

수평흐름에 의한 제방모형내의 비정상침투에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of Non-Steady State Seepage in the Levee Model by Parallel Water Flow

신방웅* · 이봉직**

Shin, Bang Woong · Lee, Bong Jik

Abstract

The stability of the embankment is depended upon the location of seepage line. As the seepage flow occurs in the embankment, the slope of the embankment loses its stability. Of particular interest is the stability following a rapid change of embankment level. The variation of seepage line in the embankment model according to flow velocity was investigated. In addition to this non-steady state flow in embankment by a fluctuation of water level is discussed. The experimental model was construction with slopes of 1 : 2.5 and flow velocity is turned from 60 cm/sec~90 cm/sec. Analysis of the experimental results, the seepage line is influenced by flow velocity and coefficient of permeability.

요 지

수평흐름에 의한 제체내의 비정상침투류를 실험을 통하여 구명한 것으로 흐름의 속도와 수위의 변동에 따른 제체내에서의 침투류영향을 고려하므로써 하천제방의 안정성증대에 목적을 두었다. 실험은 투수 계수가 서로 다른 3가지 모델($K_1=3.52 \times 10^{-1}$ cm/sec, $K_2=1.94 \times 10^{-1}$ cm/sec, $K_3=4.19 \times 10^{-2}$ cm/sec)에 대하여, 각기 흐름의 속도를 60, 70, 80, 90 cm/sec로 변화시키고 동시에 수위를 상승 또는 하강시키는 방법으로 제체내에 발생하는 수위변화를 실험을 통하여 분석하였다. 분석결과 제체내의 침투현상은 제체의 투수계수가 크고, 흐름의 속도가 작을수록 유속의 변화에 따른 영향을 많이 받음을 알 수 있으며, 제외지 수위의 상승과 강하에 따른 배면부 및 표면부에서의 수위가 유속의 영향에 따라 변화함을 알 수 있다.

1. 서 론

하천제방은 기상조건의 급변에 따른 변화에 적응할 수 있는 재해구조물로서의 중요성이 증대하고

있는 실정으로, 이러한 하천제방의 파괴는 집중호우나 하천단면 부족으로 인한 월류와 하천수위변동에 따른 침투수의 영향으로 발생하는 사면붕괴, 제체나 기초지반의 지수성부족으로 발생하는 누수나 세굴현상등이 원인이 된다.

특히 홍수시에 하천제방에 사면붕괴가 발생하는

* 정희원 · 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정희원 · 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

원인으로는 침투수로 인하여 제체내에 공극수압의 상승으로 흙의 전단강도가 저하하기 때문이다. 따라서 제체내의 안정성을 검토하기 위해서는 흐름의 특성, 축조재료의 투수성, 단면조건, 지반조건 등의 여러요인을 검토하여야 한다.

토체체의 비정상침투문제의 해석에 있어서 구조물과 물의 흐름 방향이 직각인 경우에 대해서는 많은 연구가 되어왔다. 그러나 하천제방과 같이 물의 흐름방향이 구조물과 평행한 경우 흐름의 속도변화와 함께 수위의 상승 또는 강하시 제체내의 비정상침투류에 대하여는 실험 및 이론적으로 연구가 미흡한 실정이다.

때문에 제체내의 비정상침투류를 고려할경우 흐름의 속도와 하천수위의 변동에 따른 제체내부에서의 침투류 영향을 고려하므로써 하천제방의 사면붕괴에 대한 안정성증대에 도움이 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 투수계수가 서로 다른 3가지 재료로 축조된 모형제체에 각기 흐름의 속도를 4가지 경우로 변화시켜 가면서 수위의 변동에 따른 비정상침투류의 영향을 실험을 통하여 분석하였다.

2. 침투이론식

2.1 침투류해석의 기초식

제체내의 침투류가 Darcy의 법칙에 따른다고 하면, 정상침투시 기초방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(kx \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(ky \frac{\partial H}{\partial y}) + q = 0 \quad (1)$$

H : 수두

Kx : x방향의 투수계수

Ky : y방향의 투수계수

q : 요소내에 발생하는 수량

강우에 의해 침투가 증가되고, 제체내의 자유수면이 변화할 경우 자유수면상의 연속식은 식 (2)와 같다.

$$n_e \frac{\partial H}{\partial T} = R + Uy + \frac{\partial H}{\partial x} U_x \quad (2)$$

n_e : 유효공극율

H : 수위

R : 강우침투율

U_x, y : x, y방향의 유속

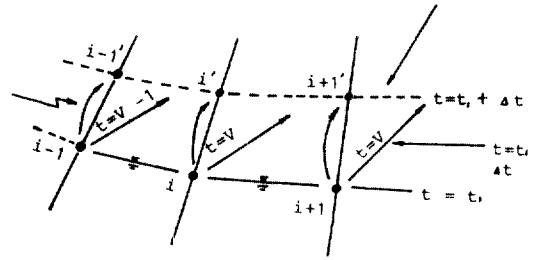


그림 1. 비정상침투류해석에서의 침윤면의 이동방법

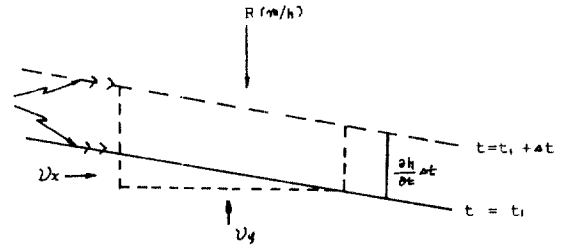


그림 2. 강우가 있을 경우의 침윤면의 연직방향 상승량

2.2 자유수면을 갖는 비정상 침투류의 해석

자유수면을 갖는 비정상 침투류의 해석에는 침윤면상에서의 유량의 연속식을 고려해야 한다. 그림 1과 같이 자유수면이 있는 경우 수위가 ΔH 만큼 상승(하강)했을 때 자유수면상의 점 P_i 는 P_i' 로 이동한다. 즉,

