

불포화 지반에 물의 침투와 흙의 변형이 사면의 안정성에 미치는 영향

Implementation of Coupled Hydro-Mechanical Problems in Partially Saturated Soils

김재홍¹⁾ · 황영철[†]

Kim, Jaehong · Hwang, Youngcheol

ABSTRACT : Partially saturated permeability should be defined by the function of suction (or degree of saturation) and porosity. However, commercial software and most researchers' model often describe as the function of suction. The stability of a soil slope can be affected by both hydraulic and shear strength properties of partially saturated soils. For both studies, we generally use an uncoupled seepage analysis program Seep/W(Geo-Slope, 2007) and a series stress-deformation analysis program Sigma/W, or slope stability analysis program Slope/W. Seep/W is performed for simulations of partially saturated flow problems in non-deformable soil media. However, under real situations, the water flow processes in a deformable soil are influenced by soil skeleton movement and the pore water pressure changed due to seepage will lead to changes in stresses and to deformation of a soil. Many researchers are currently developing their models for solving coupled hydro-mechanical problems to simulate slope stability during a rainstorm. For a proper implementation in the field, the developed model should be still needed in order to achieve appropriate accuracy of the solution for coupled hydro-mechanical problems in soil slope stability. Thus, the paper presents the comparison of slope stability between uncoupled and coupled analyses of seepage and stress deformation problems.

Keywords : Partially saturated soil, Coupled hydro-mechanical problem, Seepage, Slope stability

요 지 : 불포화 투수계수는 모관흡수력(또는 함수비)과 간극물의 함수로 정의되어야 한다. 그러나 기존 상용프로그램이나 문헌에 개발된 모델들은 모관흡수력만의 함수로써 정의 되어왔다. 사면의 안정성은 수리학적인 측면과 흙의 전단강도 특성들이 모두 고려되어야 한다. 이 두 가지 특성에 대한 해석은 상용 프로그램인 Seep/W, Sigma/W 그리고 Slope/W(Geo-Slope, 2007) 같은 상호 연계 가능한 해석 프로그램을 이용한다. 이런 해석 방법으로 강우시 불포화 침투수를 고려하고 흙의 변형을 예측하며 결국에는 사면의 안정성 평가에 예측하고 있다. 불포화 침투수를 해석하는 Seep/W 프로그램은 흙의 변형은 고려하지 못하고 단지 불포화 침투해석만을 수행한다. 그래서 흙의 변형을 고려하기 위해 Sigma/W 프로그램을 연계하여 실제 사면에서 발생하는 침투에 의한 흙의 변형을 모사하고 있다. 이와 같이 동시에 발생하는 침투와 흙의 변형을 구현하기 위해 여러 연구자들이 새로운 모델들을 개발하고 있지만, 현재로서는 각각의 해석을 연계하여 실제로 일어나는 현상에 접근하고 있는 실정이다. 본 연구는 기존 프로그램을 이용하여 연계해석에 의한 결과와 동시해석과 유사한 알고리즘을 이용하여 해석한 결과를 비교하여 동시해석의 타당성을 검증하고자 하였다.

주요어 : 불포화토, 침투-응력 연계 해석, 강우 침투, 사면안정

1. 서 론

흙의 강도로써 모관흡수력의 영향을 불포화 사면의 안정성 해석에 고려하지 못하다가 1980년대, 홍콩에서 불포화 사면의 안정성 평가를 통해 흙의 모관흡수력을 사면 강도의 요소로써 재해석하기 시작했다(Ching 등, 1984). 이 결과 흙의 모관흡수력은 불포화 사면의 안정성을 유지하는데 중요한 역할을 하며 사면의 강도에 영향을 미치는 새로운 중요 인자로 인식 되었다. Rahardjo 등(1995)은 불포화 무한 사면의 Closed-form 해석을 이용해 흙의 강도에 미치는 모관흡

수력의 중요성을 발표하였다. 그러나, 이러한 해석들은 시간에 따른 사면내의 강우침투에 의한 안정성 해석을 하지 못하였다. 강우시 사면표층에 물이 침투되면서 점차적으로 지표면 포화깊이가 깊어짐에 따라 사면의 안정성 해석을 할 수 있는 Seep/W - Slope/W(Geo-Slope, 2007) 같은 상용 프로그램의 등장으로 강우를 고려하는 시간에 따른 사면의 침투해석이 가능하게 되어, 여러 연구자들에 의해서 강우 시에 사면의 불포화 투수특성과 함수특성의 사이를 결정할 수 있는 관계식을 예측하였고, 단계적이지만 지반내의 침투와 그때마다 사면의 안정성을 해석하여 불포화 사면 파괴의 불

1) 비회원, 콜로라도 대학교(University of Colorado at Boulder) 공과대학 토목공학과 박사과정

† 정회원, 상지대학교 이공대학 건설시스템공학과 부교수(E-mail : ychwang@sangji.ac.kr)

안정성을 예측할 수 있게 되었다(Ng와 Shi, 1997; Rahardjo와 Leong, 1997; Kim 등, 2004).

강우침투로 인한 사면 붕괴는 강우가 사면 내부의 모관 흡수력을 감소시키고 지표표층의 습윤 깊이가 깊어짐에 따라 사면의 강도를 감소시켜 사면 붕괴를 유발시키는 요인들이 강조 되어지고 있다. 불포화토의 불확실한 투수특성으로 인해, 그 원인이 되는 함수특성곡선의 정수들이 강우 조건 하에서의 사면 안정성에 어떠한 영향을 미치는지 확률론적인 연구들이 수행되고 있으며, 보다 현장 조건에 맞는 상황을 재현하려는 연구들이 시도되어 왔다(Chong 등, 2000; Zhang 등 2005). 또한 현장 계측자료의 불확실성을 보완하기 위하여 실시간 사면 붕괴 경보 시스템을 도입했다(김윤기 등, 2009). 이와 같이, 최근의 연구경향은 실제 불포화 지반에서 강우 시 발생하는 현상과 지반의 거동을 재현하고자 여러가지 모델들의 개발과 특정 장비의 도입으로 불포화토 해석의 연구를 수행하고 있다.

