降雨로 인한 斜面 不安定

Slope Instability Due to Rainfall

김 상 규*1
Kim, Sang - Kyu
김 영 묵*2
Kim, Young - Mook

Abstract

This paper aims at the investigation of various seepage behavior when rainfall infiltarates into unsaturated ground and understanding of the mechanism for slope instability due to rainfall. For this purpose an experimental study is carried out for model slopes using the test equipment which can simulate various rainfall intensity. In addition, a numerical study is performed for the same dimension and boundary condition as the experimental model. From both the experimental test and numerical analysis the progress of wetting front with time, critical amounts of rainfall, and pore-water pressure development with time are know in detail and their effects on slope stability are described.

요 지

이 論文은 降雨가 시작된 후 시간의 경과에 따른 不飽和 地盤에서의 여러가지 浸透擧動을 밝혀서, 斜面 不安定의 구체적인 머케니즘을 이해하려는데 목적이 있다. 이를 위해 강우장치를 만들어 模型斜面에 대해 여러가지 강도의 강우를 再現하고 침투거동을 측정하는 한편, 실험에서 사용한 동일한 數値模型을 가지고 수치해석을 하였다. 두가지 모델시험의 결과로부터 浸潤前線이 진행되는 과정, 지반으로 침투되는 한계강우량의 존재, 地表流出의 영향, 시간의 경과에 따른 간극수압의 변화 등을 밝혀서 이들 인자들이 사면 불안정에 어떻게 영향을 끼치는가를 자세히 언급하였다.

1. 序 論

한국에서의 斜面崩壞의 시기적인 특징은 거의 雨期에 발생한다는데 있으며, 따라서 斜面의 不安定은 降雨와 깊은 관련이 있다는 것은 분명하다. 강우로 인해 雨水의 전부 또는 일부가 지반으로 침투되면, 보다 큰 剪斷強度를 나타내었던

*1 정회원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 대전공업대학 토목공학과 전임 강사

不飽和土의 지반은 함수비가 증가되면서 전단강도가 감소되는 것이 사면 불안정의 직접적인 요인이라고 할 수 있다.

강우가 시작된 후 사면이 파괴에 이르기까지 전단강도의 변화를 겪는 동안 강우량과 浸透水와의 관계, 침투수의 전파속도와 토질특성과의 관계, 간극수압의 변화과정 등, 강우시 地盤의 여러가지 거동이 확실하게 밝혀지면 사면의 안정성을 해석하는데 크게 도움이 될 것이다. 이 논문의 意圖는 수치해석과 실험을 통해서 이 관계를 명확히 알아보자는 데에 있다.

강우 및 지반침투와 관련되는 연구는 여러 학자들에 의해 수행되었다. Lumb(1978)는 지반의 飽和度와 透水係數에 따라 지반으로의 雨水의 침투깊이를 산정하는 경험식을 최초로 발표하였다. 그러나 이 공식에서는 흙의 전단강도를 결정하는데 가장 중요한 요소인 間隙水壓의 변화에 대한 言及이 없다. 최근에 이르러 강우강도, 降雨持續時間 등을 모형화하여 지반침투에 관한 數値모델들이 몇가지 발표되었다. 이 중, Leach and Herbert(1982)는 2차원 有限差分法으로 가파른 사면에 대해 적용할 수 있는 모델을 발표하고 실제로 홍콩의 실제 사면에 적용시켜 본 일이 있다. Anderson and Pope(1984)는 불포화 영역의 물의 침투에 관련되는 水文學的 수치모델을 제안하였으며, Anderson and Howes(1985)는 負間隙水壓이 사면의 안정과 관련되는 물의 침투에 관한 1차원 모델을 발표하였다. 그러나 이 모델들은 사면의 불안정을 평가하는데 있어서 토질공학적인 측면보다는 수문학적 또는 지질학적 측면이 강조되어 있는 단점이 있다.

강우로 인해 침투되는 지반은 통상 불포화토이므로 불포화 흐름에 대한 이론이 本硏究의 이론적인 바탕을 이룬다. 불포화 흐름에 대한 이론은 이미 土壤學分野(soil science)에서 많은 연구업적이 축적되어 있다(예 : Liakopulos, 1965 : Narasimahn, 1975). 불포화토의 전단강도를 새로이 정의하여 실제에 이용하기 쉽게 최초로 개발한 분은 Fredlund and Morgenstern(1977)이다. 그 이후 Ching, Sweeny, and Fredlund(1984)는 불포화토의 剪斷強度의 이론을 적용하여 실제 사면의 안전성을 평가하고, 이 이론의 타당성을 입증하였다. 김(1988)은 큰 潮位變動을 받는 防潮提에 대해 불포화영역의 전단강도를 고려하였을 때 방조제의 안정에 끼치는 영향을 연구한 바 있다.

2. 不飽和地盤에 대한 浸透理論

2.1 Darcy의 법칙과 支配方程式

흙속으로 흐르는 물의 침투이론은 Darcy에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$q = ki \tag{1}$$

여기서 q : 단위체적당 浸透流量
k : 투수계수
i : 動水傾斜

Darcy의 법칙은 본래 飽和土에 대해 유도되었지만, 그 후의 연구에 의해 불포화토에 물이 흐를 때에도 적용될 수 있다는 것을 알게 되었다(Richards, 1931 ; Chiles and Collis-George, 1950). 다만, 불포화 흐름에 있어서는 透水係數가 일정한 값이 아니고 포화도 또는 체적함수비(volumetric water content)에 따라 변화한다.

非正常 흐름(transient flow)에 있어서는 透水媒體의 어느 위치에 있는 요소에 물이 들어와서 나가는 流量差는 체적함수비의 변화와 동일하다. 다시 말하면, 외부에서 들어오는 유량이 있을 때 이것과 요소내의 유량의 변화율의 합계는 체적함수비의 시간에 관한 變化率과 동일하다고 말할 수 있다. 2차원의 흐름에 대해서는 이것을 다음과 같이 식으로 나타낼 수 있다(Lam and Fredlund, 1984).

$$\frac{\partial}{\partial h}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y \frac{\partial h}{\partial y}\right)+q=\frac{\partial(V_w/V)}{\partial t} \tag{2}$$

여기서

k_x, k_y : x 및 y방향의 투수계수
h : 全水頭
q : 外部에서 들어오는 단위체적유량
V_w : 要素內 물의 체적
V : 요소의 전체적
V_w/V : 체적함수비
t : 시간

體積含水比는 응력상태와 투수매체의 특성에 따라 변한다. 비포화토에 대한 응력상태는 두가지 應力狀態變數($\sigma-u_a$)와 (u_a-u_w)로 완벽하게 표시할 수 있다(Fredlund and Morgenstern, 1977). 여기서 σ는 全應力, u_a는 間隙空氣壓, u_w는 間隙水壓을 의미한다. 만일 비정상흐름이 발생하는 동안 전응력이 일정하고 간극공기압은 대기압에서 일정하다고 가정하면, 체적함수비의 변화는 두번째의 응력상태변수(u_a-u_w)에만 의존한다. 또한 假定에 의하여 u_a는 일정하므로 체적함수비의 변화는 간극수압만의 함수가 된다.

