

이형제체의 침투에 관한 연구

A Study of Seepage in Earth Structure of Zone Types

申 芳 雄* · 李 鳳 職**
Shin, Bang Woong · Lee, Bong Jik

Abstract

The phreatic surface in earth embankment of zone types are investigated in this thesis. Also the shape of phreatic surface are analyzed according to rising velocity and slope angle. In order to verify the validity of experimental results, the results are compared with theoretical result.

From this comparison, the shape of phreatic surface in multi-layer is predicted by heat transfer equation.

요 지

본 논문에서는 투수계수가 서로 다른 재료로 축조된 구조물내의 침투현상에 대하여 고찰하였으며, 또한 사면경사가 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5인 3가지 경우에 대하여 각 모형별로 수위 및 수위상승속도를 변화시켜 가면서 이에 따른 침윤선의 변화 상태도 함께 고찰하였다.

그리고 이 같은 모형실험결과를 양적차분근사해에 초기조건과 경계조건을 부여하여 구한 수치해와 비교, 분석하였다.

1. 서 론

자연상태의 흙은 대부분 이방성(anisotropy)을 갖고 있으며 흙속의 이방성 흐름은 침투량의 계산⁽¹⁾, 체적변화에 의한 침하량의 측정, 옹벽이나 사면에 작용하는 공극수압등⁽²⁾ 매우 중요한 문제이다.

일반적으로 Fill Dam⁽⁷⁾이나 Rock Fill Dam 및 제방등과 같은 토공구조물은 제체를 구성하는 재료가 다르므로 이에 따라 투수계수가 달라진다. 이처

럼 투수계수가 달라짐으로써 이에 따른 Seepage Line의 형상과 사면안정에 대한 상태를 해석하는데는 기존의 균질제체와는 다른 여러인자가 고려되어야 할 것이다.

따라서 수위의 변화에 따른 Seepage Line⁽⁴⁾의 형상에 따라 활동면의 내부절편에 작용하는 힘의 크기, 위치, 방향등 사면의 안정성에 영향을 주는 인자들을 분석할 필요가 있다.

*正會員 · 忠北大學校 工科大學 土木工學科 教授

**正會員 · 忠北大學校 大學院 土木工學科 博士課程

또한 Seepage Line과 사면의 안정성을 고찰하기 위해서는 투수계수가 다른 각 재료간 경계층의 수, 침투의 특징, 침투수가 제체를 통과할 때 발생하는 Seepage Force^(8, 9) 등과 같은 인자를 고려하여야 한다.

따라서 본 연구는 댐, 저수지 같은 토공구조물에 있어서 집중호우등으로 인해 급격한 수위변화⁽¹⁰⁾가 발생되었을때 투수계수가 서로 다른 토공재료로 축조한 제체의 안정성 증대를 위하여 구조물의 침투현상을 모형실험을 통하여 분석하였다.

또한 본 연구에서는 투수계수가 서로 다른 재료로 축조된 구조물내의 침투현상을 수위의 상승속도와 모형별로 비교함으로써 이형체체의 침투특성을 규명하였으며 아울러 수위변화에 따른 침투현상의 모형실험결과를 computer를 이용한 수치해와 비교하였다.

2. 침투이론식

침투현상을 나타내는 포물형 편미분방정식⁽⁶⁾은 다음과 같이 해석할 수 있다.

$$\frac{\partial h(x, t)}{\alpha} = \frac{k}{n} \left(\frac{\partial^2 h(x, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h(x, t)}{2\alpha x^2} \right) \quad (1)$$

식(1)에서 $\frac{\partial^2 h(x, t)}{2\alpha x^2}$ 항은 침윤선이 비교적 완만하다면, 무시될 수 있으므로 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial h(x, t)}{\alpha} = \frac{k}{n} \left(\frac{\partial^2 h(x, t)}{\partial x^2} \right) \quad a < x < b \quad t > 0 \quad (2)$$

여기서, 미지함수 $h(x, t)$ 는 경계조건과 초기조건

$$h(a, t) = h(b, t) = 0 \quad (3)$$

를 만족한다.

$$h(x, 0) = f(x) \quad a \leq x \leq b \quad (4)$$

식(2)의 유한차분해법은 1)양적차분 근사식 2) 음적차분 근사식 3) Crank-Nicolson의 차분근사식이 있는데 본 해석에서는 양적차분근사식으로 전개하여 결과를 얻었다.

식(4.2)에 대한 차분 근사식을 유도하기 위하여 공간좌표 x 및 시간좌표 t 에 대한 교차점 (x, t) 의 좌표를

$$x_r = a + rd, \quad r=0, 1, 2, \dots, R$$

$$t_s = s \cdot d, \quad g=0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

라 놓고, 여기서 $d_x = (b-a)/R$ 이고, d_t 는 t 축상의 구간폭을 나타낸다.

