

제방형태에 따른 제체사면의 안정검토에 관한연구

(A Study on the Stability of Slope Slant Face According to Embankment Shape)

정형식¹⁾, Hyung Sik Chung, 이승호²⁾, Seung Ho Lee

요약(Abstract)

Most stream embankments in Korea does not have filters or concrete beaching on the protected lowland, so when the seepage line rise to the edge of protected lowland the possibility of embankment leakage increases. Especially the possibility of avulsion at downstream area, which usually has large distribution of river deposits, can increase greatly by piping effect or loss of soil cause by embankment leakage when the river deposits is used for materials of embankment.

Regardless of these dangerous possibilities, few theories or case studies of the embankment leakage are in progress compare to other fields.

Therefore in order to analyze(research) the possibility of embankment leakage during floods, following studies were carried out.

(1) Theories on the changes of unsteady flow inside the embankment during floods are investigated and the possibility of applying the analytical method to it is examined.

(2) The influence of many parameters concerning stream embankment is examined and analyzed.

(3) Countermeasures for embankment leakage were investigated and practical applications of methods with better applicability on existing embankments was examined.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

제방의 누수는 크게 제체내 누수와 제방하류쪽에서의 지반누수로 나뉘어 진다. 지반누수는 그 동안 외국뿐만 아니라 국내에서도 많은 사례연구가 이루어져 왔으며 이미 이론적인 해 또한 많이 정립되어 가고 있는 실정이나, 제체내 누수의 경우는 그 이론적 배경 및 사례연구가

1) 한양대학교 토목공학과 교수

2) 상지대학교 토목공학과 교수

아직까지는 미비한 상태이다. 또한 제체누수는 홍수시 수위급상승에 따른 제체내 침윤선의 변화는 제체누수 발생에 직접적인 영향을 끼치게 되는데, 침윤선 변화는 가시적인 판단이 매우 난해하므로 누수발생여부에 대한 유관식별은 거의 불가능하게 된다. 특히 제체누수는 누수정 후를 보인 후 파이핑 현상에 의한 제체붕괴가 비교적 빠르게 진행되므로 지속적인 관찰이 없을 경우에는 매우 위험한 결과를 초래할 수 있다.

하천제방의 붕괴원인은 홍수시 급격한 수위상승에 의한 월류, 제체내 침윤선 상승에 의한 제체누수 및 지반누수 그리고 수위변화에 따른 간극수압의 변화 등 여러 가지로 볼 수 있다. 특히 우리 나라의 하천제방의 경우는 특수한 경우를 제외하고는 대부분이 제방하류쪽에 필터나 콘크리트 보호공 등을 무시하고 설계하고 있는 실정이므로 제체누수에 대한 위험성이 매우 심각한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 홍수시 수위 급상승에 의한 제체내 침윤선 변화와 그에 따른 제체누수에 대한 연구를 실시함으로써 기존의 하천제방설계시 적용되는 여러 가지 인자가 제체누수에 어떻게 영향을 미치는가를 검토하여, 토질역학의 관점에서 바라보는 올바른 하천제방설계에 관한 자료를 제시해 보고자한다.

1.2 연구내용 및 방법

본 연구에서는 홍수시 여러 가지 수문학적 인자가 제방형상 및 제체의 토성에 따라 제체누수현상에 미치는 영향을 수치해석적 기법을 통해 알아보기 위해 다음과 같은 방법으로 연구를 수행하였다.

우선 하천제방의 제체누수에 관한 시방규정 및 문헌을 고찰하고 실제 우리 나라 하천제방의 제체누수에 대한 문제점을 조사하였으며, 홍수시 수위급상승에 의한 제체내 비정상류 침투흐름에 대한 이론을 연구하여, 이에 대한 수치해석 적용방안을 검토하였다. 수치해석을 위한 제방단면 선정시 현실성을 부여하기 위해 제방형상 및 토성에 대해서는 우리나라 한강하류지역의 실제 하천제방 단면의 형상과 제체 및 기초지반의 투수계수를 조사하였으며, 홍수시 수위변화에 대해서는 수문 조사자료에 대한 문헌을 고찰하였다. 조사자료를 통하여 기본단면을 설정하고, 여러 가지 인자에 따른 제체누수에 대한 영향을 검토하였으며, 각 인자에 내용 및 방법은 다음과 같다.

(1) 수문학적 인자를 변화시키면서 수치해석을 실시하여 제체누수현상에 대한 수문학적 인자의 영향을 검토하였다.

(2) 설정한 기본단면을 기준으로 제방형상을 변화시키면서 수치해석을 실시하여 제체누수현상에 대한 제방형상의 영향을 검토하였다.

(3) 설정한 기본단면을 기준으로 제체 및 기초지반의 투수계수를 변화시키면서 수치해석을 실시하여 제체누수현상에 대한 지반의 투수계수의 영향을 검토하였다.

2. 국내 하천제방의 설계현황 및 문제점

2.1 국내 하천제방에 대한 시방규정

우리 나라 하천제방에 대한 시방규정을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 설계일반

제방설계시에는 계획홍수량, 제내지 상황, 사회·경제적 여건, 하천환경, 기초지반 상태 등을 고려하여 제방단면을 결정한 후 결정된 단면에 대해 안정계산을 실시하여 필요한 안전율을 확보할 수 있도록 최종단면을 결정한다.

