

## 하천제방 붕괴 양상의 실험적 연구(Ⅰ)

### - 단면의 기하학적 특성치의 영향

### An Experimental Study on the Collapse Phase of a River Levees(Ⅰ)

#### - Effects of the Geometric Characteristics of Cross Section

이 상 태\* / 이 종 태\*\*

Lee, Sang Tae / Lee, Jong Tae

---

#### Abstract

An experimental study was performed to investigate the effects of levee crest width and the slope steepness on levee break due to overtopping flow. The phenomenon of bank failure can be described in 4 stages. In this study, the magnitudes of breach width, breach depth, peak discharge, and scouring shape at the break site were measured, and the result shows that peak discharge will be reduced and breach duration extended by widening the crown width and lessening the levee slope steepness. The breach width was narrower and the breach depth deeper, as the levee crest width become wider or the slope steeper. And, the bed scour depth was deeper and steeper, as the levee crest width become narrower or the slope milder.

*keywords* : levee, levee crest width, slope steepness, levee break, scour, peak discharge

---

#### 요 지

본 연구는 하천제방의 마루폭, 비탈 경사가 월류에 의한 제방의 붕괴에 미치는 영향을 분석하기 위한 수리모형 실험으로부터 하천수의 제방월류에 따른 붕괴과정을 4단계로 구분하여 제시하였으며, 마루폭 및 비탈경사의 변화에 따른 붕괴폭, 깊이, 붕괴지속시간, 월류량 및 붕괴부 바닥세굴형태 등을 분석하였다. 전반적으로 제방마루폭이 넓고 비탈경사가 완만할수록 침투월류량을 감소시키며, 붕괴 지속시간이 길어지는 결과를 보였다. 또한 마루폭이 넓거나 비탈경사가 급한경우에서 제방의 붕괴 폭은 좁고 붕괴깊이는 깊었으며 제방마루폭이 좁거나 경사가 완만할수록 바닥 세굴심이 깊고 세굴웅덩이의 비탈경사가 컸다.

**핵심용어** : 하천제방, 마루폭, 경사도, 다짐도, 제방붕괴, 붕괴지속시간, 세굴, 침투월류량, 홍수피해

---

\* 대한전문건설협회, 산업정책본부장  
Director, Korean Specialty Contractors Association, Seoul, Korea  
(E-mail : stlee003@ksca.or.kr)

\*\* 경기대학교 토목환경공학부, 교수  
Professor, Department of Civil Engineering, Kyonggi Univ., Seoul, Korea  
(E-mail : jtlee@kuic.kyonggi.ac.kr)

## 1. 서 론

일반적으로 홍수시 하천제방의 붕괴는 월류 및 파이핑에 의한 점진적 붕괴이다. 제방붕괴부는 제체를 구성하는 토립자가 침식되어 나감으로서 점차적으로 발달된다.

홍수로 인하여 제방에 가해지는 외력은 늘 불확정적인 것이어서 불가피하게 홍수류가 하천제방이 월류하여 제방을 붕괴시키는 큰 재해가 발생할 위험성을 완전히 배제할 수 없다. 이는 최근 하천 개수가 잘 이루어진 일부 직할하천에서도 제방붕괴로 침수피해가 크게 발생한 사례를 보아도 알 수 있다. 따라서 하천제방의 안전성을 향상시키는 노력은 홍수피해를 줄이는데 크게 기여할 수 있다고 본다.

하천 제방붕괴로 인한 피해는 외수유입량과 붕괴부의 크기 및 형태에 따라 그 피해규모에 큰 영향을 미침에도 불구하고 이에 관한 연구는 한정되어 있으며, 아직까지 붕괴부의 확대 과정을 명확하게 해석함에는 어려움이 있고 제방붕괴에 따른 실험적 연구는 극히 제한되어 있다. Takao Uno 등(1998)은 하천제방 안전성 평가를 위하여 제방붕괴 사례를 조사하여 분석한 바 있으며, Yoshio Muramoto(1978)는 댐붕괴로 인한 유수와 유사의 이동에 관한 수치모형과 수리모형실험을 실시한 바 있다. Yuichiro Fujita(1984) 등은 하천 제방의 붕괴형상에 관한 2차원적 실험을 실시하였다. 우리나라에서는 제방붕괴 실험을 수리모형실험으로 실험한 연구는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 실험수로내에 제방을 설치하여 월류 붕괴에 대한 수리모형 실험을 실시함으로써 제방 단면형상에 따른 붕괴특성을 이해코저 노력하였다. 즉, 기존의 하천제방 단면들을 대표하는 단면을 설정하고 이를 기준으로 마루폭과 경사도 등의 기하학적 특성치들을 변화시킴으로써 나타나는 붕괴과정과 홍수특성 및 붕괴부 형태 등을 측정하였으며, 각 특성치들이 실험 결과치에 주는 영향을 분석하였다.

## 2. 제방붕괴의 양상 및 특성

제방 및 흙댐의 붕괴는 제방을 구성하고 있는 토립자의 침식에 의하여 발생하는 점진적 파괴양상(gradual failure)을 보이는 것이 일반적이다. 제방 및 흙댐의 주된 붕괴 요인은 크게 월류(overtopping), 기초결함(foundation defect), 파이핑과 누수(piping and seepage) 등의 세가지로 구분할 수 있다.

점진적 붕괴형태를 보여주는 제방의 붕괴는 물의 흐름이 제방을 월류하거나 제방의 기초부를 통한 파이핑, 누수에 의한 경우가 붕괴요인의 대부분으로서 붕괴부는 제방을 구성하는 토립자가 침식되어 나감에 따라 점차적으로 발달되어 커지게 된다. 붕괴부의 크기와 형상, 붕괴시간 등은 토립자의 침식성과 흐름의 수리특성 등에 의하여 결정된다. 월류에 의한 제방의 붕괴현상은 제방의 마루높이와 하천내의 수위차가 대략 0.5m 이내에 이르게 되면 제방마루의 가장 약한 부분의 하류단에서부터 침식으로 인한 붕괴가 시작되고, 붕괴부가 바다에 이를 때까지 계속되다가 침식성이 작은 자연지반에 이르면 중지 된다. 파이핑, 누수에 의한 붕괴는 물이 제방을 통하여 누수되고, 공동을 형성하여 제방하류단이 침식되면서 누출되는 유속이 점차로 증대되고 제방내의 토립자의 유실이 가속화되어 월류에서의 경우와 유사한 형태로 붕괴가 진행된다. 제방의 붕괴는 홍수시 빈번히 발생하나, 붕괴시 붕괴부에서의 충분한 관측자료를 얻기가 매우 어렵고 그 붕괴특성이 매우 다양하여 이를 모형화하기가 용이하지 않다(이중태, 1988).

실제로 댐의 파괴원인에 대한 ICOLD(1973)의 조사에 의하면, 적절하지 못한 여수로에 의하여 발생하는 월류가 전체 붕괴의 35%이고, 파이핑과 누수가 38%로 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 댐의 붕괴요인은 댐의 사용기간에 따라 달라지게 되어 사용기간이 경과되면서 월류로 인한 붕괴가 차지하는 비중이 증대되게 된다. 이는 댐의 내용년환을 고려한 적정 홍수소통능력의 확보와 적절한 수문조작은 댐의 안전과 직결됨을 의미한다. 특히, 댐의 경우에는 사용기간이 경과됨에 따라 파이핑과 누수에 의한 붕괴비율도 증가함으로써 댐에 대한 유지 보수관리의 필요성이 큼을 알 수 있으며, 제방의 경우에도 이와 유사할 것으로 판단되어 제방의 견실한 축조와 아울러 지속적인 제방의 유지관리가 중요하다.