$$P_i' = P_i + V' \Delta T \quad (3)$$

로 되며, 시각($t_i + \Delta t$)에서의 자유수면은 그림 1과 같이 각각의 자유수면상에 있는 절점의 이동 후 vector를 순조롭게 연결한 선으로 표현할 수 있게 된다.

여기서, 식 (3)의 V' 는 실제속도로 각 절점에서의 겉보기 투수속도 V 와 유효공극율 n_e 로부터 구할 수 있다.

$$V_i' = V_i / n_e \quad (4)$$

강우가 있는 경우에는 그림 2와 같이 ΔT 사이에 우수의 침투에 의해 발생하는 침윤선의 이동은 t_i 에서의 침윤선과 평행하다고 가정한다.

그림 2로부터 침윤선에서의 유량에 대한 연속식은 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} \Delta t = \frac{(R + Uy)}{n} \Delta t + \frac{U_x}{n} \frac{\partial h}{\partial x} \Delta t \quad (5)$$

윗 식 (5)로부터 R과 Uy는 침윤면 연직방향 상승량에 같게 작용함을 알 수 있다. 따라서 강우의 침투가 있는 경우 침윤선의 이동 방법은

$$V_i(V_{xi}, V_{yi}) \xrightarrow{\text{강우가 있는 경우}} V_i(V_{xi}, V_{yi} + \frac{R}{n}) \quad (6)$$

3. 실험에 이용한 제 조건

3.1 실험장치

실험장치는 수평흐름에 의하여 토체체의 비정상 침투현상에 대한 모형실험을 할 수 있도록 제작된 실험장치로 유속이나 유량, 그리고 제반 실험을 통제할 수 있는 주컴퓨터와 열십자형으로 구성된 수조와 수로, 그리고 수조저면에는 소수이하 첫째자리까지의 변화량을 측정할 수 있는 7개의 센서로 구성되어 있다.

또한 유속의 변화와 물의 순환에 이용되는 대형 펌프와 센서로부터 읽은 값을 수치화 하는 DPI 2000과 이를 자동기록할 수 있는 기록장치, 그리고 물을 저장할 수 있는 대형수조로 구성되어 있으며, 체외지의 수위 조절을 위하여 수로 끝에 폭 40 cm, 길이 50 cm의 수문을 달아 수위의 변화에 따른 유속별 침윤선의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

본 실험장치의 세부제원은 길이 490 cm, 폭 40 cm, 높이 60 cm의 수조를 중심으로 300 cm의 수로를 설치하여 수조양쪽으로 제방모형을 축조하였다. 수로내의 물의 흐름은 길이 331 cm, 폭 180 cm의 저수조로부터 지름 20 cm 파이프를 통해 순환시켰으며, 모형내에는 40 cm 간격으로 설치한 센서로부터 침윤선의 변화를 0.1 mm까지 정밀하게 측정하였다.

이 측정된 결과는 8sec 간격으로 자동입력되도록 하였으며, 센서의 보호를 위하여 저면에 두께 2 cm의 다공석판을 설치하였다. 사면경사는 아크릴판을 이용하여 양쪽제체 모두 자유로이 변환 시킬수 있도록 수로내에 경사판을 설치하였으며, 유속의 조절은 주컴퓨터를 이용, 수위상승시간이나 유속을 자유로이 조절할 수 있도록 하였다.

한편 모형은 모래를 이용하여 길이 230 cm 높이 40 cm 폭 30 cm로 수로양측에 설치하였다.

본 실험에 사용된 실험장치는 사진 1과 같다.

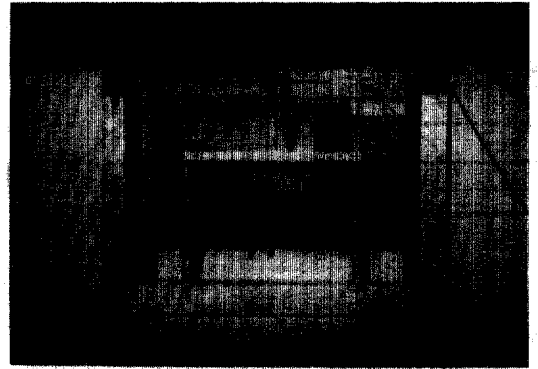


사진 1. 실험장치

3.2 실험방법

실험은 주컴퓨터에 유속 및 수위의 초기치와 세부제원, 그리고 기타 초기치를 입력시키면 수로끝의 수문과 유량은 자동적으로 조절되도록 하였다.

