

地下水 Model 에 관한 模型試驗方法

An Introduction to the Ground Water Model Test

*金 周 昶
Kim Ju Chang

Summary

Ground water flow can be studied with model test. Model test of ground water works are necessary for economic and safe design of the works. Also influence of the ground water flow to the durability and safety of hydraulic structures can be studied with this model.

a. Sand model; Water flow through porous media is the principle of sand model. Darcy's formula is the basic equation, $q = k \frac{dh}{ds}$. The effect of the ground water flow on the grain system itself is represented with this model only.

b. Hele-Shaw model; In this model use is made of the viscous flow analogy. Viscous fluid such as glycerine flowing through two parallel plates depends on Poiseuille law, $q = -c \frac{dh}{ds}$. The analogue can be used vertically and horizontally.

c. Heat model; This is based on the analogy of the Fourier's law for heat conduction and Darcy's law for ground water flow. Especially unsteady problem can be studied with this model. A difficulty of the construction of this model is the isolation, which has to prevent losses of the heat.

d. Electric model; Ohm's law for electric current is analogous to Darcy's law. Resistance material such as metal foil, graphite block, water with salt added, gelatine with salt added, etc. is connected to electric sources and resistor, and equi-voltage line is detected with galvanometer. NaCl , CuSO_4 , etc. are used as salt in the model.

e. Membrane model; This model is based on the facts that the deflection of a thin membrane obeys Laplace's equation if there is no load in the direction perpendicular to the membrane, and if the deflection is small.

I. 序 論

地下水를 灌溉 또는 其他 用水의 目的으로 획득하기 위하여는, 地下水의 流動狀態를 잘 파악하는것이 重要하다. 한편 構造物의 周圍에서 地下水의 移動關係는 構造物의 수명과 安全한 作用에 긴요한 역할을 한다. 땅속깊이 들어있는 地下水의 流動狀態를 알아내는것은 어려운 일이나 現場測定과 몇가지 地下水에 關한 理論式으로 이것을 推定할수 있다.

한편으로 地下水流에 대한 基本式을 利用하여 地下水 Model을 만들수있다. 土質의 不均質, 不明確한 境界條件등으로 實際現狀과 一致하는것은 어려우나 어느 정도 믿음만한 結果를 얻을수있다. 또한 Model 시험으로 일목요연하게 地下水의 流動狀態를 알아볼 수 있

며 地下水流의 基本理論을 분명하게 이해할 수 있게 된다.

地下水流에 대한 基本式은 Darcy 式, $q = k \frac{dh}{ds}$ 인데 이와 相似性을 가진 法則에 依하여 支配되는 現狀을 利用하여 Model을 만든다. 이들을 우선 종합하면 다음과 같다.

Model 종류	基本式	法 則	備 考
Sand Model	$q = -k \frac{dh}{ds}$	Darcy法則	多孔性物質을 통한 물의 흐름
Hele-Shaw Model	$q = -c \frac{dh}{ds}$	Poiseuille 法則	粘性液體의 흐름
Heat Model	$q = -\lambda \frac{dt}{ds}$	Fourier法則	傳導에 依한 熱의 移動
Electric Model	$i = -\sigma \frac{dv}{ds}$	Ohm 法則	電流의 흐름

* 筆者: 土聯 農業土木研究所

Membrane Model	$T_z = -C \frac{dz}{dx}$	膜의 휘임 (deflection of membrane)
----------------	--------------------------	--------------------------------

上記 表에서 q : 流量, 熱量, dh : 二點間의 水頭差, ds : 二點間의 거리, dt : 二點間의 溫度差, dv : 二點間의 電壓差, k : 透水係數 C, λ, σ 등은 係數이며 T_z 는 다음에 설명한다.

II. Sand Model

多數 粒子의 間隔을 통하여 흐르는 물은 Darcy 法則에 의해 支配되는것을 利用하여 모래로 縮小 Model을 만드는 것이다. Model을 만들때는 모래의 粒度分布가 全體部分에 均等하고 어느部分에 偏重되지 않아야 한다.

