

潮位變動을 받는 護岸堤의 斜面安定解析

Stability Analysis for a Dyke Subjected to Tidal Fluctuations

金 翔 圭*
Kim, Sang Kyu

Abstract

Assuming that tidal level is constantly changed with an amplitude of 10 meters and a cycle of 12 hours, the slope stability for a typical dyke is analysed. The variation of pore water pressure within the dyke during the tidal change is obtained using a computer program, FLUMP, which is incorporated with saturated-unsaturated and transient flow.

The results show that the variation of free water surface and distribution of pore water pressure within the dyke during the tidal fluctuations can be clearly predicted with the computer program. When a tide is lowered to the minimum level, the predicted pressure head is higher than the level of the free water surface in some parts of the dyke; that is, excess pore water pressure is generated in a zone affected by the tidal change. Also an unsaturated zone which shows negative pore water pressure is temporally created when a tide is lowered. The shear strength of the zone can be predicted based on the proposal suggested by Fredlund et al.

It is emphasized that the excess pore water pressure generated during tidal fluctuations and strength parameters for the unsaturated zone should be considered in analyzing the slope stability of dykes. When those are considered, the critical slip surface seems to be located below the free water surface obtained when a tide is at the lowest.

要 旨

하루에 두번씩 10m의 진폭을 가지고 潮位가 계속해서 變化한다고 가정하여 한 대표적인 護岸堤 단면에 대해 斜面安定解析을 행한다. 潮位가 變化하는 동안 護岸堤內 間隙水壓의 變化는 전산 프로그램 "FLUMP"에 의해 수행되며 이 프로그램은 飽和흐름은 물론 非飽和흐름과 非正常흐름까지 고려될 수 있도록 짜여져 있다. 이 프로그램으로 얻어진 결과는 潮位變動時의 自由水面的 變化와 正 및 負間隙水壓의 크기와 분포를 명확하게 결정할 수 있음을 보여주고 있다.

潮位가 最低까지 내려갔을 때 堤體內 어느 부분에서는 壓力水頭가 自由水面的 높이보다 더 높게 나타난다. 즉 이것은 潮位變動을 받는 護岸堤의 일부에 過剩間隙水壓이 발생함을 의미한

* 정희원 · 동국대학교 공과대학 교수

다. 또한 負間隙水壓이 나타나는 不飽和領域이 潮位降下時에 一時的으로 발생한다. 이 不飽和領域의 흙의 剪斷強度는 間隙水壓이 正의 상태로부터 負로 바뀔때 增加되며 이 값은 Fredlund 등이 제안한 방법에 따라 결정될 수 있다.

護岸堤 斜面の 安定解析에 있어서는 潮位變動時 발생되는 過剩間隙水壓과 不飽和領域의 負間隙水壓이 반드시 고려되어야 한다는 것을 이 논문에서 강조하고 있다. 이것들이 고려되었을 때 임계활동원은 潮位가 最低로 되었을 때 얻어지는 自由水面보다 아래에 존재하는 것 같다.

1. 序 論

육지를 바다쪽으로 擴張하는 경우에는 波浪이나 海水의 浸蝕에 대한 보호를 위하여 海岸線을 따라 堤防을 쌓는다. 특히 얇은 海岸을 農耕地로 이용하기 위한 干拓工事に 있어서는 먼저 防潮堤를 쌓아 海水의 流入을 차단한 다음, 內陸쪽을 埋立한다. 이와 같은 목적으로 설치되는 모든 土質構造物을 여기서 護岸堤(dyke)라고 부르기로 한다.

護岸堤는 첫째, 海水에 의한 집중누수가 발생되지 않도록 均質한 材料로 設計 施工되어야 하고 두번째, 波浪과 潮水變動에 대해서도 충분히 安定되도록 하여야 한다. 현재 干拓工事を 많이 施行하고 있는 西海岸은 潮水干滿의 差가 크며, 특히 인천지방의 潮差는 그 크기에 있어서 세계적으로 유명하다. 그림 1은 1984년 3월의 潮差기록을 보인 것인데 最大潮差는 동년 3월 29일 9.86m로 기록되었다 이와같은 潮差로 인해 護岸堤의 斜面은 潮差의 크기와 潮位의 上昇및 下降에 따라 安定性的 增減이 週期的으로 反復된다.

큰 潮差를 받는 護岸堤의 斜面安定 문제는 正常浸透狀態(steady-seepage state)에서 일어나는 浸透나 水位 急降下時의 것과는 차이가 있다 護岸堤에서는 浸透가 한 방향으로만 발생되지 않으며 또한 潮水干滿의 差로 인한 護岸堤內의 不飽和흐름도 浸透現狀에 크게 영향을 끼치기 때문이다.