*양적차분 근사해법
식(2)는 교차점 (x_r, t_s) 에서는

$$\frac{\partial h(x_r, t_s)}{\alpha} = \frac{k}{n} \left(\frac{\partial^2 h(x_r, t_s)}{\partial x^2} \right) \quad (6)$$

이다. 이 식에는 두개의 편미분이

$$\frac{\partial h(x_r, t_s)}{\alpha} = \frac{\partial h(x, t)}{\alpha X} \Big|_{\substack{x=x_r \\ t=t_s}} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 h(x_r, t_s)}{\alpha x^2} = \frac{\partial^2 h(x, t_s)}{\alpha x^2} \Big|_{\substack{x=x_r \\ t=t_s}} \quad (8)$$

포함되어 있는데, 이들은 다음과 같은 차분연산자를 써서 나타낼 수 있다. 먼저 $\partial h(x_r, t_s)/\alpha$ 를 생각하면 이 편미분에서는 x 가 고정되어 있다. 그러므로 x 를 상수와 같이 취급할 수 있으며, 이에 따라

$$\frac{\partial h(x_r, t_s)}{\alpha} = \frac{\Delta_t h(x, t)}{\alpha} \Big|_{\substack{x=x_r \\ t=t_s}} \quad (9)$$

$$= \frac{h(x_r, t_{s+1}) - h(x_r, t_s)}{d_t} + O(h) \quad (10)$$

로 근사할 수 있다. 단, 식(10)에서 Δ_t 의 첨자 t 는 시간좌표 t 에 대한 전향차분을 취한다는 것을 나타낸다.

그리고 2계 편미분 $\partial^2 h(x_r, t_s)/\alpha x^2$ 는 $O(hx^2)$ 의 절단오차 범위내에서 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\frac{\partial^2 h(x_r, t_s)}{\alpha x^2} = \frac{\delta_x^2 h(x, t)}{\alpha x^2} \Big|_{\substack{x=x_r \\ t=t_s}} + O(hx^2) \quad (11)$$

$$= \frac{h(x_{r+1}, t_s) - 2h(x_r, t_s) + h(x_{r-1}, t_s))}{d_x^2} + O(hx^2)$$

이상의 편미분들을 결합하면 식(6)의 포물선형 방정식은

$$\frac{h(x_{r+1}, t_s) - h(x_r, t_s)}{d_t} = \frac{k}{n} \cdot \frac{h(x_{r+1}, t_s) - 2h(x_r, t_s) + h(x_{r-1}, t_s))}{d_x^2} + O(h) + O(h_x^2) \quad (12)$$

이 되며, 이 식은 $O(h) + O(h_x^2)$ 의 절단오차를 무시하면

$$\frac{W_{s+1} - W_s}{dt} = \frac{k}{n} \frac{W_{r+1s} - 2W_{rs} + W_{r-1s}}{d_x^2} \quad (13)$$

의 차분방정식으로 근사된다. 단 W_s 는 $W_s \cong h_s$ 즉 $h(x_r, t_s)$ 의 근사를 나타낸다. 식(13)은 식(6)의 근사로 $O(h) + O(h_x^2)$ 의 절단오차를 갖는다.

그리고 이 식을 다시 정리하면

$$W_{s+1} = (1 - 2\beta)W_s + \beta(W_{r+1} + W_{r-1}) \quad (14)$$

$$\text{단, } \beta = \frac{K_1 h_1}{d_x^2} \quad (15)$$

이 된다.

그리고 이들 연립방정식은 벡터

$$W_s = (W_{1s}, W_{2s}, \dots, W_{R-1s})^T \quad (16)$$

식(14)를 행렬형으로 나타내면 식(16)이 된다.

$$W_{s+1} = AW_s; s=0, 1, 2, \dots \quad (17)$$

단,

$$A = \begin{pmatrix} (1-2\beta) & \beta & 0 & \dots & 0 \\ \beta & (1-2\beta) & \beta & & \\ 0 & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ 0 & \dots & 0 & \beta & (1-2\beta) \end{pmatrix} \quad (18)$$

*전산 Program

본 이형제체의 침투문제에 이용되는 프로그램은 본 프로그램과 3개의 부 프로그램으로 구성되며 침투류기본방정식에 대한 차분근사해^②는 식(14)로 유도된다.

이 해를 이용하여 각각의 특성을 상호 연결한 알고리즘은 다음과 같다.

침투류기본방정식에 대한 양적차분근사해법의 계산에 있어서 $h(x, t)$ 는 다음 조건을 만족해야 한다.

경계조건

$$h(SB, TT) = h(BB, TT) = 0 \quad 0 < t < T$$

$$(SB=0, BB=115, 150, 185)$$

초기조건

$$h(AA, 0) = f(AA) = 0 \quad SA < AA < BB$$

이상의 초기조건과 경계조건을 이용한 프로그램의 흐름도는 부록에 게재되어 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 연구에 이용된 실험장치는 길이 200cm×폭 30cm×높이 70cm이고 두께 3mm의 강재수조로 제체내부의 침윤선의 변화를 관찰하기 위하여 Stand Pipe를 설치함으로써 수위의 변화에 따른 제체내의 수두변화를 관찰할 수 있도록 하였다.

