

사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수 영향의 완전 연동된 수리지질역학적 수치 해석

A Fully Coupled Hydrogeomechanical Numerical Analysis of Rainfall Impacts on Groundwater Flow in Slopes and Slope Stability

김 준 모* Kim, Jun-Mo

Abstract

A hydrogeomechanical numerical model is presented to evaluate rainfall impacts on groundwater flow in slopes and slope stability. This numerical model is developed based on the fully coupled poroelastic governing equations for groundwater flow in deforming variably saturated geologic media and the Galerkin finite element method. A series of numerical experiments using the model developed are then applied to an unsaturated slope under various rainfall rates. The numerical simulation results show that the overall hydromechanical slope stability deteriorates, and the potential failure may initiate from the slope toe and propagate toward the slope crest as the rainfall rate increases. From the viewpoint of hydrogeology, the pressure head and hence the total hydraulic head increase as the rainfall rate increases. As a result, the groundwater table rises, the unsaturated zone reduces, the seepage face expands from the slope toe toward the slope crest, and the groundwater flow velocity increases along the seepage face. From the viewpoint of geomechanics, the horizontal displacement increases, and the vertical displacement decreases toward the slope toe as the rainfall rate increases. This may result from the buoyancy effect associated with the groundwater table rise as the rainfall rate increases. As a result, the overall deformation intensifies toward the slope toe, and the unstable zone, in which the factor of safety against shear failure is less than 1, becomes thicker near the slope toe and propagates from the slope toe toward the slope crest. The numerical simulation results also suggest that the potential tension failure is likely to occur within the slope between the potential shear failure surface and the ground surface.

요 지

사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수의 영향을 평가하기 위하여 수리지질역학적 수치 모델이 제시되었다. 이 수치 모델은 변형성 지질매체 내에서의 포화-불포화 지하수 유동을 설명하는 완전 연동된 간극탄성론적 지배 방정식들과 Galerkin 유한요소법에 근거하여 개발되었다. 이렇게 개발된 완전 연동된 수리지질역학적 수치 모델은 다양한 강수량 조건 하에 있는 불포화 사면에 대한 일련의 수치모의실험에 적용되었다. 이러한 수치모의실험 결과들은 강수량이 증가할수록 사면의 전반적인 수리지질학적 안정성이 저하되며 잠재적인 파괴가 사면 전단부에서부터 시작되어 사면 정상부 쪽으로 팽창됨을 보여주고 있다. 강수량이 증가함에 따라 수리지질학적으로는 압력수두와 전체 수리수두가 증가한다. 그 결과 지하수면이 상승하고 불포화대가 감소하며 삼출면이 사면 전단부로부터 사면 정상부 쪽으로 팽창하고 이러한 삼출면에서의 지하수 유동 속도도 증가하게 된다. 한편 강수량이 증가함에 따라 지질역학적으로는 사면 전단부를 향해 수평 변위는 증가하지만 수직 변위는 감소하게 된다. 이는 강수량 증가에 따른 지하수면의 상승에 수반하는 부력에 기인하는 것으로 해석된다. 그 결과 사면의 전반적인 변형이 사면 전단부를 향해 심화되고

* 정회원, 서울대학교 자연과학대학 지구환경과학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National Univ., junmokim@snu.ac.kr)

전단파괴 안전율이 1 이하인 불안정한 지역이 사면 전단부에서 두꺼워지면서 사면 전단부에서부터 사면 정상부 쪽으로 팽창하게 된다. 또한 수치모의실험 결과들은 이러한 잠재적인 전단파괴면과 지표면 사이의 지반에서는 잠재적인 인장파괴가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

Keywords : Fully coupled finite element model, Groundwater flow, Hydromechanical interaction, Poroelasticity theory, Rainfall, Slope stability, Unsaturated slope

1. 서론

인구증가에 따른 국토 개발과 사회 기반 시설의 확충은 우리 지구 환경에 여러 가지 악영향을 끼치고 있다. 그 중 하나가 사면의 증가와 그 붕괴 재해에 따른 인명 및 재산상의 피해이다. 특히 평소에는 안정했던 사면이 집중 호우 기간이나 그 직후에 불안정해지거나 붕괴되는 사례가 전 세계적으로 매년 수없이 관찰·보고되고 있는 실정이다. 이 중에는 그 인명 및 재산상의 피해가 너무 막대해 국내 또는 국제 뉴스 기사의 헤드라인을 장식하는 경우도 있다. 우리나라에서도 매년 7~8월의 장마철이나 그 외 집중 호우기만 되면 산사태나 사면붕괴로 인한 크고 작은 사고들을 대중 매체로부터 어렵지 않게 접할 수 있다.

이와 같은 강수에 기인한 사면의 붕괴(rainfall-induced slope failure)는 전 세계적으로 지대한 사회적 우려와 과학적 관심을 동시에 받아 왔다. 그 이유는 그 피해의 심각성과 함께 그 기작의 특이함에 있다. 집중 강수는 본질적으로 사면 내의 지하수 유동 영역(groundwater flow field)과 지질매체 변형 영역(geologic medium deformation field) 사이에 일련의 수리역학적 상호작용(hydromechanical interaction)을 유발시키게 된다. 즉 집중 강우(intensive rainfall)에 의한 침투량(infiltration rate)의 증가는 사면 내의 간극수압(pore water pressure) 또는 압력수두(pressure head)의 증가와 지하수면(water table)의 상승을 야기 시키고, 이는 유효응력(effective stress), 전단강도(shear strength) 및 인장강도(tensile strength)의 감소, 지하수 삼출면(groundwater seepage face)의 확대 및 지하수 유동 속도(Darcy velocity)의 증가를 초래한다. 그 결과 사면이 불안정해질 뿐만 아니라 심하면 사면 붕괴까지 발생하게 되는 것이다(Figure 1).

따라서 이와 같은 강수에 기인한 사면의 붕괴 현상은 지하수 유동을 고려하지 않는 기존의 재래식 역학적 변형 이론보다는 지하수 유동도 함께 동시에 고려하는 수

리역학적 연동 이론(hydromechanical coupling theory) 혹은 간극탄성이론(poroelasticity theory)에 의해 더 잘 설명되어질 수 있다. Biot(1941)의 선구자적인 연구 이후 이러한 수리역학적 간극탄성이론은 완전 포화되어 있는 지질매체는 물론 불포화 또는 부분 포화되어 있는 지질매체 내에서 발생하는 다양한 형태의 수리지질학적, 지질공학 및 지반공학 문제들의 해결에 널리 사용되어 오고 있다(Safai and Pinder, 1979; Noorishad *et al.*, 1982; Lewis and Schrefler, 1987; Alonso *et al.*, 1990; Schrefler and Zhan, 1993; Hsi *et al.*, 1994; Meroi *et al.*, 1995; Kim, 1996; Yeh *et al.*, 1996; Kim and Parizek, 1997; Kim *et al.*, 1997; Lewis and Schrefler, 1998; Kim

