

침식에 대한 일본의 제방 안전성 평가 방법



류 권 규 |

동의대학교 토목공학과 조교수
pururumi@deu.ac.kr



이 남 주 |

경성대학교 토목공학과 교수
njlee@ks.ac.kr

1. 머리말

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 성토 재료의 불량과 제체 및 지반 누수에 의한 파이핑 등에 의한 것을 말하며, 하천 구조물에 의한 붕괴는 하천횡단구조물이 붕괴되면서 제방이 붕괴되는 경우나 제방과 이질 재료로 건설된 구조물 접촉면의 붕괴 등을 들 수 있다(윤광석 등, 2006).

하천 흐름으로 인한 침식에 대한 제방의 안전성은 하도의 형상(평면 및 종횡단 형상), 제방 전면의 하안(고수부)의 상황, 제방 근방의 홍수류의 수리 조건, 현재의 하안 또는 제방 본체를 방호하는 구조물의 공중, 제방의 토질 조건 등에 관련이 있다. 침식 작용으로서는 유수에 의한 것 이외에 유목이나 파랑에 의한 것도 있지만, 침식 작용이 예상되는 경우에는 별도의 검토가 필요하다. 홍수시의 제방 근방의 유수에 의한 진단력을 외력으로 하고, 내력으로서 제방을 피복하는 식생, 고수부의 높이(저수 하안고)나 폭을 고려해서 침식에 대한 안전성, 즉 제방의 제외 비탈면이 침식되는가 또는 제외 기초부가 세굴될 가능성이 있는가를 평가한다. 이미 호안 등으로 방호되어 있는 제방에 대해서는 호안공의 역학적인 안정성을 평가하고, 침식에 대한 안전성이 확보되어 있는가 아닌가를 판단한다. 침식에 대한 방호가 필요 또는 시설의 호안 등의 안정성에 문제가 있다고 평가되면, 호안 등의 직접적인 대책뿐만 아니라, 하도 형상의 개선 등을 포함해서, 대상 구간의 하천의 특성에 적합한 방호 방안을 종합적으로 검토한다. 호안공에 의한 방호가 필요하다고 인정되는 경우에는 침식에 대해서 소요의 안전성을 확보할 수 있는 호안 공중이나 구조 등을 검토한다. 이 기사에서는 국토기술연구센터(2002)의 일본의 침식에 대한 제방의 안전성 평가 방법을 소개하고자 한다.

2. 침식에 대한 구조검토 순서

침식에 대한 구조 검토의 순서는 그림 1과 같다. 평가의 내용이나 방법은 호안공이 없는 경우와 있는 경우가 서로 다르다. 즉, 호안공이 없는 구간에 대해서는 제방 근방의 유속이나 고수부폭을 기반으로 제방의 안전성을 평가하는 데 대해서, 호안공이 있는 구간에 대해서는 호안공 그 자체가 역학적 안정성을 가지고 있는가를 평가한다. 또, 모든 경우에 하상 변동이나 사주, 고수부의 침식에 대해서도 고려할 필요가 있다.

침식에 대한 제방의 강화 대책으로서는 주로 호안공에 의한 대응을 다루고 있지만, 이미 서술한 것과 같이 하도의 형상이나 수제공 등에 의한 대응을 포함해 폭넓은 대책을 음미하는 것이 필요하다. 호안공에 의한 강화가 선택된 경우에는 하도의 특성이나 홍수 특성, 또는 과거의 피해 사례나 실적을 고려하여 침식 방지 기능을 발휘할 수 있는 호안 공종을 선정하고, 역학적 안정성을 평가한 후에, 하도 계획과의 정합성, 상하류의 연속성, 경제성, 내구성이라고 하는 점 외에, 자연 환경의 보전이나 재생, 친수성이란 면도 포함해 종합적으로 판단하여, 최