또한 수조전면에는 1cm격자간격으로 실크프린팅 한 아크릴판을 설치하여 각 경계점에서의 수위를 관찰할 수 있게 하였다. 제체내부에서는 경계층을 구별하기 위하여 가로 30cm×세로 45cm, 가로 30cm×60cm의 강재틀을 각각 2개씩 제작하여 #30, #20망을 부착하여 내부의 각 경계층에 설치하였으며 하단부에는 수위 조절 및 유출량의 측정을 위하여 급·배수관을 설치하였다. 제체의 축조형태 및 모델은 다음과 같다.

3.2 실험방법

본 연구에 이용된 시료는 투수계수가 $K_1=6.2 \times 10^{-1}$, $K_2=4.6 \times 10^{-1}$, $K_3=9.4 \times 10^{-2}$ (Cm/sec)의 3가지로써 실험에 사용한 제체의 형태는 제체높이 35cm,

표 1. Experimental Conditions

Slope (1:m)	B1 (cm)	B2 (cm)	H1 (cm)	Model
m = 1.5	10	115	35	
m = 2.0	10	150	35	
m = 2.5	10	185	35	

표 2. Relationship between the water Level and the Rising Time

Slop 1 : m	Rising Water Level	Rising Time(sec)	
		1'20"	2'40"
1.5	15	33"	59"
	20	46"	1'29"
	25	1'30"	2'01"
	30	1'20"	2'37"
2.0	15	24"	53"
	20	39"	1'22"
	25	55"	1'56"
	30	1'14"	2'33"
2.5	15	29"	55"
	20	46"	1'27"
	25	1'07"	2'03"
	30	1'29"	2'44"

상부폭을 10cm로 하였고 제체경사는 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5로 하였다.

각 사면경사에 대하여는 수위 상승시에는 제체저면의 불투수층으로 부터 수위가 15cm, 20cm, 25cm, 30cm일때 각 경사별 침윤선의 변화를 고찰하였으며, 또한 각 수위상승시간을 달리하여 상승시간의 변화에 따른 침윤선의 변화를 고찰하였다.

각 사면경사에 대한 V_w 시간은 표2와 같다.

4. 실험결과

실험결과는 상류측 수위를 각 모형별로 15cm, 20cm, 25cm, 30cm까지 상승할때 수위상승속도(V_w)을 변화시켜 가면서 각 경계층($K_1-K_2-K_3-K_2-K_1$)에서의 침윤선의 위치를 찾아내고 이의 결과를 이론해와 비교하였다.

사면경사별, 수위상승속도에 대한 침윤선의 위치는 다음과 같다.

사면경사 1:1.5인 경우 수위 상승속도가 0.37cm/sec일때 수평거리 40cm에서 수위가 15cm, 20cm, 25cm일때의 침윤선 높이는 각각 3.4cm, 9.3cm, 17.9cm로 나타났다.

또한 상승속도가 0.19cm/sec일때는 4.2cm, 11.5cm, 19.4cm로 상승속도가 빠를 수록 침윤선의 위치가 낮게 형성됨을 알수 있었다.

아울러 이의 결과를 Steady상태의 침윤선 위치 4.8cm, 11.7cm, 19.9cm와 비교하면 사면경사 1:1.5에서는 수위 상승속도가 0.19cm/sec일때와 거의 유사하게 침윤선이 형성됨을 알수 있었다.

사면경사가 1:2.0일때 수위 상승속도가 0.41cm/sec, 수평거리 50cm에서 수위가 15cm, 20cm일때의 침윤선 높이는 각각 1.8cm, 8.1cm이며, 상승속도가 0.20cm/sec일때는 3.0cm, 10.5cm로 사면경사 1:1.5와 같은 경향을 나타냄을 알 수 있다.

또한 사면경사 1:2.5에서는 수위 상승속도가 0.34cm/sec일때 수평거리 60cm에서는 수위 15cm, 20cm에서의 침윤선의 높이는 각각 0.6cm, 5.8cm이며, 상승속도 0.18cm/sec에서는 2.4cm, 8.0cm로 나타났다.

각 사면경사별, 상승시간별 침윤선의 높이는 표 3과 같다.

