

# 浸透解析 프로그램의 活用과 解析事例

金 翔 圭  
東國大學校 教授

洪 秉 晚  
農漁村振興公社 課長

徐 興 錫  
東國大學校 大學院

## ABSTRACT

In the analysis of seepage behavior through the porous media, unsaturated domain should be included for obtaining more accurate results. The seepage programs considering its domain have been developed and practically used widely. The programs are reviewed and two case studies are presented in this paper.

The case studies are performed using PC-SEEP and obtained good results for the cases of saturated-unsaturated transient flow.

### 1. 序論

土質構造物에 있어서 浸透舉動은 구조물의 安定에 큰 영향을 미치게 된다. 이에 대한 浸透流의 해석은 圖解에 의한 방법, 實驗에 의한 방법 그리고 數値解析에 의한 방법등이 있으나 非飽和領域까지의 浸透舉動을 포함하여 실제와 맞게 해석하기 위해서는 수치해석 기법을 이용하여 初期 및 境界條件의 변화를 포함하여 해석을 비교적 쉽게 할 수 있다. 이를 위해 본 논문에서는 침투해석 이론의 발전배경을 설명하고 PC-SEEP 프로그램을 이용하여 해석된 사례를 제시하고자 한다.

### 2. 浸透解析理論의 發展背景과 개발된 프로그램의 比較

#### 2.1 背景

完全飽和된 흙속의 물의 흐름방정식에 관한 Henry Darcy(1856)법칙과 Dupuit(1863)의 가정이 발표된 이후 Forchheimer(1902)의 2차원 침투의 圖解法등이 제안되었다. 뒤이어 Buckingham(1907)은 體積含水比와 毛管水頭의 관계를 제시하여 不

飽和흐름에 대한 이론의 기초를 마련하였고 흙속의 間隙水와 應力의 관계에 대해서는 Terzaghi(1925)가 有效應力概念을 제시 하였다. 變形豫測을 위한 Biot(1941)이론과 Terzaghi 이론을 수정하여 不飽和狀態의 흙에 有效應力概念을 Bishop(1959)이 제안하였고, 흙의 變形解析을 위한 공기와 수압관계를 규명한 Schuurman(1966)의 이론을 Biot이론과 연계하여 Chang과 Duncan(1977)은 수정 Cam-Clay Model을 개발하였다.

한편 浸透解析理論의 전산화와 관계되는 數値解析法의 발전을 보면 Shaw와 Southwell(1941)의 FDM 적용과 Taylor와 Brown(1967)의 FEM의 도입을 필두로 Neuman과 Witherspoon(1970)이 Double Iteration Scheme의 개발하였고 Desai(1973)는 FDM을 적용한 Unconfined Transient Seepage 해석을 제안하였으나 각기 問題點을 內包하여 實用化되지는 못하였다. 浸透解析을 위해 실무에 적용 할 수 있는 프로그램은 定常浸透解析에 FEM 기법을 적용하여 개발한 Tracy의 SEEP2D(1973)를 필두로 Narasimhan의 FLUMP(1977) 및 FDM기법에 의한 TRUST(1978), Neuman의 UNSAT2(1983), Krahn의 PC-SEEP (1986), Desai의 SEEP2DFE, Bathe의 ADINAT등과 Chugh와 Falvey(1983)의 Boundary Element Method를 적용한 BIE2DCP, 기타 FEMWATER, FEMWASTE, SEEPAGE, GWAP, SEEP, LOCUS 등의 프로그램들이 개발되었다. 이들 浸透解析 프로그램들은 適用理論 및 數値解析技法, 展開過程, 入力要素, 使用者 便宜性을 위한 부수기능, 處理速度등에 차이가 있으며 동일한 조건에 대해서도 결과가 각각 다르게 나타나는 경우가 대부분이다.

본 논문에서는 이들 중 몇가지 프로그램 적용 경험에 따른 概略的인 평가와 함께, 최근에 많이 보급되어 활용되고 있는 PC-SEEP을 사용하여 防潮堤 및 댐의 設計 實務에 적용하여 분석한 사례를 제시하여 비교 검토하고자 한다.

## 2.2 浸透解析 프로그램의 比較

浸透解析用 프로그램은 크게 Steady-State 浸透解析과 Transient 해석이 가능한 프로그램으로 나눌 수 있다. 프로그램 개발에 주로 많이 적용하는 數値解析方法은 有限要素解析法(FEM)이나, 그 이전에는 有限差分法(FDM)도 많이 사용 되었으며 근래에는 境界要素 解析法(BEM)을 적용한 프로그램도 개발되어 사용된다. 이들중 현재 사용가능한 대표적인 프로그램으로서 기능 및 특성을 요약하면 다음과 같다.

### 2.2.1 Tracy의 SEEP2D 및 SEEP3D

미국 공병단 수로국 (WES)의 Tracy(1973)에 의해 2차원(SEEP2D)및 3차원(SEEP3D) 浸透解析 프로그램이 FEM 기법에 의해 개발되었다. 현재까지 Steady-State해석에 가장 보편적으로 사용하여 주로 댐의 고정된 水位條件에 적용하여 왔으나, 시간에 따라 水位가 변화되는 Transient Unconfined 條件을 Steady-State條件으로 변환

시켜 해석 할 수도 있다. Unconfined 조건시 주어진 시간간격의 세부분할은 等間隔으로 나누어 해석하나 사용경험에 의하면 Unconfined 條件으로 입력 할 경우 매우 번거롭고 시간이 많이 소요되는 단점이 있어 Confined Flow 條件으로 미리 각 節點의 水頭를 가정하여 입력시켜 결과로 얻어지는 水頭와 일치되도록 施行錯誤法으로 해석하는 것이 편리하며 대개 2 ~ 3회 되풀이하여 완벽한 결과를 얻을 수 있다. Unconfined 條件으로 해석할 경우 추가되는 土質定數는 Storage Coefficient 뿐이며 기본적인 요소의 形態는 4변형이나 3변형 요소를 병행하여 사용 할 수도 있다. Steady-State에 대한 解析所要時間은 매우 짧고 入力條件 및 結果의 해석도 매우 용이하다. 最大 許容要素數, 節點數 및 土質種類는 각각 250, 350 및 12개이며 非等方性 土質에 대한 浸透解析도 가능하다.

