

강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석

Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes Due to Rainfall Infiltration

조 성 은*¹ Cho, Sung-Eun

이 승 래*² Lee, Seung-Rae

Abstract

This paper presents a procedure of calculating a safety factor of the unsaturated slope suffering from the rainfall infiltration. The process of infiltration into a slope due to rainfall and its effect on the behavior of the soil slope are examined by using a two dimensional finite element flow-deformation coupled analysis. A factor of safety is calculated at various elapsed times after the commencement of rainfall as in the following procedure. First, stresses are estimated at each Gaussian point from the coupled finite element analysis. Then, the global stress smoothing method is applied to get a continuous stress field. Based on this stress field, a factor of safety is calculated for a specified slip surface by a stress integration scheme. Then, a search strategy is used to find out a critical slip surface which is associated with the minimum factor of safety. Some numerical examples are analyzed in order to study the effect of hydraulic conductivity on the slope stability during rain-induced infiltration. According to the results, local failure zone can be formed near the slope surface due to inhomogeneous distribution of hydraulic conductivity. If the failure zone is once formed, then the region extends until a large amount of slide activates. Therefore the local failure can be neglected no longer in the stability analysis.

요 지

본 연구는 강우의 침투로 인한 불포화 토사 사면의 안정 해석을 위한 절차를 제시한다. 강우 침투로 인한 사면의 거동은 흐름과 변형이 연관된 이차원 유한요소해석을 통하여 해석된다. 시간에 따른 안전율을 계산하기 위하여 유한요소 해석법을 통한 응력장(stress field)으로부터 가상활동면에 대한 안전율을 산정할 수 있도록 하는 정교한 응력적분기법을 적용하였고 기하학적으로 허용 가능한 활동단면의 형상을 유지하면서 합리적으로 임계단면을 찾아가는 최적화 방법을 적용함으로써 강우에 의한 토사사면의 안정성 평가 절차를 개발하였다. 또한 이를 이용하여 강우침투시 투수계수의 공간적인 변화가 불포화 토사사면의 파괴 거동에 미치는 영향을 보다 공학적이고 합리적인 방법으로 연구하였다. 연구결과에 의하면 투수계수의 불균질한 분포로 인하여 강우에 의한 사면표면의 국부적인 파괴영역이 발생할 수 있고 이러한 영역이 점점 확대되어 전체적인 파괴에 이르게 된다. 그러므로 시간의존적인 사면안정해석 문제의 경우 이러한 국부적인 파괴영역의 영향을 더 이상 무시할 수 없다.

Keywords : Factor of safety, Rainfall infiltration, Hydraulic conductivity, Finite element analysis, Stress smoothing.

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

1. 서론

우리 나라는 집중호우에 의한 사면파괴가 빈번하게 발생하므로 지반공학자에게 있어 강우에 의한 사면의 안정성을 적절하게 평가하는 것은 매우 중요한 문제이다.

우기에 발생하는 사면파괴는 대부분 강우의 침투로 인하여 발생하며 이때 파괴면은 주로 얇은 깊이에서 형성된다. 이는 강우가 침투하면 지하수면 위의 음의 값을 갖는 간극수압이 흙의 포화와 함께 증가하게 되어 모관흡수력의 감소를 야기하기 때문이다. 따라서 음의 간극수압이 존재하는 불포화 사면 안정해석의 경우 모관흡수력이 전단강도에 미치는 영향을 고려해야 하며 강우의 침투로 인하여 모관흡수력이 감소하는 경우 전단강도가 감소하게 되어 파괴가 발생하게 된다. 이때 지표면을 통한 침투율은 식물의 종류 및 피복정도, 지표면의 균열, 온도, 강우강도, 토양의 물리적 특성에 영향을 받는다.

일반적으로 사면안정 해석시 예상되는 파괴면의 대부분이 지하수면 아래에 위치하면 지하수면 위의 음의 간극수압은 사면의 안정성에 전혀 도움이 되지 않으므로 무시되어 질 수 있다. 그러나, 지하수위가 깊은 곳에 위치하거나 얇은 깊이의 표면파괴가 예상될 경우에는 불포화된 부분의 음의 간극수압으로 인한 모관흡수력이 사면의 안정성에 미치는 영향을 더 이상 무시할 수 없다. 기존의 연구 결과에 의하면 심한 강우에 의해서도 지하수면의 높이는 대부분 수미터의 범위에서만 상승하므로 깊은 지하수위의 상승은 얇은 사면파괴의 경우에는 큰 영향을 미치지 않는다고 알려져 있다(Fredlund 등, 1995).

침투를 고려한 사면안정 해석과 관련된 국내연구를 살펴보면 최근 홍원표 등(1996)에 의하여 강우시 사면안정 해석법에 대한 연구가 수행되었다. 그러나 이 방법에서는 강우로 인하여 지표면으로부터 침윤선이 하강되는 깊이 및 분포를 가정한 후 한계평형해석을 수행하였다. 따라서 강우특성 및 지반 침투특성이 적절히 고려되지는 않았다.

이와 관련하여 유한요소법을 이용한 지반 내에서의 지하수 흐름을 해석하고자 하는 연구가 최근 국내 몇몇 연구자들에 의하여 수행되었다. 박성재 등(1995)은 시간의존적인 포화상태지반의 지하수 흐름 해석을 수행하였다. 이 방법은 지반 내 유체의 흐름만을 해석할 뿐이고 침투로 인한 지반거동과의 상호작용은 고려하지 못하였다. 또한 김상규 등(1995)은 강우로 인한 산사태 발생 매커니즘에 관한 연구에서 침투해석을 수행한 다음 이때 얻어진 간극수압을 고려하여 사면지반 내 응력해석을 수행하는 단계적

침투-응력 해석을 수행하였다. 그리고 김문겸 등(1997)도 지하수 흐름을 고려한 유한요소해석 후에 각 시간단계에서 산출된 간극수압을 구조계의 하중항에 포함시켜 다시 탄소성 유한요소해석을 수행하는 단계적인 해석방법을 사용하였다. 그러나 이들 방법들은 모두 실제현장에서 동시에 발생하는 지하수 흐름과 연계된 지반의 거동 및 강도 특성 변화를 모델링하지는 못하였다.

