

河口堰의 鹽水浸透防止工法에 관한 研究

Basic study for construction methods of salino water protection for Estuary barrier.

崔 榮 博*
Choi, Young Bak

林 炳 祚***
Lim, Byung Jo

ABSTRACT

The purpose of this paper is to provide basic data for construction methods of leakage pretaction for estuary barrier which is constructed to in take restoration water from irrigative use and a river flow in its ultimate dsicharge to ward to sea,

The water, accordingly, has reviewed the discrepanci between theories and experiments based on the hydraulic analysis of ground water through a series of sourveys on equi-potential line of seepage flow and a series of some experiments.

apparently, however, the research results herein might reflect in some part not more than inference since those experiments are not conducted in a real foundation but from an indoor experiment or calculation, conclusion in brief are itemized here-under.

1. small-scale barrier require cut-off wall, which should reach the complete impereable layer,
2. Duplication barrier is provided effective in protection saline water seepage.
3. a barrier with broad crest might enable protection of massive seepage by fresh water lens formed from precipitation.

要 旨

本 論文은 河口에서 無爲放流되는 農業用水의 還元 水나 洪水流量을 捕捉하기 위하여 建設되는 河口堰 에 있어서 바다로부터 浸透하는 鹽水防止을 위한 基礎 工法資料를 提供하기 위한 것이다. 그래서 本論文은 河口堰이나 堤防을 통한 海水의 浸透를 防止하기 위하 여 먼저 地下水流의 堤體浸透에 대한 水理解析과 몇가 지 實驗을 통하여 等포텐셜線의 計算 및 作圖로 理論 과 實驗의 差異를 明確히 하고져 하였다.

本研究은 모두 室內 小規模의 實驗 및 基礎的인 計算結果의 檢討이기에 推論의 域을 벗어 날수 없으나

※ 本會副會長·高麗大理工大教授·理博·技術士

※※ 正會員 " " "

대체로 아래와 같은 結論에 到達할 수 있었다.

첫째로는 堤體斷面이 小規模인 경우는 止水壁을 設置해야 하는데 止水壁이 완전한 不透水層까지 달하지 않으면 止水效果는 없는 것이고,

둘째로는 2重 堤體 斷面인 경우에 鹽水 浸透防止는 效果的이며,

세째로는 넓은 마루목을 가진 河口堰인 경우에는 降雨로 形成된 淡水렌즈로서 浸透를 大幅 防止 할수 있는 點 등이다.

1. 序 說

河口堰에 의한 河口湖는 從來뎨등 河川開發施設로서 河川의 上, 中流로부터 豐水時의 물을 貯溜하여 渴水 時에 補給하는 方法을 더욱 擴張하여 河口部 또는 바

다안에貯水池를設置해서 그目的을달성하고자하는것이다. 즉, 河口部에서鹽水の混合으로淡水로서의이용가치가상실된물, 예컨대 바다로無効放流되는農業用水의殘水나下水處理放流水 및 河川低水流量을集水해서再利用하는計劃이되기에 물의高度利用面에서보면 매우有効한水資源開發施設이되는것이다. 장래 河川上流部의多目的開發의進展으로有利한地點이감소하고또한農業用水의合理化나河川의高度利用이요청되는外國傾向에서나또한근자政府가추진하는四大江綜合開發計劃에있어서河口堰의開發促進은水資源의有効利用面에서보건데매우바람직한것이다.

河口堰에의한新規利水의水資源을確保코져하는構想은특히새로운것이아니다. 農業用水開發을目標로한和蘭의Delta plan, 日本의八郎瀉, 上水道水源을目的으로한香港의plover cove 등世界各國에서벌써河口湖가建設된바있는데, 앞으로埋立에의하여造成된臨海工業團地에서의물需給의緊迫性을생각할때이計劃이우리나라에도所望스러운것이다.

따라서河口湖開發에있어서貯水된淡水가鹽水の滲透로어떻게그鹽分濃도가上昇하는가혹은어떤工法을사용하면그上昇을防止할수있는가를正確히檢討하는것은매우중요한技術的對策이된다. 河口湖는곧자그대로河口部나海岸線근처에건설되며豐水期의물을貯溜하여渴水期에소비코져하는것이므로河口湖水位가周邊의海水位보다높게되는일은적다. 따라서거의常時河口湖內水는海水의浸透에의하여鹽分濃도가上昇하는危險性을가지며有効貯水量이증가할수록또한河口湖水位가低下하는期間만큼그危險도가높다고보지않을수없다. 그래서鹽分濃도상昇防止對策으로서本論文에서는그림-1과같은河口湖의池內側에비닐製膜을被覆하고나아가서는그膜保護를위하여얇은土砂層으로被覆하는것이나그림-2와같이池內의濃도分布를調査하여池底의高濃도의海水를펌프로써排除하는것도생각될수있지만本論文에서는主로鹽水浸透防止工法으로서아래와같은3工法에대하여그基礎理論의展開와計算 및 實驗結果檢討를하기로하였다.

- (1) 廣幅堤防工法
- (2) 止水壁工法
- (3) Water curtain(물장막)工法

2. 廣幅堤防工法の理論과檢討

堤體幅이넓게되면透水經路가길게되어堤體 및 地盤內에생기는浸透流의動水傾斜가감소하므로河口

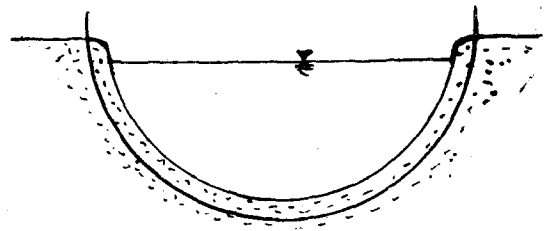


그림-1

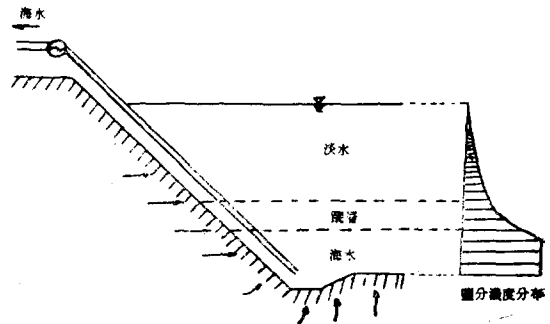


그림-2

湖에대한浸透流量은감소한다. 거기예다浸透流量을감소시키는作用으로서의降雨의영향이생기게된다.

降雨는地表面부터浸透하여地盤內에淡水를보급하는作用을한다. 이降雨에의하여供給되는地下水는比重이무거운鹽水위에놓여소위淡水렌즈를形成하여鹽水地下水面을아래方向으로밀어내준다. 이現象은海岸線에발달한砂丘아래, 降雨에의하여形成된淡水렌즈가海水의內陸側浸透를防止하고있는것이和蘭海岸에서實證되고있다. 적당한幅의堤防을設置하므로써貯水池의汚染이防止되면Sheet pile 등의止水壁에의하여浸透水を차단하는것보다그工法이훨씬유리하다.

필요한堤防幅을決定하는데는試錐 및 Sounding 등土質調査 및 土質試驗으로堤體와地盤의調査資料, 河口湖의水位變動을표시하는水文資料를사용하여먼저堤體內의浸透流의運動을조사하여야한다. 그런데堤體內의浸透流運動은鹽水와淡水의比重이다른流體가서로접하고거기예다降雨에의한補給의영향도보태어서매우복잡한非正常運動을한다고생각되므로明確한解明은곤란하다. 따라서여기서는河口湖堤防의堤體 및 地盤內의浸透流의檢討에앞서서地層構成 및 境界條件을매우單純化하여計算 및 模型實驗을檢討하여그現象의基礎的인因과을시도하였다.

- (1) 定常流로취급할경우의堤體內浸透流, 廣幅堤를築造할경우에堤體內에생기는浸透流은

매우 복잡하며 일반적으로 解析이 곤란하다.

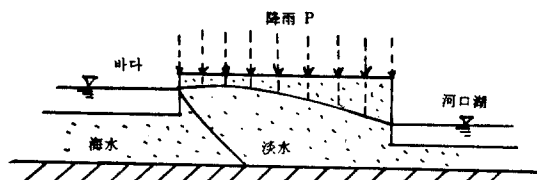


그림-3

따라서 문제를 單純化하기 위하여 上部 모래층만 생각하고 이것도 均質한 모래층으로 가정한다. 또한 실제의 堤體의 양측에는 比重이 매우 다른 淡水와 海水가 있으므로 浸透現象은 매우 복잡하나, 첫 단계로서 密度流은 생각하지 않고 보통의 河川堤防의 漏水와 같이 물만의 浸透流이라고 생각하며 定常流로서 취급하면 境界條件은 그림-4와 같이 되며, 만일 Dupuit의 假定이 성립한다고 하면 다음과 같은 式이 유도된다.

Darcy의 法則에 따라

$$Q = -kh \frac{dh}{dx} \dots\dots\dots (1)$$

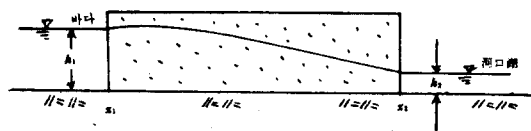


그림-4

또 連續條件에서

$$\frac{dQ}{dx} = 0 = -\frac{1}{2}k \cdot \frac{d^2(h^2)}{dx^2}$$

$$\frac{d^2(h^2)}{dx^2} = 0$$

바다의 水位를 h_1 , 河口湖의 水位를 h_2 라고 하면 境界條件은 $x=x_1$ 에서 $h=h_1$, $x=x_2$ 에서 $h=h_2$ 이다... (2) 式의 一般解는

$$h^2 = c_1x + c_2 \text{ 이므로}$$

境界條件을 생각해서 풀면

$$C_1 = \frac{h_1^2 - h_2^2}{x_1 - x_2}, C_2 = \frac{x_2 h_1^2 - x_1 h_2^2}{x_2 - x_1} \dots\dots\dots (3)$$

따라서

$$\frac{h^2 - h_2^2}{x - x_2} = \frac{h_1^2 - h_2^2}{x_1 - x_2} \dots\dots\dots (4)$$

로 된다.