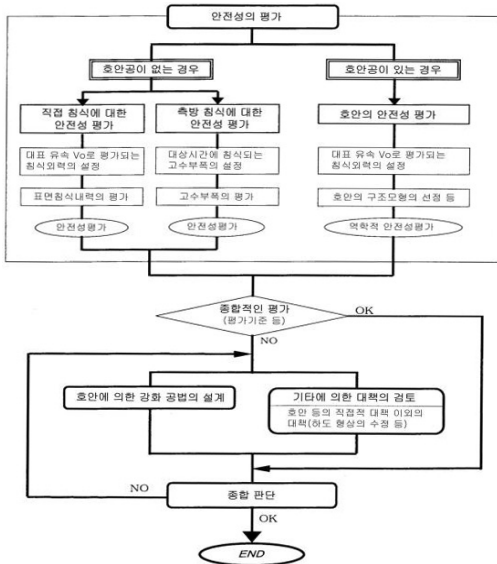


그림 1. 침식에 대한 제방의 구조 검토의 순서

종적으로 설치해야 할 호안의 공종과 그 제원을 결정하게 된다.

3. 침식에 대한 구조 검토 준비

하천 제방의 침식에 대한 구조 검토에 앞서서 일련 구간을 세분하고, 세분한 구간별로 대표 단면을 선정한다. 각 수순에서의 침식면에서 본 유의점을 정리해 놓는다. 침식에 대한 안전성 평가에서는 전제가 되는 하도 조건, 예를 들면 현황 하도를 대상으로 할 것인가, 또는 개수 진척 단계의 하도를 상정할 것인가 등을 명확히 해 놓는 것이 중요하다.

침식에 대한 제방의 구조 검토에 있어서는 먼저 하도 조건을 설정한 후에, 하도의 세그먼트 분류, 하도(제방)의 평면 형상, 고수부의 제원, 기와의 피해 개소, 기설 호안의 유무나 공종 등을 지표로 하여, 그림 2와 같이 하여, 일련 구간을 세분할 필요가 있다. 기와의 점검 결과가 있다면 세분의 자료로 활용해도 좋다. 세분된 구간(세분 구간)은 침식에 대한 안전성 평가와 마찬가지로, 평가의 최소 단위가 되며, 침식의 관점에서 제방의 구조가 거의 동일하게 되는 구간인 것에 유의할 필요가 있다.

침식에 대한 제방의 구조 검토에서는 세분된 구간별로 침식에 대해서 가장 위험하다고 생각되는 단면을 한 단면 이상 선정한다. 가장 위험한 단면으로는 기본적으로는 세분 구간내에서 유속이 빠르고, 홍수시의 하상 변동이 크고, 고수부폭이 좁은

(좌안)

거리 (km)	(하류측) ←				→ (상류측)										
	세그먼트2-2		세그먼트2-1		세그먼트1										
a) 하도의 세그먼트 분류	직선 Ri		직선 Ri		직선 Ri		직선 Ri								
b) 하도(제방)의 평면형상	직선 Ri		직선 Ri		직선 Ri		직선 Ri								
c) 고수부 제원	N		N		N		N								
d) 피해이력을 가진 개소	●		●		●										
e) 기설호안	고수호안		제방호안		저수호안										
일련구간의 세분	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮

주1) Ri: 만곡부 내안, Ro: 만곡부 외안
주2) N: 예를 들어, 고수부폭과 저수 하안고의 차이에서 보아 위험하다고 보이는 구간(후술)

그림 2. 일련 구간 세분의 예

등, 내력이 가장 작게 되는 단면이다. 이 때, 현재의 상황뿐만 아니라 장래의 상황에서 상정해서 가장 위험한 단면도 선정 대상이 된다.