2. 시간에 따른 불포화 침투수의 분석적 해법 (Analytical solution)

불포화 지반의 수리학적 요소들이 비선형적으로 나타나기 때문에, 다양한 경계조건들과 초기조건들 하에서 불포화 침투 흐름을 계산한 Richard 방정식으로 표현하기에는 어려움이 있다. 일반적으로 지반 속의 습윤의 움직임을 예측하기 위해 수치해석적인 접근을 필요로 하기 때문이다. 지난 수십년 동안 여러 분석적 해법을 구하기 위해서 여러 연구자들이 노력하였지만, 그 중에서 Gardner(1958)는 수리학적 변수들을 지수함수 형태로 표현하여 정적인 상태에서의 불포화 침투해석에 대한 방정식을 제시하였다. 그 후 많은 연구자들이 정적인 불포화 침투 흐름에 대해서 제안을 해왔지만, Srivastava 등(1991)은 시간에 따른 침투 흐름을 분석적 해법으로 제시하였다. 정적인 침투 흐름 상태를 초기 조건으로 사용하여, 흙이 건조상태와 습윤상태로 변하는 동안 침투비율을 상수로 적용하여 흙의 수리학적 거동을 제시하였다.

부간극수압(ϕ_p)을 수직방향의 위치와 시간의 함수로 가정하고 다음과 같이 제시하였다.

$$S = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) \cdot e^{-\alpha \cdot \phi_p} \quad (1)$$

$$k(\phi_p) = k_{sat} \cdot e^{-\alpha \cdot \phi_p} \quad (2)$$

여기에서 $S_{sat} = 0.45$, $S_{res} = 0.2$, $k_{sat} = 2.8 \times 10^{-6} \text{m/s}$, 그리고 침투수 $q = 2.8 \times 10^{-7} \text{m/s}$ 이다. 시간에 따른 변수들은

다음과 같다.

$$\phi_p = \frac{1}{\alpha} \cdot \ln(R) \quad (3)$$

여기에서

$$R = \frac{q}{k_{sat}} - \left(\frac{q}{k_{sat}} - 1 \right) \cdot e^{-y} - \frac{4q}{k_{sat}} \cdot e^{-(L-y)/2} \cdot e^{-t^*/4} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_i \cdot y) \cdot \sin(\lambda_i \cdot L) \cdot e^{-\lambda_i^2 \cdot t^*}}{1 + (L/2) + 2\lambda_i^2 \cdot L} \quad (4)$$

$$t^* = \frac{n \cdot \alpha \cdot k_{sat} \cdot t}{S_{sat} - S_{res}} \quad (5)$$

λ_i 는 다음 방정식의 i^{th} 단계에서의 결과 값이고, t 는 시간이다.

$$\tan(\lambda \cdot L) + 2 \cdot \lambda = 0 \quad (6)$$

그림 1은 식 (1)~(6)을 연립하여 방정식들을 계산한 결과값이다. 지표면에서 수직 1m 지하수위 윗 부분(vadose)의 불포화지반에 침투를 고려한 시간에 따른 부간극수압 변화를 나타낸다.

불포화토의 기본적인 개념은 체적비(volume fraction)를 구분하면서 전개할 수 있다. 불포화토의 체적비를 각각 흡입자(n^s), 물(n^w), 그리고 공기(n^a)로 구분한다면, $1 = n^s + n^w + n^a$ 으로 표현할 수 있다. 불포화토를 이루는 세가지의 구성요소들 사이에서 체적비의 공간 분포는 $n^a = dv^a/dv$ 로써 표현되며, 여기에서 미소공간요소 α ($\alpha = s, w, a$)와 전체 미소체적 dv 로 표현할 수 있다. 따라서 간극비 $n = n^w + n^a$ 를 나타낼 수 있다.

불포화토의 구성방정식을 계산하기 위해서는 변위(u)와

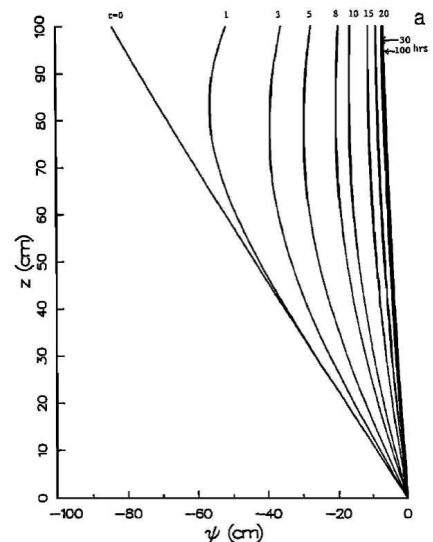


그림 1. 시간에 따른 불포화 지역의 간극수압 변화(Srivastava 등, 1991)

간극수압(p_w)을 구하기 위한 두 가지의 방정식이 필요하다 (일반적으로 간극 공기압($p_a = 0$)은 대기압 상태로 가정한다). 두 가지 미지수를 구하기 위해 사용하는 평형방정식(Balance equations)으로는, 불포화토 내의 물과 공기의 이동은 흙 입자의 움직임에 종속되기 때문에 흙 입자에 대한 평형방정식 (Balance of linear momentum)과 불포화토 내의 물의 흐름을 파악하여 간극수압을 계산할 수 있는 평형방정식(Balance of mass of the water)을 이용한다. 불포화토 내부에서 발생하는 응력 거동을 나타내는 Balance of linear momentum(식 (7))과 불포화토 내의 물의 흐름 평형을 알 수 있는 Balance of mass(식 (8))은 다음과 같다(Borja, 2004).

$$\text{div } \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$n \frac{\partial S_e}{\partial s} (-\dot{p}_w) + S_e \text{div } \mathbf{v} = -\text{div } \tilde{\mathbf{v}}^w \quad (8)$$

여기에서 전응력을 유효응력으로 나타내면, $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - S_e p_w \mathbf{1}$ (positive in tension), 유효포화도(S_e)는 포화도(S)와 잔류포화도(S_r)의 비율로 표현할 수 있다, $S_e = (S - S_r) / (1 - S_r)$. p_w (positive in compression)는 간극수압이며, 전체 밀도(ρ)는 흙의 입자, 물 그리고 공기의 부분으로 구분할 수 있다, $\rho = \rho^s + \rho^w + \rho^a$. \mathbf{g} 는 중력가속도이며, $\tilde{\mathbf{v}}^w$ (superficial Darcy velocity of water)는 실제 물의 속도(\mathbf{v}_w)와 흙 입자 속도($\mathbf{v} = \mathbf{v}_s$)의 차이로 표현된다, $\tilde{\mathbf{v}}^w = n^w (\mathbf{v}_w - \mathbf{v})$.