체적함수비와 간극수압과의 관계는 透水媒體의 특성에 의존하며, 그 관계는 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{V_w}{V} = m_2^w(u_a-u_w) \tag{3}$$

여기서 m_2^w는 그림 2.1에 보인 바와 같이 체적함수비와 간극수압 관계곡선의 傾斜가 되며, 간극수압이 正의 값이면 흙의 체적변화계수 m_v와 같아진다. 이 계수는 투수매체의 貯水能(storage capacity)을 나타낸다.

전수두는 다음과 같이 표시된다.

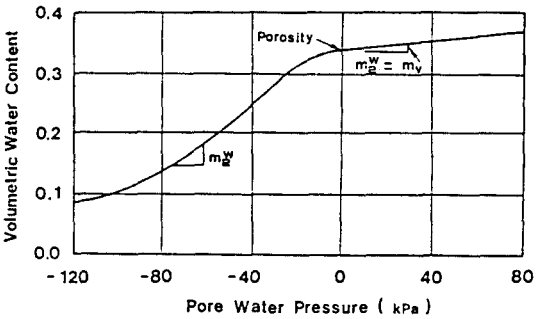


그림 2.1 체적함수비와 간극수압과의 일반적인 관계 (Lam and Fredlund, 1984)

$$h=\frac{u_w}{\rho_w g}+z \tag{4}$$

여기서

h : 全水頭
g : 중력가속도
ρ_w : 물의 密度
z : 기준점으로부터의 높이

식(3)을 미분하면 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial(V_w/V)}{\partial t} = m_2^w \frac{\partial(u_a-u_w)}{\partial t} \tag{5}$$

식(4)를 정리하여 식(5)와 (2)에 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_y\frac{\partial h}{\partial y}\right)+q=\rho_w g m_2^w \frac{\partial h}{\partial t} \tag{6}$$

식(6)은 불포화토에 대한 非正常흐름의 支配方程式이다.

위의 식을 메트릭스형의 有限要素方程式으로 표시하면 다음과 같다.

$$[C]\{h\}+[S]\{\dot{h}\}=\{Q\} \tag{7}$$

여기서

[C] : 要素特性 메트릭스
[S] : 要素貯水 메트릭스
{h} : 節點의 전수두 벡터
{$\dot{h}$} : 시간에 따른 全節點水頭 변화율
{Q} : 절점의 흐름벡터

본논문의 數値解析에서 사용한 전산프로그램 PC-SEEP(Krahn et al., 1987)은 식(7)을 근거로 하고 있다.

3. 浸透擧動에 대한 實驗 및 結果

3.1 實驗裝置

강우에 의한 지반침투 거동을 측정할 목적으로 그림 3.1에 보인 바와 같은 실험장치를 만들었다. 이 장치는 降雨裝置, 斜面謀型裝置, 및 測定裝置로 나눌 수 있다.

강우장치는 유량공급과 분배를 임의로 하여 여러가지 강우강도를 再現할 수 있도록 제작하였다. 강우강도를 재현하는데 요구되는 유량은 수조에 저장하고 펌프를 이용하여 유량분배용 水槽까지 올린다. 이 수조에는 d=13mm인 10개의 유량분배용 밸브가 수조바닥에 부착되어 있으며, 開閉式 뚜껑으로 되어 있는 이 밸브를 조작하면 강우량을 조절할 수 있다.

이 밸브를 통해 내려온 물은 강우를 재현할 수 있는 박스에 도달된다. 이 박스는 d=1.3mm의 주사바늘이 각 박스마다 121개 부착되어 있어서 그 아래에 놓인 사면 모형장치로 골고루 비가 뿌려지도록 하였다. 강우장치는 사면 모형장치 바로 위에서 물이 떨어지도록 높이를 조절할

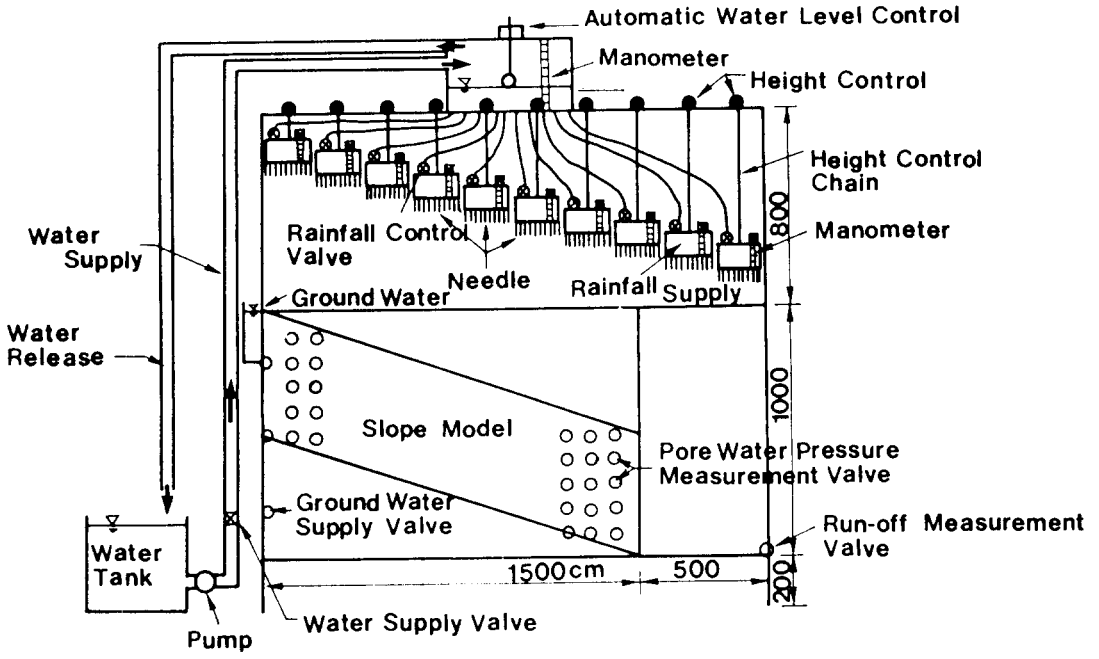


그림 3.1 강우에 의한 지반침투거동 실험 장치

수 있다. 더 상세한 내용은 김(1990)의 논문을 참조하기 바란다.