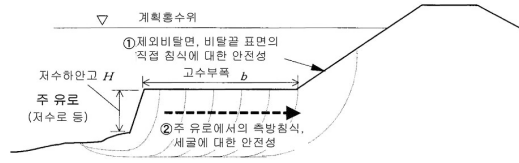


그림 3. 침식에 의한 제방 파괴의 모식도

4. 침식에 대한 안전성 평가

4.1 평가외력

제방의 침식에 대한 안전성 평가의 외력으로서 대표유속(V_0)를 설정하는 것으로 하고, 대표유속으로는 계획 홍수위(당면의 정비 목표로 하는 홍수 때의 수위가 정해져 있는 경우에는 그 수위) 이하의 수위 때에, 가장 빠른 평균유속에 만곡 등에 의한 보정 계수를 곱해서 산출하는 것으로 규정되어 있다.

하도 특성에 의해서는 계획 홍수위시 또는 당면의 정비 목표로 하는 홍수 때의 수위보다 낮은 수위 때 쪽이 침식 외력이 큰 경우가 있다. 또, 대홍수 때에는 급만곡부의 내안 측에 있는 고수부를 물이 흘러가서, 세굴될 가능성(藤田光一, 1998)도 있기 때문에, 수위의 설정에 있어서는 하도 특성을 충분히 고려할 필요가 있다. 또, 현황 제방의 안전성을 평가하는 경우에는 계획 홍수위 또는 당면의 정비 목표로 하는 홍수 때의 수위 이하의 여러 개의 수위를 대상으로 안전성을 평가해 두는 것이 바람직하다.

4.2 평가항목과 평가기준

(1) 호안공이 없는 경우

침식에 의한 제방의 파괴 상황은 일반적으로 그림 3에 보인 것과 같으며, 제외 비탈면이나 비탈끝 부근의 유수가 직접 작용해서 표면을 피복하는 식생이 벗겨지고, 제체를 구성하는 토사가 유실되어 파괴에 이르는 것과, 저수로 등의 주 유로에서의 측방 침식, 세굴에 의해 파괴에 이르는 것으로 크게 나눌 수 있다. 이런 점에서 「지침」에서는 침식에 대한 제방의 안전성 평가의 항목을 다음과 같이 규정

표 1. 침식에 대한 제방의 안전성 평가 기준

① 제방 제외 비탈면 및 비탈끝 표면의 직접 침식에 대한 안전성	표면침식내력 > 대표유속 V_0 로 평가되는 침식외력
② 주 유로(저수로 등)에서의 측방 침식, 세굴에 대한 안전성	고수부폭 > 평가대상시간에 침식되는 고수부의 폭

하고 있다.

- ① 제방 제외 비탈면, 비탈끝의 직접 침식에 대한 안전성
- ② 주 유로(저수로 등)에서의 측방 침식, 세굴에 대한 안전성

침식에 대한 제방의 안전성의 평가 기준으로 표 1에 제시되어 있다. 단, 하안 방호 등의 적절한 대책이 시행된 경우에는 이렇게 제한되는 것은 아니다.

(2) 호안공이 있는 경우

호안공 등의 방호공이 있는 경우에 대해서는, 호안공 그 자체의 역학적 안정성을 평가할 필요가 있다. 특히 그림 3에 보인 측방 침식에 대해서는 기초 공이나 비탈면침공에 의한 세굴에의 대책이 중요하게 된다. 호안공의 역학적 안정성의 평가에 대해서는 국토개발기술연구센터(國土開發技術研究センター(1999)) 등의 참고문헌을 참조할 수 있다.

5. 침식에 대한 안전성 평가방법

5.1 호안공이 없는 경우

(1) 제외 비탈면 및 비탈끝 표면의 안전성 평가
하천 제방은 우수에 의한 침식의 방지 및 환경

보전 등의 관점에서 잔디 등의 식생으로 피복하는 것으로 하고 있다. 따라서, 제외 비탈면, 비탈끝 표면의 침식에 대한 안전성은 대표유속 및 유속작용 시간에서 평가된 침식외력과, 식생으로 피복된 비탈면의 표면 침식내력을 비교하여 평가할 필요가 있다.

