

일본의 침투에 대한 제방의 안전성 평가 방법



류 권 규
 동의대학교 토목공학과 조교수
 pururumi@deu.ac.kr



이 남 주
 경성대학교 토목공학과 교수
 njlee@ks.ac.kr



이 상 호
 부경대학교 건설공학부 교수
 peterlee@pknu.ac.kr

1. 머리말

하천 제방의 침투에 의한 피해는 강우 및 하천수의 침투에 의해 제체 침윤면이 상승하는 것에 의한 활동 파괴(sliding, 침윤 파괴) 및 기초 지반의 침투압의 상승에 의한 관공 파괴(piping, 침투 파괴)가 주된 것이다. 하천 제방의 파괴 형태도 과거에는 월류에 의한 붕괴가 상대적으로 줄어들고 있다. 외수위의 상승에 따라서 제방에 대한 외력이 크게 되

어 온 것 등에서 최근에는 누수가 눈에 띄게 증가하고 있다. 일본에서는 누수 문제에 대해서는 1951년도부터 건설성의 직할기술연구회의 연구 과제(建設省 河川局 등, 1987)가 되는 등, 오래 전부터 많은 연구가 수행되었고, 또 그 대책에 대해서도 각 하천에서 각종 공법이 수행되어 왔지만, 각 하천의 제방 및 그 기초 지반의 특성이나 상황이 천차만별이기 때문에, 누수 현상이나 대책도 또 복잡하고 다양하다. 이 기사에서는 국토기술연구센터(2002)의 일본의 침투에 대한 제방의 안전성 평가 방법을 소개하고자 한다.

침투에 대한 제방의 안전성 평가란 제방 파괴의

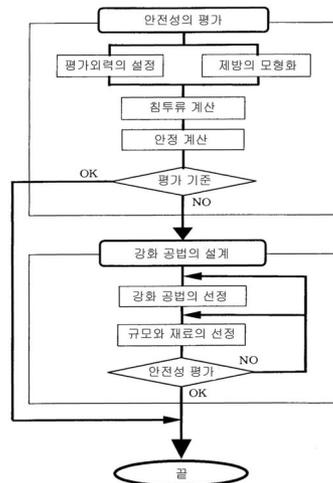


그림 1. 침투에 대한 제방의 구조 검토 순서 (누수에 관한 검토 모임, 1987)

기구를 파악한 기술적 지식에 기반하여 수리학적 및 역학적 방법을 설계 안에 도입하는 것이다. 안전성 평가에서는 외력을 설정한 후에, 평가 항목별로 적절한 방법을 적용하고, '소요의 안전성이 확보되어 있는가'를 확인하는 과정으로 구성되며, 검토 과정을 순서대로 정리하면 그림 1과 같다.

2. 안전성 평가 외력

제방의 침투에 대한 안전성 평가에서, 평가를 위한 외수위(하천수위)는 계획홍수위(당면의 정비 목표로 설정하는 홍수시의 수위가 정해져 있는 경우에는 그 수위)로 하고, 평가 강우는 계획 규모 홍수시의 강우(당면의 정비 목표로 설정하는 홍수가 결정되어 있는 경우에는 그 때의 강우)로 한다. 기왕 최대의 홍수시의 강우량 또는 수위 파형(침투 수위가 높거나 홍수의 지속 시간이 긴 홍수)에 대해서도 안전성을 확인해야 한다.

강우량은 계획 규모의 홍수시의 강우를 설정하는 것으로 되어 있으며, 원칙적으로는 계획 강우량의 유역 평균값을 외력으로 적용할 수 있다. 단, 대하천과 같은 경우에는 유역 분할된 일련 구간 근방의 유역 평균값이 계획 강우량을 명백히 상회하는 경우에는, 이것을 평가외력으로 설정한다.

3. 평가항목 및 평가기준

3.1 평가항목

침투에 의한 제방의 파괴 현상은 강우 또는 하천수의 제체에의 침투에 기인하는 활동 파괴와 기초지반의 관공 파괴로 크게 나눌 수 있다. 전자에서는 먼저 강우의 침투에 의해 제체의 포화도가 상승하고 제체를 구성하는 흙의 강도가 저하한다. 경우에

따라서는 이 단계에서의 비탈면에 활동 파괴가 생기는 경우가 있다. 제체의 포화도의 상승은 하천수의 제체에의 침투를 조장하고, 제체내에 침윤면이 급속히 상승한다. 이에 따라 제체내의 간극 수압 상승을 불러오고, 최종적으로는 제내 비탈에 붕괴나 활동 파괴가 발생하기에 이른다. 활동 파괴가 생기기 쉬운 조건은 제체의 형상과 토질, 기초지반의 토질, 강우 및 하천수에 좌우된다. 강우량이 클수록, 또 홍수시의 하천수위가 높고, 고수위의 지속 시간이 길수록, 제방의 안전성에 대해 불리하게 된다. 또, 홍수 말기의 하천 수위가 급속히 저하하는 때에는 제체내에 침투수가 잔류하고, 제외 비탈면이 붕괴하는 현상이 다수 발견된다.

