

〈論 文〉

地下埋管에 의한 地下水涵養 研究  
Artificial Groundwater Recharge by Underground Piping Method

安 相 鎭\* · 李 鍾 衡\*\*  
Ahn, Sang Jin · Lee, Jong Hyong

Abstract

The method for artificial groundwater recharge can be categorized into two groups, one is well method and the other one is scattering method. Underground piping method belongs to the latter group and it is to infiltrate water from porous pipes buried underground.

This paper shows the result of indoor experiment and numerical analysis concerning this method. The purpose of the study is to make the infiltration aspects and groundwater recharge in underground piping method. We have found that the recharge height is effect by the difference of water level and a distance of pipe laying.

要 旨

地下水를 인공적으로 涵養하는 방법은 크게 井戶法과 擴水法으로 나눌수 있다. 地下埋管法은 擴水法의 한방법이며 地下에 埋設한 管에 給水하여 浸透시키는 방법이다.

本 研究는 地下埋管에서의 浸透樣相과 地下水涵養을 규명하는 것이 목적이며, 이방법을 室內實 驗과 數值解析을 행하여 證立하였다. 한편 涵養高는 水位差와 埋設間隔에 影響되는것을 알수 있었다.

\* 忠北大學校 工科大學 土木工學科 教授

\*\* 忠北大學校 工科大學 土木工學科 講師

## 1. 序 論

生活水準의 向上과 産業發展에 수반하여 都市用水 등의 需要가 증대함에 따라 水資源開發은 自然環境, 社會環境의 인연의 制約에 의해 효율적인 개발이 곤란해지는 반면 地下水資源 開發이 필요해졌다. 따라서 물循環에서 물을 地中에 浸透시키는 것은 雨水의 浸透處理, 地下水涵養, 물環境의 保全 등의 관점에서 관심이 기대된다. 최근 都市化가 진행되는 流域에서는 개발에 의해 地表面이 被覆되어 雨水의 地中浸透가 감소되어 表面流出이 증대하고 流出係數의 증대와 洪水倒達時間의 감소로 洪水時 河川의 尖頭流量이 증가해 治水安全度를 低下시킨다.

한편 雨水의 地中浸透가 감소되면 地下水 涵養量이 감소되며 이 때문에 地下水位가 低下하여 평상시의 河川流量이 감소하고 水質 및 景觀의 惡化 등에 막대한 영향을 미치게 된다. 이러한 水文環境의 변화를 사전에 豫測하여 적절한 대책을 강구하는 것이 대단히 중요하며 종합적으로 물環境을 保全하는 수단으로서 물을 효과적으로 地中에 浸透시키는 기술이 기대되고 있다. 더구나 地下水를 地下水位 低下, 地盤沈下 등의 障害를 일으키지 않고 연속적으로 이용하기 위하여 개발구역에서 雨水의 적극적인 地下浸透를 도모시켜 表面流出을 抑制하고 地下水를 人工的으로 涵養시키는 것이 필요하다.

地下水涵養(Groundwater recharge)은 自然涵養과 人工涵養으로 분류되며 인공함양에는 擴水法과 井戶涵養法이 있으며 지금까지 행한 인공함양에는 거의 井戶涵養法을 이용하였다.

그러나 井戶涵養法은 涵養水中의 浮遊物質 등의 물리적인 원인, 酸化 등의 화학적인 원인에 의해 공급감소가 생기며 涵養效率의 低下가 문제된다. 지표면에서 물을 침투시킬 경우에는 지표면의 空隙減少가 발생하기 쉽고 그 침투능력에는 한도가 있으나 擴水法의 한방법인 地下埋管法은 지표면을 迂廻해서 직접토양에 물을 공급하는 방

법으로 空隙減少의 발생이 적고 지표면에서의 침투에 비해 큰 침투능력을 기대할 수 있다.

또한 人工涵養方法에 대한 일반적인 연구동향을 살펴보면 Latinopoulos<sup>1)</sup>는 人工涵養에서 지하수 應答의 예비평가에 이용할 수 있는 解析解를 구하였으며 그 결과 涵養 위치로부터 떨어진 帶水層에서 貯留와 流出의 변화는 帶水層특성과 함양기간에 크게 의존된다고 했다. Herrling<sup>2)</sup>은 時間從屬으로 2차원 수평 有限要素模型을 채용하여 透水性堆砂로 채워진 빙하기의 계곡에서 하천의 高水位時 地下水涵養가능성을 연구했다. Khan과 Mawdsley<sup>3)</sup>는 地下水涵養은 지하수 貯留帶內로 들어오는 물과 같으며 貯留帶의 두께열은 水文循環에서 토지양상의 여러성분에 관계된다고 했으며, Wheater과 Sherratt<sup>4)</sup>는 地下水涵養은 土壤, 植生 그리고 토양이용 변화에 중요하게 영향되는 大氣사이의 복합작용의 결과이고 複合多重層模型이 토지이용 영향을 평가하는데 정확하다고 발표했다. 또한 Rushton<sup>5)</sup>은 포텐살함양을 전달하는 帶水層의 제한된 능력과 揚水하는 우물주위 局部減少의 중요성을 포함한 주요 양상을 연구했고, Bhattacharjee<sup>6)</sup>는 地下水 貯水의 증가평가와 揚水試驗에 의해 帶水層의 比產出率(specific yield)검토에 의해 면적에 대한 지하수 포텐살을 계산했다. Klaus, Edward 그리고 McBean<sup>7)</sup>은 人工涵養에서 非被壓 帶水層의 狀態變數를 특성화하는 확장된 Kalman filter를 시험하고 개발했다. Varuttamadhira와 Raymond<sup>8)</sup>는 길고가는 유역으로부터 非被壓 帶水層에서 汚染物質 이동을 실험하여 초기 飽和깊이의 영향과 汚染物質 이동의 樣相에 관한 涵養率의 크기에 대해 토론하였다.

