



## 모형실험에 의한 토공구조물의 침투거동특성

### The Characteristics for Seepage Behaviour of Soil Structure by Modeling Tests

신 방 응\* · 강 종 범\*\*

Bang-Woong Shin · Jong-Beom Kang

(1999년 11월 10일 접수, 1999년 12월 7일 채택)

#### ABSTRACT

In parallel flow condition, to estimate the stability of the extended embankment constructed on a permeable foundation ground, a laboratory model test was performed due to extended materials and water level increasing velocity of a flood period.

A laboratory model test was performed for different permeability coefficients ( $K_1=2.0 \times 10^{-5}$  cm/sec,  $K_2=1.5 \times 10^{-4}$  cm/sec,  $K_3=2.3 \times 10^{-3}$  cm/sec) using seepage. The fluctuation of water level occurring to an extended embankment was analyzed by laboratory model tests as vary the increasing velocity of water level with 0.6cm/min, 1.2cm/min, 2.4cm/min respectively.

In analysis results, the increase of water level into embankment occurs rapidly because seepage water moving along with a permeable soil flow into embankment. The larger the permeability coefficient of an extended part is the longer initial seepage distance, and the exit point of downstream slope is gradually increased and then shows unstable seepage behavior as occurring partial collapse.

As the increasing velocity of water level increase, the initial seepage line is formed low, and the discharge increases. Therefore, the embankment extended by a lower permeable soil than existing embankment shows stable seepage behavior because an existing embankment plays a role as filter for an extended part.

---

\* 충북대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 충북대학교 대학원 토목공학과 박사과정

### 1. 연구의 필요성

제체와 같이 긴 구간에 걸쳐 연속된 구조물로 다량의 흙을 필요로 하는 축제에는 입수(入手)하기 쉬운 하천 주변의 흙이 이용되기 때문에 반드시 적절한 토질재료가 이용되는 것은 아니다. 더욱이 시공기술의 진보에 따라 제체의 규모가 커지는 경향이며, 그 수도 증가하고 있다.

현재 국내에서는 양호한 지반의 입지조건이 감소하고 비교적 연질 또는 투수층을 수반하는 지반상에 토공구조물의 건설이 많아지는 경향이 있다. 한편, 과학기술이 발달한 현대에 있어서도 역시 범람의 재해를 완전히 방지하는 것은 어렵고, 제체의 설계는 한번 발생할까 하는 어느 일정모형의 홍수를 완전히 유하(流下)시키는 것을 기초로 해서 설계되며, 제방 내부에 균열과 침하에 의한 공동이 발생해서 특히 안정성이 저하하고 있는 구간, 즉 취약구간이 있을 가능성을 부정할 수는 없다.

홍수가 일어났을 때 침투, 누수에 기인하는 하안, 제방의 주된 침식 형태로 다음 3가지를 생각할 수 있다. ① 토중 물에 의한 파이핑 등의 발생 ② 침출수, 강우에 의한 침식 ③ 유수에 의한 각부(脚部)침식 등 3가지 요인은 모두 천천히 진행하고 있던 침식이 홍수 때에 급격하게 큰 사태를 초래하고, 제체와 하안의 파괴도 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 Sliding파괴를 포함해서 동일한 관점에서 검토할 필요가 있다. 이것은 하천제방에 한정된 것이 아니라 자연하천에 있어서도 또는 근래 농업용수, 도시용수의 확보 그리고 하류지역 홍수 방지 또는 경감의 다양한 목적을 위해 건설되고 있는 투과성 댐의 제방에도 똑같이 생각할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 투수성 기초지반상에 축조된 기존 제체에 투수계수가 서로 다른 3가지 증축재료로 축조된 모형제체에 각기 홍수시 수위상승속도를 3가지 경우로 변화시켜 가면서 기존 제체의 증축부에 따라 발생할 수 있는 제체의 안정성을 검토하였다. 검토방법은 홍수시 강우로 인한 수위상승속도 변화에 따른 제체의 안정성을 침윤선 관찰과 증축부 재료의 수위변동 및 유출량 변화를 통하여 평행흐름에 따른

비정상 침투류의 영향을 침투모형실험과 유한요소해석을 통하여 분석하였다.

### 2. 침투이론식

#### 2.1 침투류 해석의 지배미분방정식

제체내의 침투류가 Darcy의 법칙에 따른다고 하면, 정상침투시 지배미분방정식은 한 요소체적에 유입과 유출되는 유량은 어느 시간에서도 같다는 정상류상태에서 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = 0 \dots\dots(1)$$

H : 전 수두

k<sub>x</sub> : x방향 투수계수

k<sub>y</sub> : y방향 투수계수

Q : 요소내에 발생하는 경계유량

Darcy의 법칙은 원래 포화토에서 유도된 법칙이나 나중에 여러 연구에 의해 불포화토의 흐름에도 적용될 수 있는 것으로 나타났다<sup>5)</sup>. 단지 한가지 차이점은 불포화 영역의 투수계수는 일정한 상수가 아닌 변수로 간접적으로 함수량과 간극수압의 변화에 따라 변한다는 것이다<sup>5)</sup>.

위 식은 시간에 따른 유입, 유출량의 변화가 있는 비정상류상태에서 식 (2)로 나타내어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots(2)$$

.....