붕괴양상이 유출량에 직접적으로 영향을 미치는 요소들은 붕괴부의 형태, 크기, 붕괴소요시간 등의 세가지로 크게 나누어 생각할 수 있으며, 제방단면의 형상, 축조재료의 종류 및 각종 제방 붕괴요인들에 따라 매우 복잡한 붕괴형태로 나타난다.

붕괴부의 형태는 불규칙하지만 일반적으로 기하학적인 형태로 가정하여 해석하고 있다. 즉, 붕괴단면은 삼각형, 직사각형, 사다리꼴형 3가지로 분류할 수 있으나 사다리꼴형은 측벽면경사 $Z(0 \leq Z \leq 2)$ , 붕괴부의 폭 B 등

표 1. 제방붕괴 사례 현황

구분	붕괴형태	개소 수	비율(%)	비고
월 류	파제	37	38	97개소 전체의 23%
	앞비탈붕괴	53	55	
	뒷비탈붕괴	7	7	
	피해경미	0	-	
기 타	파제	67	20	332개소 전체의 77%
	앞비탈붕괴	253	76	
	뒷비탈붕괴	12	4	
	피해경미	0	-	

표 2. 붕괴제방의 토질조사 현황

구분	토질	개소 수	비율(%)	비고
월 류	모래질흙	8	8	97개소 전체의 23%
	모래	3	3	
	실트·점토질흙	67	69	
	모래와 자갈	19	20	
기 타	모래질흙	4	1	332개소 전체의 77%
	모래	5	1	
	실트·점토질흙	232	70	
	모래와 자갈	91	28	

을 변화시킴에 따라 가장 일반화된 형태로 표현할 수 있다. Fread(1977)의 붕괴부 평균폭  $B$ 에 대한 연구 결과는  $H \leq B \leq 3H$  범위에 있다고 하였고, Singh(1982)이 조사한 결과에 의하면 붕괴 상단의 폭  $B$ 와 댐높이  $H$ 와의 관계는  $2H \leq B \leq 5H$ 의 범위에 있다고 하였다. 또한 MacDonald(1984)는 댐 붕괴에 관한 자료들을 정리한 결과  $B$ 의 값은  $H \leq B \leq 5H$ 의 범위에 있는 것으로 판단하였다.

한편 필댐에서의 붕괴지속시간  $T$ 는 축조재료의 침식성에 크게 좌우된다. Singh(1982), MacDonald(1984), Fread(1977) 등의 조사에 의하여 비교적 견고하게 축조된 흙댐의 경우  $0.5 \leq T \leq 3.0$ 시간, 일반 흙댐의 경우에는  $0.1 \leq T \leq 0.5$  시간 범위로 조사되었다. 균질의 토사로 축조된 흙댐에서의 침식으로 인한 결과부의 하강속도는 붕괴 지속기간을 통하여 대개 일정하다고 보아 해석하는 경우가 많다.

제방붕괴에 따른 유출량의 산정을 위해서는 제방의 붕괴 양상이 시간적 및 기하학적으로 기술되어야 하고, 붕괴부의 형태 및 제방 붕괴 월류부의 상하류의 수위에 따른 잠수효과(submergence effect) 등의 영향요

소들을 복합적으로 고려하여 유출 수문곡선을 유도한다(이종태, 1987).

'95년 8월 호우로 인하여 안성천유역에서 429개소의 하천 제방붕괴는 크게 제방월류로 인한 경우와 파이핑, 비탈면붕괴 등의 기타요인에 의한 붕괴로 구분할 수 있다. 제방월류로 인하여 결과적으로 나타난 붕괴양상은 파제가 38%, 앞비탈붕괴가 55%, 뒷비탈붕괴가 7% 해당되었으며, 기타요인에 의한 경우에는 파제가 20%, 앞비탈붕괴가 76%, 뒷비탈붕괴가 4% 등으로 나타났다(표 1). 붕괴된 제방의 토질의 구성은 제방 월류시 모래질흙이 8%, 모래가 3%, 실트·점토질흙이 69%, 모래와 자갈이 20%이었으며, 기타요인에 의한 경우에는 모래질흙과 모래가 각각 1%, 실트·점토질흙 70%, 모래와 자갈 28% 등으로 나타났다(표 2).

안성천 유역에서의 제방붕괴 양상을 분석한 결과 제방월류로 인한 붕괴의 경우에 파제의 발생비율이 높았음을 알 수 있었고 전반적으로 앞비탈의 붕괴가 가장 많이 발생하였으며, 특히 비월류에 의한 경우에는 그 비율이 매우 높았다. 한편 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 붕괴제방의 토질이 대부분 실트·점토질흙으로

분석되었는 바, 이는 축조재료의 결합을 의미하기보다는 대부분의 제방이 실트·점토질흙으로 축조되었기 때문인 것으로 판단된다(이상태, 1998).

### 3. 제방붕괴 수리모형 실험

#### 3.1 제방 기준 단면

제방설계시에는 계획 홍수량, 제내지상황, 사회·경제적 여건, 하천환경, 기초지반상태 등을 고려하여 제방단면을 결정한 후 결정된 단면에 대해 안정계산을 실시하여 필요한 안전율을 확보할 수 있도록 최종단면을 결정한다. 하천 제방의 일반 구조는 제방고(계획홍수위+여유고), 둑마루, 앞비탈, 뒷비탈, 앞턱, 뒷턱, 측단, 제방부지, 제외지, 제내지 등으로 구성되어 있다. 제방고는 계획홍수위에 여유고를 더한 높이 이상으로 하고 여유고는 계획홍수량에 따라 정한다.

둑마루폭은 침투수에 대한 안전확보, 하천순시, 홍수시의 방재활동에 지장이 없도록 최소 1차선 이상이 확보되어야 하므로 3m 이상으로 하고 홍수시 안전을 위하여 계획홍수량에 따라 둑마루폭을 정하고 제방토질의 침윤선을 고려해야 할 경우는 별도로 정할 수 있다.

제방의 비탈경사는 1:2 이상으로 완만하게 하여야 하며, 제방 또는 지반의 토질 조건, 홍수지속시간, 하천환경, 친수성 등을 고려하여 비탈경사를 결정한다.

제방의 다짐은 제방의 구조적 안전에 필요한 단위밀도를 증가시키고 제방의 파이프링(piping)작용을 막기 위하여 투수성을 억제하며, 흙의 토성 및 역학적 성질 변화와 흙의 수축 및 팽창을 줄이기 위한 간극내 침투수 유입을 억제한다. 또한 흙쌓기 완료후 침하억제로 하자 발생이 없도록 반드시 시행해야 하며, 다짐 밀도 기준은 일반적으로 80%(현장건조 밀도와 최적함수비 상태의 최대건조밀도의 비) 이상이어야 한다.

