

하천제방 붕괴 유형분석 및 설계방안



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

1. 서론

2002년 8월 낙동강 유역 장기홍수, 2002년 태풍 루사 및 2003년 태풍 매미에 의한 홍수로 강원도와 영남 지역의 피해는 홍수 방어시설로서 제방의 중요성이 부각되는 계기가 되었다. 이와 같이 잇따른 극한 홍수의 발생으로 기존의 제방 설계개념과 제방의 안전성을 확보할 수 있는 방안에 대한 검토 필요성이 제기되고 있다. 이에 우리나라 제방 붕괴 유형분석을 통하여 붕괴양상과 특징을 알아보고 이에 대한 대책을 수립해 나가는 과정으로서 제방 안전성 평가 및 설계방안을 검토하고자 한다.

2. 제방붕괴 유형 분석

일반적으로 홍수시 제방 붕괴 원인은 크게 월류, 침식, 제체(堤體) 불안정 및 하천구조물에 의한 붕괴 등 4가지로 구분할 수 있다. 월류는 하도의 통수능을 초과하는 홍수 유출이나 토사나 유목 등에 의해 통수능이 저하될 때 발생하며, 침식은 하천의 급경사, 급격한 만곡 부분에서 과도한 유속과 소류력이 작용하여 제방 비탈면이나 하단부가 세굴됨으로써 발생한다. 제체 불안정은 성토재료의 불량과 제체 및 지반 누수에 의한 파이핑(piping) 등에 의한 것을 말하며, 하천 구조물에 의한 붕괴는 하천횡단구조물이 붕괴되

면서 제방이 붕괴되는 경우나 제방과 이질 재료로 건설된 구조물 접촉면의 붕괴 등을 들 수 있다.

침투에 의한 제방붕괴는 크게 활동과 누수에 의한 붕괴로 구분할 수 있으며, 누수는 제체누수와 지반누수가 있다. 그림 1은 누수에 의해 파이핑이 발생한 모습이다.

제방 침식은 그림 2에 나타낸 바와 같이 하안이 깎이는 측방침식과 제방 비탈면의 직접 침식으로 구분할 수 있다. 이와 같이 침식으로 제방이 붕괴되는 것은 호안과 부속시설의 침식에 의해 발생한다.

계획규모 이상의 홍수가 발생하여 홍수위가 제방고보다 높을 때 월류에 의한 제방붕괴로 이어진다. 제체 재료가 주로 흙으로 구성되기 때문에 월류시 제외지측 비탈면 및 비탈끝이 세굴됨으로써 제방이 붕괴되는 것으로 알려져 있다(그림 3).

제방과 구조물 접합부에서는 이질적인 재료에 의해 부등 침하나 공극이 형성되는 공동(空洞)현상으로 인해 제방이 붕괴되고 있는 것으로 알려져 있으며, 그림 4는 공동현상에 의한 붕괴과정을 나타낸 것이다. 우리나라에서도 최근 배수구조물에 의한 붕괴가 다수 발생한 바 있으며, 공통적으로 배수구조물을 지지하는데 말뚝기초를 사용하였다.

제방붕괴 유형에 따라 1987년~2003년까지의 제방붕괴 원인을 분석한 결과는 그림 5에 나타낸 바와 같다. 조사기간 동안의 전체 제방붕괴 사례 758건중 월류가 300건(39.6%)으로 가장 많은 비율을 차지하

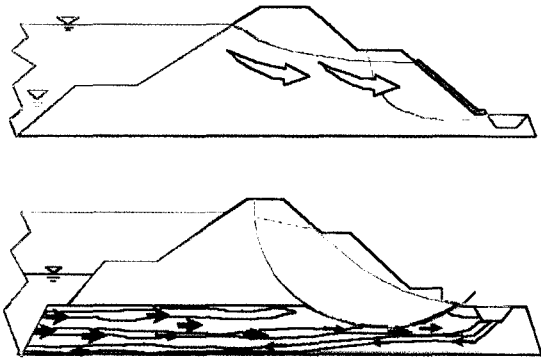


그림 1. 침투에 의한 제방 붕괴(내성천 파이핑 발생, 2002. 8)

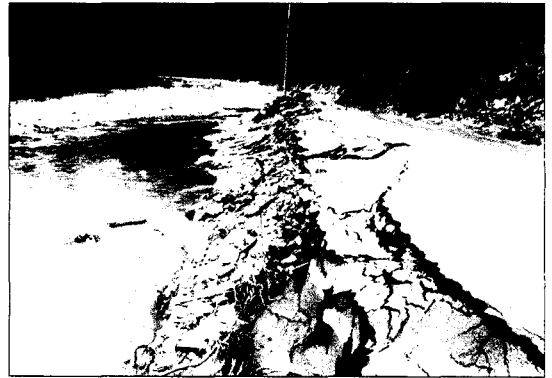
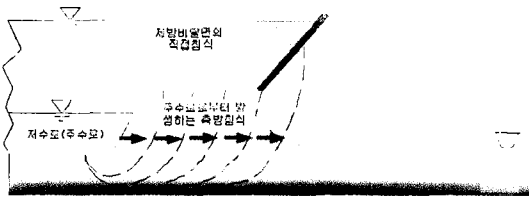