유효응력에 대한 구성방정식(linear isotropic elasticity)과 불포화 물의 흐름을 파악할 수 있는 Darcy's law(Darcy velocity of water)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\boldsymbol{\sigma}' = \mathbf{c}^e : \boldsymbol{\epsilon} \quad (9)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}^w = k^w (S_e, n) (-\nabla p_w + \rho^{wR} \mathbf{g}) \quad (10)$$

여기에서 유효응력($\boldsymbol{\sigma}'$)은 기울기, $\mathbf{c}^e = \lambda \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2\mu \mathbf{I}$ ($\lambda, \mu =$ Lamé parameters)와 변위($\boldsymbol{\epsilon}$)의 관계이며, ρ^{wR} (real mass density of water)는 물의 간극비의 곱으로, $\rho^w = n^w \rho^{wR}$ 로 표현할 수 있다. 불포화 투수계수(k^w)는 포화도와 간극비의 함수로써,

$$k^w (S_e, n) = \frac{l^2}{\eta_w} \delta(n) k_{rw} (S_e), \quad \delta(n) = \frac{n^3}{(1 - n^2)} \quad (11)$$

$$k_{rw} (S_e) = \sqrt{S_e} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (12)$$

$$S_e (s) = \left[1 + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right]^{-m} \quad (13)$$

여기에서 l 는 물의 흐름에 관련된 상수이며, η_w 는 물의 점성 계수, 상대 투수계수(k_{rw})는 유효포화도의 함수이며, a, n, m

리고 m 은 함수특성곡선의 맞춤변수들이다(van Genuchten, 1980; Coussy, 2004).

3. 불포화토의 침투수 해석방법에 따른 비교

3.1 연계해석(staggered analysis)과 동시해석(monolithic analysis)의 차이

연계해석을 하는 Seep/W나 Sigma/W 프로그램에서 사용하는 유효응력 개념은 전응력의 변화에 따른 간극수압의 변화를 계산하지 못한다. 프로그램에서 전응력의 변화는 항상 유효응력의 변화와 같은 추이를 보인다. 예를 들어, Seep/W 프로그램을 사용한 후에 Sigma/W 프로그램을 사용하므로 전응력의 변화에 간극수압이 동시에 변화하면서 해석이 이루어지지 못하기 때문에 연계해석에 대한 한계를 나타낸다. 동시해석의 경우, 전응력을 계산할 때 포화도와 간극수압을 고려하여 계산하므로 유효응력은 항상 불포화 침투 변화에 따른 포화도와 부 간극수압의 크기에 따라 변화한다는 것을 알 수 있다, $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' - S_e p_w \mathbf{1}$ (positive in tension).

또 하나의 연계해석과 동시해석의 차이점으로는, 불포화 투수계수를 예측할 때 사용하는 방정식의 구성 요소들이다. 기존 사용하는 Seep/W에서 불포화 투수계수를 계산하기 위해서 실험에서 얻은 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)을 식 (14)~(16)에서와 같이, 각각 Green과 Corey(1971), van Genuchten(1980) 그리고 Fredlund 등(1994), 방정식을 이용하여 불포화 투수계수를 구한다(Geo-Slope, 2007). 이 식들에서 알 수 있듯이, 상용프로그램의 모든 불포화 투수계수는 모관흡수력(또는 함수비)의 함수이다. 즉 외부하중이나 자중으로 발생하는 흙 알갱이 변형에 의한 간극비 변화를 고려하지 못하고 있다.

$$k(\theta)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} \cdot \frac{30 T^2}{\mu g \eta} \cdot \frac{\xi^p}{n^2} \cdot \sum_{j=i}^m [(2j+1-2i)h_i^{-2}] \quad (14)$$

$$k_w = k_s \frac{[1 - (as^{(n-1)})(1 + (as^n)^{-m})]^2}{\left[\frac{m}{2} \right]} \quad (15)$$

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^{y_i}) - \Theta(s)}{e^{y_i}} \Theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=1}^N \frac{\Theta(e^{y_i}) - \Theta_s}{e^{y_i}} \Theta'(e^{y_i})} \quad (16)$$

그러나 동시해석의 경우에는 식 (11)~(13)에서 알 수 있듯이, 일반적으로 불포화 투수계수는 모관흡수력(s) 뿐만 아니라 간극비의 함수이다. 불포화 지반에서 강우 침투와 흙의 변형을 계산하면서 발생하는 간극비의 변화를 동시에 불

포화 투수계수 변화에 관여 한다는 점이다.

이러한 차이점 때문에, 실제 불포화 지반에서 강우 침투로 인한 간극수압 변화는 흙의 강도 변화를 일으키고 변형을 가져오며, 또한 흙의 응력변화로 발생하는 간극비, 투수계수 그리고 함수특성은 강우의 침투 과정을 다시 변화시키게 된다.

3.2 간극수압을 고려한 사면안정해석

국내 기준에 의한 사면안정 해석방법은 강우에 의한 영향을 지하수위 조건을 조절하여 계산하도록 되어 있다. 그러나 최근 국내의 많은 연구자들에 의해서 강우 침투를 고려한 사면안정해석의 필요성이 제안되고 있다. 일반적인 사면의 붕괴과정은 불포화상태의 지반에 강우로 인한 간극수압의 변화가 발생하고, 이로 인해 사면의 안전율이 저하되어 붕괴가 발생하는 형태이다. 그러나 국내의 설계기준으로는 각 관리기관마다 조금씩 차이는 있으나 지하수위를 지표면에 위치시키거나 지표면으로부터 일정 깊이에 위치하는 것으로 가정하여 설계하도록 하고 있다. 이러한 설계기준은 기존의 연구자료나 예측자료 등을 고려할 때 현실과 많은 차이가 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 최근의 사면안정해석방법은 지하수위조건을 고려한 해석에서 강우에 의한 침투효과를 고려한 해석으로 발전되고 있다.

