

하천 제방의 침투 파괴에 대한 대책공 설계방법 고찰

A Study on Levee Infiltration Failure and Design of Countermeasures

이남주*, 류권규**, 이상호***
Nam Joo Lee, Kwonkyu Yu, Sang Ho Lee

요 지

이 연구는 하천 제방의 누수 문제에 대해서, 누수의 실태, 대책공 및 조사 방법에 관한 사례를 수집 정리하는 동시에, 이들 사례에 기반한 누수 특성, 하천 특성에 따른 대책공 및 조사 방법에 대해서 검토하기 위한 목적으로 수행하였다. 제방 누수는 일반적으로는 하천수가 제체 또는 기초 지반에 침투해서 제방의 제내 비탈면, 제내 비탈끝 또는 제내지에서 스며나오는 현상을 총칭하며, 각 누수 형태의 개념과 특징을 정리하였다. 1987년 일본의 건설성 하천국의 토목연구소에서 수행한 약 300건의 누수사례에 관한 검토보고서를 참고하여 일본의 하천 제방의 누수 특징을 요약 정리하였다. 제방의 침투/누수 대책 공법을 4가지로 분류하여 특징을 정리하였다. 하천 제방의 제체 누수에 대한 제방 강화 대책 공법의 선정 과정 및 지침을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 하천제방, 침투파괴, 대책공, 설계방법, 침윤선

1. 서론

하천 제방의 파괴 형태도 과거에는 월류에 의한 것이 많았지만, 제방고가 높아짐에 따라 월류로 인한 붕괴가 상대적으로 줄어들고 있다. 외수위의 상승에 따라서 제방에 대한 외력이 크게 되어 온 것 등에서 최근에는 누수가 눈에 띄게 증가하고 있다. 일본에서는 누수 문제에 대해서는 1951년도부터 직할기술연구회의 연구과제가 되는 등, 오래 전부터 많은 연구가 수행되었고, 또 그 대책에 대해서도 각 하천에서 각종 공법이 수행되어 왔지만, 각 하천의 제방 및 그 기초 지반의 성상은 천차만별이며, 누수 현상이나 대책도 또 복잡하고 다양하다. 이 연구는 하천 제방의 누수 문제에 대해서, 누수의 실태, 대책공 및 조사 방법에 관한 사례를 수집 정리하는 동시에, 이들 사례에 기반한 누수 특성, 하천 특성에 따른 대책공 및 조사 방법에 대해서 검토하기 위한 목적으로 수행하였다.

2. 침투 및 누수의 형태별 분류

제방 누수는 일반적으로는 하천수가 제체 또는 기초 지반에 침투해서 제방의 제내 비탈면, 제내 비탈끝 또는 제내지에서 스며나오는 현상을 총칭한다. 누수를 침투 경로에서 보면, 하천수가 제체에 침투해서 제내 비탈면에서 스며나오는 제체누수, 기초 지반을 통해서 제내 비탈면, 제내 비탈끝 또는 제내지에 스며 나오는 기반누수, 양자가 복합된 복합누수로 분류할 수 있다. 각 형태의 개념과 특징은 표 2.2와 같다.

1987년 일본의 건설성 하천국의 토목연구소에서 수행한 약 300건의 누수사례에 관한 검토보고서를 보면,

* 정회원 · 경성대학교 토목공학과 교수 · E-mail: njlee@ksu.ac.kr
** 정회원 · 동의대학교 토목공학과 교수 · E-mail: pururumi@deu.ac.kr
*** 정회원 · 부경대학교 토목공학과 교수 · E-mail: peterlee@pknu.ac.kr

일본의 하천 제방의 누수 특징을 다음과 같이 요약할 수 있다.

