

# 하천제방 붕괴원인에 따른 안전성 평가



윤 광 석 | 선임연구원, 한국건설기술연구원 수자원연구부 / ksyoon@kict.re.kr

## 1. 서론

'96, '99년 임진강 유역의 대홍수와 2002년 태풍 루사에 의한 강원도 지역의 피해는 홍수방어시설로서 제방의 중요성을 다시금 일깨우는 계기가 되었다. 이와 같이 잇따른 극한홍수의 발생에 의하여 기존의 제방 설계 개념과 제방의 안전성을 확보할 수 있는 방안 에 대한 검토 필요성이 제기되고 있다.

본 고에서는 우리나라 제방 붕괴 양상과 특징을 알아보고, 이에 대한 대책을 수립해 나가는 과정으로서 제방 안전성 조사와 평가 방법을 비교·검토하여 소개 하고자 한다.

## 2. 제방붕괴 원인 및 유형

일반적으로 홍수시 제방 붕괴 원인은 크게 월류, 세굴, 제체 불안정, 또는 하천구조물에 의한 파괴 등으로 구분할 수 있다. 월류는 다시 계획규모를 초과하는 홍수 유출로 인한 제방고 부족, 설계홍수량의 과소 책정, 토사나 유목 등의 유출로 인한 통수능 저하, 교량 상판이나 교대 및 교각에 의해 통수 단면적 감소로 인한 월류 등으로 세분할 수 있다. 세굴은 하천의 급경사, 급격한 만곡 부분에서 과도한 유속과 소류력, 협소해지는 하폭 구간, 장기 하상변동 등에 따른 제방 하단부 세굴 등으로 세분할 수 있다. 제체 불안정은

성토재료의 불량과 제방 표준 단면적의 부족, 제체 및 지반 누수에 의한 파이핑(piping), 제방기초의 침하와 같이 제체 불안정을 유발할 수 있는 제방 설계나 시공상의 문제점 등으로 구분될 수 있다. 마지막으로 하천 구조물에 의한 파괴는 교량이 붕괴되면서 제방이 잇달아 붕괴되는 경우, 제방과 이질 재료로 건설된 구조물 접촉면의 붕괴 등으로 나눌 수 있다. 최근에 발생한 통관 주위의 제방붕괴 뿐만 아니라, 교량 붕괴 및 보 설치 지점에서의 붕괴도 제방의 안정성을 저하시키는 요인이 되고 있다.

위와 같은 제방붕괴 유형분류에 따라 우리나라의 제방붕괴 원인을 분석해 보면 그림 1과 같다. 그림 1은 1980~2002년까지 전국에 걸쳐 국내 제방붕괴 사례를 수집하여 분류한 것이다. 분류된 자료에 따르면 총 조사건수 703건 중에서 세굴이 288건(41%)으로

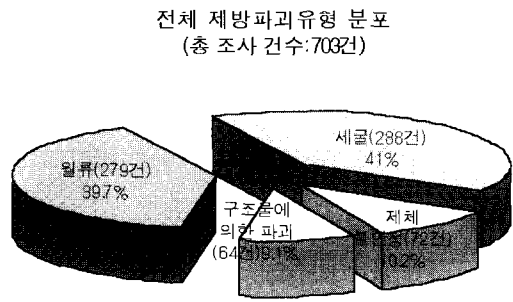


그림 1. 제방붕괴 원인 분석(1980~2002)

2002년 홍수의 제방파괴유형 분포  
(총 조사 건수:453건)

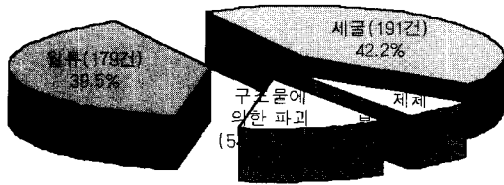


그림 2. 2002년 제방붕괴 원인

가장 많은 비율을 차지하고 있으며, 월류가 279건 (39.7%), 제체 불안정에 의한 파괴가 72건(10.2%), 그리고 구조물에 의한 파괴가 64건(9.1%)으로 나타났다. 그림 2는 낙동강 장기간의 홍수, 강원도와 경북 김천 지역에서 태풍 루사에 의한 제방붕괴가 많았던 2002년의 제방붕괴 원인을 분류한 것으로서 월류와 세굴에 의한 제방붕괴가 지배적임을 알 수 있다.

