

防潮堤의 浸透流 解析에 관한 研究

Studies on Seepage Flow Analysis through Sea Dike

金 觀 鎮* · 趙 炳 辰** · 尹 忠 燮**
Kim, Kwan Jin · Cho, Byung Jin · Yoon, Choong Sup

Summary

A mathematical model, UNSATR which predicts the seepage flow through the body of dike especially under the tidal fluctuation has been developed. This model has been revised from UNSAT2 model which was developed on the basis of the saturated-unsaturated theory by Neuman.^{10~12)}

UNSATR has been verified and applied to the hydraulic model in order to estimated the seepage quantity, the formation of free water surface etc.

The results lead to the following conclusions :

1. Seepage rates between the mathematical model and hydraulic model experiment are very similar to each other both in constant and transient water level conditions.
2. The lapsed time to be steady state of the free water surface becomes late as the tidal levels are relatively low mainly due to the seepage flow from the unsaturated zone of the body of dike.
3. Under the transient state of water levels, owing to the flow from the unsaturated domain, streamlines crossing to the free water surface are found and time lag during a falling tide may allow the free water surface inside the body of dike to stand at a high level than the outside water level.
4. The utility and validity of UNSATR model are convinced when the analyses on seepage problems through the porous embankment of the soil structures on the conditions of the steady and unsteady states are carried out

* 密陽專門大學

** 慶尙大學校 農科大學

키워드 : 非飽和흐름, 相對透水係數, 比貯流係數,
比水分容量, 體積含水量, 負壓力水頭

I. 緒 論

우리나라 西南海岸에는 干瀉地가 넓게 발달되어 있어 이를 農業用地, 工業用地 등으로 이용코저 이의 開發 事業이 활발하게 추진되고 있다. 이 事業에는 海水의 侵入을 防止하기 위하여 防潮堤를 築造하는 것이 必須的이다.

河口에 建設되는 防潮堤는 河口 流出을 貯流하는 河口 淡水湖의 役割을 해야 하기 때문에 防潮堤의 堤體를 통한 浸透 現象의 分析이 매우 중요하다.

이러한 浸透 解析은 1960年 후반부터는 컴퓨터의 發展에 따라 數值解法으로 解析하고 있으며 또한 飽和 浸透 解析에서 非飽和 浸透 解析으로, 定常狀態에서 非定常 狀態로, 土中水-一相系에서 淡水·鹽水의 境界 問題 등 多相系의 現象으로 그 研究 對象이 현저히 확대되고 있다.

防潮堤와 같이 境界面의 水位가 변화하고, 浸透 領域이 변화하거나 土質特性이 다른 帶水層의 境界와 自由水面이 교차할 경우의 浸透 解析에서는 飽和 領域만을 고려해서는 올바른 浸透 解析이 거의 불가능하므로 非飽和 領域도 고려한 飽和 非飽和 解析이 필요하다.

本 研究에서는 Davis 등⁵⁾이 開發한 飽和 非飽和 解析의 代表적 program인 UNSTA2를 定常 狀態뿐만 아니라 週期的으로 변화하는 水位變化에도 浸透解析이 가능하도록 UNSTAR program을 開發하였다. 그리고 새萬金 干拓 綜合 開發 事業 地區에 建設 豫定인 防潮堤의 代表 斷面을 選定해서 水理模型을 製作하여, 그 模型 防潮堤에 대한 浸透 實驗을 행하여 開發한 program을 檢定하고, 아울러 潮位 變化에 따른 堤體內의 自由水面의 變化, 浸出點의 位置와 浸透流量의 決定 등 防潮堤를 通過하는 浸透流의 特性을 究明코저 하였다.

II. 數值模型

1. 飽和 非飽和 理論

非飽和帶는 물과 空氣의 二相으로 構成되어 있으므로 基本式에는 물에 대한 것과 空氣에 대한 것이 모두 포함되어야 하며, 또한 이들 두 物質의 境界面의 취급에도 주의를 해야 한다. 그러나 실용상 空氣의 壓力을 어디에서나 大氣 壓과 동일한 것으로 가정하고 飽和時 壓力水頭는 正으로 非飽和時 壓力水頭는 負로 하여 連續方程式과 運動方程式에 比貯留係數, 흙의 壓縮率 및 比水分含量을 적용하여 式(1)과 같은 飽和, 非飽和浸透의 基本方程式을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho K^r K_{ij}^s \frac{\partial H}{\partial X_i}) \\ &= \frac{\partial}{\partial t} (\rho n S_r) = \rho (S_r \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial t}) \\ &= \rho (S_r \frac{\partial n}{\partial H} \frac{\partial H}{\partial t} + n \frac{\partial S_r}{\partial t}) \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

- 여기서 X_i : 空間座標 ($i=1, 2, 3$)
- ρ : 물의 密度 (g/cm^3)
- K^s : 飽和透水係數 (cm/sec)
- K^r : 相對透水係數 (0과 1사이의 값)
- H : 全水頭 (cm)
- S_r : 體積飽和度 (%) = θ/n
- θ : 體積含水率 (%)
- n : 有效空隙率 (%)
- t : 時間

全水頭 H 를 壓力水頭 h 와 位置水頭 z 로 바꾸어 表現하면 다음과 같은 飽和 非飽和의 浸透 基本方程式이 얻어진다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial X_i} (K^r K_{ij}^s \frac{\partial h}{\partial X_i} + K^r K_{i3}^s) = n \frac{\partial S_r}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} + \\ & \frac{\theta}{n} S_s \frac{\partial h}{\partial t} = [C(h) + S_r S_s] \frac{\partial h}{\partial t} \dots\dots\dots(2) \end{aligned}$$

여기서 $C(h)$: 比水分容量 = $n(\partial S_r / \partial h)$
 S_s : 比貯留係數 (g/cm^3) = $\partial n / \partial H$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(h+z) = \frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_1} = \frac{\partial h}{\partial X_1}$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_2} = \frac{\partial h}{\partial X_2}$$

$$\frac{\partial H}{\partial X_3} = \frac{\partial h}{\partial X_3}(h+z) = 1 + \frac{\partial h}{\partial X_3}$$

