

필터設置흙댐의 浸透에 關한 研究

A Study of the Seepage through Filter Installed Earth Dams

姜 瑄 沅* · 申 芳 雄** · 李 在 璣***
Kwan Won Kang, Bang Woong Shin, Jai Kee Lee

Summary

This thesis is a result of theoretical and electrical experimental studies for the shape of Seepage on various Earth Dams.

The decrement method of seepage through of water amount to earth Dam's was tested by means of experiment by the model constructed in the water tank.

A study of the seepage through earth Dam's is necessary for a satisfactory of the same.

An attempt was made in these investigations to study the problem of the seepage through homogeneous earth dams with filters located near the axis of the dam and filters extending in to upstream portion of the dam by the electrical analogy method.

The experimental results were at variance with the graphical solution given by A Casagrande method.

Some of the results were checked by relaxation method and by the circle criterion for drawing flow nets.

I. 序 論

흙댐(Earth dam)은 토질재료를 쌓아올려 축조하는 댐의 한형식으로貯水用으로 만들어진 흙댐은 역사나 구조물의 남은 유물로 보아 오래전부터 사용되었음을 알수 있으며 세계적으로 가장 오랜 댐으로 알려진 紀元前 5세기의 Foulmel gerye dam⁽¹⁾은 중앙부에 토질재료를 사용했음이 밝혀졌으며, 近代

式 댐은 19세기 미국의 캘리포니아에서 광산기술자들이 사용했던 Log crib dam⁽²⁾으로부터 발달하였다.

흙댐은 댐을 築造하는 부근에 存在하는 各種土質材料를 적절히 利用해서 댐의 수밀성과 안정성을 유지시키는 댐이다. 이와 같이 지형 지질 재료등의 조건에 별로 구애를 받지않는 利點과 댐공학 토질공학의 발달, 건설기계의 대형화 및 시공기술의 진보에 따라, 세계적인 댐건설의 動向은 1969~1971 년간

* 仁荷大學校 土木工學科

** 忠北大學 土木工學科

*** 忠北大學 土木工學科

국제 대담회의 참가국 發表에 의하면 완공 총 댐수 1,043개 가운데서 콘크리트댐은 191개 Fill dam의 數는 852개에 이른다.

흙댐의 안정은 土中을 흐르는 浸透水에 의해 좌우되므로 이에 관한 연구가 중요시되고 있으며 土中을 흐르는 浸透水의 정상적인 흐름에 대하여는 D. Forcheimer를 비롯하여 Schocklitsch⁽¹⁾ Schaf-fenak⁽²⁾ Iterson⁽⁴⁾ 및 Pavolosky 등의 연구가 있다.

本 論文에서는 흙을 浸透하는 물의 흐름은 正當的인 흐름과 비정상적인 흐름으로 分類할 수 있으나, 흙댐이나 河川堤防의 堤體內浸透水는 內水面의 變動이 거의 없는 것으로 간주하여 正當的인 흐름으로 보고, 堤體內에서의 流線은 모두 Darcy의 法則을 따른다는 假定아래 問題를 研究考察하였다.

浸透에 관한 理論은 “흙은 同質이며, 흙粒子的 크기는 균일하다”고 假定하였다. 人工堤體는 모두가 透水性이 아주 높거나, 아주 낮은 미확인 物質을 함유하고 있으며 이들은 흐름의 樣相에 영향을 미치고 있는 것으로 보았다. 또 浸透에 對한 分析에서는 毛細管現狀을 고려하지 않았으며⁽⁶⁾, 浸透에 관한 結果를 利用할때는 이런 點에 유의해야 할 것이다. 그리고 流線網작도는 弛緩方法과 圖式의 方法에 의해 檢討하였으며 基礎地盤은 不透水層基礎로 하고, 軸부근에 設置한 필터(filter)와 電氣的相似⁽⁷⁾를 이용한 模型實驗에 의해 흙으로 축조된 댐(模型)의 浸透에 관한 問題를 研究코자 하였다.

II. 解析式

不透水性基礎위에 鉛直上流面과 水平필터를 가진 흙댐의 浸透에 관한 理論은 다음과 같이 복소수함수 형태로 나타낼 수 있다.