### 3. 제방 안전성 평가 기법

제방 안전성 평가는 해당 하천의 홍수특성과 축제 토질조사를 통해 선정된 제방 대표단면을 대상으로 한다. 이 때 제방의 안전에 영향을 미치는 수리·수문학적 인자로 인한 외력에 대해 제방 붕괴 가능성을 판단하여 평가 항목별 안전율의 만족여부를 결정한다. 만약, 만족할 만한 안전율이 확보되지 않으면, 보강법을 결정하여 필요한 안전율을 만족하도록 한다. 따라서 극한홍수에 대응하는 제방을 설계하는 경우에도 극한홍수로 인한 외력을 산정하고 안전율이 확보되지 않는 경우 보강대책을 수립할 수 있을 것이다.

표 1은 국내외의 제방 안전성 평가방법을 비교한 것

표 1. 국내외 하천제방 안전성 평가

구분	한국 (하천설계기준, 2002)	일본 (하천제방설계지침, 2000)	미국 공병단 (제방설계 및 시공, 2000)
평가항목	• 활동·누수·침하	• 침투·침식 월류·지진 • 제방과 구조물 접합부	• 활동 • 침투
특징	• 평가항목별 평가방법 부재	• 항목별 구체적인 제시 • 관찰과 실험의 세부화	• 수위에 따른 구체적인 검토

이다. 우리나라는 제방 설계시 홍수에 의한 수리영향 인자를 조사하여 제방 법선을 결정한다. 제방 형상은 「하천설계기준(한국수자원학회, 2002)」에 제시되어 있으며, 주로 계획홍수량과 홍수위가 계산되면 기준에 따라 결정할 수 있도록 되어 있다. 즉, 우리나라의 제방설계는 형상 규정에 의한 설계로 볼 수 있다. 일본은 「河川堤防設計指針(建設省, 2000)」에 제방의 기하적인 형상 규정뿐만 아니라 내력 및 외력을 계산하여 안전성을 평가하는 성능 규정을 적용하여 보다 정량적으로 해석하고 있다.

안전성 평가 항목도 우리나라가 활동, 누수 및 침하에 대해 조사하는 반면, 일본은 침투(활동 및 누수) 뿐만 아니라 월류에 대해서도 평가하도록 되어 있어서 최근 극한홍수에 의해 발생하는 월류 파괴에 대한 적절한 대응 방법이라 할 수 있다.

#### 3.1 침투

일반적으로 침투는 제체 활동과 파이핑 현상 등에 의한 누수에 대해 안전성을 평가하고 있다. 그 평가 방법을 소개하면 다음과 같다.

##### (1) 활동

제방 활동에 대한 안전성 평가에 적용되는 사면안정 해석법은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간의 제체 안정을 해석하는 한계평형이론에 의해 안전율을 계산하여 기준안전율과 비교한다. 국내 하천제방설계에 이용되고 있는 기준안전율을 정리하면 표 2와 같으며, 설계사례를 조사한 결과에 의하면 안전율 1.3이 가장 많이 사용되고 있다. 반면, 일본의 경우 피해이력(被災履歷)과 축제이력에 따라 기준안전율에

표 2. 우리나라에서 제체 활동에 대한 기준안전율

구 분	문 헌 명	기준안전율	비 고
건설교통부	하천시설기준(1993)	1.3	상시 및 홍수위시
		2.0	연직붕괴 고려(간극수압 미고려)
	하천설계기준(2002)	1.4	연직붕괴 고려(간극수압 고려)
		1.8	연직붕괴 불고려(간극수압 미고려)
		1.3	연직붕괴 불고려(간극수압 고려)
한국도로공사	도로설계실무편람(1996)	1.5	평상시(건기, 절토사면)
		1.2	강우시(우기, 절토사면)
한국지반공학회	지반공학시리즈	1.2	수위 급강하시

표 3. 일본에서 제체 활동에 대한 기준안전율(건설성, 2000)