강우에 의한 침투해석을 고려한 사면안정해석은 강우조건을 고려한 seepage 해석을 실시한 후 지반의 각 위치별 간극수압정보를 고려하여 한계평형해석을 실시하고 있다. 그러나 최근의 연구동향에 의하면, 강우의 침투와 지반의 응력상태는 상호 의존적이므로 시간의 함수로 주어지는 강우조건을 고려할 경우는 침투해석과 응력해석을 동시에 수행하여야 한다고 제안되고 있다. 따라서 이러한 영향을 동시에 고려하기 위한 알고리즘을 개발하여 수치해석에 이용될 수 있도록 하

는 연구가 진행 중이며, 아직까지는 지반응력과 강우침투에 의한 간극수압을 동시에 고려하는 방법(monolithic analysis)이 개발되어 있지는 않은 상태이다. 그러므로 현재로서는 이러한 현상을 모사하기 위한 접근방법으로 각 해석에 대한 결과를 공유하되, 해석시간을 세분하여 해석하는 단계적 해석(staggered analysis) 방법이 사용될 수 있다(김재홍 등, 2009). 그러나 현재 대부분의 경우, 간극수압을 고려한 사면안정해석은 강우침투에 의한 해석이 완전히 종료된 후 한계평형해석 등을 수행하고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 현재 강우조건을 고려하여 설계하는 방법중의 하나인, 침투해석이 완전히 종료된 후 응력해석을 실시하는 경우와 침투와 응력해석을 동시에 수행하는 경우의 차이를 비교하여 사면안정해석 결과의 차이를 비교하였다.

3.3 지반응력의 고려에 따른 침투해석 결과 비교

3.3.1 해석방법

강우에 의한 침투해석시 강우에 의한 지반의 응력을 고려하지 않고 순수하게 침투해석만 실시하는 경우와 지반의 응력과 간극수압을 모두 고려하는 경우에 대한 해석결과의 차이를 비교하기 위하여 그림 2와 같은 단위모델(H:1m × W:0.5m)을 구성하고 수치해석을 실시하였다. 지반응력을 고려할 때, 불포화 투수계수의 계산은 간극비와 함수비(또는 모관흡수력)를 모두 고려하는 동시해석이 이루어져야 하지만, 본 해석에서는 동시해석에 접근하기 위해 세 가지 단계해석을 수행하였으며, 그 중 하나는 해석시간 단계인 Δt 마다 Seep/W와 Sigma/W 프로그램을 연계한 해석(case 5)과 다른 하나는 각각의 프로그램을 전체시간 동안 해석한 후 다음 프로그램을 연계한 해석(지반응력을 고려하지 않은 경우 case 3; 지반응력을 고려한 경우 case 4)을 하였다. 단계

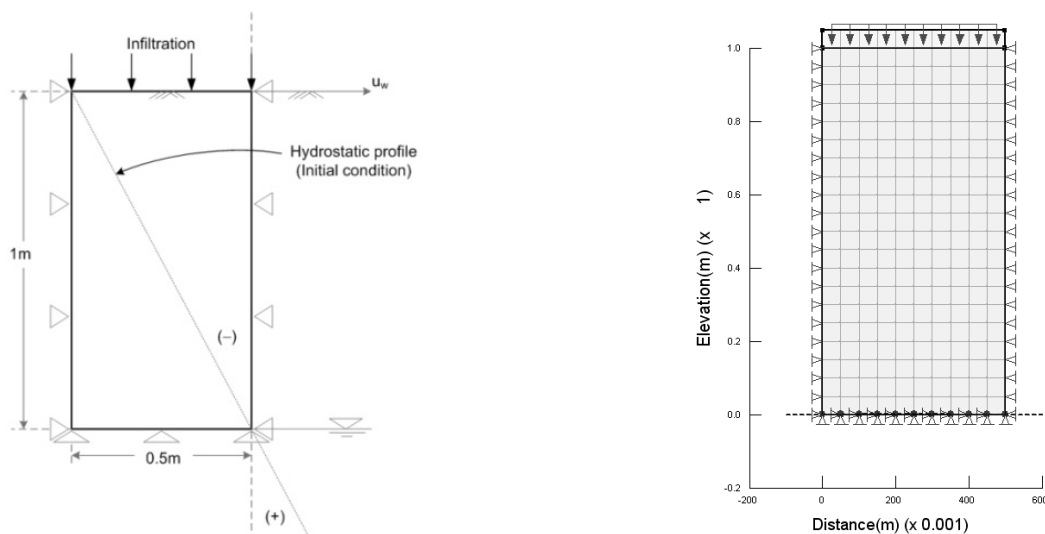


그림 2. 해석에 이용된 단위모델

해석인 Seep/W 프로그램에서 사용한 불포화 투수계수의 계산은 Fredlund(1994) 방법인 식 (16)을 이용하였다.

수치해석은 Canada Geo-Slope사의 GeoStudio 2007을 이용하였으며, 해석방법에 따른 차이를 비교하기 위하여 그림 3과 같이 5가지 경우에 대하여 각각을 해석하고 그 결과값을 비교하였다.

그림 3에서 case 1은 강우고려시 지반의 응력은 고려하지 않고 순수하게 침투해석만 한 경우이고, case 2는 강우고려시 지반의 응력을 고려하여 침투해석을 실시한 경우이다. 이때 초기 in-situ 상태를 해석하고 계산된 결과값을 고려하여 강우시 지반의 응력과 침투가 동시에 고려될 수 있도록(coupled analysis)

하였다. case 3은 case 1의 지반응력이 고려되지 않은 침투해석 결과에 in-situ 상태의 지반응력을 고려하고 외부 하중을 가한 경우이고 case 4는 case 2의 해석결과값에 더하여 외부하중을 고려한 경우이다. 그리고, case 5는 초기응력 계산 후 강우에 의한 침투와 하중 재하를 동시에 고려하여 해석한 경우이다.