표 3. Testing Results(up)

(1:1.5)

Model	h(cm)	Vup (sec)	x							
			30	40	50	60	70	80	90	100
1:1.5	15.00	1'20"	7.2	3.4	1.2	0				
		2'40"	8.1	4.2	2.1	0.3				
		steady	9.8	4.8	1.8	0.5				
	20.00	1'20"		9.3	5.2	1.5				
		2'40"		11.5	7.8	4.0				
		steady		11.6	6.5	2.5	0.7			
	25.00	1'20"		17.9	10.6	5.4	1.3			
		2'40"		19.4	13.3	7.9	2.5			
		steady		19.9	12.3	5.5	1.9			
	30.00	1'20"			14.4	9.6	4.9	1.2	0	
		2'40"			19.5	12.3	6.2	2.4	1.3	
		steady			21.1	14.5	4.5	1.4	0.3	

(1 : 20)

Model	h(cm)	Vup (sec)	x									
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	
1 : 2.0	15.00	1'20"		5.7	1.8	0.0						
		2'40"		7.1	3.0	0.7						
		steady		8.8	4.1	1.5	0.4					
	20.00	1'20"			8.1	3.6	1.2	0.0				
		2'40"			10.5	5.4	2.2	0.6				
		steady			11.7	5.5	2.0	0.6	0.1			
	25.00	1'20"				9.9	4.2	2.4	0.7			
		2'40"				12.3	5.4	2.7	1.0			
		steady				14.7	6.9	2.5	0.7	0.2		
	30.00	1'20"					9.0	4.0	1.4	0.0		
		2'40"					12.6	7.1	3.4	1.2		
		steady										

(1 : 2.5)

Model	h(cm)	Vup (sec)	x										
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
1 : 2.5	15.00	1'20"		12.1	2.7	0.6	0						
		2'40"		12.8	6.0	2.4	0.8						
		steady		13.9	7.8	3.5	1.2	0.3					
	20.00	1'20"				5.8	2.2	0.4					
		2'40"				8.0	4.8	1.7					
		steady				11.7	5.5	1.9	0.6				
	25.00	1'20"					8.4	4.2	1.0	0			
		2'40"					11.3	6.7	2.7	0.2			
		steady					16.4	8.2	3.1	0.9	0.2		
	30.00	1'20"						15.3	7.2	2.7	0.2		
		2'40"						17.1	8.4	3.6	0.7		
		steady						22.0	11.3	4.5	1.4	0.3	

5. 분석 및 고찰

5.1 상승속도(V_u) 및 사면변화에 따른 침윤선

본 실험에서 사용한 모형은 사면경사(m)가 1 : 1, 5, 1 : 2.0, 1 : 2.5인 경우로 수위상승시 제체저면의 불투수층으로 부터 수위가 15cm, 20cm, 25cm, 30cm까지 도달했을때 각 경사별 침윤선의 변화를 고찰하였다.

사면의 변화에 따른 침윤선의 변화를 고찰하기

위하여 $h=15\text{cm}$ 인 경우와 30cm 인 경우에 대하여 실험결과를 분석하여 보면 다음과 같다.

각 모형별 $h=15\text{cm}$, $x=50\text{cm}$ 에서의 침윤선의 높이는 $m=1.5$ 일때는 1.2cm, 2.1cm, $m=2.0$ 일때는 1.8cm, 3.0cm, 1 : 2.5에서는 2.7cm, 6.0cm로 나타났다. $h=30\text{cm}$, $x=80\text{cm}$ 에서의 침윤선의 높이는 $m=1.5$ 의 경우 1.2cm, 2.4cm, 1 : 2.0일때는 4.0cm, 7.1cm, 1 : 2.5에서는 15.3cm, 17.1cm이다. 이는 사면경사가 1 : 1.5에서 1 : 2.5로 완만해질수록 침윤선이 높게

형성되는 것을 알 수 있다.

또한 사면경사가 1:1.5에서는 $V_{up}=0.19\text{cm/sec}$, $V_{up}=0.37\text{cm/sec}$ 로 하였고, 1:2.0에서는 $V_{up}=2.0\text{cm/sec}$, $V_{up}=0.41\text{cm/sec}$, 1:2.5에서는 $V_{up}=0.18\text{cm/sec}$, $V_{up}=0.34\text{cm/sec}$ 로 수위상승속도를 변화시켜 가면서 수위상승속도(V_{up})의 변화에 따른 침윤선의 변화도 함께 고찰하였다.

그 결과는 실험결과에 나타난 바와 같이 V_{up} 이 빠를수록 침윤선의 위치가 낮게 형성됨을 알 수 있으며 이는 차이는 그림 1, 2와 같다.

그림 1, 2는 각 사면경사별 상승수위 15cm와 30cm에서의 침윤선의 위치와 steady상태의 침윤선의 위치를 도시한 것으로 $h=15\text{cm}$ 일때는 $m=1.5$ 에서는 $x=30\text{cm}$, $m=2.0$ 에서는 $x=40\text{cm}$, $m=2.5$ 에서는 $x=50\text{cm}$ 에서 V_{up} 에 따른 침윤선의 변화가 가장 크게 발생함을 알 수 있다(그림 1).