이상의 내용을 감안하여 본 연구에서는 제방 높이는 일정하게 8m로 정하고, 둑마루폭 4m, 제방비탈경사 1 : 2, 제방구성토질은 실트 : 모래의 비율을 70 : 30으로 하는 기준단면으로 정하였다. 또한 제방붕괴시의 범람부 바닥의 세굴현상을 검토하기 위하여 제내지측인 실험수로 끝(수로길이 8m)까지 10cm 두께의 모래를 포설하였다(그림 1).

#### 3.2 수리모형제작

수리모형실험을 위하여서는 건설교통부 국립건설시험소 수리모형실험실에 있는 수위, 유속, 유황실험을 할 수 있는 개수로 실험 장치(폭 1.5m, 높이 1.0m, 길이 12.0m)를 사용하였다(그림 2a,b).

수리모형의 축척은 일반적으로 1 : 15를 넘지 않고 또 1 : 50보다 작지 않은 축척비로 설계하므로 본 연구에서는 개수로 실험장치의 여건 등을 감안하여 축척

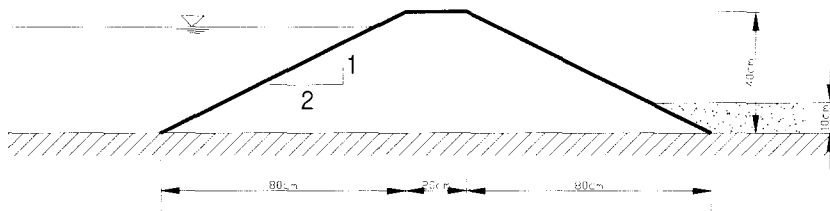


그림 1. 모형 제방의 단면형(기준단면)

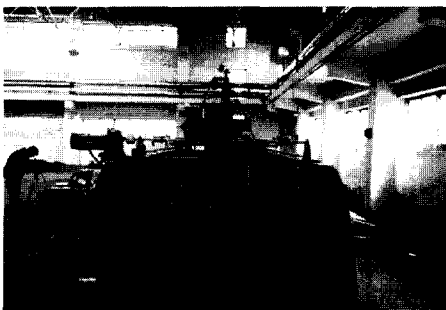


그림 2a 개수로 실험장치(정면)



그림 2b 개수로 실험장치(측면)

비를 1 : 20으로 결정하여 모형을 제작하였다.

모형수로에는 수로 길이방향 벽면에 점착식 테이프를 부착하여 가로 50cm, 세로 10cm간격의 격자를 그려 이 간격내에는 작은 1cm 격자를 그린 후, 수조 외부 벽면에 부착하고 최초 실험계획에 따라 국내의 실제 축조된 하천제방의 일반적인 단면 형태를 원형으로 하여 모형을 제작하였다. 상사법칙을 적용하여 계산된 기준 모형 제방은 마루폭 20 cm, 제방높이 40cm, 비탈경사 1 : 2로 하였으며, 제방의 주요 특성치의 변화에 따른 붕괴특성을 파악키 위해 마루폭을 10cm, 30cm로, 제방 경사를 1 : 1.5, 1 : 2.5로 각각 변환하면서 제방 모형을 제작하였다(표 3).

본 실험에서 사용한 제방축조 재료인 실트의 토성 및 토질정수는 표 4와 같다. 제방축조재료의 다짐효과는 흙의 종류, 함수량 및 가해지는 에너지의 종류와 그 크기에 따라서 크게 영향을 받는다. 실내에서의 다짐시험방법은 램머(rammer)를 이용하는 동적인 다짐방법이 일반적이며, 시험결과는 성토공사의 다짐 관리에 이용한다.

본 연구에서는 제방모형에 다짐장비 투입이 곤란하여 다짐판(30cm×30cm×10cm)에 램머(4.5kg)를 30

cm 높이에서 낙하여 4층으로 나누어 각각 다짐을 실시하였으며, 다짐율이 80% 전후가 되도록 모형을 제작하였다.

제방축조재료의 점착력, 내부마찰각 및 단위중량 등의 토질시험성과와 제방이 축조된 지반은 견고한 것으로 토질정수를 가정하고 원형 9개 제방단면의 제방원호활동에 대한 최소 안전율을 Bishop의 간편법으로 산정한 결과는 표 5와 같다. 기준단면(마루폭 4m, 제방높이 8m, 비탈경사 1:2)을 포함한 전 실험 대상 단면에 대하여 제방의 연직붕괴와 간극수압을 고려하여 산정한 제방활동의 최소 안전율은 1.3 이상으로서 규정 안전율을 모두 만족하는 것으로 산정되었다.

본 연구에서는 먼저 수로의 유입량 산정을 위한 고수조 유량검정을 통하여 삼각위의 수위별 유량을 확인하는 수위-유량관계곡선을 전대수지로부터 유도하였다. 적정 유입유량의 결정을 위하여 80% 다짐도를 기준으로 예비 실험 1에서는 다짐도 81.9%, 유량 6.5 l/sec으로, 예비실험 2에서는 다짐도 74.0%, 유량 5.0 l/sec로 제방붕괴 예비실험을 각각 실시하였으며, 제방에 일정규모의 붕괴가 발생하기 위한 적정유량은 6~6.5 l/sec, 다짐도 약 80%로 판단하였다.

표 3. 제방붕괴 실험 모형 제작

실험명	마루폭 (cm)	제방높이(cm)	비탈경사	제방축조재료(%)		다짐(회)	비 고
				실트	모래		
A-1	20	40	1:2	70	30	3	
A-2	10	40	1:2	70	30	3	
A-3	30	40	1:2	70	30	3	
B-2	20	40	1:1.5	70	30	3	
B-3	20	40	1:2.5	70	30	3	

표 4. 제방축조재료의 토성 및 토질정수

구 분	시험성과	구 분	시험성과
흙의 비중	2.63	소성지수	2.7
최대 입경	4.76mm	통일분류	SM
60% 입경	0.36mm	점착력	C=0.145kg/cm <sup>2</sup>
균등계수	37	내부마찰계수	0.605
10번째 통과량	95%	내부마찰각	31° 11' 5.91"
40번째 통과량	63%	다짐	A다짐 (KSF2312)
200번째 통과량	27%	젖은밀도	2.110g/cm <sup>3</sup>
액성한계	24.1%	마른밀도	1.874g/cm <sup>3</sup>
소성한계	21.4%	최적함수비	12.6%

표 5. 제방단면의 안전율

실험명	마루폭 (m)	제방 높이 (m)	비탈 경사	제방축조재료(%)		다짐 (회)	단위중량 $\gamma_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	최소 안전율	비 고
				실트	모래				
A-1	4.0	8.0	1:2	70	30	3	1,548	2.338	$\phi = 31^\circ$ , $C = 1,450 \text{ kg/m}^2$
A-2	2.0	8.0	1:2	70	30	3	1,501	2.116	
A-3	6.0	8.0	1:2	70	30	3	1,400	2.308	
B-2	4.0	8.0	1:1.5	70	30	3	1,508	1.828	
B-3	4.0	8.0	1:2.5	70	30	3	1,405	2.502	
C-2	4.0	8.0	1:2	60	40	3	1,583	2.228	
C-3	4.0	8.0	1:2	80	20	3	1,552	2.235	
D-2	4.0	8.0	1:2	70	30	1	1,387	2.278	
D-3	4.0	8.0	1:2	70	30	6	1,535	2.239	