제체의 모형은 투수계수가 $K_1=3.52 \times 10^{-1}$ cm/sec, $K_2=1.94 \times 10^{-1}$ cm/sec, $K_3=4.19 \times 10^{-2}$ cm/sec인 3가지에 대하여, 각기 유속을 60, 70, 80, 90 cm/sec로 변화시켜 가면서 유속의 변화에 따른 침투류의 영향에 대하여 실험을 실시하였다.

유속의 변화에 따른 침투류의 영향은 8 sec 간격으로 측정하였으며, 측정위치는 CHANNEL 1부터 CHANNEL 7까지 40 cm간격으로 측정하였다. 아울러 컴퓨터로 조작된 유속의 정확성을 검증하기 위하여 유속계를 사용하였으며, 센서에 나타난 결과는 ZERO CALIBRATION 이후 PIEZOMETER를 이용하여 확인하였다.

또한 수위변동에 따른 침투류의 영향을 분석하기 위하여 각 유속별로 체외지수위를 300 mm까지 상승시켜 홍수시 수위상승에 따른 체체내의 수위변화에 대한 실험을 실시하였으며, 아울러 각 유속별 수위강하에 따른 침투류의 영향을 분석하기 위하여 수위 300 mm에서 수위를 급강하시키면서 체체내의 수위변화를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

물의 흐름의 방향이 구조물과 평행한 경우 흐름의 속도와 체체의 투수계수에 따라 체체내의 침윤선의 변화를 구명하기 위하여, 먼저 일정단면을 갖는 수

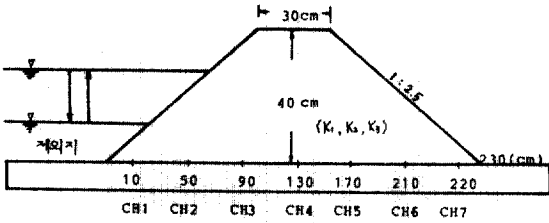


그림 3. 실험에 이용한 모형단면

로에 유속을 60 cm/sec에서 90 cm/sec로 10 cm/sec씩 증가시켜 가면서 침윤선의 변화를 측정하였다. 또한 홍수시 하천수위의 급상승에 따른 침투수에 의한 영향을 측정하기 위하여 4가지 경우의 유속에 대하여 수위를 300 mm까지 급상승 시킨 후 일정 수위를 유지시켜 각기 투수계수가 다른 3가지 조건에 대하여 제체 배면경사부($x=1700$ mm) 지점에서의 수두변화를 고찰하였다.

또한 수위 300 mm에서 수위를 급강하시켜 강하 후에 유속에 의한 제체내 수위의 변화를 측정하여 이에 따른 영향과 상승직후의 수위강하등에 의한 영향을 비교, 분석하였다.

4.1 유속의 변화에 따른 침투류의 비교

제체의 투수계수 및 흐름의 속도에 따른 제체내의 수위변화를 찾기 위하여 투수계수가 서로 다른 3가지 제체에 대하여 유속을 60~90 cm/sec로 변화시켜 가면서 제체내의 수위변화를 측정된 결과는 다음과 같다.

그림 4, 5, 6은 각 유속의 단계에서 투수계수에 따른 침윤선의 변화를 나타낸 것으로 유속이 증가할수록 침윤선의 높이는 상승함을 알 수 있다. 각 투수계수별 유속의 변화에 따른 침윤선의 변화를 고찰하여 보면 투수계수가 가장 큰 K_1 의 경우에는 유속이 60 cm/sec에서 70 cm/sec로 10 cm/sec 증가할 때 침윤선의 상승량이 가장 크게 나타났고, 70 cm/sec에서 80 cm/sec로의 유속증가에도 제체내 수위는 지속적으로 상승하였으나, 초기 유속의 증가에 따른 침윤선의 상승량보다는 작게 나타났다. 이후 80 cm/sec에서 90 cm/sec로의 유속증가에는 제체내 수위의 변화가 현격히 감소되었다.

이와같은 현상은 흐름단면의 형태에 따라 제외지 측 수위가 유속이 작을수록 작은 유속의 증가에도 유속이 빠를때와 비교하여 높게 형성됨에 따른 영

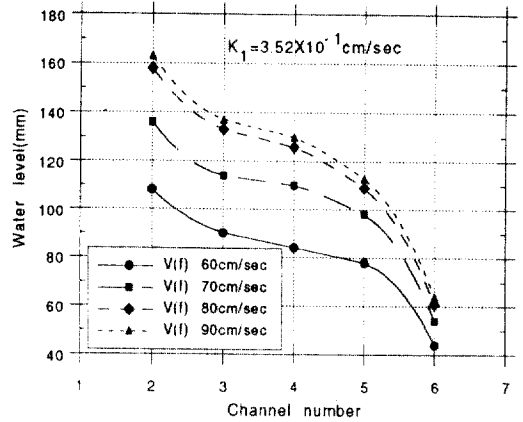


그림 4. 유속의 변화에 따른 침윤선의 변화(K_1)

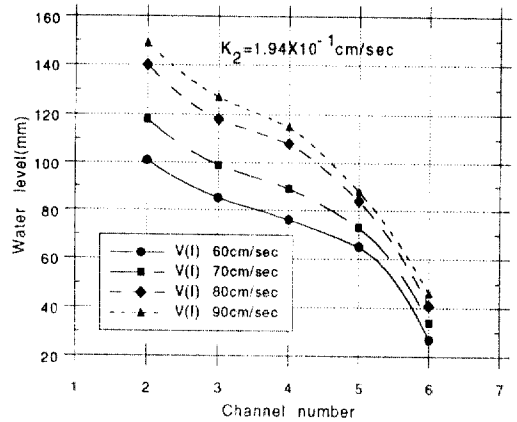


그림 5. 유속의 변화에 따른 침윤선의 변화(K_2)