Davis 등⁵⁾은 式(2)에 地表面의 水分 蒸發과 植物의 影響도 고려하여 sink와 source項을 포함하여 式(3)으로 飽和 非飽和 浸透의 基本方程式을 정의하고 有限要素 program UNSAT2를 개발하였다.

$$R(h) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial}{\partial X_i} \left[K^r(h) K_{ij}^s \frac{\partial h}{\partial X_j} \right]$$

$$+ \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial X_i} K^r(h) K_{i3}^s - [C(h) + S_r S_s] \frac{\partial h}{\partial t}$$

-S=0(3)

여기서 R : 흐름領域에서 정의되는 擬似線型 微分演算子

S : Sink or Source 項

2. 有限要素方程式의 展開

Galerkin法과 Green의 初期 恒等式을 基本方程式(3)에 적용하면 式(4)와 같은 有限要素方程式이 얻어진다.

$$\sum_{m=1}^N A_{nm} h_m + \sum_{m=1}^N F_{nm} \frac{dh_m}{dt} = Q_n - B_n - D_n$$

(n=1, 2,N)(4)

여기서

$$A_{nm} = \sum_e \frac{\alpha}{4\Delta} K^r [K_{11}^s b_n b_m + K_{13}^s (b_n c_m + b_m c_n) + K_{33}^s c_n c_m] \dots\dots\dots(5-1)$$

$$F_{nm} = \sum_e \frac{\alpha \Delta}{12} [(2c_n + c_p + c_q) + 4S_r S_s]$$

(n=m일때)(5-2)

$$F_{nm} = 0 \quad (n \neq m \text{일때}) \dots\dots\dots(5-3)$$

$$Q_n = - \sum_e \frac{(LV)_n}{2} \dots\dots\dots(5-4)$$

$$B_n = \sum_e \frac{\alpha}{2} K^r (K_{13}^s b_n + K_{33}^s c_n) \dots\dots\dots(5-5)$$

$$D_n = \sum_e \int_{Re} S \xi_n^e dR \dots\dots\dots(5-6)$$

위의 式에서

Δ : 3角形 要素의 面積

α : 平面 흐름에선 1, 軸對稱 흐름에선 $2\pi \bar{X}_i$

$\bar{X}_i = (X_1^n + X_1^p + X_1^q) / 3$

$K^r = (K_n^r + K_p^r + K_q^r) / 3$

$(LV)_n$: 節點 n에 인접한 3角形 要素의 邊을 통하여 흐르는 流量

L : 節點을 포함한 邊의 길이

V : 流速으로 L에 걸쳐 均等한 것으로 가정

3. UNSATR program의 適用

가. UNSAT2 program의 補完

飽和 非飽和 理論으로 流體 흐름에 널리 이용되는 UNSAT2는 二重反復法을 이용하여 水位의 上昇이나 下降時에 댐의 浸透를 分析하고 있으나 水位가 變化할 때마다 변경되는 境界條件 등 資料를 일일이 다시 入力시켜야 하는 번거로움이 있을 뿐만 아니라 水位가 週期的으로 變化하는 경우에는 入力 資料에 境界條件이 고정되어 있으므로 浸透 解析이 불가능하게 된다.

따라서 UNSAT2의 본래 技能을 유지하면서 水位가 週期的으로 變化하는 경우에도 적용할 수 있도록 補完하여 UNSATR program을 開發하였다.

UNSATR program에는 水位가 變化함에 따라

水面에 잠기게 되는 傾斜面의 節點을 읽어 드리는 subroutine과 水位의 변화에 따라 節點의 境界 條件을 規定하는 subroutine을 開發하였다.

또한 有限要素網의 크기를 줄이고 水理模型의 境界 條件에 적합하도록 流量의 변화가 없는 節點을 규정하는 subroutine도 設定하였다.

UNSATR program의 構造와 subroutine의 機能은 Table-1과 같다.

또한 貯藏 file로 UNSAT2에서는 output, tape 1, tape 2, tape 3만을 設定하여 計算된 結果를 모두 貯藏시켜 이를 表나 그림으로 出力시키고 있다.

그러나 水位 變化를 追跡하는 浸透 解析은 計算量이 尠大하므로 이를 모두 貯藏하여 出力시킬 필요가 없으므로 필요한 資料를 unformatted file에 기록하여 資料의 入出力이 편리하고

file의 크기도 작아지도록 하였다.

그리고 壓力水頭, 負壓力水頭, 全水頭, 流量, 水位 變化의 計算 結果를 기록하는 file로 pressure head, negative pressure head, total pressure head, flux, wave를 추가하여 필요한 資料를 表와 그림으로 出力시켜 結果 解析에 편리하도록 出力 program UNSATRP를 開發하였다. 또한 tape 1 file에는 定常 狀態에서 계산한 結果를 기록시켜 非定常 狀態의 初期 條件으로 이용할 수 있도록 하였다.

한편 飽和 非飽和를 일체로 한 解析에서는 非飽和 領域에서의 土質 特性은 Neuman^{10~12)}이 제시한 特性 曲線에서 體積含水率만을 보정한 Fig. 1을 사용하였다.

나. 初期 條件과 境界 條件

1) 初期 條件

흙의 履歷現象을 고려하지 않고 壓力水頭를

Table-1. Structure and function of UNSATR program

Program	Function
MAIN	Main program to open file and to read the control data and to calculate the dimensional data
FEM	Subroutine for finite element method procedure
MATIN	Subroutine to converse unit factor and to read the soil property date and to calculate the specific moisture for initial execution
MAFILL	Subroutine to read the element data and to calculate and direction of principal hydraulic conductivity
RESET	Subroutine for initialization of the solution matrix and extrapolation of water heads
ELEM	Subroutine to calculate the hydraulic conductivity tensor of each element and to determine the unsaturated variable of corner nodes of each element
INTERP	Subroutine to interpolate the soil property
CONSTP	Subroutine for adjusting of matrix and vector
SOLVE	Subroutine to Gaussian elimination solver
FIXQ	Subroutine to calculate the boundary flux of all nodes
PRINTO	Subroutine for printing the total head, pressure head and discharge
MOIST	Subroutine to calculate the moisture content of unsaturated nodes in flow domain
SUBNO	Subroutine to read the nodal data for submerged side of sea dike
BCMOD	Subroutine to calculate the water level and pressure head for submerged nodes of sea dike
FIXFLX	Subroutine to assign the fixed flux nodes