또한 $h=30\text{cm}$ 에서는 $m=1.5$ 일때 $x=60\text{cm}$, $m=2.0$ 에서는 $x=70\text{cm}$, $m=2.5$ 에서는 $x=80\text{cm}$ 에서 침윤선의 변화가 V_{up} 의 변화에 가장 큰 영향을 받는다(그림 2).

5.2 경계층에서의 침윤선 해석

침투가 일어나는 흙의 영역이 균질하지 않고 두 종류 이상의 이질적인 흙으로 구성되어 있는 경우, 침투의 방향은 두 흙의 경계면과 평행하거나 수직하지 않으면 경계면을 지나면서 침투의 방향에 변화가 생긴다.

따라서 투수계수가 K_1 에서 K_2 , K_3 로 변화함에 따라서 사면경사 1:1.5에서 수위 25cm인 경우를 보면 $x=40\text{cm}$ 와 $x=50\text{cm}$ 에서 침윤선의 높이가 17.9cm에서 10.6cm로 떨어졌으며, 1:2.0에서는 수위 20cm인 경우 $x=50\text{cm}$ 와 60cm에서 8.1cm에서 3.6cm로 변화하였다.

사면경사 1:2.5인 경우도 마찬가지로 수위가 15cm일때 $x=40\text{cm}$ 와 $x=50\text{cm}$ 에서 침윤선은 12.1cm에서 2.7cm로 침윤선의 높이가 급격히 변화하였다.

또한 각 경계층에서 유입점(V_m)과 유출점(V_{out})의 수위차를 비교하면 $h=15\text{cm}$ 일때 $m=1.5$ 에서는 K_1 층에서는 9.0cm, K_2 층에서는 6.0cm이며, $m=2.0$ 에서는 K_1 층에서 10.6cm, K_2 층에서 4.2cm, $m=2.5$ 일때는 K_1 층은 11.8cm, K_2 층은 3.3cm의 차이가 발생했다.

따라서 사면경사가 완만해질수록 K_1 층에서는 V_m

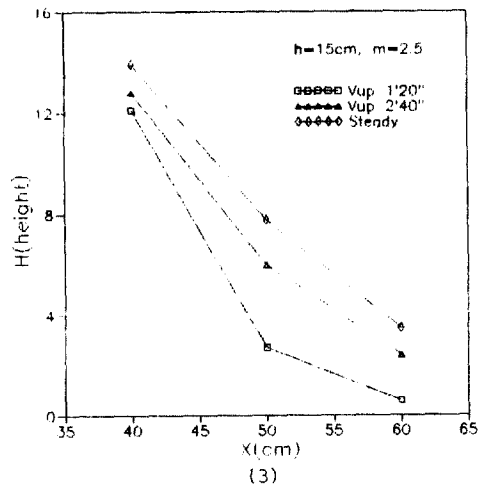
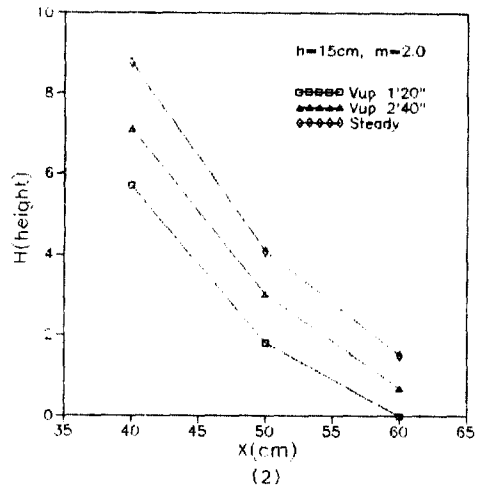
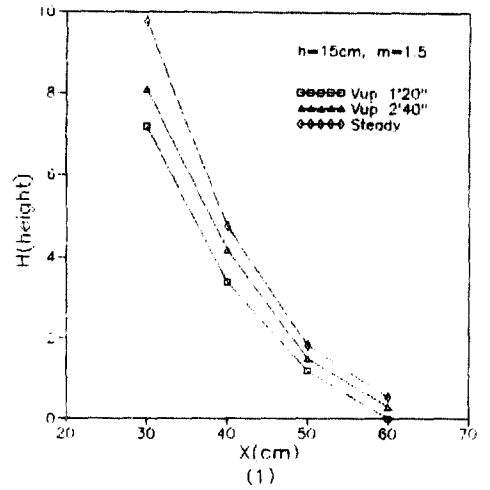


그림 1. Relationship between Rising Velocity and Steady ($h=15\text{cm}$)

