

三次元 浸透流解析을 위한 理論的 方法과 實驗適用例에 關한 考察

A Study of Theoretical Method and Application to Laboratory Tests
for Three-dimensional Transient Seepage Analysis

秦	柄	益*
Jin,	Byung	Ik
金	在	弘**
Kim,	Jae	Hong

Abstract

The main part of this thesis deals with a three-dimensional transient seepage flow, discussing its fundamental conception into which the mathematical analysis was introduced based upon the finite element method, propriety of geometrical analysis and flow movement of seepage water.

As is commented in the body of the report, the saturated-unsaturated method with respect to the free water surface method is revealed to have the relative merits and demerits. Generally, the unknown sections in the form of free water surface matters in case that tunnels or pores appear. On the other hand, the applicable range is quite large and variable to the methods accordingly.

Also, an example as to the seepage analysis in the rock bed section is described. An unfavorable time-consuming problem is inevitable because the complicated and widely multifarious joints and faults are responsible for the intensity of seepage flow.

要 旨

本 論文은 필 뎀에서의 浸透解析에 有限要素法을 利用한 數值解析의 基本概念과 幾何學的 解析法을 實驗的으로 考察하였다.

自由水面 境界法에 따른 飽和, 不飽和法은 本文에서와 같이 長短點이 있으며 通常 自由水面形에서의 未知領域內에 터널 및 空洞이 있을 경우를 고려하고 있으며 方法에 따라 적용범위는 다양하다.

또한 岩盤分割內의 浸透流를 解析하였으며 特別히 側面에서는 복잡다양한 節理 및 龜裂이 있어서 貯水池의 浸透性이 크며 또한 이의 解析에는 時間的으로도 많은 時間이 걸리는 애로점이 있다.

*正會員·漢陽大學校 工科大學 教授 土木工學科

**正會員·漢陽大學校 大學院 土木工學科 博士課程

1. 序 論

댐 本來의 貯水機能은 댐에 있어서 基礎地盤內의 浸透水와 密接한 關聯이 있다. 特히 最近에 댐 基礎가 堅固한 良質地盤에 設置하기 위한 位置 選定은 쉬운 問題는 아니다. 댐 側面의 不利한 地盤條件을 극복하기 위해 댐의 基礎地盤內의 浸透流를 精確하게 파악하는 것은 重要한 일이다.

지금까지의 浸透流解析은 二次元的인 取扱이 많이 있었으며 필댐의 基礎地盤內 浸透水의 流動現象도 二次元的으로 論하여 왔다. 그러나 基礎部에서의 潛伏流는 節理 또는 댐軸이 흐름方向과 斜交로 흘러서 周邊地盤內로 迂廻하기 때문에 필 댐의 浸透流는 二次元的으로 다루기가 곤란한 경우가 많다. 軸對稱問題와 같은 特殊한 경우를 제외하고는 一般的으로 三次元浸透流의 理論的 解析은 어렵지 않으며, 電煤質 제라친 질을 使用하여 電氣相似法을 適用하므로써 필 댐에서의 基礎地盤內의 浸透流를 實驗的으로 調査할 수 있다.

여기서 電氣相似法은 數值解析手法으로서 比較的 複雑한 모델을 取扱하지 않고서도 可能하다. 또 有限要素法은 필 댐에 있어서 基礎地盤內의 浸透水의 流動狀態를 立體的 經時的으로 파악할 수 있다.

本論文은 有限要素法에 의한 三次元 浸透流를 개략적으로 解析을 하므로써 댐 周邊地盤內의 迂廻流 等에 대하여 高찰하고자 한다.

2. 有限要素法에 의한 三次元 浸透流解析法

浸透流解析은 基礎地盤內의 自由水面 存在有無에 따라 複雑성에 차이가 있다. 地盤內 自由水面이 存在할 때는 飽和領域의 解析對象과 解析上의 境界條件을 固定하므로써 比較的 쉽게 解析할 수 있다.

한편 地盤內 自由水面이 存在하면 그 自由水面의 位置가 解析되기 前에는 잘 나타나지 않고 飽和領域의 解析對象과 解析上境界를 固定하면 解析은 複雑하지 않다.

이러한 自由水面과 上部의 不飽和領域 또는 飽和領域을 취하여 解析上의 境界條件을 事前에 固定하여 두고 問題를 解決하고자 한다. 이러한 方法을 飽和, 不飽和浸透流解析法이라고 말할 수 있으며 最近의 浸透流解析의 主流를 이루고 있다.

2.1에서는 飽和領域을 解析對象으로 飽和地盤中의 定常浸透流解析法에 對해 說明하고 2.2에서는 不飽和領域을 解析對象으로 飽和, 不飽和地盤中의 浸透流解析法을 說明하고자 한다.

2.1. 飽和地盤中の 定常浸透流解析

(1) 多孔體內의 浸透流

댐 堤體內, 層理, 節理가 分布된 岩盤內에 空隙이 있을 때에 多孔體內의 浸透流理論을 適用할 수 있다.

一般的으로 浸透領域의 水頭分布를 알고 있으면 浸透流速, 浸透流量, 浸透水壓 等を 求할 수 있다. 浸透流解析에는 水頭值分布를 求하는 것이 重要하다. 地盤內의 水頭值를 求하여 三次元的 浸透流의 基礎方程式을 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = 0 \quad (2-1)^{(2)}$$

이때 K_x, K_y, K_z 는 x, y, z 方向의 透水係數(cm/sec)이다. 位置水頭의 基準面을 $y=0$ 이라고 하면 P 를 點 (x, y, z) 에 對한 浸透水壓, γ_w 를 물의 單位重量, 그 點의 水頭值 H 는 다음 式과 같이 나타낼 수 있다. ⁽²⁾

$$H = P/\gamma_w + y \quad (2-2)$$

境界條件에는 다음 2種類가 있다. ⁽¹⁾

(i) 固定條件: H 의 값이 境界上에 關係되는 경우

$$H = H_0 \quad (2-3)$$

(ii) 自由條件: 境界上에 浸透流의 流出量이 關聯된 경우

$$K_x \frac{\partial H}{\partial x} l_x + K_y \frac{\partial H}{\partial y} l_y + K_z \frac{\partial H}{\partial z} l_z + q = 0 \quad (2-4)$$

이때 l_x, l_y, l_z 는 境界面上에 따라 外向法線의 方向으로 餘弦이 되고 q 는 單位表面에서의 流出量($\text{cm}^3/\text{sec}/\text{cm}^2$)이다. 그림 2-1과 같은 三次元 Isoparametric 有限要素를 使用하여 式(2-1)

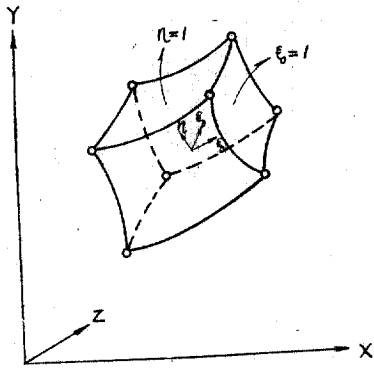


그림 2-1 3次元 Isoparametric

을 식 (2-3)으로부터 식 (2-4)의 境界條件을 解析하여 水頭分布을 求하게 된다.