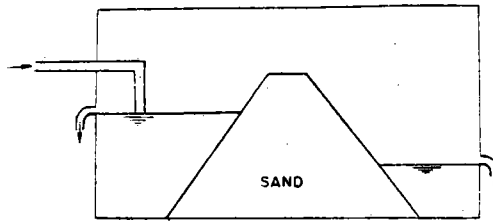


Fig. 1

水頭의 測定은 Piezometer 로, 流線은 물감을 넣어서 알아낸다. 그러나 Piezometer의 設置數가 限定되어있고 물감이 확산하므로 詳細한 測定은 어렵다. 土粒子와 관련하여 地下水流를 고려할때는 Sand Model이 가장 適當하며 물 또는 그 以上の 流體가 관련되거나 自由水面이 있거나 할때 3次元 해석을 하려면 이것을 使用한다. 그리고 毛細管에 의한 影響을 알수있는것이 특징이다.

III. Hele-Shaw Models

粘性流體의 特性을 利用하는 것으로 두개의 平行板 사이에 구리세린 같은 粘性流體가 흐를때는 Poiseuille 法則에 의해 支配된다.

$$q = -c \frac{dh}{ds}$$

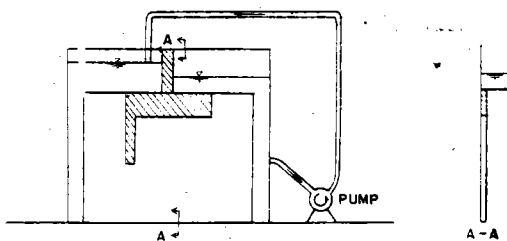


Fig. 2

上式은 Darcy 式 $q = k \frac{dh}{ds}$ 와 相似이므로 地下水流를 나타낼수 있다.

$$上式에서 \quad c = \frac{gd^2}{12\nu}$$

여기에서 g : 重力加速度(m/sec^2)

d : 二개의 平行板측 水路의 巾(m)

ν : 動粘性係數(m^2/sec)

그러므로 透水係數 $k = \frac{gd^2}{12\nu}$ 가 된다.

이 Model에는 水平 Model과 垂直 Model이 있다.

a. 垂直 Model: 二개의 板을 平行하게 垂直으로 세워 土壤의 垂直斷面에서의 물의 이동을 보여주는 Model로서 自由面 帶水層의 浸潤線, 降雨에 의한 地下水含量, 地下水位의 上昇에 의한 貯水量 등을 연구할수있고 被壓帶水層에서도 上 또는 下の 半透水性層을 통해 들어오는 滲透水를 나타낼수있다.

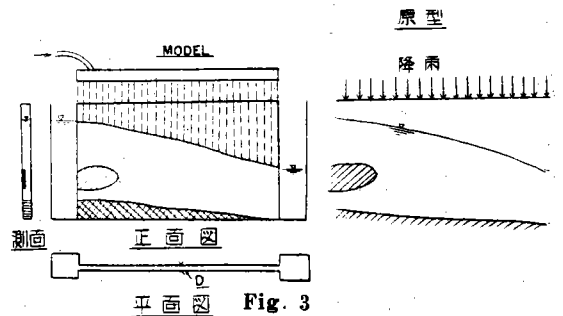


Fig. 3

b. 水平 Model: 二개의 板을 平行하게 水平으로 놓아 帶水層의 어느 地域의 平面에서 물의 水平方向 移動狀態를 나타낸다. 넓은 地域에서 地下水位의 변동 등을 시험할 수 있다.