그림 2. 침식에 의한 제방붕괴

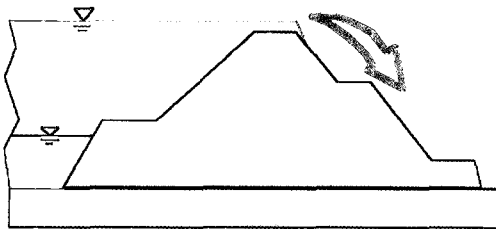


그림 3. 월류에 의한 제방붕괴(경남 함안 광려천 구포제, 2003년 태풍 매미)

고 있으며, 침식 295건(38.9%), 제체 불안정에 의한 붕괴 87건(11.5%), 그리고 구조물에 의한 붕괴 76건(10.0%)으로 나타났다.

3. 하천의 제방 설계기술 현황

하천제방설계 및 시공과 관련된 기준으로 국내에서

는 하천설계기준(2002, 2003)과 하천공사표준시방서(1999) 등이 있다. 일본의 경우에는 제방설계와 직접적으로 관련된 지침으로 하천설계지침(2000)과 고규격 제방 성토 설계·시공지침(안)(1995)이 있으며, 이 외에도 우리나라의 하천설계기준과 성격이 유사한 하천사방기술기준(안)(1997)과 하천공사표준시방서와 성격이 유사한 하천관리시설등 구조령(1999) 등이 있

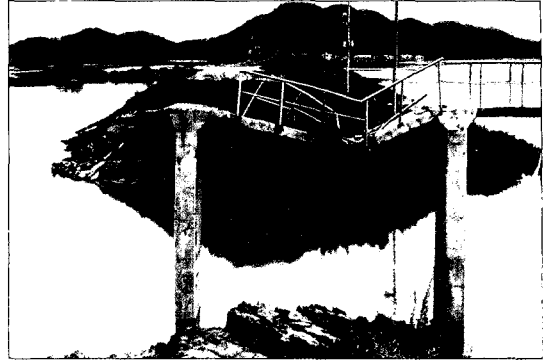
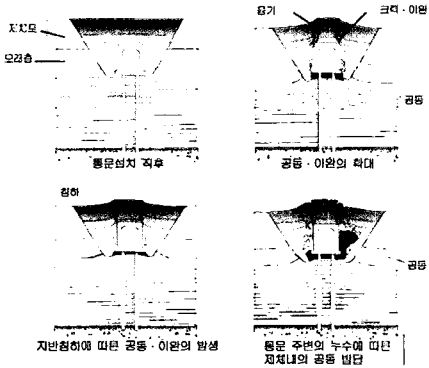


그림 4. 배수구조물 주위의 공동(空洞) 현상에 의한 제방붕괴(낙동강 백산제, 2002.8)

제방붕괴유형 분포
(총 조사 건수:758건, 기간: 1987-2003)

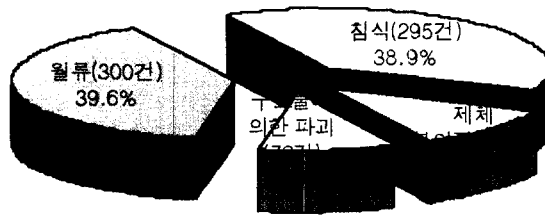


그림 5. 제방붕괴 유형 분석

다. 미국의 경우에는 미공병단에서 발간한 제방 설계 및 시공(Design and Construction of Levees, 2000)이 있는데, 우리나라나 일본에 비해 설계에 있어서는 원칙적인 사항을 간단히 기술하는 정도이고, 시공부분에 있어서는 목표 안전도를 확보하기 위해서 필요한 방법론 위주로 구성되어 있다. 이외에 제방과 관련하여 홍수벽, 하천제방 및 흙댐에서의 조경식재와 수목관리에 관한 지침(2000)이 있는데, 제방에 수목을 식재하는 경우 그 기준과 방법 등을 제시하고 있다.

3.1 제방 단면형상 설계기준

제방 단면의 설계에 있어서 그 크기를 결정하는 중요한 요소가 비탈경사이다. 동일한 제체높이와 둑마루폭을 가지고 있다면 비탈경사는 완만할수록 제방의

안전도는 향상된다. 일본의 경우, 하천제방설계지침(2000)에 1:3 이하의 완경사를 원칙으로 제시하고 있으며, 우리나라도 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미에 의한 극심한 홍수피해를 겪은 이후 2003년 10월에 비탈경사를 1:2에서 1:3 이하로 설계하도록 하천설계기준을 개정한 바 있다.

제방여유고와 관련해서는 우리나라와 일본이 동일하게 계획홍수량에 따라서 여유고를 결정하는데 비해 미공병단에서는 농경지 제방과 도시지역 제방을 구분하여 여유고에 차이를 두고 있다. 이는 치수안전도를 고려하여 여유고를 결정하는 것을 보여준다.