이 논문에서는 飽和-非飽和흐름(saturated-unsaturated flow)과 주기적인 흐름 變化(transient flow)를 함께 고려한 浸透解析을 한 다음, 이것을 근거로 間隙水壓을 推定하고 不飽和 영역내 흙의 剪斷強度를 고려하여 護岸堤斜面에 대한 安定解析을 가장 합리적으로 할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

2. 潮位變動을 받는 護岸堤의 浸透解析

水位가 變化하는 飽和-非飽和 흐름에 대한 支配方程式은 매체가 균질하다고 가정했을때 다음과 같이 微分形式으로 誘導될 수 있다⁽¹⁾.

$$\rho_w K \Delta^2 h = m_c \frac{dh}{dt} \quad (1)$$

여기서

K : 透水係數

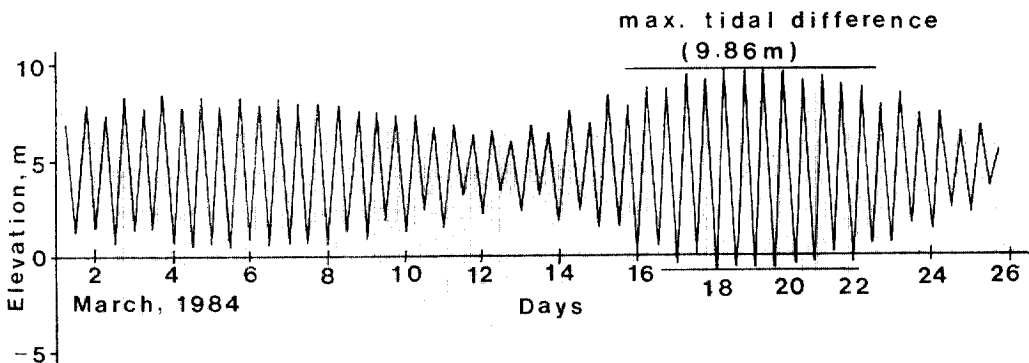


그림 1. 인천항의 1984년 3월 潮位 觀測 記錄

- h : 全水頭
- ρ_w : 물의 密度
- m_c : specific fluid mass capacity
- t : 시간
- x, y, z : 좌표축

위의 식에서 K 와 m_c 의 값은 흙의 飽和狀態에 대한 것은 물론 不飽和狀態에 대한 特性曲線도 함께 고려하여 解를 구해야 한다.

식(1)을 Galerkin 방법으로 有限要素解析을 하기 위해 分割시켰을 때에는 다음과 같은 1次線形 微分方程式의 형태로 표시할 수 있다.

$$Ah + Dh = 0 \quad (2)$$

여기서

A : conductance(stiffness) matrix

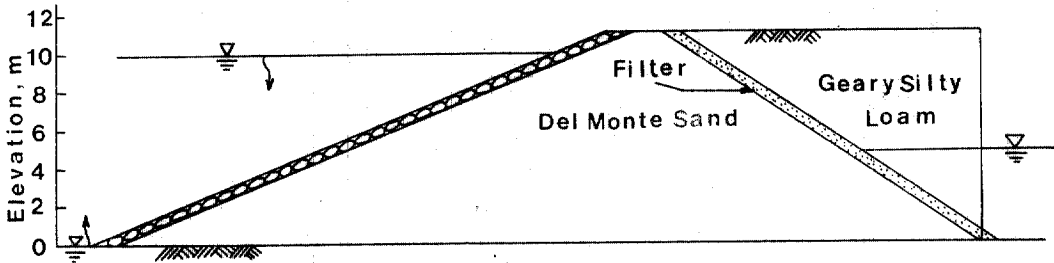
D : capacity matrix

대부분의 有限要素技法에 있어서 D matrix는 대각이 아니므로(nondiagonal) 數值解析상의 난점이 유발될 수 있다는 것이 지적되고 있다. Neuman⁽⁶⁾은 D matrix를 대각으로 만들므로서 收斂速度가 현저히 감소되었음을 발견하였다 그는 삼각형 형태의 요소를 사용하였는데, 만일 同媒介變數要素(isoparametric element)를 사

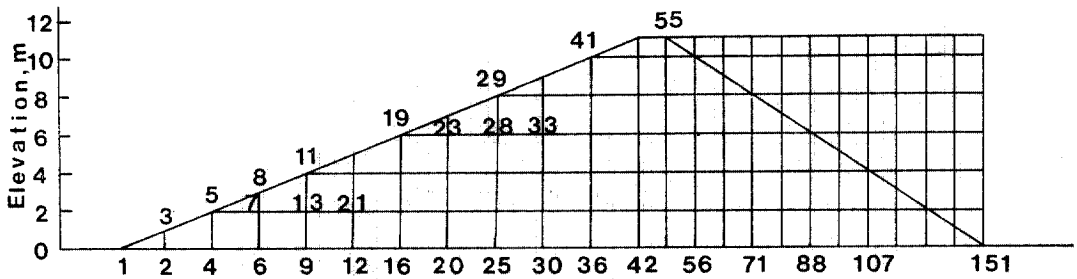
용한다면 또 다시 동일한 문제가 생긴다.

Newman and Narasimahn⁽⁷⁾은 시간에 대해서 식(2)를 explicit, implicit 또는 양쪽을 組合하여 처리할 수 있는 유한차분의 방법으로 분할되도록 組合하고, implicit 한 방정식은 Gaussian 消去法 대신 點反復技法(point iterative technique)으로 풀 수 있는 새로운 접근방법을 개발하였다 이들은 A matrix의 대각성이 지배적이라고 가정하고 explicit-implicit 기법으로 局部安定 및 收斂基準를 만족시키는 有限要素망을 구성할 수 있음을 보이었다. 이 방법을 전산화한 것이 "FLUMP"라고 하는 전산프로그램⁽⁸⁾이다.

이 프로그램에서는 어느 일정한 狀態의 external potential 값을 境界條件으로 입력하게 되어 있으나, 護岸堤가 潮位變動을 받을 때에는 경계값이 시간에 따라 變化하므로 본 논문에서는 사인곡선함수(sinusoidal function) 혹은 時間增分에 따른 경계값의 變化量을 입력할 수 있도록 修正하였다.



