

## 堤體의 平行흐름에 대한 非定常浸透의 研究

A Study of Unsteady Seepage in Embankments for a Parallel Water Flow

申 芳 雄\*  
Shin, Bang Woong

## Abstract

This thesis investigated the variation of the seepage line of earth structure when the water level rises and drawdowns and compare this with the hither to published formula.

And, analysed by a vector in embankment model's seepage velocity of followed rises and drawdowns. And, by the experimental method find difference point per follow drawdown and rises in the same model.

## 要 旨

본 논문에서는 수위가 上昇 및 下降을 할때 토공구조물에 있어서 침윤선의 변화를 고찰하고 기 발표된 식과 비교 검토하였다. 그리고, 上昇과 下降에 따른 제체모형내에서의 浸透速度를 찾아 Vector로 해석하였다.

또한 같은 모형에서 下降과 上昇에 따른 차이점을 실험으로 규명하였다.

## 1. 序 論

물의 흐름에 따라 축조되는 토공구조물은 浸透現象에 따른 斜面安定에 역점을 두고 設計, 施工 및 관리를 하여야한다. 이러한 구조물은 자연변화 및 인위적인 이용에 따라 수위의 急上昇과 急下降이 생기는데, 구조물 내부의 浸透現象의 변화를 찾아 해석할 필요성이 있다.

따라서 흙속의 흐름상태가 定常浸透問題 일때는 線型微分方程式에 의하여 해를 구할 수가 있으나, 非定常浸透는 非線型이므로 간단하게 해를 구할수가 없다. 그러나 지하수 흐름 현상과 熱傳導 현상은 수학적으로 유사성을 가지므로

이 성질을 이용하여 실험결과를 분석하므로써 浸透現象의 해석을 쉽게 얻을 수가 있다. 浸透現象을 해석하는 것은 대상 영역 내의 水頭變化 침투유량, 침투수의 유속분포, 침투수압, 유출면의 크기, 유출점의 위치등을 구하는 것으로 생각할 수 있다. 그런데 영역의 형태, 초기 및 境界條件에 결과가 상이함을 알 수 있다. 그러나 문제가 주어졌을때 그 境界條件이 수식이나 數值模型, 또는 실험모형에 어떻게 재현되는가에 그 해의 정밀도를 결정하게 된다.

본 연구에서는 하천 제방과 같이 물의 흐름방향에 같은 방향일때, 자연현상 및 인위적인 여러 요인이 구조물에 미치는 영향을 고려한 부분에 대해서 실험을 하였다. 그리고 침투류현상을 실험으로 찾아서 실험값을 이미 발표된 식과 비교

\* 正會員 · 忠北大學校 工科大學 教授

도 하였으며 또한 실험자료를 분석 정리하였다. 실험모형내에 흐름의 형태를 벡터로 표시하므로써 斜面安定에 관한 것도 찾을 수가 있을 것으로 생각된다.

## 2. 본 연구와 관련된 문헌 및 해석방법

Yeh<sup>(1)</sup>는 균등질매체로된 無限定帶水層內에서의 지하수 非定常浸透에 대하여 偏微分方程式을 常微分方程式으로 환산하여 수치해를 구하였다.

고체내에서의 熱傳導문제를 다룬 Carslaw와 Jaeger<sup>(3)</sup>도 無限定帶水層內에서의 침투유동에 대한 이론적인 해석을 오차함수(error function)를 이용하였다.

Polubarinova-Kochina<sup>(5)</sup>는 무한대수층에 대하여 偏微分方程式을 선형화하여 오차함수로 나타냈고, 또 Boltzmann<sup>(6)</sup>변환법을 이용하여 급수에 의한 근사해를 발표하였다.

Moody<sup>(4)</sup>, 도 역시 Boltzmann 변환을 이용하여 非線型 偏微分方程式을 비선형 常微分方程式으로 변환하여 해를 구하였고, Kidder<sup>(2)</sup>는 반무한다공질매체내에서의 비정상 gas 유동에 대하여 유한차분방정식을 이용하여 非線型 偏微分方程式 및 數值的方法 등으로 해석하였다.

해석방법은 양수발전 등으로 인하여 저수면의 수위가 강하할 경우는

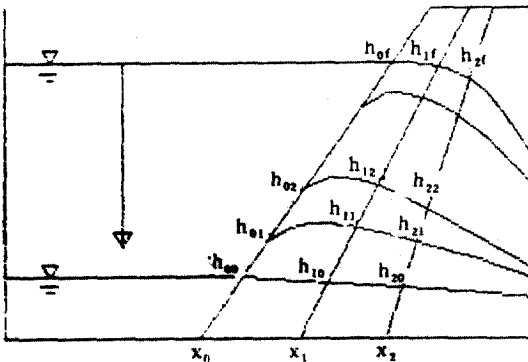


그림 2-1.

$$T = t_1 \dots \dots \dots t_n$$

$$x_0, h_0 \quad \quad \quad h(x) \text{ (quick)}$$

$$x_f, h_f \quad \quad \quad h(x) \text{ (slow)}$$

$$h_{0f}, h_{1f} \dots \dots \dots h_{nf} \text{ (steady flow)}$$

$$\frac{dh}{dt} = h$$

집중호우등으로 인하여 홍수시 수위上昇에 따른 침투문제는

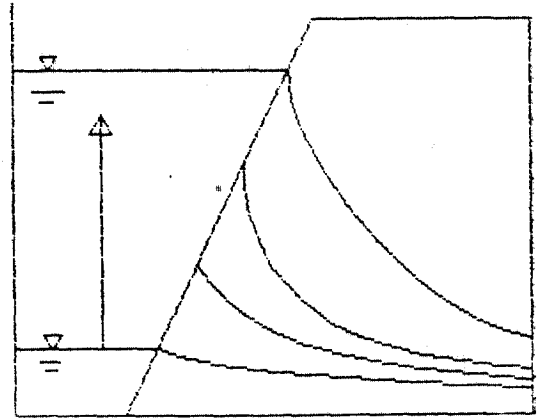


그림 2-2.