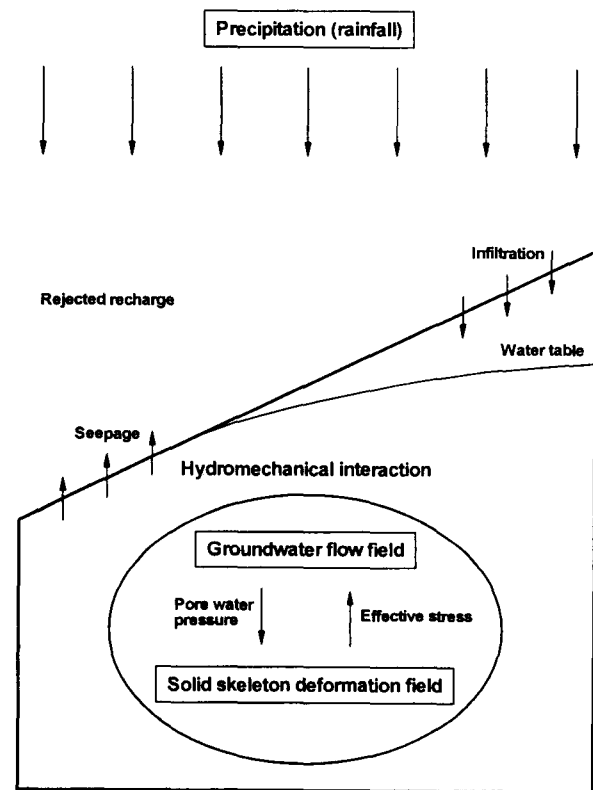


Fig. 1. Fully coupled hydromechanical interaction mechanism between groundwater flow field and solid skeleton deformation field within the unsaturated slope under rainfall

and Parizek, 1999a; Kim and Parizek, 1999b; Kim, 2000a; Kim, 2000b). 이에 부응하여 최근에는 완전 포화 된 사면의 안정성 평가에도 이 이론이 적용되어 왔다 (Iverson and Reid, 1992; Reid and Iverson, 1992; Reid, 1994; Reid, 1997). 그러나 사면이 항상 완전히 포화되어 있다는 그들의 가정은 현실성을 무시한 비합리적인 가정이다. 왜냐하면 강수량에 따라 사면 내의 불포화대 (unsaturated zone)의 크기가 변하게 되고, 그 결과 지하수면과 삼출면의 위치와 크기도 변하기 때문이다. 따라서 사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수의 영향을 보다 합리적이고 현실적으로 평가하기 위해서는 지금까지 밝혀진 요인들 외에 강수-침투-삼출 현상(rainfall-infiltration-seepage phenomenon)과 불포화대의 존재도 함께 고려할 수 있는 보다 실제적이고 일반화된 새로운 수리지질역학적 연동 이론이 요구된다.

한편 사면의 안정성에 대한 강수량이 아닌 침투량의 영향을 평가하기 위하여 먼저 재래식 유한요소법이나 유한차분법을 이용해 지하수 유동(간극수압 분포)만을 해석하고, 그 다음에 간극수압 분포와 한계평형법(limit equilibrium method)을 이용해서 사면의 안전율을 구하는 연구들(Cai *et al.*, 1998; Ng and Shi, 1998; Fourie *et al.*, 1999)이 이루어져 왔다. 그러나 그러한 비연동식 2 단계 접근방식(uncoupled two-step approach)은 상기한 지하수 유동 영역과 지질매체 변형 영역간에 필연적으로 발생하는 완전 연동된 수리역학적 상호작용을 실제로는 무시했기 때문에 정확하지 못하다. 또한 이들의 연구는 강수가 아닌 침투만을 고려하였기 때문에 강수-침투-삼출 현상을 고려하지 못한 문제점도 가지고 있다.

본 연구의 목적은 강수량(rainfall rate)에 따른 불포화 또는 부분 포화 사면에서의 강수-침투-삼출 현상, 지하수 유동 및 사면의 안정성 변화를 정량적으로 해석하고 예측하는 것이다. 이를 위하여 먼저 변형성 지질매체 내에서의 포화-불포화 지하수 유동을 설명할 일련의 완전 연동된 간극탄성론적 지배 방정식을 유도하였다. 다음에는 유한요소법을 이용하여 수리역학적 지배 방정식으로부터 하나의 완전 연동된 수리지질역학적 수치 모델을 개발하였다. 그리고 마지막으로 개발된 완전 연동된 수리지질역학적 수치 모델을 다양한 강수량 조건 하에 있는 하나의 불포화 사면에 대한 일련의 수치모의실험에 적용하였다.

본 연구의 결과는 사면과 수반된 각종 토목공사로 인한 문제점 및 부작용(adverse effect)을 예측하고 방지하

는데 유용하고 효율적인 지침으로 활용될 수 있기 때문에 본 연구의 수행은 수리지질학적 및 지반공학적 측면에서 매우 중요하다.

2. 지배 방정식

변형성 포화-불포화 지질매체 내에서의 지하수 유동을 지배하는 간극탄성론적 지배 방정식들은 다음과 같다(Safai and Pinder, 1979; Lewis and Schrefler, 1987; Kim, 1996; Kim and Parizek, 1997; Kim *et al.*, 1997; Lewis and Schrefler, 1998; Kim and Parizek, 1999a; Kim and Parizek, 1999b; Kim, 2000a; Kim, 2000b).

$$\nabla \cdot [-\mathbf{K} \cdot \nabla(h+z)] + \left(n \frac{dS_w}{dh} + nS_w \beta_w \gamma_w \right) \frac{\partial h}{\partial t} + \alpha_c S_w \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) = a_w \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[G \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} - (\alpha_c S_w \gamma_w h) \delta_{ij} \right] + [nS_w \rho_w + (1-n)\rho_s] g_i = 0 \quad i, j = x, y, z \quad (2)$$

식 (1)에서, $\mathbf{K}=K_r \mathbf{K}_{sat}$ 는 유효수리전도도 텐서(effective hydraulic conductivity tensor), $h=P/\gamma_w$ 는 압력수두(pressure head), z 는 수직 축이자 고도수두(elevation head), n 은 간극률(porosity), S_w 는 수분포화도(degree of water saturation) ($0 \leq S_w \leq 1$), β_w 는 물의 압축계수(compressibility of water) ($4.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$), $\gamma_w = \rho_w g$ 는 물의 단위중량(unit weight of water) ($9.806 \times 10^3 \text{ N/m}^3$), $\alpha_c = 1 - K/K_s$ 은 수리역학적 연동계수(hydrromechanical coupling coefficient) 또는 유효응력계수(effective stress coefficient) ($0 \leq \alpha_c \leq 1$), u_k 는 k 방향으로의 고체 변위(solid displacement), a_w 는 물의 생성 또는 소멸 항(water source or sink term) (생성일 때 양수)이고, t 는 시간(time)이다. 여기에서 K_r 은 상대수리전도도(relative hydraulic conductivity) ($0 \leq K_r \leq 1$), \mathbf{K}_{sat} 는 포화수리전도도 텐서(saturated hydraulic conductivity tensor), P 는 간극수압(pore water pressure) (압축일 때 양수), ρ_w 는 물의 밀도(water density), g 는 중력가속도 상수(gravitational acceleration constant), K 는 고체골격(지질매체)의 체적 변형계수(solid skeleton bulk modulus)이고, K_s 는 고체의 체적변형계수(solid bulk modulus)이다. 또한 $\phi = h + z$ 는 전체수리수두(total hydraulic head), dS_w/dh 는 비포화도 용량(specific water saturation capacity), $\theta_w = nS_w$ 는 수

분함량(water content)이고, $\epsilon_v = \partial u_k / \partial x_k$ 는 체적변형률(volumetric strain)이다. 한편 $\mathbf{q}_v = -\mathbf{K} \cdot \nabla(h+z)$ 는 지하수 유동 속도(Darcy velocity)이고, $\nabla(h+z)$ 는 동수구배(hydraulic gradient)이다.