### 2.2.2 Neuman의 UNSAT2

Neuman은 不飽和土의 透水係數 변화를 飽和時의 일정한 값에 대한 比로서 相對透水係數를 설정하였다. 相對透水係數는 실험치에 의해 구한 體積含水比로 정하되 이들 관계는 Neuman의 特性曲線으로 제시한다. 飽和時 相對透水係數 및 體積含水比의 변화는 없는 것으로 간주하고, 體積含水比와 負壓의 관계는 실험치 또는 特性曲線을 사용하여 정할 수 있다. Transient Flow에 대해서는 초기조건 및 경과시간을 입력하여 결과를 얻은 후 Restart 기능을 활용하여 結果要求時點까지 時間增分을 입력하되 시간간격증가치와 함께 累積誤差 限界值를 설정하여 反復計算 하여야 한다. 따라서 水位變化가 지속적이고 그 양이 많을 경우 많은 반복 입력과 계산을 필요로 하는 단점이 있는 반면, 식물뿌리에 의한 滲透, 수분의 自然蒸發 등을 고려 할 수 있고 지하 帶水層 및 軸對稱 문제를 간단히 해결 할 수 있다. 실제로 要素數 522개, 節點數 547개의 4변형 要素網으로 구성된 코어형 흙댐에 적용한 결과, 댐의 築造完了時 일시에 平常水位로 수위가 올라간 조건에서 시작하여 堤體內에 定常浸透에 가까운 결과를 얻기까지는 약 5,000 일(약 14년)이 소요되었으며 Steady-State조건에 대해 SEEP2D로 분석한 결과에 비해 下流部 浸出面이 다소 낮게 나타났다. 국내에서는 農漁村振興公社에서 보유 활용중이며, PC용 프로그램도 개발되어 있으나 PRE 및 POST Processing은 아직 개발되지 않은 상태로서 사용자 편의성은 좋지 않은 편으로 평가된다.

### 2.2.3 Narasimhan의 TRUST(Narasimahn, 1978)

IFDM (Integrated Finite Difference Method)을 적용한 것으로 임의의 多角形으로 要素를 자유롭게 표현 할 수 있다. 단, 각 節點과 要素들은 두 節點을 연결하는 선이 要素를 분리하는 境界面과 垂直이 되도록 하여 要素의 면적과 체적을 초기화시킨다. 타 프로그램에 비해 장점으로는 흙의 wetting 및 drying에 대한 불포화 투수계수의

Hysteresis 영향을 고려 할 수 있으며 인접한 要素들이 非均質土인 재료로 구성되어 있을때 接觸面에서의 連續性을 유지하기 위해 調和平均値를 사용한다. 단점으로는 많은 幾何學的 入力資料를 필요로 하며 연구용으로 개발되었으므로 使用者 便宜性이 적고 入力資料 작성에 많은 시간을 필요로 한다. 收斂은 일반적으로 빠르나 反復回數는 다른 프로그램과 유사하게 要素의 수와 遲延時間, 연결된 要素間 水頭變化의 상대적 값에 의한다. 특징으로 局部的인 安定의 制御가 용이하고 Implicit와 Explicit 기법을 混用하여 效率性이 좋고, 流體의 물리성과 흙의 압축성등 흙의 성질을 많이 고려 할 수 있다. 또한 대부분의 프로그램에 적용한 Galerkin method와 비교하여 最終計算過程이 같아 서로 높고 비슷한 정도의 正確性을 갖고 있는 것으로 평가 된다.

#### 2.2.4 Geoslope사의 PC-SEEP

실무에 쉽게 적용되도록 개발한 상업용 프로그램으로 Fredlund 와 Morgenstern (1977)의 浸透理論에 FEM 기법을 적용하였다. 1차원적인 정적 침투해석은 물론 2차원 단면의 非等方性, 非均質土에 대한 非定常 浸透解析 까지 가능하고 사용자의 편의를 도모하기 위한 Pre-Processing 및 Post- Processing 기능을 통해 입출력 자료의 圖畫 機能을 包含하고 있다. 프로그램 자체에 입력자료 편집 및 수정 기능과 資料의 誤謬檢 索 기능에 있어서 보통의 순수 연구를 위한 프로그램에서는 거의 없는 기능을 갖추고 있는 반면, 원 프로그램이 공개되지 않아 독자적인 보완 또는 부분적 인용이나 변형이 불가능하여 자유로운 활용에는 지장이 있다.

### 3. PC-SEEP의 適用理論

#### 3.1 適用理論

기본적인 지배공식으로 Darcy의 법칙을 적용하되 흙의 성질을 포함한 應力의 變化도 고려 할 수 있다. 適用理論은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + q = \mu g m_2^w \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

여기서,

h : 전수두

k<sub>x</sub>, k<sub>y</sub> : x 및 y축 방향의 투수계수

q : 경계조건으로 부여되는 유출입량(Flux)

- $V_w$  : 요소내에서 물이 차지하는 체적
- $V$  : 흡요소체의 체적
- $V_w/V$  : 체적함수비(Volumetric Water Content)
- $t$  : 시간
- $m_2^w$  : 體積含水比와 間隙水壓 關係曲線(그림 4.4)의 기울기를 나타내며 間隙水の 흡의 貯留능력(Storage Capacity)으로 표시한다.
- $\mu$  : 물의 密度
- $g$  : 重力加速度

### 3.2 土質定數의 選擇

필요로 하는 土質定數는 間隙水壓과 體積含水比 및 間隙水壓과 透水係數와의 관계 설정이 필요하다. 定常 浸透의 경우 이들 관계는 일정한 것으로 간주하여 복잡한 입력 자료가 필요치 않으나 不飽和 特性에 따른 이들 관계 설정은 결과에 중요한 영향을 미친다.

#### 3.2.1 間隙水壓과 體積含水比의 관계

흡속의 間隙水壓과 體積含水比의 관계는 浸透解析에서 흡의 非飽和 特性을 대표하는 浸透解析에 가장 중요한 성질이나 실험하여 얻는 과정이 매우 어렵다. PC-SEEP 사용설명서에 제시한 Ho(1979)의 대표적인 토질 3가지에 대한 관계치 또는 Neuman(1974)의 관계치를 수정 적용 시키거나 대표적 흡에 대한 실험자료 즉, 미국 USBR(1963)에서 실시한 27가지 흡에 대한 실제 實驗資料 적용등 사용자 임의로 선택 가능하다. PC-SEEP에서는 반복적인 負壓의 변화에 따라 관계곡선의 양상이 달라지는 Capillary Fringe 구역에서의 Hysteresis 현상은 고려 할 수 없다.

#### 3.2.2 間隙水壓과 透水係數와의 관계

間隙水壓과 體積含水比의 관계를 설정하는 방법은 여러가지 대표치를 적용 할 수 있으며 PC-SEEP에서는 Gardner (1958) 常數를 적용하여 간편하게 관계치를 설정하거나 부압의 변화에 따른 透水係數를 직접 입력 시킬 수 있다. 後者의 경우 說明書에 例示한 Green과 Corey(1971)의 土質別 代表值를 적용 할 수 있으며 Neuman(1974)의 대표 값을 적용 할 수도 있다.