(2) 岩盤分割內의 浸透流

岩盤內의 浸透流는 岩盤을 分割하여 볼 수 있도록 流過시키는 것을 생각할 수 있다.

이때 分割된 分布는 均등하게 하여 岩盤浸透流解析을 하고 岩盤을 連續體로 취급을 할 경우 分割을 볼 수 있도록 模型板을 그림 2-2와 같게 要素를 고려할 必要가 있다.

岩盤分割內의 浸透流를 생각할 경우

① 分割된 兩壁은 不透水層 ② 分割內 흩粒子는 浸透水가 있고 ③ 層流흐름의 浸透流 ④ 浸透流는 Navier-stokes의 方程式을 適用할 수 있다고 보면 分割內의 平均流速을 다음과 같이 求할 수 있다.

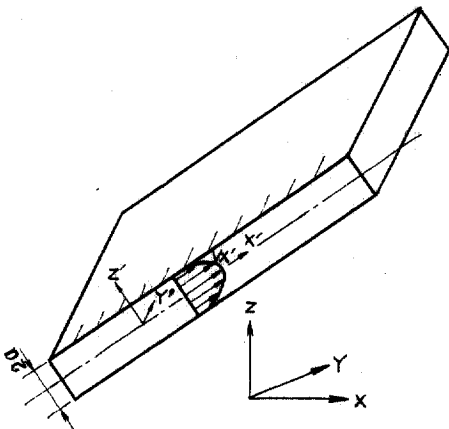


그림 2-2 分割된 模型

$$\left. \begin{aligned} V_x' &= -\frac{g(2a)^2}{12v} \frac{\partial H}{\partial x'} = -K_J \frac{\partial H}{\partial x'} \\ V_y' &= -\frac{g(2a)^2}{12v} \frac{\partial H}{\partial y'} = -K_J \frac{\partial H}{\partial y'} \\ V_z' &= 0 \end{aligned} \right\} (2-5)$$

여기서 K_J 는, 分割內의 透水係數로서

$K_J = -g \cdot (2a)^2 / 12 \cdot v$ 로서 물의 動粘性係數 v 와 分割된 幅 a 의 函數이다.

위에서 말한 假定을 考慮하여 入力資料로는 分割內 透水係數 K_J 를 적용할 수 있다. 分割內의 浸透流의 基本方程式은 式 (2-1)을 고려하면 式 (2-6)으로 나타낼 수 있다. (5)

$$\frac{\partial}{\partial x'} \left(K_J \frac{\partial H}{\partial x'} \right) + \frac{\partial}{\partial y'} \left(K_J \frac{\partial H}{\partial y'} \right) = 0 \quad (2-6)$$

二次元 四邊形 Isoparametric 要素를 使用하여 式 (2-6)에 알맞게 浸透性行列로 作成하고 또 式 (2-1)에 적합토록 三次元 浸透性行列로 하여 代入시키면 岩盤分割內의 浸透流를 解析할 수 있다.

(3) 解析例 (5)

三次元 浸透流가 軸對稱일 경우 많은 理論解析을 얻을 수 있다. 한 例로서 보링구에 비트를 利用하여 現場透水試驗을 할 때 各種 試驗條件에 맞는 理論解析의 例를 들고자 한다.

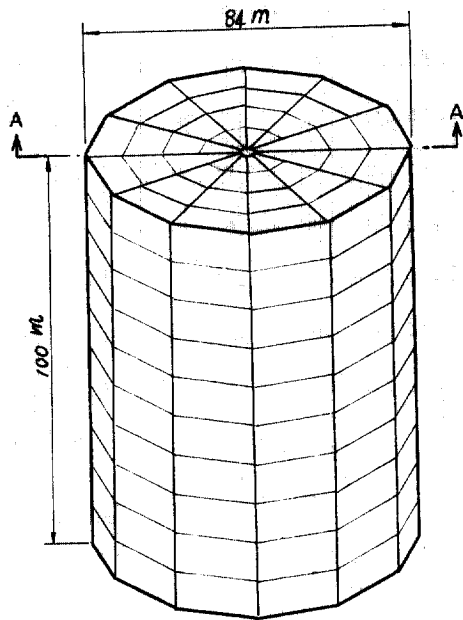
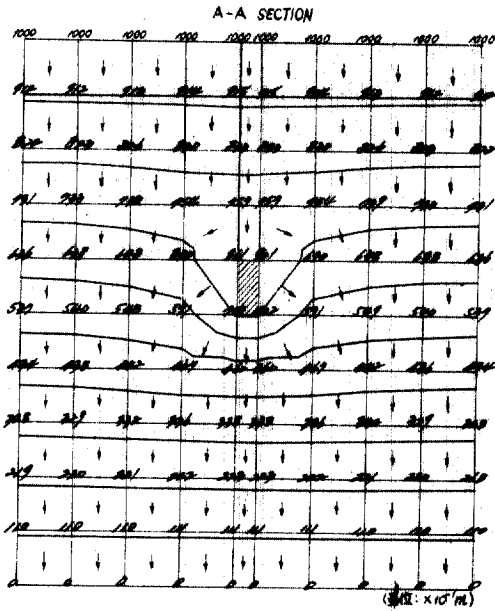
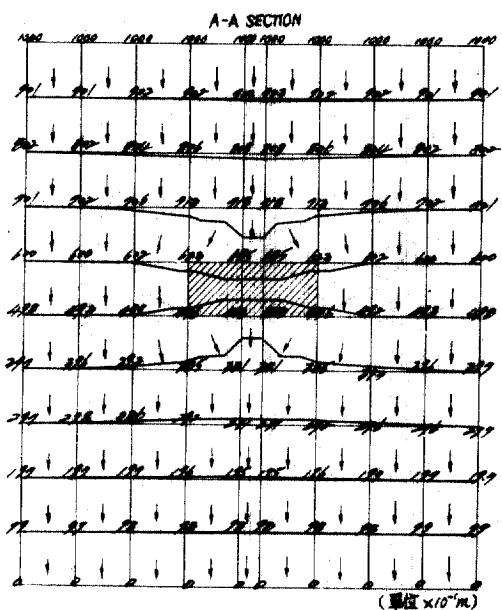


그림 2-3 軸對稱 模型

이와 같은 軸對稱問題에서 理論解析과의 對比를 할 수 있도록 均等流가 솟아나오는 境遇의 解析을 하고자 한다.