θ : 체적 함수량, t : 시간

이식은 한 요소체적에 유입흐름율과 유출흐름율과의 차이는 어떤 시간동안의 체적함수량의 변화와 같다는 것을 나타낸다.

강우에 의해 침투가 증가되고, 제체내의 자유수면이 변화할 경우 자유수면상의 연속식은 식 (3)과 같다.

$$n_e \frac{\partial H}{\partial T} = R + V_y + \frac{\partial H}{\partial x} V_x \dots\dots(3)$$

n<sub>e</sub> : 유효공극율

H : 수위

R : 강우침투율

V<sub>x,y</sub> : x, y방향의 유속

#### 2.2 자유수면을 갖는 비정상침투류의 해석

자유수면을 갖는 비정상 침투류의 해석에는

침윤면상에서의 유량의 연속식을 고려해야 한다.

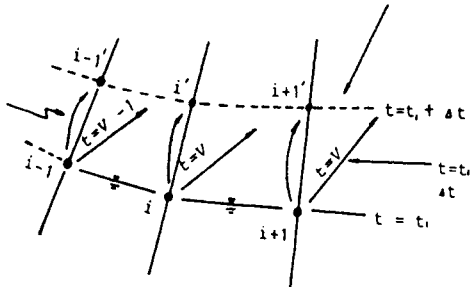


Fig. 1 Moving of seepage face by unsteady seepage flow analysis

Fig. 1과 같이 자유수면이 있는 경우 수위가 ΔH만큼 상승(하강)했을 때 자유수면상의 점 P<sub>i</sub> 는 P<sub>i</sub>'로 이동한다. 즉,

$$P_i' = P_i + V' \Delta T \dots\dots\dots(4)$$

가 되며, 시각(t<sub>i</sub> + Δt)에서의 자유수면은 Fig. 1 과 같이 각각의 자유수면상에 있는 절점의 이동 후 vector를 연결한 선으로 표현할 수 있게 된다.

여기서, 식 (4)의 V'는 실제속도로 각 절점에서의 걸보기 투수속도 V와 유효공극을 n<sub>e</sub>로부터 구할 수 있다.

$$V_i' = V_i / n_e \dots\dots\dots(5)$$

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

실험장치는 평행흐름에 의한 제체의 비정상 침투실험을 위하여 중앙에 수로를 두고, 수로 양쪽으로 모형제체를 축조할 수 있도록 하였다.

주요 실험장치로는 유속이나 유량, 그리고 수위상승속도를 통제할 수 있는 주컴퓨터와 수조 저면에는 소수이하 첫째자리까지의 변화량을 측정할 수 있는 7개의 센서로부터 10초 간격으로 읽은 값을 수치화하는 다채널 디지털 압력계 DPI2000로 자동 기록할 수 있는 기록장치와 물을 저장할 수 있는 대형수조로 구성되어 있으며, 제외지의 수위조절을 위하여 수로 끝에 폭 40cm, 길이 50cm의 수문을 달아 수위의 변화에 따른 침윤선의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

본 실험장치의 세부제원은 길이 490cm, 폭 40cm, 높이 60cm의 수로를 중심으로 300cm의 수로를 이용하여 제방모형을 축조하였다. 수로 내의 물의 흐름은 길이 331cm, 폭 180cm의 저수조로부터 지름 20cm 파이프를 통해 순환시켰으며, 모형제체 아래에는 20cm 간격으로 설치한 센서로부터 침윤선의 변화를 0.1mm까지 정밀하게 측정하였고 센서의 보호를 위하여 저면에 두께 2cm의 다공석판을 설치하였다.

사면경사는 아크릴판을 이용하여 수로내에 경사판을 설치하였으며, 수위상승 및 하강속도는 수문의 상승조절로 동일하게 조절할 수 있도록 하였다.

제체를 통과한 유출량은 제체하부 선단부에서 30cm 거리에 다공판을 통과하여 유출된 양을 메스실린더를 사용하여 2분마다 측정하였다.

한편, 모형은 기존 제체와 증축부 재료인 사질토를 이용하여, 투수층을 10cm로 하고 길이 207cm, 높이 33.3cm, 폭 30cm로 제체를 구성하였다. 본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 2와 같다.

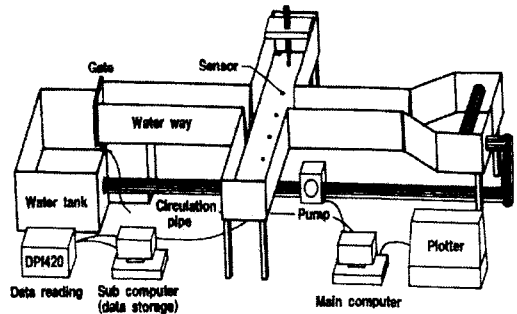


Fig. 2 Schematic sketch of experimental system

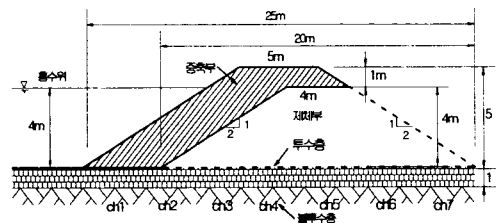


Fig. 3 Modeling embankment section used in experiment (Scale : 1/15)

실험에 사용된 모형제체사면의 개요도는 Fig. 3과 같다.

