



강우 침투에 의한 지반거동을 해석할 때, 동시해석(monolithically coupled analysis)과 단계해석(staggered coupled analysis)은 어떠한 차이가 있습니까?



김재홍

Univ. of Colorado at Boulder, 토목공학과 박사수로
jaehong@colorado.edu

1. 개요

일반적으로 강우 침투에 의한 지반거동에 대한 연구는 불포화토를 대상으로 침투수에 의한 흙의 응력-변형률 관계를 비교한다. 기존의 지반공학적 개념에서 해석대상은 포화토를 기본으로 해석이 이루어져 왔다. 최근 기후 변화에 의한 자연재해가 증가하면서 그에 따른 연구의 중심이 실제 지반 상태를 대상으로, 불포화토의 거동에 관심을 갖게 되었으며, 점점 그 필요성이 인식되기 시작하면서 여러 연구결과들이 나오고, 실무자들을 위한 상용프로그램 역시 불포화토 해석에 관심을 갖기 시작했다. 흙의 알갱이와 간극수압만으로 계산되어진 토질역학 개념에서 공기라는 또 다른 요소를 도입하면서 모관흡수력(matric suction)이라는 새로운 응력변수가 포함되어 불포화토의 이론적인 접근이 복잡해지면서, 실무적용을 위해 쉽게 적용하는 방법으로, 상용프로그램(예를 들어, Geo-Slope, SoilVision, Plaxis)을 숙지하는 것이 가장 좋은 접근 방법이 되었다.

여러 연구자들에 의해 계속적인 연구결과들이 발표되고 있지만, 이론적인 접근이 다양하고 수치해석적인 문제점들의 발생을 해결해야 하기 때문에 아직까지는 강우 침

투에 의한 불포화토 거동 해석은 상용프로그램들이 사용하는 단계적인 해석(staggered coupled analysis)으로 이루어지고 있다. 단계적인 해석은 시간에 따라 변형되지 않는 지반조건에서 침투해석을 먼저 수행하고, 침투해석에서 얻어진 지반 내의 간극수압 결과들을 이용해 응력-변형률 관계를 해석하여 지반의 거동을 알아내는 방법이다. 다른 방법으로 동시해석(monolithically coupled analysis)은 침투수나 외부 하중에 의해 발생하는 간극수압 또는 흙 알갱이의 변형을 단위시간(time step) 내에서 동시에 해석하는 방법이다. 이러한 동시해석 방법은 강우 침투시 현장에서 실제로 이루어지는 현상이기도 하다. 두 가지 해석 방법에 대한 결과 역시 분명한 차이점이 있을 것이다. 그렇지만 현장 실험이나 실내실험에서 얻어진 결과를 비교할 수치해석적인 개념은 아직 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

2. 불포화 투수계수의 함수

침투수에 의한 물의 흐름은 흙 알갱이의 변형을 발생시키며, 침투수에 의한 간극수압의 변화는 흙의 응력을 변

화시킨다. 마찬가지로, 외부하중이나 자중으로 인한 흙의 응력 변화는 물의 흐름을 방해하여 간극률, 투수계수나 함수비의 변화로 물 흐름의 변화를 유발한다. 따라서, 동시해석(monolithically coupled analysis)은 서로 상관된 부분을 충족시키기 위해서 불포화 투수계수의 함수 역시 함수비(또는 포화도)와 간극률의 함수로 이루어져야 한다. 이러한 특성을 고려하기 위해서는 Darcy's law를 이용하여 불포화 투수계수는 다음과 같이 표현할 수 있다 (Coussy, 2004).

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

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

여기에서 S 는 포화도, n 은 간극률, l 은 물의 흐름에 관련된 상수, η_w 는 물의 점성계수, K_w 는 불포화 상대투수계수이며 m 은 함수특성곡선 상수이다. 불포화 상대투수계수는 포화도의 함수이면 포화도는 모관흡수력의 함수로 표현할 수 있다.

그러나 상용프로그램에서 이용하는 불포화 투수계수의 함수는 단지 포화도의 함수로 이루어져있다. 고정된 지반 조건에서 침투해석이 이루어지기 때문에 간극률의 변화에 따른 불포화 투수계수 변화를 표현할 수 없는 단점을 가지고 있다. 대부분 상용프로그램에서 사용하는 수식으로 van Genuchten(1980)과 Fredlund and Xing(1994)이 제안한 불포화 투수계수는 다음과 같다.

$$k^w = K_s \frac{[1 - (as)^{n-1} (1 + (as)^n)^{-m}]^2}{[1 + (as)^n]^{m/2}} \quad (3)$$

$$k^w = K_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^{y_i}) - \Theta(s)}{e^{y_i}} \Theta'(e^{y_i})}{\sum_{i=j}^N \frac{\Theta(e^{y_i}) - \Theta_s}{e^{y_i}} \Theta'(e^{y_i})} \quad (4)$$

여기에서 K_s 는 포화투수계수, a, n, m 은 함수특성곡선 상수, s 는 모관흡수력, Θ 는 체적함수비, e 는 자연지수(2.718), 그리고 y 는 부간극수압의 나타내는 적분변수, 그리고 i, j, N 는 적분 지수들이다. 포화도(S)와 체적함수비(Θ)는 모관흡수력(s)의 함수이므로 위의 불포화 투수계수 식들은 모두 함수특성곡선에 의해 변화될 뿐 흙 응력에 의한 간극률 변화와는 관계가 없다.