縮尺 1.0 2.84651 M/SEC
(a) 流出源이 있는 境遇



縮尺 1.0 1.25843 M/SEC
(b) 異物質이 있는 境遇

그림 2-4 軸對稱모델 從斷面內에서 流速分布·水頭值 分布

解析모델은 그림 2-3에 나타난 바와 같이 높이가 100 m, 지름 84 m의 圓柱에 內接토록 正 12 角柱를 생각한다. 境界條件에서 頂面을 100 m, 아래面을 0 m의 水頭值라고 하고 角柱內는 다른 物質이 없도록 즉 均等流가 되도록 모델 中央에 $10 \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}^3$ 의 流量을 全方向으로 流出시켜 不透水性의 異物質로 定常浸透流를 解析한다.

그림 2-4는 그림 2-3에서의 A-A 斷面이며 (a), (b)의 中央斜線部가 각각의 流出源에 대한 障害物이다. 그림 中の 數値는 各節點에 對한 水頭值이다.

均等流의 境遇, 水頭勾配는 均等하고, 이러한 比較에서 流出源이 있는 (a)에서 流出源을 中心으로 水頭值는 上昇하고, 障害物이 있는 (b)에서 障害物을 中心으로 上流側에서 上昇하고, 下流側에서는 下降한다.

그림 2-5에 나타난 것은 그림 2-4(a)의 流速 分布에 대한 數値解와 理論解의 比較로서 流出源 附近에서 兩者間의 若干의 差는 流出源에 數値解析上 6面體에 대한 理論解에 의한 절들이

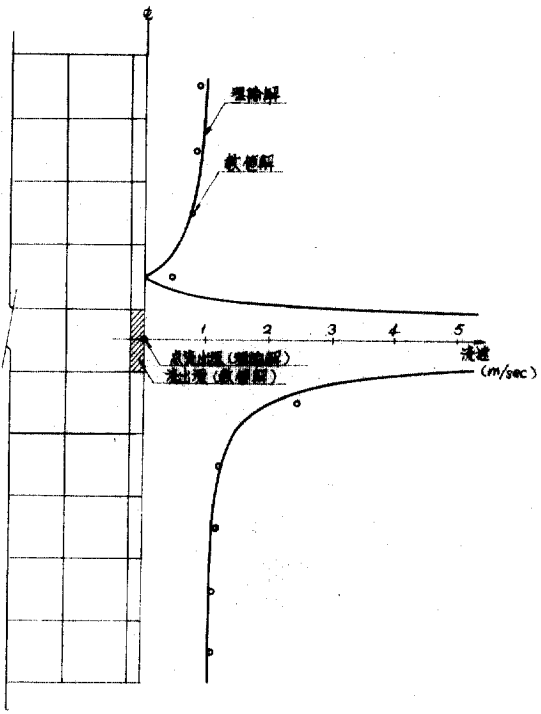


그림 2-5 中心軸上에서 流速의 理論解와 數値解와의 比較

라고 할 수 있다.

浸透物質의 透水係數가 均등하지 않고 局部的으로 異物이 存在하면 浸透水는 그림 2-4 에서와 같이 特異하게 움직임을 알 수 있다.

멤 側面의 空隙水壓은 地下水位 等の 測定計劃을 시도할 때 測定結果의 解析으로부터 이러한 解析例 등을 參考할 수 있다.

2.2. 飽和-不飽和地盤中の 非定常浸透流解析

自由水面을 갖는 浸透流 解析은 自由水面의 位置를 決定하는 複雑한 方法을 使用하여 왔다.

自由水面上的 節點을 決定함에 있어 線을 따라 移動하면서 새로운 領域을 얻고자 計算을 반복하는 方法을 쓴다.

이 방법은 自由水面의 變動에 따라 解析領域을 變動해야 한다. 따라서 飽和-不飽和浸透流 解析은 自由水面上的 節點을 各 時間에 따라 段階的으로 移動시켜 가는 것이 必要하며 計算은 複雑한 모델解析으로 할 수 있다. 不飽和浸透流는 그 現象, 運動에 따라 飽和浸透流와 다른 點이 많다.

그림 2-6의 流動은 地下水의 반대運動으로 나타나며 粘性運動으로 되어 毛管水帶가 되어 사 이폰 作用으로 運動한다.

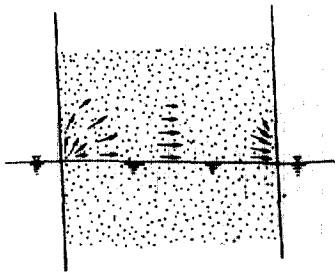


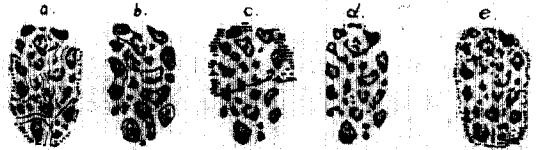
그림 2-6 毛管水帶의 水分移動

(1) 不飽和浸透流의 基礎方程式

不飽和浸透流의 基礎方程式은 그림 2-7에 나타난 浸透流의 形態를 관찰하여 一律的으로 간추려 보고자 한다.

이때 各種 不飽和形態解析은 다음과 같다.

流動時 不飽和의 形態는 다음과 같다. 즉 Darcy 法測에 의한 封入不飽和는 그림 2-7(e)로 되고, 浸潤運動理論에 의한 片寄된 不飽和는 그림 2-7



공극中 어느것이 나 各各 불포화공기는 대기와 접촉(均等不飽和) 물이 있는 부분은 포 화되고 다른 부분은 공기분입, 공기는 대 기와 접촉 (片寄不飽和) 대기와 접촉이 안 된 공입공기에 의 한 불포화(封入不飽和)

그림 2-7 不飽和 浸透流의 形態

(c)(d)이며, Richards의 毛管 Potential 理論 및 Klute의 擴散形方程式에 의한 均等不飽和는 그림 2-7(a), 그리고 薄層流理論에 의한 均等不飽和(不飽和도가 높을 경우)는 그림 2-7(b)와 같이 나타난다.

필 膜의 不飽和狀態는 (a)와 (b)의 均等 不飽和形態를 흔히 생각할 수 있다. 이러한 均等 不飽和의 경우에는 Richards의 毛管 Potential 理論으로 이를 利用하여 不飽和浸透流의 基礎方程式을 導出할 수 있다.

不飽和狀態에서의 浸透水의 連續式은 質量保存法測으로부터 다음과 같이 된다.

$$-\nabla \gamma_w \cdot u + Q = \frac{\partial}{\partial t} (\gamma_w \cdot \theta) \quad (2-7)$$

여기서 $\nabla = \partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z$ 이며, u 는 平均流速이다.