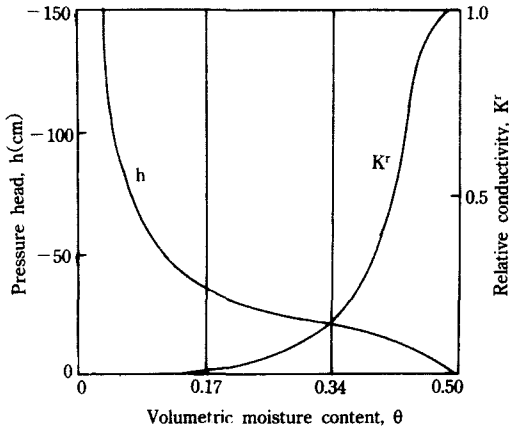


Fig. 1. Unsaturated properties of material

體積含水率의 一價函數로 정의 하였으므로 初期條件은 壓力水頭만으로 나타낼 수 있다.

$$h(X_i, 0) = h_0(X_i), \quad i=1, 2, 3 \dots \dots \dots (6)$$

여기서 h_0 는 X_i 의 函數이다.

2) 境界 條件

解析에 適用한 境界 條件은 Fig. 2와 같다.

가) Dirichlet 境界條件

壓力水頭가 既知인 境界로 Fig. 2에서 BCDF面과 HIJK面이 이 境界에 해당됨

$$h(X_i, t) = h_0(X_i, t), \quad i=1, 2, 3 \dots \dots \dots (7)$$

여기서 X_i : 時間 t의 函數

나) Neumann 境界條件

流量이 既知인 境界로 Fig. 2에서 AK面, EG面, AB面이 이 境界에 해당됨

$$K^r \sum_{i=1}^3 \left(\sum_{j=1}^3 K_{ij}^s \frac{\partial h}{\partial X_j} + K_{i3} \right) n_i = -V(X_i, t) \dots \dots \dots (8)$$

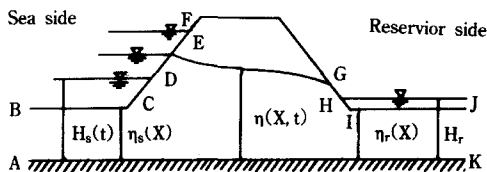


Fig. 2. Boundary condition

여기서

n_i : 境界面의 單位外向垂直 vector

v : 流速으로 X_i 와 t의 含水

III. 材料 및 方法

1. 水理模型裝置의 製作

浸透解析을 위한 斷面으로 새萬金 地區 第2號 防潮堤중 夜味島와 飛雄島를 연결하는 一般締切 區間의 斷面을 模型의 대상으로 하였다.

한편 이 區間의 平均 바닥 標高는 -7.64m, 防潮堤 바닥에서 11m깊이인 標高 -18.64m에 不透水層이 있으며, 防潮堤의 높이는 17.24m 이고, 防潮堤 橫斷面의 低幅은 약 200m가 된다.

이 代表 斷面에 幾何學의 相似律을 적용하여 築造된 模型이 Fig. 3이다.

模型은 慶尙大學校 農科大學 農工學科 水理 實驗室에 설치하였다. 이 模型의 設置와 解析에 관련된 相似律은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} X_r &= Z_r = 1/20 \\ Y_r &= 1 \\ n_r &= 1 \\ D_r &= 1 \\ T_r &= L_r^{1/2} \\ Q_r &= L_r^{3/2} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (9)$$

여기서

X_r, Y_r, Z_r : 각각 防潮堤의 幅, 길이, 높이의 幾何學的 相似律

n_r : 材料의 空隙率의 相似率

D_r : 材料의 粒徑의 相似率

T_r : 時間의 相似率

Q_r : 流量의 相似率

2. 實驗用 材料의 特性

盛土 材料의 物理的 性質과 粒度 曲線은 Table-2 및 Fig. 4와 같다.

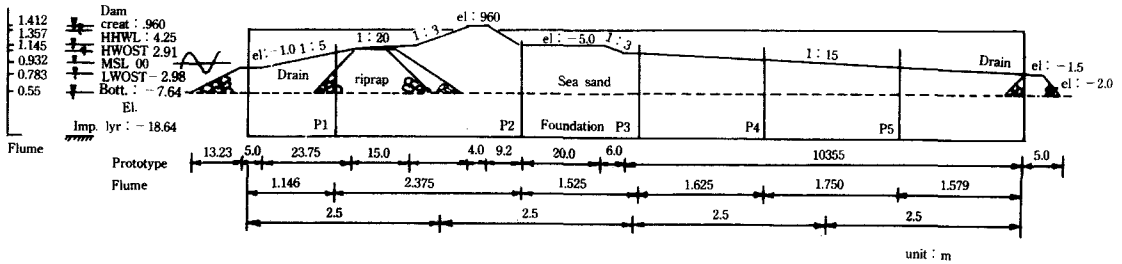


Fig. 3. Experimental flume for hydraulic model test

Table-2. Properties of experimental embankment soil

Specific gravity G_s	Percent passing of #200	Grain diameter(mm)		Coefficient of uniformity C_u	Liquid limit L_L	Plastic index P_I	Soil classification
		D_{10}	D_{60}				
2.61	9.5%	0.078	0.19	2.44	NP	0	SM-SP

Wet density $\gamma_t(g/cm^3)$	Dry density $\gamma_d(g/cm^3)$	Moisture content $w(\%)$	Porosity $n(\%)$	Void ratio e	Degree of saturation $S_r(\%)$	Coefficient of permeability $K^s(cm/sec)$
1.791	1.297	38.1%	50.3%	1.012	98.3	1.10×10^{-2}

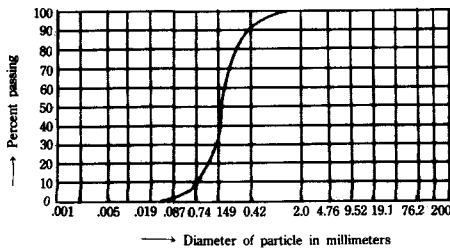


Fig. 4. Gradation curve of soil used

3. 解析 方法

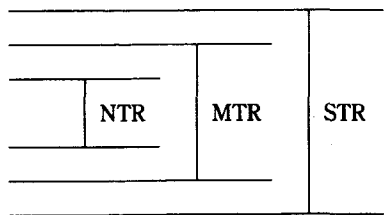
가. 潮 位 表

解析에 사용한 潮位表는 Table-3과 같다. 한편 内水面 管理水位는 -1.50m(實驗에선 -0.075m)로 일정하게 유지하였다.