제방 모형과 접하는 수로의 벽체를 따라서 급속히 형성되는 침투현상을 차단하기 위해 차수판(하단 : 150cm×10cm, 양단 : 40cm×10cm)을 좌·우안 수로 벽면에 각각 설치하였다. 제체는 10cm씩 4층으로 나누어 다짐받침대(30cm×30cm×10cm)를 다짐위치에 대고 다짐받침대 정 중앙부에 4.5kg짜리 다짐봉으로 3회씩 타격하고 각 다짐위치를 다짐받침대폭의 1/4 비율로 중첩시켜 모두 12회의 다짐을 실시하였다. 제방 중심선에서 하류 2m지점의 수로 벽면에 수위계를 설치하였고, 같은 위치의 수로폭 방향으로 35cm, 75cm, 115cm의 3개소에 유속계를 설치하였다. 실험과정의 붕괴양상을 기록하기 위하여 수조 상단에 위치한 수레에 수직으로 비디오 카메라 1대를 설치하고 수조 측면에 1대를 각각 설치하였다.

또한 제방붕괴 및 바닥의 변동을 검토하기 위하여 모래로 길이 8m, 깊이 10cm의 바닥을 만들었으며, 자연하천과 유사하도록 모래를 완전포화 상태로 만들었다. 제방의 중앙부에서 붕괴가 발생하도록 유도하기 위하여 수조벽면으로 75cm 떨어진 부분에 제방마루 20cm×20cm, 앞비탈면 100cm×20cm를 1cm 깊이로 파

서 초기월류를 유도하였다.

비디오 사진에서 쉽게 구분토록 20cm 폭의 마루부를 초록색 식용색소로 도포하고 5cm×10cm의 격자를 남색의 식용색소로 구획하였다. 또한 물에도 식용색소를 넣어 월류시의 양상을 보다 명확하게 볼 수 있도록 하였다.

#### 4. 제방단면의 기하학적 특성치에 따른 붕괴특성

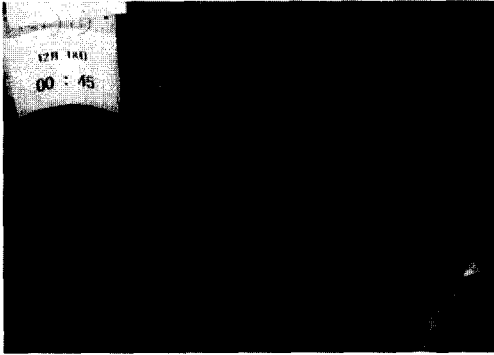
##### 4.1 제방마루폭과 붕괴특성

기준단면 (A-1) 축조시 제방의 축조재료는 실제 축조된 제방과 유사하게 실트와 모래를 70 : 30의 비율로 섞어 축조하였으며, 이때 축조재료의 다짐도는 74%, 함수비 12.3%, 습윤밀도 1.548g/cm<sup>3</sup> 등이었다. 붕괴부를 통한 월류량은 실험수로 좌·우측에 설치한 수위계에서 15초마다 측정하였고 동일한 시간에 3개소의 유속을 측정하였으며, 이를 단면 적분하여 붕괴부에서의 유출량을 산정하였다.

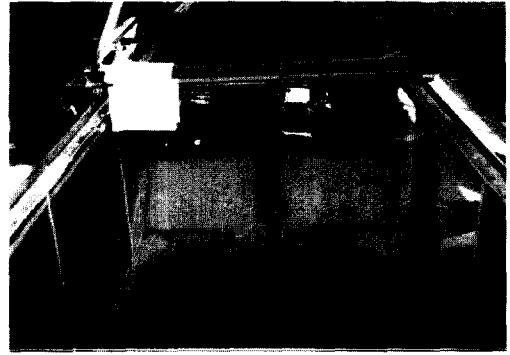
표 6과 같이 제방단면(마루폭 20cm, 경사 : 2, 높

표 6. 제방마루폭 변화실험 조건

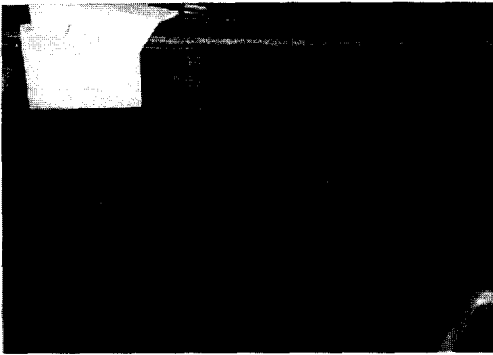
실험명	제방의 평균입경(mm)	마루폭(cm)	제방고(cm)	경사	공급유량 (l/s)
A-1(기준)	0.21	20	40	1 : 2	6.1
A-2	0.21	10	40	1 : 2	6.1
A-3	0.21	30	40	1 : 2	6.1



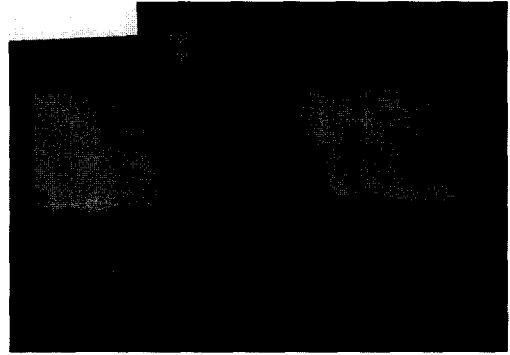
(a) 1단계 : 초기 월류 단계



(b) 2단계 : 월류량 급증 단계



(c) 3단계 : 침투월류 단계



(d) 4단계 : 월류량 감소 단계

### 그림 3. 예비실험의 제방 붕괴 과정

이40cm : A-1)을 기준으로 마루폭을 10cm, 30cm로 각각 변화시켜 모형을 축조한 후 각 경우에 대해 수리모형실험을 하였다.

제방붕괴양상을 측정하기 위해 비디오 및 사진을 촬영하였다. 붕괴실험에서는 월류수가 제방을 월류하는 시점에는 제방의 침식이 미미하다가 일정시간이 경과된 후부터는 급격히 붕괴부가 깊이방향으로 발달하면서 다시 측방방향으로 붕괴부가 발달하면 침투붕괴홍수량이 발생하여 이후 제외지 수위가 하강하면서 붕괴과정이 종료된다. 즉, 제방붕괴는 ① 초기월류단계, ② 월류량 급증단계, ③ 침투월류단계, 및 ④ 월류량 감소단계의 4단계로 구분하여 검토해 볼 수 있었다(그림 3). 즉, 제 1단계는 초기붕괴부를 월류하는 소유량이 지속하는 단계로서 수리모형실험 개시 후에 작은 유량이 월류하면서 깊이방향으로 깊은 골을 발달시킨다. 그러나 확폭은 거의 없으며, 붕괴속도가 매우 낮다. 제 2단계는 유량이 급증하는 단계로서 월류량이 증가하면

서 붕괴폭이 급격히 발달하는 단계, 제 3단계는 침투유량에 이르는 단계로서 월류량이 최대에 달하며 붕괴폭이 완전히 발달되고 최심바닥을 이루는 단계, 제 4단계는 월류량이 감소되는 단계로서 월류는 지속되나 세굴은 더 이상 일어나지 않으며, 공급유량에 대해 바닥이 안정을 이루는 단계이다. 대체로 제 1단계의 지속시간이 긴 반면, 제 2단계는 짧아진다. 이것은 붕괴부로부터 유입유량은 제방의 침식이 어느 정도 진행하여도 증가하지 않고 침식이 어느 한계점을 넘는 시점에서 급격한 증가를 하는 것을 의미한다.