$$\frac{dh}{dt} = qx/t$$

$$dh = \frac{qx}{dt} \cdot t$$

$$\Delta h_1 = \frac{qx}{dt} \Delta t$$

$$\Delta h_2 = \Delta h_1 + \left( \frac{qx}{dt} \cdot \Delta t \right)$$

$$\vdots$$

$$\frac{dh}{dt} \rightarrow 0 \quad t \rightarrow \infty$$

같은 연구방법으로 해석하였다.

Desai<sup>(9)</sup>는 제방에서 수위강하시에 따른 침투를 연구하였으며, Neuman<sup>(7)</sup>도 非定常浸透로 인하여 자유수면을 有限要素法으로 해석하였다.

H. Komada<sup>(12)</sup>는 Fill Dam의 저수지 수위 급강하시의 非定常浸透類解析 및 안정해석을 하였으며 Onaka는 제체내의 非定常浸透류에 관한 모형실험 및 실측을 하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 길이 4.8m, 폭은(수조폭은 2.15m)수조폭과 합하여 4.8m, 높이는 0.5m, 수로 밑바닥폭은 0.4m로 되었다(그림 3-1).

수조폭은 실험모형경사와 같이 할 수 있도록 하였으며 양쪽으로 모형을 축조하여 浸潤線 측

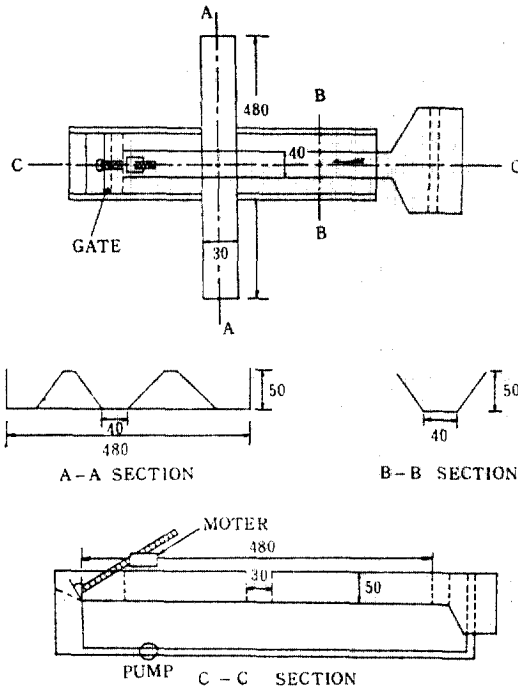


그림 3-1. Experimental equipment

정이 가능토록하여 모형제작에 편리하도록 하였다. 그리고 수위조절을 할 수 있도록 pump를 설치하여 header pipe 로써 lower tank로 유입되는 유량을 조절함으로써 gate를 달아 수위변화를 할 수 있도록 하였다.

수조쪽에 모형을 제작하여 침투상태를 관찰할 수 있게 하였고 모형사면에서 침투에 따른 斜面安定을 측정하기 위하여 slopometer를 설치하였다.

### 3.2 실험방법

본 실험에 사용한 시료의 투수계수  $k=1.03\text{cm/sec}$  로써 경사가 1:1.5, 1:2.0, 및 1:2.5의 모형을 下降과 上昇의 경우를 실험하였다.

下降의 경우는 제체모형 외측 수위를 초기에 40cm로 하여 30cm, 20cm 및 10cm로 下降하였을 때 침윤면 형상을 측정하였다.

上昇의 경우는 0cm에서 즉 실험수조의 밑바닥에서 20cm 上昇시켰을 때 측정하였고 같은 방법으로 20cm에서 30cm, 30cm에서 40cm로 모형사면의 수위를 上昇시켰을 때 제체모형내 침

윤면 형상을 측정하였다.

下降과 上昇의 수위별 시간변화는 다음과 같이 하였다.

### 下降의 경우

lim	1.5	2.0	2.5
구간(h)			
40~30	5.95	5.68	5.42
30~20	3.08	3.00	2.87
20~10	2.07	2.00	1.96

$\times 10^{-2}\text{cm/sec}$

단,  $dt/dh$ 는 상류면에서의  $V_f$ 이다.

### 上昇의 경우

lim	1.5	2.0	2.5
구 간			
0~20	5.97	5.83	5.62
20~30	6.17	6.02	5.87
30~40	6.37	6.23	6.19

$\times 10^{-2}\text{cm/sec}$

## 4. 실험결과

실험결과는 수위의 下降과 上昇의 경우를 제체모형 내의 수위별 변화상태를 찾았고 또 浸透速度( $V_s$ ), 하강속도( $V_f$ ), 上昇속도( $V_R$ ) 및 제체모형에 따른 흐름속도( $V_p$ )와 합력속도( $V_r$ )를 구하였다.

下降과 上昇시에 수위변화를 상이하게 하여 평균의 값을 실험결과로 하였다.

### 4.1 下降 실험결과

제체모형에 수위 40cm에서 30cm로 30cm에서 20cm로 20cm에서 10cm로 下降 하였을 때 실험모형별로 浸潤線 변화는 표 4-1 및 그림 4-1과 같다.