기존의 침투-응력해석 기법을 이용한 강우에 의한 사면 안정해석방법은 침투-응력해석의 결과 얻어진 간극수압에 대한 자료만을 단순히 한계평형법의 입력치로 적용하여 안전율을 산정하므로 다양한 유한요소법의 해석능력을 충분히 활용하지 못하는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고 유한요소 해석결과를 충분히 활용할 수 있도록 유한요소 해석법을 통한 응력장(stress field)으로 부터 가상활동면에 대한 안전율을 산정할 수 있도록 하는 정교한 응력적분기법을 적용하였다. 그리고 기하학적으로 허용 가능한 활동단면의 형상을 유지하면서 합리적으로 임계단면을 찾아가는 최적화 방법을 적용한 사면 안정 해석기법을 적용함으로써 강우에 의한 토사사면의 안정성 평가 시스템을 개발하였고 이를 이용하여 강우침투시 투수계수의 공간적인 변화가 불포화 토사사면의 파괴 거동에 미치는 영향을 보다 공학적이고 합리적인 방법으로 연구하였다.

2. 시간의존적 침투-응력 해석기법

불포화토에서 침투로 인한 응력변화를 해석하기 위하여 이용할 수 있는 간편하고 적용하기 쉬운 방법은 침투와 변형이 서로 연관되지 않은 해석방법이다. 즉, 유한요소법을 이용한 흐름해석에서 얻어진 간극수압 분포를 유한요소 변형해석의 입력치로 사용하면 침투로 인한 응력변화의 분포를 구할 수 있다(Spierenburg 등, 1995). 그러나 실제 불포화토의 거동은 흐름과 변형이 서로 연관되어 있으므로 이를 고려하여 해석해야 하며 최근 들어 여러 연구자들에 의해 연관된 흐름-변형 해석 방법이 개발되었다.

Alonso 등(1988)은 흙댐의 해석을 위해 불포화토의 흐름-변형이 연관된 해석 방법을 제안하였으며 이를 사면에서의 강우 침투, 원자력 폐기물 처분장의 해석 등에 확장 적용하였다. 또한 Thomas 등(1998)은 온도-흐름-변형이 연관된 해석방법을 통해 원자력 폐기물 처분장의 점토 차폐체의 거동을 해석하였으며 이밖에 Sun(1995)도 강우에 의한 사면의 안정해석을 위해 흐름-변형이 연관된 유한

요소 해석을 실시하였다. 본 연구에서는 강우에 의한 사면 내의 침투로 인한 사면의 안정성을 해석하기 위하여 Alonso 등(1988)과 Thomas 등(1998)의 불포화토 해석이론을 이용하였다.

2.1 응력-변형률 관계

불포화토는 습윤 과정(wetting)시 작용하는 구속응력의 크기에 따라 팽창(swelling) 혹은 압축(collapse)하는 거동특성을 보인다. 따라서 불포화토에 대한 응력-변형률 구성관계는 강우로 인한 침투시 이러한 현상을 모델할 수 있어야 한다.

한편 흙의 역학적 거동은 흙구조의 평형을 지배하는 상태변수(state variable)들에 의해 표현될 수 있다. 이를 위해 불포화토의 변형 거동특성을 하나의 상태변수인 유효응력식과 연관시키려는 시도가 있었지만 대부분의 흙의 경우에 특히 임계포화도보다 작은 포화도에서는 체적변형과 유효응력(effective stress) 사이에 유일한 관계가 존재하지 않는다는 결과가 얻어졌다(Jennings 등, 1962).

따라서 Bishop과 Blight(1963)는 단일 유효응력변수를 사용하여 불포화토의 변형거동을 묘사하는데 발생하는 어려움을 설명하고, 불포화토의 변형거동을 보다 적절히 묘사하기 위하여 순응력(net stress, $\sigma_{ij}^* = \sigma_{ij} - \delta_{ij}u_a$)과 모관흡수력(matric suction, $u_a - u_w$)을 상태변수로 하는 3차원 형식으로 표현할 것을 제안하였다. 여기서, u_w 는 간극수압을 u_a 는 간극공기압을 의미한다.

불포화토의 총변형률은 온도의 영향을 무시하면 순응력과 모관흡수력에 의한 요소로 구성된다고 가정할 수 있고 이는 다음과 같이 증분형태로 나타낼 수 있다.

$$d\epsilon = d\epsilon_\sigma + d\epsilon_s \quad (1)$$

여기서 첨자 σ^* 는 순응력을 s 는 모관흡수력을 나타낸다. 이로부터 모관흡수력에 의한 체적 변형률을 고려한 응력-변형률 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d\sigma^* = D(d\epsilon - d\epsilon_s) \quad (2)$$

여기서 D 는 순응력과 모관흡수력의 크기에 따라 결정되는 행렬이다.

이러한 불포화토의 응력-변형률 관계는 상태면(state surface) 개념이나 최근에 개발된 탄소성 형태의 모델에 의해 표현될 수 있으며, 상태면을 이용한 접근방식의 장점은 습윤과정시 응력과 모관흡수력의 상호작용으로 인한 흙구조의 붕괴와 팽창거동을 비교적 쉽게 묘사할 수 있다는 것이다. 이때 간극비와 포화도에 대한 상태면의 유일성(uniqueness)은 Matyas와 Radhakrishna(1968)에 의해 실험적으로 증명되었다. 그러나 재하-제하 또는 습윤-건조 과정을 수반하는 경우에는 이력현상에 의해 상태면의 유일성을 상실하며 모관흡수력의 변화에 의한 축차변형률 변화 또한 고려할 수 없는 단점이 있다.

이러한 체적변형률에 대한 상태면을 표현하기 위해 Alonso(1995)에 의해 제안된 다음과 같은 함수를 사용하였다.

$$e = a_e + b_e \ln(p) + c_e \ln(u_a - u_w) + d_e \ln(p) \ln(u_a - u_w) \quad (3)$$

여기서 e 는 간극비, p 는 순체적응력[net mean stress, $= (\sigma_1^* + \sigma_2^* + \sigma_3^*)/3$]이며 a_e, b_e, c_e 및 d_e 는 상수이다.

모관흡수력 변화에 의한 체적변형률 또한 간극비의 상태면으로부터 다음과 같이 구할 수 있으며 벡터 D_s^{-1} 은 응력수준과 모관흡수력의 크기에 의해 결정된다.

$$d\epsilon_s = D_s^{-1} d(u_a - u_w) \quad (4)$$

그리고 식(2)의 행렬 D 의 계수는 비선형 탄소성모델로부터 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\frac{1}{K_t} = \frac{1}{1+e_o} \frac{\partial e}{\partial p} \quad (5)$$

여기서 K_t 는 접선 체적탄성계수이다. 그리고 접선 전단탄성계수는 쌍곡선 응력-변형률 관계를 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$G_t = [G_o + M(u_a - u_w)][1 - R_f S_L]^2 \quad (6)$$

여기서 G_o 와 R_f 는 쌍곡선 모델의 변수이고 S_L 은 응력수준(stress level)이며 M 은 모관 흡수력에 의한 초기 선형

접선계수의 선형변화를 고려하기 위한 것이다.