(a) An Actual Typical Dyke



(b) Finite Element Mesh

그림 2. (a) 護岸堤 단면과 (b) 有限要素網

3. 護岸堤內 間隙水壓의 變化

潮水 干滿으로 인한 護岸堤內 間隙水壓의 變化를 알기 위해 그림 2에 보인 바와 같은 단면을 가정한다. 이 護岸堤는 견고한 地반 위에 놓이고 바다쪽 부분은 Del Monte 모래, 육지쪽은 Geary silty loam 으로 구성되어 있다⁽¹⁾. 이와 같은 재료를 선택한 것은 이미 실험에서 얻은 不飽和 영역에 대한 透水係數와 fluid mass capacity의 特性曲線을 외국 문헌에서 발췌하여 이용코자 하기 위함이다.

계산의 편의상, 護岸堤는 一時에 完工되었다고 보고 바다쪽의 潮位는 EL. +10.0m에서 시작하여 EL. 0.0m까지 12시간의 週期로 上昇下降을 계속한다고 가정한다. 이때 육지의 地下水位는 각각 EL. 10.0m와 EL. 5.0m에 있는 두가지 경우를 생각한다.

계산은 앞서 설명한 “FLUMP”에 의해 수행되었다. 그림 3은 위의 두가지 경우에 대하여 몇개의 대표적인 위치에서의 경과시간에 대한 壓力水頭의 變化를 보인 것이다. 이 곡선들의 처음 부분은 初期條件과 境界條件을 설정하여 계산을 시작하기 위해서 얻어진 결과이므로 별로 의미가 없으나, 경과시간이 대략 156시간(6.5일)이 된 이후부터는 각 nodal point의 壓力水頭는 거의 일정하게 진폭하고 있음을 알 수 있다.

충분히 예상되는 바와 같이, 바다쪽에 있는 nodal point no. 7, 13, 23 등은 潮水位 變化에 따라 壓力水頭가 크게 變化하나 護岸堤 내부로 갈수록 그 진폭은 줄어든다(그림 3의 nodal point no. 21, 28, 33 참조).

이 그림을 자세히 관찰해 보면, 最高 또는 最低潮位가 되었을 시간(예를 들면 12시간과 18시

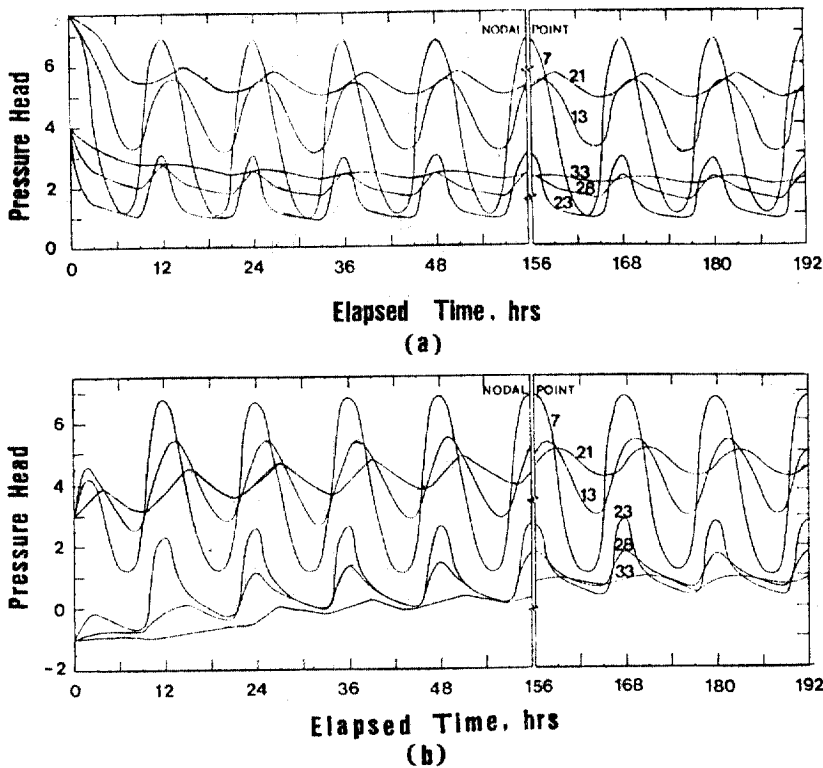
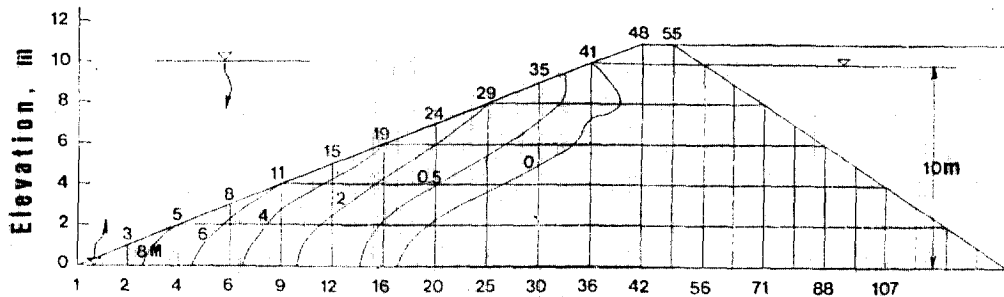
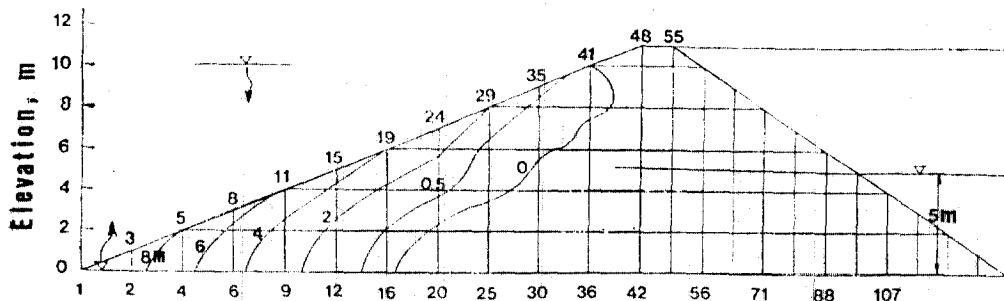