기초지반에서의 관공 파괴에 의한 제방의 불안정화는 국부의 동수 경사 또는 침투 유속이 한계값을 넘는 것에 의한 흙의 조직 구조의 파괴에 기인하고, 이것이 확대 진행되는 것에 의한 것으로, 보일링(boiling)이라 불리는 현상도 마찬가지로 기구에 의한 것이다. 보일링에 의한 파괴가 생기는 조건은 기초지반의 토질 및 홍수시의 수위의 높이와 지속 시간에 의존하고 있다. 이상과 같은 것에서 침투에 대한 안전성 평가는 다음의 두 항목에 대해서 실시하는 것을 지침으로 삼고 있다.

- i) 홍수시의 활동 파괴에 대한 안전성.
- ii) 홍수시의 기초지반의 관공 파괴에 대한 안전성.

3.2 평가기준

제방 안전성 평가지침에 규정되어 있는 침투에 대한 제방의 안전성 평가기준은 표 1에 보인 것과 같다. 여기서, 축제 이력이 복잡한 경우에는 축제 개시 연대가 오래되고, 축제가 여러 차례에 걸쳐 수행된 경우나 이력이 불명한 경우이며, 요주의 지형이란 구하도나 낙굴 등의 제방의 불안정화에 연결되는 치수 지형을 말한다.

표 1. 침투에 대한 안전성의 평가 기준(國土技術研究センター, 2002)

항 목	부 위	평가 기준
활동파괴 (침윤파괴)에 대한 안전성	제내 비탈	$F_s \geq 1.2 \alpha_1 \alpha_2$ F_s : 활동 파괴에 대한 안전율 α_1 : 축제 이력의 복잡성에 대한 할증계수 축제 이력이 복잡한 경우 $\alpha_1 = 1.2$ 축제 이력이 단순한 경우 $\alpha_1 = 1.1$ 신설 제방의 경우 $\alpha_1 = 1.0$ α_2 : 기초 지반의 복잡성에 대한 할증 계수 피재 이력 또는 요주의 지형이 있는 경우 $\alpha_2 = 1.1$ 피재 이력 또는 요주의 지형이 없는 경우 $\alpha_2 = 1.0$
	제외 비탈	$F_s \geq 1.0$ F_s : 활동 파괴에 대한 안전율
관공파괴 (침투파괴)에 대한 안전성	피복토 없음	$i < 0.5$ i : 제내 비탈끝 근방의 기초 지반의 국부 동수 경사의 최대값
	피복토 있음	$G/W > 1.0$ G : 피복토층의 중량 W : 피복토층 기저면에 작용하는 양압력

4. 안전성 평가 방법

침투에 대한 제방의 안전성은 비정상 침투류 계산 및 원호활동법(그림 2 참조)에 의한 안정 계산에 의해 평가한다. 비정상 침투류 계산은 비정상외력을 주고 시간이 지남에 따라 침윤면의 위치나 수두의 변화를 추적하는 것으로, 주목하는 시점의 침윤면의 형상을 알면, 또 수두 분포에서 국부 동수경사 등을 계산할 수 있다. 한편, 원호활동법에 의한 안정 계산에서는 제외 및 제내 비탈의 각각에 대해 가장 위험하다고 상정된 침윤면을 추출하고, 이것을 평가 대상 단면에 설정하는 것으로 홍수시의 활동 파괴에 대한 안전율을 구할 수 있다.