불포화토의 전단강도는 제한된 범위의 응력범위와 모관흡수력 변화에 대하여 Fredlund(1978)에 의해 제안된 다음과 같은 파괴규준을 적용시킬 수 있다.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (7)$$

여기서 c' , ϕ' 및 ϕ^b 는 상수이다. 식 (7)은 전단강도에 대한 모관흡수력의 영향을 고려하기 위하여 Mohr-Coulomb 파괴규준을 확장한 것이며, 특히 ϕ^b 는 모관흡수력의 증가에 의한 전단강도의 증가를 고려하기 위한 것이다. 일반적으로 이 값은 모관흡수력이 증가함에 따라 감소하나 작은 범위의 모관흡수력 변화에 대해서는 상수로 가정할 수 있다.

2.2 물과 공기의 흐름특성

불포화지반에서의 물의 흐름은 포화지반에서의 흐름과 같이 Darcy의 법칙에 의해 식(8-1)과 같이 묘사될 수 있으나, 다른 점은 투수계수가 상수가 아니라 포화도나 모관흡수력의 함수라는 것이다. 이것은 흙 속의 간극에 존재하는 물의 분포가 균일하지 않고 흙속에서 서로 연결된 통로만을 통해서 흐르기 때문이다. 그리고 불포화토에서의 공기의 흐름 또한 Darcy의 법칙에 의해 식 (8-2)와 같이 표현되며 그 타당성은 기존의 연구에 의해 실험적으로 증명되었다(Childs, 1950; Blight, 1971).

$$\mathbf{v}_w = -K_w \left[\nabla \left(\frac{u_w}{\gamma_w} \right) + \nabla z \right] \quad (8-1)$$

$$\mathbf{v}_a = -K_a \left(\frac{1}{\gamma_a} \nabla u_a \right) \quad (8-2)$$

여기서 \mathbf{v}_w 는 물의 속도, \mathbf{v}_a 는 공기의 속도, γ_w 는 물의 단위중량, γ_a 는 공기의 단위중량, z 는 높이(elevation)이다.

그리고 투수계수 K_w 와 공기의 전도계수 K_a 특성을 나타내기 위해 여러 경험식이 제안되었으며 본 연구에서는 다음과 같은 경험식을 사용하였다(Alonso 등, 1995).

$$K_w = a_w K_{ws} / [a_w + \{b_w(u_a - u_w)\}^{c_w}] \quad (9-1)$$

$$K_a = a_a K_{as} / [a_a + \{b_a(u_a - u_w)\}^{-c_a}] \quad (9-2)$$

여기서 a_w , b_w , c_w , a_a , b_a 및 c_a 는 상수이며 K_{ws} 는 포화도 100%에서의 투수계수이고 K_{as} 는 포화도 0%에서의 공기의 흐름전도계수(conductivity)이다.

이와 더불어 불포화상태의 함수특성을 표현하기 위해 불포화토에서의 물의 포화도를 모관흡수력과 순체적응력만의 함수로 가정할 수 있으며 이때도 상태면 개념을 적용하여 표현할 수 있다(Matyas 등, 1968). 본 연구에서는 다음과 같은 식이 사용되었다(Alonso 등, 1995).

$$S_r = S_i + (S_n - S_i) a_s / [a_s + \{b_s(u_a - u_w)\}^{c_s}] \quad (10)$$

여기서, S_i 는 잔류포화도, S_n 은 최대 포화도, a_s , b_s 및 c_s 는 상수이다.

2.3 지배 방정식

공기와 물의 흐름은 유체의 압력을 변화시키고 이로 인하여 지반의 변형이 발생하며 포화도가 변하게 되어 응력상태를 변화시킨다. 뿐만 아니라 간극률과 포화도의 변화는 물의 투수계수를 변화시키므로 흐름과 변형은 긴밀하게 연관되어 있음을 알 수 있다. 그러므로 불포화토에서의 흐름과 연관된 지반변형을 묘사하기 위해서는 평형방정식(식 (11))을 물의 연속방정식(식 (12)) 및 공기의 연속방정식(식 (13))과 함께 풀어야 한다. 이때 미지수는 공기와 물의 압력 그리고 흙의 변위이며 이들을 알면 구성관계로부터 다른 값들을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial (d \sigma_{ij} - \delta_{ij} u_a)}{\partial x_j} + \frac{\partial u_a}{\partial x_i} + db_i = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial (\rho_w n S_r)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{v}_w) = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial [\rho_a n (1 - S_r + H S_r)]}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho_a (v_a + H \mathbf{v}_w)] = 0 \quad (13)$$

여기서 b_i 는 체적력(body force)을 나타내며 n 은 간극률, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_a 는 공기의 밀도, S_r 은 포화도, H 는 Henry의 용해계수(coefficient of solubility)이다.

흙이 완전포화 상태에 접근하면 포화도는 100%에 가까워지며 간극수압은 간극공기압에 접근하게 되어 모관흡수력이 0인 상태에 도달하게 된다. 따라서 포화토는 불포

화토의 특수한 경우로 볼 수 있으며 이때 흙의 거동을 묘사하는 상태변수인 순응력은 유효응력(effective stress)이 된다. 그리고 공기의 질량을 무시하면 고체와 액체의 혼합체인 흙의 평균화된 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = (1 - n)\rho_s + nS_r\rho_w \quad (14)$$

위의 지배방정식과 더불어 초기조건과 경계조건 등으로부터 Galerkin 방법을 적용하면 공간상에 이산화된 행렬 형태의 방정식을 구할 수 있다(Alonso 등, 1988). 공간상에 이산화된 행렬식을 풀기 위해서는 점진적으로 시간에 따른 적분을 수행해야 하며 이때 일반화된 사다리꼴 방법(generalized trapezoidal family of methods)이 많이 사용된다. 본 연구에서는 사다리꼴 적분법을 적용하기 위하여 반복적인 예측-수정 알고리즘(Hughes, 1987)을 사용하였으며, 비선형 문제의 경우 방정식의 계수 행렬이 미지의 값이 되어 직접 풀 수 없으므로 문제를 구간마다 선형화하여 이를 반복적으로 풀어 해를 구하였다.