사면모형장치의 크기는 길이 2.0m, 높이 1.0m, 폭 0.2m로 하였다. 이 안에 흙을 다져서 넣어 實驗用 地盤을 만들 수 있으며, 실험시 지반의 거동을 볼 수 있도록 이 장치는 8mm두께의 투명 아크릴 판으로 만들었다. 이 장치는 前面에는 5cm 평방으로 눈금을 그려 두었고, 후면에는 간극수압 측정용 밸브를 10cm 간격으로 설치하였다. 이 장치내로 지하수도 공급할 수 있도록 박스 側面에 3단으로 급수용 밸브를 설치하였다. 사면의 경사는 콘크리트 받침대를 이용하여 조절할 수 있도록 하였다.

강우로 인해 지반침투가 발생할 때, 正 및 負의 간극수압의 변화를 알기 위해 피조미터 팁을 제작하였다. 이 팁은 거친 粒子의 carbon ceramic을 물로 성형시킨 후, 1,350℃의 온도로 24시간 燒成시켜 제작한 것이다. 이와 같이 제작된 팁의 空氣 陷入値(air entry value)는 별로 높지 않아 負間隙水壓을 측정하는데에는 적절하지 않았다. 負間隙水壓측정용 팁은 活性度가 작은 점토광물인 Kaolinite가 주성분인 Kaoline과 주문진에서 채취한 표준사를 사용하여 1:2로 섞어 성형시킨 다음, 1,000℃로 6시간 소성하여 제작한 것이다. 이와 같이 제작된 팁의 투수계수는 2.8×10^{-4}cm/sec이었다.

3.2 實驗地盤의 成形

본실험에서 사용된 흙은 漢江河口에서 채취한 석영질의 가는 모래와 굵은 모래이며, 입경이 균등하고 세립이 거의 포함되어 있지 않다. 흙을 사면모형장치에 넣어 일정한 밀도 및 간극률을 유지할 수 있도록 동적 다짐을 행하여 실험지반을 성형하고 乾燥單位重量, 含水比를 측정하였다. 透水係水는 동일한 조건의 시료를 가지고 별도의 투수시험을 행하였다. 포화시의 투수계수는 가는 모래에 대해 6.7×10^{-4}cm/sec, 굵은 모래

에 대해 2.1×10^{-2}cm/sec이다. 한편, 실트가 함유된 風化土도 사용하였는데, 이 흙은 입도분포가 양호하며, 포화투수계수는 6.3×10^{-5}cm/sec이다.

3.3 實驗計劃

3가지 재료에 대해서 각각 일련의 실험을 행하고, 강우강도를 달리하였을 때 침투거동을 파악하는데 실험의 중점을 두었다. 降雨強度는 가는 모래에 대해서는 포화투수계수의 1−30배의 크기로 몇단계로 나누어 변화시켰고, 굵은 모래에 대해서는 0.24배−10배의 크기로 몇단계로 나누어 변화시켰다. 풍화토에 대해서는 포화투수계수의 20배만 적용하였다. 이 3종류의 흙을 사면모형장치에 넣어 50cm의 두께로 성형하고 실험계획에 따라 실험하였다. 실험지반에 대한 區別은 F는 가는 모래, C는 굵은 모래, W는 풍화토로 표시하였고, 강우강도는 지반의 포화투수계수 k의 倍數로 표시하였다.

4. 實驗結果 및 分析

4.1 浸潤前線의 진행과 降雨強度의 영향

강우가 시작되면 지표면에서부터 젖기 시작한다. 젖은 부분은 젖지 않는 부분과 색깔로 확연히 구별된다. 강우가 지속되면 젖은 부분이 점차 아래로 진행되며, 이것을 여기서는 浸潤前線(wetting front)이라고 하기로 한다. 여기서 한 가지 유의할 것은 침윤전선내에 있는 흙이 전부 포화되는 것은 아니다.

그림 4.1은 가는 모래지반에 대해 강우강도의 差異에 따라 침윤전선이 어떻게 진행되는가를 보이고 있다. 이 그림을 보면 강우강도가 지반의 포화투수계수의 1배 내지 5배(1k−5k)까지 증가할수록 침윤전선의 進行速度가 빨라지나, 5k이상의 강우강도에서는 강우강도에 관계없이 浸透樣相이 일정하다는 것을 알 수 있다. 그림 4.2는 굵은 모래에 대한 실험결과인데, 여기서도 0.24k부터 4k까지는 강우강도의 증가에 따라 침윤전선의 진행속도는 증가하나, 그 이상이 강우강도에서는 一定한 침투양상을 보인다. 이 실험결과를 보면, 강우강도가 아무리 크다 하더라도 지반내로 침투되는 水量은 일정한 한계가 있다는 것을 알 수 있다. 지반내로 침투되지 아니한 강우량은 지표면으로 유출되는 것은 물론이다. 따라서 지반내로 침투되는 限界降雨量은 그 지반의 포화투수 계수의 4배 내지 5배라는 것이 실험적으로 밝혀진다. 한계강우량에서의 침윤전선의 진행속도는 지표면부근에서는 비교적 빠르나 그 이후는 다소 느리게 진행된다. 그러나 不透水層에 이르면 갑자기 빨라지는데, 그 이유는 본래 흙이 가지고 있던 水分이 침윤전선의 진행과 더불어 불투수층 부근까지 유출되어 이미 함수비가 증가되었기 때문이라고 판단된다.