(2) 제방고

제방고는 계획홍수위에 여유고를 더한 높이 이상으로 한다. 단 계획홍수위가 제내 지반고보다 낮고 지형상황으로 보아 치수상 지장이 없다고 판단되는 구간에서는 예외로 한다.

(3) 여유고

계획홍수량에 따른 여유고는 다음과 같다.

계획홍수량(m^3/sec)	여유고(m)
200 미만	0.6 이상
200 이상 ~ 500 미만	0.8 이상
500 이상 ~ 2,000 미만	1.0 이상
2,000 이상 ~ 5,000 미만	1.2 이상
5,000 이상 ~ 10,000 미만	1.5 이상
10,000 이상	2.0 이상

위표에 나타난 계획홍수량별 여유고는 일반하도에서 최저치로서 실제 여유고는 하천과 제방의 중요도, 제내지 상황, 사회·경제적 여건 등을 고려하여 결정해야하며 유량규모에 얽매이지 않도록 유의해야 한다.

(4) 둑마루폭

계획홍수량에 따른 둑마루 폭은 다음과 같다.

계획홍수량(m^3/sec)	둑마루폭(m)
500 미만	3 이상
500 이상~2,000 미만	4 이상
2,000 이상~5,000 미만	5 이상
5,000 이상~10,000 미만	6 이상
10,000 이상	7 이상

(5) 비탈경사

제방의 비탈경사는 1:2 이상으로 완만하게 한다. 단, 제방고가 0.6m 미만인 구간, 홍벽 또는 호안이 설치된 구간에서는 예외로 한다.

이 밖에도 시방규정에 의하면 필요에 따라 제방에 턱, 측단을 설치할 수도 있으며, 제방위에 설치되는 관리용도로 및 비탈끝보호공의 규정 등도 있다.

2.2 국내 하천제방의 누수에 대한 안정 및 문제점

2.2.1 제방누수에 대한 안정

제방의 누수는 외수위가 상승하여 제체 또는 지반을 통해 제내측으로 침투수가 유출하는 현상을 말하고, 제체를 침투해오는 제체누수와 지반을 침투해 오는 지반누수가 있다. 제체누수는 제체의 침윤선이 결정적인 요인이 되므로 침윤선이 제방부지 내에 위치하도록 해야 하며, 지반누수가 있을 경우에는 적절한 대책공법을 강구해야 한다.

(1) 제체누수

제체누수는 일반적으로 제내측 비탈끝 부근에서 침투수가 유출하는 것을 말하며 이것은 하천의 외수위가 상승하여 제체내로 유수가 침투하여 발생하는 것이다. 즉 침윤선이 제내지 비탈면에 도달하면 누수가 시작되고 그 양이 많으면 파이핑 현상에 의해 붕괴위험을 내포하게 된다. 따라서 제체 침윤선의 형상은 하천제방의 비탈면 붕괴에 결정적인 요인이 되므로 침윤선이 제방부지 내에 위치하도록 해야한다(그림 2.1 참조).

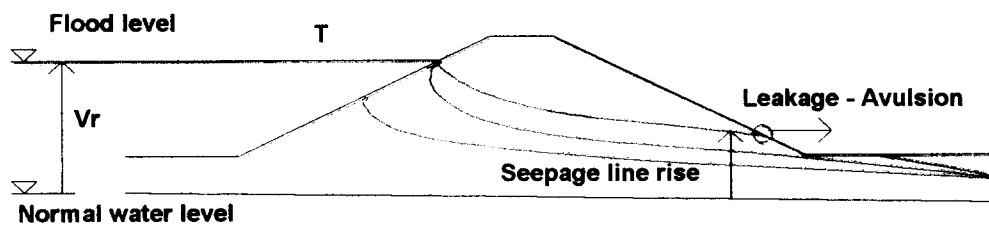


그림 2.1 침윤선 상승에 의한 제체누수현상.

일반적으로 제체누수를 일으키는 원인은 다음과 같다.

- ① 제방단면이 너무 작은 경우
- ② 제방이 사질토 또는 조립토를 다량으로 포함한 풍화토로 만들어지고 제외지 또는 중심부에 차수벽이 없는 경우
- ③ 제체를 충분히 다지지 않은 경우
- ④ 두더지 등의 동물에 의해 구멍이 뚫린 경우
- ⑤ 제체내에 매설되어 있는 구조물과의 접합부에 흐름이 생기는 경우 등

(2) 지반누수

지반의 투수성이 높은 경우에는 하천수위가 상승함으로써 침투압이 증가하여 제내지층 지반에 침투수가 용출하는 파이핑 현상이 발생한다. 이러한 파이핑 현상을 판정하는 기준으로 다음의 세가지 방법이 사용되고 있다.

- ① 한계동수 경사에 의한 판정
- ② 한계유속에 의한 판정
- ③ 크리프비(creep ratio)에 의한 판정

파이핑 현상은 치수상 문제가 되기 때문에 유선망, 침투압, 누수량 등을 검토하여 충분한 대책을 강구해야 한다.