Table-3에서 괄호안의 數値는 幾何學的 相似率을 적용하여 解析에 사용한 값이다.

Table-3. Table of tide

Tide	Tidal level	Modified tidal level for analysis
HHWL	4.250m	4.250m(0.2125m)
HWOST	2.910m	2.910m(0.1455m)
HWOMT	2.085m	2.086m(0.1043m)
HWONT	1.261m	1.262m(0.0631m)
MSL	-.037m	0.000m(0.0000m)
LWONT	-1.335m	-1.262m(-0.0631m)
LWOMT	-2.159m	-2.086m(-0.1043m)
LWOST	-2.983m	-2.910m(-0.1455m)



資料: 새萬金 基本 調査 報告書(1989. 農振公)

나. 定常 浸透 解析

水理模型實驗은 大潮平均干潮位(LWOST)를 維持하여 흐름이 安定된 狀態로 될 때까지 장시간 방치한 후 外水位를 순간적으로 平均海面(MSL), 大潮平均滿潮位(HWOST), 最高高潮位(HHWL)를 維持시키면서 流出이 發生할 때부터 浸透流量이 일정하게 될 때까지 10分 간격으로 結果를 出力시켜 分析하였다.

다. 非定常 浸透 解析

實驗 週期는 새萬金 防潮堤의 築造 地點의 時間 相似律에 맞추어 $12hr \times (1/20)^{1/2} \times 60 = 160min$ 으로 하였다.

水理模型實驗에서나 數值解析에서 모두 外水位 MSL에서 浸透流量이 일정하게 된 다음에 非定常 狀態의 解析을 하였다.

라. 海水 調製 및 測定 方法

實驗에 사용한 鹽水는 食鹽水를 溶解하여 海水와 같은 3%의 濃度가 유지되도록 하였다.

定常 實驗에서 모든 測定은 浸透流出이 發生할 때부터 10分 間隔으로 測定하였고, 非定常 實驗에서의 測定 時間 間隔은 6分 40秒이고 이것은 位相差 15°에 해당한다.

浸透流量의 測定은 內水面의 水位를 實驗前에 1.5m로 유지시켰다가 實驗이 시작하면 물의 공급을 중단한 후, 模型 防潮堤를 완전히 통과한 물을 측정병에 모아 測定하였다.

마. 有限要素網의 構成

Program의 效率을 높이고 解의 收斂이 잘

되도록 要素를 구성하기 위하여 境界 形狀과 境界 條件이 변화하는 外的 境界 條件과 透水 係數가 다른 土層사이의 境界面을 따라 分割하여 要素를 構成하였으며 動水傾斜가 큰 上下流 斜面에서는 要素의 크기를 작게하고, 動水傾斜가 작은 領域에서는 要素의 크기를 크게 하였다.

한편 測點이 설치된 斷面에서 要素를 分割하여 水理模型實驗과의 比較가 용이하게 되도록 하였으며, 浸出點이 형성될 것으로 예상되는 內水位와 접하는 內斜面 附近에는 節點의 間격을 좁게 하였다.

또한 誤差는 要素의 變形에 기인하므로 가능한 要素의 邊의 長이를 같도록 하였고, 防潮堤의 外斜面과 材料의 境界 附近에서는 3角形 要素로, 나머지 부분은 4角形 要素로 構成하였다.

節點 1을 有限要素網의 原點으로 정하였고, 水理模型의 低面을 X軸으로 하고 이에 垂直方向을 Z軸으로 하였다. 節點 番號는 原點을 지나는 Z軸에서 아래에서 위로 부여한 후 인접한 Z軸에도 같은 方法으로 番號를 부여한다.

transverse line은 防潮堤 斷面의 짧은 변인 Z軸을 選定하였으며 computer의 記憶容量을 최소로 하기위해 transverse line에 設定되는 節點의 最大數가 작아지도록 有限要素網을 構成하였다. Fig. 5는 點數 267, 要素數 256이던 한 transverse line의 最大 節點數는 12인 有限要素網이다.

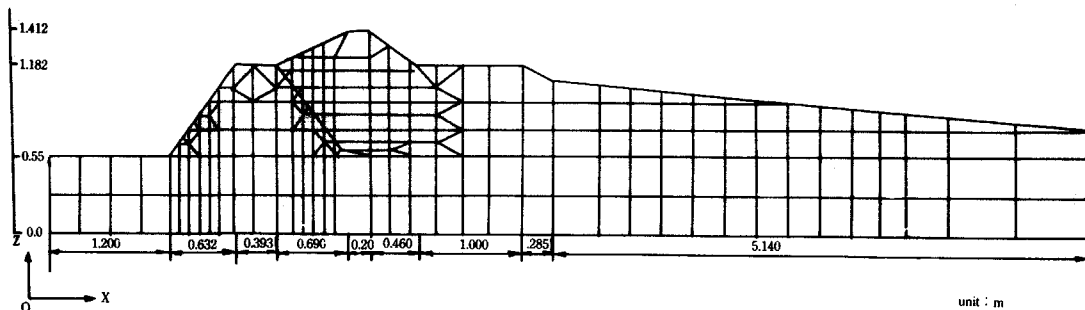


Fig. 5. Finite element mesh for sea dike model simulation

IV. 結果 및 考察

1. 定常 浸透 解析

가. 浸透 流量

潮位別로 浸透流가 定常浸透狀態에 도달할 때까지 浸透時間과 累加浸透流量의 關係를 圖示한 것이 Fig. 6으로 모두 數值解法의 結果와 水理模型實驗의 結果가 거의 같았으며, 各 外水位別 浸透時間과 累加浸透流量의 關係는 매우 有意性이 높은 正의 相關關係를 갖는 것으로 나타났으며 그 關係式은 式(10)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{HHWL} : F_N &= 20.385 \quad T - 8.309 \\
 F_H &= 19.436 \quad T - 6.003 \\
 \text{HWOST} : F_N &= 14.988 \quad T - 4.954 \\
 F_H &= 14.000 \quad T - 4.890 \\
 \text{MSL} : F_N &= 4.820 \quad T - 3.386 \\
 F_H &= 4.614 \quad T - 0.705
 \end{aligned} \quad \dots (10)$$

여기서

F_N : UNSATR으로 구한 累加浸透流量($10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}$)

F_H : 水理實驗에서 구한 累加浸透流量($10^{-3} \text{ m}^3/\text{m}$)

T : 浸透時間(hr.)