한편 地下埋管法은 본래 土壤淨化에 의한 污水處理를 위하여 新見이 연구실시한 구조물로서 토양주위의 毛管運動에 착안한 것이며, 이를 地下水涵養에 적용한 것이다. 이에대한 연구를 살펴보면 吉野 文雄과 寺川 陽<sup>9)</sup>은 地下埋管의 침투에 대하여 有限差分法을 이용하여 수치 simulation을 행하였고, 石崎勝義<sup>10)</sup>는 地下埋管에서 물의

浸透機構와 이 방법을 洪水處理를 위해 雨水를 地中에 침투시키는 것에 적용할 수 있는것을 명확히 하였다.

이상과 같은 관점에서 本研究의 目的은 室內實驗과 數値解析에 의해 地下埋管에서 물의 浸透現狀을 규명하고 이로인해 雨水를 地中에 浸透시키는 방법으로서의 적용이 가능한가를 연구하며 인공적으로 地下水를 涵養시키는것을 연구하는데 있다.

## 2. 地下埋管의 特性

### 2.1. 土壤水帶의 特徵

土壤水帶는 地層의 表層에 있으며 雨水, 地表水가 침투할때 filter로서 중요한 역할을 한다. 지하수의 水質이 양호한 것은 이 土壤水帶의 filtering 構造에 의한것이다.

土壤水帶는 Fig.2.1에 표시된것 같이 土粒子, 空氣, 물의 3相으로 구성되어 있으며 모래의 空隙에 채워진 오목면의 meniscus를 만드는 吸引壓과 오목면에서 地下水面까지의 靜水壓이 조화되고 있는 부분인 毛管水帶(Capillary zone), 그리고 이위에 놓여있는 含水量이 거의같은 懸垂水帶(Suspended zone)로 분류한다. 水分은 주로 降雨

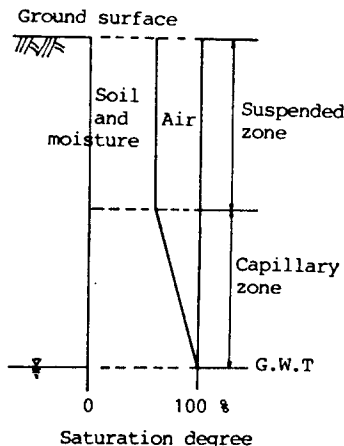


Fig. 2.1. The three phases distribution of soil

에 의해 공급되고 降雨의 일부는 지하수에 涵養되며 土壤水帶에 貯留된 水分의 일부는 蒸發散에 의해 大氣로 환원된다. 土壤水帶(Soil water zone)에는 水分과 함께 항상 공기가 존재하기 때문에 不飽和帶라 부르며, 이것은 土粒子의 空隙이 전부 물에 의해 飽和되어 있는 帶水層과 크게 다른점이다. 또 土壤水帶에서 물의 움직임은 液體와 氣體의 境界면에 작용하는 表面張力에 기인하는 毛管壓 및 重力에 지배된다.

### 2.2. 地下埋管의 構造

地下埋管은 섬세한 舉動을 나타내는 토양표면을 피해서 물을 직접 土壤水帶에 공급하여 인공적으로 지하수를 涵養시키는 한 방법이다. Fig.2.2는 지하트렌치의 구조를 나타낸것이다. 埋管에서의 供給水는 일단 트렌치에 貯溜되고, 地下埋管주위의 모래, 토양의 毛管力에 의해 트렌치내의 물은 윗쪽으로 擴散하며 毛管力 및 重力에 의해 아랫쪽으로 침투하게 된다. 토양을 침투하는 浸透水는 토양내의 풍부한 土壤 微生物의 작용 및 토양의 吸着作用등에 의해 점점 淨化된다.

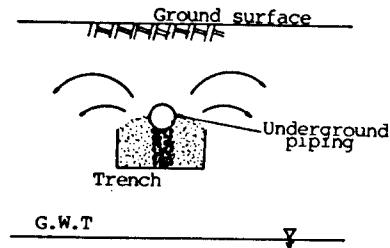


Fig. 2.2. An outline of artificial recharge by underground piping.

## 3. 不飽和帶에서의 浸透

### 3.1. 浸透流의 基本式

飽和, 不飽和의 차이는 흐름중에 氣體의 존재有無에 의해 구별되고 통상 兩側의 상태가 동시

에 생기는 경우가 많다. 따라서 飽和領域, 不飽和領域의 兩側에 걸쳐 적용 가능한 浸透의 基本式이 바람직하다.

飽和流에 대해서는 이른바 Darcy법칙이 성립한다.

$$q = -K_0(\Delta\Psi + \Delta z) \quad (3-1)$$

여기서 q : 겉보기 流速(apparent velocity)

$K_0$  : 飽和透水係數

$\Psi$  : 壓力 potential(毛管 potential)

Z : 位置 potential(重力 potential)

不飽和流의 경우는 공기에 의한 浸透流路의 遮斷 혹은 浸透流路斷面의 減少 또는 공기가 浸透水와 함께 流動하는 현상때문에 飽和流와 비교하면 취급이 복잡하다. 含水量이 대단히 작고 水分의 이동이 주로 蒸氣體로 되면 熱收支까지 포함한 해석이 필요하며, 이러한 경우를 제외하고는 통상 層流抵抗에 기인하여 다음식으로 표시하는 Darcy法則에 준한 관계가 가정된다.

$$q = -K(\theta)(\Delta\Psi + \Delta z) \quad (3-2)$$

$K(\theta)$  : 不飽和透水係數

$\theta$  : 含水量

요컨대, 공기의 존재에 기인하는 浸透流路의 遮斷 및 流路橫斷面積의 감소를 透水係數의 감소로서 받아들이는 것이다.  $\theta$  와  $\Psi$  사이에는 濕潤過程, 乾燥過程의 각각에 대하여 하나의 관계가 존재하는 것을 알고 있으며 濕潤過程 또는 乾燥過

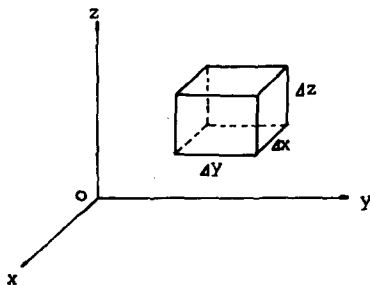


Fig. 3.1. A hexahedron of tiny.