한편, 比例定數 $K(\text{cm/sec})$ 에 體積含水率 θ 를 두고 Suction 壓 h_s 의 函數上에 Darcy 法測이 成 效된다면 流速은 式 (2-8)과 같이 된다.

$$u = -K(\theta) \cdot \nabla H \quad (2-8)^{(6)}$$

여기서 H 는 全水頭值이며, 式 (2-2)와 같이 式 (2-9)에서 Suction 壓 $h_s(\text{cm})$ 와 位置水頭 $h_c(\text{cm})$ 의 疊으로 定義할 수 있다.

$$H = h_s + h_c \quad (2-9)^{(6)}$$

그런데 $K(\theta)$ 는 不飽和透水係數이고 含水率은 큰 變化를 가진다.

이 點에서 飽和透水係數의 경우 含水率에 따라 크게 다르다.

물의 單位重量 γ_w 가 장소와 時間에 따라 不變하다고 假定하면 式 (2-7), 式 (2-8), 式 (2-9)로부터 式 (2-10)이 얻어진다.

$$\nabla \cdot [K(\theta) \nabla (h_p + h_e)] + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (2-10)^{(6)}$$

윗 식은 不飽和浸透流의 一般式이며 Richards의 Potential 方程式이라고 부른다.

式 (2-10)은 h_p 와 Q 의 2개 獨立變數로서 다음 h_p 를 獨立變數方程式으로 變換하면

$$\begin{aligned} &\nabla \cdot [K(h_p) \cdot \nabla (h_p + h_e)] + Q \\ &= \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{dh_p} \cdot \frac{\partial h_p}{\partial t} = C \frac{\partial h_p}{\partial t} \quad (2-11) \end{aligned}$$

여기서 C 는 比水分容量(1/cm)이다.

(2) 흙의 Suction

흙의 Suction은 自由水面 以上の 흙 中에서 흙 粒子가 水分을 保持하는 힘을 말하며 毛管 Potential 이라고 할 수 있다.⁽⁶⁾ 이것은 不飽和 흙 中의 毛管現象에 界面作用이 생기는 負의 空際水 壓이다. Suction 壓과 含水比와의 關係는 濕潤過程과 排水過程에서 그림 2-8에서 서로 다른 曲線을 나타내고 있다.

Suction 壓과 含水比와의 關係는 그림 2-9에 나타난 바와 같이 土質材料에 따라 큰 차이가 있으므로 實測을 해야 한다.

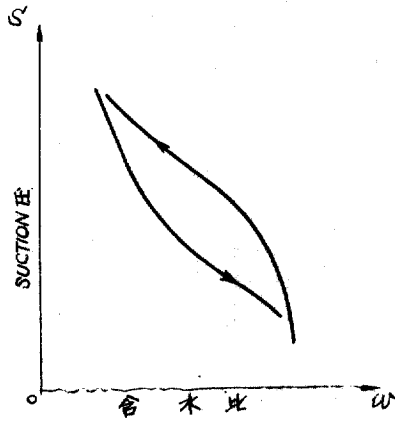


그림 2-8 含水比와 Suction 壓의 關係

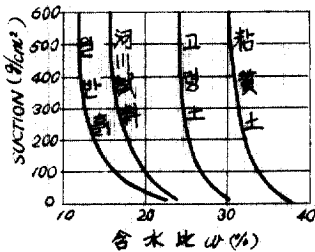


그림 2-9 含水比와 Suction 壓의 關係 測定例

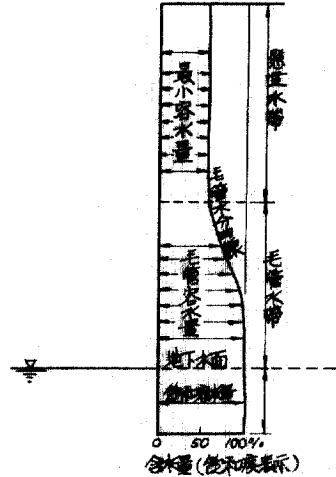


그림 2-10 흙 中의 保水狀態

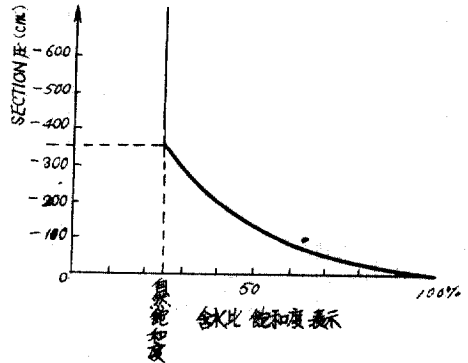


그림 2-11 Suction 壓과 含水比의 關係推定

여기서 그림 2-10에 나타난 地下水面 上部의 흙의 保水狀態 分布는 表 2-1에서 土質種類에 따라 理論毛管上昇高와 自然含水比가 다르며 또한 그림 2-11에 나타난 것과 같이 Suction 壓은 含水比에 따라 다르므로 地下水上部의 Suction pressure로부터 含水比를 알므로써 그 크기를 推定할 수 있다.⁽⁶⁾

表 2-1 土質의 理論毛管上昇高⁽³⁾

土質	極粗砂	粗砂	細砂	微砂	極微砂	粘土
h (cm)	0.1	0.45	2.25	9.37	45	45以上

表 2-2에는 PF 值를 區分하여 測定方法을 作成하였다.

比較的 suction 壓이 적은 범위의 값들에 대한

表 2-2 suction 의 測定方法⁽⁵⁾

測定範圍 PF 值	測定方法	計 算 式	계 산 근 거
2.5 以上	吸 引 法	$PF = \log_{10} k$	k : cm suction 에 따른 水柱高
2~4.5	遠 心 法	$PF = 2 \log_{10} n + \log r - 4.95$	n : 回轉數/分 r : 圓心분리기의 회전축에서부터 土層의 中心까지 거리
3	氷點降下法	$PF = 4.1 + \log_{10} t$	t : 氷點降下度(°C)
4.5 以上	水蒸氣壓 測 定 法	$PF = 6.5 + \log_{10} (2 - \log_{10} a)$	$a = p/p_0 \times 100$ p : 평형하는 포화 증기압 p_0 : 飽和水蒸氣壓

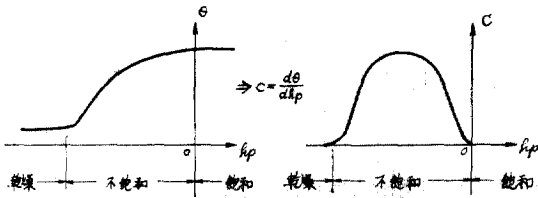


그림 2-12 比水分容量

測定方法是 suction plate 法, suction 膜法, tension meter 法 등이 있다. ⁽⁶⁾

(3) 比水分容量⁽³⁾

式 (2-11)에 나타난 바에 따르면 比水分容量은 $h_p - \theta$ 曲線으로부터 $C = d\theta/dh_p$ 로 定義한다. 그림 2-12에 나타난 것과 같이 $h_p - \theta$ 의 關係로부터 $h_p - C$ 의 關係를 얻을 수 있다.