식생으로 피복되어 있는 비탈면의 표면 침식 내력, 즉 식생의 내침식성은 높이가 그다지 높지 않은 식물의 경우, 제방 식생의 부위 중에서 내침식성을 발휘하는 주요한 부분은 뿌리줄기이며, 유수에 의한 침식에 의해 지중에서 씻겨 나온 근모층이 지표면 부근의 유속을 느리게 하여, 소류력의 저감 효과가 발휘되는 것이다(宇多 등, 1997).

- ① 식생에 의한 침식 방지 효과가 발휘된다고 하는 설계상의 최대 침식 깊이를 허용 침식 깊이로 정의하고, 허용 침식 깊이까지 침식이 진행되는 시간내에만 침식 효과가 발휘된다.
- ② 지표면 근방에 뿌리가 많이 포함될수록 높은 내침식성이 발휘되는 특성을 고려하여, 지표면 근방의 뿌리줄기의 양(평균 근모량)에 의해 식물이 가진 내침식성이 다르다.

고 하면, 식생에 의한 표면 침식 내력은 유수에 의한 전단력이 작용하는 지속 시간 와 평균 근모량을 매개 변수로 하여 다음 식에 의해 구할 수 있다(宇多 등, 1997).

$$u_{*c} = \frac{Z_{brk}}{\alpha} \frac{1}{\log t} \quad (1)$$

여기서 u_{*c} 는 마찰속도 (m/s), t 는 전단응력이 작용하는 지속시간 (min), Z_{brk} 는 허용침식깊이 (cm), α 는 침식의 용이성을 나타내는 변수 (= $-50\sigma_0 + 9$), σ_0 는 평균근모량 (gf/cm^3)으로 지표면에서 깊이 3 cm 까지의 단위 체적당 흙중에 포함된 뿌리 및 지하줄기의 총중량으로 정의한다.

식 (1)은 시간적으로 일정한 유속이 작용하는 조건에서 적용할 수 있는 것이다. 허용 침식 깊이를

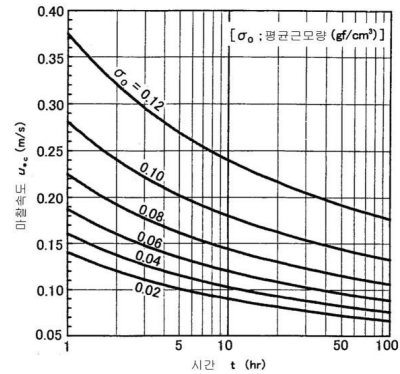


그림 4. 식생의 표면 침식 내력(宇多 등, 1997)

$Z_{brk} = 2.0$ cm로 하여 식 (1)을 그린 것을 그림 4에 도시하였다.

유속이 시간적으로 변화하는 경우에는 다음의 간편법에 의해 안전성을 평가한다. 간편법은 다음의 가정에 기반하고 있다.

- ① 수위 파형을 침두 수위를 정점으로 하는 삼각형으로 근사할 수 있다.
- ② 수위의 변화에 따라 유속이 증감한다.

이들 가정이 맞지 않는 경우에는 시간 변화를 고려한 평가를 수행해야만 한다.

침식외력으로 지속 시간 와 그 시간내의 마찰 속도의 평균값을 설정한다. 지속 시간은 고수부 높이를 상회하는 수위의 지속 시간을 개략값으로 결정한다. 는 간편법에서는 다음 식에 의해 구한다.

$$u_{*ave} = 0.82 u_{*max} \quad (2)$$

간편법이란 ①과 ②의 가정이 들어 맞는 경우에는 u_{*ave} 는 침두값 u_{*max} 의 약 82%에 대응하는 것으로 한다. 본 지침에서는 u_{*max} 는 계획 홍수위때의 u_* 로 하여 설정한다. u_{*max} 는 다음 식에 의해 구한다.

$$u_{*max} = V_{o,max} / \psi \quad (3)$$

여기서, $V_{o,max}$ 는 계획 홍수위 때의 대표 유속, ψ 는 유속 계수로 다음 식에 의해 구한다.

$$\psi = \frac{1}{n} \frac{H_d^{1/6}}{\sqrt{g}} \quad (4)$$

여기서, n 은 Manning 계수, H_d 는 수심(m), g 는 중력가속도(m/s^2)이다.