그위에 다시 降雨가 있어서 地表面부터의 浸透水가 地下水로서 補給되는 경우 連續條件은 다음과 같다.

$$\frac{dQ}{dx} = P = -\frac{1}{2}k \cdot \frac{d^2(h^2)}{dx^2} \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{d^2(h^2)}{dx^2} = -\frac{2P}{k} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, P; 降水量

(6)式을 풀면

$$h^2 = -\frac{P}{k} x^2 + c_1x + c_2 \dots\dots\dots (7)$$

같은 境界條件을 주면

$$C_1 = \frac{h_1^2 - h_2^2}{x_1 - x_2} + \frac{P}{k} (x_1 + x_2)$$

$$C_2 = \frac{h_2^2 x_1 - h_1^2 x_2}{x_2 - x_1} - \frac{P}{k} x_1 x_2 \dots\dots\dots (8)$$

이것을 (7)식에 대입하면

$$h^2 - h_1^2 = -\frac{P}{k} (x - x_1)(x - x_2) + \frac{h_2^2 - h_1^2}{x_2 - x_1} (x - x_1) \dots\dots\dots (9)$$

을 얻는다.

바다側의 水位와 河口湖水位의 差가 크지 않을 경우는 $h_1 \approx h_2$ 따라서 $h \approx h_2$ 로 간주할 수 있다.

$$\frac{h_1 + h_2}{2} = H \text{로 하면}$$

$$h - h_1 = -\frac{P}{2Hk} (x - x_1)(x - x_2) + \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} (x_2 - x_1) \dots\dots\dots (10)$$

堤體내에서 地下水水位가 가장 높게 되는 位置를 구하기 위하여 (9)식을 微分하여 정리하면

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} + \frac{(h_2^2 - h_1^2)k}{2P(x_2 - x_1)} \dots\dots\dots (11)$$

이位置를 境界로 하여 地下水는 바다側과 貯水池側의 兩方向으로 流動하는 것이 된다. 다시 말하면 堤體幅내에 x 가 존재하면 바다側에서 河口湖側으로 地下水의 流動은 없는 것이 된다.

단, 密度流에 대하여는 고려하지 않았으므로 海水의 浸透에 대하여는 적용될 수 없다고 생각 된다.

x 地點의 地下水 流量 Q 는 다음식과 같다.

$$Q = -kh \frac{dh}{dx} = -\frac{k}{2} \frac{k_2^2 - h_1^2}{x_2 - x_1} + \frac{P}{2} (2x - x_1 - x_2) \dots\dots\dots (12)$$

(2) 非定常流로 취급할 경우의 堤體內浸透流.

실제의 河口湖 堤防에서는 바다의 潮汐이나 河口湖水位의 變動때문에 地下水는 當然히 非定常流가 된다.

이 경우도 앞에서 논술한 것과 같은 均一한 地層으로 가정하면 連續條件은 다음과 같다.

$$\lambda \left(\frac{\partial h}{\partial t} \right) \times \left(\frac{\partial u h}{\partial t} \right) = P \dots\dots\dots (13)$$

또 運動方程式은

$$\frac{1}{\lambda g} \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{u}{k} \dots\dots\dots (14)$$

여기서 λ : 間隙率

u : x 方向의 流速

일반으로 地下水의 浸透流에서는 左項이 微小하여 省略할 수 있으므로

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

로 되어 Darcy식과 일치한다.

따라서 약식하면

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k}{2\lambda} \frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{P}{\lambda} \dots\dots\dots(15)$$

가 얻어지나, 이것을 풀면 좋은데, 境界條件이 복잡하여 일반적으로 이것을 푸는 것은 곤란하다. 먼저 $x-t$ 平均 數值計算에 의하여 解를 구하기 위해 먼저 階差方程式을 구한다. 이것을 위하여 $x-t$ 平面을 생각하고 距離間隔을 Δx , 時間間隔을 Δt 로 취하여 바둑판 形의 눈을 만든다. 그리하여 微分係數를 有限階差로 置換整理하면 다음식이 구하여 진다. 단, 이 階差方程式의 水位는 H 로 한다.

$$H(t+\Delta t, x) = H(t, x) + \frac{k\Delta t}{2\lambda(\Delta x)^2} [H^2(t, x+\Delta x) + H^2(t, x-\Delta x) - 2H^2(t, x)] + \frac{\Delta t P}{\lambda} \dots\dots\dots(16)$$

따라서 $H(t+\Delta t, x)$ 의 값은 $H(t, x)$, $H(t, x+\Delta x)$, $H(t, x-\Delta x)$ 의 값에서 구할 수 있고 初期値와 境界値가 주어지면 順次的으로 積分을 進행할 수 있다.

(3) 計算事例檢討

전술한 堤體내의 浸透流의 各식을 사용하여 具體的으로 한 假想한 예에 대하여 檢討하여 보기로 한다. 여기서는 海水와 密度의 相異에 의하여 생기는 소위 密度流의 現象은 생각하지 않고 單一流體에 의한 浸透流로서 취급한다.

지금 하나의 事例로, 河口部地盤으로서 地盤表面에 두께 10~15m정도의 모래층이 존재하고 그 아래에 두께 3~4m의 실트層이 이어져 있다고 한다. 이 실트층의 透水係數는 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec 정도 가정하고 모래층과 비교하면 거의 不透水層이라고 생각하여도 좋으므로 계산에는 이層부터 深部에 일어나는 浸透流를 무시하고 여기서 上層部分만 생각한다. 실트層과 上層의 모래층 사이에는 中間粒度組成을 가진 過渡領域의 실트층 細砂가 있으나 계산에는 上部 모래층의 透水係數와 같다고해서 모래층의 두께를 크게 취할수 있다.

여기서는 $k=3.76 \times 10^{-2}$ cm/sec로 가정한다. 그리고 沖積層은 일반적으로 等方性이 아니고 水平方向의 透水係數는 연직방향의 透水係數에 比하여 매우 크므로 여기서는 水平方向의 透水係數가 3.76×10^{-2} cm/sec이라고 생각한다. 그리고 地下水補給의 年間効雨量은 1,280mm를 가정하였다.

計算에 適用될 水位로서 海面에 의한 干滿의 差는 周期가 짧고 一面 河口湖 水位는 長周期로서 크게 變動하므로 각각 一定으로 하는대는 問題가 있다. 그래서 제 1 단계로서 여기서는 浸透流의 概略의 傾向을 調査하므로 海面의 年間平均潮位나 河口湖의 年平均水位를 여기서는 一定하다고 가정하여 檢討하였다. 그림-3 및 4에서

- 즉 海面 平均 潮位: $h_1=16.99$ m
- 貯水池 平均水位: $h_2=16.06$ m
- 透水係數: $k=3.76 \times 10^{-2}$ cm/sec
 $=1.35 \times 10^{-2}$ cm/sec
- 有効雨量: $P=1,280$ mm/year
 $=1.46 \times 10^{-2}$ cm/hr

이들 數值를 사용해서 地下水面의 形狀, 浸透流의 계산예를 표시하면 아래와 같다. 지금 堤防幅을 500m로 하면 (10)式에서

$$h^2 - h_1^2 = -\frac{P}{k}(x-x_1)(x-x_2) + \frac{h_2^2 - h_1^2}{x_2 - x_1}(x-x_1)$$

$\therefore h^2 = 288.66 - 0.000108x^2 + 0.00746x$ 가 되며 계산에서 구한 水面形은 그림-5와 같다. 地下水面의 形狀은 降雨에 의하여 매우 영향을 받으며 堤體中央部에서 약 20cm의 水位上昇이 있는 것을 알 수 있다.

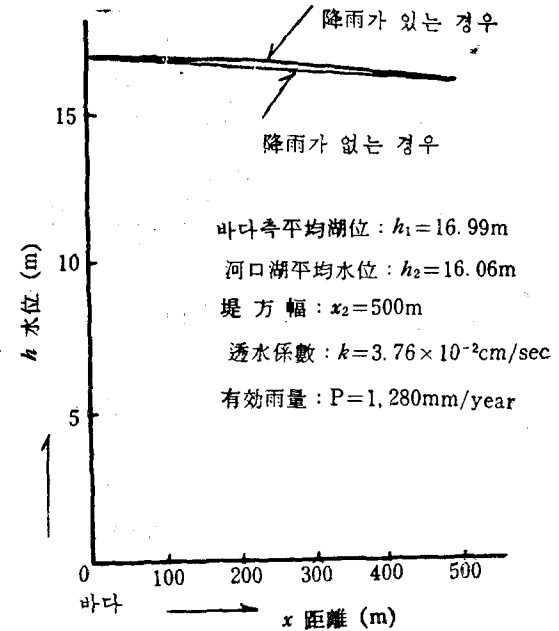


그림-5

다음은 流量인데 이것은 (12)式에 x_1 을 原點으로 取하고 $x=0$ 의 流量을 구하면 바다에서 堤體로 침입하여

오는 流量이 된다. 따라서 앞의 係數를 代入하면

$$Q_{x=0} = -\frac{1}{2} \times 1.35 \times 10^{-2} \times \frac{1606^2 - 1699^2}{x^2} - \frac{1}{2} \times 1.46 \times 10^{-2} x_2$$

$$Q_{x=0} = \frac{20,744.2}{x_2} - 0.0073x_2$$

로 되어 x_2 즉, 堤防幅과 浸透流量의 關係를 알 수 있다.