제체에 따른 흐름속도( $V_p$ ), 제체내 浸透速度( $V_s$ ) 및 제체내 下降속도( $V_f$ )와  $V_r$ 은  $V_s$ ,  $V_f$ ,  $V_p$ 의 합력속도이며 이에 각각의 침투에 따른  $x, y, z$  방향 단위 vector로  $i, j, k$ 를 구한 것이 표 4-2 및 그림 4-2와 같다.

### 4.2 上昇 실험결과

수위를 20cm로 上昇시켰을 때 20cm에서 30cm로, 또 30cm에서 40cm로 上昇하였을 때 실험모형별 浸潤線 변화는 표 4-3과 그림 4-3, 4-4, 4-5와 같다.

표 4-1. Testing Results (down)

1 : 2.0

<i>h</i>	<i>x</i>	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
30	exp	30	30.25	31.15	31.75	32.00	32.45	32.50				
	the	30	30.63	31.14	31.53	31.30	31.97	32.02				
20	exp	20	22.00	23.00	23.80	24.20	24.80	25.25	25.40	25.50		
	the	20	21.40	22.54	23.46	24.19	24.74	25.13	25.35	25.43		
10	exp	10	12.45	14.54	15.70	17.27	18.23	18.98	19.54	19.93	20.16	20.24
	the	10	12.60	14.54	16.06	17.27	18.23	18.98	19.54	19.93	20.16	20.24

표 4-2. Testing Result ( $V_s, V_f, V_p, V_r$ )<sup>(2)</sup>

model	M=2.0											
V	$V_s$			$V_f$			$V_p$			$V_r$		
notation point	(i)	j	(k)	(i)	j	(k)	i	j	k	(i)	j	(k)
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>h</i> = 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	7.15	0	0.50	5.08	0	2.54	0	5.68	0	12.23	3.04	5.68
7	5.84	0	0.33	4.87	0	2.92	0	5.68	0	10.71	3.25	5.68
<i>h</i> = 8	4.60	0	0.21	4.54	0	3.41	0	5.68	0	9.14	3.62	5.68
30 9	3.41	0	0.11	4.02	0	4.02	0	5.68	0	7.43	4.13	5.68
10	2.26	0	0.05	3.15	0	4.73	0	5.68	0	5.41	4.78	5.68
11	1.12	0	0.01	1.80	0	5.39	0	5.68	0	2.92	5.40	5.68
12	0	0	0	0	0	5.68	0	5.68	0	0	5.68	5.68
13	15.70	0	2.42	2.68	0	1.34	0	3.00	0	18.38	3.76	3.00
14	12.89	0	1.62	2.61	0	1.49	0	3.00	0	15.50	3.11	3.00
15	10.51	0	1.08	2.49	0	1.67	0	3.00	0	13.00	2.75	3.00
16	8.43	0	0.69	2.34	0	1.87	0	3.00	0	10.77	2.56	3.00
<i>h</i> =17	6.54	0	0.42	2.12	0	2.12	0	3.00	0	8.66	2.54	3.00
20 18	4.76	0	0.22	1.80	0	2.40	0	3.00	0	6.56	2.62	3.00
19	3.12	0	0.09	1.34	0	2.68	0	3.00	0	4.46	2.77	3.00
20	1.54	0	0.02	1.73	0	2.91	0	3.00	0	2.27	2.93	3.00
21	0	0	0	0	0	3.00	0	3.00	0	0	3.00	3.00

5. 분석 및 고찰

5.1 수위下降의 경우

(1) 수위변화에 따른 浸潤線

모형실험에서 각 model 별로 수위를 下降시켰을 때 浸潤線의 위치를 초기상태 40cm 에서 30cm, 20cm, 10cm 수위를 下降시켰을 때의 浸潤線

의 위치를 실험과 이론에 의해서 구하여 보았으며 실험모형의 기울기가 1 : 1.5, 1 : 2.0, 1 : 2.5 의 model 에서 수위가 40cm 에서 30cm 로 되었을 때 제체의 저쪽 1/2 지점에서 실험에 의해서 구한 浸潤線의 위치와 이론으로 구한 浸潤線의 위치를 분석하여 보면 아래와 같다(그림 5-1).  
1 : 1.5 인 경우 :