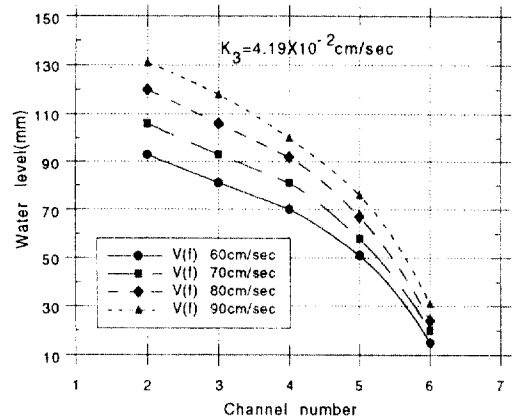


그림 6. 유속의 변화에 따른 침윤선의 변화(K_3)

향으로 판단된다.

K_2 의 경우에는 유속이 60 cm/sec~70 cm/sec와

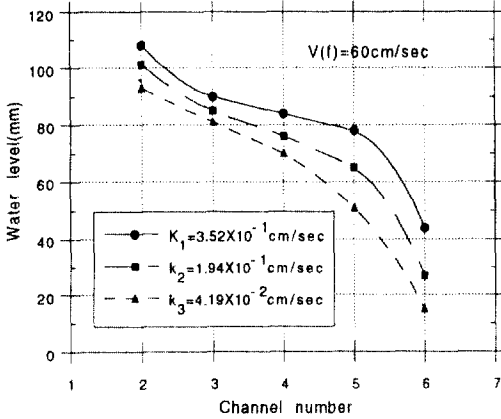


그림 7. 투수계수의 변화에 따른 침윤선의 변화($V_f=60$ cm/sec)

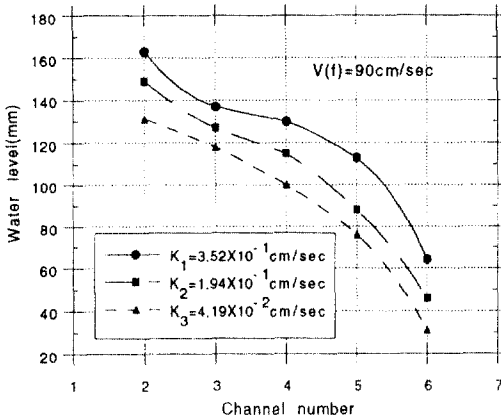


그림 8. 투수계수의 변화에 따른 침윤선의 변화($V_f=90$ cm/sec)

70 cm/sec~80 cm/sec로 증가시 유사한 침윤선의 상승이 발생하였고, 80 cm/sec~90 cm/sec로 변화할 때는 K_1 의 경우와 비교해 볼 때 침윤선의 상승량은 증가하였으나, 초기 유속의 증가시보다는 상승량이 둔화됨을 알 수 있다. 또한 실험조건에서 투수계수가 가장 작은 K_3 에서는 각 유속의 변화단계마다 거의 유사하게 침윤선의 높이가 증가하였다. 이는 제외 지층 수위변화에 따른 제체내 수위의 변화는 투수계수가 작아질수록 유속의 증가에 따른 영향을 일정하게 받음을 나타낸다.

따라서 흐름의 단면이 같을 때 유속증가에 따른 제체내의 수위변화는 투수계수가 크고, 흐름의 속도가 작을수록 크게 나타나며, 투수계수가 작아질수록 유속의 증가에 따른 변화는 지속적으로 발생

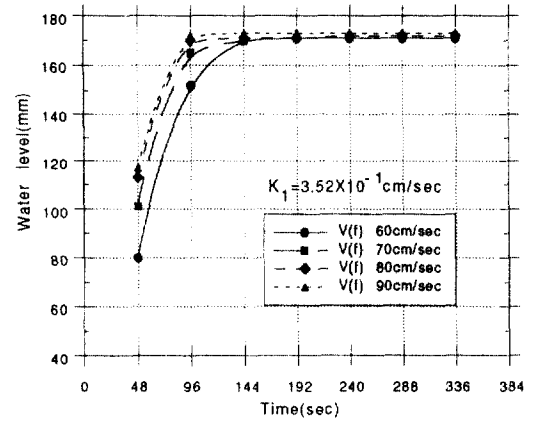


그림 9. 수위상승시 유속의 변화에 따른 배면부($x=1700$ mm) 수위의 변화(K_1)

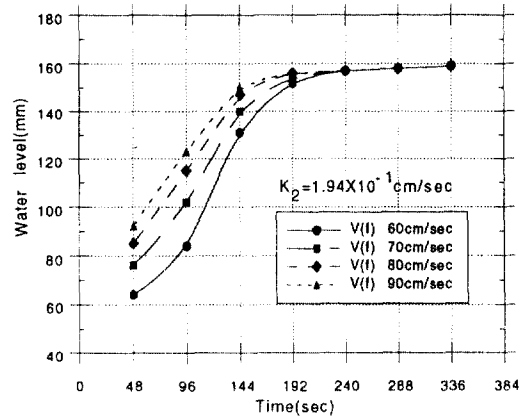


그림 10. 수위상승시 유속의 변화에 따른 배면부($x=1700$ mm) 수위의 변화(K_2)

함을 알 수 있다.