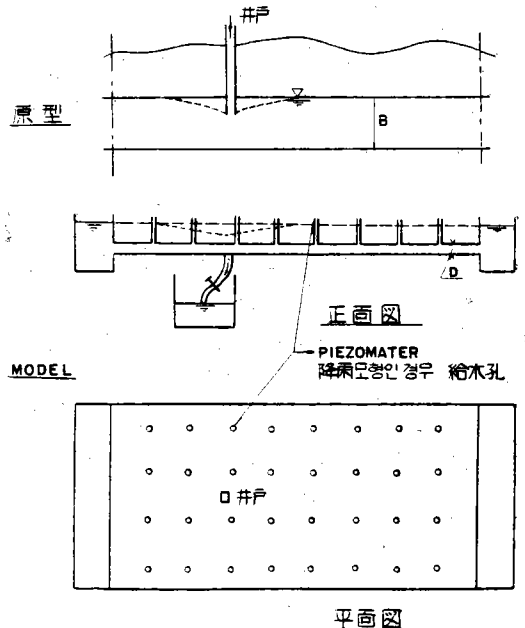


Fig. 4

IV. Heat Model

熱傳導에 의해 熱이 移動할때는 Fourier 法則 $q = -\lambda \frac{dt}{ds}$ 에 따른다. 이 식은 Darcy 式과 相似이므로 熱傳導로서 地下水流를 시험할수있다. 熱은 傳導 以外에 輻射, 對流로도 이동하므로 이 Model 을 만들때는 熱의 손실을 방지하기 위한 絶緣層이 가장 어려운일이다. 等溫度線으로는 等포텐살線을 알아낸다.

V. Electric Model

電氣抵抗에 대한 Ohm의 法則은 다음 Fig 5를 참고로 할때

$$I = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

I: 電流(Amp)

V: 電壓(Volt)

R: 抵抗(Ohm)

그런데 R는 物質固有抵抗 ρ 와 物體의 크기 $a, b, \Delta s$ 로 표시할수있다.

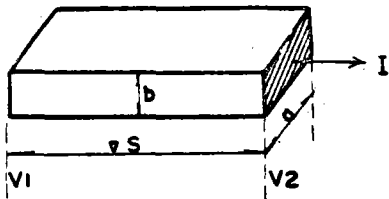


Fig. 5

$$R = \frac{\rho \Delta s}{ab}$$

電流密度는 $i = \frac{I}{ab}$ 이며 다음과 같이 될수있다.

$$i = \frac{I}{ab} = \frac{V_1 - V_2}{Rab} = \frac{1}{\rho} \frac{V_1 - V_2}{\Delta s}$$

$\Delta s \rightarrow 0$ 이면

$$i = -\frac{1}{\rho} \frac{dv}{ds}$$

上式은 Darcy 式과 相似이며 $k = \frac{1}{\rho}$ 이 된다.

抵抗物質은 다음과 같은 것들을 쓴다.

a. 固體物質: 銀箔紙, 金箔紙 등의 金屬紙, 黑鉛덩어리, Teledeltos-paper 等

b. 流體: NaCl, CuSO₄ 등의 鹽을 加한 물

이런 流體의 ρ (固有抵抗)는 쉽게 변동시킬수 있으나 分極 또는 전기분해가 생기지 않도록 交流를 사용해야 한다.

c. 鹽을 加한 젤라틴(Gelatine): 流體와 같이 鹽을 加하여 사용하나 이것은 透水性이 다른 層이나 透水性이 다른 區域을 시험할수 있게 鹽의 濃度가 다른 젤라

틴 덩이를 여러개 사용할수 있는 利點이 있다.

a, b의 경우 二次元流에 對해서 透水性이 다른곳은 材料의 두께를 변동시켜 조정한다. 流體를 이용할때는 바닥에 파라핀을 사용하여 쉽게 그 모양을 알맞게 변형시킨다.

Fig 6에서는 Teledeltos paper 에 直流를 통하여 等포텐살線을 求하는 것이다. 不透性 境界는 箔紙를 잘라낸 線이 되고 既知의 等포텐살線(境界조건)을 電極으로 한다. 電極은 銀페인트(은가루)를 발라서 만들고 이 銀線과 電線을 그림과 같이 연결시킨다.