### 3.2 실험방법

본 대상지역은 삼교천 부근에 있는 증축될 제체를 대상으로 하천인근에서 쉽게 구할 수 있는 증축부 재료의 선정과 제체 상류측을 증축할 경우 제체 안정성에 대한 고려 측면에서, 제체 안정성을 평가하기 위하여 실제 제체크기에 1/15 Scale로 축소한 모형제체를 침투모형실험을 통하여 최근 10년간의 강우자료를 토대로 증축부 재료들과 수위상승(하강)속도 변화에 따른 제체의 안정성을 침윤선과 유출량을 통하여 고찰하고자 한다. Fig. 4는 10년간 월별 강우자료를 나타낸 그림이다.

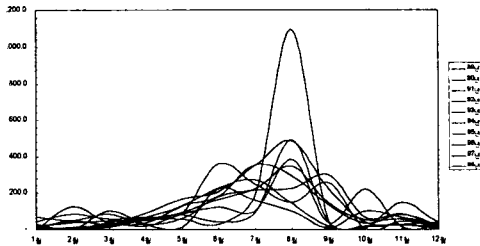


Fig. 4 Rainfall distribution per months (during 10 year)

실험은 수위변동에 따른 침투류의 영향을 분석하기 위하여 제외지 수위를 홍수위인 266mm 까지 상승시켜 홍수시 수위상승에 따른 제체내의 수위변화에 대한 실험을 실시하였으며, 아울러 각 증축재료별 수위강하에 따른 제체내의 수위변화를 측정하여 침투류의 영향을 분석하였다.

투수성 기초지반의 입정을 20번체 통과시료를 사용하여 투수성 지반을 10cm 두께로 조성하고, 그 위에 제체시료를 이용하여 시료가 갖는 최대건조밀도와 최적함수비를 적용하여 제체 다짐도를 90%가 되도록 다짐 다짐을 실시하여 현장 제체의 1/15축척으로 침투모형실험을 위한 제체를 조성하였다.

제체 사면경사는 아크릴 판을 이용하여 1:2.0으로 조성하였으며, 증축부는 하천시료 (SP)시

료와 제방측에 위치한 하천변시료(SM) 및 SP와 SM의 1:1 비율의 혼합토(MIX)를 가지고 기존 제체에 증축재료가 갖는 최적함수비로 다짐도 90%로 조성하여 침투경향을 분석하였다. 제체 및 증축재료가 갖는 입도분포경향은 Fig. 5와 같다.

본 연구에서 수행한 증축재료의 물성치와 침투모형실험의 세부사항은 Table 1과 2와 같다.

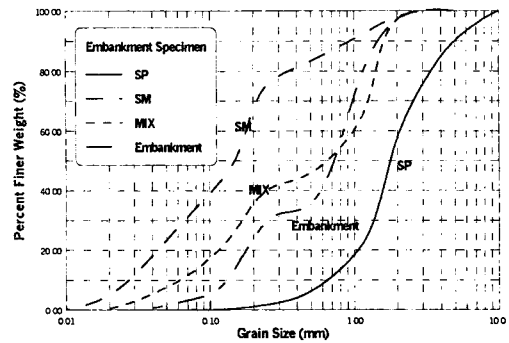


Fig. 5 Particle size curve of embankment

Table 1 Properties of material used in embankment

시료의 특성	하천변시료	혼합토	하천시료
비중( $G_s$ )	2.63	2.64	2.65
관등계수( $C_u$ )	6.92	14.2	1.86
최대건조단위중량 ( $\gamma_{dmax}$ , $g/cm^3$ )	1.581	1.731	1.552
최적함수비 ( $w_{opt}$ , %)	16.5	10.1	2.71
투수계수 ( $k$ , cm/sec)	2.0E-05	1.5E-04	2.3E-03

Table 2 Details of the model tests

Test series	증축부 재료	수위상승·하강속도 (cm/min)	유출량 변화
A	하천변시료 (SM)	0.6, 1.2, 2.4	증축부재료, 수위상승 및 하강속도별
B	혼합토 (1:1)	0.6, 1.2, 2.4	
C	하천시료 (SP)	0.6, 1.2, 2.4	

## 4. 실험결과 및 고찰

4.1 증축부 재료특성에 따른 침윤선의 변화

증축부 재료특성에 따른 제체내 침윤선의 양상을 알기 위하여, 입도분포 및 투수계수가 서로 다른 3가지 증축재료를 사용하여 조성한 제체에 대하여 홍수위까지 수위상승속도를 0.6, 1.2, 2.4cm/min으로 변화시키면서 평행흐름에 의한 증축제체내에서의 침윤선변화를 관찰하였다.