기준제방(A-1) 실험에서 월류수가 시작되어 약 2분까지는 제방의 침식이 미미하다가 이후부터 급속히 침식이 발달되어 약 1분 45초 후에는 붕괴부 유출량이 최대에 달하여 유입량 6.1 ℓ/sec의 8.2배인 약 50.0 ℓ/sec가 측정되었다. 붕괴부의 발달은 월류가 시작된지 약 3분 30초에는 제방 앞비탈 끝에서 135cm 지점 바닥이 4.7cm 깊이로 세굴되다가 붕괴가 종료되었다.

마루폭 10cm의 제방단면(A-2)의 경우에는 제방 월류시작 2분 뒤부터 붕괴부가 형성되기 시작하여 1분 15초 후인 3분 15초에 발생한 최대유출량은 유입량 6.1 l/sec의 9.6배인 58.5 l/sec이었다. 이는 기준단면 실험 A-1실험의 최대유량 50.0 l/sec와 비교할 때 약 17% 증가되는 것으로 분석되었다.

붕괴지속시간은 A-1 실험에서 5분 30초에 붕괴가 완료된 반면 마루폭을 10cm 줄인 A-2 실험에서는 5분 15초에 붕괴가 완료되어 약 15초 정도 빨리 붕괴가 진행되었다.

마루폭 30cm의 제방단면(A-3)에 대한 실험에서는 월류수에 의한 제방사면의 붕괴가 A-1, A-2 실험보다 마루폭이 더 넓어진 영향으로 30초 더 늦게 시작되었으며, 침투월류 발생시간도 기준단면 A-1 실험보다도 약 30초 후인 4분 15초에 발생되었다. 침투월류에서도 기준단면(A-1)보다도 8.7%가 줄어든 46.0 l/sec로 측정되었으며 붕괴지속시간은 기준단면(A-1)보다 약 15초 지연되었다(표 7, 그림 4).

이상의 제방마루폭 변화 실험결과로부터 하천 제방 마루폭의 증가에 따라 침투월류량이 감소되며, 침투발생시간 및 붕괴지속시간을 지연시킬 수 있음을 알 수 있었다.

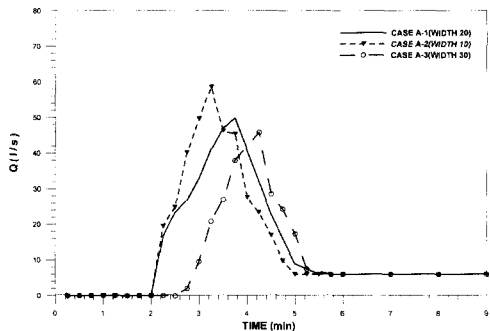


그림 4. 제방마루폭 변화와 붕괴부의 월류량 수문곡선

표 7. 제방마루폭 변화에 따른 수리 특성치

실험명	마루폭 (cm)	붕괴시작시간 (분/초)	침투발생시간 (분/초)	붕괴지속시간		침투월류량	
				(분/초)	증감비율(%)	(l/sec)	증감비율(%)
A-1(기준)	20	2/00	3/45	5/30	0	50.0	0
A-2	10	2/00	3/15	5/15	-5	58.5	+17
A-3	30	2/30	4/15	5/45	+5	46.0	-9

#### 4.1.1 붕괴부 형태

제방의 붕괴단면은 삼각형, 직사각형, 사다리꼴형 등의 3가지로 분류할 수 있으나, 본 실험에서의 결과는 대부분 사다리꼴 붕괴 양상을 나타내었다.

붕괴부의 상부폭(B1)은 제방 마루에서의 붕괴폭을, 붕괴하부폭(B2)은 제방 저부의 붕괴폭을, 붕괴깊이(h)는 마루에서부터 붕괴 중앙부까지의 깊이를 각각 측정하였다. 붕괴면적은 붕괴평균폭과 붕괴깊이의 곱으로 산정하였다.

A-1 실험에서의 붕괴단면은 상부 55.8cm, 하부 45.9cm, 깊이 27.7cm의 전형적인 사다리꼴 형태를 나타냈다. 한편 A-2 실험에서의 붕괴단면은 상부 75.1cm, 하부 48.3cm, 깊이 28.2cm이었으며, A-3 실험의 붕괴단면은 상부 50.7cm, 하부 36.5cm, 깊이 30.3cm의 형태를 보였다(표 8, 그림 5).

이상의 결과로부터 마루폭이 기준단면에서의 폭보다 넓은 경우에는 붕괴폭과 붕괴면적이 줄어들며, 붕괴깊이가 깊어지는 경향을 보였다.

#### 4.1.2 붕괴부의 바닥세굴

제방은 월류수에 의하여 뒷비탈의 윗부분부터 시작되었다. 초기의 월류수는 뒷비탈의 득마루 어깨로부터 비탈사면에 걸쳐 소규모의 붕락을 발생시키면서 확폭이 시작되며, 세굴된 토사는 비탈끝에 퇴적되어 부채꼴 둔덕을 형성하기 시작한다. 시간이 경과하면서 붕괴부의 폭은 뒷비탈면(제내)측으로 넓은 깔대기형을 이루며, 비탈면의 세굴은 크게 진행하여 제방 안쪽으로 유입량이 증가하여 주위로부터 유입수에 의해 뒷비탈 부분의 확폭이 급속해지고 붕괴부의 단면형상은 초기와는 반대의 역제형으로 변화된다. 한편 제외지측에서는 이미 초기의 부채꼴 둔덕은 소멸하여 지반상에는 대량의 세굴토사가 나무잎 형상으로 퇴적된다. 월류수의 지속적인 소류작용으로 바닥세굴형태는 모두 세장 평면



표 8. 제방마루폭 변화에 따른 평균 붕괴폭

실험명	마루폭 (cm)	붕괴상부폭(B1)		붕괴하부폭(B2)		붕괴평균폭		붕괴깊이(h)		붕괴면적	
		(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm <sup>2</sup> )	증감비율 (%)
A-1(기준)	20	55.8	0	45.9	0	50.9	0	27.7	0	1409.0	0
A-2	10	75.1	+26	48.3	+5	61.7	+18	28.2	+2	1738.0	+23
A-3	30	50.7	-10	36.5	-26	43.6	-17	30.3	+9	1322.0	-7
평균		60.5		44.2		52.1		28.7		1489.7	