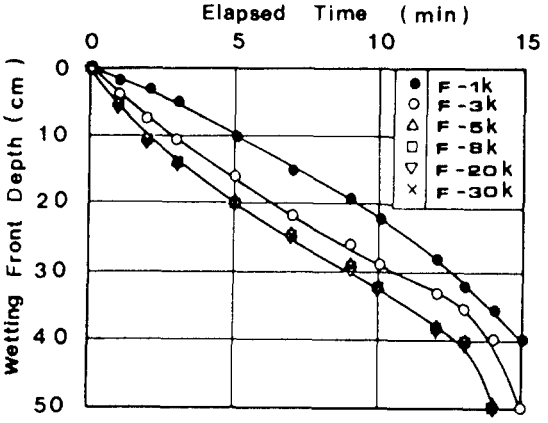


그림 4.1 가는 모래지반에 대한 강우강도와 침윤전선의 진행과의 관계

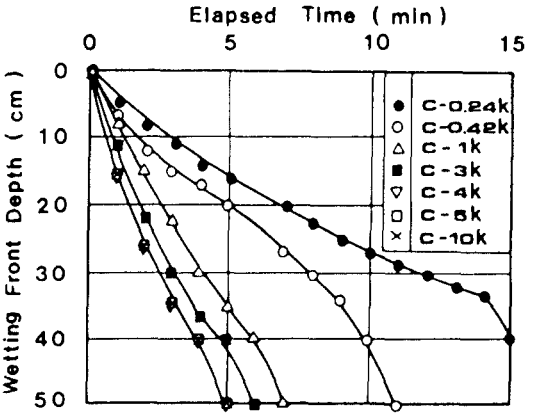


그림 4.2 굵은 모래지반에 대한 강우강도와 침윤전선의 진행과의 관계

4.2 間隙水壓의 變化

그림 4.3은 사면 바닥의 불투수경계면에서 강우가 시작되고 난 이후의 간극수압의 변화를 측정한 것이다. 굵은 모래에 대해 강우강도는 흙의 투수계수의 0.24배와 0.42배로 하였다. 이 그림을 보면 前者의 경우에는 10분부터 後者의 경우에는 16분부터 간극수압이 증가한다. 이 시간들을 그림 4.2와 비교해보면 침윤전선이 바닥에 도달하는 시간은 각각 11분과 16분이므로, 浸潤前線이 도달하기 대략 1분전부터 간극수압은 증가하기 시작한다는 것을 알 수 있다. 이 그림에서는 강우강도가 낮으므로 간극수압의 증가는 느리게 나타나지만, 강우강도가 한계값에 가까울수록 그 증가는 급격하다. 따라서, 斜面의 安定性은 이 순간부터 급격하게 저하된다고 할 수 있다.

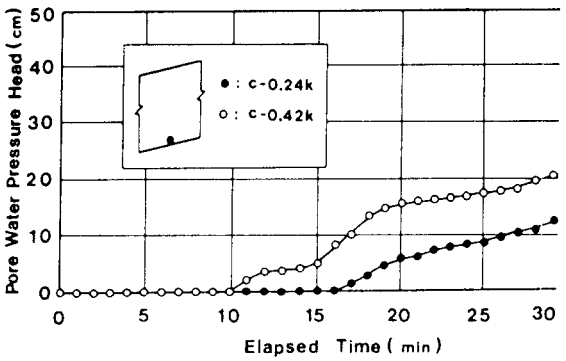


그림 4.3 굵은 모래지반에서 강우가 시작된 이후 사면바닥에서의 간극수압의 변화

그림 4.4는 細粒이 많은 風化土에 대하여 강우가 시작된 이후의 地盤內 간극수압의 변화를 보인 것이다. 피조미터는 지표면에서 5, 15, 25, 35 및 45cm의 위치에 설치하였는데, 함수비가 15.8%인 이 흙의 초기의 負間隙水壓은 모든 위치에서 $-75g/cm^2$로 측정되었다. 이 그림을 보면 피조미터가 설치된 위치에 침윤전선이 도달하면 간극수압이 갑자기 증가한다는 것을 알 수 있는데, 이와 같이 되는 이유는 함수비의 갑작스런 변화때문인 것으로 생각된다. 測定깊이 5cm, 15cm, 및 25cm에서는 강우가 200분까지 계속되는 동안에도 계속해서 負壓으로 남아 있다. 이것은 침윤전선이 아래로 지나간 후에도 그 흙은 포화되지 않았거나, 또는 침투가 下方向으로 계속 일어나고 있다는 것을 의미한다. 강우가 持續되면 상당시간이 경과한 후에는 수위가 바닥에서 상승하므로, 이 수위가 測點을 지날 때 비로소 간극수압은 正의 값으로 변한다. 측점 z=45cm에서는 강우가 시작된지 152분이 지난다음에 간극수압은 정의 값을 보이므로 이 시점이 수위가 상승한 시간이 된다.

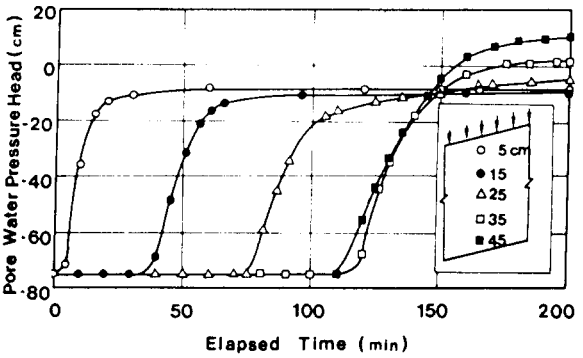


그림 4.4 풍화토지반내 여러 위치에서의 간극수압의 변화

4.4 降雨持續時間에 따른 地表面流出量의 變化

지반으로 침투되는 강우량을 초과하는 양은 지표면을 따라 流出될 것이다. 그림 4.5는 가는 모래지반에 대해 강우강도를 5배, 8배, 및 10배로 하였을 때, 강우지속시간에 따라 지표면으로 직접 유출되는 유량을 그림으로 보인 것이다. 당연히 예상되는 바와 같이 限界降雨強度 이상에서는 이 유출량은 강우강도에 비례하여 증가할 것이다. 이 유출량은 강우가 지속됨에 따라 계속해서 증가하다가, 그림에서는 나타나지 않았지만 어느 시간에 이르면 일정하게 되리라는 것을 예상할 수 있다. 直接流出量이 어느 한계를 넘으면 지표면에 pond가 형성되면서 洗堀이 일어날 수 있다. 그러나 실제로 지표면의 세굴현상은

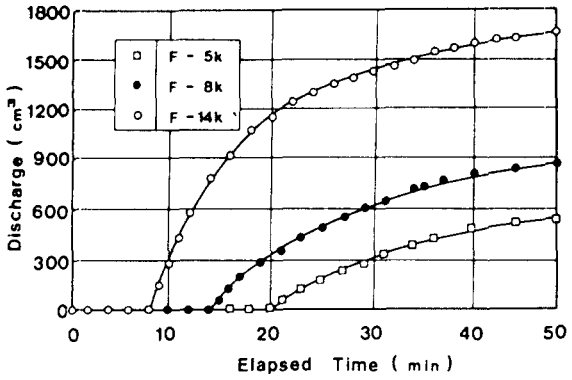


그림 4.5 가는 모래지반에 대한 강우지속시간에 따른 유출량의 변화

植生, 지반의 傾斜, 토질조건 등과 관련이 깊다. 본실험에서와 같이 表面被覆이 없는 조건에서는 강우강도가 지반의 투수계수를 10배 초과하는 경우(r=10k)부터 세굴이 목격되었고, 강우강도가 20k에 이르렀을 때에는 세굴현상이 현저하게 나타났다.

5. 數値解析에 의한 浸透擧動

5.1 數値解析 條件

수치해석은 PC-SEEP(Krahn et al, 1987)라는 전산프로그램을 사용하였으며, 이것은 weighted residual Galerkin method를 이용한 유한요소법으로 구성되어 있다.