- ① 지반이 투수성이 큰 모래층 또는 모래자갈층인 경우
- ② 고수부지 부근의 표토가 유수에 의해 세굴되어 투수층이 노출되었을 경우
- ③ 제방 제외지 비탈면 부근에서 골재를 채취하여 투수층이 노출되었거나 불투수성 표토의 두께를 알게 했을 경우
- ④ 제방 제내지 비탈기슭 부근에서 골재를 채취하여 투수층을 노출시켰을 경우
- ⑤ 지반침하에 의해 하천수위와 제체 지반고의 차가 커진 결과 침투압이 증가했을 경우 등

2.2.2 제방누수에 대한 대책

누수방지대책은 제방붕괴의 원인이 되는 제체 및 기초지반 누수에 의한 파이핑현상을 억제시키기 위한 것으로서 다음과 같은 방법들이 있다.

- (1) 지수벽설치 : 제체 및 기초지반의 투수층에 지수벽을 설치하여 지수시키므로서 제방붕괴의 원인이되는 파이핑현상을 방지하는 방법이다.
- (2) 침투로 길이의 증대 : 제방단면의 증대 및 지수벽 설치등을 통해 침투로 길이를 길게하므로서 제방붕괴의 원인이 되는 파이핑현상을 방지하는 방법이다.
- (3) 제방쌓기재료의 간극율저감 : 제방쌓기재료의 간극율을 저감시켜 투수계수를 줄이므로서 제방붕괴의 원인이 되는 파이핑현상을 방지하는 방법이다.
- (4) 침투수의 신속한 배제 : 제내측 뒷비탈기슭 또는 측단에 배수공(Drain filter, Drain well, Drain Trench 등)을 설치하여 침투수를 신속히 배제하므로서 제방붕괴의 원인이 되는 제체 및 기초지반의 연약화와 파이핑현상을 방지하는 방법이다.

2.2.3 국내 하천제방의 제체누수에 대한 문제점

(1) 우리 나라 하천제방은 대부분 제방 제내측에 필터가 설치되어 있지 않은 실정이다. 제체 하류쪽의 필터는 제체재료의 유실방지와 하류쪽의 침윤선 상승억제를 목적으로 하는데 필터가 없는 경우 홍수위가 지속되면 하류쪽의 침윤선이 상승하여 제체누수가 발생가능성이 있으므로 입자유실 및 파이핑현상의 진행이 빠르게 진행할 수 있다.

(2) 우리나라 하천제방은 대부분 제방 제내측에 콘크리트보호공이 없는 실정이다. 콘크리트

보호공이 없는 경우 제체누수에 의한 토사유실이 용이하게 되므로 제체안정에 크게 영향을 미칠 수 있다. 또한 콘크리트보호공을 설치한다하더라도 제체누수위험성이 큰 우리나라 하천하류지역은 대부분 연약지반으로 형성되어 있어 부등침하로 인하여 보호공이 크게 손상되는 경우가 허다하므로 그 역할을 제대로 하지 못하는 경우가 많다.

(3) 하천제방공사는 토공량이 매우 많으므로 주로 근접지역에 토취장을 두게 되는데 우리나라 하천하류지역은 하성퇴적물이 널리 분포하고 있어 입경이 작은 하성퇴적물을 제체재료로 쓰게 되는 경우 제체누수에 의한 파이핑현상이 쉽게 진행될 수 있으므로 제체붕괴에 대한 위험성이 더욱 커지게 된다.

(4) 제체누수는 제체재료의 투수계수 및 토립자의 입경 등 토질역학적 인자에 매우 큰 영향을 받게 되는데, 하천제방에 대한 시방규정을 살펴보면 아직까지도 제체단면 선정시, 주로 수문학적인자에 중점을 두고 있다는 것 또한 제체누수 발생가능의 무시할 수 없는 문제점이라고 할 수 있다.

3. 제체누수의 안정에 대한 검토방법

3.1 제체에서의 비정상류 침투이론

홍수시 수위상승에 따라 불포화된 제체안에 서서히 침투가 진행된다면 자유수면을 가진 흐름장이 점점 넓어진다. 이 과정은 비정상이며, 시간이 지남에 따라 침투는 마침내 정상적으로 되어 정상침투상태가 된다. 반대로, 이 상태에서 저수위가 내려가면 제체의 수두가 급속히 높아지기 때문에 침투는 저수지 쪽으로 향해 일어난다.

비정상 흐름은 흡속의 경우, 느린 흐름이다. 따라서 Navier-Stokes의 점성 유체식에 가속도의 항을 생략하는 것이 허용되며, 유속은 역시 Darcy의 법칙으로 나타내도 좋고, 그런 의미에서 퍼텐셜 흐름이다. 다만 정상인 경우와 달라서 유속과 수두는 장소 외에 시간의 함수이다. 위의 내용에서 흡속의 비정상 흐름은 Darcy의 법칙과 비정상 연속방정식에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 제체안의 침윤선의 변동은 비구속 흐름으로, 자유수면이 평활에 가까우면 정상시에 식들이 성립하나, 이것을 비정상적인 경우로 확장하면 3차원적으로 본 수위 z 를 만족하는 식은,

$$\lambda \frac{\partial z}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} (kz \frac{\partial z}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial y} (kz \frac{\partial z}{\partial y}) = 0 \quad (3.1)$$

또는

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{k}{2\lambda} \left(\frac{\partial^2 z^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z^2}{\partial y^2} \right) \quad (3.2)$$

이 된다. 여기서 λ 는 흙의 유효 간극율이다. 이것이 수평한 불투수 밑면 위에 있는 자유지하수의 비정상 연속방정식이다.