#### 4. 解析事例

##### 4.1 새만금 防潮堤의 浸透解析

###### 4.1.1 概說

새만금 防潮堤는 모두 5 條로 構成되어 總延長 約 29 Km에 달하는 國內 最大의 防潮堤로서 현재 農漁村振興公社의 계획 및 주관하에 방조제등 外廓施設에 대한 설계가 거의 완료된 상태이다. 同 防潮堤에 대한 浸透解析은 제안된 設計斷面의 安定性을 검토하는 차원에서 이루어 졌다. 방조제 표준단면도는 그림 4.1과 같다. 防潮堤 基礎地盤調査는 보오링 및 圓錐貫入試驗등 試錐調査에 의해 이루어졌다. 가장 깊은 堆積層의 깊이는 제 5호 방조제의 약 32m이나 대부분 10~20m 정도로서 부분적으로 크게 차이가 나지만 대개 실트질 細粒 모래로 構成되어 있고 일부구간에서는 연약 점토로 構成되어 있다. 이들 각 防潮堤 基礎地盤의 堆積狀態는 매우 불규칙하여 불리한 조건을 대표할 수 있는 토질정수의 선택이 필요하였다. 예비적인 분석결과 퇴적층이 깊은 경우 浸透條件이 방조제의 안정성에 유리한 결과를 초래하는 것으로 나타나 실제의 분석에서는 지층의 두께를 25.5m로 하고 지반의 標高는 EL -6.5m로 대표치를 선정하였다. 그림 4.2는 유한요소 해석을 위한 mesh를 보인다.

###### 4.1.2 透水特性

흙의 不飽和 特性은 별도의 실험이 불가능하여 표 4.1의 飽和時 透水係數 및 含水比 關係의 대표치를 적용토질의 飽和時 透水係數 값을 기준으로 수정하여 그림 4.3 및 그림 4.4와 같은 관계곡선을 구하고 이들 곡선상의 값을 입력자료로 활용하였다.

표 4.1 材料別 透水係數

재료번호	입도구분	단 면	투 수 계 수	
			(m/일)	(cm/sec)
1	실트질 모래	기초지반	0.6048	$7 \times 10^{-4}$
2	가는 모래	준설성토	6.912	$8 \times 10^{-3}$
3	자갈(파쇄암)	사석 및 지반 보호공	365.4	0.422

###### 4.1.3 外水位 變化時 入力條件

- 水位條件 : 初期 平均 外水位(EL = 0.0m) 및 內水位는 管理水位 (EL = -0.5m)로

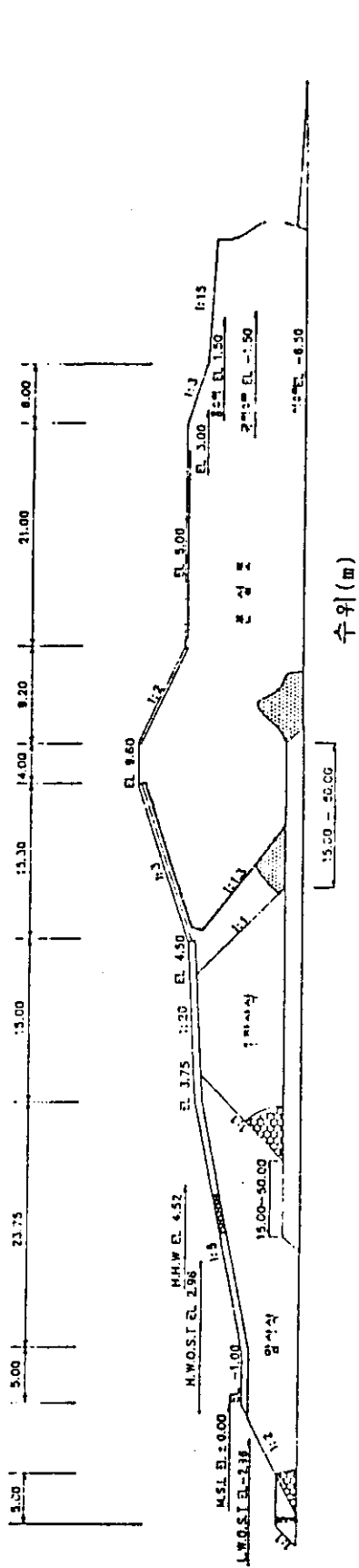


그림 4.1 방조제 표준 단면도

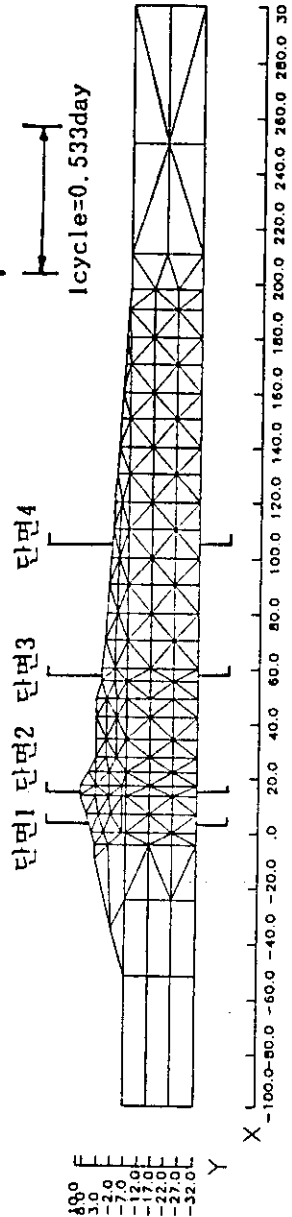
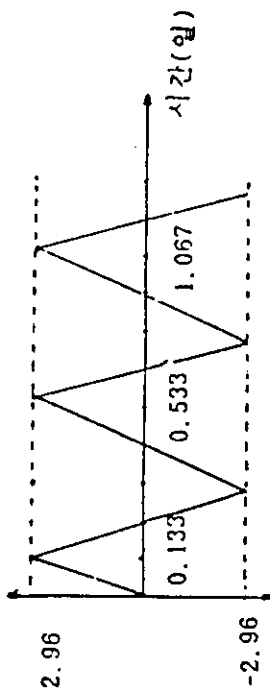