4.1 비정상 침투류 계산의 방법

침투류 계산의 방법에는 정상 해석법과 비정상

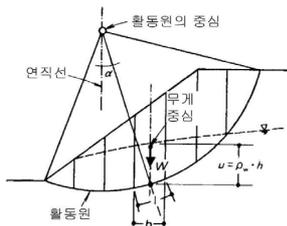


그림 2. 원호활동법의 개념도

해석법이 있으며, 비정상 해석에 있어서는 포화 해석과 포화-불포화 해석이 있지만, 실제에 가까운 현상을 재현할 수 있는 비정상외력의 포화-불포화 침투류 계산을 수행하는 것을 원칙으로 한다. 비정상외력의 포화-불포화 침투류 계산의 기본식은 다음과 같다(赤井 등, 1977).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = (C + \alpha S_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 x 는 제방 횡단면의 수평방향의 축, z 는 제방 횡단면의 연직방향의 축, k 는 투수계수 (m/hr), ψ 는 압력수두(m), C 는 비수분용량(l/m), 는 포화/비포화 영역지수(0 = 불포화 영역; 1 = 포화 영역), C_s 는 비저류계수(l/m), t 는 시간 (hr)이다. 비수분함량 C_s 는 수분특성곡선의 접선경사로 주어지며, 또 비저류계수 S_s 는 사질토에 대해서는 $S_s = 1 \times 10^{-4}$ (l/m), 점성토에 대해서는 $S_s = 1 \times 10^{-3}$ (l/m) 정도를 설정하면 좋다.

비정상외력의 포화-불포화 침투류 계산은 모형화된 제방(제체 및 기초 지반)을 대상으로 토질 상수, 초기 조건 및 계산 조건을 설정하는 동시에, 경계 조건 등을 입력해서 실시한다. 계산 도중에는 강우의 종료시나 하천 수위(외수위)의 침투시 등 제방의 안전성을 평가할 때 중요한 시점에서의 계산 결과를 파일로 기록하고, 홍수 종료까지 실시한다.

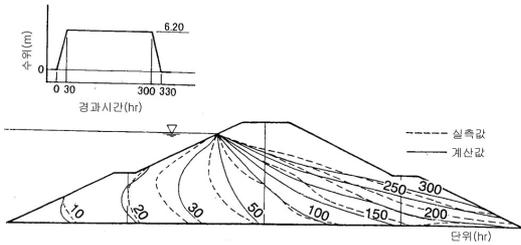


그림 3. 실물 제방에서의 침투 실험 결과의 침투류 계산에 의한 검증예

그림 3은 이와 같이 하여 얻어진 계산에 의한 침윤면과 실물 제방의 침투 실험에서 관측된 침윤면을 비교한 사례를 보인 것으로, 실제의 침투 현상을 잘 재현하고 있는 것을 알 수 있다.

4.2 원호 활동법에 의한 안정 계산법

침투류 계산에 의해 얻어진 침윤면 중에서 가장 위험한 것을 추출하고, 전응력법에 기반한 다음 식에 의해 활동 파괴에 대한 최소 안전율을 산출한다.

$$F_s = \frac{cl + (W - ub) \cos \alpha \tan \phi}{W \sin \alpha} \quad (2)$$

여기서, F_s 는 안전율, u 는 활동면의 간극수압(tonf/m^2), W 는 분할조각의 중량(tonf), c 는 활동면에 따른 흙의 점착력(tonf/m^2), l 는 원호의 길이(m), ϕ 는 활동면에 따른 흙의 내부 마찰각($^\circ$), b 는 분할조각의 폭(m)이다. 원호 활동법에 의한 안정 계산에는 많은 수의 방법이 제안되어 있지만, 여기서 제시한 계산식은 간편 분할법으로 불리는 방법이다. 안정 계산에서는 복수의 원호 중심에 대해서 최소 안전율을 구하고, 그 중에서 최소값이 계산 단면에 대한 최소 안전율이 된다.

4.3 안전성 평가 순서

안전성 평가의 구체적인 순서는 그림 4에 보인 것과 같으며, 이하 그 흐름에 따른 평가의 유의점은 다음과 같은 항목들이 있다.

(1) 제방(제체 및 기초지반)의 모형화

단면형상에 대해서는 제방 안전성 평가지침에 기반하여 설정한 제방의 횡단면 형상 및 제내지, 제외지의 지반면(지표)을 모형화한다. 토질 구성에 대해서는 제방 횡단 방향의 토질 단면도를 기반으로 모형화하지만, 토질 조사의 결과와 함께 근방의 제방 개삭 조사의 결과나 축제 이력을 충분히 감안하여 적절히 모형화하는 것이 중요하다. 중요한 토질상수는 포화/불포화 투수계수, 습윤밀도, 점착력, 내부마찰각 등을 고려하여야 한다. 침투 대책공이 시행되어 있는 단면에 대해서는 안전성 평가에 있어서 침투 대책공을 모형화할 필요가 있다. 차수 널말뚝이나 차수 시트 등의 인공 재료를 이용한 침투 대책공에 대해서는 이것을 토질 재료로 치환해서 토질 상수를 설정하는 방법이 일반적으로 채용하고 있다. 차수시트 및 차수널말뚝의 접합부를 통한 침투를 고려한 겉보기투수계수는 다음과 같은 값을 제안하고 있다.