이상의 계산은 浸透流를 定常流로 가정된 것이다. 실제의 河口湖는 매우 큰 水位變動을 수반하는 것이므로 水位의 振動을 생각할 경우 堤體內에는 非定常運動이 되므로 地下水位가 어떻게 이용되는가를 (15)式에서 계산하여야 하는데 이것을 풀기 위하여 階次方程式으로 變換하여 數值計算을 할 수 밖에 없다.

이 式은 (16)式으로서 주어진다.

階差方程式에 代入할 各係數는 아래와 같이

$$k = 32.4 \text{ m/day}$$

$$\lambda = 0.4$$

$$P = 1,280 \text{ mm/Year } 3.5 \times 10^{-3} \text{ m/day}$$

으로 가정하였으므로 $\Delta x = 50 \text{ m}$ 로 하면

$$\Delta t = \frac{0.4 \times 50^2}{6 \times 32.4 \times 10} \approx 0.5 \text{ day}$$

가 되므로 이를 代入하여 堤防幅 500m의 경우의 非定常運動을 준다. 數值計算에서 $\Delta x = 50 \text{ m}$, $\Delta t = 0.5 \text{ m/day}$ 로 취하여 計算한다. 이것은 實際問題로서 그 數值計算에 많은 努力과 時間을 요하므로 여기서는 計算出은 생략한다. 數值計算結果의 事例를 圖示하면 그림 2-6, 7과 같다.

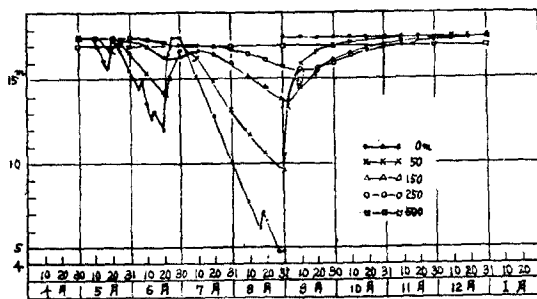


그림-6. 堤防幅 500m 降雨이 있는 경우.

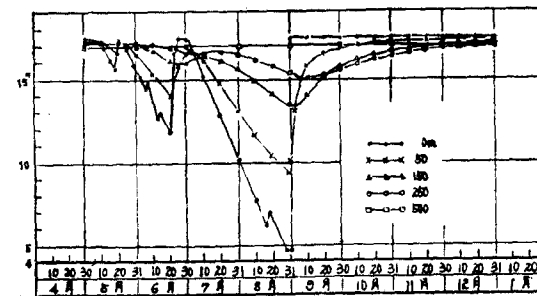


그림-7. 堤防幅 500m 降雨이 있는 경우.

3. 止水壁工法の 理論과 檢討

透水性 있는 地盤 혹은 堤體內部에 생기는 浸透流를 防止할 目的으로 透水層內에 不透水性의 止水壁을 設置하는 것이 가장 널리 사용되는 漏水防止 工法이다.

止水壁으로는 粘土心壁, Sheet pile 박기 現場콘크리트 말뚝의 連續施工등이 있고 기타 grouting이나 특수한 것으로 이코스工法등에 의하여 水密性의 壁을 땅속에 만드는 方法도 있다. 이들 止水工法중 가장 많이 사용되는 것이 Sheet pile박기로서 河川堤防 漏水對策工事に 잘 利用된다.

透水層을 水密性의 止水壁으로서 완전히 縮切하면 漏水는 멈춰지지만 실제로 施工上 問題에 있어서 완벽한 止水는 어렵다. 일반적으로 地盤의 地層構成은 매우 不規則하고 동시에 透水層이 深部까지 미치는 경우가 많다. 따라서 止水壁을 만드는 것은 透水層 全體에 걸쳐서 완전히 施工하는 것은 쉽지 않고 또 止水壁을 가장 확실하다고 생각되는 steel sheet pile로 만든다해도 形成되는 壁은 完全한 水密性은 아니고 이음 눈으로부터 漏水가 예상외로 많다고 알려져 있다. 한편, 臨海工業團地의 工業用水는 거기에다 매우 淸淨한 것이 요구되며 海水에 의한 過度의 汚染은 許容되지 않으므로 止水壁工法을 적용할 경우의 止水效果에 對하여는 詳細한 檢討가 필요하다.

(1) 河口湖의 基礎地盤부터의 浸透理論 止水壁의 浸透防止效果를 檢討하기 위하여는 河口堰 堤體 및 表層의 砂層을 흐르는 浸透水에 대한 止水壁의 效果를 調査하기 앞서서 表層 모래層의 바로 아래에 있는 실트層에서 아래 부분부터의 浸透流에 대한 檢討가 필요하다.

일반으로 河口湖의 基礎地盤은 모래層 및 실트층이 서로 交互되어 深部까지 계속되어 있으므로 만일 表層 모래層 바로 아래에 있는 실트層부터 아래의 浸透流量이 매우 작으면 이層부터 深部に 存在하는 層을 일단 不透水層으로 생각할 수 있어서 문제가 매우 간단하여진다. 이와같은 目的에서 地層을 單純化하여 실트層을 지나서 河口湖 바닥부터 浸透하여 오는 流量을 檢討하여 보기로 한다.

먼저 地層이 水平으로 無限히 넓어져 있다고 가정한다. 또 실트層의 윗 부분에 있는 表層 모래층의 透水係數는 실트層의 그것에 비해서 매우 작으므로 모래층의 存在는 무시된다. 또 堤體를 不透水性이라고 하면 그림-8에서 보는 透水條件이 된다.

따라서 河口湖 바닥으로부터 浸透하여 온 물은 바다 側에서 海底의 실트층을 아래쪽으로 浸透하여 下部모

래를 지나서 오는 것이라고 한다.

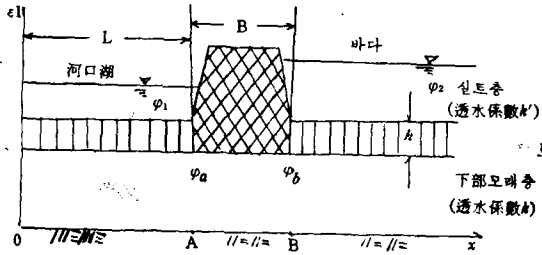


그림-8

그림-8에서 보는 바와 같이 堤體를 완전한 不透水層으로 가정한다. 河口湖내로 浸透하여 온 물은 바다측으로부터 온 海水만이 아니고 內陸側에서도 오는 地下水가 예상되므로 河口湖의 中央을 對稱面으로 생각하여 바다로 부터의 鹽水는 河口湖의 바다側 半정도의 底面에서만 浸出하는 것으로 가정한다.

따라서 下部 모래층내의 浸透流는 Darcy法則에서

$$Q = -kh \frac{d\phi}{dx} \dots\dots\dots(17)$$

連續方程式은

$$\frac{dQ}{dx} = -kh \frac{d^2\phi}{dx^2} = \frac{\phi_1 - \phi}{c}$$

여기서,

$$C = \frac{h^1}{k^1}, \lambda = \sqrt{khc}$$

따라서 다음과 같은 微分方程式을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{1}{\lambda^2}(\phi_1 - \phi) \dots\dots\dots(18)$$

이 方程式의 一般解는

$$\phi_1 - \phi = c_1 e^{x/\lambda} + c_2 e^{-x/\lambda} \dots\dots\dots(19)$$

지금 A의 領域을 생각하면 앞에서 논술한 境界條件은 다음과 같이 주어진다.

$$x=0 \text{ 일 때 } \frac{d\phi}{dx} = 0$$

$$x=A \text{ 일 때 } \phi = \phi_A$$

이것을 (19)式에 代入해서 풀면 OA사이의 任意地點에서의 流量은

$$Q_x = \frac{kh(\phi_1 - \phi_A)}{\lambda} \tanh \frac{x}{\lambda} \dots\dots\dots(20)$$

A地點의 流量은

$$Q_A = \frac{kh(\phi_1 - \phi_A)}{\lambda} \tanh h \frac{L}{\lambda} \dots\dots\dots(21)$$

다음에 B부터 바다 方向으로 ∞의 領域을 생각한다. 境界條件은

$$x=L+B \text{ 일 때 } \phi = \phi_B$$

$$x=\infty \text{ 일 때 } \phi = \phi_2$$

따라서 (19)式에 代入해서 任意地點의 流量을 求하면

$$Q_x = -\frac{kh}{\lambda} (\phi_2 - \phi_B) e^{-\frac{x-(L+B)}{\lambda}} \dots\dots\dots(22)$$

B地點의 流量은

$$Q_B = -\frac{kh}{\lambda} (\phi_2 - \phi_B) \dots\dots\dots(23)$$

또한 AB領域의 浸透流量은 堤體가 不透水性이므로 一定하며

$$Q_0 = kD \frac{\phi_A - \phi_B}{B} \dots\dots\dots(24)$$

$Q_A = Q_B = Q_0$ 이므로 (21), (23), (24)式으로 부터 ϕ_A , ϕ_B 를 求하면

$$\left. \begin{aligned} \phi_A &= \frac{(\phi_2 + \phi_1) \tanh \frac{L}{\lambda} + \lambda \phi_2}{\lambda + (B + \lambda) \tanh \frac{L}{\lambda}} \\ \phi_B &= \frac{(B \phi_2 + \lambda \phi_1) \tanh \frac{L}{\lambda} + \lambda \phi_2}{\lambda + (B + \lambda) \tanh \frac{L}{\lambda}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(25)$$

透水層내의 任意地點의 水頭는 다음 式으로 주어진다.

$$0 < x < L$$

$$\phi_1 - \phi = \frac{(\phi_1 - \phi_A) \text{Cosh} \frac{x}{\lambda}}{\text{Cosh} \frac{L}{\lambda}}$$

$$L < x < L+B$$

$$\phi = \frac{\phi_B + \phi_A}{B} (x-L) + \phi_A$$

$$L+B < x$$

$$\phi_2 - \phi = (\phi_2 - \phi_B) e^{-\frac{x-(L+B)}{\lambda}}$$

(2) 事例研究의 檢討

그림-8에 있는 各記號에 對한 數值를 利用하여 河口湖 基礎地盤부터의 浸透流量을 計算하여 보기로 한다.