Figs. 6~9는 증축부 재료로서 기존제체 부근에서 채취한 시료(SM,  $K_1=2.0 \times 10^{-5}$ )를 사용하여 수위상승속도 변화에 따른 침윤선의 양상을 유한요소해석 결과와 비교한 것으로, 기존 제체와 증축부의 경계면인 수평거리 800mm~1000mm구간에서 침윤선이 집중되다가, 일정한 시간경과 후에 정상류상태에 도달하고 있음을 볼 수

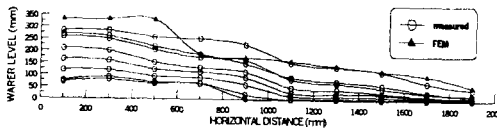


Fig. 6 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=0.6\text{cm/min}$ ,  $K_1=2.0 \times 10^{-5}$ )

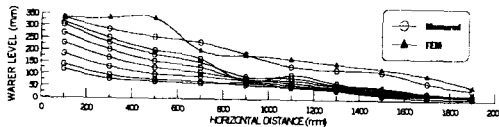


Fig. 7 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=1.2\text{cm/min}$ ,  $K_1=2.0 \times 10^{-5}$ )

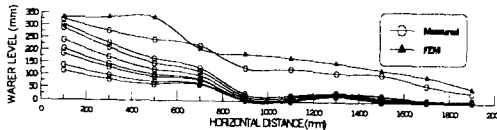


Fig. 8 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=2.4\text{cm/min}$ ,  $K_1=2.0 \times 10^{-5}$ )

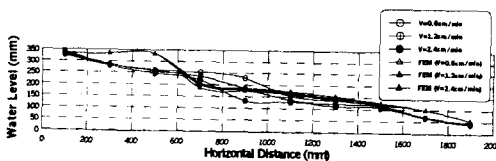


Fig. 9 Seepage line due to rising velocity of water level ( $K_1=2.0 \times 10^{-5}$ )

있다.

유한요소해석에 의한 침윤선의 변화는 500mm~700mm구간에서 급격한 침윤선 변화를 보이며 실험치보다 더 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 실제 평행흐름유속에 의한 침투력이 증축부에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

기존 제체와 증축부 재료의 투수계수의 차이에 의해 경계면에서의 침윤선의 변화양상을 뚜렷이 확인할 수 있었고, 실험치와 해석치도 경계면에서 침윤선의 차이를 보이고 있으나, 하류측으로 갈수록 점차 일치하고 있음을 알 수 있다.

Figs. 10~13은 증축부 재료로서 하천시료와 제체부근의 재료를 혼합한 혼합토(MIX,  $K_2=1.5 \times 10^{-4}$ )인 재료를 사용하여 수위상승속도변화에 따른 침윤선의 양상을 유한요소해석 결과와 비교한 것으로, 기존제체와 증축부의 경계면인 수평거리 700mm~900mm구간에서 침윤선이 집중되다가, 일정시간경과 후에 정상류상태에 도달하고 있음을 볼 수 있다.

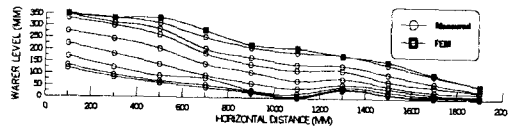


Fig. 10 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=0.6\text{cm/min}$ ,  $K_2=1.5 \times 10^{-4}$ )

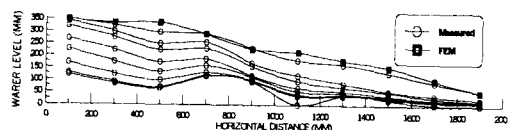


Fig. 11 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=1.2\text{cm/min}$ ,  $K_2=1.5 \times 10^{-4}$ )

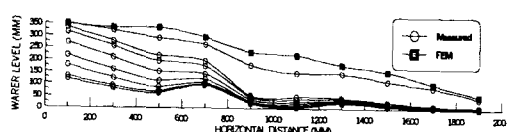


Fig. 12 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=2.4\text{cm/min}$ ,  $K_2=1.5 \times 10^{-4}$ )

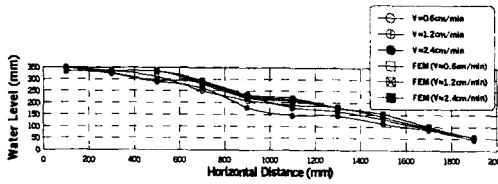


Fig. 13 Seepage line due to rising velocity of water level ( $K_2=1.5 \times 10^{-4}$ )

유한요소해석에 의한 침윤선의 변화는 500 mm~700mm구간에서 급격한 침윤선 변화를 보이며 실험치와 거의 동일한 침윤선 분포를 보이고 있다.

하천변재료(SM)로 증축한 경우 제체 중앙부에 침윤선 변화가 발생하는 반면, 증축부가 혼합토(MIX)인 경우는 수위상승속도 변화에 침윤선 양상이 크게 변동되지 않음을 알 수 있으며, 하류측으로 갈수록 동일한 양상을 보여주고 있다.

Fig. 14~17은 증축부 재료로서 하천시료(SP,  $K_3=2.3 \times 10^{-3}$ )인 재료를 사용하여 수위상승속도 변화에 따른 침윤선의 양상을 유한요소해석 결과와 비교한 것으로, 기존제체와 증축부의 경계면인 수평거리 600mm~800mm구간에서 침윤선이 집중되다가, 일정한 시간경과 후에 정상류 상태에 도달하고 있음을 볼 수 있다.

유한요소해석에 의한 침윤선의 변화는 급격한 침윤선 변화 없이 하류측으로 갈수록 감소함을 보여주고 있다.