식 (2)에서, $G = \mu = E/2(1+\nu)$, $\lambda = E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$, G 는 전단계수(modulus of rigidity or shear modulus), E 는 탄성계수(modulus of elasticity or Young's modulus)이고, ν 는 포아송비(Poisson's ratio)이다. 상수 λ 와 ν 는 종종 Lamé의 상수라고 불리기도 한다. 여기에서 δ_{ij} 는 Kronecker의 delta, ρ_s 는 고체의 밀도(solid density)이고, g_i 는 i 방향으로의 중력가속도(gravitational acceleration) 성분이다. 식 (2)의 왼쪽의 첫 번째 사각 괄호 안에서 처음 두 항의 합은 변형을 유발시키는 유효응력 텐서(deformation-producing effective stress tensor) σ'_{ij} (팽창일 때 양수) 이고, 세 항 모두의 합은 전체응력 텐서(total stress tensor) σ_{ij} (팽창일 때 양수) 이다. 따라서 식 (2)의 왼쪽의 첫 번째 사각 괄호 항은 불포화 지질매체에 대한 변형된 유효응력 개념식(modified effective stress concept equation)인 $\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} - (\alpha_c S_w \gamma_w h) \delta_{ij}$ 이 된다. 식 (2)의 왼쪽의 남은 항은 i 방향으로의 자체 하중력(body force) 성분 f_i 를 나타낸다.

식 (1)과 식 (2)에서 압력수두 h 가 음수이거나 또는 공기유입 압력수두(air-entry pressure head)보다 작은 불포화 조건에서는 수분포화도 S_w 와 상대수리전도도 K_r 은 압력수두 h 에 의존하여 변하며 1 이하의 양수 값을 가지게 된다. 지질매체 내에서의 이 관계를 고려하기 위해 다양한 수학적 모델들(예, Brooks and Corey, 1964; van Genuchten, 1980)이 실험과 이론에 근거하여 개발되어 왔다. 또한 불포화 조건에서의 수분포화도의 변화는 식 (1)과 식 (2)에 보다는피 지하수 유동 영역과 지질매체 변형 영역사이의 수리역학적 결합 정도(degree of hydromechanical coupling)를 좌우하게 된다.

요약하면, 식 (1)과 식 (2)는 Cartesian 좌표계 (x, y, z) 상에서 네 개의 종속변수 h, u_x, u_y, u_z 를 가지는 네 개의 비선형 편미분 방정식의 집합을 나타낸다. 따라서 불포화 지질매체 내에서의 지하수 유동 영역과 지질매체 변형 영역간의 완전 연동을 성취하기 위해서는 이들 네 개의 지배 방정식을 네 개의 종속변수에 대해 동시에 풀어야 한다.

3. 수치 모델

식 (1)과 식 (2)를 수치학적으로 근사하고 두 식을 함께 동시에 만족하는 네 개의 종속변수 h, u_x, u_y, u_z 의 값을 구하기 위하여 복잡한 형태의 경계를 가지는 포화-불포화 불균질 및 비등방성의 영역을 적절하게 이산화 할 수 있는 Galerkin 유한요소법(finite element method) (Lewis and Schrefler, 1987; Istok, 1989; Lewis and Schrefler, 1998)을 이용하였다. 유한요소법에서 압력수두와 고체 변위를 나타내는 미지변수 ϕ 는 그것들의 절점 값과 기저 또는 형태 함수(basis or shape function)를 이용해 다음과 같이 하나의 시도해(trial solution) ϕ' 로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(x, y, z, t) &\approx \phi'(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^{MN} N_j(x, y, z, t) \phi_j(t) \\ \phi &= h, u_x, u_y, u_z \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 N_j 는 절점(node) J 에서의 기저 함수 값, ϕ_j 는 절점 J 에서의 종속변수 값이고, MN 은 영역의 이산화(discretization)에 쓰인 전체 절점의 개수이다. Galerkin의 원칙과 Green의 정리 그리고 식 (3)을 적용하면 식 (1)과 식 (2)는 각각 다음과 같은 행렬 방정식으로 변환된다.

$$\begin{aligned} &\int_R \nabla N_I \cdot \mathbf{K} \cdot \nabla N_J dR (h) + \int_R N_I \left(n \frac{dS_w}{dh} + n S_w \beta_w \gamma_w \right) N_J dR \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} \\ &+ \int_R N_I \alpha_c S_w \frac{\partial N_J}{\partial x_k} dR \left\{ \frac{\partial u_k}{\partial t} \right\} = \int_B N_I \mathbf{n} \cdot [\mathbf{K} \cdot \nabla(h+z)] dB \\ &+ \int_R N_I q_w dR - \int_R \nabla N_I \cdot \mathbf{K} \cdot \nabla z dR \quad I, J=1, 2, 3, \dots, MN \quad (4) \\ &\int_R \frac{\partial N_I}{\partial x_j} G \frac{\partial N_J}{\partial x_j} dR \{u_j\} + \int_R \frac{\partial N_I}{\partial x_i} G \frac{\partial N_J}{\partial x_i} dR \{u_i\} \\ &+ \int_R \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \lambda \delta_{ij} \frac{\partial N_J}{\partial x_k} dR \{u_k\} - \int_R \frac{\partial N_I}{\partial x_i} \alpha_c S_w \gamma_w \delta_{ij} N_J dR \{h\} \\ &= \int_B N_I \sigma_{ij} n_j dB + \int_R N_I [n S_w \rho_w + (1-n) \rho_s] g_j dR \\ &I, J=1, 2, 3, \dots, MN \quad i, j=x, y, z \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서 R 은 경계면 B 를 가지는 관심 영역(domain of interest)이고, n_j 는 경계면에 수직이고 외부로 향하는 단위 벡터(normal outward unit vector) \mathbf{n} 의 j 방향의 성분이다.

식 (1)과 식 (2)는 초기 및 경계 값 문제를 나타낸다. 따라서 행렬 방정식 (4)와 (5)는 풀기 전에 적절한 초기 및 경계 조건에 의해 완전히 제한되어야 한다. 압력수두 및 고체 변위의 초기 분포는 관심 영역 R 전체에

걸쳐 주어져야 한다. 그리고 식 (4)와 식 (5)에 수반하는 경계 조건에는 다음의 네 가지 형태가 있다. Dirichlet 유형의 압력수두 $h(t)$, Neumann 유형의 경계면 수직 Darcy 속도 $q_r(t) = -\mathbf{n} \cdot [\mathbf{K} \cdot \nabla(h+z)]$, Dirichlet 유형의 i 방향의 고체 변위 $u_i(t)$, Neumann 유형의 i 방향의 표면 견인력(surface traction) $T_i(t) = \sigma_{ij} n_j$ 등이다. 또한 지질매체와 대기의 경계면(soil-air interface)과 같은 보다 실제적인 경계면을 다루기 위해서는 Dirichlet 유형의 경계 조건과 Neumann 유형의 경계 조건의 조합인 소위 혼합 유형의 경계 조건(mixed-type boundary condition)이 필요하다. 강수-침투-삼출 경계 조건(variable rainfall-infiltration-seepage boundary condition)이 그러한 혼합 유형 경계 조건의 대표적인 예로서 이 혼합 유형 경계 조건의 수치학적 고려는 Huyakorn *et al.*(1986)과 Yeh(1987) 등에 의해 상세하게 서술되어 있다.