程의 어느쪽을 택할 경우에는  $K(\theta)$ 는  $K(\Psi)$ 로 고쳐 쓸수 있다. 지금 Fig.3.1에 표시한 微小六面體를 취하여 이 내부에서 微小時間  $\Delta t$ 에 있어서 물의 質量保全을 생각하면 다음 식을 얻는다.

$$\begin{aligned} \text{div} \cdot \{ \rho K(\Delta\Psi + \Delta z) \} \Delta x \Delta y \Delta z \Delta t \\ = \frac{\partial}{\partial t} (\rho n s \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (3-3)$$

여기서  $\rho$  : 물의 密度

n : 空隙率

s : 飽和度

微小六面體의 체적변화는 z방향으로 보고, x, y 방향은 무시할 수 있다고 생각하면 식(3-3)의 右邊은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho n s \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \cdot \Delta t \\ = \left\{ \rho n s \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} + \rho s \Delta z \frac{\partial n}{\partial t} + n s \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial t} \right. \\ \left. + \rho n \Delta z \frac{\partial s}{\partial t} \right\} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta t \end{aligned}$$

그런데 土粒子의 構造(skeleton) 및 물의 체적변화를 彈性變化로 가정하여 각각의 壓縮係數를  $\alpha, \beta$ 로 하면 위식 右邊의 각항에 대하여는 다음식이 성립된다.

$$\begin{aligned} \rho n s \cdot \frac{\partial(\Delta z)}{\partial t} &= \rho n s \frac{\partial(\Delta z)}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \\ &= \rho^2 g n s \Delta z \cdot \alpha \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (3-4)$$

$$\begin{aligned} \rho s \Delta z \cdot \frac{\partial n}{\partial t} &= \rho s \Delta z \frac{\partial n}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \\ &= \rho^2 g (1-n) s \Delta z \cdot \alpha \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (3-5)$$

$$\begin{aligned} n s \Delta z \cdot \frac{\partial \rho}{\partial t} &= n s \Delta z \frac{\partial \rho}{\partial p} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} \\ &= \rho^2 g n s \Delta z \cdot \beta \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} \end{aligned} \quad (3-6)$$

$$\rho n \Delta z \cdot \frac{\partial s}{\partial t} = \rho n \Delta z \frac{\partial s}{\partial \Psi} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (3-7)$$

여기서  $p$ 는 水壓이며,  $p = \rho g \Psi$ 인것을 이용한  
다.

식(3-4), (3-5)는 土粒子 skeleton의 彈性變化, 식(3-6)은 물의 彈性變化에 기인하여 변형한다. 식(3-7)은 飽和度의 시간변화에 관계되는 것이고 不飽和浸透流의 경우에는 중요한 項이 된다. 이 項은 飽和浸透流의 경우에는 고려할 필요가 없다.

식(3-4)~(3-7)을 식(3-3)에 대입하면 다음 식을 얻는다.

$$\text{div} \cdot \{ \rho K(\Delta \Psi + \Delta z) \} = \{ \rho^2 g s(\alpha + n\beta) + \rho n \frac{\partial s}{\partial \Psi} \} \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (3-8)$$

식(3-8)에 있어서 不飽和浸透流에서는 土粒子的 skeleton 및 물의 壓縮變化를 무시하는것으로부터 右邊中 괄호내의 제1항은 무시할 수 있다. 또  $n, \rho$ 가 일정하다고 생각하는 것로부터 不飽和浸透流의 경우는 右邊中 괄호내의 제2항에 대해서 다음같은 변형이 가능하다.

$$\rho n \frac{\partial s}{\partial \Psi} = \rho \frac{\partial ns}{\partial \Psi} = \rho \frac{\partial \theta}{\partial \Psi} = \rho C(\Psi)$$

따라서 식(3-8)은 식(3-9)와 같이 된다.

$$\text{div} \cdot \{ K(\Psi)(\Delta \Psi + \Delta z) \} = C(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial t} \quad (3-9)$$

이것은 飽和浸透流의 基礎式

$$\text{div} \cdot \{ K_0(\Delta \Psi + \Delta z) \} = C_0 \frac{\partial \Psi}{\partial t}$$

$K_0$  : 飽和透水係數

$C_0$  : 常數,  $C_0 = \rho g(\alpha + n\beta)$

과 같은 形을 하고 있으므로 식(3-9)에서 飽和, 不飽和에 따라 係數를 변화시켜 飽和, 不飽和兩領域에 걸쳐 해석이 가능하다. 단 식(3-9)는 강한 非線形性을 갖으며 解析解를 구하는것은 곤란하기 때문에 실제에서는 數値解析에 의해 解析하게 된다.

