


Fig. 2 : 성암제 제당붕괴 현황도

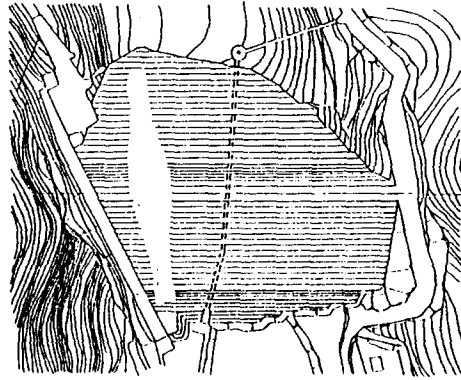


Fig. 2-1. 평면도



Fig. 2-2. 종단면도

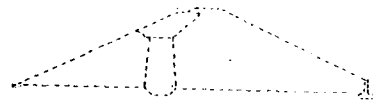
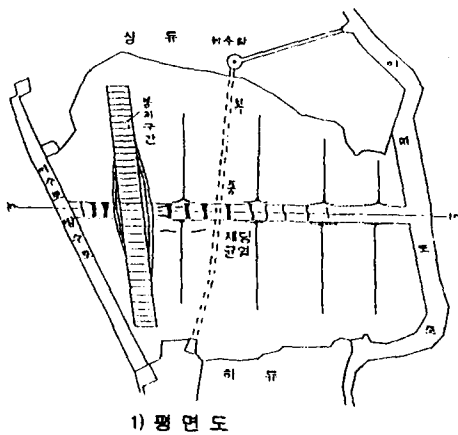
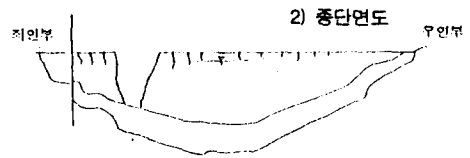


Fig. 2-3. 제당 표준단면도

Fig. 3 : 성암제 제당 붕괴현황 조사도



1) 평면도



2) 종단면도