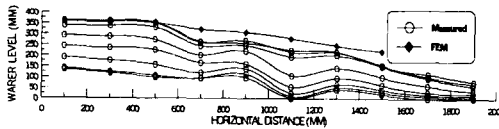


Fig. 14 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=0.6\text{cm/min}$ ,  $K_3=2.3 \times 10^{-3}$ )

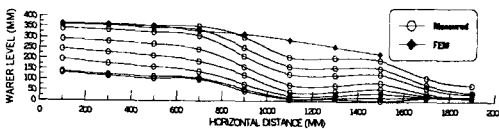


Fig. 15 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=1.2\text{cm/min}$ ,  $K_3=2.3 \times 10^{-3}$ )

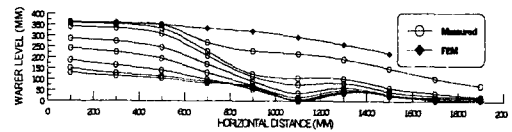


Fig. 16 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=2.4\text{cm/min}$ ,  $K_3=2.3 \times 10^{-3}$ )

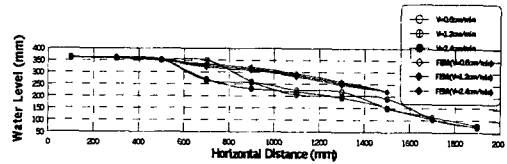


Fig. 17 Seepage line due to rising velocity of water level ( $K_3=2.3 \times 10^{-3}$ )

하천재료(SP)로 증축한 경우는 제체 상부와 하부에 수위상승속도에 따른 침윤선 변화가 발생하고 있음을 알 수 있으며, 유한요소해석 결과에서 알 수 있듯이 증축부의 투수계수가 제체보다 큰 침투력에 의해 하류사면에 유출점이 점점 상승하면서 사면선단에서부터 토립자가 이동하여 선단부터 사면거리 약 23.5cm까지 국부적인 붕괴가 점차로 발생하였고 붕괴깊이는 약 1.5cm, 붕괴각도도 평행흐름에 의해 약  $10^\circ$ 경사, 토립자 이동거리는 약 8cm정도를 보여주고 있다.

#### 4.2 유한요소해석에 의한 침윤선 변화

침윤선 변화를 알아보기 위해 해석에 사용된 유한요소해석법은 Galerkin방법이며, 비정상류 해석 프로그램인 SEEP/W를 사용하였다. 이 프로그램은 흙이나 암과 같은 다공성 재료내에서의 거동과 간극수압소산을 분석하는데 사용되는 것으로 2차원 시간변화를 고려한 포화 및 불포화흐름해석과 정상류 및 비정상류상태를 해석할 수 있는 유한요소해석 프로그램이다.

수치해석을 위한 초기 경계조건은 침투조건으로 상부사면 좌측 수직경계는 무한요소를 사용하였다.

투수계수와 압력수두 사이의 관계는 Ho, P.G. (1979)와 Brunch, P.G.(1993)의 방정식을 사용하였는데, sand와 silty sand에 가까운 재료를 사

용하였다.

Figs. 18~20은 수위상승속도를 0.6cm/min 조건에서 증축부 재료별 침윤선변화를 보여주는 것으로, 증축부 재료의 투수계수  $K_1$ ,  $K_2$ 인 경우는 유출점이 제체하부 선단에 위치함을 보여주며, 투수계수  $K_3$ 인 경우는 기존제체보다 큰 투수계수에 의해 경계부에서 침윤선의 변화 없이 제체하부에 유출점이 상승함을 보여준다.

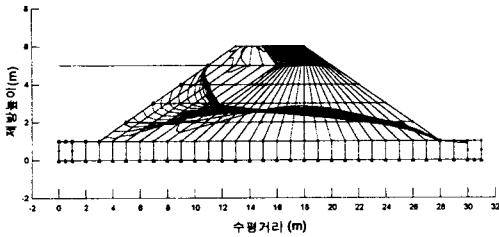


Fig. 18 Seepage line due to rising velocity by FEM ( $K_1 = 2.0 \times 10^{-5}$ ,  $V=0.6\text{cm/min}$ )

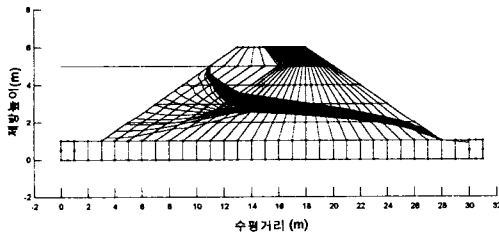


Fig. 19 Seepage line due to rising velocity by FEM ( $K_2 = 1.5 \times 10^{-4}$ ,  $V=0.6\text{cm/min}$ )

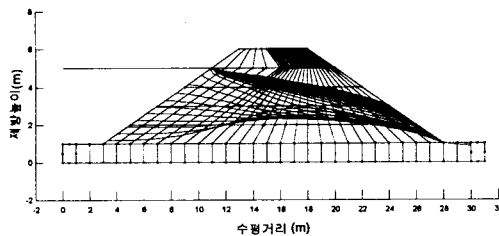


Fig. 20 Seepage line due to rising velocity by FEM ( $K_3 = 2.3 \times 10^{-3}$ ,  $V=0.6\text{cm/min}$ )

### 4.3 수위상승속도에 따른 침윤선의 변화

수위상승속도가 증축제체에 미치는 침윤선의

변화양상을 관찰하기 위하여 수위상승속도를 0.6, 1.2, 2.4cm/min로 변화시켜가며 증축재료별로 침윤선의 변화를 관찰하였다.