식 (4) 내의 시간 미분 항을 이산화하기 위해서는 시간 가중 계수(time weighting factor) ω ($0 \leq \omega \leq 1$)를 이용하였다. 또한 각 시간 단계에서 압력수두의 변화에 따른 불포화 수리계수 S_w , dS_w/dh 및 K_r 의 변화에 따른 비선형 문제를 풀기 위해서는 비선형 반복 변수(nonlinear iteration parameter) Ω ($0 < \Omega \leq 2$)를 이용하는 소위 incremental Picard method를 채택하였다. 수치학적 안정성을 획득하기 위해 본 연구에서는 $\omega = 1$ 과 $\Omega = 0.5$ 를 사용하였다. 각각의 비선형 반복 단계에서는 상기한 incremental

Picard method에 의해 선형화된 행렬 방정식 (4)와 (5)를 direct sparse matrix method(Duff, 1977)나 iterative non-symmetric preconditioned conjugate gradient(NSPCG) method(Oppe *et al.*, 1988)를 사용하여 상기한 네 개의 종속변수 h, u_x, u_y, u_z 에 대해 함께 동시에 풀었다.

지배 방정식 (1)과 (2)를 수치학적으로 풀기 위해서 이 장에서 설명한 일련의 수치학적 기법들에 근거한 기존의 수치 모델 COWADE123D(Kim, 1995)가 이용되었다. 이 수치 모델은 다차원 유한요소모델로서 변형성 포화-불포화 지질매체 내에서 일어나는 다양한 형태의 완전 연동된 수리지질역학적 현상들의 해석에 적용되어 왔다. 또한 일련의 문제들에 대해 이 모델을 이용해 구한 수치해들이 기존의 해석해들(Biot, 1941; Bear and Corapcioglu, 1981; Corapcioglu and Bear, 1983)과 거의 완벽하게 일치함으로써 그 정확성이 검증되었다(Kim, 1996). 이 수치 모델은 현재까지도 계속해서 개선·발전되고 있다.

4. 사례 연구

상기한 수치 모델을 미사질토(silt)로 구성된 26.6°의 경사각도를 가지는 2:1 사면에 작용하는 다양한 강수량에 수반하는 지하수 유동과 사면 안정성 해석에 적용하여 보았다. 평면 변형률(plane strain) 상태를 고려하여

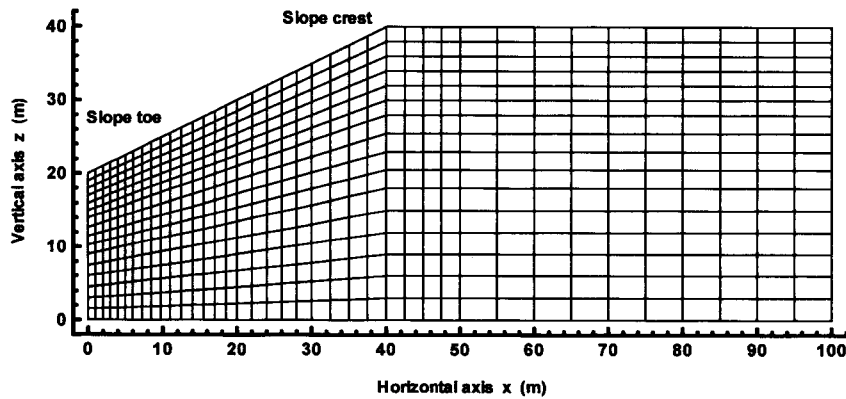


Fig. 2. Illustration of slope and finite element mesh used in the numerical simulation

Table 1. Precipitation (rainfall) rate statistics for the period of 1990~1999 in Seoul, Korea

Parameter	Value
Dry season (January) rainfall rate	6.13×10^{-9} m/sec
Annual average rainfall rate	4.88×10^{-8} m/sec
Wet season (August) rainfall rate	1.52×10^{-7} m/sec
Peak season (August, 1998) rainfall rate	4.62×10^{-7} m/sec

Figure 2와 같은 이차원 수직 단면만 고려하였다. 또한 이 연구에서는 1990년부터 1999년까지의 서울 지역 강수량 자료를 사용하였다(Korea Meteorological Administration, 1990~1999)(Table 1).

Figure 2에서 불투수성의 왼쪽 측면($x = 0$ m)은 수평 방향으로는 움직일 수는 없지만 수직 방향으로는 움직일 수 있다. 불투수성의 오른쪽 측면($x = 100$ m)도 왼쪽 측면과 마찬가지로 수평 방향으로는 움직일 수는 없지만 수직 방향으로는 움직일 수 있다. 불투수성의 바닥($z = 0$ m)은 수직 방향으로는 움직일 수는 없지만 수평 방향으로는 움직일 수 있다. 상부 경사면은 수직 방향과 수평 방향으로 모두 자유롭게 움직일 수 있으며 강수에 의한 침투와 삼출을 고려하기 위하여 앞장에서 설명한 혼합 유형의 경계 조건인 강수 침투삼출 경계 조건을 적용하였다.

본 연구에 사용된 불포화 수리 계수 S_w 와 K_r 의 변화를 위한 수학적 모델은 다음과 같다(van Genuchten, 1980).

$$S_w = S_{wr} + (1 - S_{wr})(1 + |\alpha_V h|^{n_V})^{-m_V} \quad h < 0 \quad (6)$$

$$K_r = (1 + |\alpha_V h|^{n_V})^{-m_V/2} \left[1 - \left(\frac{|\alpha_V h|^{n_V}}{1 + |\alpha_V h|^{n_V}} \right)^{m_{V1}} \right] \quad h < 0 \quad (7)$$

여기에서 S_{wr} 는 잔류 수분포화도(residual water saturation)

이며, α_V , m_V 및 n_V 는 van Genuchten의 불포화 수리 계수(unsaturated hydraulic parameter)이다. 그리고 $m_V = 1 - 1/n_V$ 이다. 지배 방정식 (1)에서의 비포화도용량 dS_w/dh 는 식 (6)을 압력수두 h 에 대해 미분함으로써 얻어지게 된다.

한편 사면의 안정성을 평가하기 위해서 다음과 같은 전단파괴 안전율(factor of safety against shear failure) F_s 와 인장파괴 안전율(factor of safety against tension failure) F_t 를 구하였다(Figure 3).

$$F_s = \frac{AC}{AB} = \frac{\sin \phi' (\sigma'_m + c' \cot \phi')}{\tau_{\max}} \quad (8)$$

$$F_t = \frac{DF}{DE} = \frac{\sigma'_1 - T_o}{2\tau_{\max}} \quad (9)$$

Figure 3과 식 (8) 및 식 (9)에서 σ'_1 은 최대 유효 주응력(major principal effective stress), σ'_3 은 최소 유효 주응력(minor principal effective stress), $\tau_{\max} = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$ 는 최대 전단응력(maximum shear stress), $\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ 는 평균 유효 수직응력(mean effective normal stress), c' 은 점착력(cohesion), ϕ' 은 내부 마찰각(angle of internal friction)이며 T_o 는 인장강도(tensile strength or tension cutoff) ($T_o \leq 0$)이다. 식 (8) 또는 식 (9)에서 구한 안전율이 1보다 크면 지질매체(지반)가 전단파괴 또는 인장