그림 3. 護岸堤의 대표적인 위치에서의 壓力水頭의 變化

- (a) 內陸쪽 地下水位 높이 H=10.0m
- (b) 內陸쪽 地下水位 높이 H=5.0m



(a)



(b)

그림 4. 壓力水頭的 等振幅曲線

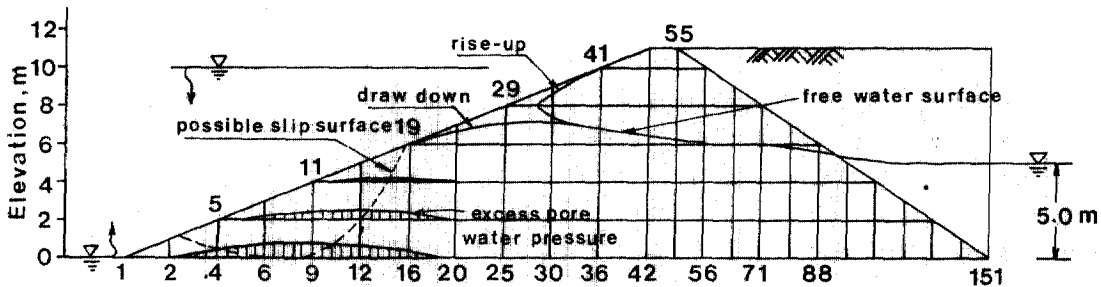


그림 5. 滿潮位 및 低潮位時의 自由水面的 位置와 低潮位時 堤體內 過剩 間隙水壇의 發生

간)에 堤體內 nodal point 에서의 壓力水頭가 最高 또는 最低가 되지 않고 그 시간이 약간 경과 한 후에 그 점들이 나타난다는 사실을 알 수 있다. 이것은 흙속에서의 浸透에서 흔히 일어나는 時間遲滯 現象(time lag)으로 설명될 수 있다.

그림 4는 潮位의 上昇과 下降으로 인해 堤體內 壓力水頭的 變化가 있는 區域을 진폭별로 표시한 것이다. 堤體안에 있는 수치는 壓力水頭的 진폭의 크기를 의미한다. 護岸堤의 肢端(toe) 부근에서는 壓力水頭가 거의 潮水位의 진폭의 크

기만치 진폭하나 안쪽으로 들어갈수록 그 진폭은 줄어들며, 진폭이 있는 區域내에서는 주기적으로 浸透와 排水가 계속된다. 零等振幅曲線의 오른쪽에서는 潮水位의 上昇下降에도 불구하고 壓力水頭는 아무런 영향을 받지 않는다.

그림 5는 潮水位의 上昇과 下降時의 自由水面的 變化를 보인 것이다. 그림 4로부터 이해할 수 있는 바와 같이 바다쪽에서는 潮水位의 上昇下降과 더불어 自由水面이 變化하나, 內陸쪽의 地下水位가 일정하게 유지되고 있을 때에는 內

陸쪽에서는 自由水面이 일정한 曲線을 보인다. 이 그림을 보면 自由水面의 곡선형상이 正常浸透인 경우와 전혀 다르다는 것을 알 수 있으며, 특히 低潮位時에는 自由水面曲線이 불룩하므로 그 頂點을 중심으로 하여 양쪽으로 浸透가 발생한다. 이와같은 曲線은 數値解析이나 實驗을 통하는 방법의에는 쉽게 얻어질 수 없을 것이다.

潮水位가 干潮位까지 下降했을 때에는 堤體內一部에 過剩 間隙水壓이 발생한다. 여기서 過剩 間隙水壓은 임의 위치에서 그 점의 壓力水頭로부터 自由水面(上流面)까지의 높이를 뺀 것을 壓力으로 換算한 값을 말한다. 그림 5에 표시되어 있는 바와 같이 이 값의 크기와 분포는 위치마다 다르며 위로 갈수록 줄어들므로, 干潮時에는 堤體內部에서 上向成分의 浸透도 발생한다는 사실을 짐작할 수 있다. 正常浸透의 경우에는 堤體內 間隙水壓은 流線망을 그려 구할 수 있으며 일반적으로 이 값은 自由水面까지의 水頭를 壓力으로 換算한 값보다 작다. 그러나 이 경우에는 오히려 壓力水頭가 더 크며 間隙水壓은 유선망으로 결정될 수 없다는 것을 이해할 수 있을 것이다.