### 3.2. 不飽和透水係數의 特性

前節에서 既述한것같이 浸透流의 해석에는 浸透層 固有의 特性을 사전에 파악하는것이 필요하다. 특히 不飽和浸透流에서는 不飽和透水係數가 중요한 役割을 한다. Fig.3.2<sup>11)</sup>는 대표적인 不飽和 透水係數와 吸引壓(suction)과의 關係를 圖示한것이며 이것은 근사적으로 다음과 같은 식으로 표현 할 수 있다.

$$K = K_0 \quad \Psi > \Psi_b \text{의 경우} \quad (3-10)$$

$$K_0 \left( \frac{\Psi - \Psi_b}{\Psi} \right)^n \quad \Psi \leq \Psi_b \text{의 경우}$$

여기서  $\Psi_b$ : 氣泡壓(bubbling pressure)(毛管壓이 작게 될때 空隙內에 氣泡가 발생하여 透水係數의 變化가 현저히 되는 毛管壓)

$n$ : 浸透層의 土粒子 粒徑, 粒度分布에 관계되는 常數로 粒徑이 크고 균일한 경우에는 큰값을 갖으며, 粒徑이 작고 粒度가 넓게 분포하는 경우에는 작은 값을 갖는다.

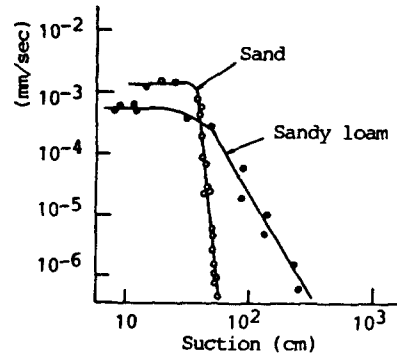


Fig. 3.2. Permeability coefficient of unsaturated.

氣泡壓(bubbling pressure)을 경계로 하여 非飽和 透水係數의 경향이 크게 변화하고 있으며, 이것은 流動의 형태가 변화하는것에 기인하고 있다. 飽和度가 낮고 요컨대 吸引壓(suction)이 큰 경우에는 空隙內의 공기가 透水層內의 流路를 遮

斷 혹은 流路 斷面積을 감소시키기 때문에 透水係數가 작은 반면에, 飽和도가 높아짐에 따라 결국 吸引壓(suction)이 작게됨에 따라 空隙內 공기의 閉塞作用이 작게되어 투수계수가 크게된다.  $\Psi_0$  근처까지 吸引壓(suction)이 작게 되고 空隙內의 空氣泡는 流動하기 시작하게 되며 空氣泡의 閉塞作用은 거의 없게 되어 非飽和 透水係數는 飽和透水係數와 거의 같게 된다.

非飽和透水係數  $K$ 는 吸引壓  $\Psi$ 의 函數로서 표현되며  $K$ 와  $\Psi$  혹은  $\theta$ 와  $\Psi$ 의 관계는  $\Psi$ 가 증가하는 경우와 감소하는 경우에 약간 다르며 Hysteresis loop를 그린다.

4. 地下埋管에서의 浸透와 地下水涵養

4.1. 地下埋管에 관한 室內實驗

4.1.1 實驗方法

지금까지 土壤水帶에서의 浸透에 대하여 定性的으로 토론한 결과 不飽和浸透에 있어서 毛管力이 중요한 役割을 하는것이 나타났다. 그런데 毛管力 作用의 정도는 土壤條件 뿐만아니라 浸透施設의 構造形態에 의해서도 다른것이라고 생각된다. 따라서 地下埋管에서의 浸透量을 定量的으로 파악하기 위해서 實驗에 의해 檢討를 한다. 본 實驗에 있어서 地下埋管의 構造는 Fig.2.2의 形態에 대하여 室內模型實驗을 행한다. 實驗裝置의 크기는 길이 70cm, 폭 30cm, 깊이 60cm이며 설치한 埋管의 諸元은 Table 4.1과 같다.

實驗은 이동가능한 側壁의 間隔을 변화시켜 인

Table 4.1. The dimension of underground structure.

	室內 實驗	現地를 생각한 縮尺
地下構造物의 幅	3.0cm	20.0cm
地下構造物의  높이	2.5cm	7.5cm
地下構造物중의水深	1.0cm	3.5cm
흙두께	26.0cm	60.0cm

접한 埋管과의 설치간격이 변화하는것으로 대응하고 측면에 붙어있는 連通管의 중앙에 삽입한 管을 上下이동시켜 地下水位를 어느 일정 위치에 유지시켜 浸透量을 측정한다.

한편 물의 供給方法은 트렌치내의 水位를 일정하게 유지하기 위해 給水되며 탱크내의 물 減少量으로부터 浸透量을 計測할 수 있다. 涵養水로는 수도물을 사용하였으며, 浸透의 媒體로서는 주문진 標準砂를 이용하였고, 이 粒度分布는 0.30-0.42mm가 93%를 차지하여 거의 均一粒徑이라고 생각된다. 그 이외의 特性은 比重 47.6% (乾燥密度 1.4), 透水係數  $K=1.4 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 이다.

Table 4.2. A characteristic of experiment sand.

比重	2.65
空隙率	47.6%( 건조밀도 1.4)
透水係數	$1.4 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$

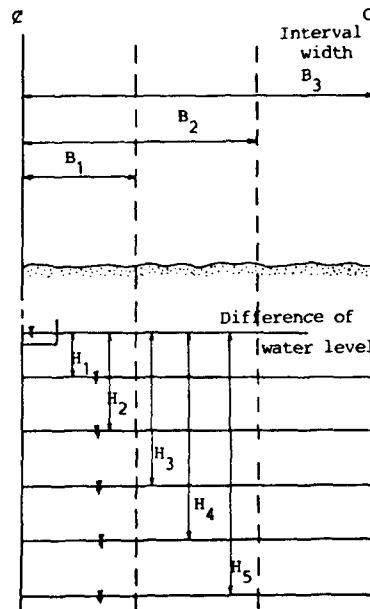


Fig. 4.1 Experiment condition of indoor experiment.