구 분	문 헌 명	기 준 안 전 율	비 고
건 설 성	하천제방설계지침(2000)	$1.2 \times \alpha_1 \times \alpha_2$ $\alpha_1 = 1.2$ (복잡) $\alpha_1 = 1.1$ (단순) $\alpha_1 = 1.0$ (신설제방) $\alpha_2 = 1.1$ (주의필요) $\alpha_2 = 1.0$ (주의불필요)	제내지축 사면 $\alpha_1$ : 축제이력 가중계수 $\alpha_2$ : 기초지반 피재이력 가중계수
		1.0	제외지축 사면

가중치를 주게 되어 있다(표 3 참조). 실제로 피재 및 축제이력이 복잡한 경우 기준안전율이 약 1.6이며, 이는 국내기준보다 기준안전율이 높게 산정된다. 따라서 국내 제방의 안전성 향상을 위해서는 피재이력 및 축제이력의 고려가 필요할 것으로 보인다.

(2) 누수(파이핑)

그림 3은 일반적으로 발생하는 제체 및 지반누수제를 나타낸 것이다. 이와 같은 파이핑 현상에 대한 안전성

은 홍수위 등 외력과 제체 및 기초지반 재료와 제방 형상 등 내력에 의해 좌우된다. 한편, 그림 4는 2002년 8월 내성천에 축조된 제방의 지반누수에 의해 파이프가 발생한 장면이다.

우리나라의 「하천설계기준(한국수자원학회, 2002)」은 한계동수 경사, 한계유속, 그리고 크립 비(creep ratio)를 기준으로 누수 안전성을 검토하도록 규정되어 있다. 그러나 침윤선 검토에 대한 일정기준이 없어 Mononobe 식이 가장 많이 이용되어 왔으며, 최근 부

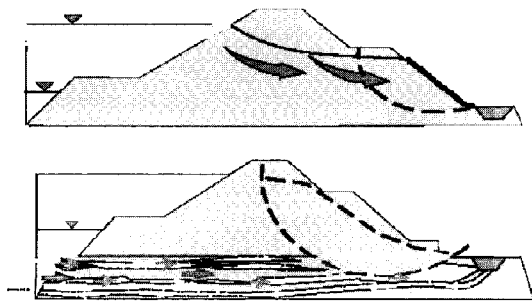


그림 3. 제체 및 지반 누수 제방 파괴

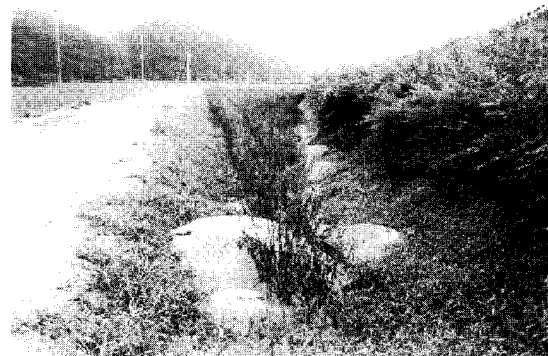


그림 4. 내성천 파이핑 발생(2002. 8)

표 4. 우리나라에서 파이핑에 대한 기준안전율

구 분	문 헌 명	기준안전율
NAVFAC	Design Manual 7.1	2.0
Roy E. Hunt	Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation	3.0
Braja M. Das	Advanced Soil Mechanics	4.0

표 5. 일본에서 파이핑에 대한 기준안전율

구 분	문 헌 명	기 준 안 전 율	비 고
건설성	하천제방 설계지침	$i < 0.5$ $i$ : 제내지층 사면 끝단부근 기초지반의 국소 동수 경사의 최대치	투수성 지반인 제내지에 피복 토층이 없는 경우
		$G > W$ $G$ : 피복토층의 중량 $W$ : 피복토층의 기저면에 작용하는 양압력(피복 토층의 두께가 3m이상인 경우나 점성토 지반인 경우 불필요)	투수성 지반인 제내지에 피복 토층이 있는 경우

정류 침투해석이 이루어지고 있다. 또한 파이핑에 대한 안전율 기준이 없어 외국에서 제안한 값이 이용되고 있다. 표 4는 국내에서 이용되고 있는 파이핑에 대한 기준안전율을 나타낸 것이며, 음영부분은 주로 이용되는 기준안전율을 나타낸다. 표 5는 일본 「河川堤防設計指針(建設省, 2000)」에 제시된 기준안전율을 나타내는데 피복토층 유무에 따라 기준안전율을 결정하고 있다.