윗식은 계차적으로 풀 수 있다. 지금 (x, y) 평면을 Δs 의 간격으로 정 4각형 격자망 위에

나누고, 시간간격을 Δt 로 한다. 현재 생각하고 있는 점 (x, y, t) 를 $(0, 0, 0)$, $(x - \Delta x, y, t)$ 를 $(-1, 0, 0)$, 점 $(x, y + \Delta s, t + \Delta t)$ 를 $(0, 1, 1)$ 과 같이 나타내면,

$$\begin{aligned}\frac{\partial z}{\partial t} &\sim \frac{1}{\Delta t} [z(0, 0, 1) - z(0, 0, 0)] \\ \frac{\partial^2 z^2}{\partial x^2} &\sim \frac{1}{\Delta s^2} [z^2(1, 0, 0) - 2z^2(0, 0, 0) + z^2(-1, 0, 0)] \\ \frac{\partial^2 z^2}{\partial y^2} &\sim \frac{1}{\Delta s^2} [z^2(0, 1, 0) - 2z^2(0, 0, 0) + z^2(0, -1, 0)]\end{aligned}\quad (3.3)$$

과 같이 쓸 수 있으므로 식(3.2)은,

$$\begin{aligned}z(0, 0, 1) = z(0, 0, 0) + \frac{k\Delta t}{2\lambda(\Delta s)^2} [z^2(1, 0, 0) + z^2(0, 1, 0) \\ + z^2(-1, 0, 0) + z^2(0, -1, 0) - 4z^2(0, 0, 0)]\end{aligned}\quad (3.4)$$

우변은 모두 현재시각 Δt 의 값이기 때문에, 기지랑이므로 좌변 즉 $(x, y, t + \Delta t)$ 에서의 z 를 계산할 수 있다. 차차 식(3.4)를 계산하여 유선망을 그림으로써 내부의 헤드의 분포를 구할 수 있다. 식(3.4)를 기준수위 H 에서 무차원화 했을 때, 우변에 나타나는 계수 $kH\Delta t/2\lambda(\Delta s)^2$ 이 1보다 작지 않으면 반복 계산에 의한 $z(x, y, t)$ 는 발산 또는 진동할 염려가 있다. 따라서 시간간격 Δz 는 $2\lambda(\Delta s)^2/kH$ 보다 작게하면 된다.

여기서 설명한 차분해법 외에 비정상 문제에 대한 릴랙세이션법도 있다. 2차원 흐름장이 일정시각의 순간에 정상이라고 생각하면, 흐름장 내부를 포함한 임의의 점의 수두 h 는 Laplace의 식 $\nabla_1^2 h = 0$ 을 충족하므로, 앞에 설명한 릴랙세이션의 방법으로 각 점의 수두분포를 알 수 있다. 다음에 Darcy의 법칙을 이 분포에 적용하여 속도를 구하고, 침윤선 위의 물분자의 $\Delta \tau$ 안의 변동을 계산하여 $t + \Delta t$ 에서의 수면위치를 구하여 다시 Laplace의 식을 푸는 것이다.

3.2 홍수시 제체누수에 영향을 주는 인자

본 연구에서 다룬 홍수시 하천의 수위변화에 의한 제체누수에 영향을 주는 인자는 다음과 같다(그림 3.1 참조).

(1) 수문학적 인자

- ① 홍수시 수위상승정도(H_f) ② 홍수시 수위상승시간(T_f)
- ③ 홍수수위 지속시간(T_m)

(2) 제방형상에 대한 인자

- ① 제체사면의 기울기(S) ② 제체의 두마루폭(b) ③ 제체의 높이(H)

(3) 제체재료 및 기초지반에 대한 인자

- ① 제체재료의 투수계수(k_1) ② 기초지반의 투수계수(k_2)
 ③ 기초지반의 초기지하수위

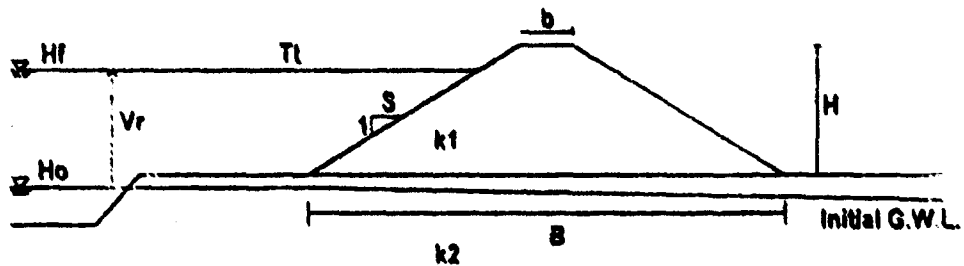


그림 3.1 제체누수에 영향을 주는 인자.