그림 7, 8은 실험조건에서 최저유속과 최고유속에서의 투수계수에 의한 제체내 수위의 변화를 나타낸 것으로, 각 조건마다 투수계수가 작을수록 제체내 수위는 급격히 변화하며, 유속이 빠를수록 투수계수의 변화에 따른 침윤선의 변화폭이 증가함을 나타낸다.

이와같은 실험결과로부터 유속과 투수계수의 변화에 따른 침윤선의 변화에 대한 상관도 분석결과 양의 상관관계가 존재함을 알 수 있었다. 즉, 유속이 60 cm/sec인 경우에는 0.98696~0.99821, 70 cm/sec인 경우에는 0.98659~0.99519, 80 cm/sec일때는 0.98998~0.99748, 90 cm/sec인 경우에는 0.98863~0.99437의 값으로 나타났다.

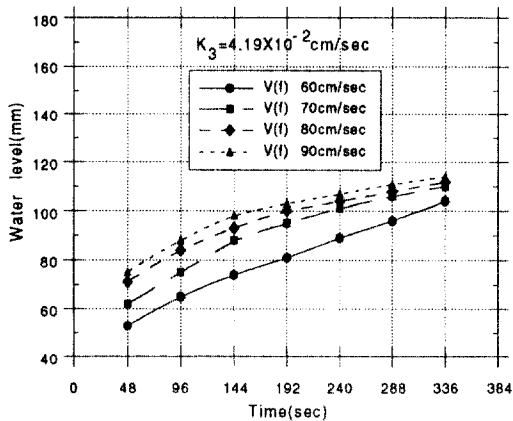


그림 11. 수위상승시 유속의 변화에 따른 배면부($x=1700$ mm) 수위의 변화(K_3)

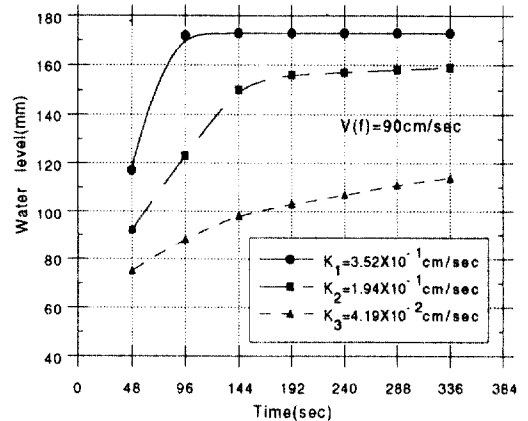


그림 13. 수위상승시 투수계수의 변화에 따른 배면부($x=1700$ mm) 수위의 변화($V_f=90$ cm/sec)

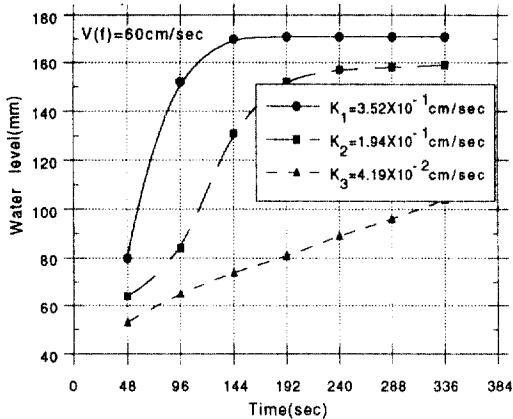


그림 12. 수위상승시 투수계수의 변화에 따른 배면부($x=1700$ mm) 수위의 변화($V_f=60$ cm/sec)

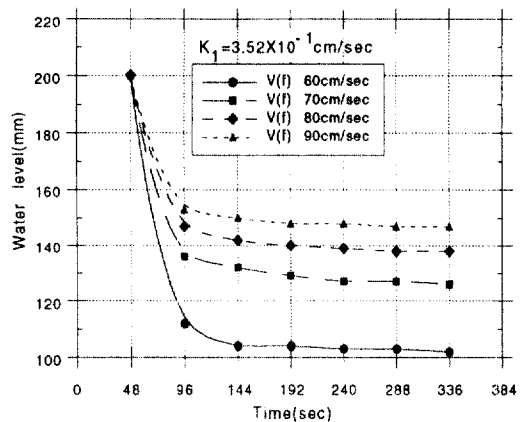


그림 14. 수위강하시 유속변화에 따른 표면부($x=500$ mm) 수위의 변화(K_1)

따라서 이와 같은 관계를 이용, 투수계수가 작은 토질에 대한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4.2 수위상승에 따른 침투류의 비교

홍수시에 침투수에 의한 제체의 안정성을 고려할 경우 바깥수위와 홍수지속시간의 외력이 제체의 안정성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 투수계수 K_1 , K_2 , K_3 에 대하여 각 유속조건에서 수위를 300 mm 까지 상승시키에 따른 침투류의 변화에 대하여 실험을 실시하였다.