지금 그림-8에 있어서 $h^1=4.62\text{m}$, $h=7.22\text{m}$, $B=75\text{m}$, $\phi_1=4.72\text{m}$, $\phi_2=16.99\text{m}$ 및 $L=300\text{m}$ 로 가정하고 透水係數를 $k^1=1 \times 10^{-6}\text{cm/sec}$ 로 가정하면

$$C = \frac{h^1}{k^1} = 4.62 \times 10^8 \text{sec}$$

$$\lambda = \sqrt{khc} = 1.72 \times 10^4$$

또 ϕ_A 및 ϕ_B 는 (25)式에서

$$\phi_A = 10.04\text{m}$$

$$\phi_B = 12.06\text{m}$$

가 되며 (25)式을 利用하여 임의 장소의 ϕ 가 求하여진다.

모래層內에 생기는 浸水流의 水頭分布를 도시하면 그림-9와 같다.

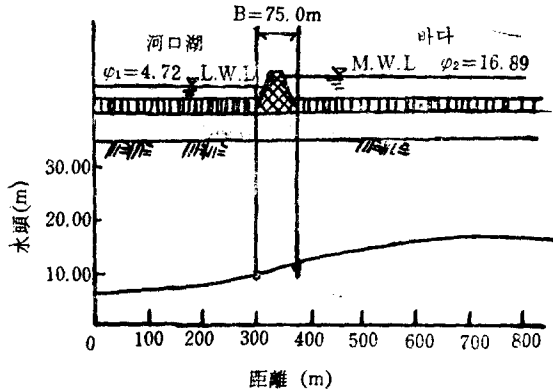


그림-9

또한 바다측부터 河口湖로 향하여 흐르는 單位幅당의 浸透流量은 (23)式에서

$$Q_B = -\frac{kh}{\lambda} (\phi_2 - \phi_B)$$

$$= -\frac{10^{-3} \times 7.22}{1.72 \times 10^4} (16.99 - 12.06)$$

$$= 2.07 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$$

으로 되어 浸透流量은 河口湖와 바다의 水位差가 매우 큰 경우에 있어서도 매우 적고 따라서 실트층보다 아래에 있는 地層을 지나서 河口湖로 流入하는 海水는 무시하여도 좋다는 것을 의미한다. 그러나 이계산에서는 실트層이 無限이 퍼지고 砂層된면을 均일한 두께로서 덮어쓰고 있다는 가정이 있으므로 실제문제 적용에 있어서는 실트層의 存在를 잘 확인하지 않으면 안된다.

(3) 止水壁의 施工深度와 止水効果의 檢討

透水層內에 止水壁을 만들고 浸透를 防止하는 경우의 止水壁의 施工深度와 止水效果를 明確히 하기 위하여 電氣相似 模型을 사용하였다.

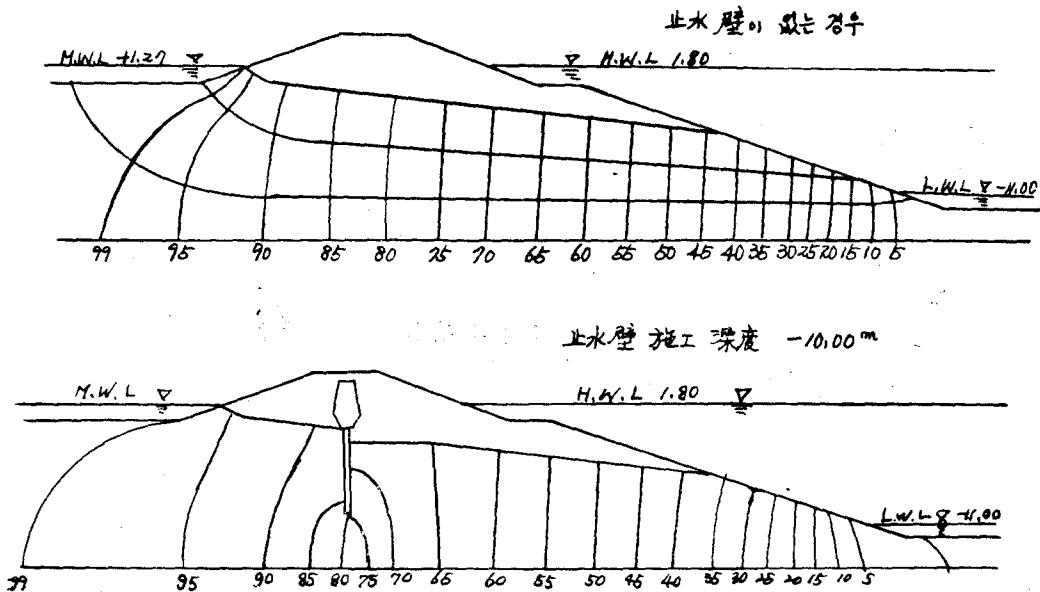
實驗에서 求한 等포텐셜 線을 도시한 것은 그림-10이다. 여기서 止水壁의 施工深度의 增大와 함께 이에 對應해서 等포텐셜의 位置가 바다側으로 移動하고 Sheet pile 前面과 背面의 水位差가 漸次 크게 되는 것을 알았다.

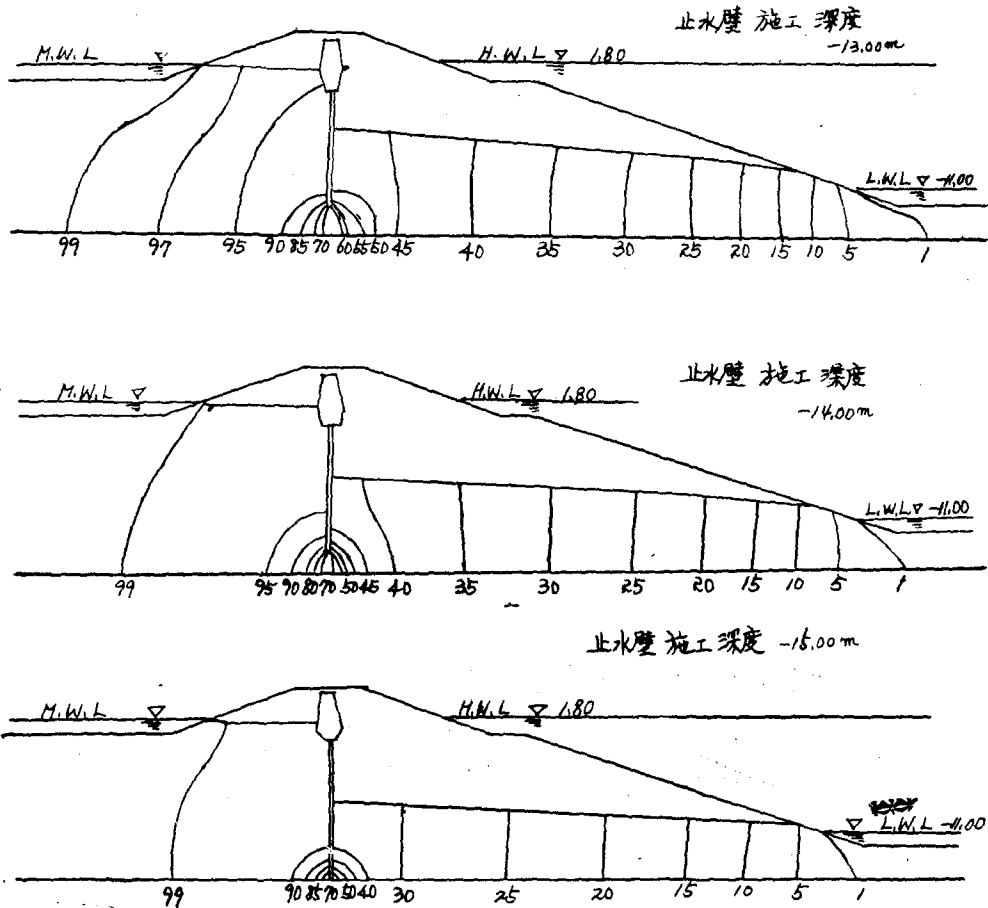
4. Water Curtain 工法의 理論과 檢討

河口湖가 海水浸透에 의하여 汚染되는 것을 防止하는 工法의 하나로서 河口湖周邊의 堤防 혹은 地盤內의 地下水水位를 人爲的으로 上昇시켜 逆으로 堤防側에서 바다로 向하여 흐르는 地下水 浸透를 일으키는 方法이 있다.

河口堰 周邊의 地下水水位를 높게 하자면 地盤內에 淡水를 補給할 需要가 있으며 이까닭에 堤防을 2重으로 만들고 堤防 사이로 淡水를 흐르게 해서 水路 바닥부터 물을 地盤內로 浸透시켜 地下水水位를 필요한 높이로 유지하는 方法, 이와함께 堤體幅을 충분히 넓게 취하여 降雨를 堤體內部로 浸透시켜 필요한 地下水水位를 유지시키는 方法등이 있다.