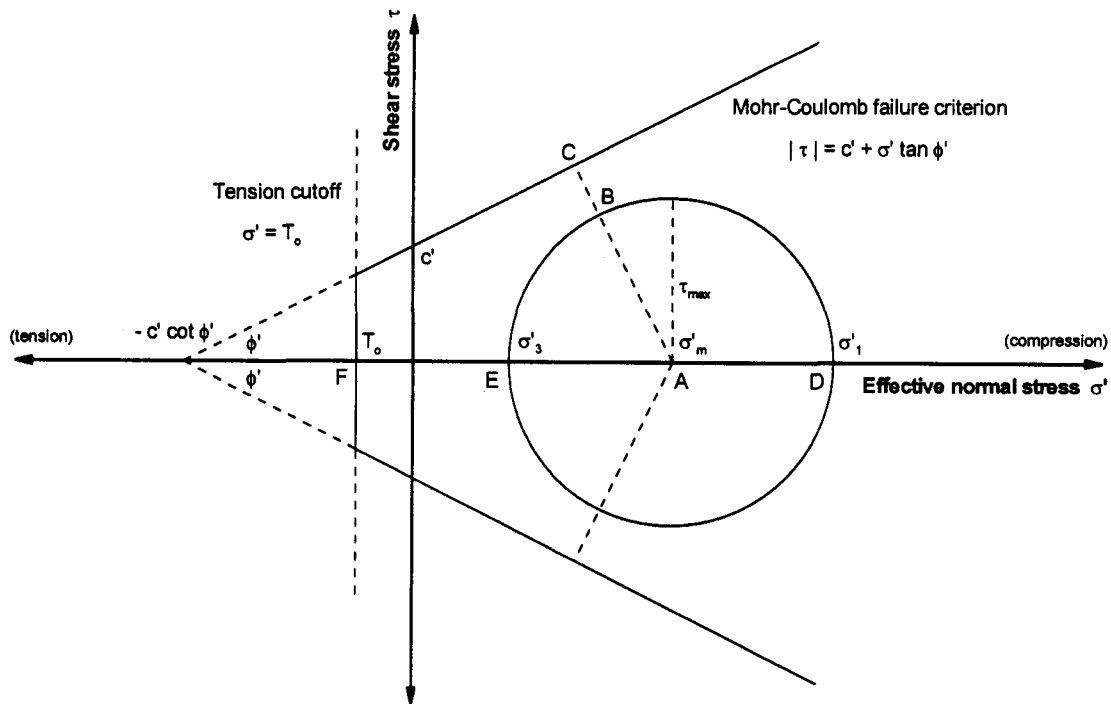


Fig. 3. Shear and tension failure criteria and their parameters

파괴에 대해 안정한 것이고 1 이하이면 전단파괴 또는 인장파괴에 대해 불안정한 것으로 평가하였다. 아울러 실제 전단파괴 및 인장파괴의 발생 여부를 알아보기 위해서 다음과 같은 소위 잠재 전단파괴 지수(potential shear failure index) I_s 와 잠재 인장파괴 지수(potential tension failure index) I_t 를 구하였다.

$$\begin{aligned} \text{If } \sigma'_3 > T_o \ (F_t > 1) \text{ and } F_s > 1, \text{ then } I_s = 0 \text{ and } I_t = 0 \\ \text{If } \sigma'_3 > T_o \ (F_t > 1) \text{ and } F_s \leq 1, \text{ then } I_s = 1 \text{ and } I_t = 0 \\ \text{If } \sigma'_3 \leq T_o \ (F_t \leq 1), \text{ then } I_s = 0 \text{ and } I_t = 1 \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 구한 잠재 전단파괴 지수 또는 잠재 인장파괴 지수가 1이면 전단파괴 또는 인장파괴가 발생하는 것이고 0이면 전단파괴 또는 인장파괴가 발생하지 않는 것으로 평가하였다. 이러한 식 (10)은 최소 유효 주응력과 인장강도의 상관 관계 그리고 식 (8)과 식 (9)에서 구한 전단파괴 안전율과 인장파괴 안전율을 이용하여 유도되었다.

본 연구에 사용된 미사질토의 물성은 Table 2와 같다 (Lambe and Whitman, 1969; van Genuchten, 1980; Guymon, 1994; Bardet, 1997). 사면은 680개의 절점과 624개의 사면형 요소로 이산화 되었다(Figure 2). 압력 수두와 고체 변위를 위한 오차범위(tolerance)는 10^{-5} m 이며, iterative NSPCG method(Oppe *et al.*, 1988)의 하나인 incomplete Cholesky LU decomposed orthogonal minimum (ICOMIN) method를 이용하여 수리역학적 행렬 방정식 (4)와 (5)를 동시에 만족하는 해를 구하였다.

건기, 연평균 및 우기 강수량 하에서의 수치모의실험의 결과들을 Figure 4와 Figure 5의 좌측, 중간 및 우측

에 각각 도시하고 비교하여 보았다. 강수량의 변화에 대한 사면의 수리역학적 반응에는 뚜렷한 차이가 있음이 관찰된다.

Figure 4에서 보듯이 강수량이 증가할수록 압력수두(간극수압)와 전체수리수두가 증가한다. 그 결과 지하수면이 상승하고, 불포화대가 축소되고, 삼출면이 사면 전단부(slope toe)로부터 사면 정상부(slope crest)를 향해 팽창하며, 삼출면에서의 지하수 속도가 증가된다. 그와 동시에 강수량이 증가함에 따라 수평 변위는 증가하고, 수직 변위는 감소하게 되어, 전반적인 사면의 변형이 사면 전단부를 향해 강해지게 된다. 그 결과 Figure 5에서 보듯이 전단파괴 안전율 F_s 값이 1 이하인 지역이 사면 전단부에서는 두꺼워지면서 사면 정상부를 향해 확장된다. 그리고 잠재 전단파괴 지수 I_s 값이 1인 예상 전단파괴면도 같은 양상을 보여준다. 아울러 예상 전단파괴면은 전단파괴 안전율 F_s 값이 0.65 이상 1 이하 지역에서만 발달한다. 반면에 전단파괴 안전율 F_s 값이 0.65 미만 지역에서는 인장파괴 안전율 F_t 의 최소 값은 0.98이며, 잠재 인장파괴 지수 I_t 의 최대 값은 0.42이다. 이는 이 지역에서 최소 유효 주응력 σ'_3 값이 인장 조건 하에 있고 그 크기가 인장강도 보다 약간 크거나 같기 때문에 실제로는 전단파괴가 아니라 미약하나마 인장파괴가 발생함을 암시하는 것이다.

한편 Figure 6(a)에서 보듯이 본 사면의 경우에는 임계 강수량(critical rainfall rate)이 수치학적으로 5.30×10^{-7} m/sec로 계산되었다. 임계 강수량이란 사면이 완전 포화되기 위한 최소 강수량을 말한다. 그리고 Figure 6(a)에서 보듯이 건기 강수량 하에서는 지표에

Table 2. Material properties of the silt used in the numerical simulation

Property	Symbol	Value
Porosity	n	0.46
Saturated hydraulic conductivity	$K_{sat\ ij}$	$6.94 \times 10^{-7} \delta_{ij}$ m/sec
Poisson's ratio	ν	0.33
Young's modulus	E	1.10×10^7 N/m ²
Solid density	ρ_s	2.67×10^3 kg/m ³
Hydromechanical coupling coefficient	α_c	1.00
Residual water saturation	S_{ur}	7.39×10^{-2}
Unsaturated hydraulic parameters	α_v	1.60 m^{-1}
	n_v	1.37
Cohesion	c'	1.00×10^4 N/m ²
Angle of internal friction	ϕ'	30°
Tensile strength	T_o	0.00 N/m ²