제체높이와 관련해서 우리나라와 일본은 관련 규정 자체가 없는 반면에 미공병단에서는 25ft(약 7.5m) 이하로 할 것을 권장하고 있으며, 규정 이상으로 축제할 경우 비탈경사를 완만하게 하거나 턱을 댄으로써

표 1. 국내외 제방 단면 결정 기준 비교

구 분	한 국 하천설계기준 (2002)	한 국 하천설계기준 (2003.10 개정)	일 본 하천제방설계지침 (2000)	미국(공병단) 제방설계 및 시공 (2000)
비탈경사	1:2이하	1:3이하	1:3 이하(수퍼제방 : 1/30)	1:2 이하
여유고	계획홍수량의 규모에 따라 여유고 결정	(변경 없음)	국내 기준과 동일	농경지 제방: 2ft 도시제방: 3ft
독마루폭	계획홍수량에 따라 독마루 폭 결정	(변경 없음)	국내 기준과 동일	최소마루폭(10ft~12ft)
제체높이	없음	(변경 없음)	없음	25 ft(약 7.5m)이하 ※ 규정치 초과시 턱 설치 또는 완경사화
턱의 폭	앞턱 : 연직방향으로 3~5m 간격, 폭 3m내외 뒤턱 : 연직방향으로 3m 간격, 폭 3m내외	턱을 두지 않음	턱을 두지 않음	제시되어 있지 않음
다짐도	최대 건조밀도의 90% 이상	(변경 없음)	90% (평균치 85% 이상 확보)	다짐기기사용시 95% 도달
더듬기	제체 특성, 기초지반의 토질 및 제체높이에 따라 더듬기 높이 규정	(변경 없음)	허용침하량으로 규정허용 침하량으로 규정	다짐 방법별로 더듬기 높이 설정

제체의 안전성을 확보하도록 제안하고 있다. 반면에 일본의 하천제방설계지침(2000)에서는 제방에 턱을 두지 않는 것을 원칙으로 하고 있는데, 빗물이 제방의 턱에 고여 제체로 침투하는 경우 제방의 안전성을 크게 저하시킬 수 있다는 점 때문이다. 우리나라도 2003년 하천설계기준개정시 이 점을 고려하여 턱 설치에 관한 내용을 삭제한 바 있다.

3.2 제방 안전성 평가 방법

제방 설계에 있어서 설계 단면에 대한 안전성을 평가하여 안전 여부를 결정하는 것은 매우 중요하다. 안전성 평가는 설계 대상 구간의 흐름특성, 기초 및 제체 특성 등을 고려하여 가능하면 모든 항목에 대해서 정확히 이뤄져야 할 것이다. 만약, 안전성 평가 결과, 제방이 불안정하다고 판단되면 안전도를 향상시킬 수 있도록 단면을 다시 설계하거나 강화 공법을 적절히 사용하는 것이 중요하다. 따라서 제방 안전도

평가를 어떤 항목에 대해서 어떤 방법으로 수행하는가 중요하다고 할 수 있다.

표 2는 국내외 안전성 평가 방법을 정리한 것이다. 표 2에 보인 바와 같이 안전성 평가 항목은 우리나라의 경우 활동, 누수 및 침하에 대한 안전성을 평가하도록 하고 있다. 미국의 경우 비탈면의 활동 파괴에 대해서만 안전성을 검토하는데 하중조건에 따라 안전성을 검토하도록 하고 있다. 일본의 경우 제방설계시 안전성 평가를 월류, 침투, 침식 및 구조물접합부에 대해서 실시하도록 하고 있는데, 침투에 대한 안전성 평가를 제외하고는 우리나라에서는 하지 않는 항목들이다. 월류에 대한 안전성 평가를 우리나라에서 수행하지 않는 제방 설계 기본방향이 월류를 허용하지 않는 것으로 되어 있기 때문이다. 일본 평가항목 중 구조물 접합부에 대한 안전성 평가가 있는데, 주로 제체내를 관통하는 배수구조물에 대한 점검 및 대책 등에 대해서 다루고 있다.

표 2. 제방 안전성 평가 항목 및 방법 비교

구분	한 국 하천설계기준(2000)	일 본 하천제방설계지침(2000)	미국(공병단) 제방설계 및 시공(2000)
평가 항목	1) 제방활동에 대한 안정 2) 제방누수에 대한 안정 3) 제방침하에 대한 안정	1) 월류에 대한 안전성 평가 - 비탈면, 마루부, 비탈끝 보호공 안정검토 2) 침투에 대한 안전성 평가 - 활동파괴 및 파이핑에 대한 안전성 3) 침식에 대한 안전성 평가 - 기존 호안공의 유무에 따른 평가 4) 구조물접합부의 안전성 평가	활동파괴에 대한 안전성 검토 - 하중조건 I : 축제종료시 - 하중조건 II : 장기간 정상침투 - 하중조건 III : 갑작스런 수위 저하 - 하중조건IV : 지진시
평가 방법	1) 활동에 의한 안전성분석 - 전응력 및 유효응력분석법 2) 누수에 의한 안전성분석 - 정상침투류 계산 방법 사용 - 파이핑에 대한 안전성 검토·한 계동수경사, 한계유속 및 크리 프비에 의한 판정	1) 월류, 침투, 침식에 대해 내·외력 을 산정하여 안전성 분석 2) 구조물접합부의 안전성 평가 - 외관관찰, 함내관찰, 연동시험 등	1) 활동 - 원호활동 및 썩기활동법 2) 침투 - 정상침투류법