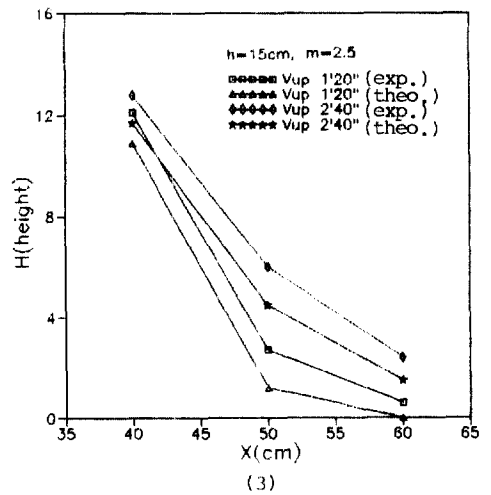
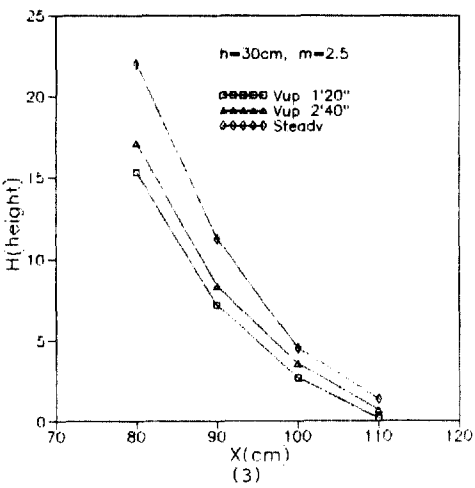
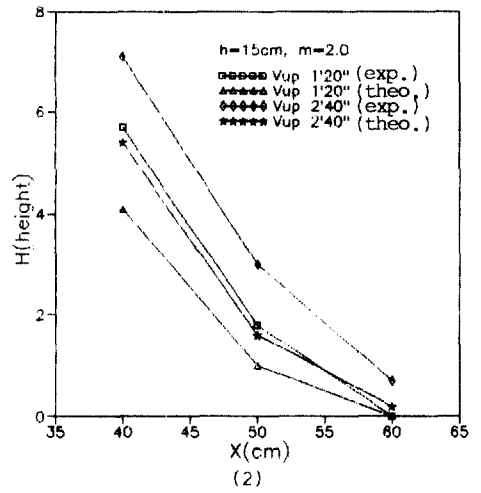
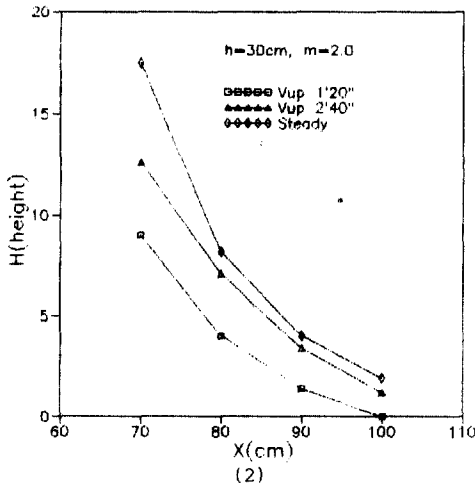
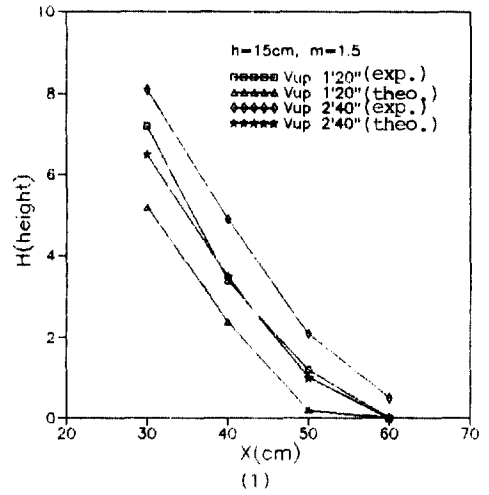
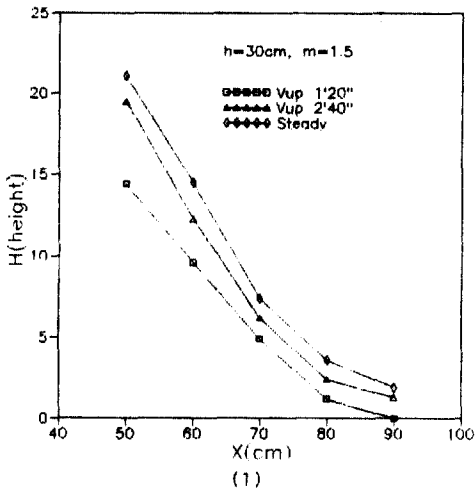


그림 2. Relationship between Rising Velocity and Steady (h=30cm)

그림 3. Comparisons of Experimental Result and Computed Result(h=15cm)