2.4 강우특성에 따른 경계조건

사면의 표면은 초기에 불포화 상태로 존재하는 경우가 많으므로 투수계수가 매우 작은 상태이며 따라서 강우시 초기에는 침투할 수 있는 물의 양이 매우 작은 상태이다. 그러나 강우가 지속될수록 지반의 포화도가 증가하게 되고 따라서 투수계수가 커지며 침투하는 물의 양도 많아지게 된다(Alonso 등, 1995). 이러한 강우의 침투특성을 모델하기 위한 사면 표면의 경계조건으로는 다음의 2가지 방법을 적용할 수 있다.

먼저 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 물의 양보다 많은 경우에는 강우의 일부분만 침투하고 나머지는 지표면을 통하여 유출된다. 즉, 강우강도가 아무리 크더라도 지반내로 침투되는 수량은 일정한 한계가 있다는 것이다. 일반적으로 강우강도가 증가할수록 침윤전선의 진행속도는 빨라지나 한계 강우강도보다 큰 강우강도에서는 강우강도에 관계없이 침투양상이 일정하게 된다. 김상규 등(1991)에 의하면 지반내로 침투되는 한계 강우강도는 그 지반의 포화 투수계수의 4배 내지 5배이나, 대체로 강우강도가 포화투수계수와 차수(order)가 같아지는 경우 한계 강우강도로 볼 수 있다. 이러한 경우에 지표면에 지정되는 경계조건은 모관흡수력이 0인 조건($u_a - u_w = 0$)이다. 그러나 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 물의 양보다 작

은 경우에는 침투하는 물의 양이 강우강도에 의해 좌우되며 이때 경계조건은 강우강도를 지표면에 작용하는 단위 유량으로 지정함으로써 주어진다.

한편 투수문제와 경우 균질한 댐을 통한 흐름과 같이 경계조건이 흐름과정에 따라 결정되어야 할 때가 있다. 따라서 댐사면과 투수면인 자유수면과의 교차점인 유출점(exit point)은 비선형 유한요소해석과 같이 반복적인 방법에 의해 구해야 하고 그에 따라 경계조건이 결정된다. 이와 같이 경계조건이 미지인 사면 위의 점들에서는 흐름(flux) 경계조건이 처음에 주어지고 계산 도중 산정된 간극수압이 대기압보다 크면 다음 반복에서는 그 점에서의 경계조건을 모관흡수력이 0인 경계조건으로 변경하여 해가 수렴될 때까지 반복 계산한다. 이때 모관흡수력이 0보다 큰 점이 여러 개 존재하면 가장 높이가 작은 한 점의 모관흡수력을 0으로 지정한다.

3. 유한요소법을 이용한 사면안정 해석

3.1 개요

일반적으로 사면의 안정성을 평가하는 방법으로 사면을 다수의 절편으로 분할하여 해석하는 한계평형법이 많이 사용되고 있다. 그러나 한계평형법은 사면내의 가상활동면에 대한 전체안전율은 산정할 수 있으나 전체사면의 응력분포 및 변위량은 예측할 수 없으며 실제 사면의 형성 과정에 따른 응력이력효과를 고려하기 어렵다(김주용, 1998).

특히 강우의 침투로 인한 대부분의 사면파괴의 경우 파괴면 전체에 걸쳐 동시에 파괴에 도달하지는 않으며 국부적인 파괴가 발생한 후 과도한 하중이 인접지역으로 전이되면서 국부적인 파괴지역이 점진적으로 확대되어 전체 사면의 불안정을 유발하게 되는 진행성 파괴(progressive failure)의 형태를 보인다. 이러한 경우 시간에 따라 지반응력상태가 변화하므로 한계평형법의 적용성이 매우 떨어진다. 즉, 한계평형법 등의 방법은 지반의 파괴에만 중점을 둔 해석인데 비해 유한요소해석에서는 지반내의 응력상태, 변형양상을 알 수 있는 동시에 파괴에 이르기까지의 국소적인 항복영역의 진행과정을 알 수 있는 장점이 있다.

강우의 침투로 인한 불포화 사면의 안정성 평가를 위한 연구를 살펴보면, 대부분이 불포화지반의 흐름해석을 통하여 강우침투로 인한 사면내의 모관흡수력 분포를 구하고 이를 한계평형법에 적용하여 안전율을 구하는 방식을

취하고 있다(Ng 등, 1998; Fourier 등, 1999; Fredlund 등, 1995). 이때 불포화토의 함수특성을 고려한 흐름해석은 유한요소법을 통하여 수행되며 한계평형법을 적용하기 위하여 모관흡수력을 고려한 보완된 Mohr - Coulomb 파괴기준이 사용된다.

한편, 침투 - 응력해석 기법을 이용한 안정해석법이 적용되기도 하였는데 침투 - 응력해석의 결과로 얻어진 간극수압에 대한 자료를 한계평형법의 입력치로만 사용하거나(Alonso 등, 1995), 전체안전율을 계산하지 않고 거동해석에 그쳐 유한요소법의 해석능력을 충분하게 활용하지 못하는 단점이 있다(Sun, 1995). 최근에는 강우에 의한 수평배수의 불포화 사면 안정성에 미치는 영향을 연구하기 위해 3차원 유한요소 흐름해석과 3차원 탄소성 유한요소 해석을 통한 강도감소법(shear strength reduction finite element method)이 사용되기도 하였다(Cai 등, 1998).

3.2 유한요소 응력장을 이용한 사면안정해석

한계평형법에서 사용되는 안전율의 정의에 대한 개념을 동일하게 사용하기 위해 전체안전율은 다음과 같이 정의할 수 있다(김주용, 1998).

$$F_s = \frac{\int_{\Gamma} \tau_f d\Gamma}{\int_{\Gamma} \tau_i d\Gamma} \quad (15)$$

여기서 τ_i 는 활동면상에서의 전단응력이며 τ_f 는 같은 위치에서의 전단강도이다. 그리고 Γ 는 파괴면의 길이이다.