각각의 단계에서 침투해석은 transient analysis를 수행하였고 해석시간은 초기응력 해석조건을 제외하고는 각각 10시간을 적용하였다. 표 1은 침투해석에 적용한 지반정수들과 Fredlund 모델의 매개변수들 (a, n, m)이다. 여기에서 θ_s 는 포화 체적함수비, θ_r 는 잔류 체적함수비이다.

표 1. 침투해석을 위한 지반특성

k_{sat} (m/s)	θ_s (m^3/m^3)	θ_r (m^3/m^3)	a (kPa)	n	m
2.78×10^{-6}	0.45	0.2	0.45	2	0.6

3.3.2 해석결과 비교

Seep/W 프로그램을 사용하여 강우 침투시 불포화 지역 (vadose zone)의 침투 특성의 초기조건을 갖추기 위해서

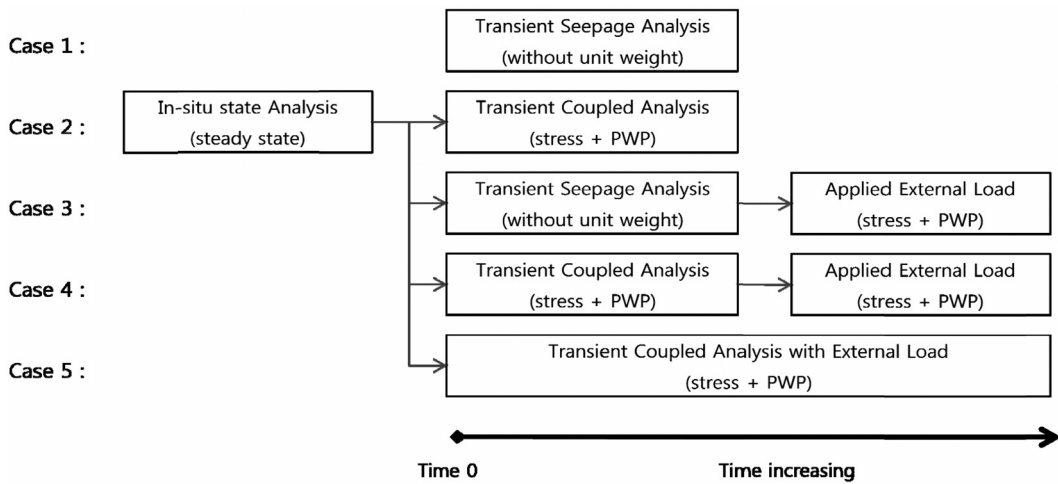
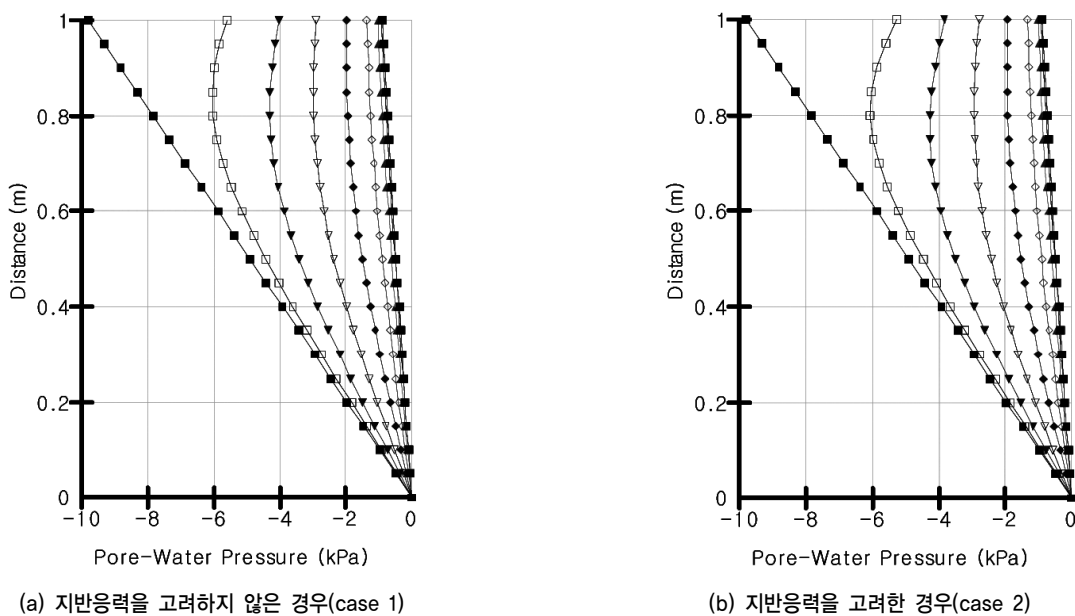


그림 3. 해석방법에 따른 차이비교를 위한 해석 조건



(a) 지반응력을 고려하지 않은 경우(case 1)

(b) 지반응력을 고려한 경우(case 2)

그림 4. 지반응력의 고려에 따른 시간별 간극수압 변화 비교

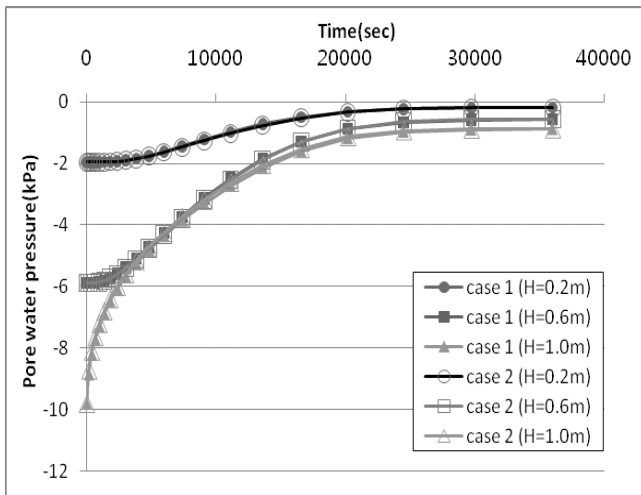
Srivastava(1991)의 결과에 맞추는 초기 작업이 필요하다. 그림 1과 같은 불포화 침투 특성을 위해 앞에서 언급한 각각의 경우에 대하여 수치해석을 수행한 결과, 지반응력을 고려하지 않고 순수하게 침투해석만 한 경우와 지반응력을 고려한 경우의 시간에 따른 간극수압은 그림 4와 같은 것으로 나타났다. 표시된 값은 총 10시간 경과시 까지의 값으로 각 1시간별로 계산된 값(맨 왼쪽 직선이 초기상태)을 나타낸 것이며 그림에서 세로축의 1.0m 지점이 상부 지표면이다.