흙댐을 그림 1~(a)에서와 같이 z' 면에 나타내면

$$z' = x' + iy' \text{로 表示할 수 있고}^{(7)}$$

또 복소수포텐셜을 $\omega = \Phi + i\Psi$ 로 하면 方程式은

$$z' = \frac{\omega^2}{2\Psi_0} + A_n \cosh \frac{n\pi\omega}{\Psi_0} \dots\dots\dots(1)$$

이다.

A_n, Ψ_0, n 는 常數 (n 는 정수)

그러면

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{\Phi^2 - \Psi^2}{2\Psi_0} + A_n \cosh \frac{n\pi\Phi}{\Psi_0} \cos \frac{n\pi\Psi}{\Psi_0} \\ y &= \frac{\Phi\Psi}{\Psi_0} + A_n \sinh \frac{n\pi\Phi}{\Psi_0} \sin \frac{n\pi\Psi}{\Psi_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots(i)$$

上式의 境界조건은

$$\Phi = \Psi_0 \text{ 일때 } y = 0 \dots\dots\dots(ii)$$

$$\Psi = 0 \text{ 또는 } \Phi = 0 \text{ 일때 } y = 0 \dots\dots\dots(iii)$$

이다.

이렇게 하여 水平不透水層과 水平필터를 가진 地下水의 흐름에 대한 問題를 解決할 수 있다.

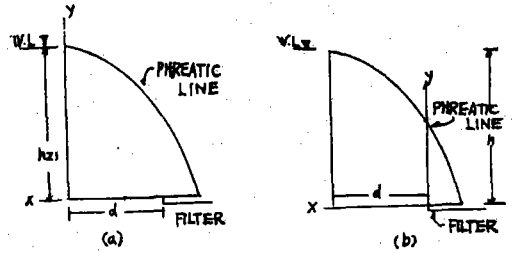


Fig. 1. Theoretical solution

여기서 $x=0, \Phi=1$ 이라고 하면

$$\left. \begin{aligned} 0 &= \frac{1 - \Psi^2}{2\Psi_0} + A_n \cosh \frac{n\pi}{\Psi_0} \cos \frac{n\pi\Psi}{\Psi_0} \\ \text{또는} \\ \frac{-1}{2\Psi_0} &= \frac{-\Psi^2}{2\Psi_0} + A_n \cosh \frac{n\pi}{\Psi_0} \cos \frac{n\pi\Psi}{\Psi_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

이라고 쓸 수 있다.

위 方程式은 한쪽에만 變數 Ψ 를 포함하고 다른 쪽은 常數이므로 Ψ 는 0에서 Ψ_0 까지의 모든값에 對하여 成立하며, n 는 독립변수가 될 수 없다.

따라서

$$a_n = A_n \cosh \frac{n\pi}{\Psi_0} \text{ 이라면}$$

$$a_n = \frac{2\Psi_0}{n^2\pi^2} (-1)^n$$

$$a_0 = \frac{\Psi_0}{3} - \frac{1}{\Psi_0} \dots\dots\dots(3)$$

이것은

$$A_n = \left(\frac{2\Psi_0}{\pi^2} \operatorname{sech} \frac{n\pi}{\Psi_0} \right) \frac{(-1)^n}{n^2} \text{ 임을 의미하므로}$$

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{\Phi^2 - \Psi^2}{2\Psi_0} + \left(\frac{\Psi^2}{6} - \frac{1}{2\Psi_0} \right) + \frac{2\Psi_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \sec \frac{n\pi}{\Psi_0} \cosh \frac{n\pi\Phi}{\Psi_0} \cos \frac{n\pi\Phi}{\Psi_0} \\ y' &= \frac{\Phi\Psi}{\Psi_0} + \frac{2\Psi_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \operatorname{sech} \frac{n\pi}{\Psi_0} \frac{\sinh \frac{n\pi\Phi}{\Psi_0} \sin \frac{n\pi\Psi}{\Psi_0}}{\Psi_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots(4)$$