3.3 누수검토를 위한 단면선정

하천제방은 수문학적 인자 및 지역적 여건에 따라 다양한 형상과 여러가지토성을 가지고 있어 실제로 일반적인 단면을 설정하기가 매우 힘들다. 따라서 본 연구에서는 제방형상과 수문학적 인자의 다양성을 극복하고 되도록 실제 현실적인 상황에 접근하도록 노력하였다. 우선 제방형상은 한강하류지역의 단면을 기본으로 하였으며, 수문학적 인자는 한강하류의 홍수수위 및 홍수위 지속기간을 기준으로 하였다. 그 실례로 이미 누수로 인한 제방붕괴사건이 발생한 경기도 일산제방의 단면모습과 사고당시의 홍수 수위표는 각각 그림 3.2, 3.3과 같다.

실제로 제체누수현상에 영향을 미치는 인자가 너무 많기 때문에 모든 인자를 고려하려면 연구범위가 매우 방대해질 것으로 예상되어 단면선정시 제체누수에 영향을 미치는 몇 가지 인자는 다음과 같이 가정하였다.

- (1) 하천의 평상시 평균수위는 제체 밑 1m를 기준으로 하였음
- (2) 제내지쪽의 지하수위는 제체 밑 2m를 기준으로 하였음
- (3) 홍수시 수위상승속도는 가속 및 감속하지 않는다고 보았음
- (4) 제체와 기초지반은 각각 균질한 토성을 가지고 있다고 보았음

본 연구에서는 위의 가정사항을 근거로 하여 수치해석기법을 이용하여 여러 가지 인자가 제체누수발생에 미치는 영향을 검토하기 위해 제방형상에 따라 여러 단면을 선정하였으며 이에 수문학적 인자와 제체 및 기초지반의 투수계수를 변화시키면서 해석을 실시하도록 하였다.

수문학적 인자에 대한 영향 검토 시에는 조사자료를 근거로 제체높이 10m, 사면기울기 1:2.0, 두마루폭 5m인 제방형상을 기본단면으로 하여 홍수시 상승한 최대수위와 정상수위에서 최대수위까지의 상승속도를 각각 5~9m, 0.5~2.0day/ Δh (Δh =정상수위에서 최대수위까지의 수위변화)로 변화시키면서 해석에 적용하였다. 시방규정을 살펴보면 계획홍수량이

10,000m³/sec 일 때 여유고를 2m이상 두도록 하고 있으나, 계획홍수량이상의 홍수시를 감안하여 여유고 1m 까지 수위가 상승하는 것으로 하여 수위변화를 적용하였다(그림 3.4 참조).

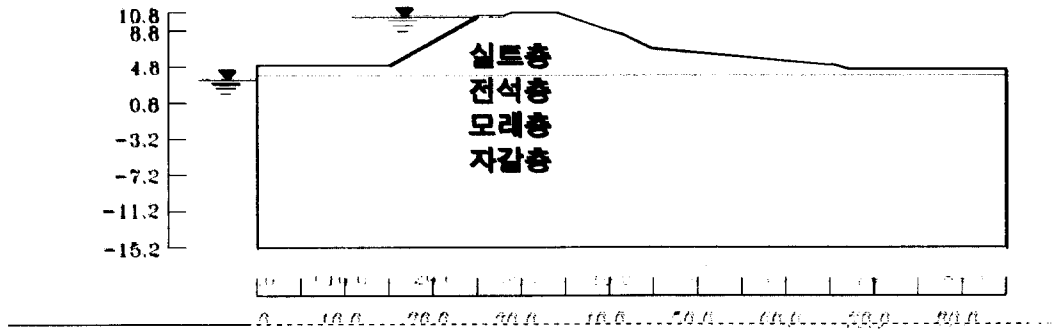


그림 3.2 일산제방의 단면모습.

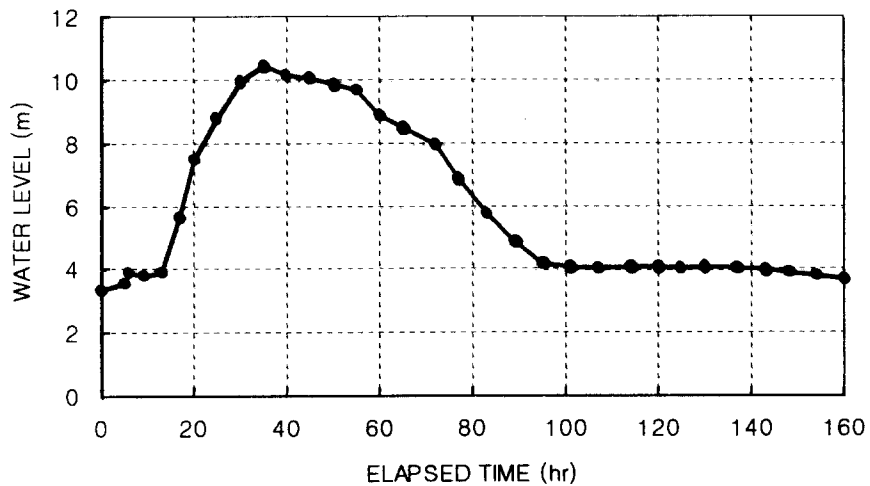


그림 3.3 일산제방 사고당시의 시간-수위 곡선.