그림 4에 의한 결과를 세부적으로 나타내기 위하여 단위모델의 하부로부터 각각 0.2m, 0.6m, 1.0m 위치에서의 시간에 따른 간극수압 변화를 나타내면 그림 5(a)와 같다. 해석 결과 동일한 위치에서 동일한 시간대의 간극수압은 지반의 변형을 고려하지 않은 경우(case 1)가 지반의 변형을 고려한

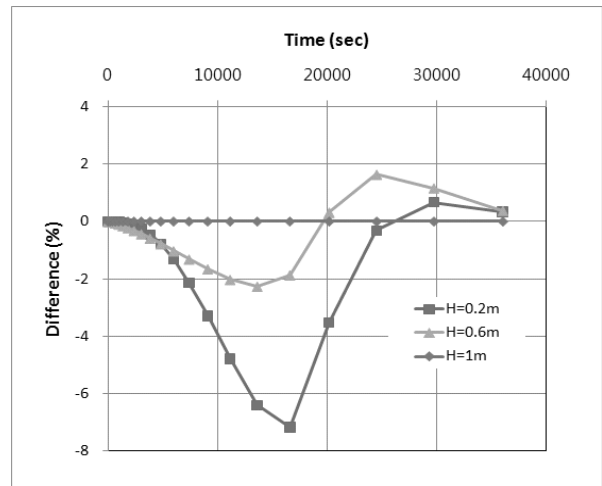
경우(case 2)에 비하여 큰 값(절대값으로 작은 값)으로 계산되었으며, 두 해석의 간극수압의 차이를 자세히 비교하기 위해서 상대비교, $(p_{w(case1)} - p_{w(case2)})/p_{w(case1)}$ 를 할 때, 지반내의 0.2m 지점에서 간극수압의 차이는 최대 7.2% 정도로 나타났다(그림 5(b)). 이것은 지반의 변형을 고려하면 물의 침투가 천천히 진행된다는 것을 나타낸다.

그림 6은 지반에 외부하중을 고려하는 경우인 case 3,4,5에 대하여 각 위치에서의 지반응력 고려유무에 따른 간극수압 변화를 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 전체 시간에 대한 변화이고 그림 6(b)는 단위모델의 하부부터 0.6m 위치의 경우 외부하중이 가해지는 시간인 36,000sec 부근의 변화를 확대해서 나타낸 것이다.

그림 6에서 외부하중을 가하는 시점에서의 최대 간극수압의 크기는 지반응력을 고려하지 않은 침투해석의 경우

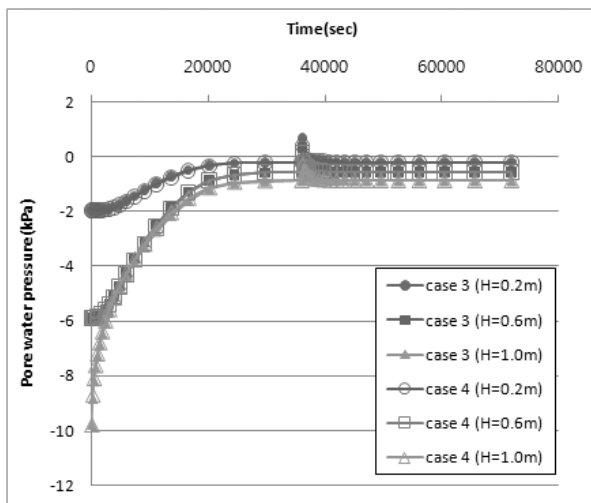


(a)

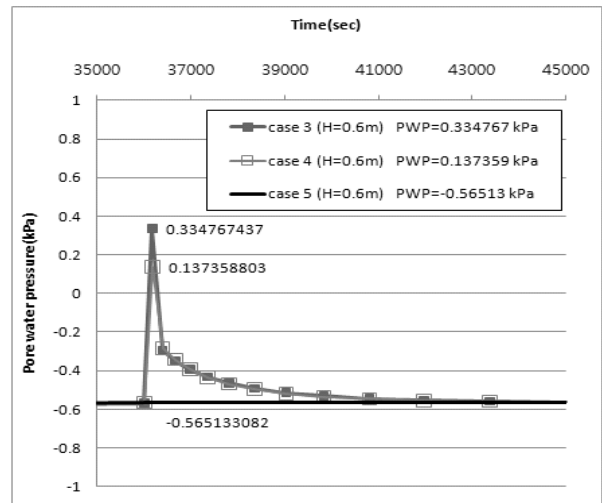


(b)

그림 5. 각 위치에서의 시간에 따른 간극수압 변화 차이



(a)



(b)

그림 6. 외부하중을 고려하는 경우 시간에 따른 위치별 간극수압 변화(case 3,4,5)

(case 3) 간극수압은 0.335kPa로 계산되고, 지반응력을 고려하여 침투해석을 한 경우(case 4)는 간극수압이 0.137kPa로 계산되어 외부하중이 가해질 경우는 간극수압의 최대값이 상당한 차이를 나타내는 것으로 해석되었다.

이러한 결과들로부터, 침투해석을 실시하고 응력해석을 수행하여 지반의 거동을 평가하는 경우, 침투해석시 지반의 응력을 고려하여 해석하는지 여부에 따라 최종 결과값이 차이가 있음을 알 수 있다.