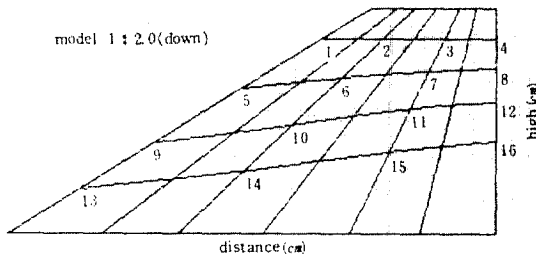


그림 4-1. Seepage Line

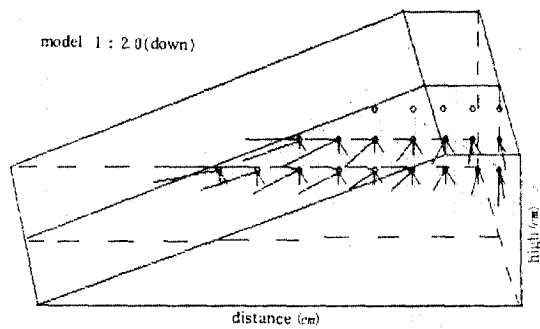


그림 4-2. Vector Notation of  $V_s$ ,  $V_f$ ,  $V_p$ , and  $V_r$

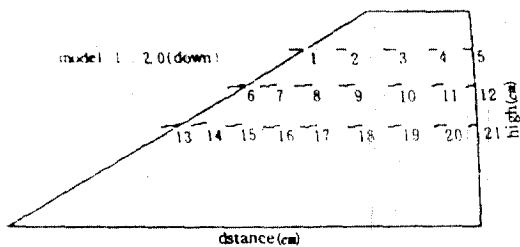


그림 4-3.  $V_s$ ,  $V_f$  by Seepage Velocity

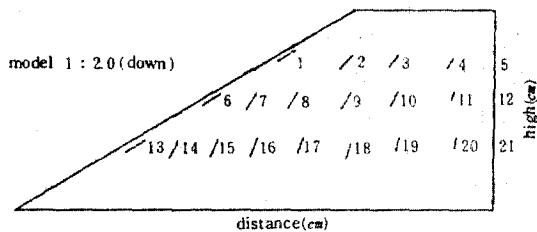


그림 4-4.  $V_s$ ,  $V_f$  by Drowdown Velocity

표 4-3. Testing Results(up)

	$x$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$H$	$M$										
40	1 : 1.5	40.0	29.7	23.5	18.7	15.7					
	1 : 2.0	40.0	29.0	23.0	19.0						
	1 : 2.5	40.0	28.4	23.2	19.7						
30	1 : 1.5	30.0	24.8	20.2	16.6	13.8	11.8	10.5			
	1 : 2.0	30.0	23.9	19.3	16.5	14.6	12.9	12.0			
	1 : 2.5	30.0	22.4	18.8	16.9	15.3	13.7				
20	1 : 1.5	20.0	17.0	14.7	12.6	10.9	9.4	8.2	7.0	6.0	5.4
	1 : 2.0	20.0	16.5	13.8	11.7	10.5	9.1	8.0	7.1	6.5	
	1 : 2.5	20.0	15.5	12.8	11.4	10.3	9.2	8.2			

$x$  : length from water surface

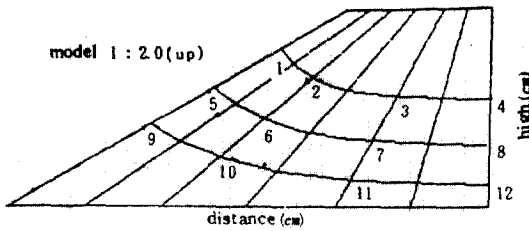


그림 4-5. Seepage Line

수위가 10cm로 되었을때 제체내의 속도변화가 20cm, 30cm수위의 경우보다도 크다는 것을 알 수 있었다.

1:2.0인 경우;

수위가 20cm에서 10cm 되었을때 제체의 폭 1/2 지점에서 80cm부터 90cm 지점까지 下降속도의 증가가 크다는 것을 알 수 있었다.

1:2.5인 경우;

제체의 경사가 1:1.5, 1:2.0의 경우와 거의 일치함을 알 수 있었으나 제체의 폭 1/2 지점에서 40cm되는 지점에서 실험으로 구한 浸潤線의 위치와 이론으로 구한 浸潤線의 위치가 차이가 있음을 알 수 있었다.

(2) 모형  $V_s, V_f$  및  $V_p$ 에 따른 속도의 관계

각 모형별로 수위 20cm와 30cm로 下降 하

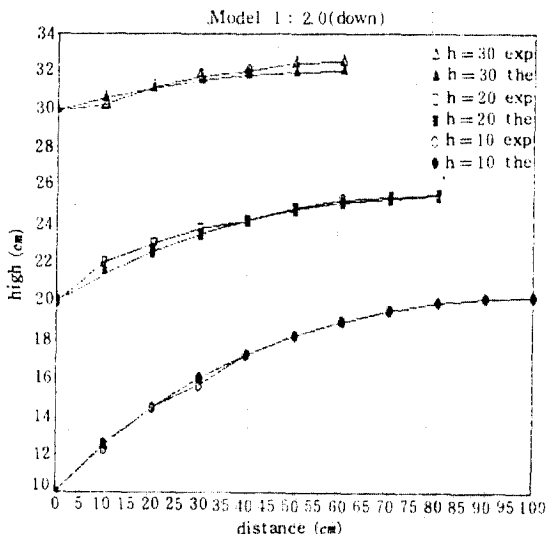


그림 5-1. Relationships of Velocity under Distance(2)

였을 때에  $V_s, V_f$  및  $V_p$ 에 따른 속도의 변화를 살펴보면, 제체의 종방향의 유속성분( $V_p$ )가 3.08cm/sec, 제체의 기울기가 1:1.5, 수위( $h$ )가 20cm인 경우: 제체안쪽 침투속도( $V_s$ )의  $x$  방향의 浸透速度 vector  $i$ 와  $z$  방향의 浸透速度 vector  $k$ 는 많은 차이를 보이고 있다. 그리고 제체내의 下降 浸透速度( $V_f$ )의  $x$ 방향 침투속도 vector  $i$ 는 감소상태이며  $z$ 방향의 浸透速度 vector  $k$ 는 증가상태이며 15cm 지점에서 교차하고 있다(그림 5-2).

제체의 종방향의 유속성분( $V_p$ )가 5.95cm/sec, 제체의 기울기가 1:1.5, 수위( $h$ ) 30cm인 경우; 제체 안쪽 浸透速度( $V_s$ )의  $z$  방향의 浸透速度 vector  $k$ 는 수위( $h$ ) 20cm인 경우의  $z$  방향의 浸透速度 vector  $k$ 보다 차이가 적음을 알 수있었고 제체내의 下降 浸透速度( $V_f$ )는 수위( $h$ )가 20cm인 경우 보다도 크며  $x$ 방향과  $z$ 방향의 浸透速度도 거의 같은 지점에서 일어난다.