Figs. 21~23은 수위상승속도에 대한 침윤선의 양상을 관찰한 것으로 하천번시료(SM)과 하천시료(SP)는 각각 증상부와 상·하부에서 침윤선의 변동이 있음을 보여주는 반면에, 혼합토로 증축된 경우는 수위상승속도에 침윤선 변화가 비교적 안정적인 거동을 보임을 알 수 있다.

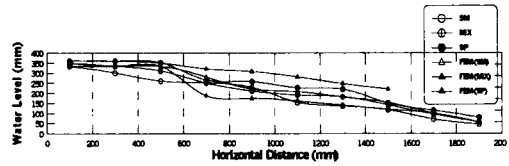


Fig. 21 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=0.6\text{cm/min}$ )

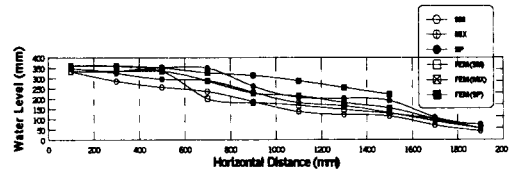


Fig. 22 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=1.2\text{cm/min}$ )

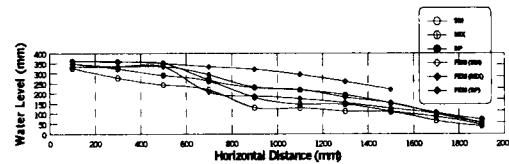


Fig. 23 Seepage line due to rising velocity of water level ( $V=2.4\text{cm/min}$ )

또한, 동일한 수위상승속도에서 제체내 수위 변화는 증축부의 투수계수가 클수록 제체내 침윤선 분포는 완만히 변화함을 알 수 있다.

### 4.4 시간에 따른 유출량의 변화

#### 4.4.1 증축부 재료에 따른 시간-유출량변화

Figs. 24~26은 증축부 재료에 따른 수위상승과 하강시 시간에 따른 유출량 변화를 보여주고

있다. 그림에서 알 수 있듯이 수위상승 속도에 의한 초기 유출량은 수위상승속도가 클수록 증가하고, 경과시간이 40min을 기준으로 SM인 경우는(80, 60, 25cm<sup>3</sup>), MIX인 경우는(200, 70, 50 cm<sup>3</sup>), SP인 경우는(600, 500, 200cm<sup>3</sup>)로 증축재료의 투수계수가 클수록 제체 하부의 유출량이 큼을 알 수 있으며, 그 증가비율도 더 급한 경향을 보여주고 있다.

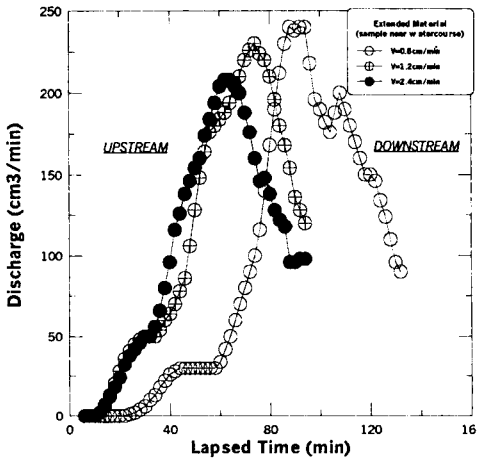


Fig. 24 Runoff discharge due to velocity ( $V=0.6, 1.2, 2.4\text{cm/min}$ ) when an extended material is SM

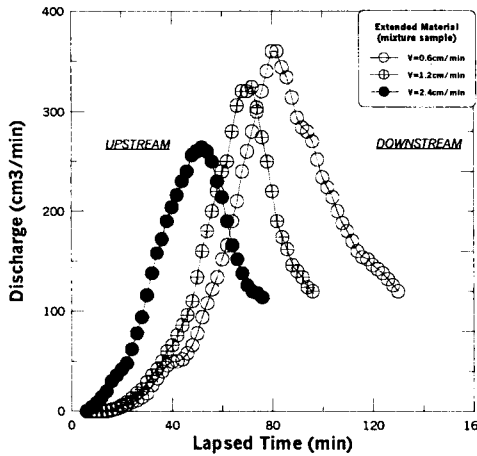


Fig. 25 Runoff discharge due to velocity ( $V=0.6, 1.2, 2.4\text{cm/min}$ ) when an extended material is MIX

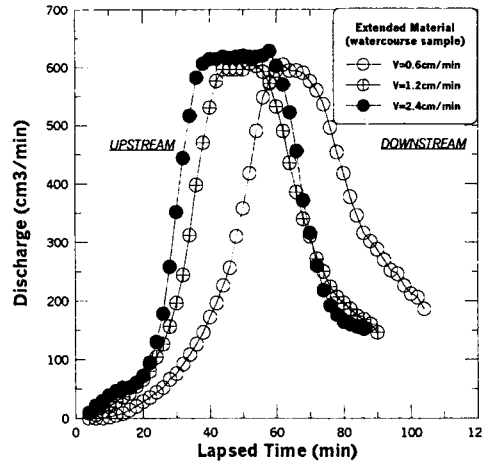


Fig. 26 Runoff discharge due to velocity ( $V=0.6, 1.2, 2.4\text{cm/min}$ ) when an extended material is SP

따라서, 제체 상류측을 증축하는 경우 기존제체보다 투수성이 큰 재료(하천시료: SP)로 증축하는 경우는 침투유량과 침윤선의 관찰로 알 수 있듯이 전반적으로 불안정한 침투거동을 보인다. 상대적으로 증축부가 투수성이 작은 경우는 전반적으로 안정적인 거동을 보이고 있는데, 이것은 상류측이 기존제체보다 투수성이 작은 혼합토로 되어 있어 하류측의 기존제체가 상류측에 대해 필터역할을 하기 때문으로 사료된다.