어느 것이나 堤體 및 基礎地盤의 透水層內에 淡水를 계속적으로 보급해서 所定場所에 淡水의 地下水 領域을 形成시켜 이것에 의하여 海水侵入을 防止하고자 하는





思考方式이다.

즉, 河口湖 周圍에 淡水의 water Curtain을 쳐놓는 것이다. 透水層이 상당히 깊어도 water Curtain을 충분한 크기까지 발달시켜서 그 下端部를 地盤內의 不透水層까지 도달시켜 鹽水의 浸透를 완전히 防止코져 하는 것이다.

water Curtain을 만드는 方法에는 注入孔(recharge well)을 사용하는 方法도 있다.

和蘭의 zuider海灣이나 日本 八郎瀉干拓 工事에는 堤防을 2重으로 만들고 그 사이에 淡水를 貯藏하여 水路바닥 및 側壁으로부터 地盤內에 물을 계속적으로 補給하여 淡水의 Curtain을 形成하는 2重堤防水式이 鹽水防止對策으로 採用되어 큰 效果를 發揮하고 있다. 하지만 이 2重堤防工法은 土工量을 적게하고 工費를 節減하는 意味에서 될 수 있는 대로 水路幅을 적게하는 것이 所望되며 2重堤防이라기보다 오히려 幅이 넓은 堤體의 中央에 水路를 開鑿한 것으로 생각되는 規模로 하였다.

이 工法에는 여러가지 檢討할 點이 있지만 浸透에관

한 것에 問題點을 좁히면 形成되는 water Curtain의 規模, 鹽水浸入을 防止하는데 필요한 水路水面의 水位 및 流量등이다.

流量에 있어서는 地盤으로 浸透한 물의 몇 %가 河口湖로 還元되고 그 나머지 몇%는 바다로 流入되어 損失水量이 되는가 등이 중요한 檢討 事項이 될 것이다.

(1) 降雨의 補給에 의한 Water Curtain理論,

a) 密度差를 무시한 경우

廣幅 堤防으로 河口湖를 建設할 경우 堤防幅이 크므로 動水傾斜가 작기되어 當然히 海水의 浸透流量은 적게 된다. 그래서 堤防위에 내린 降雨가 땅속으로 浸透하고 地下水面에 도달할 때 이 降雨의 補給이 충분하면 地下水面의 形狀은 窪 方向으로 凸形이 되어 雨水가 河口湖側은 물론 바다側을 向하여 流出한다.

즉, 雨水의 補給에 의하여 생긴 動水傾斜때문에 海水는 堤防內로 침투하지 못하고 河口湖에서 海水의 浸透우수의 Water Curtain에 의하여 차단된다.

이와같은 water Curtain의 效果는 降雨量, 堤防幅, 바다와 河口湖의 수위차, 밀도차 透水係數등이 諸量에

의하여 결정되는데 여기서는 密度差를 무시한 경우에 대하여 생각한다.

現象을 간략화한 것이 그림-11이다.

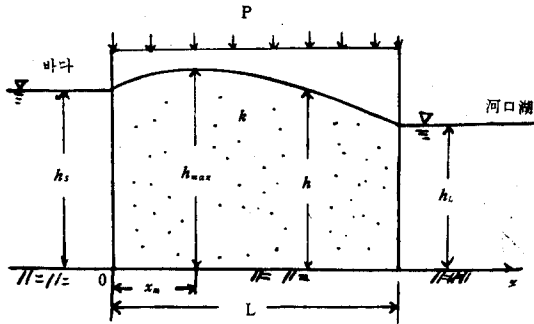


그림-11

水平인 不透水層의 透水係數 k , 幅 L 의 矩形堤防이 있고 계속적으로 單位時間당 P 인 강우의 補給이 있다고 한다. 바다 및 河口湖의 水深은 각각 h_s 및 h_L 이라고 한다.

實際降雨은 연속적이 아니라 여기서는 平均的으로 생각하고 年降雨量 P_0 에서 蒸發 및 表面流出등이 손실을 除外하여 地下水面에 도달한 有效降雨量 P 를 對象으로 한다.

따라서 $P = \alpha P_0$ ($\alpha \ll 1$)(27)

또한 海水位는 潮位變化로 一定하지 않으나 堤防幅이 크게되면 그 영향은 적으므로 대략 平均 海面高를 취하여도 지장이 없다.

河口湖水位는 變動하므로 危險側條件으로서 最低水位(LWL)를 취한다.

淡水나 海水의 밀도차를 무시하고 Darcy法則 및 準一樣흐름의 假定이 成立한다고 하면 運動方程式은

$$U = -k \frac{dh}{xd} \dots\dots\dots(28)$$

連續方程式은

$$\frac{d(uh)}{dx} = \frac{dQ}{dx} = P \dots\dots\dots(29)$$

여기서 u : 浸透流速

h : 任意點水深

Q : 單位幅當 流量

(28)식을 (29)식에 代入하면

$$\frac{d^2h^2}{dx^2} = -\frac{2P}{k} \dots\dots\dots(30)$$

(30)식을 積分하여 境界條件 $x=0$ 에서 $h=h_s$, $x=L$ $h=h_L$ 을 代入하여 정리하면

$$h^2 = h_s^2 + \frac{P}{k}(L-x)x - \frac{h_s^2 - h_L^2}{L}L \dots\dots\dots(31)$$

또한 $Q = uh = -\frac{k}{2} \frac{ah^2}{\alpha x}$ 이므로

(31)식에서

$$Q = \frac{P}{2}(2x-L) + \frac{k(h_s^2 - h_L^2)}{2L} \dots\dots\dots(32)$$

(32)식에서 $Q=0$ 인 위치 x_m 로 할때 堤體內 水深은 여기서 最大值 h_{max} 이 되고 (32)식에서

$$x_m = \frac{L}{2} - \frac{k(h_s^2 - h_L^2)}{2PL} \dots\dots\dots(33)$$

이와같은 x_m 이 堤體內에서 存在하기 위하여는 $h_s > h_L$ 을 고려하면 $\frac{L}{2} > x_m > 0$ 로 되고 위험측의 條件으로서

$$x_m = \frac{L}{2} - \frac{k(h_s^2 - h_L^2)}{2PL} > 0$$

$$\therefore L > \sqrt{\frac{k}{P}(h_s^2 - h_L^2)} \dots\dots\dots(34)$$

降雨의 補給을 고려한 경우 (34)식은 海水의 浸透를 許容하지 않는 廣幅堤의 堤防幅을 주는 條件式이다.

또, (32)식에서 $x=0$ 에 있어서 流量을 Q_0 로 하면

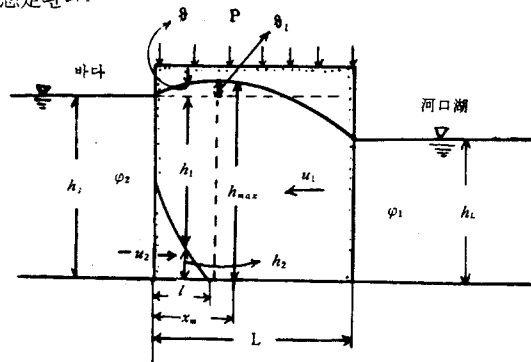
$$Q_0 = \frac{k(h_s^2 - h_L^2)}{2L} - \frac{PL}{2} \dots\dots\dots(35)$$

(35)식에서 $Q_0 > 0$ 이면 海水浸透 流量을 표시하며 따라서 海水가 浸入하지 않는 條件은 $Q_0 < 0$ 이다.

b) 密度差를 고려한 경우

海水와 淡水에서 密度差가 있는 까닭에 降雨가 바다側으로 浸出하는 경우에도 海水는 下層에서 그림-12와 같이 鹽水 격쇠를 形成한다고 생각된다.

降雨의 補給이 적게 되면 x_m 의 位值까지 도달된다고 想定된다.



만일 降雨의 補給이 적게 되면 격쇠는 x_m 을 超越하여 成長하게 되는데 이렇게 되면 격쇠의 先端부근에서 動水傾斜는 河口湖를 向하여 傾斜하고 있으므로 격쇠를 밀어올리는 힘은 전혀 작용하지 않게 된다.

따라서 海水는 河口湖를 向해서 정상적으로 流入하게 된다.

즉 密度差의 영향을 고려하면 單一流體로서 구한 경우보다 더욱 海水가 河口湖로 浸入하기 쉽게 되는데

이와같은 경우의 water curtain效果에 대하여 檢討가 필요하다.

地下密度流의 基本式은

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -k \frac{d\zeta}{dx} \\ U_2 &= -k\{(1-\epsilon)\frac{d\zeta}{dx} + \epsilon\frac{dh_2}{dx}\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(36)$$

正常運動에 作用하는 連續方程式은

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\{U_1(h_1+\zeta)\}}{dx} &= P \\ \frac{d(U_2h_2)}{dx} &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(37)$$

여기서

水深 : $h_1 + \zeta$ h_2
 流速 : U_1 U_2
 密度 : ρ_1 ρ_2

海面은 基準으로 취한 地下水面높이 : ζ

$$\epsilon = \frac{\Delta\rho}{\rho_1} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1}$$

지금 $0 < l < x_m$ 의 범위에서 鹽水격퇴가 停止하여 平衡狀態를 유지한다고 하면 下層에서는 $U_2=0$

그래서 $h_2 = h_1 + h_2$ 를 고려하면 (36)식의 제 2 식에서

$$\zeta = \frac{\epsilon}{1-\epsilon} h_1 = \epsilon h_1 \dots\dots\dots(38)$$

윗식이 Herberg의 條件式이다.