표 3. 제체 활동에 대한 기준안전율

구 분	문 헌 명	기준안전율	비 고
국내 건설 교통부	하천시설기준(1993)	1.3	상시 및 홍수위시
	하천설계기준 (2003)	2.0	연직붕괴 고려(간극수압 미고려)
		1.4	연직붕괴 고려(간극수압 고려)
		1.8	연직붕괴 불고려(간극수압 미고려)
일본 건설성	하천제방설계지침 (2000)	1.3	연직붕괴 불고려(간극수압 고려)
		$1.2 \times a_1 \times a_2$ $a_1 : 1.2(\text{복잡}), 1.1(\text{단순}), 1.0(\text{신설제방})$ $a_2 : 1.1(\text{주의필요}), 1.0(\text{주의불필요})$	제내지축 사면 $a_2 : \text{축제이력 가중계수}$ $a_2 : \text{기초지반 피재이력 가중계수}$
		1.0	제외지축 사면

4. 하천제방 설계기법 개선 방향

대해 적절한 대응 방법이라 할 수 있다.

표 2는 국내외 제방 안전성 평가방법을 비교한 것이다. 우리나라는 형상규정에 의해 제방설계를 하는 반면에 일본은 내력 및 외력을 계산하여 안전성을 평가하는 성능 규정을 적용하여 해석하고 있다. 안전성 평가 항목도 우리나라가 활동, 누수 및 침하에 대해 조사하는 반면, 일본은 침투(활동 및 누수) 뿐만 아니라 침식 및 월류에 대해서도 평가하도록 되어 있어서 최근 이상홍수에 의해 발생하는 침식 및 월류 붕괴에

4.1 제방 활동 파괴에 대한 안전율

표 3은 우리나라와 일본에서 사용되는 활동에 대한 기준안전율을 정리한 것이다. 설계사례를 조사한 결과에 의하면, 우리나라에서는 안전율 1.3이 가장 많이 사용되고 있다. 반면, 일본의 경우 피재이력(被災履歴)과 축제이력에 따라 기준안전율에 가중치를 주게 되어 있다. 실제로 피재 및 축제이력이 복잡한

경우 기준안전율은 약 1.6이며, 이는 국내 기준보다 기준안전율이 높게 산정된다. 따라서 국내 제방의 안전성 향상을 위해서 붕괴이력 및 축제이력을 고려한 안전율의 도입이 필요할 것으로 보인다.

4.2 비정상 침투해석을 위한 홍수파형

일본은 비정상 침투류 해석을 통해서 제체누수 및 지반누수에 대한 안전성을 평가하고 있다. 이때 외력 조건으로서 홍수파형이 주어지는데 그림 6은 일본 하천제방설계지침에서 제시하고 있는 침투류 해석을 위한 홍수파형 결정 순서를 나타낸 것이다. 그림 6(a)의 여러 개의 하천 수위 파형 각각에 대해서 기준이 되는 수위(원칙적으로 평수위)마다의 지속시간을 구하고 그림 6(b)를 작성한다. 그림 6(b)의 지속시간에 대

한 포락선을 그린 후, 그 포락선으로 둘러싸인 면적을 구한다. 그림 6(a)의 수위파형중에서 홍수 말기의 감수부 경사(수위저하 속도)중 최대인 것을 찾아서 그 경사를 구한 다음, 그림 6(c)에 나타난 것처럼 그림 6(b)와 같은 면적이 되도록 증수부 곡선경사 및 지속시간을 산정하여 비정상 침투해석을 위한 기본 수위파형으로 결정한다.

그러나 홍수파형 결정시 계획홍수파형을 사용할 경우 과거 홍수사상에 의한 홍수지속시간이 반영되지 않으므로 안정성 향상 측면에서 보면 과거 홍수를 고려한 홍수파를 결정하는 것이 타당할 것으로 보인다. 과거 홍수사상을 고려한 홍수파형 결정을 위하여 낙동강 수계의 수위관측소중에서 자료가 양호가 9개 지점에 대해서 1987년 이후 대표적 홍수사상 11개를 추출하여 분석된 바 있다. 그림 7~10은 분석대상 지점