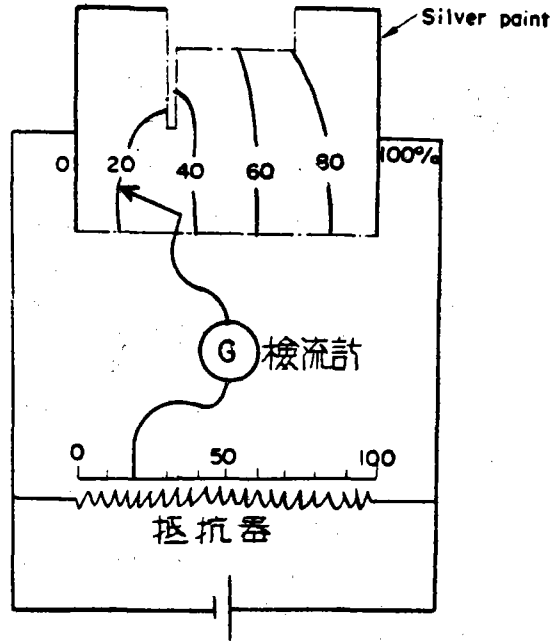


Fig. 6

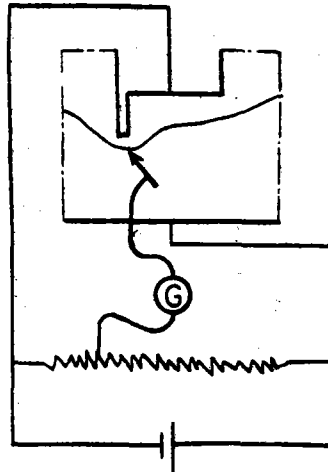


Fig. 7

等포텐살線의 決定順序는 抵抗器를 어느 값에 固定하고 檢流計에 의해 同一抵抗點(檢流計에 전류가 흐르지 않는 點)을 찾아내어 연속되는 點을 연결한 것이다.

Fig 7과 같이 電極과 境界線을 서로 바꾸어 同一한 操作을 하면 流線이 決定된다.

Electric Model에

는上記와 같이 金屬紙, 黑鉛板等을 쓰는 以外로 鐵線網等을 쓰기도 한다. 前者는 全斷面을 통해 연속적으로 電流가 흐르지만 後者에선 網의 線만 따라서 흐르므로 精確도가 낮다. Electric Model로 自由表面을 시험할수는 없으며 콘덴사를 이용하여 地下水 貯溜문제도 시험가능하다.

VI. Membrane Model

얇은 膜에 直角方向의 荷重이 作用하지않고 變形이 적은 경우 膜의 變形(휨)은 Laplace 방정식에 따라 변하는데 Laplace 방정식 $\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0$ 은 非壓縮性 流體의 正常流에 대한 基本的인 微分方程式이므로 모델시험을 할 수 있다.

간단히 다음 경우를 고려하면 Fig. 8에서 水平으로 兩端端이 固定된 膜위에 荷重 P가 作用하여 膜이 點線位置로 변동된다면 임의點 A에서 다음 式을 유도할 수 있다.

$$\frac{T_z}{T_x} = \frac{dz}{dx}$$

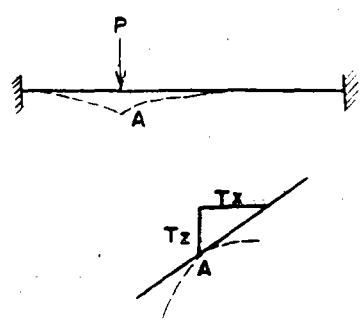


Fig. 8

$$T_z = T_x \frac{dz}{dx}$$

여기서

T_z : 膜에 作用하는 垂直力

T_x : 膜에 作用하는 水平力

$\frac{dz}{dx}$: 變形된 膜의 勾配

上式에서 水平力

T_x 는 水平力 平衡條件($\Sigma H=0$)에 의하여 常數가 된다.

따라서 $T_z = c \frac{dz}{dx}$

Darcy 式의 K는 C와 相似된다.

VII. 結 論

다음에 지금까지 설명한 Model의 適用범위를 간추려본다.