τ_i 와 τ_f 는 유한요소 해석에서 얻은 응력장으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_f = c' + \sigma_n^* \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (16)$$

$$\tau_i = 0.5(\sigma_y^* - \sigma_x^*) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \quad (17)$$

$$\sigma_n^* = \sigma_x^* \sin^2 \alpha + \sigma_y^* \cos^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha \quad (18)$$

여기서 c' 는 재료의 유효 점착력, ϕ' 는 재료의 내부마찰각, ϕ^b 는 모관흡수력의 증가에 의한 전단강도의 증가를 고려하기 위한 마찰각, σ_n^* 은 가상활동면에 수직 방향으로 작용하는 법선응력이고 α 는 수평면과 활동면이 이

루는 각도를 나타낸다. 또한 u_a , u_w , σ_x^* 및 σ_y^* 는 각각 간극공기압, 간극수압, x 방향 및 y 방향의 순응력(net stress) 이고 τ_{xy} 는 전단응력이다.

사면의 안전율을 구하기 위한 식(15)의 가상활동면에 대한 응력적분을 수행하기 위해서 전체응력 평활화기법(global stress smoothing method)을 사용하여 유한요소의 각 절점에서 연속된 응력장을 구성하였다. 그리고 이 응력장으로부터 2차원 전체좌표계에서의 가상활동면에 따른 응력적분을 1차원 지역좌표계에서의 적분형태로 변환시켜 수치적분을 수행한다.

유한요소법을 이용하여 사면의 안정성을 평가하는 과정은 우선 유한요소법을 사용하여 사면에 대한 응력해석을 수행한 다음 이 응력해석 결과를 바탕으로 가상활동면에 대한 사면의 안전율을 산정하고 최소의 안전율을 주는 임계단면을 결정한다. 임계단면을 얻기 위해서는 가상활동면의 형상을 변화시키면서 보다 작은 안전율을 탐색하게 되는데 이 탐색과정을 합리적으로 수행하기 위하여 체계화된 최적화 전략을 사용한다. 자세한 절차는 Kim 등(1997)에 기술되어 있다.

4. 침투로 인한 불포화 토사사면의 안정성 해석

사면의 안정은 사면 내부의 간극수압 분포에 의해 직접적인 영향을 받으며 강우로 인한 침투에 의해 간극수압 분포가 영향을 받게 되므로 적절한 사면 침투 해석은 사면의 안정성 평가에 있어 필수적인 요소이다. 본 연구에서는 앞서 기술한 바와 같이 유한요소법을 적용하여 불포화 지반 내에서 강우로 인한 침투를 해석하였다.

불포화 사면내 침투를 해석하기 위하여 그림 1과 같이 수평면과 40° 경사를 가지는 높이 30m의 가상사면을 해석 영역으로 고려하였다. 영역 abcdef는 등방인 지반으로 가정하였으며 경계면 af, de 및 ef는 불투수 경계조건으로 이에 수직인 방향으로 공기와 물의 흐름이 발생하지 않는다고 가정하였다. 또한 af와 de는 수평방향의 변위를, ef는 연직방향의 변위를 구속하였다. 초기 지하수위는 그림 1과 같이 사면 하부 지면에 수평하게 존재하며 강우는 사면을 따라 침투하거나 사면표면으로 유출될 수 있다고 가정하였다.

일반 사면의 경우 지반내 간극 공기압은 대기와 접해있어 0에 가까운 값을 가지므로 간극 공기압은 전 해석영역에 대하여 대기압과 같다고 가정하였다. 해석결과 강우로 인

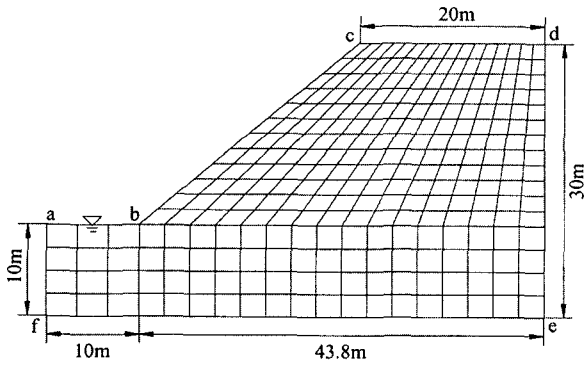


그림. 1 해석영역

표 1. 지반의 재료상수

투수계수	$k_{ws} = 5 \times 10^{-5}, 1 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ $a_w = 1000, b_w = 0.01, c_w = 1.7$
간극비의 상태면	$a_e = 1.2, b_e = -0.04, c_e = -0.002, d_e = 0.0001$
포화도의 상태면	$S_i = 0.08, S_n = 1,$ $a_s = 1, b_s = 5 \times 10^{-5}, c_s = 3.5$
전단강도	$c' = 5 \text{ kPa}, \tan \phi' = 32^\circ,$ $\tan \phi^b = 15^\circ, R_f = 0.75$
기타	$H = 0.018$

한 사면내의 흐름특성과 지반내 응력을 구할 수 있으며 자유수면의 위치는 간극수압의 분포로부터 얻어질 수 있다.

해석영역은 304개의 절점과 4절점 요소 268개로 구성되었으며 해석에 사용된 흙의 물성치는 표 1과 같다. 이때 응력과 압력의 단위는 Pa이다.

초기상태의 간극수압 분포는 그림 2와 같이 수면으로부터의 높이에 따라 수면 아래는 양의 값, 수면 위는 음의 값을 갖는 선형분포를 따르나 특정높이 이상에서는 일정한 값(-60kPa)을 갖는 것으로 가정하였다. 본 연구의 목적은 실제현장의 경우를 정확하게 해석하는 것이 아니라 침투 과정의 규명에 중점을 두므로 간극수압의 초기분포를 해석의 편의상 그림 2와 같이 가정, 사용함으로써 사면내에서 모관흡수력 분포의 형성과정을 보여주려 하였으나 실제문제를 해석할 경우에는 초기 간극수압의 분포를 어떻게 가정하느냐에 따라 사면의 침투거동이 크게 영향을 받게 되므로 현장상태에 가까운 분포를 사용하여야 실제거동과 가까운 예측이 가능하다.

비선형 모델의 경우 지반의 거동은 초기응력상태에 의존하므로 초기응력상태의 추정치 필요하며 자중을 일시에 가하여(gravity turn on) 역학적 평형상태만을 만족시키

는 값을 구하여 사용하였고 사면의 형성과정에 따른 응력의 이력은 고려하지 않았다. 이때 지반의 단위중량은 지반의 포화도와 간극비에 의해 식 (14)와 같이 계산되어진다. 토사사면의 강우에 의한 거동을 살펴보기 위해 일련의 해석을 수행하였으며 지표면의 경계조건으로 강우강도 20mm/hr가 66시간 동안 지표면(abcd)에 작용되었다. 이때 가해진 강우량이 모두 침투하는 것은 아니며 포화투수 계수의 크기에 따라 수치적으로 가능한 양만 지반으로 침투된다.