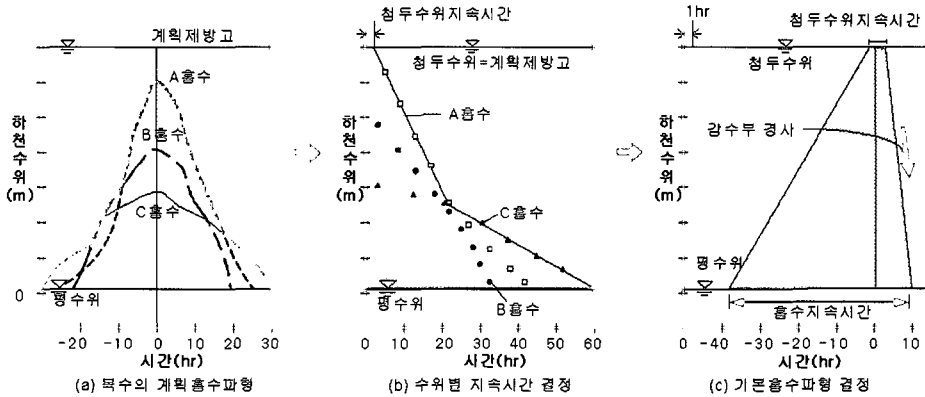


그림 6. 침투해석을 위한 홍수파형 결정 방법

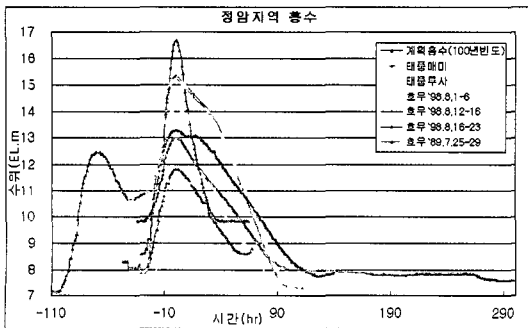


그림 7. 계획홍수와 홍수사상

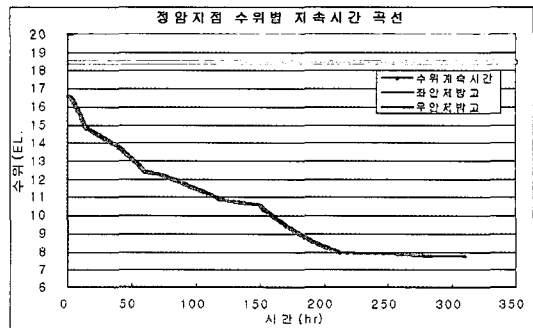


그림 8. 수위별 지속시간 합성

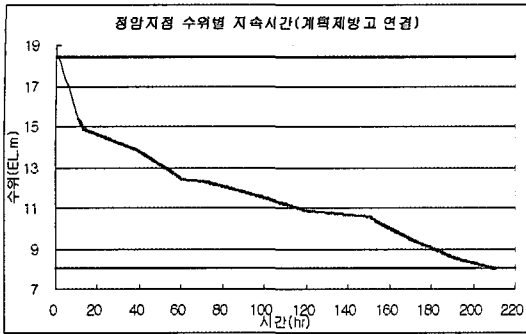


그림 9. 보정된 수위별 지속시간

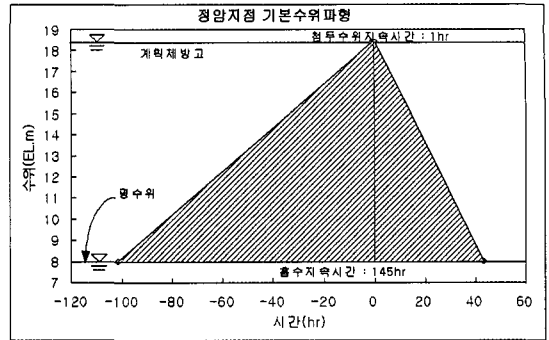


그림 10. 합성홍수파형

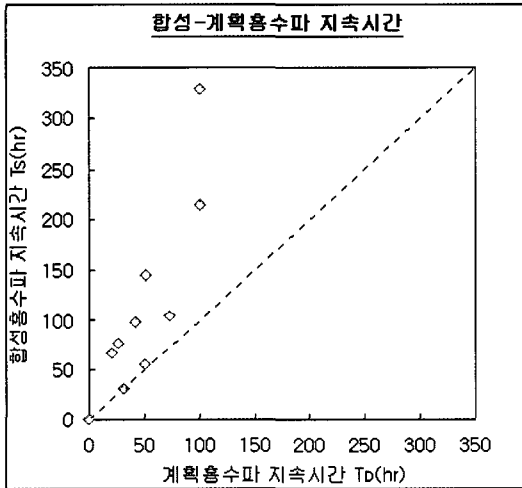


그림 11. 합성-계획홍수파 지속시간

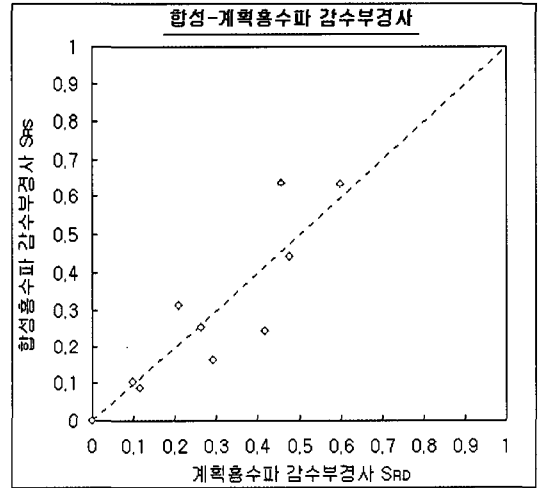


그림 12. 합성-계획홍수파 감수부 경사

중 남강의 정암 지점에 대해서 합성홍수파형을 작성하는 과정을 나타낸 것이다.