실험에서 사용된 模型斜面과 가능한 한 동일한 것으로 수치해석을 행하였으며, 이 해석을 위해서 사용된 유한요소망은 그림 5.1과 같다. 사면 바닥에는 바닥과 일치되게 지하수가 존재하는 것으로 하였고, 사면의 上端 연직면은 불투수층의 경계면, 하단 연직면은 유출면으로 정하였다. 사면 상단 연직면을 불투수층으로 가정한 것은 실제와 어긋나나, 해석상 부득이하다. 그러나 침투는 대부분 연직한 방향으로 발생하므로 사면의 길이를 충분히 길게 한다면 이 영향은 거의 무시할 수 있을 것으로 생각된다.

地下水面으로부터 위로 30cm까지의 지반은 毛管作用을 받아 높이에 비례하여 負壓을 받고

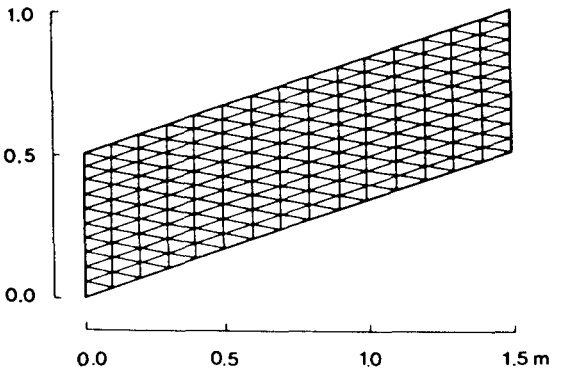


그림 5.1 침투해석을 위한 유한요소망

있으며, 그 이상에서는 함수비와 부압이 일정한 것으로 가정하였다.

지반의 含水特性은 Gardner방정식에 의해 결정되었는데, 이때 Gardner 常數는 포화투수계수가 비슷한 기존의 실험결과(Mualem, 1976)를 참고로 하여 굵은 모래에 대해서는 a=10, n=3을 적용하였고, 가는 모래에 대해서는 a=10, n=2를 적용하였다. 이 값들을 써서 계산된 각 모래에 대한 負間隙水壓-상대투수계수 特性曲線은 그림 5.2와 같다. 여기서 상대투수계수란 현재 투수계수의 포화투수계수에 대한 비이다.

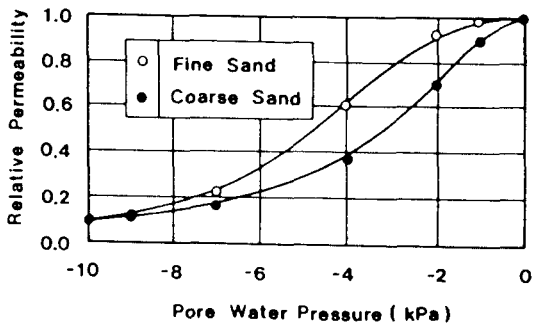


그림 5.2 부간극수압과 상대투수계수와의 관계

5.2 降雨強度의 변화에 따른 浸潤前線의 진행

그림 5.3은 가는 모래지반에 대해 강우강도를

달리하였을 때, 침윤전선의 진행속도를 나타내고 있다. 이 그림을 보면 강우강도가 지반의 포화투수계수의 5배이상이 될 때에는 침윤전선의 進行樣相을 모든 강우강도에 대해 동일하다는 것을 보인다. 그림 5.4는 굵은 모래에 대한 것이다. 이 그림에서도 지반의 포화투수계수의 4배이상의 강우강도에서는 침윤전선의 진행양상은 동일하다. 따라서 수치해석에 의해서도 지반을 침투할 수 있는 한계강우강도는 포화투수계수의 4-5배라는 것이 확인되고 있다.

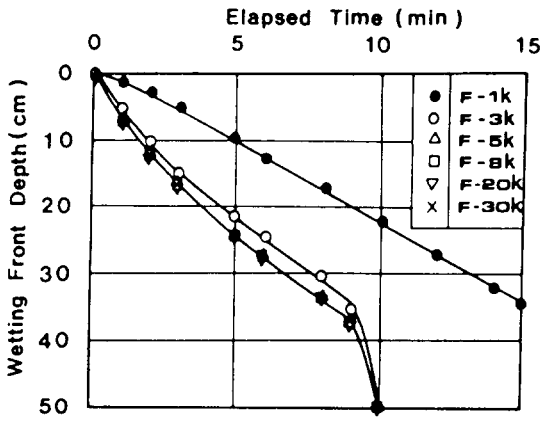


그림 5.3 가는 모래지반에서 수치해석에 의한 침윤전선의 진행

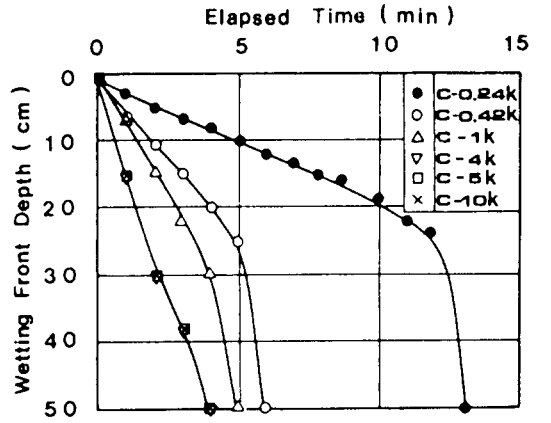


그림 5.4 굵은 모래지반에서 수치해석에 의한 침윤전선의 진행

5.3 浸透로 인한 地下水位의 上昇

사면 바닥에 지하수위가 경사지게 존재할 때, 강우강도에 따라 수위가 어떻게 변화 하는가를 알아보기 위하여 數値解析을 하였다. 그림 5.5는 강우강도가 지반의 포화투수계수와 같을 때 (r=1k) 지하수위의 상승을 보인 것이다. 가는 모래지반에 대해 강우가 시작되면 18분뒤에 수위가 상승하기 시작하여 36분후에는 약 20cm의 높이까지 올라온다. 地下水位가 상승하기 전까지는 강우로 인한 불포화흐름이 계속되었고, 흐름의 영향이 본래의 지하수위면에 미칠 때 지하수위가 상승하게 된다는 것을 알 수 있다. 그러나 地表面 附近에서는 전혀 飽和帶가 형성되지 않는다는 것을 주목할 수 있다. 이 그림에서 오른쪽의 수위상승이 뒤지는 것은 오른쪽 측면을 불투수경계면으로 가정하였기 때문이다. 다음에 제시되는 그림들에서도 이와 같은 현상이 나타나지만 수치해석시 경계조건의 設定때문에 부득이한 것으로 이해하여야 한다.