Table-4는 定常 狀態에서 外水位 別로 堤體를 통과하는 浸透流量을 開發한 program UNSATR와 水理模型實驗 및 流線網을 이용하여 구한 값으로 防潮堤의 築造 地點과 築造 材料 그리고 防潮堤 斷面의 크기를 고려하면 閔 등⁹⁾의 研究 結果와 유사하다.

Fig. 7에서 自由水面은 壓力水頭가 0인 等壓線으로 飽和 領域과 非飽和 領域의 境界線으로 되며 堤體上部에 等水頭線이 密集되어 있는 것으로 보아 非飽和 領域에 局部的으로 飽和된 領域이 존재하고 이와 같이 局部的으로 존재하는 飽和 領域은 外水位가 낮아 질수록 넓게 分布함을 확인할 수 있었다. 또한 堤體內的 모든

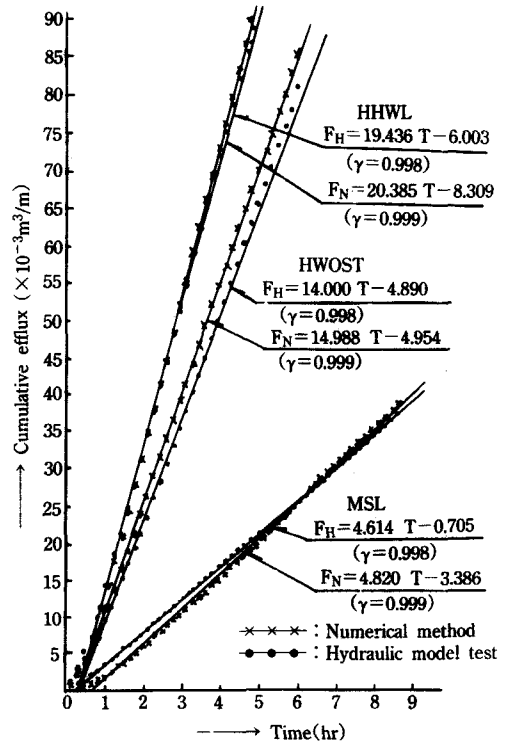


Fig. 6. Relationships between cumulative efflux and time in steady state

Table-4. Efflux at steady state

unit : $\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$

Water level	Method		
	UNSTAR program	Hydraulic model test	flow net
HHWL	44.93	43.51	21.60
HWOST	33.16	33.29	15.85
MSL	10.84	10.67	4.86

節點에서 壓力水頭와 位置水頭를 알 수 있으므로 有效應力을 計算하여 堤體의 安定 計算에도 應用할 수 있을 것으로 判斷된다.

나. 自由水面과 浸出點

各 外水位別로 定常浸透狀態일 때의 浸出點과 自由水面을 數值解法, 水理模型實驗 및 Casagrande方法으로 구한 結果를 比較한 것이 Fig. 8이다.

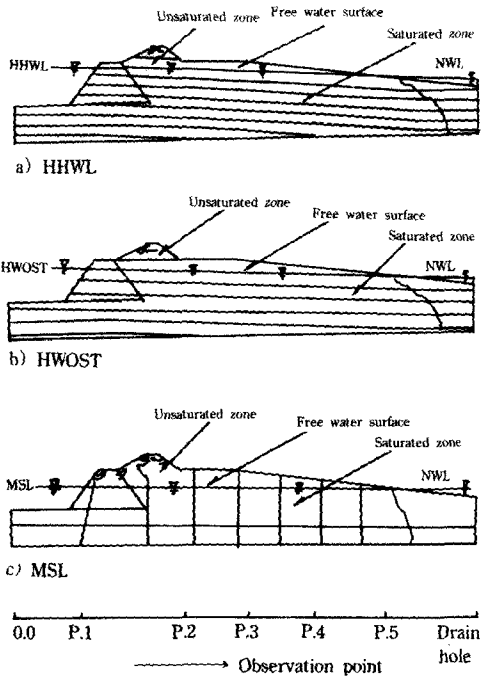


Fig. 7. Flow net and free water surface in steady state

Fig. 8에서 數值解法으로 구한 浸出點의 位置는 Casagrande法과 水理模型實驗으로 구한 浸出點 사이에 位置하고 있는 것으로 나타났으며, 外水位 MSL에서는 浸出點의 位置가 數值解法과 水理模型實驗에서는 모두 內水面과 만나는 點에 형성되었고, Casagrande法은 약간 높은 쪽에 나타났다. 그리고 外水位 HHWL과 HWOSt에서는 最初에는 內水面과 일치하는 點에 형성되었던 浸出點이 점차 上昇되어 內水面보다 높은 點에 浸出點이 형성되는 것을 알 수 있었다. Casulli³⁾도 上下流水位가 定常狀態인 댐에서 自由水面의 形成 過程을 飽和領域만을 대상으로 한 數值解析에서 本 研究와 같이 最初의 浸出點이 下流側 水面과 일치하였다가 차츰 上向 調整되었다고 보고하였다.