그림 11은 합성홍수파형의 홍수지속시간과 계획홍수파형의 홍수지속시간을 나타낸 것인데, 과거홍수사상의 지속시간을 반영한 합성홍수파의 지속시간이 계획홍수량 산정시 이용했던 계획홍수파의 지속시간보다 큰 것으로 나타났다. 그림 12는 합성홍수파의 감수부 경사와 계획홍수파의 감수부 경사를 비교한 것이다. 그림에서 점들의 편차는 있으나, 대체로 합성홍수파의 감수부 경사와 계획홍수파의 감수부 경사가 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 비정상 침투해석시 이와 같은 방법을 이용한다면 안전측면에 유리한 설계가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 침식에 대한 설계기법 개선

우리나라 대부분의 하천제방 비탈면에 호안이 설치되고 있음에도 불구하고, 호안의 종류나 제원을 결정할 수 있는 명확한 방법은 제시되어 있지 않다. 최근 돌망태나 환경블록 등이 많이 사용되고 있으나, 홍수시 유실되는 경우가 많이 발생하고 있어 정량적인 안전성 평가방법의 개발이 요구되고 있다.

4.3.1 호안공에 대한 안전성 평가기법

(1) 식생 호안

일본에서 수행하고 있는 안전성 평가방법에서 대

표유속과 유속계수로 표현되는 외력 소류력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_*' = V_0/\Phi, \Phi=(1/n) \cdot (H_d^{1/6}/\sqrt{g})$$

위의 식에서 V_0 는 대표유속, Φ 는 유속계수를 나타낸다.

평균근모량(σ_0)으로 나타내어지는 침식의 용이성을 나타내는 변수 $\alpha(= 50\sigma_0 + 9)$, 전단응력 지속시간(t), 허용침식깊이(Z_{brk})로 표현되는 내력 소류력(u_*)은 아래와 같다.

$$u_* = \frac{Z_{brk}}{\alpha} \frac{1}{\log t}$$

(2) 돌망태공

돌망태의 비탈덮기공은 대표 유속에 의해 망태속 재료의 이동을 허용하지 않는 조건으로 평가한다. 즉 망태속 재료는 무차원 외력 소류력에 견딜 수 있도록 설계한다. 안정조건은 아래와 같다.

$$\tau_{sd} = \tau_{sd} \times \cos\theta \sqrt{1 - \frac{\tan^2\theta}{\tan^2\phi}} \geq \tau_{sd} = \frac{u_*^2}{sgD_m}$$

τ_{sd} 는 내력 소류력을 나타내고 τ_{sd} 는 외력 소류력, s 는 하상재료의 수중비중(≈ 1.65), D_m 는 돌망태안의 돌의 평균입경을 나타낸다.

(3) 콘크리트 블록공

비탈면에 설치된 콘크리트 블록은 유체력에 의한 활동이 생기는 조건으로 안전성 평가를 조사한다. 즉, 수중에서의 콘크리트 블록의 항력과 양력에 대한 활동에 대한 안정성을 조사한다. 안정조건은 아래와 같다.

$$\mu(W_w \cos\theta - L) \geq ((W_w \sin\theta)^2 + D^2)^{1/2}$$

양력(L)은 $L = \rho_w/2C_L A_b V_b^2$, 항력(D)은 $D = \rho$

$w/2C_D A_D V_d^2$ 와 같으며, W_w 는 비탈덮기공의 부재 수 중중량을 나타내는데 $W_w = (\rho_b - \rho_w)gK_v A_b t_b$ 와 같다.

4.3.2 국내 제방 적용성 검토

제방 침식의 정량적인 안정성 평가를 위하여 지난 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미에 의한 홍수시 제방 피해를 입은 강원도 지역의 하천에 대해 현장조사를 수행하고 그 결과를 가지고 안정성 평가 방법의 적용성을 검토하였다.

식생호안, 콘크리트 블록공 및 돌망태에 대한 안전성 평가결과는 각각 표 4에 나타난 바와 같다. 표 4에 나타난 바와 같이 각 호안공에 대해 안전성 평가 결과와 현장조사결과가 일치함을 알 수 있다. 조사 지점에 대한 홍수량을 강우-유출 모형을 이용하여 산정하였고, 호안공의 붕락 당시의 유속 조건을 정확히 알 수 없다는 불확실성을 가지고 있긴 하나 안정성 평가 방법의 적용성은 어느 정도 확보된 것으로 판단할 수 있다.