본 實驗에 標準砂를 이용한것은 그 物理的性質이 일반 土壤과 달리 安定하며 취급이 容易하기 때문이다.

實驗條件은 Fig.4.1에 나타냈으며 트랜치내의水位와 地下水水位와의 水位差 H를 5 case(5, 10, 15, 20, 25cm), 각각에 대하여 側壁間隔 B를 3 case(10, 20, 30cm) 변화시켜 모두 15 case에 대하여 定常狀態에 있어서 浸透量 測定을 실시하였다.

4.1.2. 實驗結果

前節의 實驗條件으로 室內實驗한 結果를 그래프로 정리하면 Fig.4.2와 같다.

여기서 涵養量(m<sup>3</sup>/s)은 각 case에 있어서 浸透量의 값이며 涵養高(mm/day)는 涵養量을 1日當으로 換算한 量을 埋管의 支配面積으로 나눈값이다. 그림에서 水位差 H 및 設置間隔의 幅 B를 증가시키에 따라 涵養量이 크게 나타나고 있다. 단 幅 B의 증가에 의한 涵養量의 증가는 直線의이 아니고 어느정도까지 擴大되며 H에 대하여 일정의 浸透量에 接近하는것으로 생각된다. 이것은 毛管作用에 의한 浸潤의 影響範圍에 限界가 있기 때문이라고 생각된다. 또 H의 증가에 대하여도 어느 平均적인 全 potential傾斜가 一定值에 接近하는것으로부터 浸透量은 一定值에 점차 接近하는것으로 판단된다.

4.2. 數值解析

본절에서는 실내실험에 의한 浸透量을 검토하기 위해서 不飽和地下水의 運動基本式을 差分近似하여 Simulation model을 작성하고 실내실험의 조건을 模型에 적용시켜 數值解析을 행하여 實驗結果와 비교분석한 후 현장측척에 적용하여 數值模型에 의한 地下水涵養의 再現性을 검토한다.

4.2.1. 基本式의 差分化

여기에서는 地下埋管이 浸透施設로서의 有效性을 평가하는것이 목적이기 때문에 定常的인 浸透量에 대하여 해석한다. 따라서 식(3-9)는 時間項을 생략하여 簡略化하면 다음과 같이 된다.

$$\text{div} \cdot [K(\Psi)(\Delta \Psi + \Delta z)] = 0 \tag{4-1}$$

이식을 鉛直 2次元의 경우에 대하여 쓰면 다음 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} [K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial z} [K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} + K(\Psi)] = 0 \tag{4-2}$$

여기서  $K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial x}$ ,  $K(\Psi) \frac{\partial \Psi}{\partial z} + K(\Psi)$ 는 각각 x 및 z方向의 流速을 표시한다.

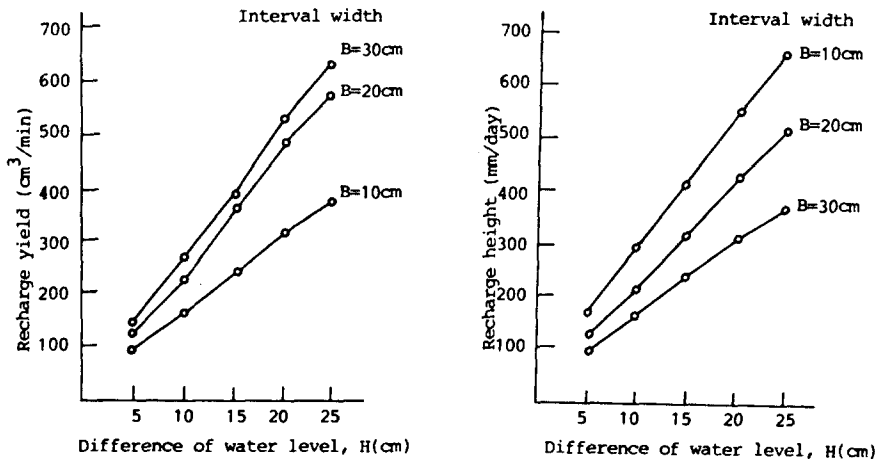


Fig. 4.2 Experiment value for indoor experiment.

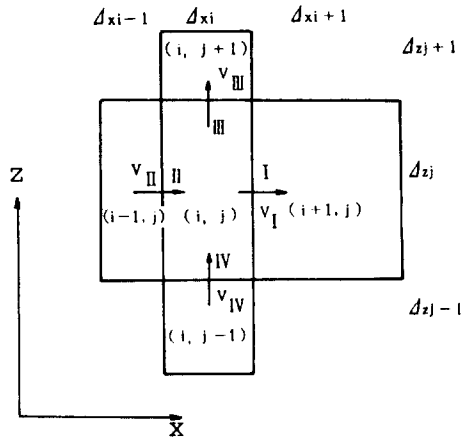


Fig. 4.3 The figure of difference block.

Fig.4.3에 표시한 微小要素를 생각하면 그림중의 I, II, III 및 IV점에 있어서 流速을 각각  $V_I, V_{II}, V_{III}$  및  $V_{IV}$ 라 하고, 吸引壓  $\Psi$  값에 대응하는 不飽和透水係數를 각각  $K(\Psi_I), K(\Psi_{II}), K(\Psi_{III})$  및  $K(\Psi_{IV})$ 라 하여 식(4-2)를 差分표시하면

$$\frac{1}{\Delta x_i}(V_I - V_{II}) + \frac{1}{\Delta z_j}(V_{III} - V_{IV}) = 0 \quad (4-3)$$