또한 Fig. 8에서 自由水面이 形成되는 過程을 나타낸 그림은 數值解法으로 구한 結果로 最上部에 있는 流線이 定常狀態에 도달한 경우의

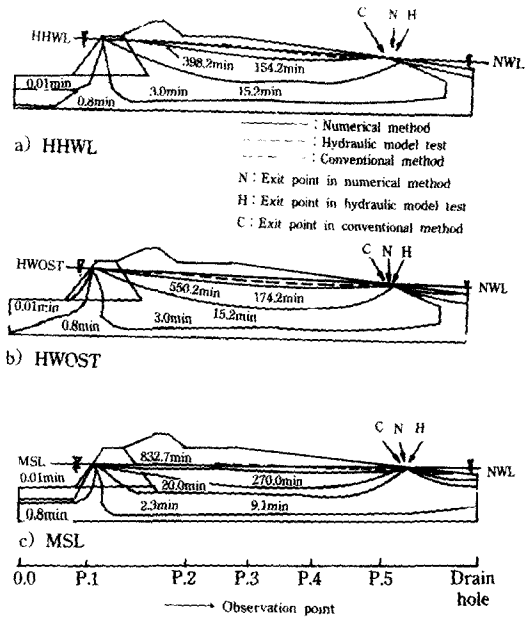


Fig. 8. Advance of free water surface in steady state

自由水面이고 이 自由水面의 바로 아래에 있는 自由水面은 浸出이 발생하기 시작하는 순간에서의 自由水面이다. 外水位 別로 浸出이 발생하기 시작하여 浸透流가 正常的으로 될 때까지의 所要 時間은 HHWL, HWOSt, MSL에서 數值解法에서는 각각 244分, 376分, 562分이었으며, 水理模型實驗에서는 각각 270分, 350分, 520分 정도 소요되었다.

이와 같이 外水位가 낮을수록 浸透流가 正常的으로 되는 데 많은 時間이 소요되는 것은 外水位가 낮아질수록 自由水面의 上部에 非飽和領域이 두껍고 넓게 形成되므로 이 非飽和領域에서 매우 느린 速度로 흐름이 발생하여 浸透流에 영향을 미치기 때문인 것으로 생각된다.

위의 結果로 보아 흙댐이나 防潮堤에서 浸出點과 自由水面의 位置를 추정은 UNSATR program을 이용하여도 좋을 것으로 생각된다.

2. 非正常 浸透 解析

가. 浸透流量

外水位的 週期的인 變化에 따른 浸透流量을 測定하여 1 cycle당 堤體를 통과하는 浸透流量이 일정하게 될 때까지 時間과 累加浸透流量과의 關係를 圖示한 것이 Fig. 9로서 數值解法의 結果와 水理模型實驗의 結果가 거의 동일 하였다. 浸透時間과 累加浸透流量과의 關係는 定常浸透解析에서와 같이 매우 有意性이 높은 正의 相關關係를 갖는 것으로 나타났고 그 關係式은 式(11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 \text{STR} : F_N &= 7.685 \quad T = 2.283 \\
 F_H &= 7.560 \quad T = 1.634 \\
 \text{MTR} : F_N &= 6.794 \quad T = 1.133 \\
 \text{NTR} : F_N &= 5.924 \quad T = 0.419
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots(11)$$

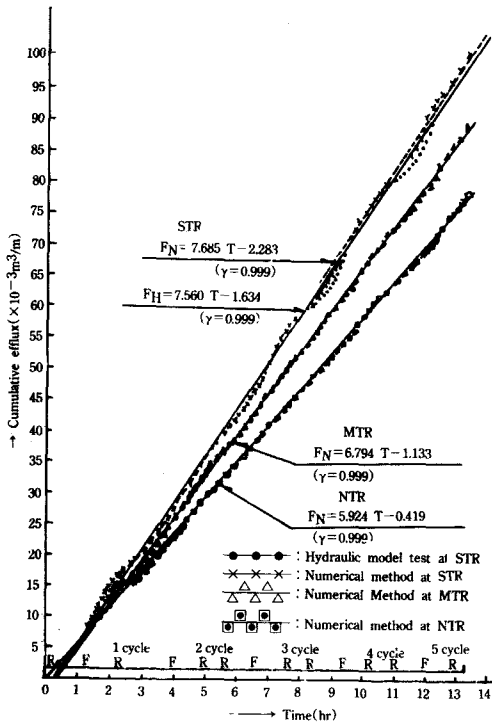


Fig. 9. Relationships between cumulative efflux and time in transient state

Fig. 9는 大潮差에서는 數值解法과 水理模型實驗의 結果를, 平均潮差와 小潮差에 대해서는 UNSATR解析만을 실시한 結果를 圖示한 것이다. 定常浸透解析과 大潮差에 대한 非定常浸透解析에서 浸透流量등 浸透流의 特性이 數值解法으로 구한 結果와 水理模型實驗으로 구한 結果가 일치하였으므로 UNSATR program의 妥當性이 立證된 것으로 보고 平均潮差와 小潮差에 대해서는 開發한 數值模型으로만 分析하였다.

Table-5는 潮位 變化에서 1 cycle당 浸透流量이 일정하게 될 때까지의 浸透流量을 나타낸 것으로 5번째 cycle의 값이 1 cycle당 浸透流量이 일정하게 되는 값이다. 따라서 이 값에 流量의 尙似律을 고려하면 潮位 變化의 影響을 받는 新萬金 防潮堤의 實際 浸透流量이 구해진다. 따라서 본 解析에 사용한 防潮堤와 비슷한 條件으로 築造되는 防潮堤는 Table-5의 浸透流量을 직접 이용할 수 있고, 본 研究에 이용한 數值模型을 이용하여 浸透流量을 計算할 수 있을 것으로 생각한다.

Fig. 10은 각 潮差別, 外水位別로 數值解法으로 그린 流線網이다. 이 流線網에서 주목할 만한 것은 飽和 非飽和을 일체로 한 解析에서는 外水位가 下降할 경우 自由水面 上部의 堤體內에 飽和 領域이 局部的으로 존재하는데 이는 水理模型實驗中 採取한 堤體 試料에서도 확인되었다. 또한 非飽和 領域에서의 흐름으로 인하여 自由水面과 교차하는 流線이 形成되는 것을 확인할 수 있었다.

Freeze⁷⁾는 有限差分法을 이용하여 흙댐에서 非飽和 領域이 浸透流에 미치는 影響을 研究하여 본 研究 結果와 같이 非飽和 領域에서의 흐름으로 인하여 自由水面과 교차하는 流線이 있음을 밝히고 自由水面은 流線이 아니라고 하였다.