제방형상은 시방규정을 살펴보면 제체사면의 기울기는 일반적으로 1:2.0을 기준으로 하고 있으나 시공상황 및 지역여건에 따라 기울기가 변경될 수 있으며, 제체 둑마루폭 시방규정은 계획홍수량에 따라 3~7m 이상으로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 제체높이는 10m로 일정하게 두고 제체사면의 기울기를 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5로, 제체 둑마루폭은 3m, 4m, 5m, 6m, 7m로 변화시키면서 총 15가지의 해석단면을 선정하였다(그림 3.4 참조). 제체 및 기초지반의 토성인자에 대한 영향 검토시에는 제체와 기초지반 투수계수를 변화시키면서 기준단면에 적용하여 해석을 실시하도록 하였다

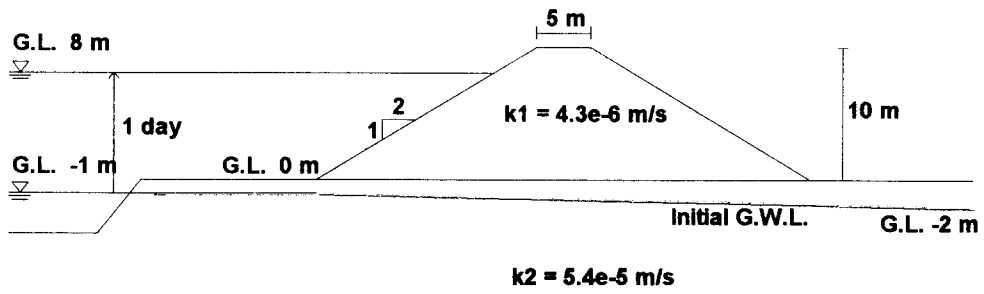
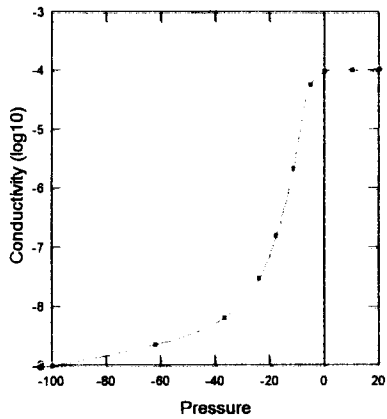
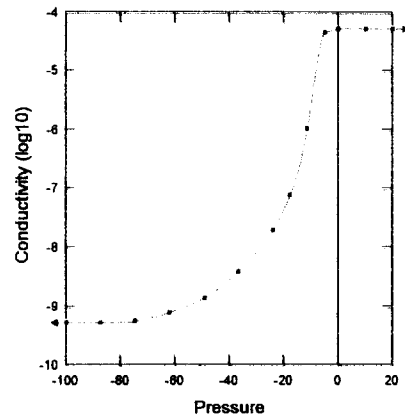


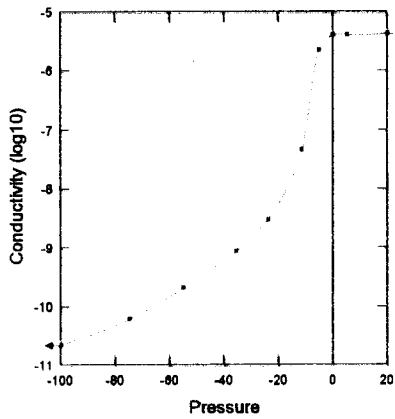
그림 3.4 수치해석을 위한 제방의 기본단면 및 지하수위 초기상태.



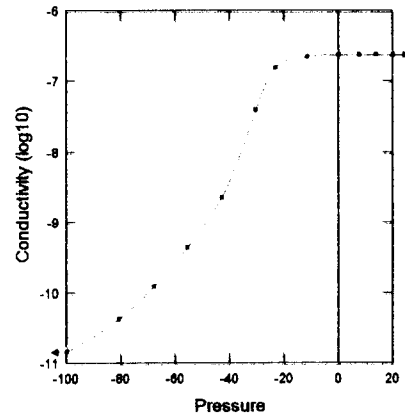
(a) Uniform Sand ($k_s=1 \times 10^{-4}$ m/s)



(b) Sand ($k_s=5.4 \times 10^{-5}$ m/s)



(c) Fine Sand ($k_s=4.3 \times 10^{-6}$ m/s)



(d) Silt ($k_s=2.5 \times 10^{-7}$ m/s)

그림 3.5 불포화 특성을 고려한 투수계수

특히 제체와 기초지반의 투수계수 적용시에는 기존에 Swanson, Bruch 등 여러 학자들이 지반의 불포화 특성을 고려하여 연구한 투수계수 자료를 이용하여 비교적 신뢰할 수 있는 침투

해석결과를 얻을 수 있도록 하였다. 해석에 적용된 각각의 투수계수 자료는 그림 3.5와 같다.

제체누수 방지대책중 하나인 제방 제내지쪽에 필터를 설치한 단면은 누수발생가능성이 있는 기존제방에 대하여 필터설치가 용이하도록 필터모양을 직삼각형 형태로 하였으며, 필터폭은 인력굴착이 가능한 최소폭인 0.5m에서부터 1.0m, 1.5m, 2.0m로 변화시키면서 기준단면에 적용시켰다.