그림 1은 단계해석과 동시해석의 차이를 알아보기 위해 유효요소해석을 수행하여 비교한 결과이다. 하루 동안의 불포화 압밀시험을 수행하여 앞에서 언급한 불포화 투수계수를 적용한 것이다. 단계해석으로는 Geo-Slope 프로그램(Geo-Slope, 2007)을 이용하여 van Genuchten 수식을 이용하였고, 동시해석은 수식 (1)과 (2)를 적용한 동시해석 프로그램이다(Kim, 2010). 그림 1에서 왼쪽 두 개의 그림은 지하수위 상부의 초기 모관흡수력 조건과 지표면에서 침투수와 응력을 동시에 작용하며, 양쪽 측면은 불포화 투수층으로 경계조건을 보여준다.

침투수를 고려한 지반응력 해석을 위해 수치해석을 수행할 때, 단계해석은 주어진 지반에서 단위시간 동안 물의 침투가 이루어지고, 이에 간극수압이 계산되어진 조건에서 응력을 가하게 된다면, 과잉간극수압의 발생은 침투수와 응력을 동시에 수행하는 동시해석에 비해 훨씬 크게 발생한다(그림 1의 맨 오른쪽 그래프: low node=13, mid node=7, top node=1). 즉, 단계해석의 결과는 동시해석의 결과보다 포화도가 높아져 모관흡수력의 감소로 인해 흙의 유효응력이 작아지는 차이점을 발생할 수 있다. 이에 따른 차이는 초기조건이나 흙의 물성에 따라 사면의 안정성이나 기초지반의 강도 차이를 크게 변화시킬 수 있다.

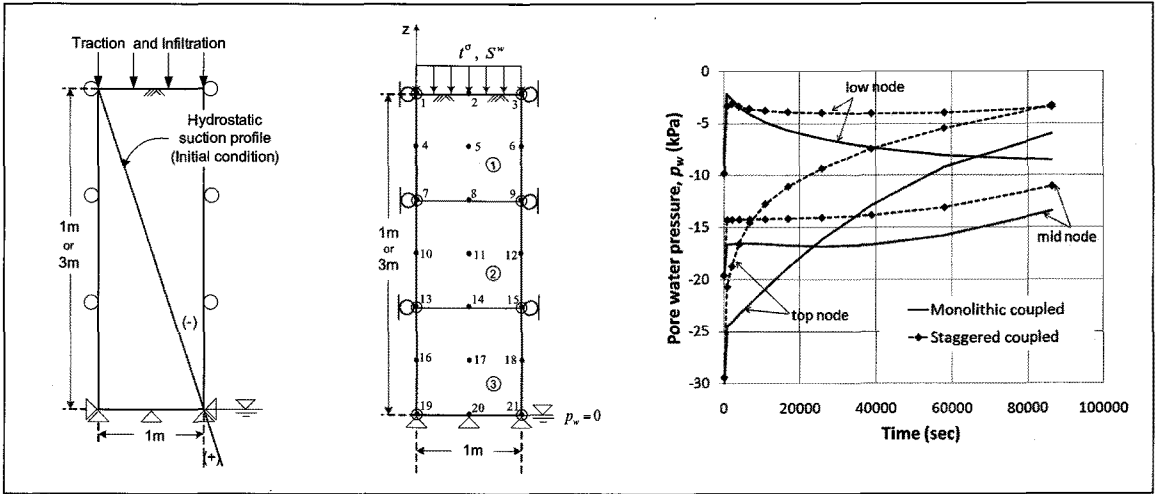


그림 1. 수치해석을 위한 초기조건과 mesh, 그리고 node 1, 7, 13에서의 간극수압의 비교

[참고문헌]

1. Coussy, O. (2004). Poromechanics. John Wiley & Sons.
2. GEO-SLOPE. (2007). Version 7.13. User's guide, International Ltd., Calgary, Canada
3. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994). "Equations for the soil-water characteristic curve." Canadian Geotechnical Journal, 31, 521-532.
4. Kim, J. (2010). "Plasticity modeling and coupled finite element analysis for partially-saturated soils" Ph.D thesis, University of Colorado at Boulder.
5. van Genuchten, M. (1980). "Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils." Soil Science Society of America Journal 44(5), 892-898.