(4) 式은 다시

$$\left. \begin{aligned} z' &= 2 \frac{\omega^2}{\Psi_0} + \frac{\Psi_0}{6} - \frac{1}{2\Psi_0} + \frac{2\Psi_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\Psi_0} \\ &\quad \sec \frac{n\pi}{\Psi_0} \cosh \frac{n\pi\omega}{\Psi_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots(5)$$

이라고 쓸수 있으며 이것은 댐 전체가 x軸의 “음(-)”부분에 대한 변수를 적용함으로써 알수 있을 것이다. “양(+)”의 값을 가지고 다루는 것이 쉽기는 하나 가능한 한 Fig. 1~(a)에서 d의 길이를 산출하고 아래와 같이 그 함수를 변형 적용하는 것이 좋다.

$$d = \frac{\Psi_0}{6} - \frac{1}{2\Psi_0} + \frac{2\Psi_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{\pi^2} \operatorname{sech} \frac{n\pi}{\Psi_0} \dots (6)$$

(6)식에 (5)식을 代入하여 아래식을 얻을수 있다

$$z = \frac{\omega^2}{2\Psi_0} + \frac{2\Psi_0}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \operatorname{sech} \frac{n\pi}{\Psi_0} (-1 + \cosh \frac{n\pi\omega}{\Psi_0}) \dots (7)$$

(7)식은 Fig. 1~(b)와 기본 미분 방정식에 나타난 경계조건

i) 上流面 $\Phi=1$ $x=d$ $0 \leq y \leq 1$

ii) 基礎 $\Psi=0$ $y=0$ $0 \leq x \leq d$

iii) 필터 $\Phi=0$ $y=0$ $-1 \leq x \leq 0$

iv) Phreatic line $\Psi=\Psi_0$, $\Phi=y$

을 만족하므로, 이것은 완전해이며 Phreatic line에 대한 식은 아래와 같다.

$$x = \frac{\Phi^2}{2\Psi_0} - \frac{\Psi_0}{2} + \frac{2\Psi_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \operatorname{sech} \frac{n\pi}{\Psi_0} \left\{ (-1)^{n+1} + \cosh \frac{n\pi\Phi}{\Psi_0} \right\} \dots (8)$$

$= \Phi$

III. 實驗

1. 實驗裝置

電流에 關한 Ohm의 법칙이 透水性材料중에서의 물의 流動에 關한 Darcy 法則⁽⁶⁾과 尙사하다는 것에 입각하여 Fig. 2와 같이 電氣的 透水性模型 實驗裝置를 使用하였다.

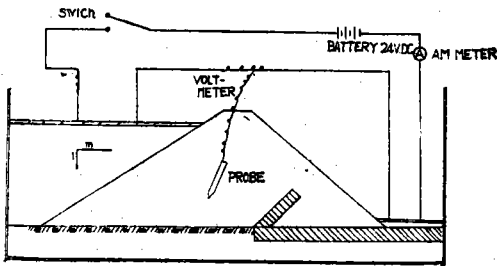


Fig. 2.

2. 實驗方法

필터를 頂의 軸 가각게 設置하여 電氣的 透水性模型 實驗에 의하여 等水頭線을 求하였다. Fig. 3은 各 모형의 最高水位일때의 浸潤線이며 수조바닥은 鉛판으로 만들어 不透水性 基礎로 看做하였다.

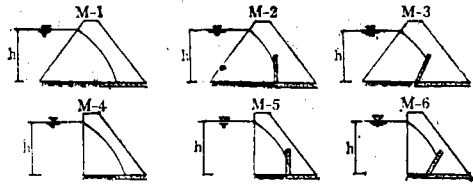


Fig. 3. Model of experiments

IV. 實驗結果 및 考察

Fig. 2와 같이 電氣的 透水性模型 實驗裝置를 使用하여 Fig. 3과 표(1)에서 보는 바와 같이 24개의

표-1

Model No.	h/d	S	$\alpha(^{\circ})$
1	0.5	1.5	180
1	1.0	1.5	180
1	1.5	1.5	180
1	2.0	1.5	180
2	0.5	1.5	90
2	1.0	1.5	90
2	1.5	1.5	90
2	2.0	1.5	90
3	0.5	1.5	135
3	1.0	1.5	135
3	1.5	1.5	135
3	2.0	1.5	135
4	0.5	0	180
4	1.0	0	180
4	1.5	0	180
4	2.0	0	180
5	0.5	0	90
5	1.0	0	90
5	1.5	0	90
5	2.0	0	90
6	0.5	0	135
6	1.0	0	135
6	1.5	0	135
6	2.0	0	135