다음에 지속시간 t 를 식 (1)에 대입해서 표면 침식내력 u_{sc} 를 구한다. 이상에서 $u_{sc} > u_{s,ave}$ 이라면, 제방 제외 비탈면 및 비탈끝 표면의 직접침식에 대한 안전성을 확보되어 있다고 평가한다.

침식에 대한 제방의 안전성의 평가에 이용하는 대표유속에 대해서는 적절한 방법으로 구한 평균 유속의 최대값에 만족 등에 의한 보정 계수를 곱해서 산정할 필요가 있다. 식 (1)은 다음과 같은 조건인 경우에 적용할 수 있다는 점에 유의할 필요가 있다.

- 벼과의 식물이 우점종인 식물 군락이 번성하고 있다(뿌리 줄기의 직경이 최대 1 mm 정도).
- 두더지 굴로 대표되는 나지부가 거의 없고, 식물에 의해 균일하게 피복되어 있다.
- 지면의 구성 재료가 실트 내지 실트 혼합 모래이다.
- 마찰 속도 u_s 가 약 27 cm/s 이하이다.
- 평균 근모량 σ_0 가 0.02~0.12 gf/cm³의 범위 내에 있다.

평균근모량 σ_0 의 측정은 다음과 같이 하면 좋다.

- ① 선정된 조사 지점의 비탈면에 염화비닐관을 박아 넣는다.
- ② 염화비닐관에 들어간 흙을 지표면에서 3 cm 까지 눌러 내어 커터 등으로 잘라 낸다.
- ③ 흙에 포함된 뿌리 및 지하 줄기를 물로 씻어 낸 뒤, 이들의 총중량을 측정한다.
- ④ 총중량을 잘라낸 흙의 체적으로 나누어, 평균 근모량을 계산한다.
- ⑤ 이상의 측정을 3회 수행하고, 그 평균값을 해당 조사 지점의 평균근모량으로 한다.

근모량의 조사가 곤란한 경우에는 잔디의 피도별의 마찰 속도와 시간의 관계를 이용해서 제방의 내침식성을 평가하는 방법도 있다. 대표유속 2 m/s를 개략값으로 하여, 그 이하라면 제방 제외 비탈면 및 비탈끝 표면의 내침식성은 일부 확보되어 있는 것으로 생각할 수 있다.

(2) 측방 침식과 세굴에 대한 안전성 평가

홍수때에는 주 유로(저수로 등)에서의 측방침식, 세굴에 의해 제방이 피해를 받는 경우가 있다. 측방 침식의 속도는 침식의 형태나 하안에 작용하는 외력과 그 작용 시간에 따라 다르며, 이들은 하도 특성 및 평면형과 관계가 깊다. 침식은 여러 홍수의 반복에 의해 진행되는 것으로, 침식 폭에 대한 평가는 홍수가 작용하는 기간을 설정한 후에, 하도 특성 및 침식 형태에 대응한 침식속도의 평가방법을 이용해서 수행할 필요가 있다. 홍수가 작용하는 기간은 대상 하천의 상황을 종합적으로 감안하고, 평가 대상기간을 결정할 필요가 있다. 최소의 평가대상 구간은 한 홍수(1회의 홍수)이지만, 평가대상시간을 한 홍수로 설정한 경우에는 홍수 때의 점검과 대처하는 것이 필요하게 된다.

침식속도의 평가법에 대해서는 수리학적, 토질 공학적인 해명은 아직 충분히 되어 있다고 말할 수 없으므로, 평가대상시간에 침식되는 고수부의 폭을 평가 기준으로 이용하는 것으로 하고 있다. 1회의 홍수에 의한 고수부 등의 침식 폭의 개략값을 표 2에 보인다. 표에 보인 값은 한 홍수로 생긴다고 예상되는 주 유로(저수로 등)에서의 측방 침식, 세굴량의 개략값이며, 현지 하천에서 수집한 1회의 홍수(모두 계획 홍수위 이하)에 의한 침식량의 실적을 정리하여 얻어진 것이다(土木研究所, 1989). 또, 해당 하천에서 기왕의 홍수에 의한 고수부의 침식폭이 정리되어 있는 경우에는, 이들 실적을 파악해서 평가에 이용할 필요가 있다.