Model로 나타낼수 있는 事項	Sand Model	Hele Shaw Model		Heat Model	Electric Model	Membrane Model
		垂 直	水 平			
水流의 型態(2次元, 3次元)	3次元	2次元	2次元	3次元	3次元	2次元
透 水 係 數	○	○	○	○	○	○
水平垂直透수係數의 不等	○	○	○	○	○	○
土壤의 下均質	○	○	○	○	○	—
半透水性層	○	○	○	○	○	—
自由水面(地中の)	○ ^①	○	—	—	—	—
毛 管 地 域	○	○	— ^②	— ^②	— ^②	—
自由面帶水層에서의 貯水	○ ^③	○ ^③	○	○	○	—
被壓帶水層에서의 貯水	○	○	○ ^④	○ ^④	○ ^④	— ^⑤
降 雨	○	○	○	○	○	○
地表水와의 接觸	○	○	○	○	○	○
地下水의 水頭	○	○	○	○	○ ^⑥	○ ^⑦
單位面積當의 流量 (Darcy 속도)	○ ^⑧	○	○	○	○ ^⑧	○ ^⑩
流線을 볼수있음	○	○	○	—	○	○ ^⑪
流 量	○	○	○	○	○	○
密度差(清水와 鹽水)	○ ^⑫	○	○	—	—	—
非飽和土壤을 통한 水流	○	—	—	—	—	—

備考 ○印은 可, —표시는 不可

① : Sand model에선 毛管地域이 존재하여

飽和部分을 찾아내기가 곤란하다 表面張力을 減少시키는 化學藥品을 물에 첨가하여 사용하면 毛管現狀에 依한 影響을 적게할수있다.

② : 水頭의 작은 變動에 依한 貯水에 대해서만 可能하다.

③ : Model에 모형저수지를 붙이면 이론상 可能하지만 복잡하고 불편하다.

④ : 全地域에 均一하게 降水가 되지않고 여러개의 구멍(孔)으로 集中적으로 給水가 되므로 이구멍이 많아질수록 實際 降雨과 類似하게 된다.

⑤ : 膜의 自重 또는 等分布荷重 또는 壓力으로 降雨를 모방한다.

⑥ : 熱의 흐름密度(Density of heat flow rate)및 電流密度로 알수있다.

⑦ : 膜表面을 굴러가는 작은 球(球)의 속도

⑧ : 粒子가 투명하고 粒子의 光 굴절각이 使用하는 流體의 光 굴절각과 같은 Model에서 볼수있다.

⑨ : 電解液에 指示藥을 넣어 볼수있으므로 電解液 Model에만 限한다.

⑩ : 膜의 表面上을 끌려가는 작은 공(球)의 徑路

⑪ : 膜에 直角으로 作用하여 變形을 일으키는 荷重 또는 힘.

⑫ : 이런 종류의 시험은 투명한] Sand Model로서 할수있다.

以上과 같이 여러가지 종류의 Model을 만들수 있으나 흐름의 次元問題 製作의 難易, 精確도等を 고려하여 가장 알맞는 Model을 만드는것이 중요하다.

實際 現場을 Model로 만들어 研究하는 것은 장래의 변동상황을 미리 豫想할수 있어 經濟的인 設計를 가능케하고 위험을 예방할수있게한다.

그리고 教育的인 目的으로 만드는 Model은 地下水의 흐름에 관한 개념을 쉽게 이해시키는데 큰 도움이 된다.

參 考 文 獻

1. Karplus, W. J. Analog simulation. London 1958, McGraw-Hill Book Co.
2. Muskat, M. The flow of homogeneous fluids through porous media, Michigan 1946, J. W. Edwards, Inc.
3. Bear, J. Scales of viscous analogy models for ground water studies. Proc. A.S.C.E. 86(1960) No Hy 2.
4. Childs, C. E. The equilibrium of rain-fed ground water resting on deeper saline water. Journal of soil science 1 (1950) No 2.
5. Hall, H. P. An investigation of steady flow toward a gravity well. La Houille Blanche 10 (1955) No 1
6. Santing, G. A horizontal scale model based on the viscous flow analogy for studying ground water flow in an aquifer having storage. Proc. General Assembly of the International Association of Scientific Hydrology, Toronto 1957. Vol II
7. Todd, D.K. Investigation of unsteady flow in porous media by means of a Hele-Shaw viscous fluid model. Thesis, Univ of California, Berkeley, 1953
8. Zee, Chong-Hung; D.F.Peterson and R.O.Book Flow into a well by end membrane analogy. Proc. ASCE. 81 81955) Paper No 817.