차수시트: $k_v = 1.0 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ (두께 1 mm)

차수널말뚝: $k_v = 1.0 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ (두께 10 mm)

(2) 초기 조건의 설정

제방의 안전성은 이와 같은 시기를 상정해서 평가할 필요가 있지만, 이 시기의 제체 아래의 지하수면의 형상이나 제체의 포화도가 장기에 걸친 관측에 의해 정확하게 파악되어 있는 사례는 극히 한정되어 있다(朱와 山村, 1997). 사전 강우량은 설계 대상 구간의 강우 특성에 따라, 다우기시의 월강수량의 평년치 정도를 설정한다. 초기 지하수위는 홍수기(다우기)의 평균 지하수위 정도를 수평으로 설정한다.

(3) 홍수 외력의 설정

강우량은 하천수위 파형과 비정상 침투류 계산의 입력 조건으로서 필요하며, 원칙적으로 당해 하천의 계획 강우량(총강우량)을 이용한다. 강우강도는 10 mm/hr 정도를 개략값으로 설정하며, 설정된

총강우량과 강우 강도를기반으로 직사각형의 강우 파형을 설정한다. 하천 제방의 침투에 대한 안전성 평가에 있어서 특히 중요한 것은 ① 파형 면적(기준이 되는 수위와 파형으로 둘러싸인 면적), ② 고수 위의 지속 시간, ③ 홍수 말기의 수위 저하 속도(파형의 경사)로 설정을 할 때는 이 점에 충분히 유의할 필요가 있다.

(4) 침투류 계산 및 안정 계산

침투에 대한 안전성 평가에서는 모형화된 제방에 대해서, 설정된 외력 조건의 기반에서 침투류 계산 및 안정 계산을 실시한다. 침투류 계산 및 안정 계산에 대해서는 다수의 소프트웨어가 개발되어 시판되고 있으며(비정상 포화-불포화 침투류 계산의 소프트웨어로서는 SEEP/W, GW-USAF, PC-

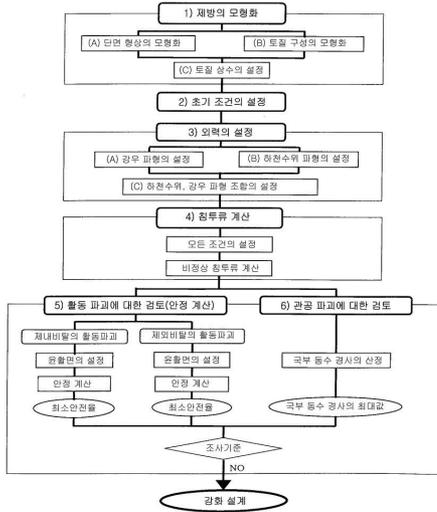


그림 4. 침투에 대한 안전성 평가 순서 (國土技術研究センター, 2002)

UNISSF, 2D-FLOW, SAUSE, SOIL2F 등이 있다), 이들을 이용하게 되지만, 이용에 있어서는 실험 결과에 의한 검증 등을 수행하여 적용성을 확인해 두는 것이 바람직하다.

5. 맺음말

하천 제방의 침투에 의한 피해는 강우 및 하천수의 침투에 의해 제체 침윤면이 상승하는 것에 의한 활동 파괴(침윤 파괴) 및 기초 지반의 침투압의 상승에 의한 관공 파괴(침투 파괴)가 주된 것이다. 이 기사에서는 국토기술연구센터(2002)의 일본의 침투에 대한 제방의 안전성 평가 방법을 소개하였다. 침투에 대한 제방의 구조 검토 순서와 제방의 침투에 대한 안전성 평가에서 검토할 외력을 정리하였다. 침투에 대한 안전성 평가는 i) 홍수시의 활동 파괴에 대한 안전성, ii) 홍수시의 기초 지반의 관공 파괴에 대한 안전성에 대한 두 항목에 대해서 실시하고 있다. 제방 안전성 평가지침에 규정되어 있는 침투에 대한 제방의 안전성 평가방법으로써 비정상 침투류 계산 및 원호활동법을 소개하였다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 國土技術研究センター (2002) 河川堤防の構造検討の手引き.
2. 建設省 河川局, 土木研究所 外 (1987) 漏水に関するW・G報告書.
3. 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠 (1977). “有限要素法による飽和-不飽和浸透流解析”, 土木學會論文報告集, No.264, pp.87-96.
4. 朱偉, 山村和也 (1997). “堤防の長期的な水分量の動”, 土木學會論文集, No.582/III-41, pp.99-108.