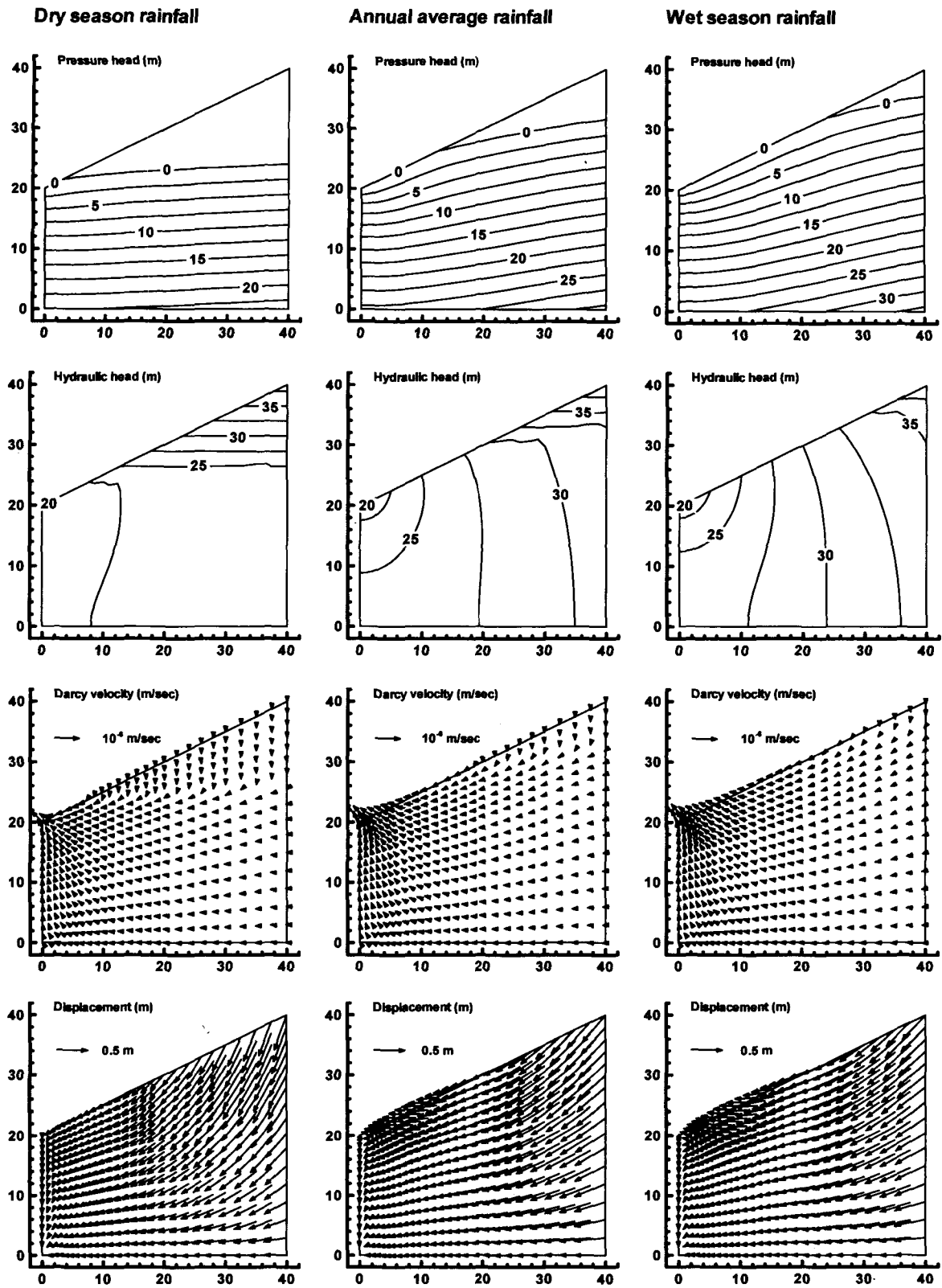


Fig. 4. Spatial distributions of pressure head, hydraulic head, Darcy velocity, and displacement vector under three different rainfall rates. The units of pressure head, hydraulic head, and displacement vector are m, and the unit of Darcy velocity is m/sec. The units of coordinate axes are m.

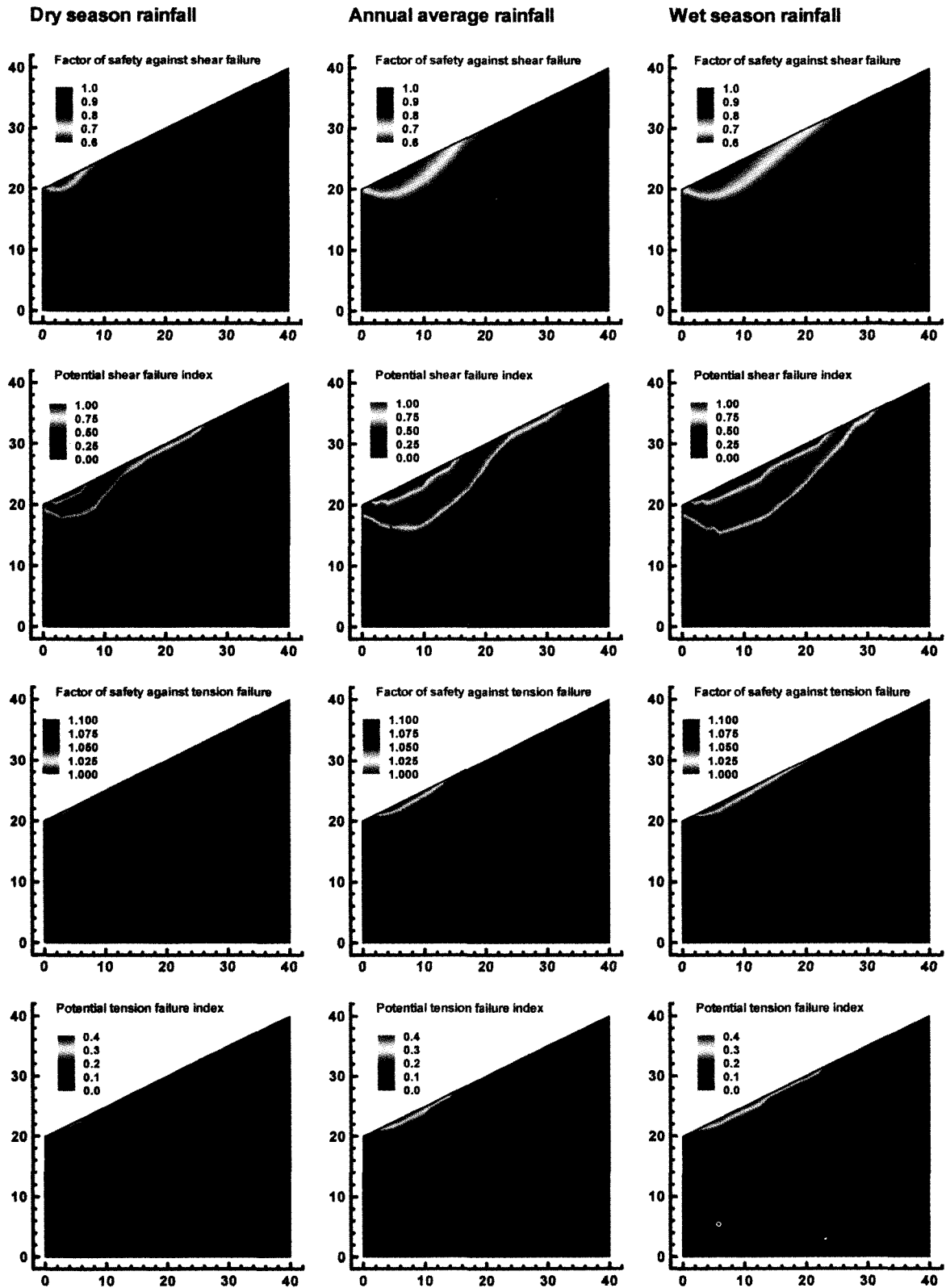


Fig. 5. Spatial distributions of shear and tension failure parameters under three different rainfall rates. The units of coordinate axes are m.

※ 본 그림의 컬러판을 원하시는 분은 저자에게 요청하시면 보내드립니다.