### 3.2 침식

그림 5는 일반적으로 침식에 의해 발생하는 제방

붕괴 메커니즘을 나타낸 모식도이다. 이와 같은 침식에 의해 제방 붕괴를 일으키는 요인은 호안과 부속시설의 침식에 의해 발생한다. 그림 6은 작년 8월에 발생한 강원도지역 도로제방의 침식 모습이다.

「하천설계기준(한국수자원학회, 2002)」의 제25장 호안에 따르면, 우리나라는 대부분의 하천제방 비탈면에 호안이 설치되고 있음에도 불구하고 명확한 설계기준은 없다. 그러나 실제 설계에서 식생 호안이나 과도한 유속이 발생할 것으로 예상된 지역은 돌망태 등이 사용되고 있다. 특히, 세굴 우려가 높은 구간에서는 밀다짐으로 콘크리트 블록공, 사석공, 또는 돌망태공 등이 이용되고 있다. 또한, 호안에서 기초(비탈

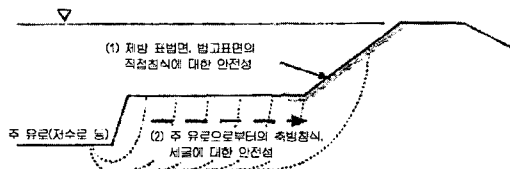


그림 5. 침식에 의한 제방파괴의 메커니즘



그림 6. 도로제방의 침식

멈춤)의 기초밑 깊이는 유속과 입경에 따른 홍수시 일시적 세굴깊이가 제시되어 있으나 세굴에 대한 안전성 평가에 대해서는 제시되어 있지 않다.

일본은 보호공이 있는 경우와 없는 경우로 나누어 안전율을 산정한다. 대표 유속 결정 방법은 우리나라에서 1차원 수리계산으로 단면평균유속을 이용하는 반면, 일본에서는 만곡, 세굴, 흐름간섭, 그리고 밑다짐공 등의 유무에 따라 보정 유속을 결정한다. 비탈면 기 보호공에 대한 안전성도 파괴요인, 설치상태에 따라 세분하고 비탈면기공의 수중증량, 양력, 항력 등을 이용하여 안전성을 조사하고 있다.

### 3.3 월류

「하천설계기준(한국수자원학회, 2002)」에서는 기본적으로 월류에 따른 제방 안전성 평가는 제시되어 있지 않다. 일본의 경우 초과홍수 등에 의한 월류에도 붕괴되지 않는 난파제(難破堤)에 대한 설계방법이 제시되어 있는데, 최근 이상강우로 인한 초과홍수에 의해 월류로 인한 제방의 붕괴 가능성이 증대된 우리나라에서도 이에 대한 대책으로 난파제 개념에 따른 제방 설계 방법이 필요할 것으로 보인다.

월류에 대한 안전성 평가는 이와 같은 난파제에 한하여 시행되는데, 주로 독마루부와 제내지측 비탈면에 보호공을 설계하는 방법이다. 안전성 평가를 위한 기본 조사항목은 (1) 외력 조사(월류 수심), (2) 단위폭당 월류량, (3) 제내지측 사면 보호공의 안전성 평가

(차수시트와 피복토의 안전성) (4) 마루부 보호공의 안전성 평가(월류에 대한 마루부 보호공, 차수시트의 전단력에 대한 견인내력), 그리고 (5) 비탈면 끝단의 밑다짐공(월류에 대한 전도, 활동에 대한 안정 등)이다.

그림 7은 난파제 설계의 기본구조이며, 그림 8은 지난해 경북 김천시 직지사천에서 태풍 루사로 인해 철교 아래 제방이 월류하여 붕괴된 모습이다.