4. 연계해석으로 인한 사면안정성 변화

본 논문에서는 강우에 의한 침투해석시 지반의 응력을 함께 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우에 대하여 단위모델을 이용하여 그 차이를 확인하였다. 이러한 해석방법의 차이를 사면안정해석에 이용하기 위하여 사면안정 해석시 지반의 간극수압을 고려하는 방법으로 강우조건에 의한 지반침투해석을 우선 실시한 후 각 위치의 간극수압정보를 고려하여 사면의 안정성을 평가하는 방법과 지반침투 해석시 지반의 응력을 함께 고려하여 간극수압을 산정한 후 그 값을 이용하여 사면의 안정성을 평가하는 방법에 대하여 비교하였다.

안정성 비교를 위해 가정된 지반조건은 사면높이 20m이고 지반의 경사는 1:2.0(V:H)로 비교적 완만하며, 응력해석(선형 탄성모델), 침투해석(Fredlund 모델) 및 사면안정해석(Mohr-Coulomb 모델)을 위한 지반물성치는 각각 지반변형계수 20,000kPa, 단위중량은 16.85kN/m³, 점착력 10kPa, 내부마찰각 25°가 적용되었으며, transient analysis를 위한 지반의 체적함수비와 투수계수는 간극수압의 함수로써, 앞의 3장에서 적용된 값을 동일하게 적용하였다. 또한 강우조건은 사면의 표면에 단위유량으로 6×10⁻⁶m/sec 값을 적용하였으며 강우지속시간은 2일간 지속되는 것으로 가정하였다.

그림 7은 사면안정해석을 위한 모델이고, 그림 8(a)와 8(b)는 각각 지반응력을 고려하지 않은 침투해석결과(case 3)와 지반응력을 고려한 침투해석결과(case 4) 지반의 압력수두분포를 나타낸 것이다.

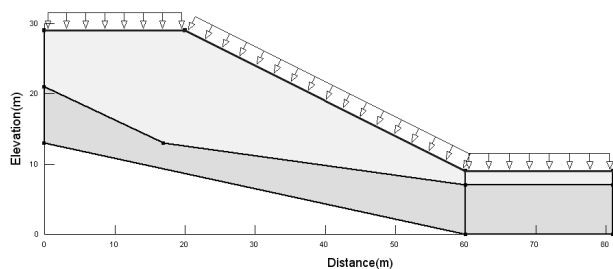
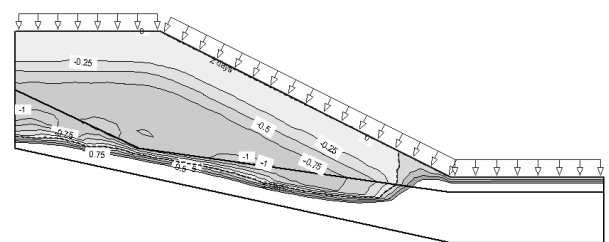


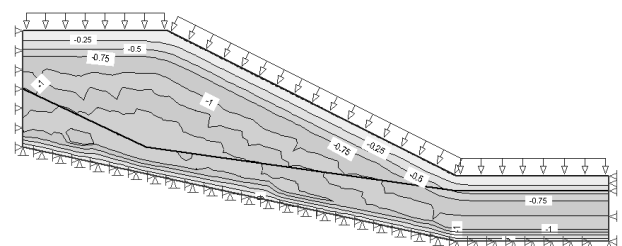
그림 7. 사면안정해석에 사용된 지반 조건

그림 8에 표시된 수치는 압력수두 분포값으로 0(zero)일 경우 포화상태를 나타내며, 음(-)의 값은 음의 불포화상태를 나타낸다. 해석결과로부터 침투해석시 지반응력을 고려하지 않는 경우는 압력수두가 0(zero) 값에 근접한 영역이 지표면으로부터 깊은 위치까지 분포하여 지반응력을 고려하여 침투해석을 한 경우에 비해 침투영역이 넓은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지반의 자중과 침투에 의해 발생하는 지반변형으로 인해 강우의 침투가 저하되기 때문이며, 이는 기존의 문헌들의 연구결과와 유사하며(Chong 등, 2000; Zhang 등 2005), 위의 결과에서 지반응력을 고려한 침투해석은 투수계수의 감소가 침투로 인해 지표면으로부터 발생하는 포화층 깊이를 얇게한다. 이 결과는 사면의 얇은 파괴의 주요원인을 제거하고 불포화된 상태를 유지하며 모관흡수력으로 인한 흙의 강도를 증가시키는 원인이 된다.

각 침투해석에 의한 결과를 이용하여 Bishop 방법에 의한 사면안정성을 검토한 결과, 침투해석시 지반응력을 고려하지 않은 경우 안전율은 1.367, 지반응력을 고려한 경우는 1.378로 계산되어 지반응력을 고려한 경우가 안전한 것으로 계산되었다. 이러한 안전율의 차이는 사면안정 해석시 지하수위를 고려하는 경우와의 차이에 비하여 크지는 않으나, 사면의 규모나 강우조건 및 지반조건에 따라 안전율의 차이는 다양하게 나타날 수 있으며, 인장력에 의한 거동보다는 압축성 거동이 대부분인 흙의 특성을 고려한다면 지반 응력의 변형은 간극률의 변화를 가져오며 지반내의 침투흐름에 방해요인으로써, 흙의 종류나 외부하중의 크기에 따라 비교적 뚜렷한 안정성의 차이를 나타낸다(Zhang 등, 2005; 김재홍 등 2009).