그림 4.2 유한요소 해석 mesh

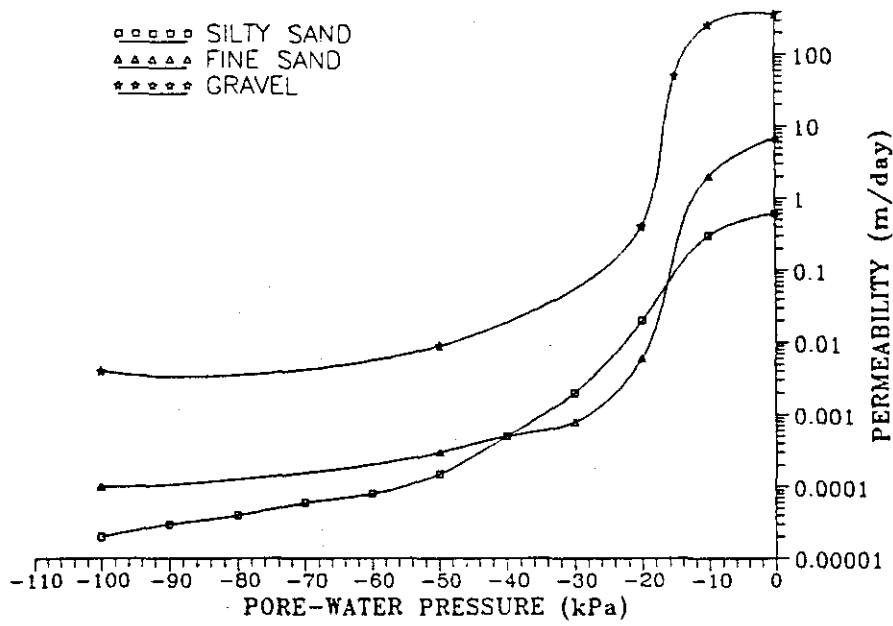


그림 4.3 토질별 부간극수압과 투수계수 상관도

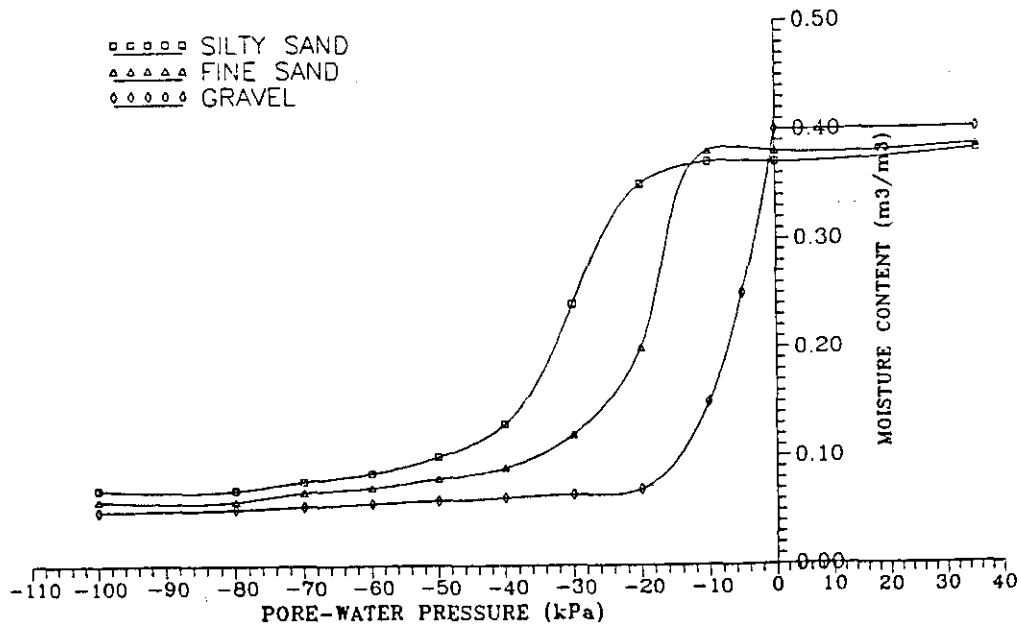


그림 4.4 토질별 부간극수압과 체적함수비 상관도



- 하여 堤體內에 固定된 浸透現狀을 나타낸 이후 외수위에 한하여 HWOSt  
HWOSt(EL=2.96m)와 LWOSt(EL=-2.96m)를 주기적으로 반복 변화시켜 적용
- 週期 : 干滿潮의 1週期는 실제 12시간 50분(0.535 일)이나 편의상 0.533일로  
適用(그림 4.2 참조)하되 1週期를 4개의 段階로 재분류하여 분석한다.  
즉, 각 週期內 段階別 水位를 MSWL(0.0) - HWOSt(2.96) - MSWL(0.0) -  
LWOSt(-2.96)으로 재분리하여 해석한다. 따라서 단계간의 시간간격은  
0.1333일 이다.
  - 持續段階 : 浸透解析 課程은 1週期 單位로 일정한 樣相을 찾을 때까지 지속시킨다.
  - 其他條件 : 段階間의 水位는 直線으로 變化하는 것으로 하고 一定 水位에서의 停  
滯時間은 考慮하지 않는 것으로 한다

#### 4.1.4 結果 및 分析

새만금 防潮堤의 경우 정적인 浸透解析에 비해 時間 經過에 따른 水位變化를 考  
慮한 浸透解析은 보다 現實的인 境界條件 및 解析方法의 適用으로 信賴性이 높다. 주  
어진 初期條件으로부터 일정한 浸透現狀을 얻을 때까지의 해석을 완료한 經過時間은  
27.73일이다. 이 기간에 모두 52 회의 반복적인 水位變化에 대응하는 出力 結果를 檢  
討하고 그림 4.2의 방조제 橫斷面上的의 垂直으로 分割된 4 개의 斷面을 通過하는 流量  
의 變化가 거의 없는것으로 나타나는 時點(유량 變化율 1%)을 선정하여 檢討過程을 마  
무리 하였다. 그림 4.5는 水位變化週期를 2 주기(1.07 일) 단위로 구분하고 후반 1 週  
期の 각 4 개 水位段階別(만조, 간조, 평균수위 상승 및 하강시)로 通過流量의 變化를  
표시한 것이다. 浸透解析 結果를 要約하면 다음과 같다.

가) 정적인 수위조건으로부터 출발한 후 약 3일간은 모든 침투현상이 매우 불규칙  
적이고 불안정한 상태를 보이며 약 5일이 경과후 거의 고정된 浸透現狀을 보인다. 이  
러한 현상은 防潮堤 盛土斷面內의 4 개 단면을 출입하는 유량중 2주기 간격으로 初期  
狀態(平均海水面, EL = 0.0 m)의 流量變化를 나타낸 그림 4.5를 통해 알 수 있다.

나) 바다쪽에 가까운 단면 1, 2를 통과하는 流量은 水位降下時의 통과유량이 水位  
上昇時의 유량보다 현저하게 많으나 內水面의 사면 끝부분에는 항상 海水가 內水面쪽  
으로 유입되는 상태로 나타난다. 이러한 현상은 외수위 변화의 시간적 구분을 最高水  
位, 最低水位, 및 平均水位에 도달한 時點에서의 瞬間的 流量을 산출하는 방법상의 이  
유와 함께 海水面쪽으로 갈 수록 盛土斷面의 透水係數가 큰 粗立土로 구성된 단면의  
특성으로 내측으로 갈수록 流出入 速度가 水位變化 速度에 비해 늦어져 표 4.3의 수위  
별 단면 1, 2 의 流出入量과 같이 수위에 비해 流出入量의 변화는 일정기간씩 늦어지  
는 특성을 보인다.