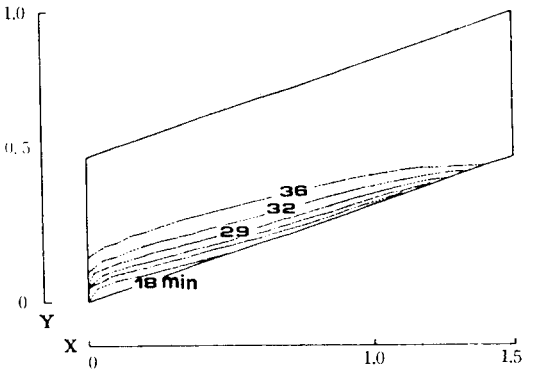


그림 5.5 강우강도가 지반의 포화투수계수와 동일한 경우, 강우지속시간에 따른 지하수위의 상승 (가는 모래)

그림 5.6은 강우강도를 5배로 증가시켰을 때 (r=5k) 강우지속시간에 따른 지하수위의 上昇을 보인 것이다. 이 그림을 보면 지하수위가 상승하기 시작하는 시간이 8분이므로 前者의 경우보다

훨씬 빠르며, 특히 이번 경우에는 지표면에 얇게 飽和帶가 형성된다는 것을 알 수 있다. 그러나 이 포화대는 限界降雨量이상에서만 형성되고, 지하수위의 상승에 비해 대단히 느리다. 강우강도를 10배와 20배로 증가시켰을 때에도 그림 5.6과 거의 동일한 결과가 얻어졌다. 이미 4장의 실험결과로부터 밝혀진 바와 같이, 한계강우강도 4k－5k이상의 강우에서는 지반내로의 浸透擧動은 거의 동일하다는 것이 밝혀졌는데, 수치해석 결과도 이 사실을 뒷받침해주고 있다.

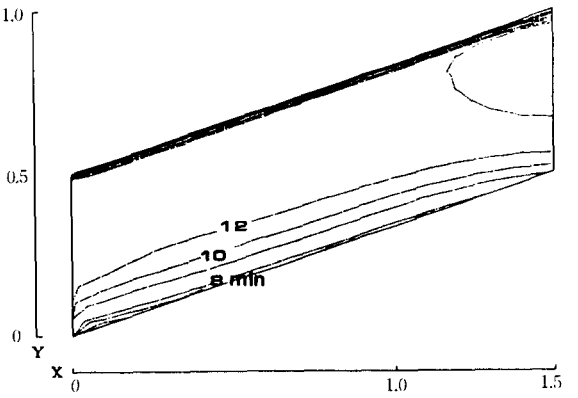


그림 5.6 강우강도가 지반의 포화투수계수의 5배인 경우, 강우지속시간에 따른 지하수위의 상승

5.4 間隙水壓의 變化

강우가 지반내로 침투되기 시작한 이후 지반내

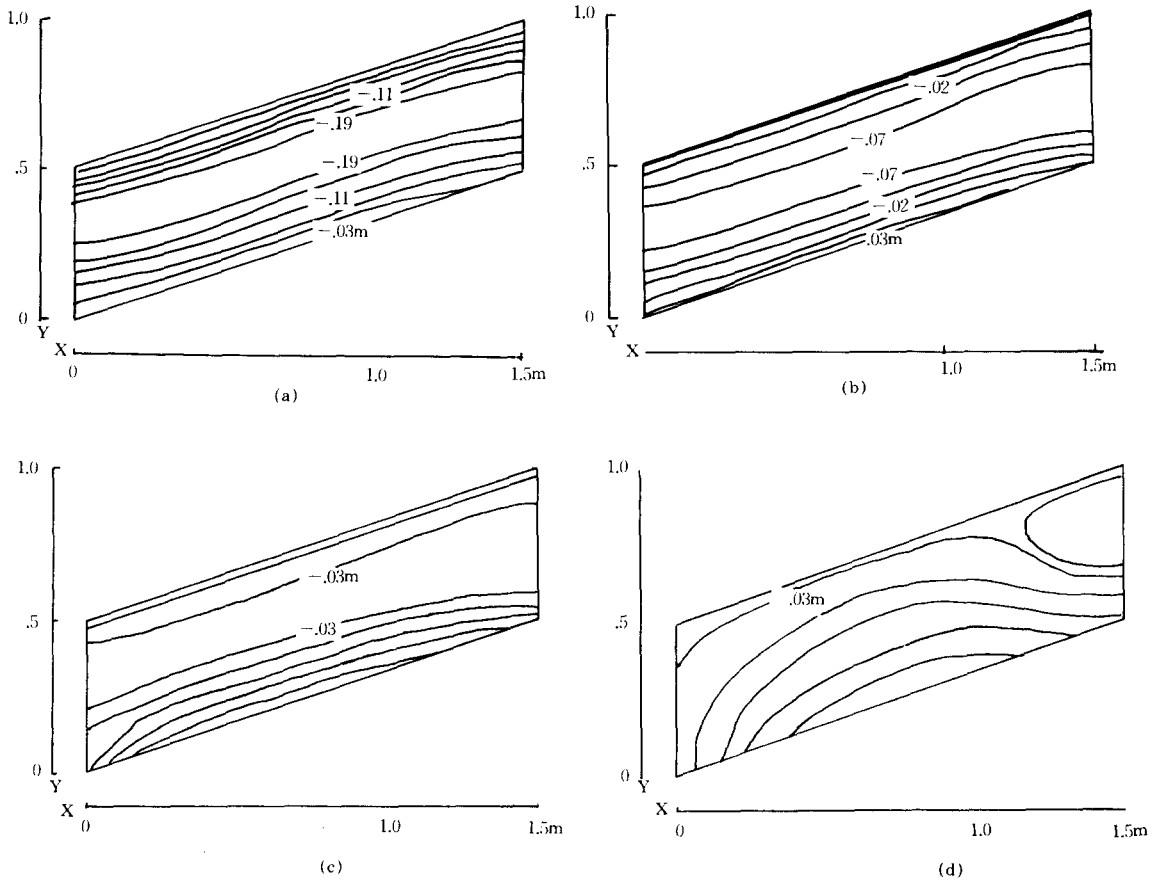


그림 5.7 가는 모래의 강우지속시간에 따른 간극수압의 변화 (a) 0.5분 (b) 10분 (c) 12분 (d) 13분

의 간극수압의 변화를 實驗的으로 정확히 측정하는 것은 결코 쉬운 일이 아니다. 스탠드 파이프식 피조미터로서는 간극수압의 반응시간과 측정시간사이에 時間遲滯가 있기 때문에, 4장에서 설명한 모형장치에서는 만족스러운 측정이 불가능하였다.