또  $V_I, V_{II}, V_{III}$  및  $V_{IV}$ 는 각각

$$\begin{aligned} V_I &= K_I \frac{\partial \Psi}{\partial x} \\ &= K(\Psi_I) \frac{2}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} (\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j}) \\ V_{II} &= K_{II} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \\ &= K(\Psi_{II}) \frac{2}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} (\Psi_{i,j} - \Psi_{i-1,j}) \\ V_{III} &= K_{III} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \\ &= K(\Psi_{III}) \left\{ \frac{2}{\Delta z_{j+1} + \Delta z_j} (\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j}) + 1 \right\} \\ V_{IV} &= K_{IV} \left( \frac{\partial \Psi}{\partial z} + 1 \right) \\ &= K(\Psi_{IV}) \left\{ \frac{2}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} (\Psi_{i,j} - \Psi_{i,j-1}) + 1 \right\} \end{aligned}$$

로 된다. 여기서  $\Delta x, \Delta z$ 는 각각 等間隔으로 制限되지는 않는다. 이것을 식(4-3)에 대입하면 다음 같이 된다.

$$\begin{aligned} &\frac{1}{\Delta x_i} \left[ K(\Psi_I) \frac{2(\Psi_{i+1,j} - \Psi_{i,j})}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} \right. \\ &\quad \left. - K(\Psi_{II}) \frac{2(\Psi_{i,j} - \Psi_{i-1,j})}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} \right] \\ &+ \frac{1}{\Delta z_j} \left[ K(\Psi_{III}) \frac{2(\Psi_{i,j+1} - \Psi_{i,j})}{\Delta z_{j+1} + \Delta z_j} \right. \\ &\quad \left. - K(\Psi_{IV}) \frac{2(\Psi_{i,j} - \Psi_{i,j-1})}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} + K(\Psi_{III}) \right. \\ &\quad \left. - K(\Psi_{IV}) \right] = 0 \quad (4-4) \end{aligned}$$

윗식을  $\Psi_{i,j}$ 에 대해서 정리하면

$$\begin{aligned} \Psi_{i,j} &\left[ \frac{1}{\Delta x_i} \left\{ \frac{K(\Psi_I)}{\Delta x_i + \Delta x_{i+1}} + \frac{K(\Psi_{II})}{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\Delta z_j} \left\{ \frac{K(\Psi_{III})}{\Delta z_j + \Delta z_{j+1}} + \frac{K(\Psi_{IV})}{\Delta z_j + \Delta z_{j-1}} \right\} \right] \\ &= \frac{K(\Psi_I)}{\Delta x_i(\Delta x_i + \Delta x_{i+1})} \Psi_{i+1,j} \\ &\quad + \frac{K(\Psi_{II})}{\Delta x_i(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \Psi_{i-1,j} \\ &\quad + \frac{K(\Psi_{III})}{\Delta z_j(\Delta z_j + \Delta z_{j+1})} \Psi_{i,j+1} \\ &\quad + \frac{K(\Psi_{IV})}{\Delta z_j(\Delta z_j + \Delta z_{j-1})} \Psi_{i,j-1} \\ &\quad + \frac{K(\Psi_{III})}{2\Delta z_j} - \frac{K(\Psi_{IV})}{2\Delta z_j} \quad (4-5) \end{aligned}$$

또한  $\Psi$  이외의 것을 係數 A, B, C, D, E 및 F로 표시하면

$$\begin{aligned} A \cdot \Psi_{i,j} &= B \cdot \Psi_{i+1,j} + C \cdot \Psi_{i-1,j} \\ &\quad + D \cdot \Psi_{i,j+1} + E \cdot \Psi_{i,j-1} + F \quad (4-6) \end{aligned}$$

로 된다.



이것은 中央의 값  $\Psi_{ij}$ 이며, 주위4점에서의 값  $\Psi_{i+1,j}, \Psi_{i-1,j}, \Psi_{i,j+1}, \Psi_{i,j-1}$ 에서 구한것을 나타내고 있다. 따라서 領域을 要素分割하여 각 要素에 대하여 上記方程式을 세우고 境界條件을 넣어 連立方程式을 풀면 전체要素에 대한  $\Psi_{ij}$ 를 구하는것이 된다. 본 논문에서는 어느 領域에 初基值를 주어 그 領域의 境界條件 아래서 各格子를 1개씩 주위의 4점에서 計算을 행하여 中央點값과 바꿔 놓는다. 이것을 全領域에 대하여 행하며 이 순서를  $\Psi$ 가진값에 접근할때까지 반복하는 弛緩法(Relaxation method)을 이용하여 식(4-6)을 풀었다.

4.2.2. 境界條件

數值解析을 행할 경우 境界條件이 문제가 된다. 지금 문제로하는 人工涵養에 대하여 생각하면 上部境界는 地表面, 下部境界는 地下水面이므로 이 점을 고려해서 조건을 준다. 또 埋管은 一定間隔으로 행한다고 생각하여 左右의 境界는 各 埋管과의 中間으로 한다. 여기서 模型은 左右 對稱이므로 어느 한쪽을 생각하고 中心線上에서는 물의 出入이 없다고 생각한다. 따라서 여기서의 境界條件은 透水係數  $K=0$ 로 한다. 다음에 地下水面 및 地中構造物의 水面을 생각하면 그 境界條件으로는 水面에서의 壓力水頭(吸引壓)  $\Psi=$

0가 되므로 이것을 境界條件으로 한다. 또 埋設幅에 의한 境界는 앞의 對稱性和 같으며 이웃 構造物과 對稱이므로  $K=0$ 로 놓고, 지중구조물은 불투수성이라 생각하여  $K=0$ 로 놓는다. 上部境界條件은 室內實驗이므로 물의 출입이 없다고 생각되어  $K=0$ 로 한다. 이상과 같은 조건의 개념도와 計算축척을 표시하면 Fig.4.4와 같다.