$0 < x < l$ 의 領域에 作用하여 (36) 및 (37)의 각 제 1 식과 (38)식을 사용하여 U_1 및 h_1 을 소거하면 $-\frac{1+\epsilon}{2\epsilon} k \frac{d^2\zeta^2}{dx^2} = P$

윗식을 積分하여 境界條件 $x=0$ 에서 $\zeta=0$, $x=l$ 에서 $\zeta=\zeta_2$ 을 代入하면

$$\zeta^2 = \frac{N\epsilon}{k(1+\epsilon)}(l-x)x + \frac{\zeta_2^2}{l}x \dots\dots\dots(39)$$

여기서,

ζ_1 은 격퇴 失端에서의 ζ 의 값이고 $\zeta_1 = \epsilon h_s$ 로 된다.

한편 $l < x < L$ 의 領域에서는 격퇴가 存在하지 않으므로 單一流로서 취급 가능하다.

즉 (32)식이 基本式이 되므로 이것을 積分하여 境界條件 $x=l$, $h=h_s + \zeta_1 = (1+\epsilon)h_s$ $x=L$ 에서 $h=h_L$ 을 고려해서 積分상수를 결정하면 다음식이 成立한다.

$$h_2 = (1+\epsilon)^2 h_s^2 + \frac{P}{k}(L-x)(x-l) - \frac{(1+\epsilon)^2 h_s^2 - h_L^2}{L-l}(x-l) \dots\dots\dots(40)$$

하층의 海水가 河口湖에 流入하기 위해서는 先端이 地下水面의 最高位置 x_m 보다 바다측에 停止하고 있어야 한다. 따라서 x_m 은 $l < x_m < L$ 의 범위로 볼 수 있으므로

로 (40)식을 積分하여 x_m 의 값을 求한다. 즉

$$\frac{dh^2}{dx} = -\frac{P}{k}\{2x + (L+l)\} - \frac{(1+\epsilon)^2 h_s^2 - h_L^2}{L-l} = 0$$

$$\therefore x_m = \frac{L+l}{2} - \frac{k\{(1+\epsilon)^2 h_s^2 - h_L^2\}}{2P(L-l)} \dots\dots(41)$$

격퇴의 先端을 초월하지 않을 조건은 $l < x_m$ 이든가 (41)식으로부터

$$(L-l) > \sqrt{\frac{k(1+\epsilon)^2 h_s^2 - h_L^2}{P}} \dots\dots\dots(42)$$

(42)식에 있어서 l 은 未定이므로 가장 危險한 狀態는 격퇴의 先端이 x_m 과 一致할 때이다. 즉 이때는 地下水面의 最高인 位置부터 바다側에서는 (39)식이 河口湖側에서는 (40)식이 각각 성립하고 모두 이 位置에서 左邊의 微分계수가 0이 된다. 그래서 (39)식에서

$$\frac{d\zeta^2}{dx^2} = \frac{-P\epsilon}{k(1+\epsilon)}(2x-l) + \frac{\epsilon^2 h_s^2}{l} = 0$$

로 하고 x_m 을 求하면

$$x_m = \frac{l}{2} + \frac{k\epsilon(1+\epsilon)h_s^2}{2Pl}$$

그런데 限界狀態에서는 $l = x_m$ 이므로

$$l = \sqrt{\frac{k\epsilon(1+\epsilon)}{P}} h_s \dots\dots\dots(43)$$

(43)식을 (42)식에 代入하여 l 을 소거하면 密度差를 고려한 경우의 條件式이 다음과 같이 구하여 진다.

$$L > \sqrt{\frac{k\{(1+\epsilon)^2 h_s^2 - h_L^2\}}{P}} + \sqrt{\frac{k\epsilon(1+\epsilon)}{P}} h_s \dots\dots(44)$$

(44)식은 堤防幅에 注目한 條件式이나 無次元表示를 행하고 $\epsilon=0.02$ 로 하면

$$\sqrt{\frac{P}{k}} \frac{L}{h_s} > \sqrt{1.04 - \left(\frac{h_L}{h_s}\right)^2} + 0.14 \dots\dots\dots(45)$$

密度差를 無視한 경우는 (34)식에서 다음과 같이 표시된다.

$$\sqrt{\frac{N}{k}} \frac{L}{h_s} > \sqrt{1 - \left(\frac{h_L}{h_s}\right)^2} \dots\dots\dots(46)$$

(2) 事例연구의 檢討

그림-11에 있는 各記號에 대한 數値를 이용하여 密度差를 무시한 경우의 (34)식을 만족시키는 最小堤防幅을 구하기로 한다. 그림-11에 있어서 $h_s=7.11m$ $h_L=5.0m$ 5.5, 6.0, 6.5m $P_0=2,000mm/year=0.62 \times 10^{-5}$ $L=0.1$ $L=0.2$ $k=5 \times 10^{-4}cm/sec$ 로 하면 (34)식을 만족시키는 最小 堤防폭 L_m 는 아래表와 같다.

$h_1(m)$	5.0	5.5	6.0	6.5	
$L_m cm$	$\alpha_1=0.1$	450	404	334	145
	$\alpha_2=0.2$	319	284	237	104

다음에 (45) 및 (46)식을 利用하여 雨水의 water curtain에 의한 海水차단 限制조건을 도시하면 그림-13

3과 같은데 여기서 限界條件 및 密度差의 효과를 알 수 있다.

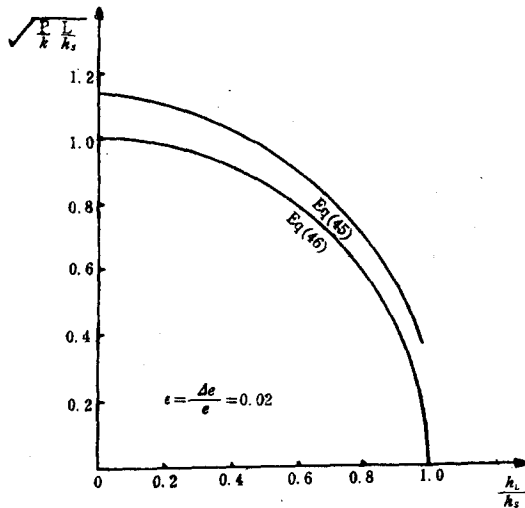


그림-13

(3) 粘性流의 模型實驗 檢討

浸透問題를 푸는데 있어서 境界條件이 간단하고 問題가 단순한 경우에는 浸透流의 基本式을 풀면 가능하지만 좀 복잡해지면 다른 方法에 의존할 수 밖에 없다. 지금, 여기서 생각하는 問題는 海水와 淡水의 流體가 서로 接하는 浸透流이므로 境界條件이 매우 복잡하다. 이렇게 되면 模型實驗을 이용하는 것이 쉽고 目的에 따라 電氣模型 模型等이 사용되고 있다.

粘性流模型은 좁은 간격으로 서로 接하는 2개의 유리벽으로 형성되는 도랑이 模型의 主要部分이 되며 이 도랑중은 粘性이 높은 流體를 흐르게 해서 浸透流의 檢討에 이용한다.

粘性流模型은 H.S. Hele-shaw가 1897~1899年 사이에 여러 形狀의 物體周圍에 생기는 流體의 흐름을 研究한 데서 처음 시작된 것으로 다시 1936년에는 R. Dachler 地下水流에 應用되었는데 이 模型을 Hele-shaw 模型이라고 부른다.

이 原理는 透水層중의 飽和浸透量을 나타내는 식이 2개의 壁으로 形成된 도랑중을 흐르는 粘性流體의 흐름을 나타내는 식과 전혀 相似하다는 것에 基本을 두고 있다.

粘性流模型의 특징으로는 특히 2次元流의 實驗에 適合하다는 것으로 定常流의 경우뿐만 아니라 非定常流의 경우등 모든 浸透流의 實驗에 應用되고 있다. 거기다 다시 海岸地下水의 鹽水와 淡水의 境界문제의 檢討에도 適用되는 例가 있고 앞으로 浸透防止工法으로서 檢討될 2重堤防方式은 模型實驗에도 가장 적합하다.

기타 모래模型에서는 不飽和의 毛管帶가 생겨 現象이 복잡하게 되는데 粘性流模型에서는 自由水面이 매우 명료한 큰 이점이다.

a) 粘性流模型의 相似 縮尺

粘性流體 原理는 전술한 바와 같이 좁은 간격으로 나란한 2개의 壁사이를 흐르는 粘性流와 透水層內를 흐르는 地下水流와 相似性을 나타내는 點에 基因하고 있다.

2개의 壁사이를 흐르는 層流는 2次포텐셜흐름을 形成하여 Navier-Stokes 方程式에 規定된다.

그리하여 이것은 定常流의 경우 Darcy法則에 귀착될 수 있다.

식의 유도는 생략하고 粘性流模型의 2개의 壁사이 간격을 흐르는 粘性流의 平均流速은 다음과 같이 표시할 수가 있다.

$$\left. \begin{aligned} U_m &= -\frac{b_m^2 \rho_m g}{12\eta_m} \frac{\delta h_m}{\delta x_m} = -k_m \frac{\delta h_m}{\delta x_m} \\ V_m &= -\frac{b_m^2 \rho_m g}{12\eta_m} \frac{\delta h_m}{\delta y_m} = -k_m \frac{\delta h_m}{\delta y_m} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(47)$$

여기서 u, v, 는 x, y方向의 速度成分, b는 水路幅, η는 粘性係數, ρ는 密度, Suffix m는 模型을 의미한다.

또 Darcy의 法則에서

$$\left. \begin{aligned} U_p &= -k_p \frac{\delta h_p}{\delta x_p} \\ V_p &= -k_p \frac{\delta h_p}{\delta y_p} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(48)$$

로 표시되므로 粘性流 模型의 $k_m = (b_m^2 \rho_m g) / 12\eta_m$ 과 實物의 透水係數 k_p 는 對應된다.