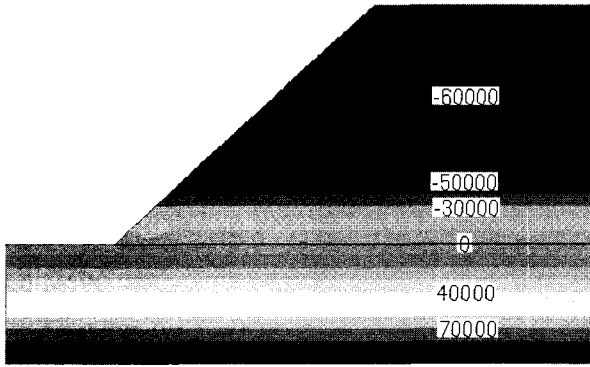
4.1 균질한(homogeneous) 사면의 해석

포화투수계수의 변화가 실제 사면내의 투수계수 분포에 미치는 영향과 그에 따라 사면안정에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 규명하고자 일반적인 silty sand의 가능한 투수계수의 범위내에서 3가지로 포화투수계수의 절대 값을 바꾸어가면서 해석을 실시하였다($k_{ws} = 5 \times 10^{-5} \text{ m/s}, 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}, 5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$). 이때 지반은 등방(isotropic), 균질(homogeneous)하다고 가정하였다.

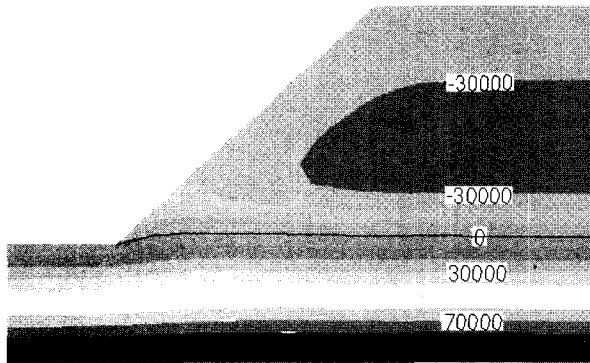
그림 2는 초기상태와 66시간 후의 간극수압 분포를 나타내며 그림 3은 전단응력비분포를 나타낸다. 이때 자중에 의한 초기상태의 응력장을 바탕으로 계산한 안전율은 1.61이다. 이 결과는 초기의 큰 모관흡수력으로 인한 전단강도의 증가에 기인한다.

일반적으로 사면의 파괴형상은 원호형, 대수나선형, 직선형 등 여러 가지로 분류할 수 있지만 균질한 사면에서는 활동면이 원호에 가까우므로 원호활동을 가정한 해석이 주로 실시된다. 그러나 전단강도가 깊이에 따라 증가하는 무한사면에서는 평면 활동 파괴가 발생하므로 이를 고려한 해석이 요구된다. 이 경우 활동길이보다 비교적 짧고 깊이가 얕은 경우 큰 원호의 일부로 고려하여 해석할 수도 있다. 본 연구에서는 강우침투에 따른 사면의 안전율을 구하기 위하여 원호 파괴면을 고려한 원호 임계단면 탐색방법을 사용하였고 사면의 표면 부근에서 얕은 파괴면이 탐색된 경우에는 비원호 임계단면 탐색법을 같이 사용하였다.

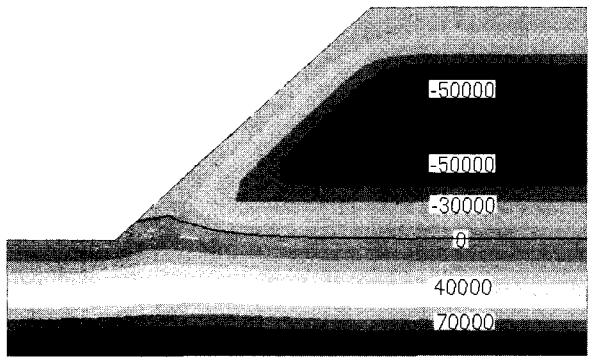
일반적으로 사면의 응력분포는 강우의 침투에 의해 초기 분포로부터 교란이 발생하여 시간에 따라 변하게 된다. 이렇게 교란된 응력장에서는 목적함수의 형상변수에 대한 민감도를 계산하여 탐색방향을 결정하는 임계파괴면 탐색과정에 있어 정적인(steady) 응력분포 상태의 임계파괴면 탐색에 비하여 더 큰 어려움이 있다. 따라서, 형상변