4. 제방형상에 따른 누수검토

제방형상에 따른 누수검토시에는 제체의 높이를 10m로 고정시키고 기본단면을 기준으로 제체사면의 기울기(S) 및 독마루폭(b)의 크기를 변화시키면서 해석을 실시하였으며, 제내측의 비탈끝부분까지 침윤선이 도달하는 홍수경과시간(T)을 누수발생 위험성에 대한 판단기준으로 하였다. 제체사면의 기울기 및 제체 독마루폭의 변화에 따른 해석결과는 표 4.1와 같다.

우선 해석결과에 대해서 전체적인 경향을 살펴보면 이미 예상한 바와 같이 제체의 폭이 작을수록, 또한 제체사면의 기울기 급할수록 침윤선이 제내지측 제체끝까지 비교적 짧은 홍수경과시간내에 도달하게 되고, 또 그만큼 제체누수가 일어날 수 있는 가능성이 빨라지고 있음을 증명하고 있다.

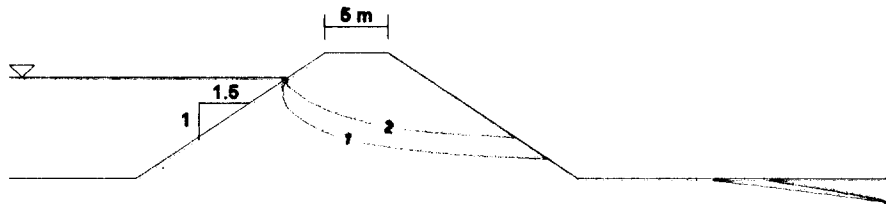
그림 4.1은 제체독마루폭이 5m로 일정할 때 제체사면의 기울기가 각각 1:1.5, 1:2.0인 경우 홍수경과시간 2일 동안의 제체내 침윤선 변화를 나타낸 해석결과이며, 그림 4.2는 제체사면의 기울기가 1:2로 일정할 때 제체독마루폭이 각각 3m, 7m인 경우 홍수경과시간 3일 동안의 제체내 침윤선 변화를 나타낸 해석결과이다.

제체사면의 기울기가 1:1.5인 경우에는 제체의 독마루폭에 따라 누수발생가능 홍수경과지속시간이 13~17시간 정도로 나타났으며, 1:2.0인 경우에는 21~46시간 정도, 1:2.5인 경우에는 62~240시간 정도로 나타났다. 사면기울기가 1:1.5인 경우에는 독마루폭의 변화에 따라 누수발생가능 홍수경과시간이 거의 일정한 간격으로 변화하고 있으며, 사면기울기가 1:2.0, 1:2.5인 경우에는 독마루폭의 변화에 따라 예상홍수시간이 점점 큰 간격으로 변화하고 있고, 1:2.0의 경우 보다는 1:2.5의 경우가 더욱 큰 간격으로 변화하고 있다.

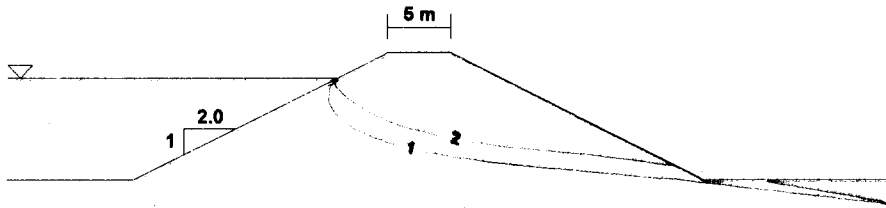
이러한 결과는 홍수위가 제체상부까지 상승했을 때 제체상부에서 제체끝까지의 침투거리를 크게 좌우하는 독마루폭의 변화보다는 제체하부에서 제체끝까지의 침투거리를 크게 좌우하는 사면기울기의 변화가 누수발생 홍수시간에 영향을 미치는 더 큰 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

표 4.1 제체의 사면기울기 및 둑마루폭에 따른 누수발생예상 수위지속시간.

제체사면의 기울기	제체의 둑마루폭 (m)	누수발생가능 홍수경과시간 T_t (hr)	비고
1 : 1.5	3	13(4.3)	※ 괄호안은 수위상승 시 이미 누수발생가능 이 있는 경우의 수위 상승높이 (m)
	4	14(4.7)	
	5	15(5.0)	
	6	16(5.3)	
	7	17(5.7)	
1 : 2.0	3	21(7.0)	
	4	24	
	5	28	
	6	35	
	7	46	
1 : 2.5	3	62	
	4	96	
	5	132	
	6	180	
	7	240	