다)그림 4.6(CASE 2) 의 流速 벡터도로 나타낸 바와 같이 水位降下時의 流向은 사

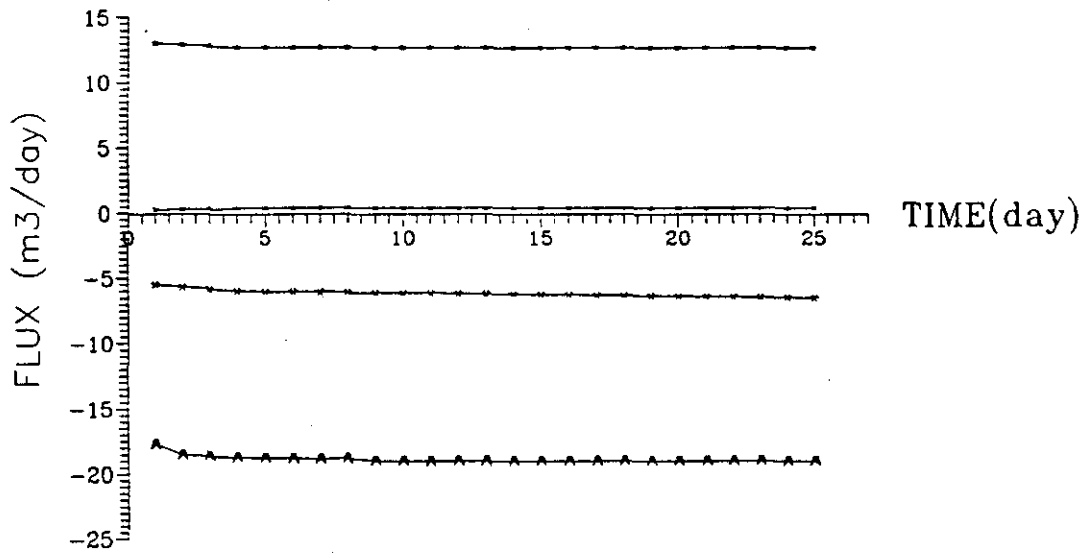


그림 4.5.1 단면별 수위변화주기에 따른 침투량 변화

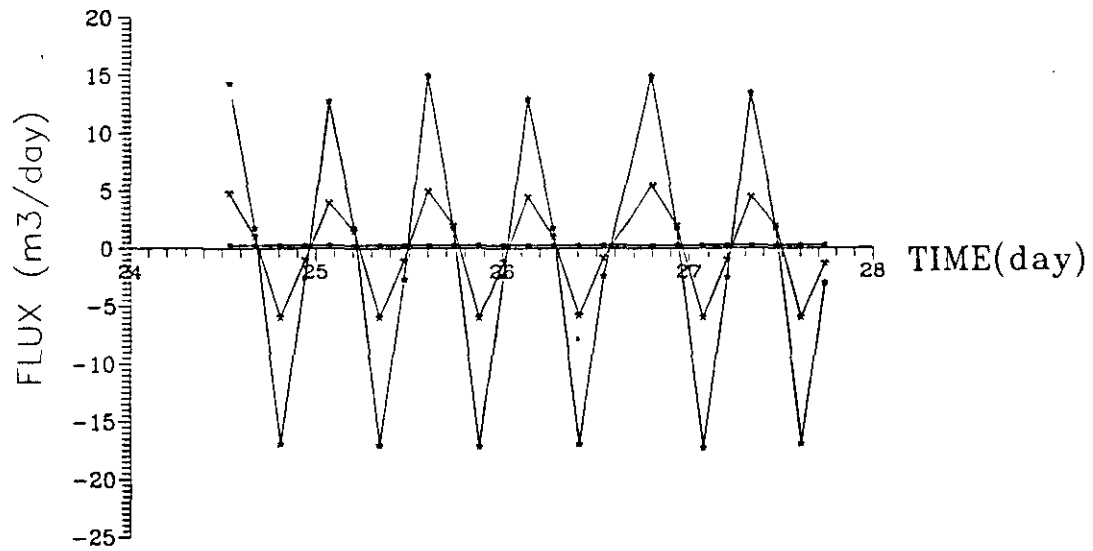


그림 4.5.2 단면별 외수위변화에 따른 침투량 변화

석부와 浚渫盛土 斷面을 경계로 반대로 나타난다. 또한 전과정에 걸쳐 全體通過 流量의 약 70 ~ 90% 이상이 성토단면에 貫入 된 기초지반 보호공의 중앙부분 경계면을 통해 발생하며, 유속의 최대치도 이부분에서 발견된다. 最大流量의 週期的 變化는 그림 4.5와 같이 海水의 유입량에 한하여 한단계씩 번갈아 浸透流量의 大小가 발생하는 것으로 나타났으며 이는 급속한 주기적 수위상승에 따른 해수의 流入이 浸透方向으로 透水性이 적어지는 斷面 構成으로 인해 한 주기씩 걸러가며 일종의 Back Water와 같은 海水의 流入遲滯 현상이 발생 되는 것으로 推定된다.

라) 浸透 및 파이핑에 대한 安定檢討에 직접적으로 적용되는 해석 결과는 수위변화 週期別로 일정한 樣相을 나타내는 최종(27.8 일 경과후)의 결과치로서, 표 4.3의 通過流量 算出斷面の 위치에 따른 海水의 防潮堤 浸透量은 단면 4의 0.39 m<sup>3</sup>/일/m 임을 알 수 있으며, 실제의 수위조건에서는 (1)항의 정적인 조건으로 해석한 Case 1의 浸透量(0.2396 m<sup>3</sup>/일/m)보다 약 1.6 배정도 많은 양이 防潮堤 內側으로 유입되는 것으로 나타났다.

마) 浸透流量 및 流速의 最大値는 水位低下時의 -16.94m<sup>3</sup>/일/m 및 -5.49x10<sup>-3</sup> cm/sec 로서 제(1)항의 정적으로 해석한 결과중 최대치인 Case 4(간조 및 홍수위시)의 浸透流量 및 流速보다 약 10배 이상 더 큰 것으로 나타났으며, 또한 일반적으로 防潮堤의 靜的浸透解析時 많이 적용하는 Case 1(외수위를 평균해수면으로 간주)의 결과 보다는 浸透流量의 경우 66배, 浸透流速은 158배 큰 값으로 나타나 防潮堤 浸透解析時 外水位를 정적인 조건으로 가정할 경우 透水性의 變化가 크게 다른 境界面(새만금 방조제의 경우 地반보호공의 성토부 관입 경계면)의 浸透에 대한 安定性에 심각한 문제를 야기할 우려가 있다.

표 4.2 정적인 조건에서의 경계조건별 침투해석결과

CASE NO.	침투유량 (Flux) (m <sup>3</sup> /day/m)	최대침투유속 (m/day)			비 고
		X 축	Y 축	합력 (cm/sec)	
1	0.2396	0.032	0.0061	0.0326 (3.77 x10 <sup>-5</sup> )	-평상시(기초지 반두께:12m)
2	0.2544	0.0323	0.0065	0.0329 (3.807x10 <sup>-5</sup> )	-평상시(기초지 반두께:22.5m)
3	0.9114	0.0381	0.0227	0.0443 (5.127x10 <sup>-5</sup> )	-만조시( " )
4	-1.417	-0.4498	-0.0105	-0.4499 (-5.207x10 <sup>-4</sup> )	-간조 및 홍수 ( " )
5	-0.1961	-0.0614	-0.0016	-0.0610 (-7.06 x10 <sup>-5</sup> )	-간조 및 평상 ( " )
6	-0.5129	-0.1593	-0.0026	-0.1593 (-1.843x10 <sup>-4</sup> )	-평상 및 홍수 ( " )

\* 負(-) 符號는 바다쪽 방향을 뜻한다.