飽和狀態에서는 $C=0$ 이며 이때 式 (2-11)은 飽和領域內的 浸透流方程式이 되며 式 (2-1)과 같이 된다.

(4) 不飽和透水係數

飽和土는 吸引力의 作用으로 含水量을 低下시키며, 크고 넓은 空隙이 따른다. 이때 생기는 不飽和狀態下에서의 水分移動은 물이 가득 찰 때의 남은 空隙과 空隙壁面의 2가지를 利用하여 이루어진다.

물이 없으면 空隙은 없어지고 透水性에 따른 영향은 크며, 飽和度의 減少로 인한 孔隙中的 透水性은 急激히 低下된다.

一般的인 關係는 그림 2-13⁽³⁾과 같다. 이 그림에서 飽和透水係數에 대한 不飽和 透水係數의 比는 土質種類에 따라 다르나 큰 差異는 없다.

不飽和透水係數는 實驗式으로 나타낼 수 있으며 그 代表的인 것은 다음과 같다.

(i) 毛管 Potential h_p 와의 關係

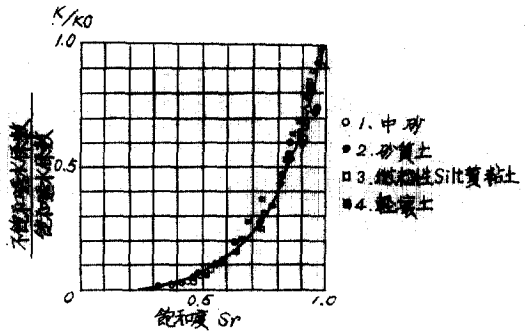


그림 2-13 透水係數와 飽和度와의 關係

$$k = a / (b + h_p)^n \quad (2-12)$$

모래는 $m=10 \sim 15$, 粗粒土 $m > 4$, 細粒土 $m > 2$

(ii) 體積含水率 θ 의 函數

$$k = a \cdot \theta^m, \quad m=10 \quad (2-13)$$

(iii) 飽和度 S_r 의 函數

$$k = K_s (S_r/100)^m, \quad m=3.6 \quad (2-14)$$

Mitchell 은 不飽和孔隙의 空隙에 毛管이 있으면 Poiseuille 式의 徑深 $R_n = (\text{流斷面積}) / (\text{浸潤邊長})$ 을 구하여 補正하고, 透水係數와 飽和度 S_r 의 關係를 다음과 같이 나타내었다. ⁽⁵⁾

$$k = \frac{\gamma_w}{\mu} \cdot \frac{C_s V_s^2}{A_s^2} \frac{e^3}{1+e} S_r^3 \quad (2-15)$$

여기서 C_s : 形狀定數 μ : 粘性係數
 V_s : 孔隙單位體積中的 孔隙粒子體積
 A_s : 單位體積中的 浸潤面積
 e : 空隙比

(5) 飽和-不飽和浸透流 解析法

飽和領域에 따른 浸透流에 대한 方程式은 不飽和透水係數, 比水分容量, 負壓 등을 고려할 수 있으며 不飽和領域으로 확대시켜 成立토록 飽和-不飽和浸透流의 支配式에서 式 (2-11)에 의해

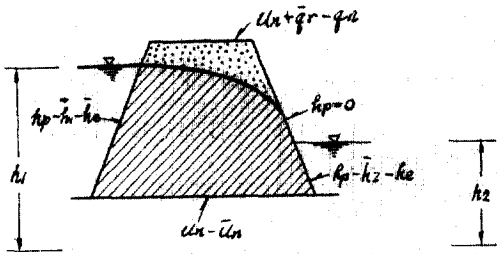


그림 2-14 境界條件

殘差法을 利用하여 有限要素法으로 數值解析을 할 수 있다.

이 解析法에 따르면 境界條件은 그림 2-14와 같은 Fill Dam의 例를 들면 다음 3種類로 구분할 수 있다.⁽⁶⁾

(i) 滲水境界(水壓指定)

$$h_p = \bar{h}_p(r, t) \quad (2-16)$$

(ii) 内部境界(法線流速指定)

$$u_n = \bar{u}_n(r, t) \quad (2-17)$$

(iii) 大氣境界

$$u_n + \bar{q}_r(r, t) = q_n(r, t, \theta) \quad (\text{不飽和領域}) \quad (2-18)$$

$$h_p = 0 \quad (\text{飽和領域}) \quad (2-19)$$

여기서 \bar{q}_r 는 地表降水率, q_n 는 蒸散率이다.

(6) 解析例

本 解析方法의 妥當性을 檢討하기 위해 그림 2-15에 赤井宇野가 實驗한 모래模型實驗,⁽⁶⁾ 二次元數值計算, 그리고 Casagrande의 定常解⁽⁶⁾와

三次元數值計算과의 比較를 하였다. 그 결과 實驗結果와 數值解析結果에서 模型材料의 飽和透水係數, 그리고 不飽和土의 suction 壓과 透水係數와의 差等에서 差가 생기는 것은 入力 data의 不正確한 原因이라고도 생각된다.

여기서 二次元計算結果와 三次元計算結果와의 차이는 二次元解析에서는 要素內의 水頭值 函數를 1次式으로 近似的 三角形要素만을 利用하여 1次式으로 表示하였으나 三次元解析에서는 높은 次元으로 近似的 Isoparametric 要素를 使用하였기 때문에 생긴 것으로 생각된다.

Casagrande의 定常解와 數值計算結果의 차이는 不飽和領域의 毛管水의 有無에 의한 것이라 사료된다.

3. 댐의 迂廻浸透流에서의 適用

3.1. 댐 接岸部 迂廻浸透流의 解析例

댐 接岸部의 地山迂廻浸透流는 三次元解析에 有效한 例가 될 수 있다.

그림 3-1에서와 같은 모델을 使用하여 地山迂廻浸透流의 基本的 性狀을 解明하여 一連의 實驗結果를 수록하였다. 여기서 實驗은 浸透媒質로서의 砂礫은 유리구슬을 그리고 流體로서는 潤滑油를 使用하여 透水係數를 0.045 cm/sec 毛管上昇高를 4 mm되는 條件으로 하였다.