- ① 피해 개소 분류: 피해 개소는 제체부가 13.9%, 제내지가 14.1%, 비탈끝이 72%를 점하고 있어, 비탈끝부분의 누수가 많다.
- ② 치수 지형 분류 구분: 요지와 저지에서 64.1%로 다수를 점하고 있지만, 미세 고지에서도 32%를 점하고 있어, 누수의 발생 개소가 치수 지형의 분류 구분과 명확하게 관련이 있다고는 생각할 수 없다. 호안의 유무에 의한 누수 발생율은 호안유:호안무는 37%:63%가 되며, 호안이 시공되어 있어도 누수는 높은 비율로 일어나고 있다. 널말뚝을 시공하고 있는 사례가 전체의 약 1할을 점하고 있으며, 이것도 비교적 높은 비율로 일어나고 있다. 하도와 습지에서의 누수 발생의 위험성이 높은 것을 알 수 있으며, 자연 제방의 의외로 크게 나타났다. 구하도와 습지는 위험성이 높고, 자연제방도 상당히 높다. 선상지와 대지는 위험성이 낮다.
- ③ 평면형: 만곡부 외측 35.8%, 직선부 35.4%, 만곡부 내측 24.2%, 사행 만곡점 4.6%의 순이 되어 있다. 만곡부 외측이 만곡부 내측보다 누수가 발생하기 쉽다.
- ④ 종단형: 통상부 93.2%, 경사 급변부 6.8%가 되어 있다.
- ⑤ 대책공 실시의 유무: 단순히 누수 발생 후, 대책공을 실시했는가 아닌가를 조사한 것으로, 전체 중 54.8%가 누수 대책이 수행되었다.
- ⑥ 기반과 제체의 투수성: 기반에 대해서는 투수성이 81.4%, 불투수성이 18.6%로 투수성일 때 누수가 발생하는 경우가 많았다. 제체에 대해서도 마찬가지로의 경향이다. 또, 기반과 제체가 함께 투수성일 때가 60.6%, 양자가 불투수성일 때가 8.9%로 작다.
- ⑦ 투수성 기반층 두께: 투수성 기반층 두께가 10 m 미만이 62%, 20 m 미만이 96.4%를 점하여, 대부분의 누수가 투수층 20 m 미만에서 일어나고 있다.
- ⑧ 기반과 제체의 토질 분류: 기반의 토질은 모래가 53%이며, 점토와 자갈의 순으로 되어 있다. 제체도 같은 순위로 모래가 58.2%로 많다. 또 기반과 제체의 토질이 동일한 경우가 61.3%이다.
- ⑨ 총우량: 총우량이 200 mm 전후에서의 누수 발생 사례가 많으며, 2일 우량으로 150 mm를 넘으면, 급격히 누수의 발생율이 높아진다.
- ⑩ 강우 지속 시간: 30시간 전후가 가장 많다.
- ⑪ 홍수지속시간: 홍수지속시간은 외수위가 경계 수위를 넘는 사이의 시간이며, 경계 수위를 돌파하지 않았어도 누수의 사례가 있으므로, 주의를 요하지만, 20시간 전후에 집중하고 있다. 또, 하상 경사와 홍수 지속 시간과의 사이에는 특별한 관계가 없는 것으로 나타났다.
- ⑫ 피해 수위: 피해 수위는 외수의 침투와 누수 개소의 고저차를 수위차로 하고 있지만, 3~4 m의 부근이 많으며, 이것을 중심으로 정규적인 분포를 하고 있다.
- ⑬ 부지폭: 20~80 m 사이에 거의 균일하게 분산되어 있으며, 부지폭이 80 m 보다 작은 경우는 누수가 일어날 가능성이 높다.
- ⑭ 제방폭: 외수위의 상승에 따라서, 제방폭은 작게 되지만, 40 m를 하회하면 누수 발생의 가능성이 높다.
- ⑮ 제내 비탈 경사: 제방의 제내 비탈 경사는 대략 1:2의 근방에 집중되어 있으며, 결과는 당연하다.
- ⑯ 제체의 투수계수: 제체의 투수계수가 작은 경우에도 누수가 일어나기 때문에, 외수위가 높고, 홍수 지속 시간이 길게 되면 주의를 요한다.
- ⑰ 기반의 투수계수: 기반의 투수계수가 작은 경우에도 누수가 일어나고 있다(하상 재료와 기반 재료가 대략 10^{-3} ~ 10^{-6} 정도의 경우가 많다고 하는 것과, 투수 계수가 큰 경우는 물이 분출하는 것보다 주변부의 지하수위가 상승하고, 서서히 스며 나오는 상태가 되는 경우라고 생각된다.)
- ⑱ 하상 경사: 하상 경사가 완만하게 되는 데 따라서, 누수의 발생 빈도가 높게 된다.