4. 斜面滑動에 대한 安定解析

限界平衡理論에 따라 有效應力解析法으로 주어진 斜面의 安定解析을 하는데 있어서는, (1) 間隙水壓을 정확하게 推定하는 일과, (2) 堤體構成材料의 強度定數를 실제와 맞게 선정하는 일이 信賴性있는 解析 결과를 얻을 수 있는 가장 중요한 관건이다. 제 3 장에서는 飽和-非飽和 흐름에 대한 浸透解析 결과를 제시하였는데 이로부터 間隙水壓을 결정하고 이어서 不飽和領

域內 흙의 強度定數를 결정하는 방법에 대해 논의해 보기로 한다.

4.1 間隙水壓

週期的으로 潮位變化가 있을 때 飽和狀態는 물론 非飽和狀態에 대한 흐름을 포함하여 堤體內 임의시간에 있어서의 間隙水壓의 크기와 분포는 전산 프로그램 FLUMP를 사용하여 계산할 수 있다. 그림 6은 EL. 10.0m에서 EL. 0.0m까지 潮水位가 下降한 狀態 즉 干潮位가 되었을 때 自由水面과 正負 間隙水壓의 等壓線을 보인 것이다. 干潮時에 斜面은 滑動에 대한 安定性이 가장 저하된다는 것은 분명하므로 護岸堤 전면의 水位와 堤體內 間隙水壓은 이 狀態에 대한 것이 적용되어야 한다. 예상활동면이 가정되면 그 滑動面을 따르는 間隙水壓의 분포는 이 그림에 보인 바와 같이 쉽게 결정될 수 있다.

潮水干滿을 받는 護岸堤의 斜面 安定解析에 있어서 間隙水壓을 결정하는 더욱 단순한 방법으로서는 다음과 같은 두가지 경우를 생각할 수 있다.

(1) 干潮位가 되었을 때 浸透는 바다쪽 또는 內陸쪽으로 수평방향으로만 발생한다고 가정한다. 이 때 自由水面의 위치를 육지쪽의 地下水位, 바다쪽의 滿潮位, 또는 그 중간으로 삼느냐 하는 것은 논란의 여지가 있으나, 합리성은 없지만, 滿潮位로 가정하는 것이 더 不安側이 된다는 것은 분명하다. 이때 假想滑動面을 따르는 임의 위치에서의 間隙水壓은 그림 7에 보인 것처럼 그 위치에서 상류면까지의 높이를 壓力으로 환산한 값이 된다.