후단 斷面에 대하여 浸潤線과 等水頭線을 求해보았 으며, 그중에서 模型 -1(Model-1)은 Fig. 4이며 模型 -2는 Fig. 5, 模型 -3은 Fig. 6, 模型 -4, 5, 6 은 Fig. 7이다.

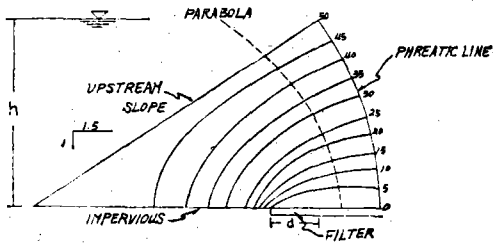


Fig. 4. Equipotentials for Section M-1

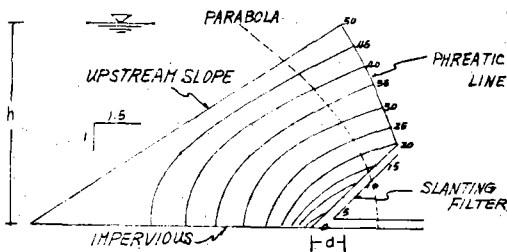


Fig. 5. Equipotentials for Section M-2

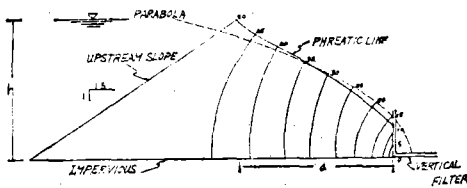


Fig. 6. Equipotentials for Section M-3

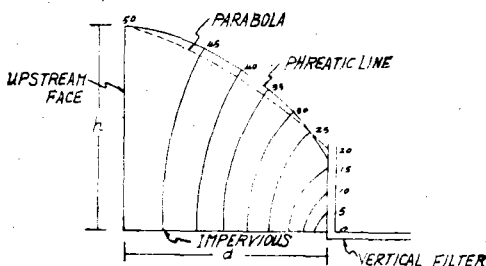


Fig. 7-1. Equipotentials for Section M-4

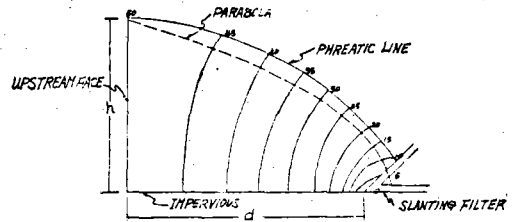


Fig. 7-2. Equipotentials for Section M-5

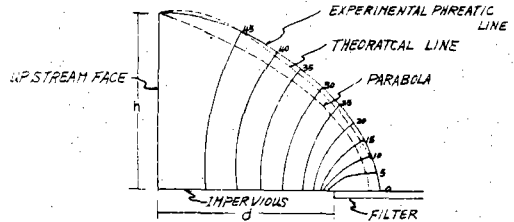


Fig. 7-3. Equipotentials for Section M-6

1. 理論解析

$z = \omega^2 / 2\psi_0$ 에 의하여 Kozeny의 解가 주어짐을 고려하면 解析式에서 “ Σ ” 다음에 오는 項들은 該解의 正誤 要素역할을 한다는 것을 알수 있다.

만일 $\phi = 0$ 로 놓고 무한급수의 합이 무시될수 있는 條件이 決定된다면 그 條件에서의 Kozeny 解는 거의 오차가 없는 조건인 것이다. 급수의 총계는 π / ψ_0 이 커질수록 작아지고 $\psi_0 = 0.125\psi$ 일 때는 실제로 무시할수 있다. Fig. 8에 그려진 불투수 기초 층의 길이 “ d ”와 총유량 “ ψ_0 ”의 관계곡선으로 나타 내었다.