표 1. 누수의 형태와 특성(土木研究所, 1987)

누수형태	개념도	특징
제체 누수		하천수위의 상승에 따라 제체내의 침윤면이 상승하고, 하천수가 제내 비탈면이나 비탈 끝에서 스며 나오는 현상으로, 제체가 투수성이 높은 모래나 자갈로 축조되어 있는 경우, 제체 단면이 작고 침투로 길이가 짧은 경우, 제체 내에 공극이나 균열이 있는 경우에 발생하기 쉽다.
기반 누수		제체가 난투수성이고 기초 지반의 투수성이 높은 경우, 내외 수위의 수두차에 의해 하천수가 지반내를 침투하고, 제내 비탈끝에서 제내지에 걸쳐서 스며 나온다. 이 때, 침투수와 함께 토사가 용출되는 경우가 있다.
		또, 기반의 제외 비탈쪽이 불투수층이 되어 있는 경우를 멈춤형 지반으로 칭하며 제체내의 침윤면을 상승시켜, 외수위가 높게 되면 양압력이 크게 되어 비탈면 붕괴의 위험성이 높게 된다.
복합 누수		제체, 기반 모두 투수성이 높은 경우, 제체 누수와 기반 누수가 동시에 발생한다.
강우침투에 의한 비탈면 붕괴		외수위는 그다지 높지 않지만, 제체에 강우가 침투하면, 침윤면을 상승시켜, 누수를 조장하거나 제내 비탈면이 붕괴되거나 한다.

3. 제방 침투/누수 대책 공법 및 선정 지침

제방의 침투/누수 대책 공법을 크게 분류하면 다음과 같이 4가지이다.

- ① 제방 단면 확폭 공법 (그림 3.3(a))
- ② 표면 차수 공법 (그림 3.3(b))
- ③ 지중 차수 공법 (그림 3.3(c))
- ④ 배수 공법 (그림 3.3(d))

일반적인 대책 공법은 널말뚝(지중 차수 공법)과 호안(표면 차수 공법)의 두 종류인 것을 알 수 있다. 또, 시공 개소에 따라서는 복수의 대책공이 채택되고 있다. 복수의 대책공은 시공 개소 전체의 55.6%이며, 주요 조합은 「널말뚝 + 호안」이 전체의 47.2%, 「널말뚝 + 압성토」가 전체의 11.1%이다. 이 중, 널말뚝과 호안의 조합이 많은 것은 다른 대책공법과 비교해서, 시공이 쉽고 경제적이기 때문이라고 생각된다. 기초 지반의 토질은 사질토가 85%를 점하고 있으며, 누수 개소는 비탈끝과 제내부가 많다. 이것은 기반 누수의 특징을 보인 것이며, 이 대책으로서 널말뚝 공법이 채택되고 있는 예가 많다. 이 경우, 제체 토질에 대해서도 사질이 많게 되지만, 이것은 널말뚝 공법과 합쳐서 제체에서의 누수를 방지하기 위해 호안의 시공이 많은 사실을 뒷받침하고 있다. 널말뚝의 타입심과 불투수층의 깊이와의 관계를 보면, 투수층을 차단해서 불투수층까지 타입한 것이 가장 많고, 과반수는 투수층을 8할 정도까지 차단하고 있다. 널말뚝을 시공하는 경우의 시공 연장의 실시 사례를 보면, 누수 구간의 상하류단에서 누수 지점에서 각각 상하류 방향으로 약 45°의 각도로 떨어진 구간까지 시공하고 있는 경우가 많다. 널말뚝의 종류는 약 90%는 강널말뚝이며, 그중에서도 II형이 약 70%를 점하고 있다. 호안이 시공되어 있는 누수 지점에서 그 지점의 토질 및 누수 개소를 보며, 제체 및 기초 지반은 사질토가 100%를 점하고 있으며, 제체나 기반에 물이 가능한 들어가지 않도록 제체의 표면 또는 제외지의 표면을 불투수층 또는 난투수성 재료 및 안정 처리토 등으로 피복하는 것이 바람직하다.