제체의 종방향 유속성분( $V_p$ )가 3cm/sec, 기울기가 1:2.0, 수위( $h$ )가 20cm인 경우; 제체 안쪽 浸透速度( $V_s$ )의  $x$  방향의 浸透速度 vector  $i$  값과  $z$  방향의 浸透速度 vector  $k$  값의 차이가 크며 제체내의 下降 浸透速度( $V_f$ )의 값은  $x$  방향의 浸透速度 vector  $i$ 와  $z$  방향 浸透速度 vector  $k$ 가 40cm에서 교차함을 알 수 있었다.

제체의 종방향 유속성분( $V_p$ )가 5.68cm/sec, 기울기가 1:2.0, 수위( $h$ )가 30cm인 경우: 제체내의 下降 浸透速度( $V_f$ )의  $x$ 방향 浸透速度 vector  $i$ 와  $z$ 방향 浸透速度 vector  $k$ 는 25~30 사이에서 교차된다.

제체의 종방향 유속성분( $V_p$ )가 2.87cm/sec, 기울기가 1:2.5, 수위( $h$ )가 20cm인 경우; 제체내의 下降 浸透速度( $V_f$ )의  $x$ 방향 浸透速度 vector  $i$ 와  $z$ 방향 浸透速度 vector  $k$ 는 50~55cm 지점에서 교차한다.

제체의 종방향 유속성분( $V_p$ )가 5.43cm/sec, 기울기가 1:2.5, 수위( $h$ )가 30cm인 경우 제체내의 下降 浸透速度( $V_f$ )의  $x$ 방향 浸透速度 vector  $i$ 와  $z$ 방향 浸透速度 vector  $k$ 는 30~35cm 지점에서 교차한다.

(3) 제체내 浸透速度에 의한  $V_s, V_f$

제체내의 浸透速度에 따른 모형 1:1.5, 1:2.0

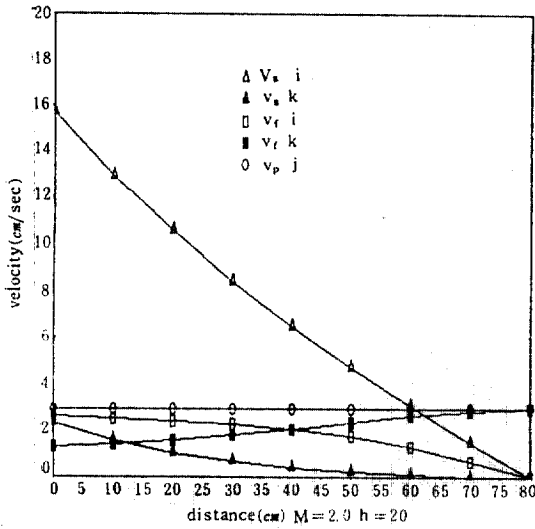


그림 5-2. Relationship between  $V_s$ ,  $V_f$  and  $V_p$  (3)

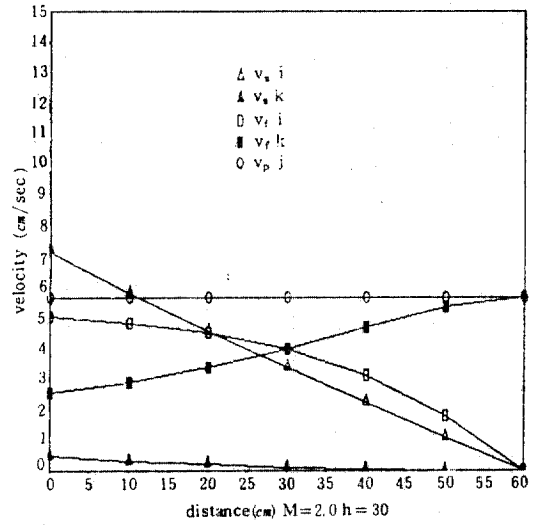


그림 5-3.  $V_s$ ,  $V_f$  by Inner Seepage Velocity (2)

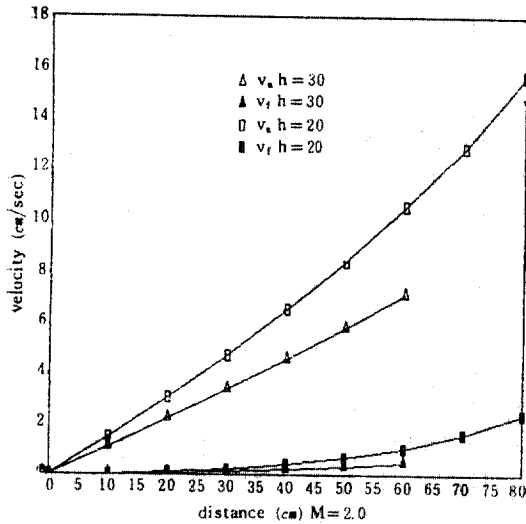


그림 5-2. Relationship between  $V_s$ ,  $V_f$  and  $V_p$  (4)

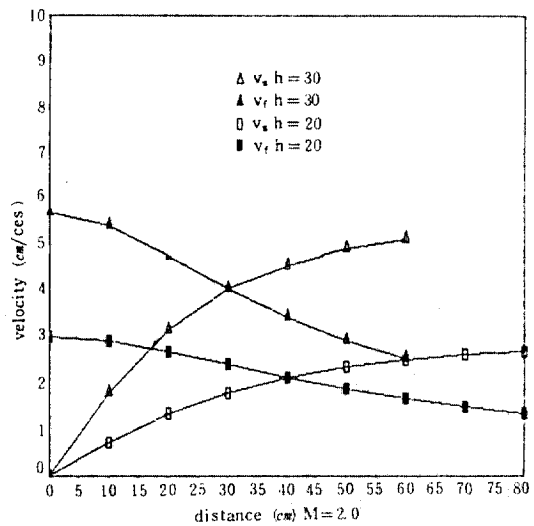


그림 5-4.  $V_s$ ,  $V_f$  by Inner Drop Velocity (2)

및 1:2.5를 분석하여 보면 1:2.0인 경우는  $V_s$ 가 20cm인 경우 20~30cm에서는 속도의 증가가 작으며 30cm 이상에서는 속도증가가 크다. 또 30cm인 경우는 속도증가가 일정하게 되고 있다(그림 5-3).