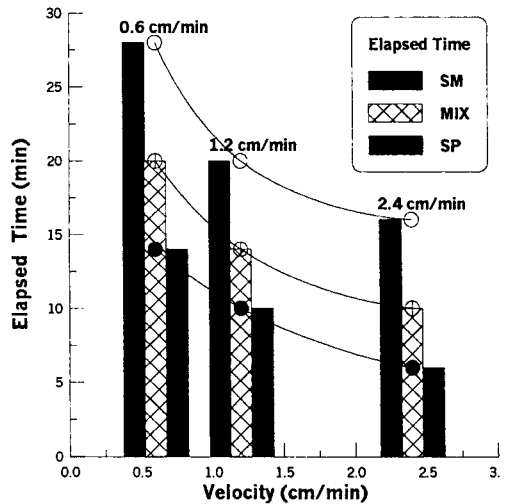


Fig. 27 Elapsed time due to upstream velocity for reaching steady flow



4.4.2 상승속도에 따른 시간-유출량변화

Figs. 27~30은 수위상승속도와 증축부 재료별로 유출량의 변화가 일정한 시점인 정상상태에 도달시간을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 증축부의 투수계수가 클수록, 수위상승속도가 증가할수록 정상상태에 도달시간은 단축되고, 그 총유출량도 증가함을 보여준다.

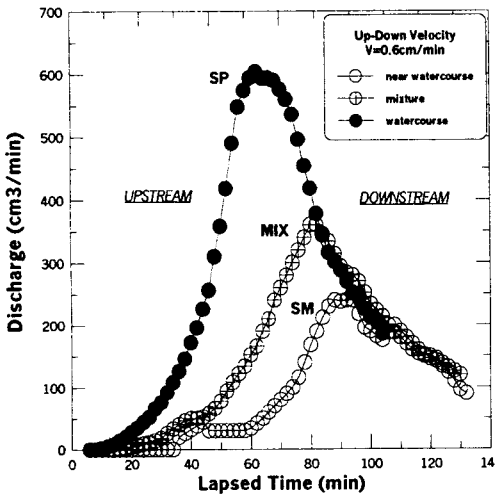


Fig. 28 Runoff discharge of extended materials when up-down velocity is 0.6cm/min

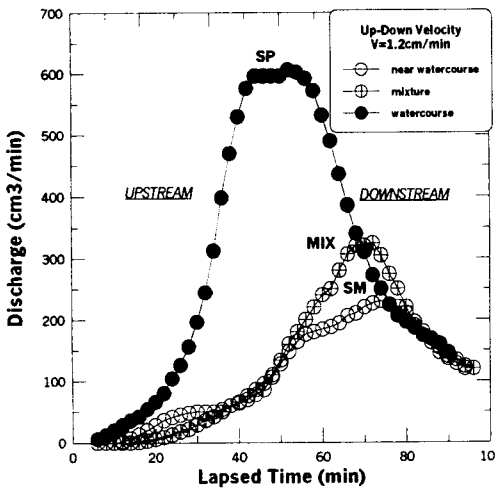


Fig. 29 Runoff discharge of extended materials when up-down velocity is 1.2cm/min

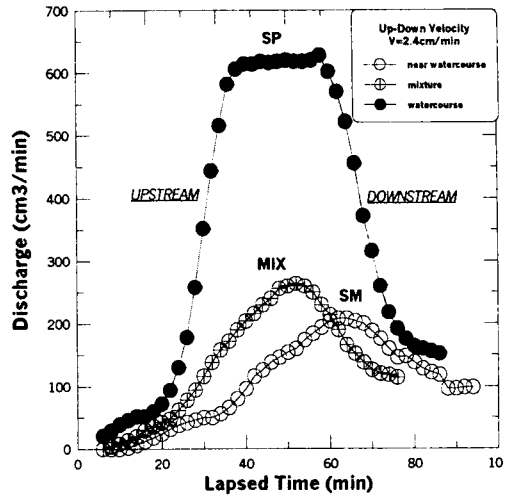


Fig. 30 Runoff discharge of extended materials when up-down velocity is 2.4cm/min

4.5 유한요소해석에 의한 유출량의 변화

Fig. 31~33에서 알 수 있듯이, 수위상승속도에

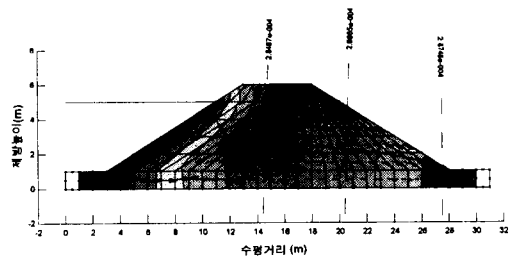


Fig. 31 Discharge by FEM analysis ( $K_1=2.0 \times 10^{-5}$ ,  $V=2.4\text{cm/min}$ )