앞에서 말한 그림 2-11과 그림 2-13에 나타난 透水特性을 參考하여 그림 3-3으로부터 透

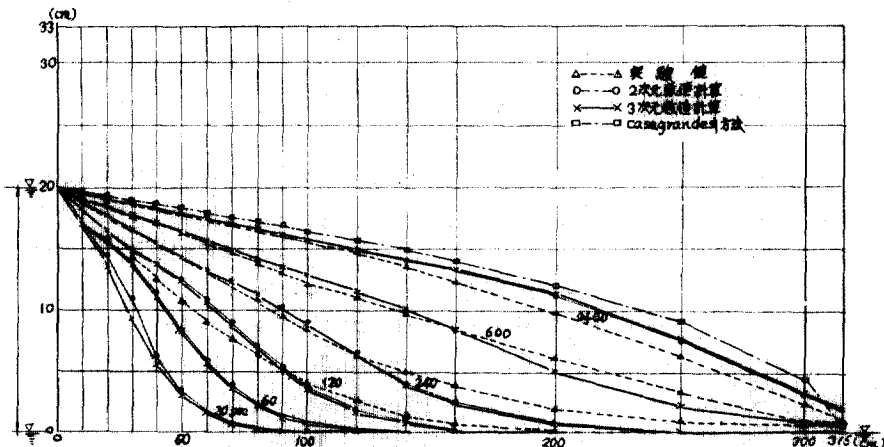


그림 2-15 砂模型實驗 · 數值計算 Casagrande의 解析과의 比較

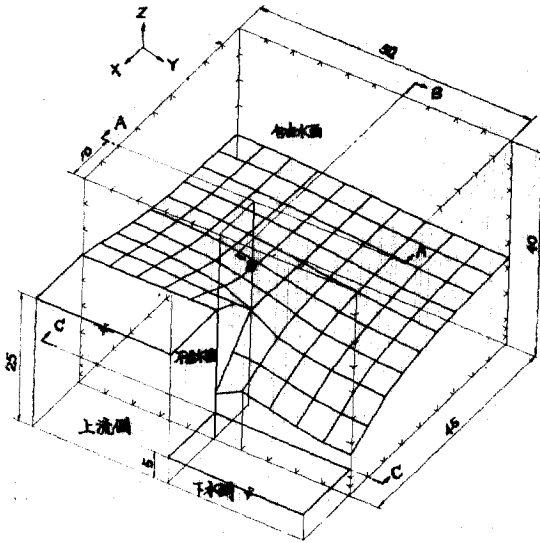
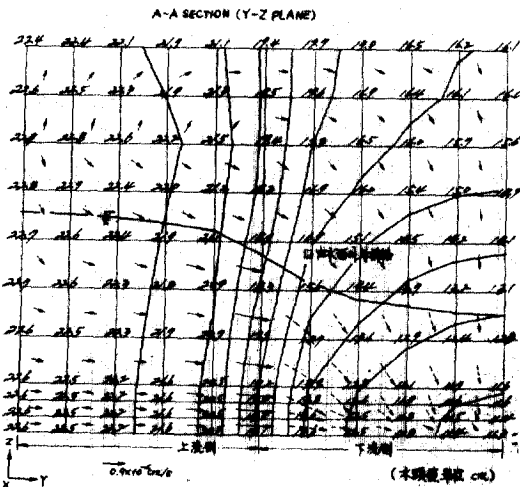


그림 3-1 렘 接岸部迂廻浸透流의 自由水面形狀

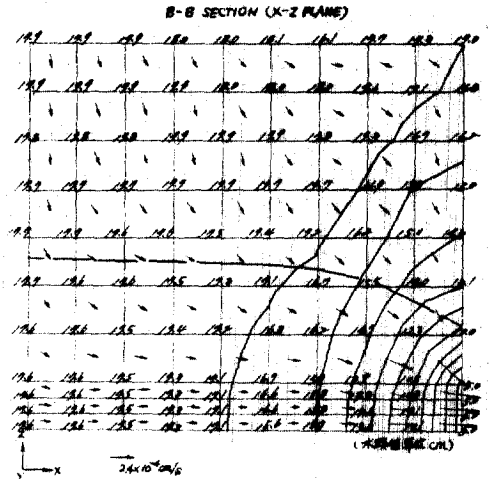
水特性을 假定하여 그림 3-1의 모델로 數值解析을 하였다.

모델의 四周와 底面과 中央의 不透水壁은 完全不透水性이며 上流側水位와 下流側水位는 各 각 25 cm에서 5 cm의 差가 있다.

그림 3-1에 나타난 自由水面形은 本 解析에 서는 壓力水頭의 값이 0인 點으로 얻을 수 있다. 이 點들은 順서있게 연결하여 作成하고 上流側에서 下流側사이 單調로운 傾斜로 보고 下流



(a) 그림 3-1의 斷面에 關한 流速分布·水頭值·自由水面形



(b) 그림 3-1의 斷面에 關한 流速分布·水頭值·自由水面形

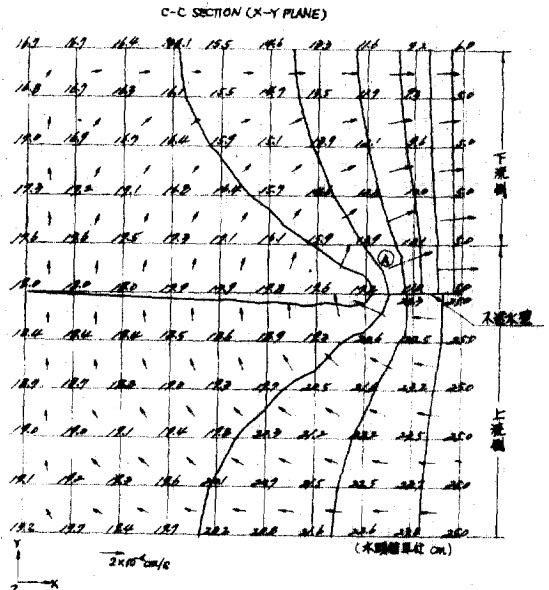


그림 3-2(c) 그림 3-1의 斷面에 關한 流速分布·水頭值·自由水面形

端으로부터 浸出面이 表面으로 나오게 하였다.

自由水面의 不透水壁에 沿하는 部分은 勾配가 가장 急激하며 下流端은 浸出이 없게 되도록 水面形狀을 完滿한 傾斜가 되도록 유지함에 주의 하였다. 前者는 流線上에 浸透路長이 가장 짧도록 함이 좋을 것이며 後者는 다음과 같은 事實을 고려하여야 한다.

그림 3-2(c)에 나타난 C-C 斷面으로부터 平面內의 流速分布를 보면 不透水壁 背面의 要素(A)

에서 流向을 不透水壁의 반대의 方向이 되고 流速이 非定常的으로 클 수 있다.

그 直下流에는 不透水壁이 약간 떨어져서 部分的으로 流量이 모이고 있으며 結果的으로 水位는 上昇하고 있다. 같은 그림 중에서 格子上的 數値는 水頭值를 折線에 等水頭線으로 나타내었으며, 이 平面內의 動水勾配는 上流側이 완만하고 下流側이 急하다.

그림 3-2(a)에 나타낸 不透水壁線端이 포함된 A-A 斷面으로부터 自由水面은 上下流側으로 對稱形狀을 이루고 對稱軸은 分明히 下流側으로 이루어진다.

이 現象은 前記의 實驗으로 관찰한 것이며, 迂廻流의 特徵을 端的으로 나타냈음을 생각할 수 있다.