지금까지 살펴본 바와 같이 식생공의 안전성 평가를 통하여 호안공 필요 유무를 판단한 후 호안공 필요시 각 호안공법에 대한 안전성 평가에 의해 적합한 호안공을 선택하여 제방 강화가 이루어져야 할 것이다. 또한 침식에 대한 제방의 안전성은 홍수시의 제방 부근의 대표유속에 의해 결정되는데 이 유속은 하도의 형상과 하상 재료 등에 관계가 되므로 하도 특성을 평가하는 하나의 지표인 하도의 세그먼트 분류를 통해 침식에 대한 안전성 평가와 호안공법의 분류가 필요한 것으로 판단된다.

4.4 월류에 대한 제방설계 방안

앞의 제방붕괴 유형 분석에서 홍수시 월류에 의한 제방붕괴 사례가 전체 피해원인 중 39.6%를 차지하고 있어 월류에 의한 피해가 큰 것으로 나타났다. 월류의 경우, 계획홍수량을 초과하는 경우에 발생하기 때문에 자연재해라 볼 수 있지만, 중요 시설이 있는 구간에 대해서는 월류시 제방이 완전 붕괴되는 것을 방지하여 인명 및 재산을 보호할 수 있는 대책이 수

표 4. 식생호안 안전도 평가 결과

(1) 식생 호안 항목

지점	항목	허용침식깊이 (뿌리깊이)(m)	전단응력 지속시간(분)	외력소류력 (m/s)	내력소류력 (m/s)	평가결과	현장조사결과
양양남대천 No.22 좌안지점		277.73	40	0.226	0.393	안정	안정
강릉남대천 No.38 좌안지점		231.63	60	0.307	0.300	불안정	불안정

(2) 콘크리트 블럭공 항목

지점	항목	호안공의 수중중량(kgf)	양력 L (kgf)	항력 D (kgf)	외력(kgf) $((W_w \cdot \sin\theta)^2 + D^2)^{1/2}$	내력(kgf) $\mu(W_w \cdot \cos\theta - L)$	평가결과	현장조사 결과
강릉남대천 No.38우안지점		277.73	117.79	94.07	168.56	79.40	불안정	불안정
주수천 No.4좌안지점		231.63	27.93	53.90	139.67	106.96	불안정	불안정

(3) 돌망태공하천지점대표

하 천	지 점	대표유속 (m/s)	내력 τ_{sd}	내력 $\tau_{,sd}$	평가결과	현장조사 결과
양양남대천	No.22우안	2.98	0.097	0.022	안정	안정
낙 풍 천	No.16좌안	2.37	0.0858	0.014	안정	안정
골 지 천	No.14좌안 저수호안	12.78	0.117	0.435	불안정	불안정
	No.14좌안 고수호안	12.78	0.040	0.433	불안정	불안정
	No.14 상류 100m 좌안 저수호안	12.78	0.117	0.147	불안정	불안정
	No.42+50 하류 50m좌안 저수호안	6.28	0.114	0.116	불안정	불안정
	No.42+50 하류 50m좌안 고수호안	6.28	0.090	0.116	불안정	불안정

립되어야 할 것으로 판단된다.

4.4.1 고규격 제방(수퍼제방)

고규격 제방이란 설계홍수보다 훨씬 큰 홍수가 발생하여 제방을 월류하여도 제방붕괴를 막을 수 있는 폭이 매우 넓은 제방으로서, 뒷비탈 경사가 약 1/30(제방의 높이의 약 30배)정도로 매우 완만하며, 뒷비탈측의 통상적인 이용을 위해 기본단면형을 확보 하되 안전성이 보완되는 형태로 성토하여 토지이용이 가능한 것이 특징이다.

4.4.2 친환경 도시제방

(1) 그린(Green) 제방

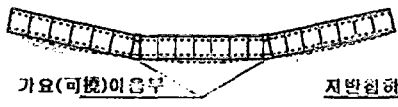
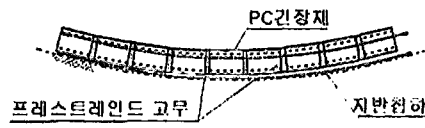
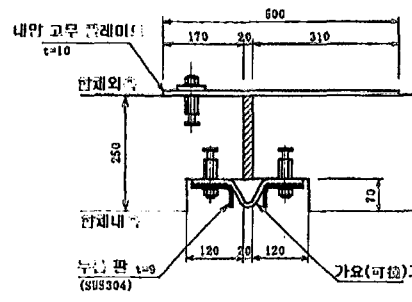
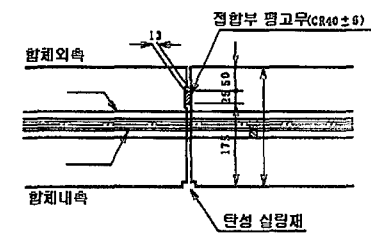
제내지에 수림대를 조성하여 제방을 강화하고 환

경상의 녹지정비를 겸할 수 있는 제방이다. 일본의 경우 홍수에 따른 제방 피해조사결과 제내지 구간에 콘크리트나 잔디로 제방을 보호한 것보다 수림대를 조성한 구간에서 제방 붕괴가 거의 발생하지 않았고, 제방붕괴가 일어나도 그 피해가 매우 적은 것으로 밝혀지면서 그 필요성이 높아지고 있다. 따라서 제방 자체와 제방 뒷비탈 및 뒷기슭에 녹화를 적극 검토하여 제방 파괴에 의한 피해를 최소화시키는 방안을 고려할 수 있다.