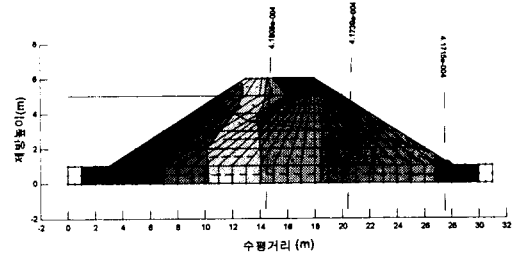


Fig. 32 Discharge by FEM analysis ( $K_2=1.5 \times 10^{-4}$ ,  $V=2.4\text{cm/min}$ )

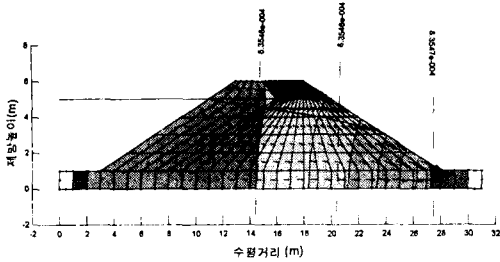


Fig. 33 Discharge by FEM analysis ( $K_3=2.3 \times 10^{-3}$ ,  $V=2.4\text{cm/min}$ )

다른 유출량 변화보다 증축부 투수계수에 의한 유출량 변화가 두드러짐을 알 수 있으며, 수위상승속도  $V=2.4\text{cm/min}$ 으로 동일할 때 증축부 투수계수가  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ 인 경우의 유출량은 각각 2.87, 4.17,  $6.35 \times 10^{-4}\text{m}^3$ 로 증축부 투수계수에 따라 증가함을 보여주고 있다.

### 5. 결 론

제체의 증축부를 투수계수가 서로 다른 하천 인접시료로서 조성하고, 홍수시 발생 가능한 수위상승속도를 0.6, 1.2, 2.4cm/min로 변화시켜 가며 침윤선과 유출량의 변화양상을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 수위상승속도가 증가함에 따라 하천변시료 (SM)는 중앙부에서, 하천시료(SP)는 상부와 하부에서 각각 침윤선 변화가 큰 반면, 혼합토(MIX)인 경우는 균일한 안정적인 거동을 보임을 알 수 있었다.
- 2) 유한요소해석에 의한 제체의 침윤선 변화는 증축부의 경계면에서 실험치보다 더 뚜렷한 변화양상을 보이는데, 이것은 실제 평행흐름 유속이 수위상승속도보다 더 큰 영향을 주고 있음을 보여준다.
- 3) 증축부를 하천시료를 사용하는 경우 즉, 기존 제체에 비해 투수성이 큰 재료로 증축하는 경우는 제체하부에 유출점의 상승으로 불안정한 침투거동을 보이며, 다른 증축재료에 비해 큰 침투력을 갖기 때문에 초기 침투거리가 길고, 제체하부의 국부적인 붕괴로 이어짐을 알 수 있다.
- 4) 증축부의 투수계수가 기존제체보다 작은 경

우는 유출점이 제체하부 선단에 위치함을 보여주며, 상대적으로 안정적인 거동을 보이는 데, 이것은 상류층이 기존제체보다 투수성이 작아 기존제체가 상류층에 대해 필터역할을 하기 때문으로 사료된다.

- 5) 수위상승시 초기유출량은 경과시간 40min을 기준으로 증축부의 투수계수와 수위상승속도가 클수록 유출량이 많고 정상류상태 도달시간도 빠르며, 투수성 지반위에 축조된 제체이므로 수위상승시 투수지반을 따라 이동한 침투수가 제체내로 유입되기 때문에 제체내의 수위상승은 빠르게 발생하고 있음을 보여주고 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) 신방용, “제체의 평행흐름에 대한 비정상침투의 연구”, 大韓土木學會論文集, 제8권, 제3호, pp. 101~110, 1988.
- 2) 신방용, 이봉직, “이형제체의 침투에 관한 연구”, 大韓土木學會論文集, 제11권, 제1호, pp. 135~144, 1991.
- 3) 김재홍, “유클립스벽형에 따른 침투현상에 관한 실험적 연구”, 박사학위논문, 한양대학교, 1985.
- 4) Casagrand, A. “Seepage through Dams”, New England Water Works Association, Vol. 1, No. 2, pp. 131~170, 1976.
- 5) Childs, E.C. and Collis-George, N., The Permeability of Porous Materials. Proceedings of the Royal Society, pp. 392~405, 1950.
- 6) J.L. Sherard, R.J. Woodward, S.F. Gizenski, W.A. Clevenger. Earth and Earth-Rock Dams. John Wiley & Sons, Inc. 1963.
- 7) J. Takemura, T. Kimura and A. Hiro-oka, “Failure of embankments due to seepage flows and its countermeasure”, Centrifuge 94, Balkema co., pp. 575~580, 1994.
- 8) P. Novak and J. Cabelka. Models in Hydraulic Engineering physical Principles and Design Applications. Pitman, 1981.