速度 Vector 를 그림 중에 表示했으며 實線은 紙面에 나타내고 破線은 方向을 가리키는 Vector 를 표시하였다. 自由水面下의 飽和部 流速을 比較하였으며, 自由水面上 不飽和部의 流速은 大體로 定常流로 볼 수 있다. 그림 3-2(b)에 나타낸 것은 B-B 斷面의 速度分布이며 浸出面에 近接된 浸透流는 加速되어 流速이 增大됨을 알 수 있다.

그림 3-1의 下流端을 等間隔으로 5等分한 경우, 各 구획에 浸出한 流量은 不透水壁에 가까운 구획순서로부터 1.7 : 1.5 : 1.2 : 1.0의 比를 보이고 있으며 全浸出量 9.14 cm³/sec는 같은 條件에서 木村⁽⁶⁾의 實驗值 8.83 cm³/sec와 비슷하다.

그림 3-3에 나타낸 毛管上昇高를 2 cm 變化해서 計算하여 自由水面形 및 全浸透流量 等은 명확한 차이가 있음을 알 수 있다.

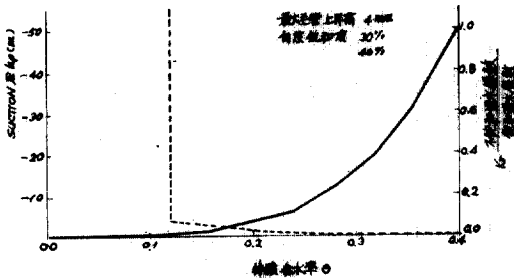


그림 3-3 不飽和領域의 透水特性

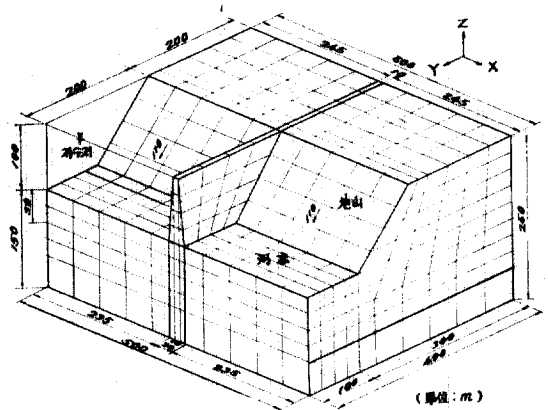


그림 3-4 댐 基礎에서 接岸地上의 3次元 浸透流解析 Model

3.2. 댐 基礎로부터 接岸地山の 3次元浸透流 解析例

록필댐의 土質遮水壁, 基礎로부터 接岸地山에 따른 貯水의 浸透狀況을 調査하여 그림 3-4에 그려진 모델을 使用하여 數値解析을 하였다. 댐에서 Rock 으로부터 Filter Zone 은 遮水壁 및 地山을 比較하여 극히 양호한 상태인지를 고려함은 무시하고 댐 側面의 地形이 左右對稱인 것에 대해서 左측으로 1/2만 취하였다.

想定된 댐은 堤高 100 m, 堤長 400 m, 堤長幅 10 m 堤底를 따라서 遮水壁 30 cm 의 中央心壁型 록필댐이고 堤體斜面 傾斜度는 1 : 1.0 으로 취하였다.

模型各部는 不飽和領域에 따라 想定透水特性은 그림 3-5에 표시한 곳으로 통과하며 心壁部, Grout Curtain 部, 基礎에 따른 地上部의 飽和透水係數는 각각 1×10^{-6} , 1×10^{-5} , 1×10^{-4} cm/sec 로 하였다.

Grout Curtain 의 두께는 河床部에서는 均등하게 10 m 이고 左岸部는 10 m 에서 4 m 로 漸變하도록 하였다. Blanket Grout工은 本 計算에서 고려하지 않았다.

計算은 Grout Curtain 의 範圍를 變化시켜 두가지 case 로 나누어서 行하였다. 그림 3-6(a)(b)에서 그림중 破線으로 나타낸 것은 天端에서 Grout Curtain 의 幅이 20 m 와 80 m 인 경우이다.

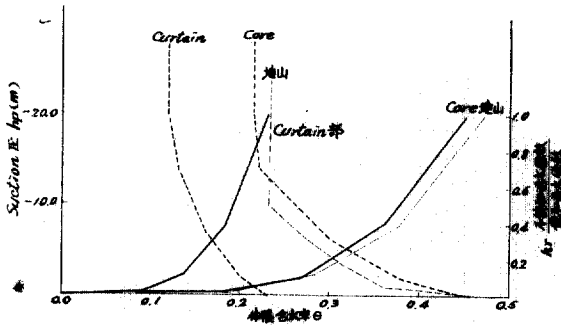
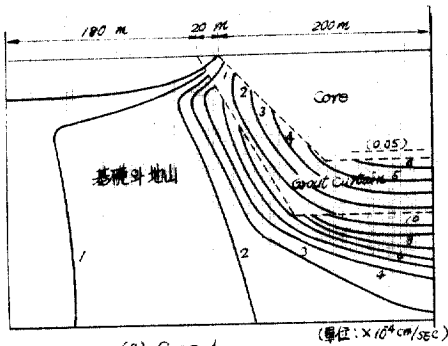
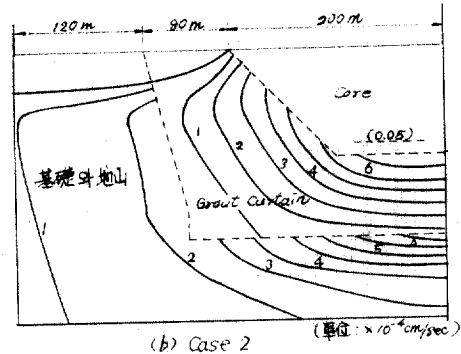


그림 3-5 不飽和領域의 透水特性

이 計算에서 模型의 四周과 底面은 完全不透水性이고, 上流側 貯水池內는 水深 100 m의 貯水에 接하며, 下流側 平坦한 河床表面은 薄膜狀의 水面 core 趾部에 넓은 境界條件을 갖는다. 計算으로 얻은 堰軸 縱斷面內의 上下流의 流速 分布를 概略으로 나타내면 그림 3-6 과 같다. Curtain의 面積은 그림 3-6(b)의 경우는 그림 3-6(a)의 約 2.6 倍로서 그림 3-6斷面을 浸透하는 全浸透流量은 case-1인 경우 1.08 m³/min, case-2인 경우 1.04 m³/min으로 4%程度의 차