### 3.4 배수구조물(통관) 주변

제방과 구조물 접합부에서는 이질적인 재료에 의해 부등 침하나 공극이 형성되는 공동(空洞)현상으로 인해 제방이 붕괴되고 있는 것으로 알려져 있으며, 그림 9는 공동현상에 의한 붕괴과정을 나타낸 것이다. 우리나라에서는 2002년 8월 낙동강 장기 홍수시 그림 10과 같이 배수구조물에 의한 붕괴가 발생했으며, 공통적으로 배수구조물을 지지하는데 말뚝기초를 사용하였다.

일본의 경우 부등침하에 의한 붕괴가능성이 큰 말뚝기초의 사용을 1999년 이후로 금하고 있으며 그 대안으로 그림 11과 같은 유지지지초(柔支持基礎)를 제시하고 있다. 뿐만 아니라, 배수구조물에 주위의 제방 안전성 평가를 위하여 제방 및 구조물 제원, 피재이력, 외관, 함내상황, 공동현상에 의한 유로형성과 흐름에 대한 연통시험, 그리고 전문가의 조언 등을 검토하도록 하고 있다.

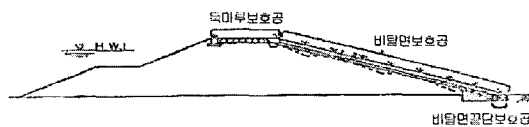


그림 7. 난파제 설계의 기본 구조 (일본 하천제방설계지침)



그림 8. 월류에 의한 제방붕괴(2002. 8. 직지사천)

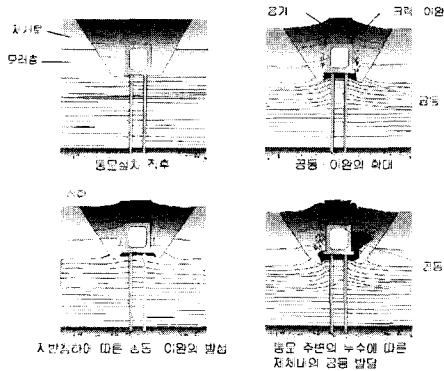
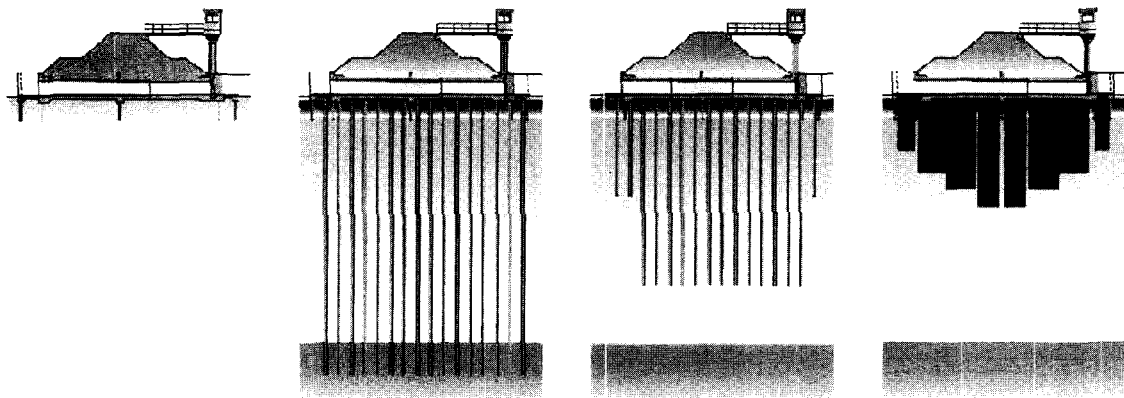


그림 9. 통관 주위의 공동(空洞)현상에 의한 제방붕괴 과정



그림 10. 배수구조물에 의한 제방붕괴 (2002. 8 낙동강 백산제)



(a) 직접기초 (b) 지지말뚝기초 (c) 마찰말뚝기초 (d) 유지지 기초

그림 11. 일반적인 배수구조물 기초 형식

#### 4. 제방 안전성 향상을 위한 개선방향

지금까지 제방 안전성 평가 방법에 대해 살펴보았다. 극한 홍수에 의한 제방 붕괴 피해를 최소화하기 위해서는 우선적으로 제방 파괴 원인의 정량적 분석이 선행되어야 하며 이를 위해서 조사 및 실증연구가 전제되어야 한다. 이를 근거로 수립할 수 있는 제방 안전성 향상 방안을 정리하면 다음과 같다.