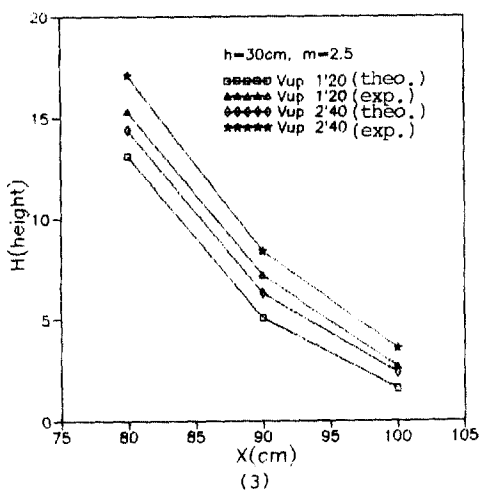
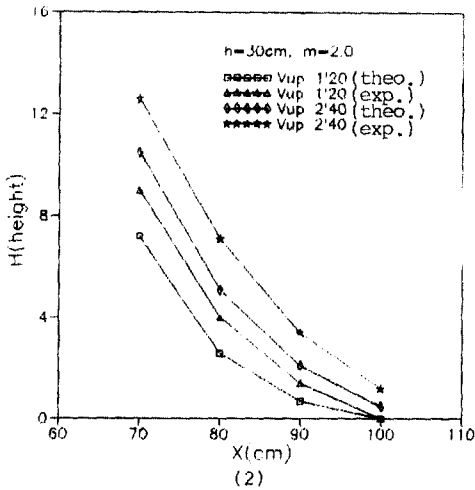
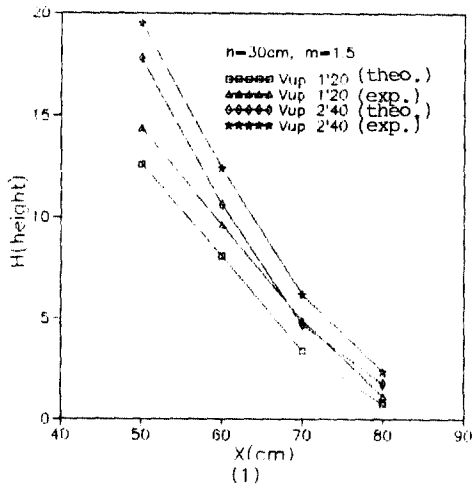


그림 4. Comparisons of Experimental Result and Computed Result($h=30\text{cm}$)

과 V_{ur} 의 차가 증가하나, K_2 층에서는 두점의 차가 완만해짐을 알 수 있다.

상류측 수위가 30cm일때는 사면경사가 완만해짐에 따라 K_1 , K_2 , K_3 층에서는 V_n 과 V_{ur} 의 차가 증가하나 K_3 층에서 K_2 층으로 침투가 발생할 때는 두점의 차가 감소함을 알 수 있다.

5.3 수치해와 실험결과와의 비교

본 이형체체의 침투에 대한 이론해와 실험결과와의 비교는 각 사면경사에 따라 수위가 15cm와 30cm경우에 대하여 비교하였다.

그 결과는 그림 3, 4에 도시되어 있는 바와 같이 이론해가 실험결과 보다 약간 낮은 값을 나타내며, 또한 사면경사가 완만해질수록 투수계수의 변화에 의한 침윤선의 변화가 뚜렷이 나타남을 알 수 있다.

본 이론해와 실험결과는 수위가 높고 사면경사가 완만할수록 잘 일치함을 알 수 있다.

6. 결론

1) 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 본 Computer Program을 이용하여 해석된 이론해는 수위가 높을수록, 사면경사가 완만할수록 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.
- 2) 상류측(Upstream)의 수위가 증가함에 따라 K_1 층에선 V_n 과 V_{ur} 의 차가 감소하나 K_2 , K_3 층에서는 두점의 차가 증가함을 알 수 있다. 따라서 수위가 높을수록 경계층의 영향을 많이 받음을 알 수 있다.
- 3) 수위상승속도(V_{up})에 따른 침윤선의 변화는 사면경사 1:1.5인 경우에는 $h=25\text{cm}$, $x=50\text{cm}$, 1:2.0에서는 $h=25\text{cm}$, $x=60\text{cm}$, 1:2.5에서는 $h=25\text{cm}$, $x=70\text{cm}$ 에서 가장 크게 나타났다.
- 4) 이형체체의 침투해석은 양적차분근사해에 초기조건과 경계조건을 부여함으로써 본 연구의 Computer Program을 이용하여 침윤선형상의 변화를 예측할 수 있다.