(2) 間隙水壓比(pore pressure ratio)를 써서 潮位가 低潮位까지 下降했을 때의 間隙水壓을

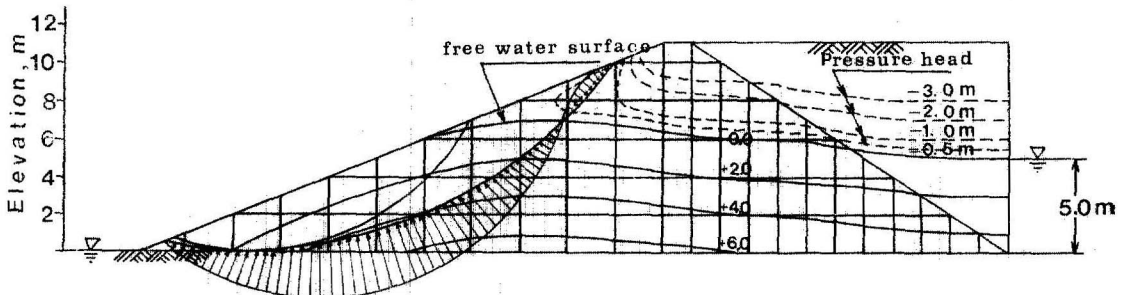


그림 6. 間隙水壓 等壓線과 滑動面上的 間隙水壓의 분포

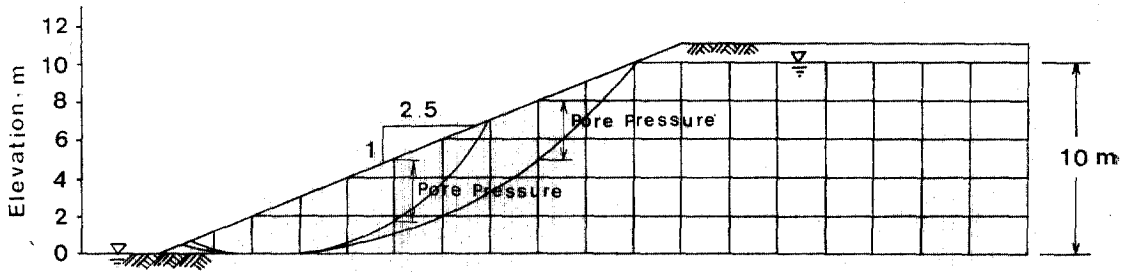
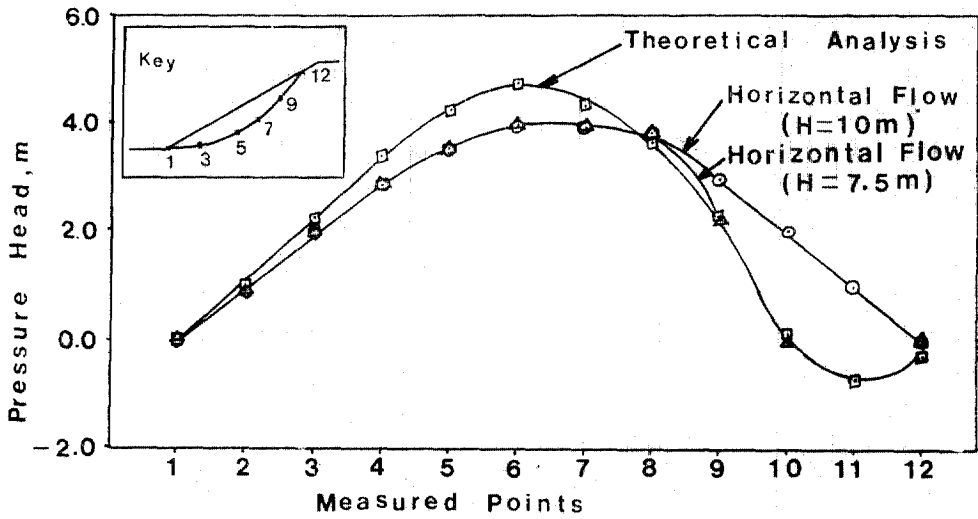
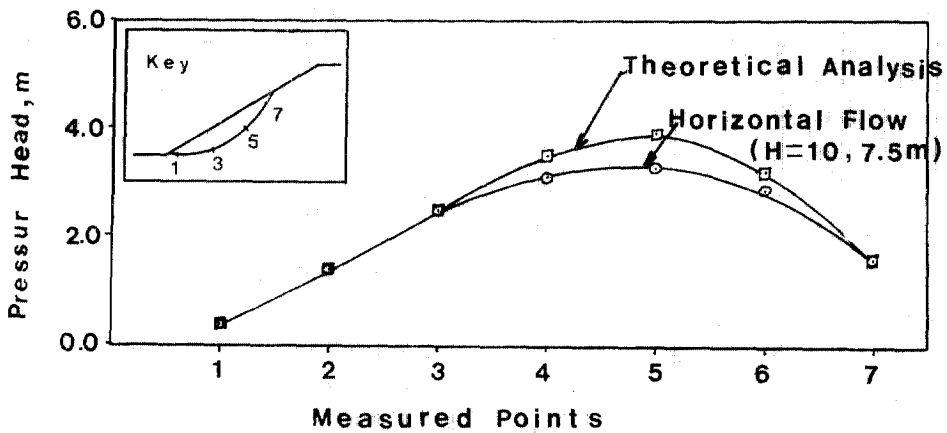


그림 7. 유선이 수평인 경(H=10.0m)



(a)



(b)

그림 8. 여러가지 경우에 대한 間隙水壓 推定値의 비교

추정할 수 있다. 間隙水壓比 r 는 다음과 같이 정의된다.

$$r = \frac{u}{\gamma z} \quad (3)$$

여기서 u : 間隙水壓

γ : 흙의 單位重量

z : 豫想滑動圓의 임의위치에서 護岸堤 상단까지의 높이

그런데 이 식을 써서 間隙水壓을 추정하면 전산기로 안정계산을 하는데 대단히 편리하다. 대부분의 안정계산을 위한 전산 프로그램은 間隙水壓比를 적용할 수 있도록 되어 있기 때문이다. 假想滑動面을 따라 間隙水壓比가 일정할 때에는 위의 식을 적용하여 만족스런 결과를 얻을 수 있으나 실제에 있어서는 水位의 위치와 堤體 구성재료의 차이 때문에 이것이 일정한 경우는 거의 없다. 그러나 적절한 평균치를 사용한다면, 斜面の 安定性을 실제와 가깝게 추정할 수 있을 것이다.

그림 8은 임의로 가정한 두개의 假想滑動圓에 대하여, 그림 6에서 얻은 이론적 解析 결과와 그림 7의 수평 흐름으로 간주하였을 때의 間隙水壓을 그 滑動線上에 분포시켜 본 것이다. 여기서 첫번째 滑動圓은 自由水面 위를 지나고 두번째 것은 그 아래를 지난다. 飽和-非飽和 흐름과 주기적인 비정상 흐름의 이론을 써서 계산된 間隙水壓의 값은 축점 11과 12 즉 自由水面 위에서는 負間隙水壓을 보이며, 활동면의 아래 부분에서는 수평흐름의 경우보다 높고 윗부분에서는 오히려 낮다(그림 8(a)참조). 그러나 滑動圓이 自由水面 아래에 있을 때에는 理論解析에서는 負間隙水壓이 발생되지 않는다는 것은 당연하며, 過剩間隙水壓의 발생때문에 이론적 解析에서 얻은 間隙水壓은 수평흐름의 경우보다 크다.

4.2 不飽和 領域內 흙의 剪斷強度

일반적으로 실험실에서는 흙을 飽和狀態로 만들어 두고 有效強度定數를 결정하여 不飽和土에 대한 安定解析에도 공통적으로 적용한다. 이렇게 하면 안정축이 될뿐더러 不飽和土가 地下水位의 上昇, 降雨등으로 飽和되는 狀態까지 감안할 수 있으므로 이런 관점에서는 합리적이다.