실험결과 투수계수가 가장 큰 K_1 의 경우에는 배면부($x=1700$ mm)에서의 제체내의 수위상승은 각

유속에 따라 수위상승 직후 $t=96$ sec까지는 급격히 증가하였다. 이후 $t=144$ sec까지는 유속이 증가할수록 배면부의 수위상승이 둔화되다가 144 sec 이후에는 변화가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

K_2 의 경우에는 유속의 증가에 따른 배면부의 수위상승은 $t=144$ sec까지 완만히 상승하다가 점차로 둔화되었으며, $t=192$ sec 이후에는 상승량이 거의 나타나지 않았고, 실험조건에서 투수계수가 가장 작은 K_3 에서는 유속의 증가와 시간의 경과에 따라 배면부의 수위는 지속적으로 상승하였다.

이상의 실험결과에서 수위상승시 유속의 변화가 배면부 수위의 변화에 미치는 영향을 고찰하여 보면,

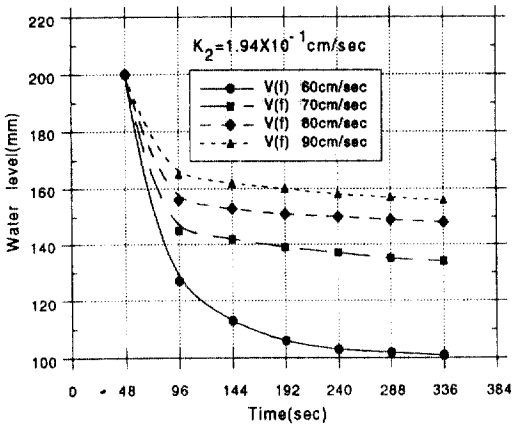


그림 15. 수위강하시 유속변화에 따른 표면부(x=500 mm) 수위의 변화(K_2)

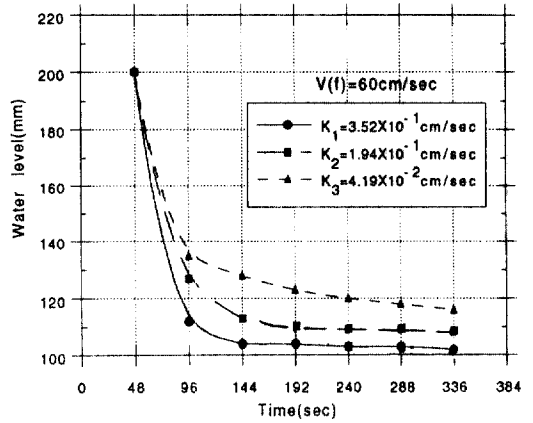


그림 17. 수위강하시 투수계수의 변화에 따른 표면부(x=500 mm) 수위의 변화($V_1=60$ cm/sec)

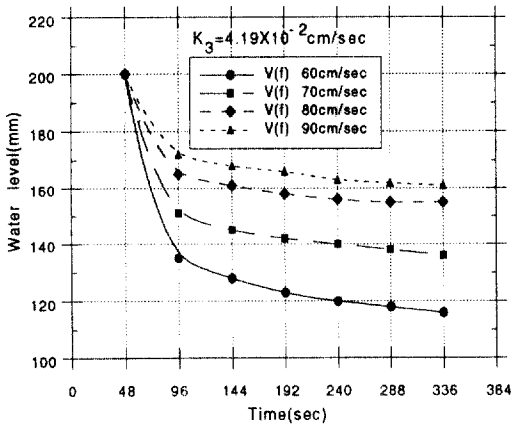


그림 16. 수위강하시 유속변화에 따른 표면부(x=500 mm) 수위의 변화(K_3)

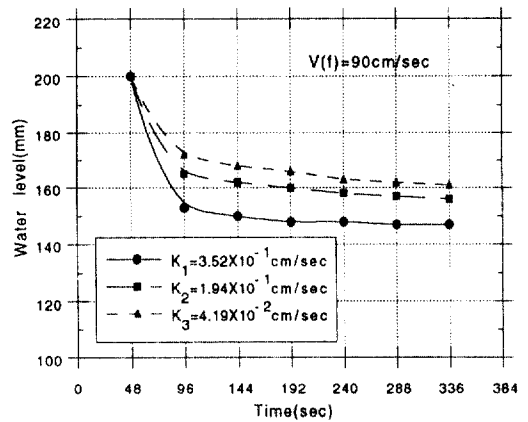


그림 18. 수위강하시 투수계수의 변화에 따른 표면부(x=500 mm) 수위의 변화($V_1=90$ cm/sec)

유속이 빠를수록 배면부 수위의 상승속도는 빨라짐을 알 수 있으며, 투수계수가 작을수록 유속의 증가에 따른 배면부의 수위상승은 시간의 경과에 따라 지속됨을 알 수 있다.

또한 일정유속에서 투수계수에 따른 제체내의 수위변화는 투수계수가 클수록 배면부 수위가 높아지며, 최고점에 도달하는 시간도 짧아짐을 알 수 있다.

4.3 수위강하에 따른 침투류의 비교

하천수위의 강하에 의한 침투류의 영향을 고찰하기 위하여 제체의 투수계수 K_1 , K_2 , K_3 에 대해 수위 300 mm에서 유속의 변화를 주면서 제외지의 수위를 강하시킨후 표면부(x=500 mm)와 배면부(x=1700

mm)에서의 제체내의 수위변화를 측정하였다.