4.2.3. 實驗値와 計算値의 比較

室內實驗의 縮尺 및 境界條件을 基礎로 식(4-6)을 數值解析한 결과를 나타낸다.  $K(\Psi)$ 에 대해서는 標準砂에 관한 측정결과에 의해  $K_0=1.4 \times 10^{-2} \text{cm/s}$ ,  $\Psi_0=-45 \text{cm}$ ,  $\eta=12.2$ 로 한다. 計算치와 實驗치와의 比較를 나타낸것이 Fig.4.5이며 計算치의 폭이 H의 증가에 대한 涵養高의 增加率이 緩慢하고 兩者는 거의 대응하여 해석결과가 타당하다는것을 나타내고 있다.

4.3. 地下埋管의 浸透量解析

전절에서 타당성을 나타낸 Simulation模型을 이용하여 縮尺을 擴張한 現地施設規模에 적용하여 數值解析을 행하므로써 실제의 地下埋管에 있어서 기대되는 浸透量을 검토하였다.

浸透層은 砂質로 생각하여 Fig. 3.2에서  $K_0=5.4 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $\eta=3.5$ ,  $\Psi_0=-40 \text{cm}$ 로 하고 Table 4.1에 표시한 值數의 地下埋管 構造物에 있어서 浸透量을 計算한 결과는 Fig.4.6에 나타났다. 그림에서는 트렌치내 水位와 地下水水位의 水位差에 대한 涵養高의 變化를 埋管의 設置間隔을 파라메타로 하여 표시하고 있다. 이것에 의하면 涵養高는 水位差 H가 작은 경우에는 그 영향을 크게 받고, 특히 設置間隔이 작은 경우에는 水位差의 증가에 반하여 涵養高의 증가 경사가 크게되는것으로 판단된다. 따라서 어느 設置間隔에 있어서도 水位差 H가 어느정도 이상 크게 되면 水位差의 영향은 없으며 浸透層을 砂質層 혹은 그것에 粒度分布가 비슷한 土壤에 대해서는

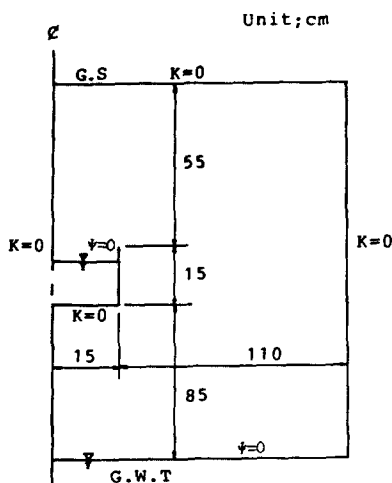


Fig. 4.4. Boundary condition and calculation scale

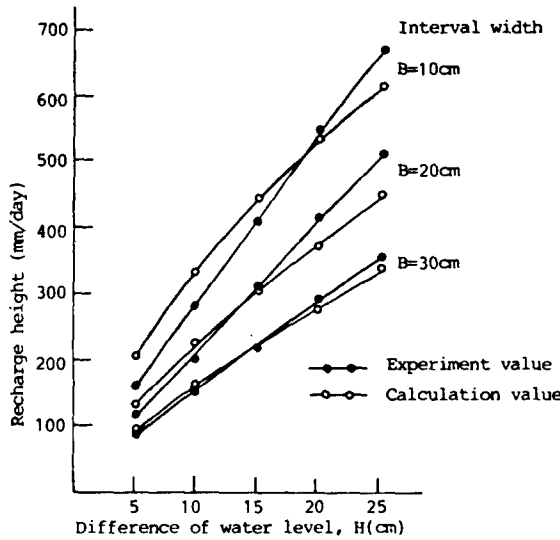


Fig. 4.5. The comparison of experiment value and numerical analysis value for interval width.

水位差가 1m 이상 이라해도 涵養高는 거의 일정치가 되고 있다. 현지에 있어서 水位差는 1m 이상인 것이 보통이므로 오히려 設置間隔 B에 의한 영향을 고려할 필요가 있다. Fig.4.7은 設置間隔과 涵養高의 관계를 표시한 것이며 設置間隔이 넓게 되면 涵養高의 감소는 완만하며 경제적인 埋設이 가능하게 되는 것으로 판단된다.

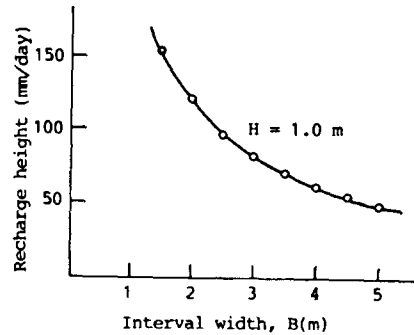


Fig. 4.7. The relation of establish interval and recharge height.

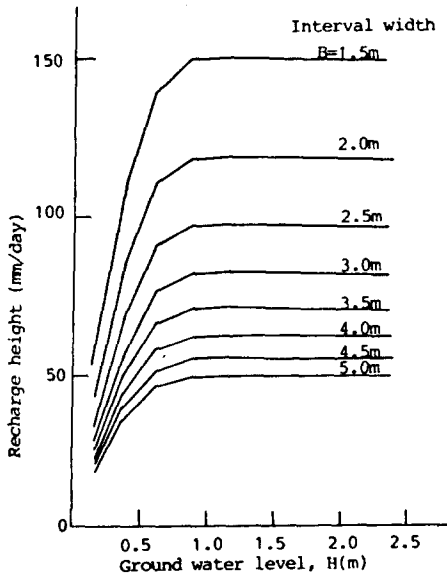


Fig. 4.6. The result of numerical analysis for field scale.