(a) 침투해석시 지반응력을 고려하지 않은 경우



(b) 침투해석시 지반응력을 고려한 경우

그림 8. 침투해석시 지반응력의 고려에 따른 압력수두 분포 차이

또한 이러한 차이로부터 지반응력과 강우침투를 동시에 고려할 수 있는 알고리즘 및 해석방법이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

불포화 지반에 물이 침투할 경우, 물이 침투함에 따라 지반의 변형이 발생하며 지반의 변형은 물의 침투를 억제하게 되어 전체적인 흐름조건이나 변형상태가 달라지게 된다. 이러한 현상을 해석하기 위해 여러가지 접근방법이 시도되고 있으나 응력과 침투를 동시에 고려하는 동시해석방법은 아직까지 개발되어 있지 않은 상태이다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 프로그램을 이용하여 현재 일반적으로 이용하고 있는 해석방법에 의한 결과와 동시해석방법에 근접한 알고리즘으로 접근한 해석결과와의 차이를 비교하고자 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 불포화 지반에의 강우침투시 지반의 거동은 물의 침투와 동시에 발생하며 이로 인해 침투 정도가 저하되게 된다. 이러한 실제거동을 해석할 수 있는 동시해석 알고리즘은 기본적인 모델에 한해 이론적 해는 발표되었으나, 이를 실제 거동해석에 적용할 수 있는 알고리즘은 아직까지 개발되어 있지 않다. 따라서 동시해석방법을 근사적으로 모사할 수 있는 단계해석방법을 이용하여 물의 침투시 지반의 변형을 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 차이를 비교하였다.
- (2) 단위모델을 구성하여 침투해석시 지반의 변형을 고려하지 않는 경우와 고려하는 경우의 간극수압변화정도를 해석한 결과, 지반의 변형을 고려하지 않는 경우가 좀 더 작게(큰 절대 값) 계산되었다. 이러한 결과는 지반의 변형에 의해 물의 침투가 억제된다는 기존의 이론과도 잘 일치한다.
- (3) 사면안정 해석시 지반의 응력을 고려하지 않은 순수침투해석을 실시한 후 사면안정해석을 수행한 경우와, 지반응력을 고려한 침투해석을 실시한 후 사면안정해석을 수행한 경우를 비교하였다. 각 해석방법에 따라 지반의 간극수압분포가 차이가 발생하며 지반응력을 고려하지 않는 경우가 지반응력을 고려한 경우보다 깊은 침투영역이 계산되었다.
- (4) 침투해석 결과를 이용하여 Bishop 방법에 의한 안정성을 계산한 결과, 지반변형을 고려하지 않은 경우의 안전율이 1.367, 지반응력을 고려한 경우의 안전율은 1.378로 지반의 변형을 고려한 경우가 안전한 것으로 계산되었으며, 지반의 변형은 물의 침투를 억제하여 안정성을

증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

- (5) 안전율의 차이는 강우나 지반조건에 따라서 달라질 수 있으나, 해석방법의 차이에 따라 안전성이 달라지므로, 불포화 지반의 안정해석시 지반변형을 고려하여 계산할 필요가 있음을 알 수 있으며, 특히 이러한 경향으로부터 지반의 변형과 침투를 동시에 고려하는 방법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 상지대학교 2007년 교내 연구비에 의해 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김윤기, 최정찬, 이승래, 성주현(2009), 강우로 인한 사면의 불안정성에 대한 신뢰성 있는 평가, *한국지반공학회 논문집*, Vol. 25, No. 5, pp. 53~64.
2. 김재홍, 황영철(2009), 강우를 고려한 사면 안정성 해석방법의 비교, *2009년 학술발표회 논문집*, 한국지반환경공학회, pp. 448~452.
3. Borja, R.(2004), Cam-Clay Plasticity. Part V: A Mathematical Framework for Three-phase Deformation and Strain Localization Analyses of Partially Saturated Porous Media, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 193, pp. 5301~5338.
4. Ching, R.K.H., Sweeney, J. and Fredlund, D.G.(1984), Increase in Factor of Safety due to Soil Suction for Two Hong Kong Slopes, *Proceeding 4th International Symposium Landslides*, Canada, pp. 617~623.
5. Chong, P.C., Phoon, K.K. and Tan, T.S.(2000), Probabilistic Analysis of Unsaturated Residual Soil Slopes, *Proceedings of the ICASP 8 Conference*, Sydney/New South Wales, Australia 1999, Applications of Statistics and Probability by Melchers & Stewart, Balkema, Rotterdam, pp. 375~382.
6. Coussy, O.(2004), *Poromechanics*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, pp. 45~49, 168~170.
7. Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S.(1994), Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soil Using the Soil-Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 533~546.
8. Gardner, W.R.(1958), Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table, *Soil Science*, Vol. 85, pp. 228~232.
9. GEO-SLOPE(2007), *User's Guide SEEP/W*, 4th Edition, International Ltd., Calgary, Canada, pp. 96~101.
10. Green, R.E. and Corey, J.C.(1971), Calculation of Hydraulic Conductivity: A Further Evaluation of Some Predictive Methods, *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol. 35, No. 1, pp. 3~8.
11. Kim, J., Jeong, S., Park, S. and Sharma, J.(2004), Influence

- of Rainfall-Induced Wetting on the Stability of Slopes in Weathered Soils, *Engineering Geology*, Vol. 75, No. 3~4, pp. 251~262.
12. Ng, C.W.W. and Shi, Q.(1997), A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage, *Computers and Geotechnics*, Vol. 22, No. 1, pp. 1~28.
 13. Rahardjo, H and Leong, E.C.(1997), *Soil-Water Characteristic Curves and Flux Boundary Problems, Unsaturated Soil Engineering, Practice-Geotechnical Special Publication*, Vol. 68, pp. 88~112.
 14. Rahardjo, H., Lim, T.T., Chang, M.F. and Fredlund, D.G.(1995), Shear Strength Characteristics of a Residual Soil, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, No. 1, pp. 60~77.
 15. Srivastava, R. and Yeh, T.C.J.(1991), Analytical Solutions for One-Dimensional, Transient Infiltration toward the Water Table in Homogeneous and Layered Soils, *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 753~762.
 16. van Genuchten, M.(1980), Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892~898.
 17. Zhang, L.L., Zhang, L.M. and Tang, W.H.(2005), Rainfall-Induced Slope Failure Considering Variability of Soil Properties, *Geotechnique*, Vol. 55, No. 2, pp. 183~188.

(접수일: 2009. 12. 18 심사일: 2010. 1. 14 심사완료일: 2010. 3. 22)