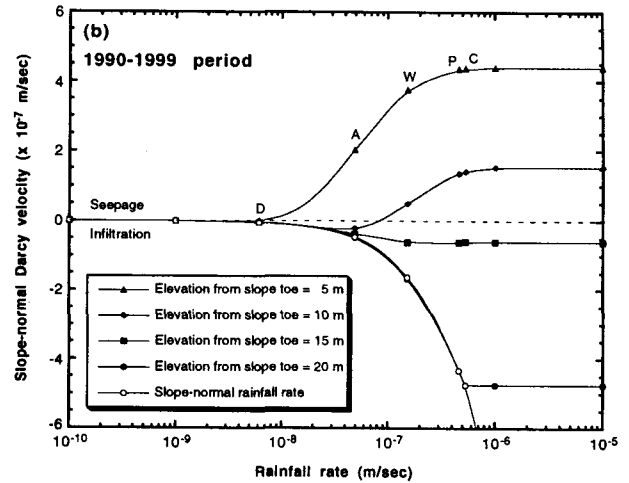
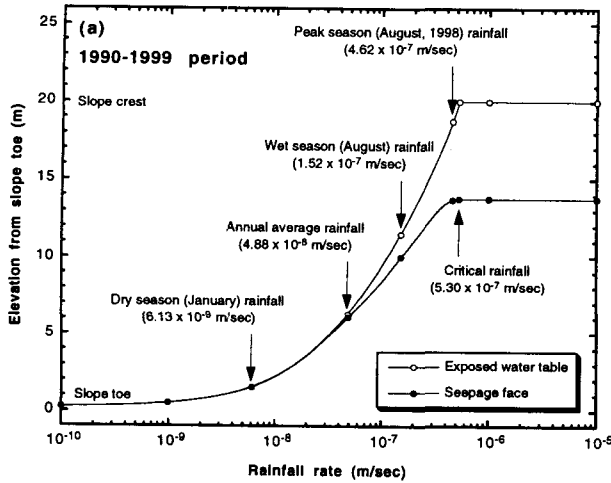


Fig. 6. Variations of (a) exposed water table and seepage face elevations from the slope toe and (b) slope-normal Darcy velocity along the slope surface under different rainfall rates. The capital letters D, A, W, P, and C in the right figure stand for the dry season, annual average, wet season, peak season, and critical rainfall rates, respectively.

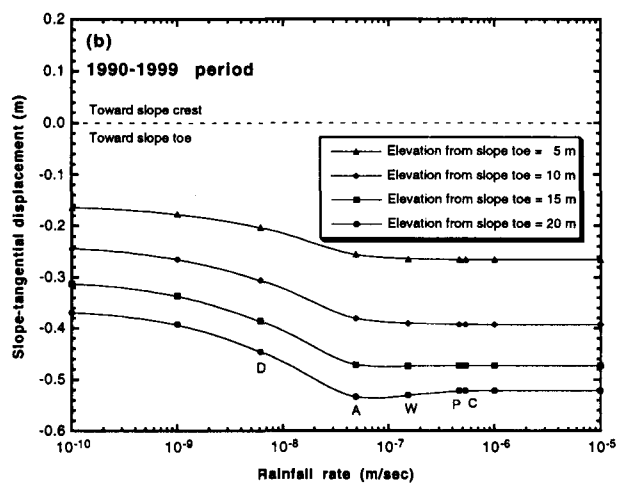
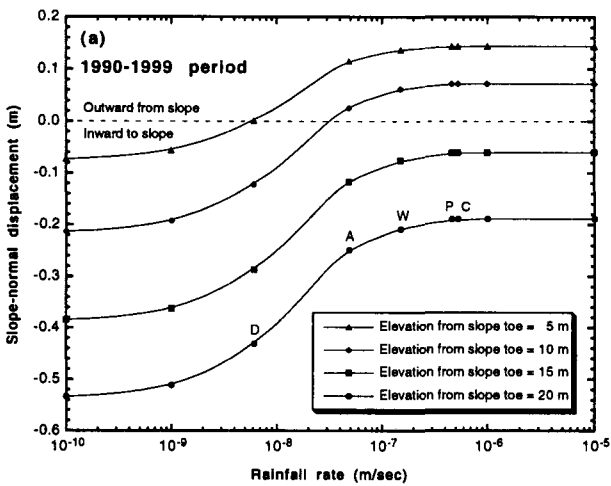


Fig. 7. Variations of (a) slope-normal displacement and (b) slope-tangential displacement along the slope surface under different rainfall rates. The capital letters D, A, W, P, and C stand for the dry season, annual average, wet season, peak season, and critical rainfall rates, respectively.

노출된 지하수면과 삼출면의 공간적 위치가 서로 일치 하지만, 강수량이 증가함에 따라 이 둘간의 공간적 위치가 서로 달라지게 된다. 즉 강수량이 증가함에 따라 삼출면의 크기가 노출된 지하수면의 크기보다 상대적으로 작아지게 되며, 노출된 지하수면에서 삼출면을 제외한 나머지 면에서는 삼출이 아니라 오히려 침투가 일어나게 되는 것이다. 예를 들면 임계 강수량 하에서는 사면 전단부를 기준으로 노출된 지하수면의 높이는 20.0 m 이고 삼출면의 높이는 13.8 m이다. 따라서 0 m 지점(사면 전단부)에서 13.8 m 지점 사이 즉 삼출면을 통해서 는 강수가 침투하지 못하고 대신에 지하수가 방출되며, 13.8 m 지점과 20 m 지점(사면 정상부) 사이에서만 강수의 침투가 발생하는 것이다. 아울러 Figure 6(b)에

서 보드시피 강수량이 증가함에 따라 사면 전단부에서는 삼출량이 증가하고 사면 정상부에서는 침투량이 증가하게 된다.

한편 강수량이 증가함에 따라 사면에 수직인 변위 (slope-normal displacement)는 Figure 7(a)에서 보드시피 사면의 바깥 방향으로 증가하고 사면에 평행한 변위 (slope-tangential displacement)는 Figure 7(b)에서 보드시피 사면 전단부를 향해 증가한다. 그리고 Figure 7(b)에서 보드시피 강수량이 증가함에 따라 사면 정상부 근처에서 사면에 평행한 변위(slope-tangential displacement)가 사면 전단부를 향해 증가하다가 약간 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 침투량 증가에 따른 지하수면의 상승에 의한 부력(buoyancy)에 기인하는 것으로 해석된다.

5. 결론

수치모의실험 결과들은 사면 내의 지하수 유동과 사면의 안정성에 대한 강수의 영향을 정량적으로 평가하는 데 본 연구에서 제시된 수리지질역학적 연동이론과 수치학적 모델이 잘 적용됨을 보여주고 있다. 다양한 강수량 하에서의 강수-침투-삼출 현상 및 사면 내 포화-불포화 지하수 유동과 사면 안정성에 대한 상기 수치모의 실험 결과들은 강수량이 증가할수록 사면의 전반적인 수리지질학적 안정성이 저하됨을 보여주고 있다. 또한 수치모의실험 결과들은 잠재적인 전단파괴가 사면 전단부에서 시작하여 강수량이 증가할수록 사면 전단부에서 심화되면서 사면 정상부로 진행됨을 보여주고 있다. 아울러 수치모의실험 결과들은 이러한 잠재적인 전단파괴면과 지표면 사이의 지반에서는 잠재적인 인장파괴가 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

감사의 글

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF-00-003-D00149)에 의하여 연구되었음을 밝히며 이에 감사 드립니다. 또한 서울대학교 지질환경연구소의 지원에도 감사 드립니다.