$V_f$ 는 거리 30cm까지는 아주 적게 증가하고 있으며  $h=20$ cm인 경우 거리 60cm에서는 증가폭이 다소 크게 나타나고 있다. 1:2.0인 경우는  $V_s$ ,  $V_f$ 가 거리에 비하여 증가가 일정하며

1:2.5인 경우는  $V_s$ 는 증가가 일정하지 않으나  $V_f$ 는 일정하고 30cm까지 증가가 아주 적은점은 각 모형이 동일하다.

(4) 제체내의 下降 속도에 의한  $V_s$ ,  $V_f$

$h=30$ cm에서  $V_s$ 는 증가하나  $V_f$ 는 감소하고 있으므로 1:1.5에서는 35~40, 1:2.0에서는 30~35, 1:2.5에서는 25~30cm 내에서 서로 만나고 있다(그림 5-4).

$h=20$ cm일때 1:1.5에서는 45~50, 1:2.0

에서는 40~45, 1:2.5에서는 35~40cm에서 교차함을 알 수 있다.

(5) 모형별 침투에 따른 斜面安定

동일점에서 浸透速度를 고찰하여 보면 1:1.5 > 1:2.0 > 1:2.5로 된다. 실험지점이 1:1.5에서(No. 5), 1:2.0에서 (No. 7), 1:2.5에서(No. 7)의  $V_s$ 를 비교하여 보면 1:1.5에서는  $66.938 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$  1:2.0에서는  $60.833 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ , 1:2.5에서는  $49.972 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 로써 1:1.5와 1:2.0에서는 다소 차이가 있으나

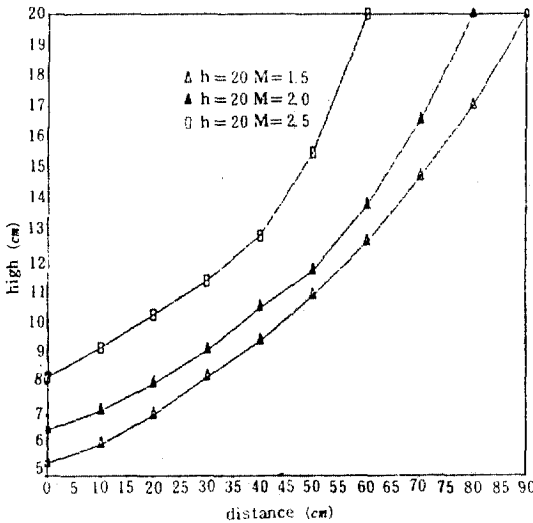


그림 5-5. Comparisons of Typical Free-Surface (1)

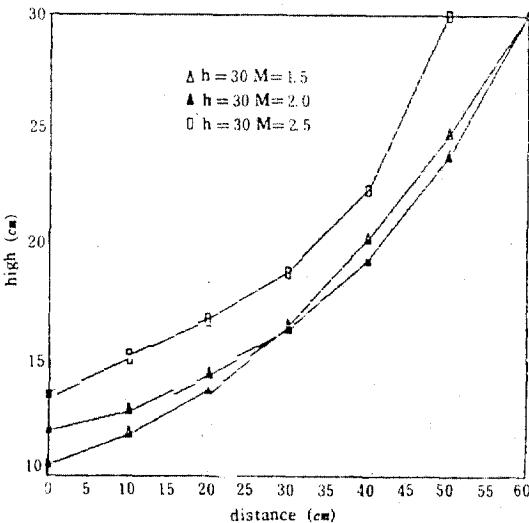


그림 5-5. Comparisons of Typical Free-Surface (2)

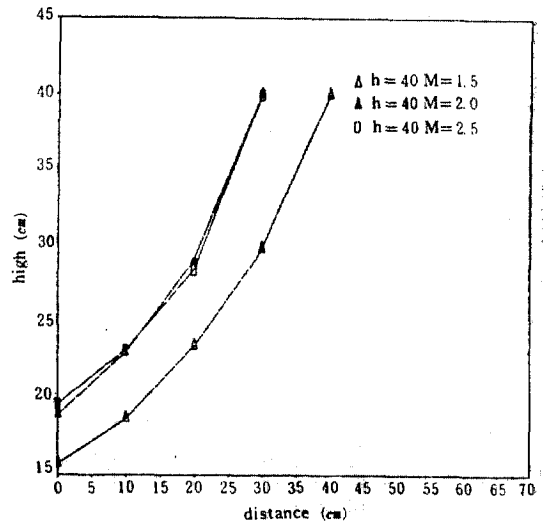


그림 5-5. Comparisons of Typical Free-Surface (3)

1:2.0과 1:2.5에서는 큰 차이가 나타남을 보여준다. 따라서 구조물의 경사가 완만할수록 안정하다는 것을 알 수 있다.