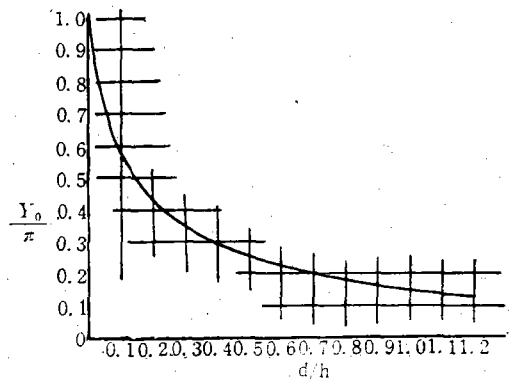


Fig. 8. Relation between d/h and ψ_0/π

그러므로 Kozeny 解法⁽⁹⁾에 基礎를 둔 A. Casagrande의 근사해법은 필터가 水槽깊이의 1.2배 되는 거리에 位置할때만 실제에 가깝다. 上流面의 傾斜가 鉛直이 아닌 경우에는 垂直인 경우 이상으로 上

流面위의 잔여토량은 필터를 설치할 수 있고 Casagrande의 解法을 만족시켜줄 수 있는 거리를 短縮시킨다.

2. 流線網

물은 흙댐이나 河川堤防등에서 좌우 水位差에 따라서 높은 쪽에서 낮은 쪽으로 浸透한다. 이때 堤體內的 動水壓이 같은 點의 接線을 等壓面 또는 等水線이라 하고, 堤體中으로 물의 分子가 浸透하는 경로를 流線이라한다. 이 2개의 曲線은 서로 垂直하고 이것은 보통 ϕ , ψ 인 2개의 함수로서 等水頭線은 總수두의 20%마다 計算되었으며, 求해진 數의 供給으로 流線이 計算되었다. 이와같이 하여 그려진 流線網이 Fig. 9이다.

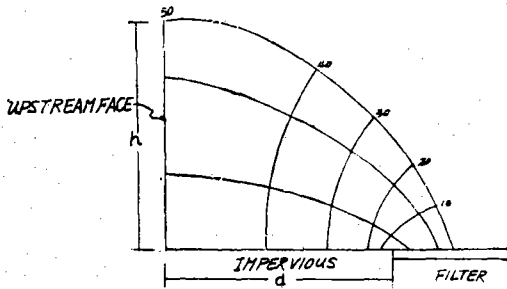


Fig. 9. Flownet by theoretical method

3. 實驗 結果 分析

필터를 댐의 軸 가깝게 設置 했을때의 電氣的 透水 模型 實驗結果는 1936年 A. Casagrande가 發表한 圖解法⁽¹⁰⁾과는 近似하였으며, 模型 -1에서 얻은 結果는 弛緩法으로 檢討되었으며, 比較하여 본 차이는 무시하여도 좋을 정도이다. 模型 -4의 流線網은 電氣的 透水模型 實驗裝置에서 얻어진 등수두선으로 그려졌으며 圖式的方法에 의해 檢토되어 오차는 별의 미가 없음을 알수 있었다. 모든 경우에 A. Casagr-

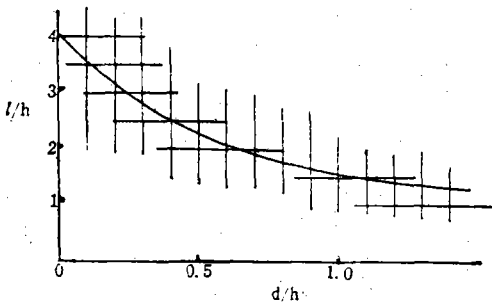


Fig. 10. Relation between d/h and l/h

ande의 도해법과 같이 포물선으로 실험에서 나타났으며 오차는 필터가 上流面쪽에 있을때 커지고 上流面 자체에 있을때 가장 크다.