그러나 수치해석에서는 이것이 충분히 가능하다. 다만, 강우가 시작되기전 지반의 깊이에 따른 負間隙水壓이 어떻게 분포되어 있는가 하는 것이 문제가 되나, 실제로 이것을 실험적으로 정하기 위해서는 많은 시간과 노력이 요구되므로, Gardner 식 또는 기타 經驗式을 이용하여 측정할 수 밖에 없다. 여기서는 앞서 설명한 바와 같이 Gardner 식을 적용하여 초기의 負間隙水壓을 추정하였다.

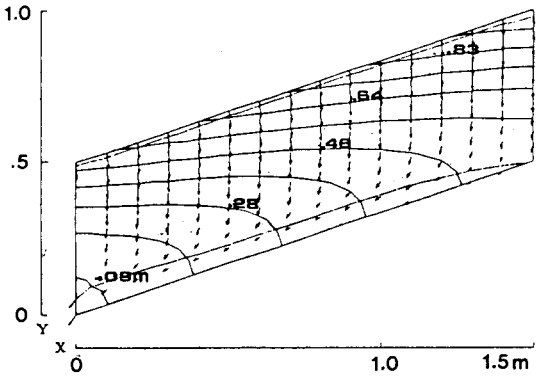
그림 5.7은 강우강도가 투수계수의 5배인 경우에 대하여 降雨持續時間에 따른 간극수압의 변화를 보인 것이다. 그림 5.7(a)는 강우가 시작된 후 0.5분, 그림 5.7(b)는 10분, 그림 5.7(c)는 12분, 그림 5.7(d)는 13분일 때 等間隙水壓線이 그려져 있다. 이 그림에서 검은 부분은 포화대를 의미한다. 지반내의 처음의 負間隙水壓은 침투가 발생하는 동안 거의 일정한 負壓을 보이다가 지하수위의 상승과 더불어 正의 값으로 점차로 증가된다.

5.5 浸透速度벡터

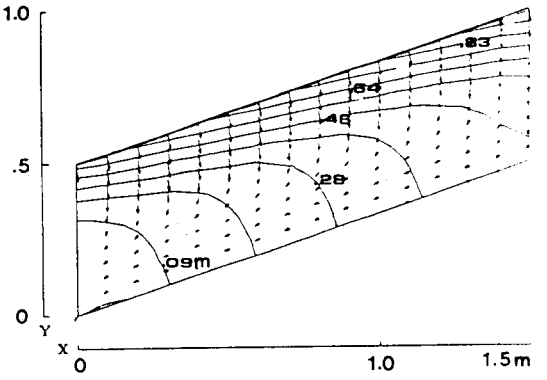
지반내로 침투가 발생하는 동안 침투속도의 벡터를 經過時間別로 표시할 수 있다. 그림 5.8은 강우가 시작된 후 0.5분, 10분에서의 침투속도 벡터를 보인 것이다. 0.5분 경과시의 침투속도 벡터를 보면, 지표면 부근에서는 속도가 크고 浸透方向은 연직이나 아래로 내려갈수록 속도가 줄어들며, 그 방향은 아래로 향한다. 강우가 시작되면 침윤전선이 형성되어 아래로 발전되어 가면서 그 아래에 있는 지반의 수분도 少量이나마 유출되기 시작한다는 것을 이 그림은 분명하게 보이고 있다. 그림 5.8(a)의 왼쪽 바닥에서는 이 水分의 유출로 말미암아 강우시작후 0.5분부터 지하수위가 상승하기 시작하는 증후가 나타나고 있다. 따라서 여기서 분명한 것은, 침윤전선이 지하수위에 도달후에 지하수위가 상승하는 것이 아니고 그 이전 침윤전선이 형성되면 곧 原地盤이 가지고 있는 수분이 유출되어, 이로 말미암아 지하수위는 上昇하기 시작한다는 것을 알 수 있다.

그림 5.8(b)는 降雨가 시작된 후 10분에서의 침투속도벡터를 보인 것인데, 이때에는 침윤전선이 아직 바닥까지 도달되어 있지 않았는데도 불구하고 지하수위가 상당히 상승하였다. 침윤전선 안에서는 침투방향이 연직이지만 그 밖을 벗어나면 경사지고, 지하수위 아래에 있는 침투수의 流出方向은 바닥의 경사와 평행하다.

그림 5.8에는 全水頭의 콘터(contour)도 함께



(a)



(b)

그림 5.8 가는 모래에 대한 침투속도벡터와 전수두
(a) 강우시작 후 0.5분 경과 (b) 10분 경과

그려져 있다. 전수두의 값은 토층 왼쪽의 바닥을 기준하였으며, 강우시작 직전에는 전수두는 位置水頭와 본래 그흙이 가지고 있는 負間隙水壓에 의한 압력수두를 합친 값이다. 강우가 시작되면 침투가 발생하므로 침투로 인한 간극수압의 변화만큼 전수두는 변화할 것이다. 그림 5.8(a)와 5.8(b)를 비교해보면 강우가 지속됨에 따라 침윤전선 내에서는 等全水頭線의 콘터가 아래로 내려오고(두 그림에서 콘터의 간격이 넓어진 것에 留意할 것)속도 벡터가 아래로 향하면 콘터가 아래로 급격하게 휘어지는 것을 알 수 있다. 이것은 침투가 발생하면 간극수압은 침투의 영향으로 負壓이 감소된다는 것을 의미한다.

6. 實驗과 數値解析과의 비교

이미 언급한 바와 같이 4장에서는 실험결과가 제시되었고, 5장에서는 수치해석결과가 제시되었다. 두 결과를 定量的으로 비교하기 위하여 가능한 한 初期條件을 동일하게 하려고 하였으나 실험에서는 測定의 정확도에 문제가 있고, 수치모델에서는 경계조건의 設定上의 문제 때문에 직접적인 비교가 불가능한 점이 많이 있다. 그러나 이러한 문제점 때문에 설사 두 결과가 꼭 일치되지 않는다 하더라도 공통적인 傾向이 발견된다면 강우에 의한 지반내 침투거동을 밝히는데 크게 도움이 될 것이다.

아무리 강우강도가 크다 하더라도 지반내로 침투되는 강우량은 어떤 限界가 있다. 이 限界降雨量은 실험과 수치해석에 의해 공통적으로 지반의 포화투수계수의 4 내지 5배라는 것이 밝혀졌다. 강우강도가 한계값보다 낮으면, 강우강도가 작을수록 침윤속도의 진행속도는 느리다. 그림 4.1과 5.3, 그림 4.2와 5.4를 비교해보면, 강우강도에 따라 침윤전선이 진행되는 경향은 거의 동일하지만 침윤전선이 지반의 바닥에 도달되는 시간은 數値解析의 경우가 공통적으로 빨랐다. 두 모델의 차이는 실험모델에서는 지반의 바닥을 불투수층으로 하였고, 수치모델에서는 바닥에 따라 지하수위가 존재하는 것으로 境界條件을 設定하였다. 전자의 경우에는 지반의 含水比가 일정하다면 모든 위치에서 부간극수압은 동일하나, 후자의 경우에는 地下水位面으로부터의 높이에 따라 달라진다.