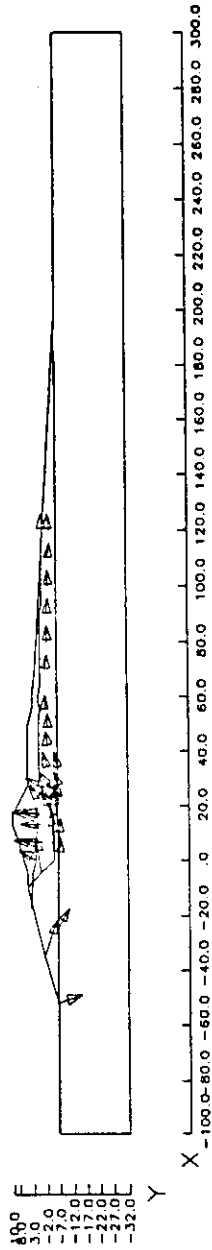


그림 4.6.1 Case(1) 외수위가 HWOST에 도달시 속도벡터도

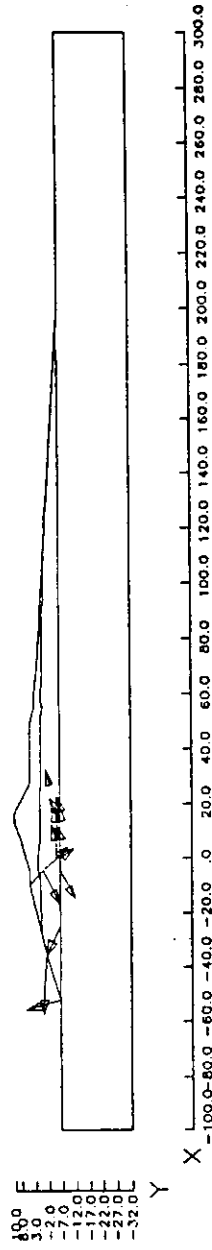


그림 4.6.2 Case(2) 외수위가 평균수위에 저하시 속도벡터도

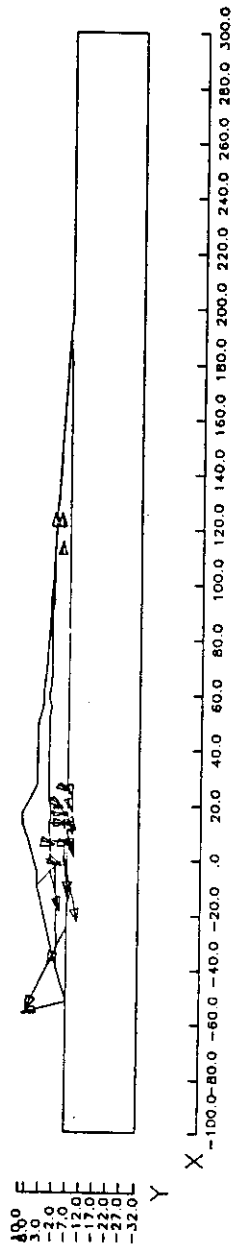


그림 4.6.3 Case(3) 외수위가 LWOST에 저하시 속도벡터도

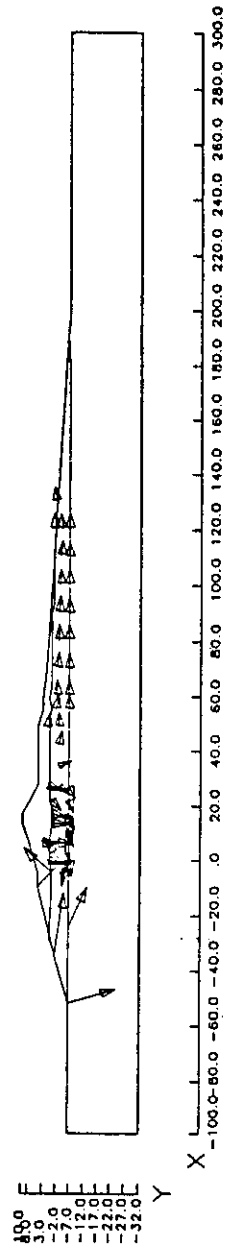


그림 4.6.4 Case(4) 외수위가 평균수위로 상승시 속도벡터도

표 4.3 最終段階에서의 水位別 浸透解析 結果

수 위 (M)		통과 유량 (m <sup>3</sup> /일/m)				최대 침투 유속	
종 전	현 재	단면1	단면2	단면3	단면4	m/일	cm/sec
0.0	2.96	14.31	4.78	0.38	0.39	4.038	4.67x10 <sup>-3</sup>
2.96	0.0	1.88	1.07	0.38	0.39	0.448	5.19x10 <sup>-4</sup>
0.0	-2.96	-16.94	-5.90	0.37	0.39	-4.744	-5.49x10 <sup>-3</sup>
-2.96	0.0	-2.22	-0.92	0.36	0.39	-0.653	-7.56x10 <sup>-4</sup>
0.0	2.96	13.29	3.84	0.37	0.38	3.858	4.46x10 <sup>-3</sup>
2.96	0.0	1.77	1.03	0.38	0.39	0.434	5.02x10 <sup>-4</sup>
0.0	-2.96	-16.53	-5.75	0.37	0.39	-4.648	-5.38x10 <sup>-3</sup>
-2.96	0.0	-2.51	-1.02	0.36	0.38	-0.749	-8.67x10 <sup>-4</sup>

\* 負(-) 符號는 바다쪽 방향을 뜻한다.

이상의 浸透解析 結果를 綜合하면 堤體의 浸透特性은 시간별 浸透方向의 變化가 크며, 瞬間最大流速 및 침투유량은 基礎地盤 保護工이 성토부로 관입된 부분에서 中間水位에서 最低水位로 저하된 상태에서 발생한다. 이 경우 바다쪽으로 나가는 流量 및流速은 防潮堤 內水面 方向으로의 最大値에 비해 약 20% 이상 큰 값으로 나타났다. 따라서 현재의 防潮堤 斷面 構造를 바다쪽에서 육지쪽 방향의 침투해석에만 의존하는 것은 침투에 대한 安定性에 불리한 결과를 초래 할 우려가 있다.

특히 새만금 防潮堤의 斷面 및 土質構造의 境遇 基礎地盤 保護工의 貫入部는 浸透에 대한 安定性에 不利한 要素로 作用하며, 水位條件을 靜的으로 假定하는 既存의 方法을 적용하여 한 方向으로만 解析 判斷 할 경우 상기부분의 局部的인 安定性이 극히 過大評價 되므로 時間的 水位變化를 고려 할 수 있는 解析方法의 適用이 要求된다.

浸透解析 結果중 대표적인 값들을 요약하면 다음과 같다.