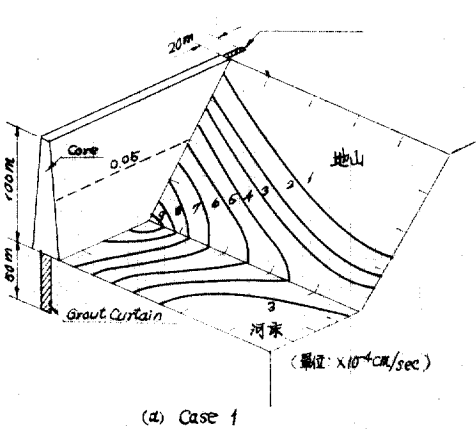


(a) Case 1

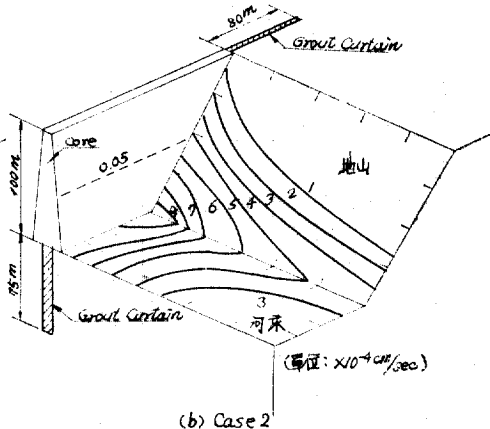


(b) Case 2

그림 3-6 堰 軸縱斷面內의 上下流方向의 流速分布



(a) Case 1



(b) Case 2

그림 3-7 下流側 表面에 關한 浸出速度

이가 있다. 그림 3-6의 양측 그림을 比較하면 case-1은 Curtain 外側에 沿하는 主要流量을 集中시키는 現象이며 case-2는 그 集中度가 낮고 廣範圍하게 흐름을 平均化시키는 傾向이 있다.

그림 3-7은 下流側 表面에 浸透水가 浸出한 것에 대한 速度分布의 양상을 나타내었다. 最大速度는 그림의 中央隅角部에서 약간 떨어진 곳으로 浸出速度는 단순히 減少하고 斜面上의 等速度線形狀은 隅角部 부근에서 自由水面形에

平行하게 된다.

河床部에서 浸出速度의 分布形은 地山迂迴流의 영향이 현저하게 나타나며 堰 軸에 等距離의 點에는 河心에 가까울수록 浸出速度가 줄어든다. 從來 堤體와 基礎의 浸透流解析은 堤軸橫斷方向의 二次元流로 取扱하였다.

그림 3-6과 그림 3-7은 그 適用限界 및 誤差 等の 評價를 위해 쓰여질 수 있다. 本 解析에서 使用한 模型은 二次元流에 가까우며 妥當한 範圍

4. 結 論

本論文은 필립의 三次元浸透流를 有限要素法에 의한 數値解法으로 해석하였다. 여기에서는 基本概念과 幾何解析例의 妥當性 및 浸透水の 流動特性을 고찰한 것이다.

自由水面 境界法에 따른 飽和, 不飽和法은 得失이 있으며 通常 自由水面形에 未知領域은 터널 및 空洞이 있는 경우를 생각할 수 있고 方法에 따라 汎用性이 높다. 흙의 suction 壓 및 不飽和透水係數 等에 관하여는 불확실한 부분이 많이 남아 있으므로 이 分野에 대한 調査研究은 今後 계속해서 究明하려고 한다.

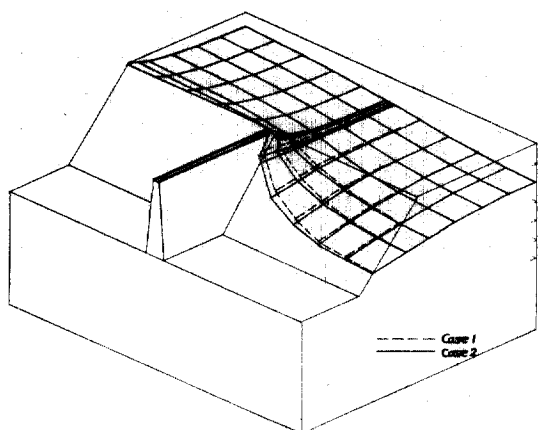
또한 本論文에서는 岩盤分割內의 浸透流 解析例를 記述하였으나 現實적으로 礫 側面의 複雜 다양한 節理 및 龜裂로 말미암아 浸透性이 크게 좌우되므로 研究에 소요되는 時間이 많이 필요하다.

岩盤分割을 고려한 解析結果 및 現案에서 礫 側面의 實測値와 數値解析에 의한 結果値와의 比較檢討는 앞으로 계속 研究되어야 하겠다.

參 考 文 獻

1. 金在弘, “有限要素法에 의한 飽和浸透流 解析 理論의 考察”, 大韓土木學會誌, 第31卷, 第1號 pp.16~19, 1983.2.
2. 金在弘, “運動方程式과 連續方程式을 利用한 堤體浸透의 基本式에 관한 研究考察”, 大韓土木學會誌 第31卷, 第2號, pp.40~44, 1983.4.
3. 久保田敬一外2名 公著, 透水—“設計へのアプローチ”, 鹿島出版會, pp.18~19, 昭和 51年 7月.
4. Neuman, S.P., “Saturated Unsaturated Seepage by Finite Elements”, *Proc. ASCE, Vol. 99, No. HY12*, pp.2233~2250, Dec. 1973.
5. 金在弘, 1983年度 大韓土木學會 學術的表會 概要集, pp.1-124~1-138, 1983.10.
6. 最新フィルダム工學, 電力土木技發協會, pp.359~368, 昭和 56年 3月.

(接受: 1984.1.16)



(a) 堤體內의 自由水面形狀

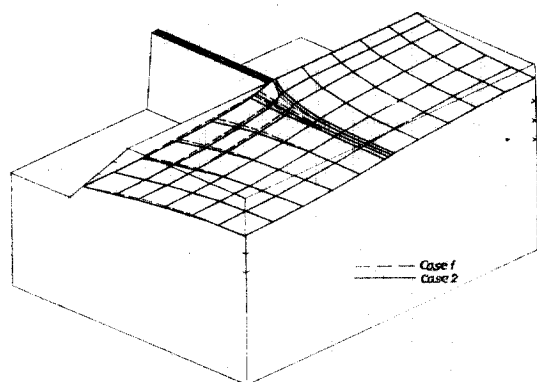


그림 3-8 (b) 堤體內의 自由水面形狀

는 河心에서 30 m 程度까지이며, 이 이상 兩岸에 가까운 斷面은 解析誤差가 相當히 크다. 그림 3-8은 그 方向이 左岸地山으로서 自由水面의 개략적인 形態를 나타낸 것이다.

Curtain이 廣範圍할 경우 나타낸 case-2의 水面形 方向變化는 완만하고 浸出點의 位置가 낮다. 이때 Model에서 거리가 떨어진 쪽의 側壁部는 兩者의 差가 없으며, 自由水面의 位置는 上流端 地表에서 -20 m, 礫軸延長線上에서 -33 m, 下流端에서 50 m이다.