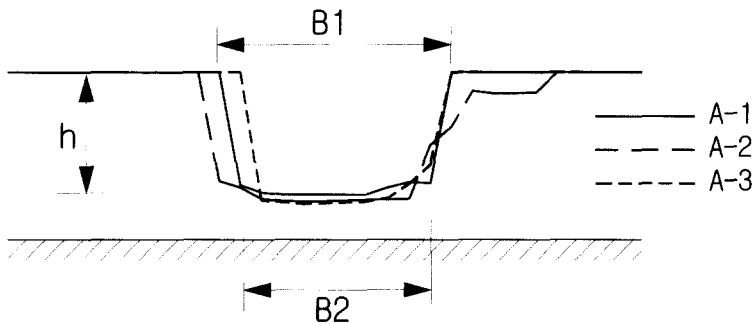


그림 5. 제방마루 변화와 제방붕괴양상

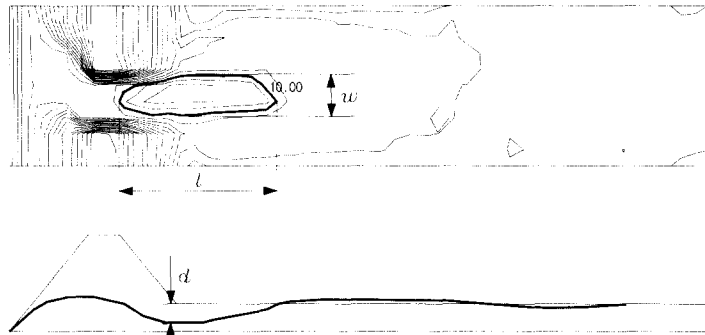


그림 6. 세굴심(d), 세굴길이(l), 세굴폭(w)

형상을 나타내었다(그림 6).

붕괴부의 형상을 검토하기 위하여 그림 6과 같이 세굴심(d), 세굴길이(l), 세굴폭(w)을 고려한 ① 종단비( $l/d$ ), ② 횡단비( $w/d$ ), ③ 평면비( $l/w$ )의 세가지 특성을 측정하였으며 그 결과는 표 9와 같다.

A-1 실험의 바다 최심 세굴심은 제방 앞비탈 끝에서 135cm 지점의 4.7cm이었고, 바닥의 세굴 길이는 141.5cm, 뒷비탈 끝의 세굴폭은 36.9cm이었으며, A-2 실험의 최심 세굴 위치는 140cm, 세굴심은

6.9cm, 세굴길이는 135cm, 세굴폭은 39.9cm이었다. 한편 A-3 실험의 최심 세굴 위치는 141cm, 세굴심은 5.0cm, 세굴길이는 141cm 또한 세굴폭은 36.9cm이었다.

표 9에서 보여주는 바와 같이 마루폭이 기준제방보다 좁은 경우에 세굴심은 깊게 나타났으며 종단비 및 횡단비는 작게 측정됨으로써 바닥세굴 응당의 비탈이 다른 경우에 비해 급경사를 이루고 있음을 알 수 있다. 즉, 제방폭이 좁은 경우에는 월류부 수면경사가

표 9. 제방마루폭 변화에 의한 붕괴부 바닥의 세굴특성치

실험명	마루폭 (cm)	붕괴지속 시간 (분/초)	붕괴폭 (cm)	최심 세굴위치 (cm)	세굴심 (d) (cm)	세굴길이 (l) (cm)	세굴폭 (w) (cm)	종단비 (l/d)	횡단비 (w/d)	평면비 (l/w)
A-1	20	5/30	50.9	1.35	4.7	141.5	36.9	30.1	7.9	3.8
A-2	10	5/15	61.7	1.40	6.9	135.0	39.9	19.6	5.8	3.4
A-3	30	5/45	43.6	1.70	5.0	141.0	36.9	28.2	7.4	3.8

※ 최심세굴위치는 앞비탈 끝에서부터의 수평거리  
 ※ 세굴심, 세굴길이 측정위치는 제방길이의 중앙

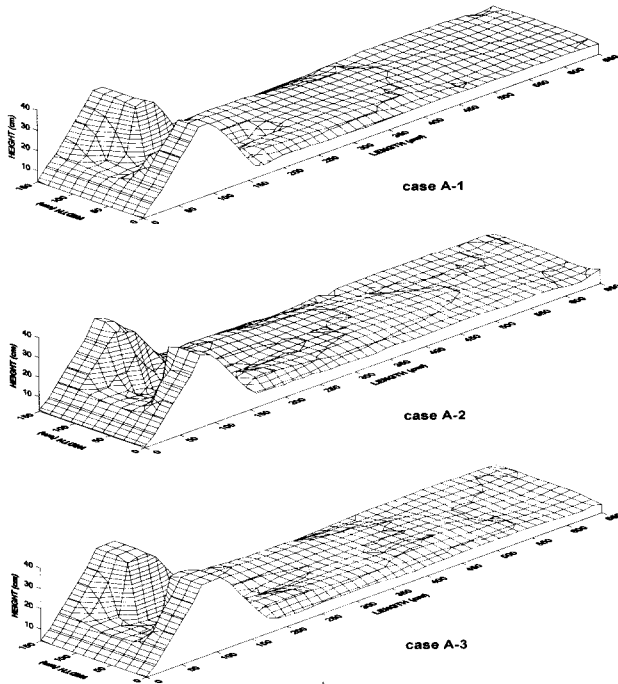


그림 7. 제방 마루폭의 변화와 세굴부의 형상

커지므로 붕괴부의 확폭이 현저하고 이에 따라 세굴폭도 넓었다. 또한 동시에 하류방향으로의 수류가 바닥을 깊게 세굴하였다. 그러나 마루폭이 기준보다 넓은 경우에서의 바닥세굴부의 형상은 기준제방의 경우와 큰 차이를 발견할 수 없었다(그림 7, 8).

#### 4.2 제방 경사도와 붕괴특성

일반적으로 토사로 축조되는 제방의 비탈경사는 1:2 이내로 축조됨을 감안하여 본 연구에서는 1:2인 경우를 기준단면으로 하여 1:1.5와 1:2.5인 제방 모형을 각각 축조하였으며, 제방 비탈면 경사의 변화에 따른 제

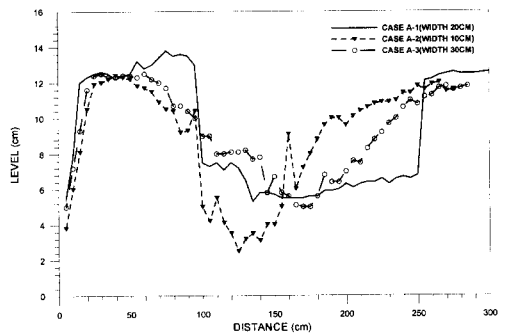


그림 8. 제방 마루폭과 붕괴부 형상

표 10. 제방비탈경사도 변화 실험조건

실험명	제방의 평균입경(mm)	마루폭(cm)	제방고(cm)	경사	공급유량 (ℓ/sec)
A-1	0.21	20	40	1:2	6.1
B-2	0.21	20	40	1:1.5	6.1
B-3	0.21	20	40	1:2.5	6.1

방붕괴의 영향을 검토하였다.

기준단면(마루폭 20cm, 경사 1:2, 높이 40cm : A-1)을 중심으로 제방의 상류 및 하류측 비탈경사를 1:1.5, 1:2.5로 각각 변화시켜 3개의 비탈경사를 갖는 제방단면에 대하여 각각 수리모형실험을 실시하였다(표 10).