또한 潮差에 관계없이 滿潮位에서는 外斜面에 流入이 발생하고, 이 이외의 外水位에서는 外

Table-5. Efflux by tidal 160.0 min.

unit : $10^{-3}m^3/cy/m$

Tide	Method	Time(min.)	1st. cy.	2nd. cy.	3rd. cy.	4th. cy.	5th. cy.
Spring tide range	Hydraulic model test	R1 0-40	2.8485	2.9458	3.0315	3.0016	2.9187
		R2 40-80	4.0257 6.8702	4.0858 7.0316	4.0542 7.0857	4.0186 7.0202	4.0229 6.9416
		F1 80-120	5.5743	5.9215	6.0714	6.1930	6.0243
		F2 120-160	6.5985 12.1718	6.9800 12.9015	7.0714 13.1428	7.0958 13.2888	7.0358 13.0601
		Total	19.0470	19.9331	20.2285	20.3090	20.0017
	Numerical method	R1 0-40	3.5314	3.5413	4.3205	4.4170	4.4291
		R2 40-80	4.9170 8.4484	4.9090 8.4503	5.0710 9.5060	5.0890 9.5060	5.0930 9.5221
		F1 80-120	4.8477	4.8181	5.3915	5.4650	5.4738
		F2 120-160	5.7929 10.6376	5.7766 10.5947	6.1280 11.5195	6.1710 11.6360	6.1771 11.6509
		Total	19.0860	19.0450	20.1110	21.1420	21.1730
Mean tide range	Numerical method	R1 0-40	3.4764	3.8930	3.9370	3.9434	3.9440
		R2 40-80	4.3850 7.8614	4.4550 8.3480	4.4650 8.4020	4.4670 8.4104	4.4670 8.4110
		F1 80-120	4.3480	4.5700	4.6000	4.6054	4.6060
		F2 120-160	4.9946 9.3416	5.1270 9.6970	5.1470 9.7470	5.1502 9.7556	5.1500 9.7560
		Total	17.2040	18.0450	18.1490	18.1660	18.1670
Neap tide range	Numerical method	R1 0-40	3.4268	3.5873	3.5925	3.5933	3.5935
		R2 40-80	3.9160 7.3428	3.9250 7.5123	3.9260 7.5185	3.9260 7.5193	3.9260 7.5195
		F1 80-120	3.9179	3.9632	3.9667	3.9674	3.9675
		F2 120-160	4.2893 8.2072	4.3065 8.2697	4.3088 8.2755	4.3093 8.2767	4.3100 8.2775
		Total	15.5500	15.7820	15.7940	15.7960	15.7970

R1, R2 : Time interval of water level rising

F1, F2 : Time interval of water level falling

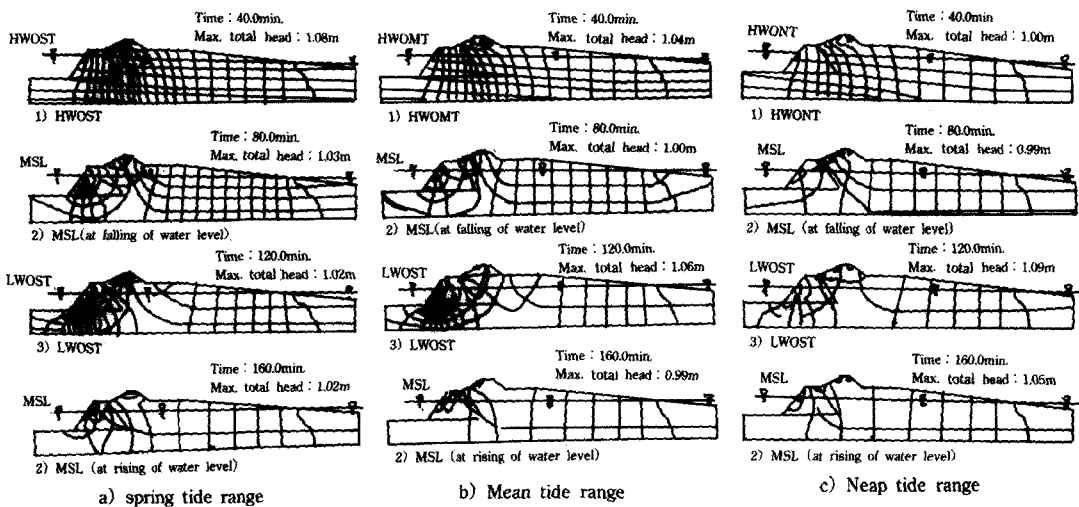


Fig. 10. Flow net and free water surface in transient state

斜面에서 堤外地쪽으로 流出이 발생함을 알 수 있으며, 또한 外水位의 下降時가 上昇時보다 堤體를 통과하는 浸透流量이 많음을 알 수 있다. 또한 外水位가 낮아질수록 外斜面에 流線網이 밀집되어 堤外地로 流出이 많이 발생함을 알 수 있다.

나. 自由水面과 浸出點

數値解法의 結果로 自由水面이 형성되는 과정을 각 潮差별로 外水位에 맞추어 그린 것이 Fig. 11이다.

水理模型實驗이나 數値解析에 의한 浸出點의 位置는 內水面의 水位와 같은 節點인 252(X=7.710m, Z=0.892m)로 潮差나 外水位의 변화와 관계없이 항상 일정하였다.

특히 Fig. 11에서 外水位가 下降할 때의 自由水面은 둥근모양을 이루고 있어 外水位쪽으로 도 流出이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이것은 堤體내의 自由水面의 低下 速度가 外水位의 低下 速度보다 느리기 때문이다. 반면에

外水位가 上昇할 경우에는 堤體內의 自由水面이 外水位보다 낮게 형성되어 Table-5와 같이 堤體를 통과하는 浸透流量이 外水位 下降時보다 적게 되었다. 이런 現象은 堤體의 外斜面의 設計에 반영하여야 할 것으로 생각된다.

Stephenson¹⁸⁾은 貯水池의 水位가 급히 下降할 경우 堤體內의 自由水面의 형성이 본 研究 結果와 비슷한 형상을 이루고 있음을 발표하였다.

Desai⁶⁾도 河川의 水位가 낮아질 경우 堤體內의 自由水面의 變化를 有限要素法으로 解析하고 粘性流體模型으로 實驗한 結果에서도 本 研究와 비슷한 現象을 보고하였다.