- 가) 海水의 堤體 流入量 : 0.38 m<sup>3</sup>/일/m
- 나) 最大浸透流速
  - 제체내부 : -4.7 m/day 또는 -5.44x10<sup>-3</sup> cm/sec  
(기초지반보호공 관입부, 바다쪽으로 침출)
  - 사석부 : -9.5 m/day 또는 -0.011 cm/sec

(사석비탈면 끝 기초지반의 경계면)

- 하류사면 : 0.084 m/day 또는  $9.8 \times 10^{-5}$  cm/sec

(관리수면위)

다) 最大浸透流速 發生位置: 기초지반보호공이 제체내로 관입된 중간부

라) 下流斜面 浸潤線 露出點 : EL -1.5 M

#### 4.2 주압본댐, 조절지댐의 浸透解析

##### 4.2.1 入力條件

##### 4.2.1.1 土質特性

주압 본댐과 조절지댐의 토질특성은 표 4.4와 같다.

表 4.4 댐의 材料特性

	透水係數 (m/day)		
	堤殼	心壁	필터
본 댐	365.47	0.002378	0.743
조절지댐	365.47	0.0050976	5.1926(上流側) 2.4883(下流側)

非飽和 領域內的 透水係數와 垂直, 水平 透水係數比에 대한 측정치는 없으므로 외국문헌에 나오는 자료를 발취하였다. 堤殼에 대해서는 De1 Monte Fine sand, 心壁에 대해서는 Yolo light clay, 필터는 거친 모래(Muallem, 1976)에 대한 것을 참고하였다.

##### 4.2.1.2. 水位條件

주압 본댐과 조절지댐에 대한 水位는 표 4.5와 같다.

表 4.5 댐의 水位

	低水位(EL. M)	常時 滿水位(EL. M)	計劃 洪水位(EL. M)
본 댐	28	39.5	53.5
조절지댐	44	82.1	96.1

#### 4.2.2 解析條件

##### 4.2.2.1 주암 본댐

- 댐을 一時에 施工했다고 가정한 상태에서 潭水時 수위 상승속도 0.55m/day(즉 1990년 3월 12일의 담수개시시 수위인 5.6m로부터 동년 4월 30일의 수위 33.11m)로 댐의 바닥면으로부터 계획홍수위 53.5m까지 99일에 걸쳐 수위가 상승하도록 한다. 그 이후 수위를 일정하게 유지하면서 제체 내부로 물이 침투하여 定常浸透狀態에 도달하기까지의 시간을 구한다.
- 저수위 28m에서 0.55m/day의 수위상승속도로 51일에 걸쳐 계획홍수위에 도달한 후 定常浸透狀態가 될때까지의 경우
- 수문을 갑자기 개방하는 경우와 같은 水位急降下 條件 즉 계획홍수위 53.5m로부터 수문 하단의 높이 39.5m까지 2일에 걸쳐 수위가 강하되고 일정수위를 유지하면서 定常浸透狀態에 도달하는 시간을 구하도록 한다.

위의 세 조건 모두 下流側의 水位는 시간이 경과함에 따라 浸潤線이 心壁을 통과하여 14.5m에서 형성되도록 한다.

##### 4.2.2.2 주암 조절지댐

- 댐을 一時에 施工했다고 가정한 상태에서 수위 상승속도 0.55m/day로 댐의 바닥면으로부터 계획 홍수위 96.1m까지 174일에 걸쳐 수위가 상승하도록 하고 그 이후 일정 수위를 유지하면서 定常浸透狀態에 도달되는 시간을 구하도록 한다.
- 저수위 44m로부터 0.55m/day의 수위 상승속도로 81일에 걸쳐 계획홍수위에 도달한 후 定常浸透狀態가 될때까지의 경우
- 水位急降下 조건 즉 계획홍수위 96.1m에서 수문 바닥의 높이 82.1m까지 2일에 걸쳐 수위가 降下

위의 세 조건 모두 下流側의 水位는 시간이 경과함에 따라 침윤선이 심벽을 통과하여 18m에서 수위가 형성되도록 한다.



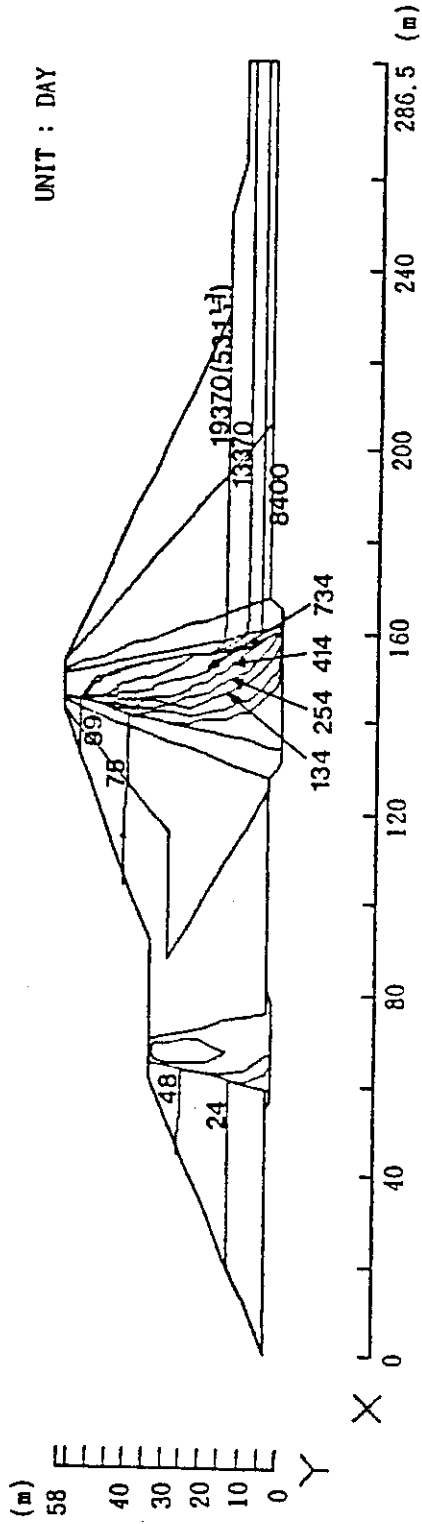


그림 4.7.1 주암 본댐의 침윤선 변화(계획홍수위(53.5m)에 도달시)