하천 제방의 제체 누수에 대한 제방 강화 대책 공법의 선정 과정 및 지침을 표 2와 같이 정리하여 제시

하고자 한다.

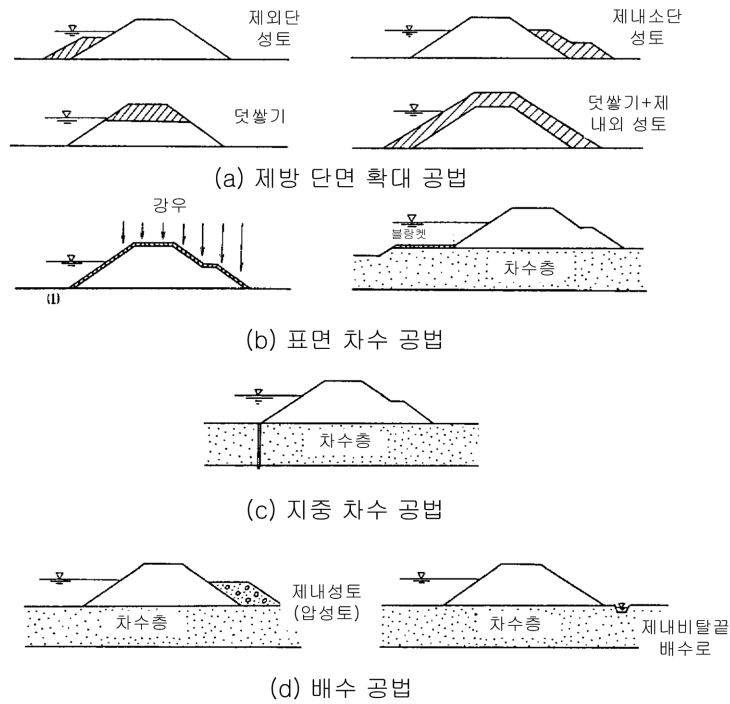


그림 1. 누수 대책 공법(土木研究所, 1987)

4. 결론 및 향후연구

이 연구는 하천 제방의 누수 문제에 대해서, 누수의 실태, 대책공 및 조사 방법에 관한 사례를 수집 정리 하는 동시에, 이들 사례에 기반한 누수 특성, 하천 특성에 따른 대책공 및 조사 방법에 대해서 검토하기 위한 목적으로 수행하였다. 제방 누수는 일반적으로는 하천수가 제체 또는 기초 지반에 침투해서 제방의 제내 비탈면, 제내 비탈끝 또는 제내지에서 스며 나오는 현상을 총칭하며, 각 누수 형태의 개념과 특징을 정리하였다. 1987년 일본의 건설성 하천국의 토목연구소(土木研究所, 1987)에서 수행한 약 300건의 누수사례에 관한 검토보고서를 참고하여 일본의 하천 제방의 누수 특징을 요약 정리하였다. 제방의 침투/누수 대책 공법을 4 가지로 분류하여 특징을 정리하였다. 하천 제방의 제체 누수에 대한 제방 강화 대책 공법의 선정 과정 및 지침을 제시하고자 한다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신 F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 建設省 河川局 土木研究所 (1987) 漏水に関するW.G報告書.