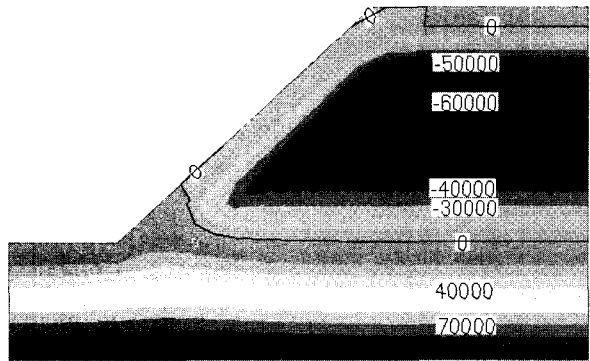
(a) 초기상태



(b) $k_{us} = 5 \times 10^{-5} m/s$

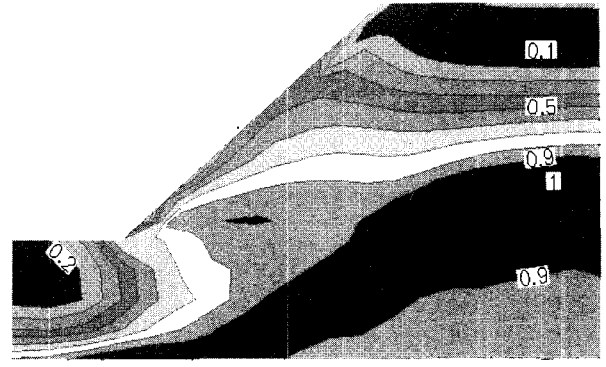


(c) $k_{us} = 1 \times 10^{-5} m/s$

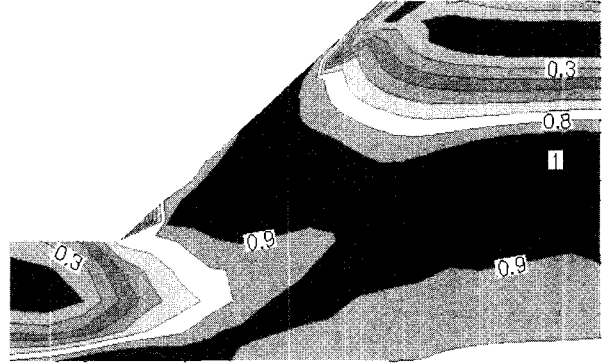


(d) $k_{us} = 5 \times 10^{-6} m/s$

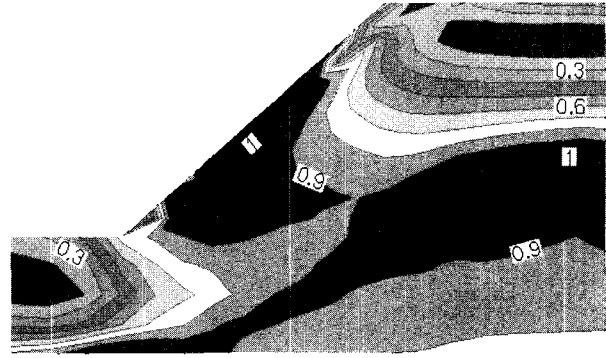
그림 2. 간극수압의 분포(Pa)



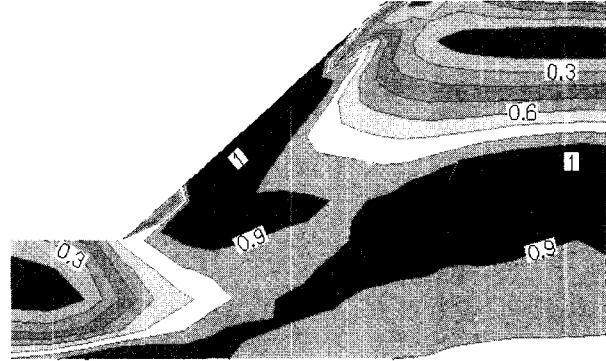
(a) 초기상태



(b) $k_{us} = 5 \times 10^{-5} m/s$

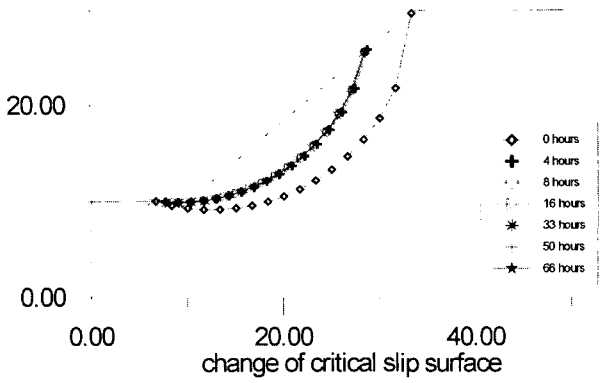


(c) $k_{us} = 1 \times 10^{-5} m/s$

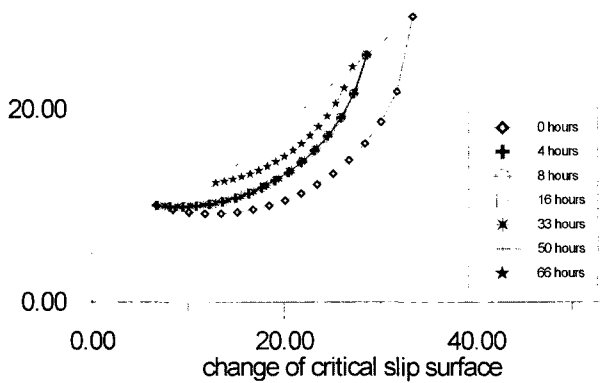


(d) $k_{us} = 5 \times 10^{-6} m/s$

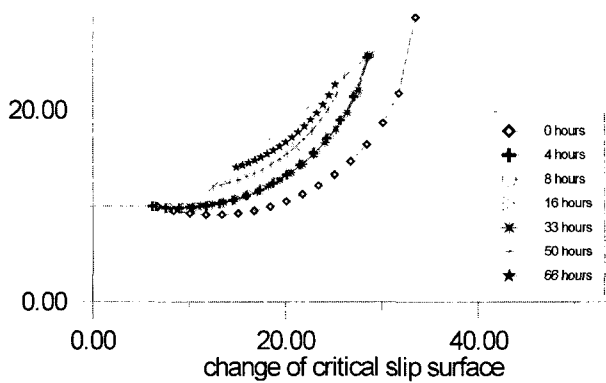
그림 3. 전단응력비의 분포



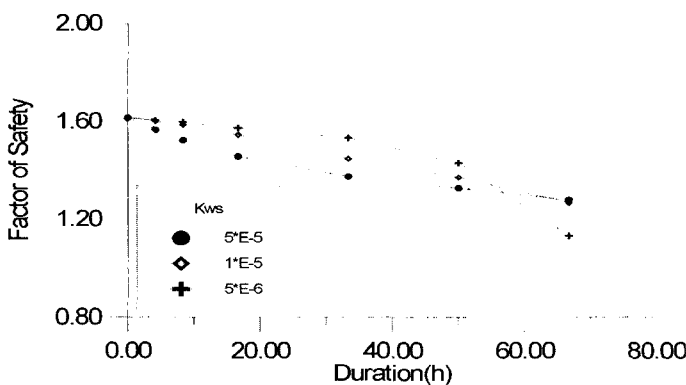
(a) $k_{ws} = 5 \times 10^{-5} m/s$



(b) $k_{ws} = 1 \times 10^{-5} m/s$



(c) $k_{ws} = 5 \times 10^{-6} m/s$



(d) 안전율의 변화

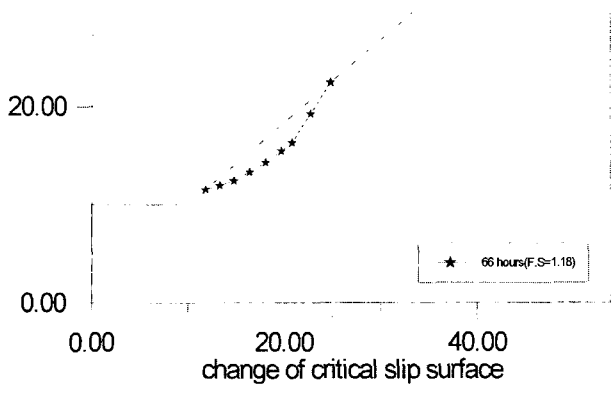
그림 4. 임계단면과 안전율(원호 임계단면)

수의 수가 상대적으로 적은 원호 파괴면에 대하여 안정해석을 실시하였고 표면의 국부적인 임계단면이 탐색된 경우에만 전단응력비나 전단변형률 분포로부터 적절한 초기단면의 가정을 통하여 비원호 임계단면 탐색을 실시하였다.