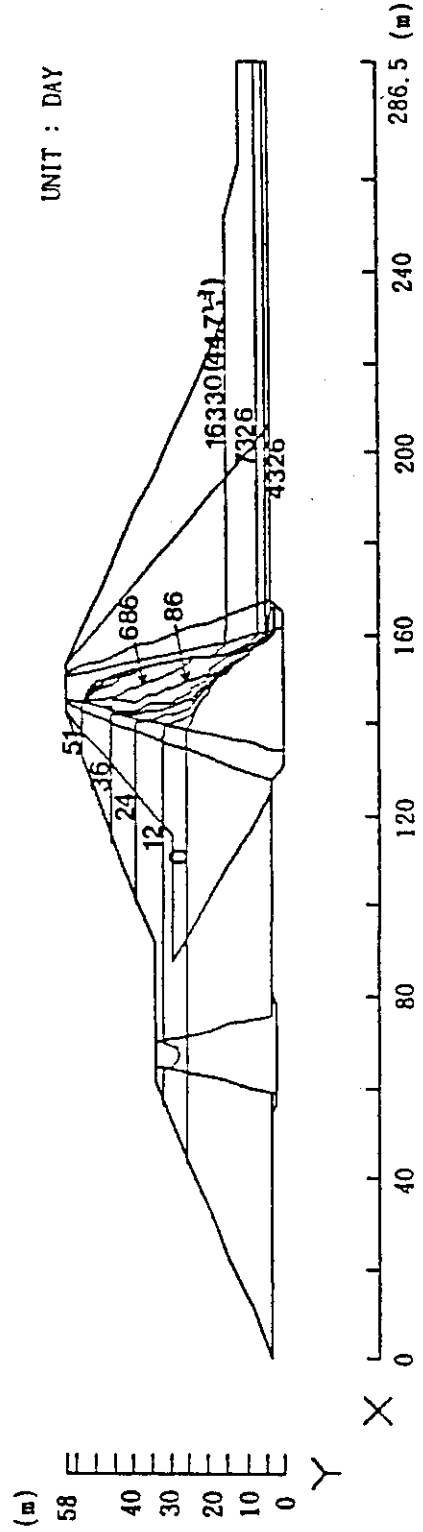


그림 4.7.2 주암 본댐의 침윤선 변화(저수위(28m)→계획홍수위(53.5m))

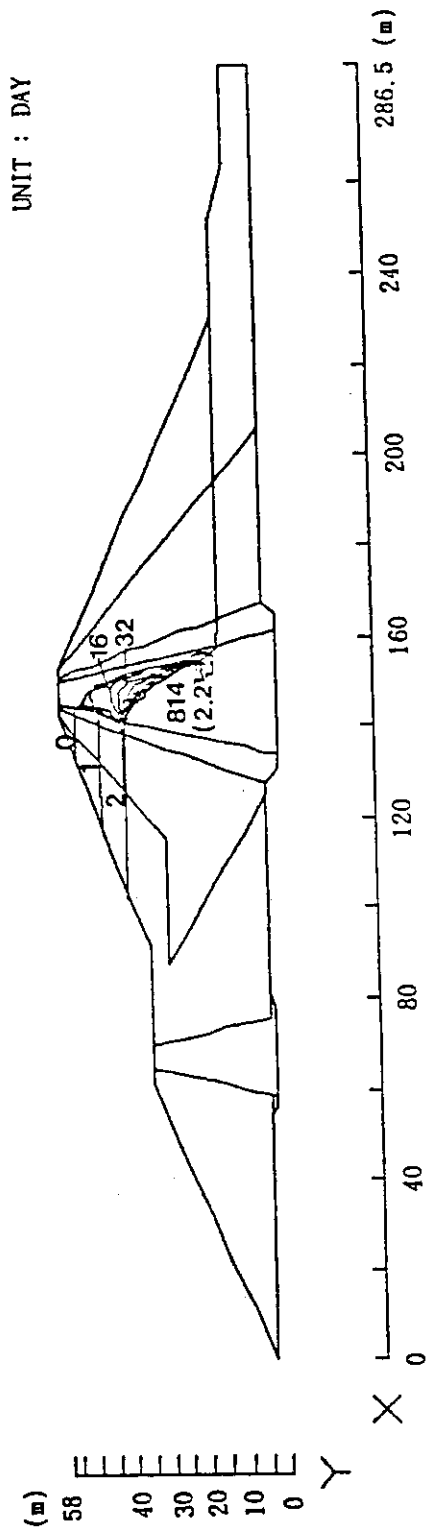


그림 4.7.3 주암 본댐의 침윤선 변화(수위급강하시(53.5m→39.5m))

#### 4.2.3 結果分析

##### 4.2.3.1 본댐의 경우

수 위	정상침투 도달시간(일)	비 고
계획홍수위(53.5m)	19370	코퍼댐은 90일 후 완전포화 8400일 경 정상침투시와 비슷한 윤곽을 보임
저수위→계획홍수위 (28→53.5m)	16330	
수위급강하 (53.5m→39.5m)	814	

##### 4.2.3.2 조절지댐의 경우

수 위	정상침투 도달시간(일)	비 고
계획홍수위(96.1m)	17450	7500일 경 정상침투시와 비슷한 윤곽을 보임
저수위→계획홍수위 (44 96.1m)	12370	
수위급강하시 (96.1m→82.1m)	814	

#### 5. 結論

두 흙구조물의 浸透現狀을 분석하기 위해 프로그램 PC-SEEP을 적용한 결과 실무차원에서 사용상 장단점은 다음과 같다.

- 가. 기능 및 성능상으로 처리속도가 類似 프로그램에 비해 빠르며(UNSAT2에 비해 약 5배 이상) Pre 및 Post Processsing의 활용으로 입출력 자료의 해석 및 誤謬檢索이 편리하다.
- 나. 결과로 제시되는 항목이 다양하고 내용별로 구분된 출력화일에 따라 선택 이용할 수 있다.
- 다. 使用者 便宜 爲主로 프로그램을 작성하여 對話式으로 입력 가능하며, 修正 및

編輯技能을 자체로 보유하고 있다.

- 라. 결과의 正確性 유지를 위해 許容誤差의 범위를 지정 가능하다.
- 마. 실무적용에 가장 적절한 프로그램이나 단점으로는 상업용 Package로서 Source Program의 非公開로 사용자가 프로그램을 變形하나 일부분을 引用할 수 없다.

## 6. 參考 文獻

1. A. Casagrande, " Embankment - Dam Engineering ", John Wiley & Sons, 1973. pp. 23 - 30.
2. A. K. Chugh & H. T. Falvey, " Seepage Analysis Using The Boundary Element Method", USBR. 1983.
3. F. T. Tracy, " A Plane and axisymmetric finite element Program for steady-state and transient seepage problem", U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. 1973
4. Gyorgy Kovacs, " Seepage Hydraulics ", Elsevier Scientific Publishing Co. 1981. pp.358 - 362
5. Harr, " Groundwater And Seepage ", McGraw Hill Co. 1962, pp.124-128
6. H. Cedergren, "Seepage, Drainage, And Flow Nets ", John Wiley & Sons Inc.1967
7. J. C. Huis in't Veld 외, " The Closure Of Tidal Basins ", Delft University Press. 1984, pp. 453 - 456.
8. J. Sherald 외, " Earth And Earth-Rock Dams ", John Wiley & Sons Inc., 1963. pp.114 - 130.
9. K. Terzaghi, " Theoretical Soil Mechanics ", John Wiley & Sons Inc. 1942, pp.253 - 264.
10. L. Davis & S. Neuman, "Documentation and User's Guide: UNSAT2", NUREG/CR-3390, 1983.
11. PC-SEEP, A Finite Element Program for Seepage Analysis, Users Manual, Geo-Slope Programming Ltd, Calgaery, Alberta, Canada, 1988
12. T.N. Narasimhan, and P.A. Witherspoon, Numerical model for saturated-unsaturated flow in deformable porous media, 2. Algorithm, Water Resource Res., Vol.14, No.2, pp255-261, 1978