그러나 護岸堤에 있어서는 最低干潮位까지 海水面이 下降하였을 때 흙은 일시적으로 不飽和土가 되며, 그림 6에 보인바와 같이 負間隙水壓의 발생으로 판명될 수 있는 상당히 큰 不飽和領域이 존재한다. 따라서 이 領域內 흙에 대해서는 不飽和土에 대한 剪斷強度를 적용하는 것이 실제와 더 가깝다. 최근에 이르러 Fredlund⁽³⁾ 등은 不飽和土에 대한 剪斷強度를 표시하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$s = c' + (u_a - u_w) \tan \phi_b + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (4)$$

여기서

c' : 有效점착력

u_a : 間隙空氣壓

$(u_a - u_w)$: matrix suction

$(\sigma - u_a)$: 空氣壓에 관한 全應力

ϕ_b : matrix suction에 의해 증가되는 摩擦角

ϕ' : 有效摩擦角

σ : 全垂直應力

식(4)를 보면, 不飽和土의 剪斷強度는 2개의 독립적인 應力變數($u_a - u_w$)와 $(\sigma - u_a)$ 의 함수이므로 이 식은 그림 9에 보인 바와 같이 3차원으로 표시될 수 있다.

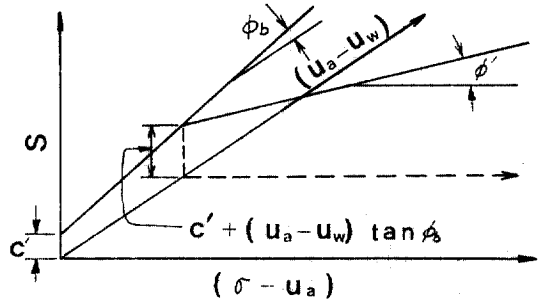


그림 9. 不飽和土에 대한 剪斷強度의 3차원 표시⁽³⁾

흙이 飽和되면 間隙空氣壓이 間隙水壓과 같아지므로 飽和土에 대해서 식(4)는 Terzaghi에 의해 처음으로 제안되었던 剪斷強度 기준, 즉

$$s = c' + (\sigma - u_w) \tan \phi' \quad (5)$$

과 일치한다.

식(4)에서 $(u_a - u_w)$ 를 점착성분의 일부로 간주하여

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan \phi_b \quad (6)$$

로 두면 식(4)는 다시

$$s = c + (\sigma - u_a) \tan \phi' \quad (7)$$

가 된다. 여기서 c 를 겉보기 점착력(apparent cohesion)이라고 말하기로 한다. 이 식의 물리적 의미는, 不飽和土의 強度의 일부는 점착성분으로 간주될 수 있다는 것이다. 그러면 식(7)을 사용하여 흙의 강도를 결정한다면 종전의 모든 斜面滑動의 공식에 이것을 적용하여 안정계산을 할 수 있다.

실제문제에 있어서 間隙空氣壓 u_a 는 대기압과 거의 동일하므로 0으로 둘 수 있고⁽³⁾, ϕ_b 의 값은 空氣壓을 加할 수 있도록 표준 3축압축시험을 개조한 시험기로 不飽和土를 시험하여 구할 수 있다⁽⁴⁾. 현재까지 축적된 시험결과를 보면 ϕ_b 의 값은 ϕ' 보다 항상 작으며, 대표적인 측정치는 13°내지 20°의 범위에 있다고 한다.

지금, Del Monte 모래에 대해 $c=0$, $\phi'=41^\circ$ 로 가정하고 ϕ_b 를 5°로부터 35°까지 變化시켰을 때 負間隙水壓과 겉보기 점착력과의 관계를 구하면 그림 10과 같다.

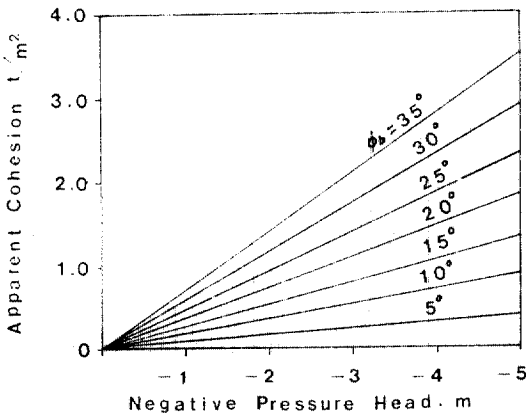


그림 10. 負間隙水壓과 겉보기 점착력과의 관계

4.3 安全率에 대한 민감도

그림 11은 주어진 한 假想滑動圓에 대해 이론적인 解析으로부터 얻은 間隙水壓과 전절에서 언급한 不飽和領域內的 剪斷強度의 증가를 모두 고려하여 安定解析을 한 결과를 보인 것이다. 여기서 斜面의 強度定數는 $c'=0$, $\phi'=41^\circ$, $\gamma_s=2.0t/m^3$ 으로 가정하였고, ϕ_b 는 0°에서 25°까지 變化시켜 보았다.

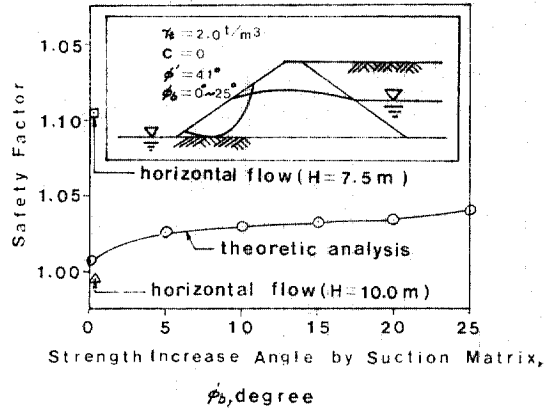


그림 11. 安全率의 비교

이 그림을 보면 $\phi_b=5^\circ$ 일때, ϕ_b 를 고려하지 않았을 때(SF=1.007)에 비해 安全率은 0.02의 증가를 가져왔으나 그 이상의 증가에 대해서는 安全率의 증가가 별로 없는것 같다. 이것은 假想滑動圓이 不飽和領域을 극히 일부 밖에 통과하지 않기 때문이다. 이 그림에는 비교를 위하여 수평흐름으로 가정하였을때의 安全率을 계산한 결과를 표시하였는데, 滿潮位狀態(즉 H=10.0m)에서 수평흐름이 일어난다고 가정하였을때의 安全率이 합리성은 없지만 이론치와 가깝다(이때 SF=0.999).