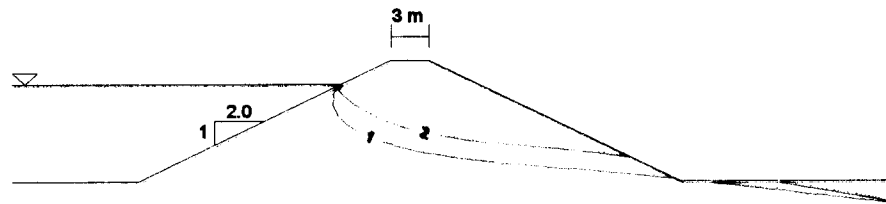


(a) $b=5m$, $S=1:1.5$ 인 경우 홍수경과시간 2일 동안의 제체내 침윤선의 변화

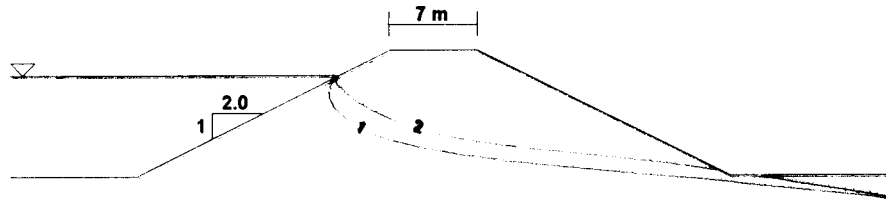


(b) $b=5m$, $S=1:2.0$ 인 경우 홍수경과시간 2일 동안의 제체내 침윤선의 변화

그림 4.1 제체사면의 기울기에 따른 제체내 침윤선의 변화



(a) $b=3m$, $S=1:2.0$ 인 경우 홍수경과시간 2일 동안의 제체내 침윤선의 변화



(b) $b=7\text{m}$, $S=1:2.0$ 인 경우 홍수경과시간 2일 동안의 제체내 침윤선의 변화

그림 4.2 제체 둑마루폭에 따른 제체내 침윤선의 변화

5. 결 론

본 논문에서는 하천제방의 제체누수에 대한 안정성을 검토하기 위하여 홍수시 제체내 비정상류 흐름에 대한 수치해석적 기법을 통해 하천제방과 관련된 여러 가지 인자가 제체누수에 미치는 영향을 분석하였다. 이에 대한 연구수행 결과는 다음과 같다.

(1) 제방형상에 따른 누수검토시에는 제체의 높이를 10m로 고정시키고 기본단면을 기준으로 제체사면의 기울기(S) 및 둑마루폭(b)의 크기를 변화시키면서 해석을 실시하였으며, 재내측의 비탈끝부분까지 침윤선이 도달하는 홍수경과시간(T_f)을 누수발생 위험성에 대한 판단기준으로 하였다.

(2) 제체의 폭이 작을수록, 또한 제체사면의 기울기 급할수록 침윤선이 제내지측 제체끝까지 비교적 짧은 홍수경과시간내에 도달하게 되고, 또 그만큼 제체누수가 일어날 수 있는 가능성이 빨라지고 있음을 증명하고 있다.

(3) 제체사면의 기울기가 1:1.5인 경우에는 제체의 둑마루폭에 따라 누수발생가능 홍수경과 지속시간이 13~17시간 정도로 나타났으며, 1:2.0인 경우에는 21~46시간 정도, 1:2.5인 경우에는 62~240시간 정도로 나타났다.

(4) 사면기울기가 1:1.5인 경우에는 둑마루폭의 변화에 따라 누수발생가능 홍수경과시간이 거의 일정한 간격으로 변화하고 있으며, 사면기울기가 1:2.0, 1:2.5인 경우에는 둑마루폭의 변화에 따라 예상홍수시간이 점점 큰 간격으로 변화하고 있고, 1:2.0의 경우 보다는 1:2.5의 경우가 더욱 큰 간격으로 변화하고 있다.

(5) 홍수위가 제체상부까지 상승했을 때 제체상부에서 제체끝까지의 침투거리를 크게 좌우하는 둑마루폭의 변화보다는 제체하부에서 제체끝까지의 침투거리를 크게 좌우하는 사면기울기의 변화가 누수발생 홍수시간에 영향을 미치는 더 큰 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

1. 정형식, 이승호(1993), “제방축조에 의한 연약점토지반의 변형해석에 관한연구”, 한국지반공학회 논문집, 제9권 제2호
2. 김상규 (1994), “토질역학(이론과 응용)”, 청문각, Chap. 7
3. 이지원, 이경성 (1996), “댐의 설계와 시공편람”, 신기술, Chap. 5
4. 신방웅 (1985), “비정상 침투에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회, 제5권 제1호, pp. 31~42
5. 건설부 한강홍수통제소 (1980), “한강홍수예경보 유출 및 상수분석보고서”
6. 서울지방국토관리청 (1991), “김포제 개수(보강)공사 용역 보고서”
7. 건설부 (1994), “하천공사 표준시방서”
8. 건설부 (1991), “한국수문조사연보”
9. Fredlund, D. G., Rahardjo, H. (1995), “*Soil Mechanics for Unsaturated Soils*,” John Wiley & Sons, Inc.
10. GEO-SLOPE International (1994), “*SEEP/W User's Guide*”
11. Holmberg, R. (1986), “Surfacial Failure of Alluvial Stream Banks,” Can. Geotech.J.23, pp. 304~316
12. Lam, L., Fredlund, D. G. and Barbour, S. L. (1987), “Transient Seepage Model for Saturate-Unsaturated Soil System : A Geotechnical Engineering Approach,” Can. Geotech. Journal, 24, pp. 565~580
13. Sherard, J. L., Rey S. Decker and Norman L. Ryker (1972), “Piping in Earth Dams of Dispersive Clay,” Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, pp. 589~626
14. Sherard, J. L. et al. (1963) “*Earth and Earth-Rock Dams*,” John Wiley & Sons, Inc. pp. 114~130
15. T.William Lambe, Rovert V. Whitman (1979), “*Soil Mechanics, SI Version*,” John Wiley & Sons, Inc., Chap. V