##### (1) 정량적인 제방 안전성 평가

제방 설계시 형상규정뿐만 아니라 내·외력에 의한 성능규정을 도입하여 제방의 안전성을 평가하는 것이 바람

직할 것으로 판단된다. 또한 극한홍수에 의한 월류 파괴를 고려할 수 있도록 월류에 안전한 제방(난파제)에 대한 안전성 평가를 실시하여 제방붕괴에 의한 피해를 최소화시킬 수 있도록 하는 것도 고려할 필요가 있을 것이다.

##### (2) 침식에 대한 안전성 확보

침식에 대한 제방의 안전성은 제방 주위의 유속이나 하상변동에 의해 결정되는데 이러한 하도 특성을 평가하는 하나의 지표로서 세그먼트 분류를 통해 침식에 대한 안전성 평가와 호안 설계 기준을 제시함으로써 제방의 침식에 대한 안전성을 확보할 수 있는 방안으로 볼 수 있다.

**(3) 월류에 대한 안전성 확보**

제방은 보통 흙으로 제체가 구성되어 있어 월류에 대해서 매우 취약하므로 일본의 고규격, 완경사, Green, Frontier 제방 도입을 검토하는 것도 제방 안전성을 향상시키기 위한 방안으로 볼 수 있다.

**(4) 구조물 접합부에 대한 안전성 평가방법 및 대책**

구조물 접합부의 파괴 원인이 되는 공동현상 발생을 방지하기 위해 일본에서 적용되고 있는 유지지기초의 도입을 고려할 수 있으며, 이를 위해서 유지지기초의 거동에 대한 실험실증 연구 수행이 선행되어야 할 것이다.

**5. 결론**

제방은 홍수방어를 위한 가장 중요한 구조물이다. 특히 최근 극한홍수의 발생가능성이 커짐에 따라 그 중요성은 더욱 높아지고 있다. 앞서 언급한 바와 같이 제방의 안전성 확보를 위해서는 정량적인 평가 방법의 도입이 필요하다. 구체적으로 제방의 안전성을 확보하기 위해서는 안전성 평가를 위한 내·외력 산정이 필요하며, 여기에는 많은 제방 붕괴 거동에 대한 학술 및 실험 연구와 현장 조사가 수행되어야 실효성이 있는 안전성 평가 기법을 개발할 수 있을 것이다.

**참/고/문/헌**

U. S. Army Corps of Engineers(2000), Design and Construction of Levees.  
 建設省/河川堤防設計研究會(2000), 河川堤防設計指針, 建設省 河川局 治水課.  
 강릉시(2003), 군선천 수해복구공사 실시설계 보고서.  
 건설교통부(1999), 낙동강 봉산제 수해복구공사 보고서.  
 건설부(1993), 하천시설기준.  
 윤광석, 이성준, 김규호(2002), 홍수피해 저감을 위한 제방관련 설계기술 개선방안 검토, 2002년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 616-619.  
 윤광석, 차준호, 이성준, 김규호(2003), 하천제방 안전도 평가기법의 적용성 검토, 2003년 한국수자원학회 학술발표회 논문집(Ⅰ), pp. 309-312.  
 이성준, 윤광석, 김규호(2002), 제방안전도 평가방법 비교, 2002년도 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 612-615.  
 충청북도(2003), 추풍령천 추풍령제 수해복구공사 실시설계 보고서.  
 한국건설기술연구원(2002), 2002년 8월 낙동강 유역 홍수.  
 한국건설기술연구원(2002), 2002년 태풍 루사에 의한 강원도 지역 대홍수.  
 한국건설기술연구원, 건설교통부(2002), 하천제방관련 선진기술 개발 보고서.  
 한국도로공사(1996), 도로설계실무편람.  
 한국수자원학회(1999), 하천공사표준시방서.  
 한국수자원학회(2002), 하천설계기준.  
 한국지반공학회(1994), 지반공학시리즈 5-사면안정.