표 2. 제체 누수에 대한 제방 강화 대책 공법의 선정 지침(土木研究所, 1987)

관찰된 현상	발생 기구와 주원인	대책의 요점	현지 조건	대책 공법	설계상 유의점
비탈끝~비탈면 하부에서의 누수 • 하천 수위의 상승보다 약간 늦게 발생하며, 수위 저하에 약간 늦게 없어진다.	침투 - 제내 비탈에의 침윤선 도달 • 투수성이 높은 제체토에서 침윤선이 제내 비탈에 도달하여 누수된다. • 제내 비탈측 침윤선이 높을수록 불안정하게 된다.	• 침투 경로 차단 (흐름을 없앤다)		제외 비탈 피복(불투수) 공법	지반의 투수성이 큰 경우는 제외 비탈끝에서 지반의 투수층의 차수를 수행하지 않으면 효과가 작다. 차수성 호안은 제체내의 강우 침투의 방지 대책과 일체로 하여 생각할 필요가 있다.
		• 제내 비탈끝 수위 저하 (비탈끝 안정화)	지반에서의 누수도 있다. 제체에서만의 누수	차수성 호안 공법 배수로 승수로	
		• 제내 지반 손상 (출구를 없앤다)	용지를 구할 수 있다	비탈끝 트렌치 공법 압성토 공법	
비탈끝 부근에서의 물이나 모래의 분출 • 제내지 지반과 높이가 거의 변하지 않는 범위에 서밖에 생각할 수 없다.	비등 - 한계 동수 경사 • 제체의 투수성이 낮은 투수성이 큰 지반 투수층이 제내 비탈끝중 가까이에서 단되어 있을 때만 생긴다 (중단형 지반)	• 지반 침투 차단		제외 비탈끝 차수 널말뚝 공법	제체 제외 비탈이 약간 투수성인 경우 제외 비탈면의 차수도 고려할 필요가 있다.
		• 제내 비탈끝 수위 저하 • 비탈부 제체를 두껍게 한다.	지반의 중단 구조의 파악 용지를 구할 수 있다	슬러리 트렌치 공법 비탈끝 트렌치, 치환 공법 압성토 공법	
제체 자체의 관공은 볼 수 없다. • 솟아나온 누수가 탁하다. • 용출구에 점토와 모래 등 경계가 보인다. • 비등 후에 모래의 유출이 계속된다.	관공 - 한계 유속 • 제체토중에 현저하게 투수성이 다른 흙의 경계, 투수층의 협착부에 큰 유속이 생기며, 흙입자의 이동이 생긴다.	• 침투 유입부 차단 • 토사 유출의 억제 (흐름을 없앤다. 공극 확대를 막는다)	물길의 경로가 어느 정도 투정할 수 있는가 용지를 구할 수 있다	제외 비탈 피복 공법 차수성 호안 공법 (감시, 물의 오탃 등)	토중에 관공이 생긴 것을 알고, 그 누출구가 발견되어도, 유출구(범위) 및 물길의 경로를 확인하는 것은 매우 어렵다.
표면 유출수의 비탈면 침식, 침식된 물의 누수. 습윤화된 제체의 비탈 붕괴 • 강우, 하천 수위 저하 후의 누수	강우, 침투, 강도 저하 - 침윤선 상승, 투수성 향상 • 투수성의 제체에서는 침윤선의 상승이 빨리 일어난다. • 비탈끝~비탈면 아래에서는 포화도가 올라가고, 강도가 내려가 누수와 비탈 붕괴가 생기기 쉽다.	• 표면 침식 방지 • 침투 방지		비탈면 보호공 전면 피복 공법	차수 기능, 배수 기능, 내구성, 미관 등의 모든 점에서 조화를 이룰 필요가 있다.
		• 침투수 배수	마루, 소단의 이용 상황	비탈끝 트렌치 공법	