참고 문헌

- Alonso, E. E., Gens, A., and Josa, A. (1990), "A Constitutive Model for Partially Saturated Soils", *Geotechnique*, Vol.40, pp.405-430.
- Bardet, J. P. (1997), *Experimental Soil Mechanics*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 582 pp.
- Bear, J., and Corapcioglu, M. Y. (1981), "Mathematical Model for Regional Land Subsidence Due to Pumping, 2. Integrated Aquifer Subsidence Equations for Vertical and Horizontal Displacements", *Water Resources Research*, Vol.17, pp.947-958.
- Biot, M. A. (1941), "General Theory of Three-Dimensional Consolidation", *Journal of Applied Physics*, Vol.12, pp.155-164.
- Brooks, R. H., and Corey, A. T. (1964), *Hydraulic Properties of Porous Media*, Hydrology Papers, No.3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 27 pp.
- Cai, F., Ugai, K., Wakai, A., and Li, Q. (1998), "Effects of Horizontal Drains on Slope Stability under Rainfall by Three-Dimensional Finite Element Analysis", *Computers and Geotechnics*, Vol.23, pp.255-275.
- Corapcioglu, M. Y., and Bear, J. (1983), "A Mathematical Model for Regional Land Subsidence Due to Pumping, 3. Integrated Equations for a Phreatic Aquifer", *Water Resources Research*, Vol.19, pp.895-908.
- Duff, I. S. (1977), *MA28: A Set of FORTRAN Subroutines for Sparse Unsymmetric Linear Equations*, Report R-8730, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, England, 153 pp.
- Fourie, A. B., Rowe, D., and Blight, G. E. (1999), "The Effect of Infiltration on the Stability of the Slopes of a Dry Ash Dump", *Geotechnique*, Vol.49, pp.1-13.
- Guymon, G. L. (1994), *Unsaturated Zone Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 210 pp.
- Hsi, J. P., Carter, J. P., and Small, J. C. (1994), "Surface Subsidence and Drawdown of the Water Table Due to Pumping", *Geotechnique*, Vol.44, pp.381-396.
- Huyakorn, P. S., Springer, E. P., Guvanasen, V., and Wadsworth, T. D. (1986), "A Three-Dimensional Finite-Element Model for Simulating Water Flow in Variably Saturated Porous Media", *Water Resources Research*, Vol.22, pp.1790-1808.
- Istok, J. (1989), *Groundwater Modeling by the Finite Element Method*, Water Resources Monograph Series, Vol.13, American Geophysical Union, Washington, D. C., 495 pp.
- Iverson, R. M., and Reid, M. E. (1992), "Gravity-Driven Groundwater Flow and Slope Failure Potential, 1. Elastic Effective-Stress Model", *Water Resources Research*, Vol.28, pp.925-938.
- Kim, J. M. (1995), *COWADE123D: A Finite Element Model for Fully Coupled Saturated-Unsaturated Water Flow in Deforming One-, Two-, and Three-Dimensional Porous and Fractured Media*, Report HGL-1995-9, Hydrogeology Laboratory, Department of Geosciences, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 254 pp.
- Kim, J. M. (1996), *A Fully Coupled Model for Saturated-Unsaturated Fluid Flow in Deformable Porous and Fractured Media*, Ph.D. Dissertation, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, 201 pp.
- Kim, J. M. (2000a), "Generalized Poroelastic Analytical Solutions for Pore Water Pressure Change and Land Subsidence Due to Surface Loading", *Geosciences Journal*, Vol.4, pp.95-104.
- Kim, J. M. (2000b), "A Fully Coupled Finite Element Analysis of Water-Table Fluctuation and Land Deformation in Partially Saturated Soils Due to Surface Loading", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.49, pp.1101-1119.
- Kim, J. M., and Parizek, R. R. (1997), "Numerical Simulation of the Noordbergum Effect Resulting from Groundwater Pumping in a Layered Aquifer System", *Journal of Hydrology*, Vol.202, pp.231-243.
- Kim, J. M., and Parizek, R. R. (1999a), "Three-Dimensional Finite Element Modelling for Consolidation Due to Groundwater Withdrawal in a Desaturating Anisotropic Aquifer System", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.23, pp.549-571.
- Kim, J. M., and Parizek, R. R. (1999b), "A Mathematical Model for the Hydraulic Properties of Deforming Porous Media", *Ground Water*, Vol.37, pp.546-554.
- Kim, J. M., Parizek, R. R., and Elsworth, D. (1997), "Evaluation of Fully-Coupled Strata Deformation and Groundwater Flow in Response to Longwall Mining", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.34, pp.1187-1199.
- Korea Meteorological Administration (1990~1999), *Climatological Data of Seoul, Korea* (published annually).
- Lambe, T. W., and Whitman, R. V. (1969), *Soil Mechanics, SI*

- Version, John Wiley and Sons, New York, 553 pp.
25. Lewis, R. W., and Schrefler, B. A. (1987), *The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media*, John Wiley and Sons, New York, 344 pp.
 26. Lewis, R. W., and Schrefler, B. A. (1998), *The Finite Element Method in the Static and Dynamic Deformation and Consolidation of Porous Media*, second edition, John Wiley and Sons, New York, 492 pp.
 27. Meroi, E. A., Schrefler, B. A., and Zienkiewicz, O. C. (1995), "Large Strain Static and Dynamic Semisaturated Soil Behaviour", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.19, pp.81-106.
 28. Ng, C. W. W., and Shi, Q. (1998), "A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage", *Computers and Geotechnics*, Vol.22, pp.1-28.
 29. Noorishad, J., Mehran, M., and Narasimhan, T. N. (1982), "On the Formulation of Saturated-Unsaturated Fluid Flow in Deformable Porous Media", *Advances in Water Resources*, Vol.5, pp.61-62.
 30. Oppe, T. C., Joubert, W. D., and Kincaid, D. R. (1988), *NSPCG User's Guide Version 1.0: A Package for Solving Large Sparse Linear Systems by Various Iterative Methods*, Report CNA-216, Center for Numerical Analysis, University of Texas, Austin, Texas, 82 pp.
 31. Reid, M. E. (1994), "A Pore-Pressure Diffusion Model for Estimating Landslide-Inducing Rainfall", *Journal of Geology*, Vol.102, pp.709-717.
 32. Reid, M. E. (1997), "Slope Instability Caused by Small Variations in Hydraulic Conductivity", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.123, pp.717-725.
 33. Reid, M. E., and Iverson, R. M. (1992), "Gravity-Driven Groundwater Flow and Slope Failure Potential, 2. Effects of Slope Morphology, Material Properties, and Hydraulic Heterogeneity", *Water Resources Research*, Vol.28, pp.939-950.
 34. Safai N. M., and Pinder, G. F. (1979), "Vertical and Horizontal Land Deformation in a Desaturating Porous Medium", *Advances in Water Resources*, Vol.2, pp.19-25.
 35. Schrefler, B. A., and Zhan, X. (1993), "A Fully Coupled Model for Water Flow and Airflow in Deformable Porous Media", *Water Resources Research*, Vol.29, pp.155-167.
 36. van Genuchten, M. Th. (1980), "A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
 37. Yeh, G. T. (1987), *FEMWATER: A Finite Element Model of Water Flow through Saturated-Unsaturated Porous Media - First Revision*, Report ORNL-5567/R1, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, 258 pp.
 38. Yeh, H. D., Lu, R. H., and Yeh, G. T. (1996), "Finite Element Modelling for Land Displacements Due to Pumping", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.20, pp.79-99.

(접수일자 2002. 4. 19, 심사완료일 2002. 11. 28)