自由水面 아래 過剩間隙水壓이 가장 크게 發生한 위치를 따르는 滑動圓(그림 5 참조)에 대해서도 安定계산을 해보았는데 이 滑動圓은 不飽和領域을 통과하지 아니하므로 增加된 剪斷強度는 고려되지 않는다. 주기적인 潮水位 上昇과 下降으로 인한 過剩間隙水壓의 發生으로 이때의 安定性이 가장 낮다는 사실은 충분히 짐작할 수 있다. 계산으로 얻어진 이때의 安定율은 SF=0.815인데 비해 전자에서 얻어진 安全率은 SF=1.007이나 되므로 큰 差異를 보였다. 전자보다 훨씬 더 작은 安全率이 얻어진 것은 過剩間隙水壓의 最大值가 發生한 位置를 따르는 곡선을 滑動圓으로 간주하였기 때문이다.

5. 結論 및 要約

이상의 논의로부터 다음과 같은 結論을 내릴 수 있다.

(1) 飽和一非飽和 흐름(saturated-unsaturated flow)과 非正常흐름(transient flow)의 이론을 적용하여, 주어진 재료로 구성된 한 대표적인 護岸堤 斷面에 대해 潮水位의 上昇과 下降에 대응하는 堤體內 間隙水壓의 時間的 變化를 解析할 수 있었다.

(2) 護岸堤 前面에서 潮位變化가 있고 內陸쪽의 地下水水位가 일정하다면, 堤體內 間隙水壓은 바다와 접하는 면에서 가장 많이 진폭하나 內陸쪽으로 갈수록 줄어든다.

(3) 自由水面은 바다쪽에서는 潮水位의 上昇과 下降에 따라 變化하나 內陸쪽에서는 일정한 曲線形狀을 이룬다. 本堤體의 경우 潮位가 最低로 되었을 때의 自由水面은 위로볼록하므로 그 頂點을 중심으로 해서 浸透는 바다쪽과 內陸쪽의 양쪽 방향으로 發生한다.

(4) 堤體內 間隙水壓이 진폭하는 領域內에서는 潮水位降下에 의한 荷重增加와 時間遲滯現狀(time lag)으로 인해 過剩間隙水壓이 發生한다. 이의 크기와 분포는 護岸堤의 斜面 安定解析上 중요한 영향을 끼친다.

(5) 潮水位가 下降하였을 때에는 一時的으로 不飽和領域이 存在하며 이 領域內의 흙의 剪斷強度는 Fredlund et al.의 提案에 따라 결정될 수 있다.

(6) 護岸堤 斜面의 安定解析은 非飽和흐름을 고려하고 不飽和領域의 剪斷強度와 潮水位 下降時 發生되는 過剩間隙水壓을 써서 解析하는 것이 合理的이다. 이와같이 하였을 때 가장 위험한 滑動面은 低潮位時의 自由水面 아래에 存在하고 그 形狀은 過剩間隙水壓의 最大值를 連結하여 이루는 曲線인 것 같다.

감사 말씀

本 研究는 韓國科學財團의 연구비의 도움을 받아 이루어졌다. 本 研究를 수행하는데 많이 도와 준 임희대 교수, 김영목, 신승복, 이시용, 이종재 제군과 기타 대학원생 여러분께 감사를 드린다.

1. 김상규, "潮位變動으로 인한 護岸堤內의 浸透", 大韓土木學會論文集, 제 5권, 제 3호, 1985, pp. 71~84.
2. Fredlund, D.G., "Slope Stability Analysis Incorporating the Effect of Soil Suction," Slope Stability edited by M.G. Anderson and K.S. Richards, John Wiley and Sons, 1987, pp.113~144.
3. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, R.A., "Shear Strength of Unsaturated Soils," *Canadian Geotechnical Journal*, 15, 1979, pp. 313~321.
4. Ho, D.Y.F. and Fredlund, D.G., "A Multistage Triaxial Test for Unsaturated Soils," *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, June, 1982, pp.8~25.
5. Narasiman, T.N., Neuman, S.P., and Edwards, A.L., "Mixed Explicit-Implicit Iterative Finite Element Scheme for Diffusion-type Problems, II, Solution Strategy and Examples," *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 2, 1977, pp.325~344.
6. Newman, S.P., "Galerkian Method of Analyzing Nonsteady Flow in Saturated-Unsaturated Porous Media, Fluid Element in Fluids, Vol. 1, edited by R.H. Gallagher et al., John Wiley and Sons, New York, 1975.
7. Newman, S.P. and Narasimahn, T.N., "Mixed Explicit-Implicit Iterative Finite Element Scheme for Diffusiointype Problems: I. Theory," *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 2, 1977, pp.309~323.

(接受: 1988. 4. 21)