5.2 수위上昇의 경우

(1) 모형별에 의한 浸潤線

수위가 20cm일 때에는 1:1.5, 1:2.0, 1:2.5가 거의 같은 線形으로 나타나며,  $h=30\text{cm}$ 의 경우 1:1.5와 1:2.0은 비슷하나,  $h=40\text{cm}$ 일 경우에는 1:2.0과 1:2.5가 같은점이 특이하다. (그림 5-5)

(2) 下降 및 上昇의  $V_s$  관계

1:1.5모형에서 No. 5점에 대하여 下降과 上昇을 비교하여 본 결과 上昇의 경우가 크다. 따라서 上昇의 경우가 下降의 경우 보다 斜面安定에 좋지 않음을 알았다. 마찬가지로 1:2.0과 1:2.5의 경우도 같은 결과를 얻었다. 한편 1:1.5와 1:2.0에서는 비슷한 결과를 나타내고 있으나 1:2.5에서는 좀더 많은 차이를 나타내고 있어 上昇의 경우는 구조물 경사를 완만하게 設計하는 것이 좋을 것으로 사료된다.

6. 결 론

1) 수위의 下降 및 상승에 따른 침윤선 형상은 이론식과 거의 일치함을 얻었다.

2)  $h$ 가 클수록  $V_s$ 가 모형 외측 부분에서는 낮은 수위에 비하여 큰 차이를 나타내고 있다.



3)  $V_s$  는 모형내의 같은 지점에서는 1 : 1.5 > 1 : 2.0 > 1 : 2.5 로 나타나고 있으며, 경사가 급할수록 완만한 조건보다 큰 차이를 보여주고 있다.

4) 수위하강과 상승의 경우를 같은모형에 동일조건( $dh/dt$ , 등)으로 실험한 결과는 상승이 하강보다 침투속도 값이 크다.

### 감사의 글

본연구는 한국과학 재단연구비지원에 의해서 수행하였으며, 본연구를 할 수 있도록 지원하여준 한국과학재단에 감사드립니다. 또한 연구수행중 자료정리에 협조와 수고를 하여준 안 상로, 엄 용섭군에게 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Yeh, W.G., "Nonsteady Flow to Surface Reservoir" *ASCE*, Vol. 96, HY3 pp.609~618, (1970)
2. Kidder, R.E., "Unsteady Flow of gas Through a Semi-infinite porous medium," *ASME* Vol. 24, pp. 329~332, (1977).
3. Carlaw, H.H., & Jaeger, J.C., "Conduction of Head in Solids" Second Edition, Oxford University Press, (1959)
4. Moody, W.T., "Discussion of Unsteady Flow of Groundwater into a Surface Reservoir" *ASCE*, Vol. 127, pp.417~421, (1962)
5. Polubarinova-Kochina, P. Ya, "Theory of Groundwater Movement" Translated from the Russian by J.M. Roger Dewiest, Princeton, (1962), Chapter XIII. p.497 "Nonlinear Equations of Unsteady Flow with a Free Surface."
6. Boltzmann, L., "Eur Integration der Diffusions Gleichung bei Variabeln Diffusions-Coefficienten", *Ann Physikchemie* (Leipzig), Vol. 53, pp.959~964, (1984)
7. Numen, s.p., & Witherspoon, P.A. "Analysis of Nonsteady Flow with a Free Surface Using the Finite Element Method" *Journal of water Resources Research*, Vol. 7, No. 3, June, pp.611~623, (1971)
8. Zienkiewicz, O.C., & Parekh, C.J., "Transient

Field Problems: Two-Dimensional and Three Dimensional Analysis by Isoparametric Finite Elements" *International Journal of Numerical Methods in Eng.* Vol. 2, No. 1, Jan. (1970)

9. Dasai, C.S., "Seepage Analysis of Earth Banks Under Drawdown" *ASCE*, Vol. 98, No. SM11, pp.1143~1162, (1972)
10. Kono, I., "Finite Element Analysis of Nonsteady Seepage Problem" *Soil and Foundation* Dec. (1974)
11. Kono, I., "An Experimental Study on Characteristics of Seepage Through Unsaturated Sandy Soil" *JSCE*. Mar. (1981)
12. Komada, H. & Kanazawa, K., "Analysis of Unsteady Seepage Flow and Stability of Fill Dam Under Rapid Drawdown of the Water Surface Level of Reservoirs" pp.51~62, Aug. (1975)

### 부 록 1.

비정상상태의 흐름  
흐름의 평균속도 Darcy 의 법칙,  
속도의 수직성분은 무시한다.  
수평방향의 흐름속도

$$V = -k \frac{\partial h}{\partial x}$$

유량

$$Q = -\frac{\partial h}{\partial x} \int_0^h k(z) dz$$

물의 질량보존에 의하여

$$-\frac{\partial Q}{\partial x} = n \frac{\partial h}{\partial t}$$

$k$  : 투수계수

$h$  : 위치  $x$  와 시간  $t$  에서 불침투성 수평대위의 물 표면의 높이

$n$  : 공극율

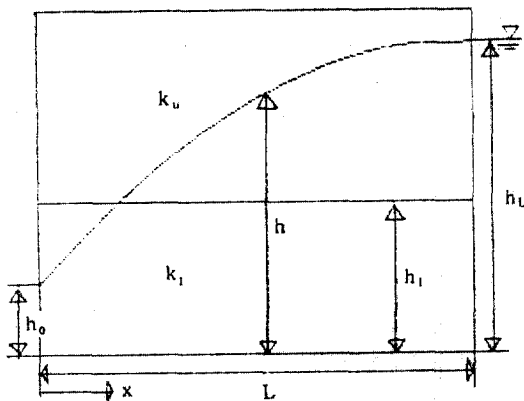
$$Q = -\frac{\partial h}{\partial x} \int_0^h k(z) dz$$