다음에 模型實驗에 있어서 縮尺決定方式인데 水平인 不透水層에 透水層이 있어서 地下水가 그 사이를 느린 自由水面의 傾斜를 가지고 흐르고 있고 동시에 斷面內의 流速을 均一하다고 가정해도 좋은 경우의 浸透流의 連續方程式은

$$\lambda_p \frac{\partial h_p}{\partial t_p} + \frac{\partial((U_p h_p))}{\partial x_p} = 0 \dots\dots\dots(49)$$

로 된다.

여기서 λ는 間隙率, Suffix p는 m에 대응하는 原型을 의미한다.

地下水의 流速이 느리므로 加速度項을 생략할 수 있을 때 運動方程式은 Darcy의 法則과 일치하며

$$u_p = -k_p \frac{\partial h_p}{\partial x_p} \dots\dots\dots(50)$$

으로 되고 (49), (50)식에서 다음 方程式이 유도된다.

$$\frac{\partial h_p}{\partial t_p} = \frac{k_p'}{\partial \lambda_p} \cdot \frac{\partial^2 h_p^2}{\partial x_p^2} \dots\dots\dots(51)$$

模型에 대하여도 같은 식을 쓰면

$$\frac{\partial h_m}{\partial t_m} = \frac{k_m}{\partial \lambda_m} \frac{\partial^2 h_m}{2x_m^2} \dots\dots\dots(52)$$

이래서

$$\left. \begin{aligned} k_p &= \frac{k_m}{k_r}, & x_p &= \frac{x_m}{x_r} \\ h_p &= \frac{h_m}{h_r}, & t_p &= \frac{t_m}{t_r}, & \lambda_p &= \frac{\lambda_m}{\lambda_r} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(53)$$

으로 하여 (51)식에 대입해서 (52)식과 對比하면 相
法則에 따라 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{h_r}{t_r} = \frac{k_r h_r^2}{\lambda_r x_r^2} = \alpha \dots\dots\dots(54)$$

여기서 α 는 任意의 값을 취할수 있다.

i), 時間의 縮尺:

實驗중의 水位變化의 測定 淡水量的 觀測중에 형편
상 좋은 測定間隔을 조절할 수 있으므로 時間의 縮尺
을 사전에 충분히 檢討해 두지 않으면 안된다.

$$\text{時間縮尺은 } t_n = \frac{\lambda_r x^2 y}{k_r h_r} \dots\dots\dots(55)$$

따라서

$$t_n = \frac{\lambda_{n1} x_r^2 k_p}{\lambda_p h_r k_m} t_p = \frac{12 k_p x_r^2 \nu_m}{g \lambda_p h_r b_n^2} t_p \dots\dots\dots(56)$$

으로 된다. (56)식에서도 보는 바와 같이 模型이 2
개板의 水路間隔 b 를 사용하는 粘性液의 動粘性係數
 ν 를 適宜 선택하므로써 模型實驗이 時間短縮을 조절할
수 있다.

實驗에 가장 편리한 時間을 선정하는 것이 중요하다.

ii) 流量縮尺:

Darcy法則에서 流量縮尺을 구한다. 먼저 실물에 있
어서 透水小流量은

$$Q_{xp} = -k_p b_p h_p \frac{\partial h_p}{\partial x_p}$$

또한 模型에서의 流量은

$$Q_{xm} = -k_m b_m h_m \frac{\partial h_m}{\partial x_m}$$

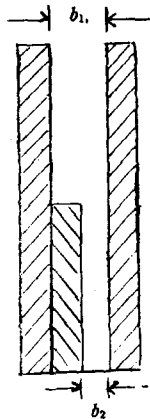


그림-14

$$\text{따라서 } Q_{x_r} = \frac{k_r b_r h_r^2}{x_r} \dots\dots\dots(57)$$

iii) 透水層이 透水性의 다른 層으로 構成되어 있는
경우:

透水層이 透水性이 다른 몇개의 地層으로 형성된 경
우에도 模型에서의 板의 間隙을 部分的으로 변경하므
로써 實物과의 相似性을 성립시킬 수 있다.

보통 그림-14에 표시하는 얇은 板을 도랑중에 집어
넣어서 幅을 감소시킨다. 流量縮尺은 透水係數가 다른
層에서도 같아야 하므로 $(k_r b_r)$ 은 변경되지 않도록 한
다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{k_m}{k_p} \cdot \frac{b_m}{b_p} &= \frac{1}{12} g \frac{b_m^2}{\nu k_p} \cdot \frac{b_m}{b_p} = \text{const} \\ \frac{b_m^3}{k_p} &= \text{const} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(58)$$

이 성립하여야 한다. k_r 을 어느 透水層에 대해서도
같도록 하기 위한 조건으로서 $b_m^2/k_p = \text{const}$ 의 관계가
사용되기도 하나 $k_r b_r$ 을 一定하게하는 방식이 타당하다.

나아가서는 (56)식에서 t_r 등의 透水層에 대해서도 같
게 되도록 하기 위하여 λ_p/b_m 이 동일하게 되지 않으면
안된다. 이 조건은 模型實驗에서 만족되지 않을 때가
많으나 여기에 기인하는 誤差는 작다 透水層의 透水係數

에 있어서 水平方向과 鉛直方向이 다른 경우, 즉 不
等方性 地層의 경우에는 模型의 縱橫의 縮尺을 歪曲시
키면 좋으며 不等方性 地層內의 浸透流의 方程式 k_x
 $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$ 에서 쉽게 다음의 관계식이 구해진
다. 여기서 k_x 및 k_z 는 각각 x 및 z 方向의 透水係數가

$$\frac{k_x}{k_z} = \frac{x_r^2}{z_r^2} \dots\dots\dots(59)$$

iv) 密度가 다른 2 流體의 接觸:

密度가 다른 2 流體가 서로 接觸하여 境界面을 유지
하면서 流動하는 경우 즉, 여기서 취급하는 河口湖 주
변의 提體內의 地下水와 같이 海水의 浸透문제를 模型
實驗하는 경우에는 上述한 模型縮尺과에 다음 條件이
만족되어야 한다.

模型實驗에서 취급하는 領域은 密度가 다른 流體로
서 차지하는 部分이 되는데 어느 流體에 대하여도 地
層이 透水性은 變化하지 않은 것으로 가정한다. 그리
고 透水係數는 流體의 粘性에 逆比例하는 사실에서 다
음식이 성립한다.

$$\left. \begin{aligned} k_{mf} &= \frac{1}{12} g \frac{b m^2}{\nu_{mf}}, & k_{pf} &= C \frac{1}{\nu_{pf}} \\ k_{ms} &= \frac{1}{12} g \frac{b m^2}{\nu_{ms}}, & k_{ps} &= C \frac{1}{\nu_{ps}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(60)$$

여기서 Suffix f 및 s 는 淡水 및 海水를 표시하는
것으로 한다. 따라서

$$\left(\frac{\nu_m}{\nu_p}\right)_r = \left(\frac{\nu_m}{\nu_p}\right)_s \dots\dots\dots(61)$$

이면 $k_r^f = k_r$ 로 된다.

그리고 두 流體의 境界面에 있어서 兩側의 壓力은 같게 되어야 하므로 그림-15에 표시하는 A點에 있어서

$$a_p r_{sp} = (a_p + h'_p) r_{fp} \dots\dots\dots(62)$$

$$\text{혹은 } a_p \delta_p = h'_p \dots\dots\dots(63)$$

여기서 $\delta = \frac{r_s - r_f}{r_f}$

모델에 있어서도

$$a_m \delta_m = h'_m \dots\dots\dots(64)$$

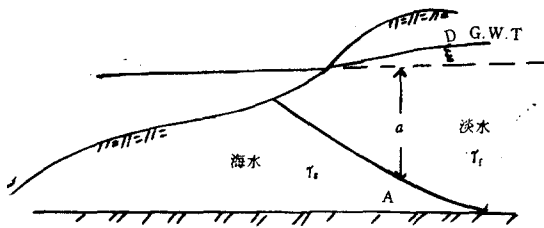


그림-15

따라서 (63), (64)식에서

$$a_r \delta_r = h'_r \dots\dots\dots(65)$$

$a_r = h'_r$ 이므로 두 粘性을 적당히 선정하면 $\delta_r = 1$ 로 되어

$$\left(\frac{r_r - r_s}{r_f}\right)_m = \left(\frac{r_r - r_s}{r_f}\right)_p \dots\dots\dots(66)$$

인 條件이 模型實驗에서 만족되어야 한다.

b) 模型縮尺의 事例研究

模型의 2平行板의 間격은 時間縮尺을 고려해서 $b = 0.3\text{cm}$ 로 정하여 있으므로 模型下部의 透水性이 작은 地層에 대응하는 부분의 2平行板의 間격을 얼마로 할 것인가를 계산하여 본다.

(58)식에서 표시되는 바와같이 $b_m^3/k_p = \text{const}$ 이어야 하므로 지금 第1層 및 第2層을 가정하면

$$\frac{b_m^{31}}{k_{p1}} = \frac{b_m^{32}}{k_{p2}} \text{로 되고}$$

$$\frac{k_{p2}}{k_{p1}} = \frac{b_m^{31}}{b_m^{32}} \text{이어야 한다.}$$

k_{p1}/k_{p2} 를 5로 가정하면 $b_{m1} = 0.3\text{cm}$ 이므로 b 및 ν 를 대입해서 계산하는데 地層마다 k_r 이 달라지므로 實驗에서는 浸透에 지배적인 모래層의 k_m 를 구하여 k_r 을 산출하였다. 動粘性係數 ν 는 $\nu = \eta/\rho$ 로 표시되며 混入 구리세린의 動粘性係數는 각각

$$\nu_1 = \frac{11.3}{1,2636} = 8,943\text{cm}^2/\text{sec}$$

$$\nu_2 = \frac{17.5}{1,2920} = 13,545\text{cm}^2/\text{sec}$$

가 되어

$$k_{m1} = \frac{1}{12} \times 9.8 \times \frac{0.3^2}{8,943} = 0.822\text{cm}^2/\text{sec}$$

$$k_{m2} = \frac{1}{12} \times 9.8 \times \frac{0.3^2}{13,545} = 0.543\text{cm}^2/\text{sec}$$

를 얻는다.