각 투수계수 K_1 , K_2 , K_3 에서 수위강하에 따른 표면부에서의 수위변화는 유속의 변화에 따라 유사하게 나타나나, K_1 과 K_2 에서는 유속이 가장 작은 60~70 cm/sec 사이에서 제외지의 수위강하에 따른 변화량이 가장 크고, 투수계수 K_3 에서는 유속이 60~70 cm/sec 사이의 수위강하량이 작아져, 70~80 cm/sec로 변화할 때와 유사한 차이를 나타낸다. 이와 같은 결과는 유속의 변화에 따른 침투류의 변화에서 검토된 것과 같은 경향을 나타내고 있음을 보여준다. 또한 일정유속에서 제외지 수위강하시 투수계수의

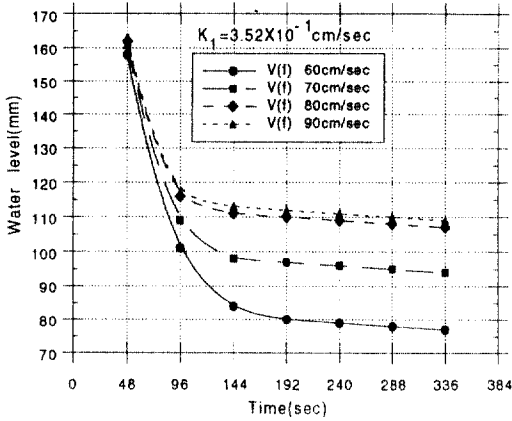


그림 19. 수위강하에 따른 배면부($x = 1700$ mm)에서의 수위변화(K_1)

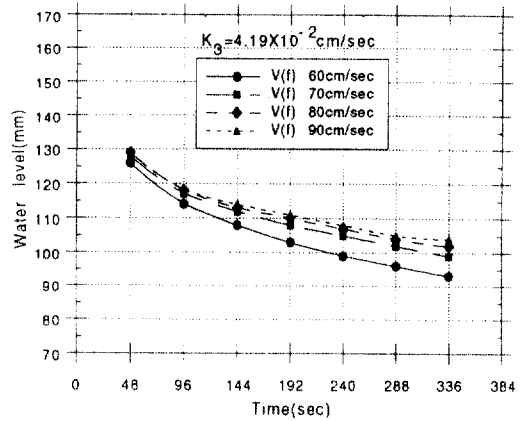


그림 21. 수위강하에 따른 배면부($x = 1700$ mm)에서의 수위변화(K_3)

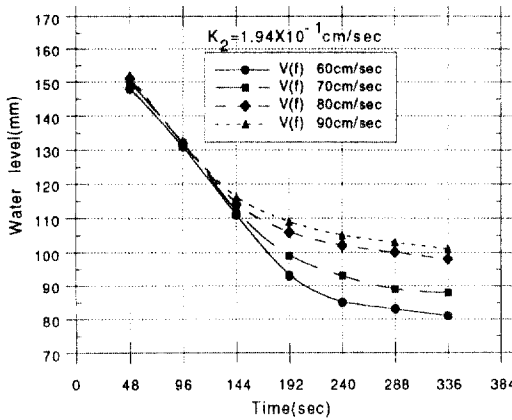


그림 20. 수위강하에 따른 배면부($x = 1700$ mm)에서의 수위변화(K_2)

변화에 따른 표면부에서의 수위는 투수계수가 작을수록 강하량이 작아지고, 유속이 빠를수록 표면부 수위는 높게 형성됨을 알 수 있다.

그림 19, 20, 21은 수위강하에 따른 배면부에서의 수위변화를 나타낸 것으로, 투수계수가 가장 큰 K_1 에서는 수위강하 직후 96 sec까지 급속한 변화를 나타내고 있으며, 유속이 60~70 cm/sec, 70~80 cm/sec까지 유속의 변화에 따른 강하량의 차가 크게 발생함을 알 수 있다. 투수계수 K_2 에서는 $t = 192$ sec까지 배면부에서의 수위강하가 지속적으로 발생하며 강하량은 K_1 의 경우와 비교하여 시간적 지체와 함께 유속의 변화에 따른 강하량의 차도 감소함을 알 수 있다. 이와같은 현상은 K_3 에서는 거의 완만한 변화를 나타내고 있으며 유속의 변화에 의한 강하

량의 차도 상당히 둔화됨을 알 수 있다.

따라서 제외지 수위의 강하에 따른 제체내의 수위변화는 유속이 빠를수록 강하량이 작아지며, 투수계수가 작아질수록 시간적 지체와 함께 유속의 변화에 따른 강하폭이 작아짐을 알 수 있다.

5. 결론

흐름의 속도에 따른 제체의 비정상침투류와 홍수시 발생하는 수위의 상승 및 강하에 따른 제체내의 변화를 구명하기 위하여 투수성이 서로 다른 3가지 모형을 이용하여의 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제체내의 수위변화는 제체의 투수계수가 크고, 흐름의 속도가 작을수록 유속의 변화에 따른 영향이 많이 받음을 알 수 있으며, 투수계수가 작아질수록 유속의 변화에 따른 영향이 지속적으로 나타남을 알 수 있다.