$h < h_1$

$$Q = -kh \frac{\partial h}{\partial x}$$

$h < h_1$

$$Q = -k_1 h_1 \frac{\partial h}{\partial x} - k_*(h-h_1) \frac{\partial h}{\partial x}$$



$S(L)$ : 하층 대수층의 높이와 같아지는 위치  
 $0 < x < S(L), t > 0$  (하층)

$$k_l \frac{\partial}{\partial x} \left( h_l \frac{\partial h_1}{\partial x} \right) = n_l \frac{\partial h_1}{\partial t}$$

$x > S(L), t > 0$  (상층)

$$k_u \frac{\partial}{\partial x} \left( h_2 \frac{\partial h_2}{\partial x} \right) + (k_l - k_u) h_l \frac{\partial^2 h_2}{\partial x^2} = n_u \frac{\partial h_2}{\partial t}$$

초기조건과 경계조건

$$t=0 \text{ 이고 } x > S(L) \text{ 일때 } h_2 = h_l$$

$$t=0 \text{ 이고 } t > 0 \text{ 일때 } h_1 = h_0$$

$$t > 0 \text{ 이고 } x = \infty \text{ 일때 } h_2 = h_l$$

$$t > 0 \text{ 이고 } x = S(L) \text{ 일때 } h_1 = h_2 = h_l$$

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{\partial h_2}{\partial x}$$

$$\frac{k_l(h_0 + h_l)}{2} \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} = n_l \frac{\partial h_1}{\partial t}$$

$x > S(L)$  일때

$$\left\{ k_u \frac{h_1 + h_l}{2} + (k_l - k_u) h_l \right\} \frac{\partial^2 h_2}{\partial x^2} = n_u \frac{\partial h_2}{\partial t}$$

여기서

$$c_1 = \frac{k_l(h_0 + h_l)}{2n_l}$$

$$c_2 = \frac{k_u(h_1 + h_l) + 2(k_l - k_u)h_l}{2n_u}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{c_1}{c_2}} \text{ 라 하면}$$

$$c_1 \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} = \frac{\partial h_1}{\partial t}$$

$$c_2 \frac{\partial^2 h_2}{\partial x^2} = \frac{\partial h_2}{\partial t} \text{ 로 되며}$$

해는

$$\frac{h_1}{h_l} = \frac{h_0}{h_l} + \left( \frac{h_l}{h_l} - \frac{h_0}{h_l} \right) \frac{\text{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{c_1 t}} \right)}{\text{erf} \lambda}$$

$$\frac{h_2}{h_l} = 1 - \left( 1 - \frac{h_l}{h_l} \right) \frac{\text{erfc} \left( \sqrt{\frac{x}{2\sqrt{c_2 t}}} \right)}{\text{erfc}(\alpha \lambda)} \text{ 이다}$$

$c_1$  과  $c_2$  는 동점성계수 또는 확산계수와 같은 차원이다.

$\lambda$  는

$$\frac{e\lambda^2 \text{erf}(\lambda)}{ae x^2 \lambda^2 \text{erfc}(\alpha \lambda)} = \frac{h_l - h_0}{h_l - h_l}$$

$$S(L) = 2\lambda \sqrt{c_1 t}$$

미지상수  $\lambda$  를 구한후  $h_1, h_2$  를 구할 수 있다.

상미분방정식으로 변환

편미분방정식을 상미분방정식화 하기 위하여

$$f = \frac{h}{h_l}, f_0 = \frac{h_0}{h_l}, f_l = \frac{h_l}{h_l}$$

$$\eta = \frac{x}{2} \sqrt{\frac{n_l}{k_l h_l t}}$$

그리고

$$h(x, t) = h(\eta)$$

$$S(L) = 2\lambda \frac{h_l k_l t / n_l}{h_l k_l t / n_l}$$

로 가정

$\lambda$ : 상수

편미분방정식을 상미분방정식으로 변환

$$f_0 < f_1 < f_l, 0 < \eta < \lambda \text{ 일때 (하층)}$$

$$\frac{d}{d\eta} \left( f_l \frac{df_1}{d\eta} \right) + 2\eta \frac{df_1}{d\eta} = 0$$

$$f_l < f_2 < 1, \eta > \lambda \text{ 일때}$$

$$\frac{d}{d\eta} \left( f_2 \frac{df_2}{d\eta} \right) + \left( \frac{k_l - k_u}{k_u} \right) f_l \frac{d^2 f_2}{d\eta^2}$$

$$+ 2 \frac{n_u}{n_l} \frac{k_l}{k_u} \eta \frac{df_2}{d\eta} = 0$$

선형화 방법

$$h_0 < h_1 < h_l \text{ 이며 } h_l < h_2 < h_l$$

$$0 < x < S(L) \text{ 일때}$$

경계조건은

$$\eta = \infty \text{ 일때 } f_2 = 1$$

$$\eta = 0 \text{ 일때 } f_1 = f_0$$

$$\eta = \lambda \text{ 일때 } f_1 = f_2 = f_i$$

$$\eta = \lambda \text{ 일때 } \frac{df_1}{d\eta} = \frac{df_2}{d\eta}$$

는 Runge-Kutta 방법에 의하여 직접 수치적 방법으로 풀 수있다.

여기서

$H$  : 초기수위

$H_d$  : 상류수위

$\delta(x)$  : 수위면에서 수위강하가 없는 지점까지의 거리

$x$  : 수위면과 접하는 사면에서 부터 임의의 절까지의 거리

(接受 : 1988. 8. 8)

### 부록 2.

$$h^2 = H^2 - (H^2 - H_d^2) \left( \frac{\delta - x}{\delta} \right)^2$$