실험에서는 間隙水壓 반응시간의 지체현상 때문에 負間隙水壓의 순간적인 변화를 정확하게 측정하는 것이 용이하지 않다. 그러나 수치해석에서는 이것이 가능하지만, 초기의 負間隙水壓의 값과 지반깊이에 따른 분포를 정확하게 정하는 것이 여간 어려운 일이 아니다. 그럼에도 불구하고 수치해석에 의해 강우가 시작된 후 수치적으로는 정확하지 않을런지 모르지만, 그림 5.7에 보인 바와 같이 負間隙水壓의 變化過程이 소상하게 밝혀질 수 있다. 더우기, 침투속도의 벡터는 실험으로서는 불가능하지만 수치해석을 함으로서 침투방향과 속도를 定量的으로 나타낼 수 있다.

결론적으로 말하면, 본 연구에서는 實驗裝置의 제작과 실험하는데 소요되는 많은 노력에도 불구하고, 극히 제한된 실험결과밖에 얻지 못하는 실험과 電算機에 의한 수치해석을 병행함으로서 相互 補完이 되었다는데 큰 의미를 부여할 수 있을 것이다.

7. 結　　論

降雨裝置를 제작하고 模型地盤을 만들어 강우에 의한 지반으로의 여러가지 침투거동을 실험하였다. 한편, Geo-Slope 사에서 개발된 전산 프로그램을 가지고 여러가지 강우강도에 대한 浸透擧動을 해석하였다. 실험과 수치해석으로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 강우가 持續되면 침윤전선이 형성되어 下方向으로 진행한다. 침윤전선의 진행속도는 강우강도에 의존하며, 강우강도가 낮으면 느리고 높으면 빨라진다. 그러나 지반의 飽和透水係數의 4−5배이상의 강우강도에서는 침윤전선의 進行速度가 동일하다는 것이 실험과 수치해석에 의해 공통적으로 밝혀졌다.

(2) 지반내로 침투되는 限界降雨量을 초과하는 강우량은 水膜을 형성하면서 지표면이 경사를 따라 유출된다. 이 유출량이 크면 사면을 洗堀시킬 수 있다. 세굴시킬 수 있는 강우량은 지표면의 被覆狀態에 따라 크게 달라지지만, 본 실험에서

와 같이 피복이 전혀 없는 경우 강우강도가 지반의 포화투수계수의 10배일 때 세굴의 징조가 나타나기 시작하였다. 일단 세굴이 일어나면 사면의 原地形을 변경시키므로, 이것이 사면불안정의 중요한 원인이 될 수 있다.

(3) 일부의 실험결과와 數値解析 결과에 의하면 침윤전선이 하강하면 그 아래에 있는 흙이 함유하고 있는 물도 아래로 흐르는 것이 분명하게 나타났다. 따라서 침윤선이 原水位面에 도달하기 이전에 그 아래 지반내에서는 불포화흐름이 생기며, 이와 같이 유출된 물로 인해 지하수위는 조금씩 상승하기 시작한다.

(4) 降雨가 지속되는 동안 침윤전선이 하강하면서 지표면에서는 포화대가 형성되어 아래로 느리게 진행한다. 그러나 강우가 오랫동안 지속되어도 그 두께는 대단히 얇으며, 이것이 사면의 안정에 끼치는 영향은 미미한 것 같이 보인다.

(5) 불포화지반의 본래의 間隙水壓은 침투가 지속되더라도 負의 상태를 유지한다. 침투가 발생하는 동안은 침투로 인해 흙의 單位重量이 증가함과 동시에 負의 간극수압이 천천히 증가하기 때문에 사면의 安定性도 서서히 감소된다. 그러나 지하수위가 상승하기 시작하면서 지반내 간극수압은 비로소 정의 값으로 변한다. 따라서 사면의 安定性은 침투시에는 크게 低下되지는 않으나, 지하수위가 상승하기 시작할 때부터 급속히 低下된다.

8. 감사의 말

本연구는 한국과학재단의 연구비 지원을 받아 연구가 수행되었다. 本연구를 가능하게 해준 관계당국에 깊이 감사를 드리는 바이다.

參 考 文 獻

1. Anderson, M. G. and Howes, S.(1985), "Development and Application of a Combined Soil-Water Slope Stability Mode," Quarterly Journal Engineering Geology, London, Vol.18, pp.225−236.
2. Anderson, M. G. and Pope, R. G.(1984), "The Incorporation of Soil Water Physics Models into Geotechnical Studies of Landslides Behavior," Proceedings, 4th Int, Conf. Landslide Behavior, Toronto, pp.349−353.
3. Childs, E. C., and Collis-George, N.(1950), "The Permeability of Porous Materials," Proc., The Royal Society of London, 201, pp.392−405.
4. Ching, R. K. H. and Fredlund, D. G.(1983), " Some Difficulties Associated with the Limit Equilibrium Method of Slices," Canadian Geotechnical Journal, Vol.96.
5. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R.(1977), "Stress State Variables of Unsaturated Soils," Journal, Geotechnical Engineering Div., ASCE, Vol.113, No. Gt. 5, pp.447−464.
6. Krahn, J., Fredlund, D. G., Lam, L., and Barbour, S.L.(1987), "PC-SEEP: A Finite Element Program for Modelling Seepage," Publiction, GEO--SLOPE Programming Ltd., Calgary, Alberta.
7. Lam, L. and Fredlund, D. G.(1984), "Saturated--Unsaturated Transient Seepage Model for Geotechnical Engineering," Proc., 5th Finite Elements in Water Resources Conf. Vermont, pp.18−22.
8. Liakopulos, A. C.(1965),"Theretical Solution of Unsteady-Unsaturated Flow Problems in Soils," Bulletin, The Intern, Association of Science Hydrology, Vol.10, pp.5−39.
9. Lumb, P.(1975), "Slope Failure in Hong Kong," Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol.8, pp.31−65.
10. Mualem, Y.(1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resource Research, Vol.12, No.3, pp.513−522.
11. Narasimahn, T. N.(1975), "A Unified Numerical Model for Saturated-Unsaturated Ground Water Flow," Ph D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
12. Richards, L. A.(1931), "Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums," Physics, New York, 1, pp.318−333.
13. 김상규(1988), "조위변동을 받는 호안제의 사면안정해석," 대한토목학회 논문집, 8권 4호, pp.91−100.
14. 김영묵(1990), 강우시 무한사면의 침투거동, 박사학위논문, 동국대학교 대학원.

(접수일자 1991. 2. 12)