(2) 프론티어(Frontier)제방

설계 빈도 이상의 홍수로 인하여 월류가 발생하였을 때 제방 뒷기슭 밑단부의 세굴을 막기 위해 돌망태 공법 등을 뒷기슭에 적용하여 강화하는 제방이다.

표 5. 강접합 방식과 탄성접합 방식의 비교

구분	강접합(+이음부)	탄성접합
개념도		
이음부 상세도		
특징	<ul style="list-style-type: none"> - 1개의 이음부에 큰 변형능력을 설정하고 이음부의 변형 능력에 따라서 주변지반 침하·변위에 따라 변형 - 접합부가 강한 구조이고, 구조특성은 통상의 RC구조의 본체 세로 방향으로 변하지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> - 통문 부재 연결부의 변형 능력은 작지만 다수의 접합부의 변형에 따라 주변 지반침하·변위에의 굴요성이 좋음 - 통문축 방향에 인장력이 작용하고 있기 때문에 접합부나 이음부의 균열은 미소

수목이나 잔디 등을 식재하여 자연성을 살리거나, 부직포로 보강한 잔디호안을 통해 자연성을 살릴 수 있으며, 수퍼제방과 같이 제내지측 부지확보가 용이치 않은 지역에 있어 제방 보강 형태로 적합한 공법이다. 프론티어 제방 조성에 따른 효과로는 제방의 강화를 통한 신뢰성 향상과 부차적으로 식재지반 확충을 통한 친자연성 향상 등을 들 수 있다.

4.5 구조물 접합부에 대한 설계 방안

일본의 경우 부등침하에 의한 붕괴가능성이 큰 말뚝기초의 사용을 1999년 이후로 금하고 있으며, 그 대안으로 유지지기초(柔支持基礎)를 제시하고 있다. 또한, 배수구조물 주위의 제방 안전성 평가를 위하여 제방 및 구조물 제원, 피재이력, 외관, 함내 상황, 공동현상에 의한 유로형성과 흐름에 대한 연통시험, 그리고 전문가의 조언 등을 검토하도록 하고 있다.

최근에는 유연지지기초와 더불어 유구조(柔構造) 통문이 사용되는데, 유구조 통문이란 기초 지반의 침

하가 발생하더라도 구조물이 침하형상에 따라 유연하게 거동하도록 하여 공동현상을 방지하는 공법이다. 표 5는 일본 홋카이도 지방의 나카지마(中島) 통문 공사에 적용된 신기술을 기존 방법과 비교한 것이다. 표 5에 나타난 바와 같이 기존 공법과 신기술의 차이는 통문 부재를 연결하는 방법에 따라 다르다. 기존 공법은 통문 부재를 강접합을 함으로써 침하 발생시 구조물이 파괴되는 반면, 신기술에서 채용하고 있는 탄성접합방식은 기초지반의 침하가 발생하더라도 유연한 통문 부재가 침하된 만큼 탄성적으로 거동하므로 부등 침하에 의한 공동현상이 발생하지 않아 통문 주변의 누수현상을 방지할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있다.

5. 결론 및 제언

제방은 홍수방어를 위한 가장 중요한 구조물이며, 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 실효성 있는 안전성 평가 기법을 개발할 수 있을 것이다. 제방 안전성 향상을 위한 설계 방안을 정리하면 다음과 같다.

(1) 정량적인 제방 안전성 평가

제방 설계시 형상규정뿐만 아니라 내·외력에 의한 성능규정을 도입하여 제방의 안전성을 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한, 극한홍수에 의한 월류 붕괴를 고려할 수 있도록 월류에 안전한 제방(난과제)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 유속

이나 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 있다.

(3) 월류에 대한 안전성 확보

제방은 보통 흙을 재료로 하므로 월류에 대해서 매우 취약하다. 일본의 고규격, 완경사, Green, Frontier 제방 도입을 신중히 검토하는 것이 필요하다.

(4) 구조물 접합부에 대한 안전성 평가방법 및 대책

구조물 접합부의 붕괴 원인이 되는 공동현상 발생을 방지하기 위해 일본에서 적용되고 있는 유지지기초(柔支持基礎)의 도입을 고려할 수 있으며, 이를 위해서 유지지기초의 거동에 대한 실험실증 연구수행이 선행되어야 할 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
한국건설기술연구원(2002). 하천제방관련 선진기술 개발 연차보고서-1차년도, 한국건설기술연구원/건설교통부

한국건설기술연구원(2003). 하천제방 관련 선진기술 개발 연차보고서-2차년도, 건설교통부/한국건설교통기술평가원
한국수자원학회(1999). 하천공사표준시방서
한국수자원학회(2003). 하천설계기준