V. 結 論

飽和 非飽和 理論으로 浸透流를 豫測할 수 있는 UNSAT2를 補完하여 外水位가 週期的으로 變化하는 非定常 狀態에서도 適用할 수 있는 UNSATR program을 開發하고 水理模型實驗을 통해서 이를 檢定하고, 防潮堤의 堤體를 통과하는 浸透流를 分析한 結果는 다음과 같다.

1. 堤體를 通過하는 浸透流量은 定常 狀態 및 非定常 狀態에서 UNSATR program에 의한 結果와 水理模型實驗의 結果는 매우 類似하였다.

2. 定常 狀態 解析에서 自由水面은 모든 解析 方法에서 비슷한 結果를 얻었다. 數値解法과 水理模型實驗에서 外水位가 낮아질수록 浸透流가 定常 狀態에 이르는 時間은 非飽和 領域에서의 流出 때문에 많이 少요되었다.

3. 非定常 狀態에서의 外水位가 下降할 경우 自由水面이 外水位보다 높았다. 또한 非飽和 領域에서의 흐름으로 인하여 自由水面과 交叉하는 流線이 형성되었다.

4. UNSATR program은 定常 狀態에서 뿐만 아니라 週期的인 水位 變化에 대해서도 連續的으로 浸透流를 解析할 수 있는 收斂이 빠른 有用한 方法이라는 妥當性이 立證되었다. 따라

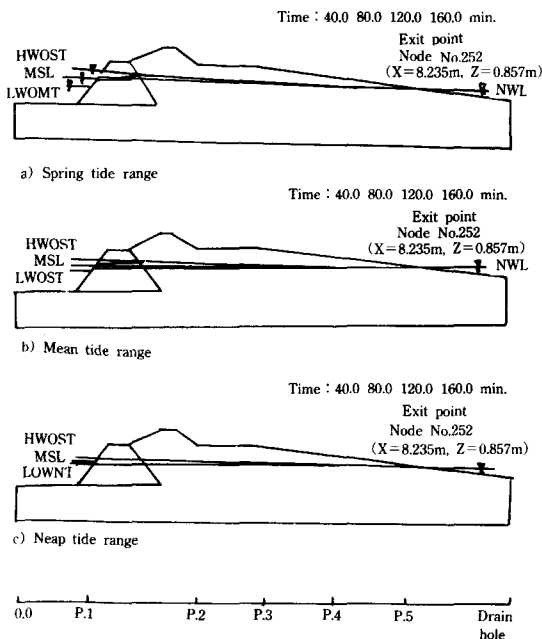


Fig. 11. Advance of free water in transient state

서 적절한 入力資料를 이용하면 UNSATR program으로 防潮堤의 實物에 대해서도 潮位의 變化를 고려한 浸透流量을 算定할 수 있다.

參 考 文 獻

1. Abriola, L. M., 1986, Finite element solution of the unsaturation flow equation using hierarchic basis functions. VI International Conference on Finite Elements in Water Resources, Lisbon : 125-133.
2. 赤井浩一, 大西有三, 西垣誠, 1977, 有限要素法による飽和-不飽和浸透流의 解析, 土木學會論文報告集(264) : 87-96.
3. Casuli, V. and D. Greenspan, 1982, Numerical solution of free surface porous flow problems, International J. for Numerical Methods in Fluids, 2 : 115-122.
4. 趙炳辰外, 1990, 새萬金地區 防潮堤를 통한 鹽水侵入에 관한 研究, 農林水産部, 農業振興公社 : 89-125.
5. Davis, L. A. and S. P. Neuman, 1983, Documentation and user's guide : UNSAT2-variably saturated flow model(including 4 example problems), Final Report, WWL/TM-1791-1, Water, Waste & Land, Inc., Colorado.
6. Desai, C. S., 1972, Seepage analysis of earth banks under drawdown, J. of the Soil Mech. & Found. Div. SM 11 : 743-1162.
7. Freeze, R. A., 1971, Influence of the unsaturated flow domain on seepage through earth dam, Water Resources Research, 7(4) : 929-941.
8. 權武男, 姜义默, 1983, 堤體의 浸透流 解析에 관한 比較 研究, 韓國農工學會誌 25(1) : 41-66.
9. 閔允植外, 1988, 새萬金 地區 干拓 綜合 開發 事業 基本 調査 報告書 第7-1卷, 農林水産部, 農業振興公社 : 148-153.
10. Neuman, S. P., 1972, Finite element computer problems for flow in saturated-unsaturated porous media, Second Annual Report, Project No. A10-SWC-77, Hydraulic Engineering Laboratory, Technion, Haifa.
11. _____, 1973, Saturated-unsaturated seepage by finite elements, Proc. ASCE. J. Hydraul. Div. 99(HY12) : 2233-2250.
12. _____, 1975, Galerkin approach to saturated-unsaturated flow in porous media, Ch. 10 in Finite Elements in Fluids, John Wiley & Sons London : 201-217.
13. _____, R. A. Feddes and E. Bresler, 1974, Finite element simulation of flow in saturated-unsaturated soils considering water uptake by plants. Third Annual Report, Project No. A10-SWC-77, Hydraulic Engineering Laboratory, Technion, Haifa.
14. 農業振興公社, 1988, 새萬金 地區 干拓 綜合 開發 事業 基本 調査 報告書 17(1), 農林水産部, 農業振興公社 : 143-153.
15. 大西有三, 西垣誠, 1981, 有要素法による飽和・不飽和浸透流解析의 프로그램とその解説.
16. Rubin, J. and R. Steinhardt, 1963, Soil water relations during rain infiltration, 1, Theory, Proc. Soil. Soc. Am. 27 : 246-251.
17. Sorek, S., 1986, An adaptive Eulerian-Lagrangian approach for the numerical simulation of unsaturated flow. VI International Conference on Finite Elements in Water Resources Lisbon : 87-100.
18. Stephenson, D., 1978, Drawdown in embankments, Geotechnique 28(3) : 273-280.
19. Watson, K. K., 1987, Gravity drainage analysis for scale heterogeneous porous material under falling water table conditions, Water Resources Research 23(5) : 818-826.
20. Yalin, M. S., 1971, Theory of hydraulic models, Macmilan press, Ltd. London : 80-90.