제방 비탈경사의 변화에 따른 붕괴양상의 변화는 모의하기 위하여 먼저 B-2실험조건에서 제방의 내·외측 경사를 1:1.5로 기준단면보다 급하게 축조하여 모형 실험을 실시하였다. 이 경우의 제방붕괴는 제방월류시작 2분후부터 붕괴부가 형성되기 시작하였으며, 2분 15초 후인 4분 15초경에 최대 월류량 62.0 ℓ/sec에 달하는 것으로 측정되어 유입유량 6.1 ℓ/sec의 약 10.2배에 달하였다. 이는 기준단면 A-1 실험의 최대 유량 50.0 ℓ/sec보다 약 24% 큰 값이다. 그러나 침투 유량의 발생시간에 있어서는 기준단면에서의 경우보다 약 30초가 늦었으며, 붕괴부가 발달되는 붕괴지속시간은 기준단면의 경우와 거의 비슷하게 발달되었다.

한편 제방비탈경사가 1:2.5로서 기준단면 보다 완만한 경우인 B-3 실험에서의 침투유량은 45.0 ℓ/sec로서 기준단면의 경우보다 약 10%가 감소되는 것으로 측정되었다. 붕괴부가 발달하는 과정인 붕괴지속시간에 있어서는 기준단면보다 약 30초 정도 길게 측정되었다(그림 9).

이상의 제방 비탈경사 변화에 대한 제방붕괴 실험에서 완만한 경사제방에서의 침투유량은 급경사보다 약 34% 정도 감소하였으며, 붕괴지속시간은 약간 길어지는 것으로 측정되었다(표 11).

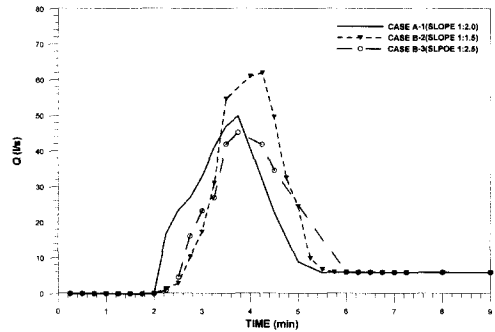


그림 9. 제방 비탈경사와 유출수문곡선그림

#### 4.2.1 붕괴부의 형태

비탈경사도의 변화에 따른 실험에서 나타난 제방의 붕괴단면은 대체로 사다리꼴이었다. 기준단면인 A-1 실험에서 상부 55.8cm, 하부 45.9cm, 깊이 27.7cm, B-2 실험에서 상부 55.7cm, 하부 36.8cm, 깊이 29.0cm로 각각 측정되었고, B-3 실험에서는 상부 55.6cm, 하부 46.2cm, 깊이 27.7cm의 붕괴 단면형을 보였다(표 12, 그림 10).

이상의 실험결과로부터 제방의 경사도가 급해지면 붕괴부의 폭은 줄어드나 붕괴깊이는 늘어나는 양상을 보임을 알 수 있었다. 그러나 기준단면보다 경사가 완만한 경우의 붕괴부의 형태에서는 뚜렷한 차이를 발견할 수 없었다.

#### 4.2.2 붕괴부의 바닥세굴

붕괴부의 바닥에는 월류수의 소류작용으로 세굴구덩

표 11. 제방비탈경사와 붕괴부의 형상특성치

실험명	경사도	붕괴시작시간 (분/초)	침투발생시간 (분/초)	붕괴지속시간		침투월류량	
				(분/초)	증감비율(%)	(ℓ/sec)	증감비율(%)
A-1(기준)	1:2.0	2/00	3/45	5/30	0	50.0	0
B-2	1:1.5	2/00	4/15	5/30	0	62.0	+24
B-3	1:2.5	2/00	3/45	6/00	+9	45.0	-10

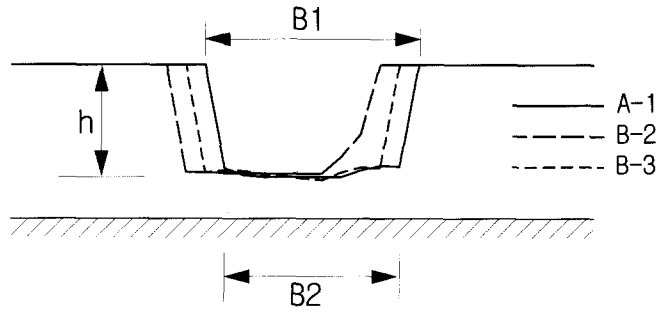


그림 10. 제방비탈경사 변화와 제방붕괴양상

표 12. 제방비탈경사도와 붕괴부 형태

실험명	경사도	붕괴상부폭(B1)		붕괴하부폭(B2)		붕괴평균폭		붕괴깊이(h)		붕괴면적	
		(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm)	증감비율 (%)	(cm <sup>2</sup> )	증감비율 (%)
A-1(기준)	1:2.0	55.8	0	45.9	0	50.9	0	27.7	0	1409.0	0
B-2	1:1.5	55.7	0	36.8	-24	46.3	-10	29.0	+5	1338.0	-5
B-3	1:2.5	55.6	0	46.2	+1	50.9	0	27.7	0	1408.0	0
평균		55.7		42.9		49.3		28.1		1385.0	

이와 두렁이 형성되었다(그림 11). 제방비탈경사 변화에 따른 세굴부의 종단비, 횡단비 및 평면비는 표 13과 같다.

A-1 실험에서의 바닥 최심 세굴심은 제방 앞비탈 끝으로부터 135cm 지점에서 4.7cm가 세굴되었고 세굴부 길이는 141.5cm이며, 뒷비탈 끝의 세굴폭은 36.9cm이었다. B-2 실험에서의 최심 세굴 위치는 145cm, 세굴심은 4.7cm, 세굴길이는 132.3cm, 세굴폭은 55.3cm이었다. 한편 B-3 실험에서의 최심 세굴 위치는 190cm, 세굴심은 7.1cm, 세굴길이는 166.9cm, 세굴폭은 46.1cm이었다.

표 13에서 알 수 있는 바와 같이 비탈경사가 완만할수록 바다세굴심은 깊고, 세굴길이는 길어지는 경향을 보여주었다. 그러나 세굴 폭에 관하여서는 일정한 경향을 발견할 수 없었다.

한편 세굴 종단비와 횡단비는 제방경사가 급할수록 커지는 경향을 보여 세굴심에 대한 상대적인 세굴길이는 더 길며 세굴폭도 넓은 형상을 보였다. 반대로 완구배(1:2.5)의 경우에서는 비탈면의 침식부가 수로를 형성하면서 세굴이 지속적으로 이루어져 세굴심과 세굴길이는 컸으나 종·횡단비는 작아지는 결과로 나타났다.