감사의 글

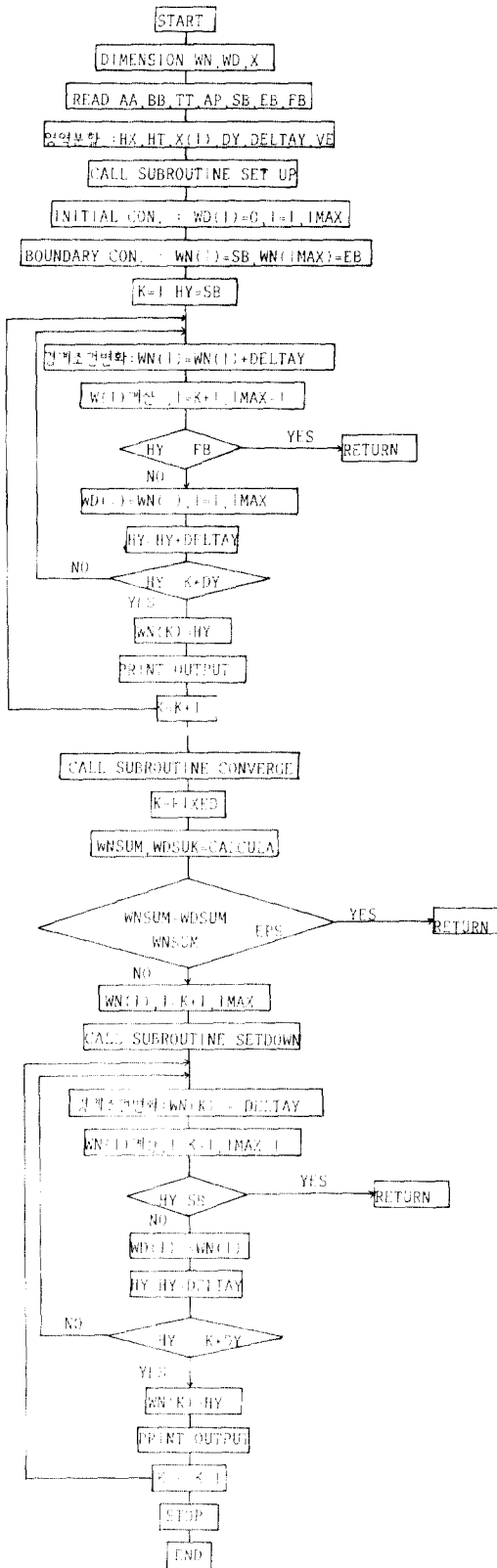
본 연구는 한국과학재단 연구비지원에 의해 수행하였으며, 본 연구를 할 수 있도록 지원하여 준

한국과학재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. W.G.yeh, "Nonsteady flow to surface reservoir", *J. Hydraulics Div.*, Proc.ASCE, 96, No. HY3, 609-618. 1970.
2. R.E.Kidder, "Unsteady flow of gas through a semi-infinite porous medium", *J.of Appl. Mech.*, Trans. ASME, 24, 329-332, 1957.
3. Carslaw, H.H., and jaeger, J.C., "*Conduction of Heat in Solids*" Second Edition, Oxford University Press, 1959.
4. Polubarinova-Kochina, p.Ya, "*Theory of Groundwater Movement*", translated from the Russian by J.M.Roger Dewiest, Princeton, 1962. Chapter XIII, p.497 on "Nonlinear Equations of Unsteady Flows with a free surface".
5. Moody, W.T., discussion of "Unsteady Flow of Groundwater into a surface reservoir", by William haushild and gordon Kruse, *transaction. ASCE, Vol.127, Part I*, pp.417-421, 1962.
6. Hildebrand, francis B., "*Introduction to Numerical Analysis*", McGraw-Hill Book Co., New York, 1956.
7. Harr, M.E. *Groundwater and Seepage*, McGraw-Hill book Company Inc., New York, pp. 208, pp. 94, 1966.
8. Cedergren, H.R. *Seepage Control in Earth Dams*, John Wiley & Sons, Inc, New York, pp. 21-45, 1973.
9. Casagrande A., (1976) "Seepage through Dams", New English Water Works Association, Vol.LI., No.2, pp.131-170.
10. Ehlers, K.D., (1970) "Calculation of Non-steady Ground and Seepage Water flow With Free Surface by the Method of Finite Elements", *Wasserwirtschaft, Stuttgarts*, Vol.63, No.2, pp.35-38.
11. Wittke, W., (1970) "Methods of Calculation of Three-dimensional Problems of Percolation of Fissured Rock by Finite Element and Resistance Networks", *2nd Congress of the International Society of Rock Mechanics*, Belgrade, Theme 6, No.18, pp.1-12
12. Guellec, P., (1970) "Calculation of Flows in Porous Media by the Finite Element Method" *Laboratories des Ponts et Chaussees*, Raport de Recherche, No.11, pp.1-35.
13. Chugh A.K. and Davidson L.W., (1988) "Analysis of foundation settlements at Ridgway Dam", *Canadian Geotechnical Journal* Vol, 25, No. 4, pp.716-725.
14. 신방웅, "체체의 평행 흐름에 대한 비정상 침투의 연구" *대한토목학회논문집* 제8권, 제3호 pp.101-110, 1988.

〈부 록〉
Flow Chart



(接受: 1990. 12. 19)