Fig.4.8은 地下埋管 주위의 水分分布 解析例를 표시한 것이며 毛管壓分布에서 水分量에의 換算에는 식(3-13)을 이용했다. Fig. 4.8에서 地下埋管 주위의 含水量 상승은 埋管에서의 浸透量에 의한 것이며 아래쪽에 水分量이 많은 것은 境界條件으로 주어진 地下水面에서의 毛管上昇에 의한 것이다.

### 5. 結論

地下埋管에 의한 浸透特性和 地下水涵養에 대한 특성을 파악코져 雨水를 地中에 浸透시키는 실험장치에 의한 室內實驗과 數值解析에서 얻어

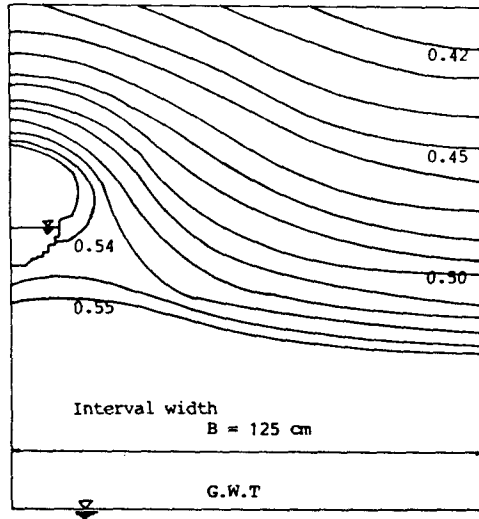


Fig. 4.8. A distribution of moisture content of soil for around of underground piping.

진 결과를 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험장치에 의하여 地下埋管에 대한 室内實驗에서 水位差가 작은 경우에는 涵養高가 크게 影響이 되며 水位差가 增加함에 따라 일정하게 되고, 地下埋管의 浸透施設로서 적응성을 확인했다.
- 2) 數値解析을 하여 측벽간격과 水位差에 따른 涵養高를 實驗値와 비교한 결과 數値計算의 결과와 비슷한 양상으로 나타났으며, 地下埋管은 인접한 埋管 상호의 간섭이 크며, 따라서 埋設間隔을 넓게 하여도 浸透量의 감소는 완만하게 나타났다.
- 3) 水分分布 解析을 한 결과 埋管에서의 浸透量에 의해 地下埋管 주위의 含水量이 상승했고, 地下水面에서의 毛管上昇에 의해 아래쪽에 수분량이 많았다.
- 4) 본 연구에서는 室内實驗 및 數値解析에 의한 것이므로 앞으로 현지실험을 통하여 보완하므로써 現場에의 適用이 기대된다.

參 考 文 獻

1. Latinopoulos p.,(1981) *The Response of Groundwater to Artificial Recharge Scheme*, Water Resources Research, Vol. 17(6)

2. Herrling B.,(1982) *Artificial Groundwater Recharge in Quaternary Gravel Aquifers in the Foreland of the Alps*, Proceeding of the Exeter Symposium, IAHS, Publ., No.136.

3. Khann L.R. & J.A.Mawdsley,(1982) *Effects of Land-use Changes on Groundwater Recharge Assessed using a Nonlinear Catchment Model*, Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS, Publ., No.136.

4. Wheater H.S., D.J.Sherratt & S.S.Nwabuzor,(1982) *Assessment of the Effects of Land use on Groundwater Recharge*, Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS, Publ.,No.136.

5. Ruston K R.,(1982) *Aquifer Demands met from Storage or Recharge*, Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS, Publ., NO.136.

6. Bhattacharjee B.K.,(1982) *Rainfall-recharge Correlation; a Method for Evaluating Potential Groundwater*, Proceedings of the Exeter Symposium, IAHS, Publ., No.136.

7. Klaus D.S., A.M. Edward & F.S.Jonathan,(1982) *Stochastic Estimation of States in Unconfined Aquifers Subject to Artificial Recharge*, Water Resources Research, Vol.18(5).

8. Varuttamadhira G. & E.V.Raymond,(1983) *Experimental Investigations of Unconfined Aquifer Pollution from Recharge Basins*, Water Resources Research, Vol.19(3).

9. 吉野文雄,寺川 陽,田子秀徳,(1983) 地下埋管からの浸透の 數値Simulation, 日本 土木學會 年次學術講演會 概要集.

10. 石崎勝義,(1985) 地下埋管からの 浸透機構と その 應用に關する 研究, 日本建設省 土木研究所資料.

11. Masashi Nakao and Kenichi Ichii,(1977) *Measurement of Hydraulic Conductivity in Unsaturate Porous Medium*, Trans. JSDRE.

12. Campbell G.S.,(1974) *A Simple Method for Deter-*

- mining Unsaturate Conductivity from Moisture Retention Data*, Soil Sci. No.117.
13. Childs E.C. and N.Collis-Gorge.(1950) *The Permeability of Porous Materials*, Proc.Soc. London.
14. Jackson R.D.,(1972) *On the Calculation of Hydraulic Conductivity*, Soil Sci.Soc. American Proc.
15. Eagleson P.S.,(1978) *Climate,Soil and Vegetation(3)-A Simplified Method of Soil Moisture Movement in the Liquid Phase*, Water Resources Research, Vol.14(5).
16. Morel-Seytoux H.J. and J.Khanji,(1974) *Drivation of an Equation of Infiltration*, Water Resources Research,Vol.10(4).
17. Mein R.G. and C.L.Larson.(1973) *Modeling Infiltration during a Steady Rain*, Water Resources Research, Vol.9(2).
18. Bouwer H.,(1964) *Unsaturated Flow in Groundwater Hydraulics*, Journal of Hydraulics Divison, A.S.C.E., Hy5.
19. Yeheykel Mualem,(1977) *Extention of the Similarity Hypothesis used for Modeling the Soil Water Characteristics*, Water Resources Research, Vol.13(4).
20. Pinder G.F. and W.G.Gray,(1977) *Finite Element*