표 13. 제방비탈경사와 붕괴부 바닥의 세굴특성치

실험명	경사도	붕괴지속 시간 (분/초)	붕괴폭 (cm)	최심세굴위치 (cm)	세굴심 (d) (cm)	세굴길이 (l) (cm)	세굴폭 (w) (cm)	종단비 (l/d)	횡단비 (w/d)	평면비 (l/w)
A-1(기준)	1:2.0	5/30	50.9	135	4.7	141.5	36.9	30.1	7.9	3.8
B-2	1:1.5	5/30	46.3	145	3.4	132.3	55.3	38.9	16.3	2.4
B-3	1:2.5	6/00	50.9	190	7.1	166.9	46.1	23.5	6.5	2.5

※ 최심세굴위치는 앞비탈 끝에서부터의 수평거리

※ 세굴심, 세굴길이 측정위치는 제방길이의 중앙

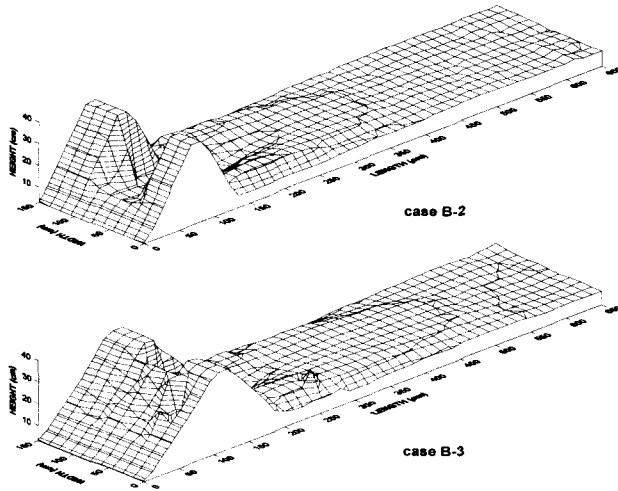


그림 11. 제방비탈경사와 붕괴부형상

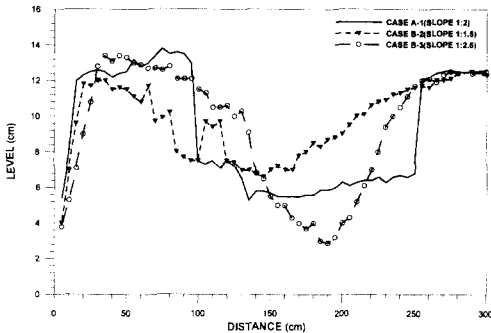


그림 12. 제방 비탈경사와 제방 붕괴로 인한 세굴 종단형상

이상의 제방 마루폭, 경사도의 하천제방단면의 기하학적 특성치의 변화에 따른 각종 붕괴실험 결과를 붕괴지속시간, 침두유량, 붕괴평균폭, 붕괴깊이, 붕괴면적, 세굴심, 종단비, 횡단비 및 평면비에 대하여 기준제방단면을 기준으로 그 증감량을 비교하면 표 14와 같다.

표 14. 제방단면의 붕괴특성치의 증감율(%) 비교

실험명	구분	붕괴지속 시간	침두 유량	붕괴 평균폭	붕괴 깊이	붕괴 면적	세굴심	종단비 (d/l)	횡단비 (d/w)	평면비 (l/w)
A-1	기준	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A-2	10cm	-5	+17	+18	+2	+23	+47	-55	-35	-12
A-3	30cm	+5	-8	-17	+9	-7	+6	-6	-6	0
B-2	1:1.5	0	+24	-10	+5	-5	-28	+24	+52	-38
B-3	1:2.5	+13	-10	0	0	0	+51	-82	-21	-34

이 표에서 알 수 있는 바와 같이 제방 마루폭의 영향은 제방붕괴시간, 침두유량 붕괴단면 및 세굴심에 영향을 주었으며, 제방경사도는 붕괴시간, 침두유량 및 바닥세굴심에 비교적 큰 영향을 주는 것으로 분석되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 마루폭, 비탈경사와 같은 제방단면의 기하학적 특성치들이 홍수류의 범람으로 인한 제방붕괴 양상에 미치는 각종 영향을 수리모형실험을 통하여 분석 연구하였다. 즉, 단면의 마루폭과 비탈경사를 각기 달리하는 5가지의 붕괴 실험 결과로부터 붕괴시작 시간, 붕괴지속시간, 침두유량, 붕괴부 평균폭과 붕괴 깊이, 바닥세굴심 및 세굴길이와 세굴폭을 측정함으로써 제방 단면 기하학적 특성치의 영향을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 월류로 인한 제방 붕괴부의 발달과정은 ①초기 월류에 의한 깊이 방향으로의 침식단계, ②측방방향으로

의 침식 확대단계, ③충분한 단면확보에 따른 침투유티량 발생단계, ④하천수위의 저하로 인한 유티량 감소단계 등의 4단계로 구분할 수 있다.

(2) 제방 마루폭이 넓을수록 제방붕괴 지속시간이 길어지고 침투유티량은 감소되는 결과를 보였으며, 붕괴폭과 붕괴면적은 줄어드는 경향을 보였다. 한편 마루폭이 기준 제방의 폭보다 좁은 경우에는 붕괴폭이 넓고 세굴심이 깊었으며, 세굴종단비와 횡단비는 작게 측정됨으로써 바닥 세굴부 웅덩이의 발달 경사는 기준제방에서 보다 급하게 나타났다.

(3) 제방 비탈경사가 완만할수록 붕괴지속시간은 길어지고 침투유티량은 감소하는 경향을 보였으며, 바닥세굴심은 깊고 세굴길이는 길어지는 경향을 보였으나 종단비와 횡단비는 상대적으로 작아지는 결과로 나타났다. 한편 제방경사가 급한 경우에는 붕괴의 폭은 줄어들으나 붕괴깊이는 깊어지는 결과로 나타났다.

### 감사의 글

본 실험연구를 위하여 실험실 관리와 재료 선별, 공급 등에 도움을 주신 당시 건교부 토목시험소 윤병모 선생과 경기대학교 수공학연구실의 강태호(현 (주) DATAPCS)박사, 전형준(현 삼안기술공사), 허성철(현 남원건설 ENG), 최광운 및 박상식 군들의 적극적인 도움에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

이상태(1998), “하천 제방의 단면 특성과 붕괴양상에 관한 실험 연구”, 경기대학교 박사학위논문  
 이종태(1987), “댐의 파괴 양상”, 한국수문학회지, pp. 186~188.

이종태(1988), “도시하천 제방의 붕괴와 제내지 침수”, 한국수문학회지 21(3), pp. 227~232.

村本嘉雄, 佐溝時彦(1978), “貯水池決壊時の流出特性”, 土木学会 第33回 年次学術講演会講演概要集, II-347.

Fread D.L.(1977), “The Development and Testing of a Dam-Break Flood Forecasting Mode”, *Proc. of the Dam-Break Flood Routing Workshop Water Resources Council.*

ICOLD(1973), “Lessons from Dam Incidents”, Boston, Massachusetts, U.S. *commission on Large Dams.*

MacDonald, T.C., and Jennifer, L.M.(1984), “Breaching Characteristics of Dam Failures”, *J. of HY Div, Vol. 110, No. 5, ASCE*, pp. 567~586.

Singh, K.P.(1982), “Dam Safety Program”, *Univ. of Illinois, Champaign, Illinois.*

Takao Uno, Hisayoshi Morisugi, Toshio Sugii and Yuji Nakano(1998), “Stability Evaluation of River Levees on the Basis of Actual Levee Breachings”, *日本土木學會論文集, 第400号/III-10*, pp. 161~170.

Yuichiro Fujita, Takashi Tamura and Yoshio Muramoto(1984), “Emperiments on Enlarging Process of River Bank Breaches” **東京大學 防災研究所 年報 第27号 B-2.**

(논문번호:01-007/접수:2001.01.26/심사완료:2001.03.23)