표 2. 제외 비탈끝 부분의 세굴에 대한 안전성 평가 기준 (國土開發技術研究センター, 1999)

하도의 세그먼트 분류	평가 기준 (한 홍수로 침식되는 고수부 폭의 개략값)
1	40 m 정도
2-1	고수부폭 b > 저수 하안고 H 의 5배
2-2 및 3	고수부폭 b > 저수 하안고 H 의 2~3배

5.2 호안공이 있는 경우

호안공이 있는 경우의 안전성 평가는 비탈복공,

학술/기술기사

기초공 및 비탈면침공의 각각에 대해서, 주로 설정된 외력에 기반하여 역학적으로 안정성이 확보되어 있는가를 평가한다. 평가는 먼저 대표 단면에서의 기설 호안의 제원을 설정한 후에, 비탈복공에 대해서는 공중 및 구조, 상정된 파괴의 요인이나 형태, 및 설치 상황을 고려해서 구조 모형을 선정하고, 대표 유속을 외력으로 하여, 두께(중량)이나 지름 등이 부족하지 않은가를 평가한다. 한편, 기초공에 대해서는 최심 하상고의 평가값(추정 최대 세굴심)을 기반으로, 기초공의 마루높이나 그 구조, 또는 비탈면침공의 구조를 고려해서 안정성이 확보되어 있는가를 평가한다. 기설 호안의 안전성 평가에 있어서는 역학적인 안정성의 평가의 결과를 파악한 후에, 설정된 하도 조건의 타당성, 하도의 형상이나 하상의 상황, 호안의 변형 상황, 피해 이력 등을 충분히 고려하여 종합적으로 안전성을 평가할 필요가 있다.

6. 맺음말

일반적으로 홍수시 제방 붕괴 원인은 크게 월류,

침식, 제체(堤體) 불안정 및 하천구조물에 의한 붕괴 등 4가지로 구분할 수 있다. 이 기사에서는 국토기술연구센터(2002)의 일본의 침식에 대한 제방의 안전성 평가 방법을 소개하였다. 침식에 대한 구조 검토의 순서를 그림으로 정리하였고, 평가의 내용이나 방법은 호안공이 없는 경우와 있는 경우로 구분하여 기술하였다. 하천 제방의 침식에 대한 구조 검토에 앞서서 일련 구간을 세분하고, 세분한 구간별로 대표단면을 선정하는 방법을 정리하였다. 제방의 침식에 대한 안전성 평가의 외력으로서 대표 유속을 설정하고, 호안공이 없는 경우와 있는 경우로 구분하여 침식에 대한 안전성 평가방법을 기술하였다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08 기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 🍷

참고문헌

1. 윤광석, 김규호, 이성준 (2006). “하천제방의 안전성(수공학적 측면).” 물과 미래, 한국수자원학회, 제39권, 제5호, pp. 14-19.
2. 藤田光一 (1998) 大規模破堤による地形変化の實態, 土木研究所資料 第3526号.
3. 國土開發技術研究センター (1999) 護岸の力學設計法, 山海堂.
4. 國土開發技術研究センター (2002) 河道計畫檢討の手引き, 山海堂.
5. 宇多, 望月, 藤田, 平林, 佐々木, 服部, 藤井, 深谷, 平館 (1997) 洪水流を受けた時の多自然型河岸防衛工, 粘性土, 植生の舉動, 土木研究所資料 第3489号.
6. 土木研究所 (1989) 河道特性に関する研究 -その2- 高水敷の機能に関する研究-, 第43回 建設省 技術研究会, 建設省 河川局 治水課.