일반으로 연직방향의 透水係數는 수평방향의 그것에 비교해서 작은 것이 보통이며 이 實驗에서는 수평방향만의 透水係數를 생각하여도 문제가 되지 않는다. 模型의 縱橫의 縮尺은 같게 취하여 1/100의 幾何學的의 相似로 하였다. 流量의 縮尺은 $Q_r = k_r a_r x_r$ 로서 주어진다. 두 堤防사이의 水路에서 淡水의 浸透流量이 문제가 되므로 k_r 에는 淡水에 대응하는 濃구리세린의 k_m 를 사용해서 계산을 한다.

$$Q_r = \frac{k_m}{k_p} \cdot \frac{b_m}{b_p} \cdot \frac{x_m}{x_p}$$

$$= \frac{8.22 \times 10^{-1}}{5 \times 10^{-3}} \times \frac{0.3}{1} \times \frac{1}{100} = 0.493$$

또 時間의 縮尺은 (55)식으로서 다음과 같다.

$$t_r = \frac{\lambda_r x_r^2}{k_r h_r}$$

時間縮尺은 주로 海水와 淡水의 境界面의 이동상태를 조사하기 위하여 사용되므로 위 식의 k_r 에는 k_{m1} 와 k_{m2} 의 平均을 사용하였다. λ_p 는 0.4로 가정한다. 따라서

$$t_r = \frac{\frac{1}{0.4} \times \frac{1}{100}}{\frac{0.683}{5 \times 10^{-3}} \times \frac{1}{100}} = 1.83 \times 10^{-4}$$

로 되어 實物에서 1日의 길이는 模型에서 1.58sec 단

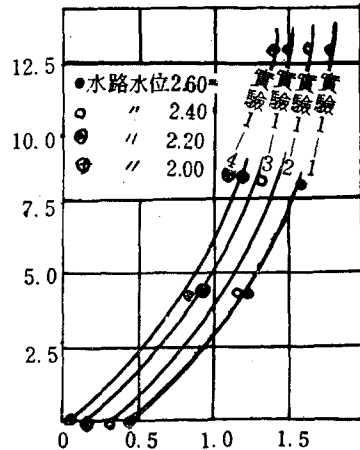
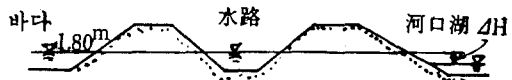


그림-16

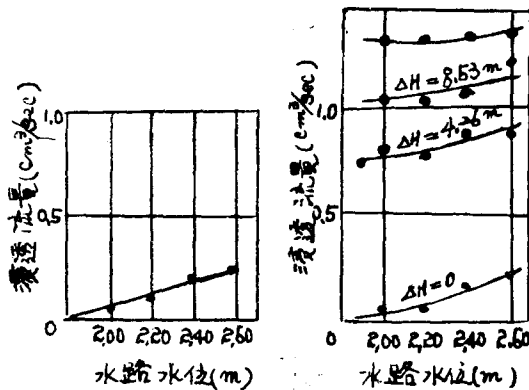


그림 - 17

측되는 것이 된다.

c) 實驗結果

전술한 縮尺으로 도랑間隔을 定하여 實物 1/10의 模型을 製作하고 海水 및 淡水에 相當하는 雪糖混入 구리세린 및 濃구리세린으로 20°C의 一定 溫度下에 몇個 實驗을 계속한 결과 水路 바닥에서 的 浸透流量과 바다 및 河口湖에서 浸透流量은 각각 그림-16 및 17과 같다.

結 論

河口湖를 위한 河口堰동의 堤體設計에 있어서 海水의 浸透流防止를 위한 内外의 몇가지 工法을 생각하여 그 各工法에 대한 水理計算과 模型實驗을 위한 基礎理論 및 그 特徵과 事例研究로서 그 效果를 檢討하였다. 여기서는 주로 計算結果와 簡單한 室內實驗의 檢討이며 특히 우리나라 現場에 있어서 實際地盤을 對象으로 한 調查가 거의 全無하므로 實際比較가 不可能하고 따라서 本研究가 内外文獻에서의 推論의 域을 벗어나지 못한 것을 遺憾으로 생각한다. 推論의 計算 및 實驗檢討에서 導出된 몇가지 結論을 列記하면 다음과 같다.

1. 2重堤防에 의한 鹽水의 浸透防止는 效果的이나 Water Curtain(물장막)이 어느 정도 크기로 成長할 때까지 貯水池내에 많은 鹽水가 流入할 것이다.

2. 넓은 마루를 가진 河口湖 堤防에서는 降雨의 影響이 크고 形成되는 淡水렌즈가 鹽水의 流入을 大幅的으로 防止할 수 있다.

3. 小斷面의 堤防일 경우 止水壁을 設置해야 하는데 止水壁은 완전히 不透水層의 실트層까지 도달시키지 않으면 止水效果는 적다.

4. 淡水렌즈를 發達시키는 데는 相當한 年月이 必要

하다.

5. 止水壁工法보다 淡水의 Water Curtain(물장막)을 形成하는 것이 有利하나 淡水와 鹽水의 境界面의 混合이나 實際地盤에서 Water Curtain이 잘 유지되는가 의 與否의 檢討가 必要하다.

6. 여기서 取扱한 3工法은 가장 一般的인 것으로 다른 工法에 對하여도 施工 및 維持에 兩面에서 綜合的인 檢討가 必要하다.

끝으로 本研究를 위하여 研究費를 支給하여 주신 産學協同財團에게 深甚한 謝意를 표한다.

引用 文獻

- 1) 片岡勘二郎: 木曾川綜合開發, 土木學會誌 Vol.53, No.9, 1968, pp.59~62
- 2) 長尾精: 長良川河口堰計劃의 水文水理調査, 土木學會誌 Vol.53 No.3, 1968, pp.14~18
- 3) Milton E. Harr: Ground Water and Seepage, Mcgraw-Hill Book Co. pp.143~144, 1962
- 4) David K. Todd: Ground water hydrology, John Wiley & Sons Inc., Publishers pp.44~49, 1959
- 5) G. Sonting: Lecture Note on Ground Water Flow, Delft, Holland, 1960
- 6) Roger J.M. DE Wiest: Geohydrology, John Wiley & Sons Inc., 1965
- 7) S. Shima, K. Ogihara: the problems of Seepage flow in the rectangular domain including a wall, "Collecting Paper" Vol. III. Dept. of Civit Eng. Univ. of Japan, 1965
- 8) Polubarinova-Kochima P. Ya.: Theory of Ground water movement, Princeton Univ Press 1962 p.2 15~227
- 9) Henry, H.R.: Salt Intrusion into Fresh-water Aquifers. Jour. Geophysics Res., Vol. 64 No.11, p. 1911~1919, Nov. 1959
- 10) Glover R.E.: The Pattern of Fresh-water in Coastal Aquifer, Journ. Geophysics Res., Vol.64 No. 4, p.457~459 Apr. 1959.
- 11) 山村和也, 高橋淳一: 粘性流模型による 河口貯水池堤防의 浸透流의 檢討, 土木技術資料 Vol.5, No.4, 1963.

參 考 文 獻

1. Baumann, P., Ground-Water movement controlled through spreading, Trans. Amer. Soc. Civil Engrs., Vol. 117 pp.1024~1074, 1952.

2. Baumann, P., Experiments with water barrier to prevent sea water intrusion, Jour. Amer. Water Works Assoc., Vol. 45 pp.521~534, 1953.
3. Biemond, C., Dune water flow and replenishment in the Catchment area of the Amsterdam water supply, Jour. Inst. Water Engrs., Vol.11, pp.195~213, 1957.
4. Muskat, M., The theory of potentiometric models, Trans. Amer. Inst. Min. and Metals, Engrs', Vol. 179, pp. 216~221, 1949.
5. Hele-Shaw, H.S., Stream-line motion of a viscous film, Rep. 68th Meeting British Assoc. for the Advancement Sci., pp.136~142, 1899.
6. Muskat, M., The flow of homogeneous Fluids through porous media, McGraw-Hill, New-York, 763 pp., 1937.
7. Santing, G., Infiltratie en modelonderzoek, Water, Vol. 35, No.21, pp.234~246, The Hague, 1951.
8. Todd, D.K., Laboratory research with ground-water models, Symposia Darcy, Publ. 41, Assoc. Intl. Hydrologie Scientifique, pp.199~206, 1956.
9. Santing, G., A Horizontal Scale Model, Based on the Viscous Flow Analogy, for Studying Ground-water Flow in a Aquifer having Storage, JASH, pp. 105~114 General Assembly, Toronto, 1957.
10. Bear, J., Scales of Viscous Analogy Models for Ground-water Studies, ASCE Journal of the Hydraulic Division, pp. 11~23, 1960.

○ 내재산 내향토는 내손으로 보호하자

○ 살기 좋은 우리고장 재해막고 살아보자

○ 없을때 한탄말고 있을때 아껴두자

○ 오늘의 내핍생활 내일의 안전생활

○ 번영위한 내핍생활 너도나도 앞장서자