필터의 거리 " d "와 浸透수가 들어온 필터길이 " l " 사이에 그려진 도표는 Fig. 10에서와 같으며 일반적으로 d/h 와 l/h 가 사용된다. Fig. 10에서 上流面의 傾斜가 $1:1\frac{1}{2}$ 일때 浸潤線이 수평필터와 만나는 점을 얻을 수 있으며 浸潤線은 上流水面이 上流面 傾斜와 만나는 點사이에 完만한 曲線으로 그려진다. 그 경계는 잘 알려져 있는바와 같이 도해법으로 적합한 流線網을 그리면 쉽다.

표 2. Effect of slanting filters

M No.	Case	Slope	in a degs	Experi- mental correction	Cassag- rande's correction
2	0.5	1.5	90	0.14	0.26
2	1.0	1.5	90	0.14	0.26
2	1.5	1.5	90	0.14	0.26
2	2.0	1.5	90	0.16	0.26
3	0.5	1.5	135	0.17	0.26
3	1.0	1.5	135	0.16	0.26
3	1.5	1.5	135	0.22	0.26
3	2.0	1.5	135	0.23	0.26

수평필터 대신에 수직 또는 傾斜필터를 사용하 면 浸潤線은 낮아지며 이 낮아지는 정도에 대하여 A. Casagrande는 "댐의 浸透"⁽¹⁰⁾에서 제시했다. 이 러한 考察은 圖解法으로 說明되었고 上流面이 무한한 경우이다. 上流面의 거리가 제한된 때의 효과는 模型-2에서 模型-3까지에 考察되었으며, 그에 대한 보정은 A. Casagrande에 의한 보정방법으로 표 (2)에 計算된 바와 같으며 이것은 上流面에 가까운 거리에서 수직 또는 傾斜필터로 대치하면 浸透流量은 증가될 것이다. A. Casagrande가 調査한바에 의하면 수직 또는 傾斜필터로 대치함에 따른 浸透流量의 증가는 없다.

V. 結 論

1. 浸潤線의 位置와 모양은 上流面傾斜와 필터平面사이의 거리에 의해 변화한다.
2. 同一한 크기의 鉛直또는 傾斜필터로 바꾸어도 같은 模型에서는 浸透流量의 變化는 없다.
3. 필터가 水槽의 깊이와 같은 거리에 있을때 흐름의 양상은 Kozeny의 解와 거의 같고 A. Casagrande

의 解와 일치한다. 수평필터가 있을 때는 上流面傾斜가 0°에서 90°까지에서 타당하다는 것을 理論的 分析에 의해 알 수 있다.

4. 필터가 水槽의 길이보다 가까운 거리에 位置해 있거나 上流面 그 자체내에 位置해 있을 때는 電氣的相似를 이용한 模型實驗과 理論的 研究結果는 A. Casagrande의 解와는 꼭 일치되지는 않으나 앞에서 말한바와 같이 실제 문제에 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 傾斜진 面에 對한 A. Casagrande의 수정이 실제보다 높은 편일지 모르나 實驗值와 A. Casagrande의 수정 사이의 差가 5% 이내 일 때는 거의 같다.

參 考 文 獻

1. 劉漢烈外 3, “營工學” 螢雪出版社 p.47~48, 1975.3
2. Schaffernah “日本土木學會編水理公式集” p.51
3. Schacklitsch “日本土木學會編水理公式集” p.51
4. Iterson “Einige Theoretische Beschonwing-enkwel, Die Ingenieur”
5. Chapman, T. G. “Capillary effects in a two dimensional ground water flow system, Geotechnique, Vol X, No.2 1960.
6. Harr. M.E. “Groundwater and Seepage” McGraw Hill p.143, 1962
7. Sokonikoff, I.S & Redheffer R.M “Mathematics of Physics and Mordern Engineering” McGrawhill Kogakusha LTD. p.527
8. A Veruijt “Theory of Ground water Flow, Macmillan p.6~p.12, 1969.
9. Leliasusky, S. “Irrigation and Hydraulic Design”
10. Casagrande, A “Seepage through dams”
11. Davison, B “On the Steady 2D Motion of Ground water with Free Surface” Phil. Mag Vol. 21, 1936.