2) 각 투수계수별 유속의 변화에 따른 제체내 수위에 대한 상관도는 양의 상관관계가 존재함을 알 수 있다. 즉, K_1 과 K_2 , K_1 과 K_3 , K_2 와 K_3 의 상관도는 0.98659~0.99821의 값을 나타내고 있어 이의 관계를 이용, 실험의 실시가 어려운 투수계수가 작은 토질에 대한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3) 수위상승시 유속의 변화가 배면부 수위의 변화에 미치는 영향은 유속이 빠를수록 배면부 수위의 상승속도는 빨라짐을 알 수 있으며, 투수계수가 작을수록 유속의 증가에 따른 배면부 수위의 상승은

표 1. 유속변화에 따른 투수계수별 침윤선의 변화(t=600 sec)

K	Channel 유속	CH2 (mm)	CH3 (mm)	CH4 (mm)	CH5 (mm)	CH6 (mm)
K ₁	60	108	90	84	78	44
	70	136	114	110	98	54
	80	158	133	126	109	61
	90	163	137	130	113	64
K ₂	60	101	85	76	65	27
	70	118	99	89	73	34
	80	140	118	108	84	41
	90	149	127	115	88	46
K ₃	60	93	81	70	51	15
	70	106	93	81	58	20
	80	120	106	92	67	24
	90	131	118	100	76	31

표 2. 수위상승에 따른 배면부(x=1700 mm)에서의 시간에 따른 침윤선의 변화

K	Time(sec) 유속	48	96	144	192	240	288	336
K ₁	60	80	152	170	171	171	171	171
	70	101	165	170	171	171	171	171
	80	113	170	171	171	172	172	172
	90	117	172	173	173	173	173	173
K ₂	60	64	84	131	152	157	158	159
	70	76	102	140	154	157	158	159
	80	85	115	147	156	157	158	159
	90	92	123	150	156	157	158	159
K ₃	60	53	65	74	81	89	96	104
	70	62	75	88	95	101	106	110
	80	71	84	93	100	104	108	112
	90	75	88	98	103	107	111	114

표 3. 수위강하에 따른 표면부(x=500 mm)에서의 시간에 따른 침윤선의 변화

K	Time(sec)	48	96	144	192	240	288	336
	유속							
K ₁	60	200	112	104	104	103	103	102
	70	200	136	132	129	127	127	126
	80	200	147	142	140	139	138	138
	90	200	153	150	148	148	147	147
K ₂	60	200	127	119	111	109	108	107
	70	200	145	142	139	137	135	134
	80	200	156	153	151	150	149	148
	90	200	165	162	160	158	157	156
K ₃	60	200	135	128	123	120	118	116
	70	200	151	145	142	140	138	136
	80	200	165	161	158	156	155	155
	90	200	172	168	166	163	162	161

표 4. 수위강하에 따른 배면부(x=1700 mm)에서의 시간에 따른 침윤선의 변화

K	Time(sec)	48	96	144	192	240	288	336
	유속							
K ₁	60	158	101	84	80	79	78	77
	70	161	109	98	97	96	95	94
	80	162	116	111	110	109	108	107
	90	163	117	113	112	111	110	109
K ₂	60	148	131	111	93	85	83	81
	70	150	132	112	99	93	89	88
	80	151	132	114	106	102	100	98
	90	152	132	116	109	105	103	101
K ₃	60	126	114	108	103	99	96	93
	70	128	117	112	108	105	102	99
	80	129	118	113	110	107	104	102
	90	130	119	114	111	108	105	104

시간의 경과에 따라 지속된다.

4) 수위강하시 유속의 변화가 제체내 수위의 변화에 미치는 영향은 유속이 빠를수록 강하량이 작아지며, 또한 투수계수가 작아질수록 시간적 지체와 함께 유속의 변화에 따른 강하폭도 작아짐을 알 수 있다.

5) 제방 사면붕괴의 원인인 배면부 수위는 제외지 수위가 하강하기 시작한 후에 가장 높게 형성됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 연구비지원에 의해 이루어진 것으로 연구가 원활히 이루어질 수 있도록 도와주신 동 재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. 山村, 久樂, 堤防補強に關ての考察, 土木研究所報告 第 145의2, 昭 49.2.

2. 内田茂男, 自由境界な有する非定常浸透流について, 土木學會誌, Vol. 37, No. 2, 昭 27.

3. Polubarinova-Kochina, P. Ya, Theory of Ground Water Movement, Princeton Univ. Press, 1962.

4. Cedergren, H.R., Use of Flow Net in Earth Dam and Levee Design, Proc. 2nd ICSMFE, Vol. 5, 1948.

5. 山村, 久樂, 堤防への浸透と堤體の安定性, 土木研究所報告第 145의3, 昭 49.2.

6. 矢部, 久樂, 堤防補強に關する調査(1), 昭和53年度河川事業調査費報告, 昭 54.5.

7. Chugh A.K. and Davidson L.W., "Analysis of foundation settlements at Ridgway Dam", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, No. 4, pp. 716-725, 1988.

8. Harr, M.E., "Mechanics of Particulate Media", McGraw Hill, 1977.

9. 신방웅, "제체의 평행흐름에 대한 비정상침투의 연구", *대한토목학회논문집* 제 8권 제 3호, 1988. 9, pp. 101-110.

10. 신방웅, 이봉직, "이형제체의 침투에 관한 연구", *대한토목학회논문집* 제11권 제 1호, 1991. 3, pp. 135-144.

(接受: 1994. 5. 17)