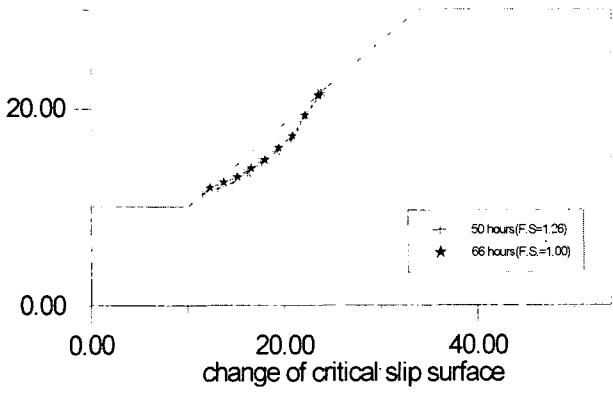
그림 4는 시간에 따른 임계단면과 안전율의 변화를 나타낸 것으로 강우로 인하여 안전율이 지속적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있다. $k_{ws} = 5 \times 10^{-5}$ 인 경우 강우강도에 비하여 투수계수가 상대적으로 큰 값을 가지므로 표면에서 수면방향으로의 침투가 원활하게 이루어져 사면 내부의 간극수압이 많이 변하고 표면에서의 물흐름의 지체가 발생하지 않았다. 따라서 파괴면은 그림 4(a)와 같이 사면의 내부에서 결정되었다. 그러나 $k_{ws} = 1 \times 10^{-5}$ 의 경우에는 앞의 경우보다 물의 흐름이 원활하지 못하므로 지표에서 간극수압의 변화, 즉 모관흡수력의 변화가 더 크게 나타났으며 임계단면은 이로 인한 강도의 감소로 내부에서 지표쪽으로 옮겨가고 있음을 볼 수 있다. 이러한 경향은 전단응력비 분포에 의해서도 확인할 수 있다. 그리고 $k_{ws} = 5 \times 10^{-6}$ 의 경우에는 더 작은 투수계수를 가지므로 사면 표면에서의 강도감소가 더욱 크게 발생하였고 임계 파괴면도 사면의 표면에서 국부적으로 발생하는 것을 볼 수 있다.

이러한 경향은 그림 4(d)에서도 살펴볼 수 있다. 강우 초기에는 세 경우 모두 깊은 임계단면이 탐색되므로 임계단면에 흐름이 도달하는 큰 투수계수의 경우가 안전율의 감소가 크지만, 투수계수가 작은 경우에는 파괴면이 표면으로 이동하면서 안전율이 급격한 감소를 보이는 것을 알 수 있다. 즉 사면표면에서의 모관흡수력 감소로 인한 강도감소로 얕은 깊이의 국부적인 파괴면이 형성되어 급격한 안전율의 감소가 발생하게 된다.

그림 5는 표면에 임계단면이 형성된 시간에 대하여 비원호 임계단면 탐색을 실시한 결과를 나타낸 것으로 파괴면의 위치와 안전율이 원호 파괴면의 파괴면과 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 특히 $k_{ws} = 5 \times 10^{-6}$ 인 경우 66시간 후의 안전율이 1.0으로 계산되었으며 이는 그 이전에 이미 이 단면에서 파괴가 발생했음을 의미한다. 이때 그림 6의 전단변형률 분포도를 참조하면 비원호 파괴면 탐색에 의한 결과가 보다 파괴면에 가깝다는 사실을 추정할 수 있다. 위에서 알 수 있듯이 강우의 침투에 의해서 토사사면의 임계단면은 깊은 임계단면에서 얕은 임계단면으로 옮겨가게 된다. 이때 깊은 파괴면의 경우는 원호 파괴면을 가정



(a) $k_{us} = 1 \times 10^{-5} m/s$

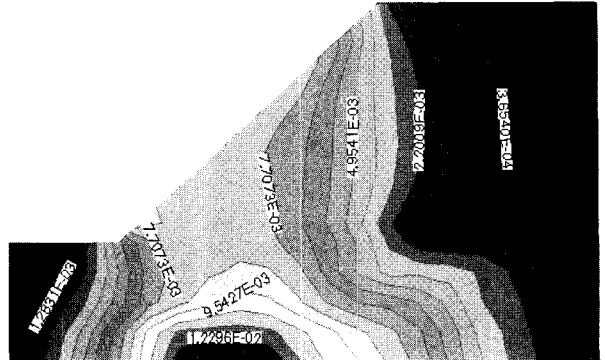


(b) $k_{us} = 5 \times 10^{-6} m/s$

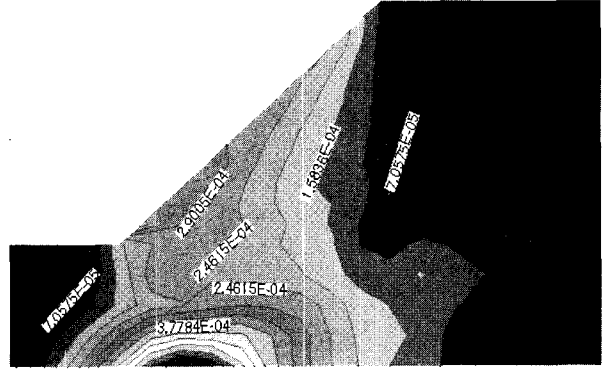
그림 5. 임계단면과 안전율(비원호 임계단면)

하는 것이 설계변수의 수가 적으므로 전체(global)안전율이 최소인 임계단면을 탐색하는데 유리하다. 이것은 실제 현장에서의 관찰결과와도 일치하므로 합리적이지만 앞은 파괴의 경우는 원호 파괴면을 가정할 경우 적절한 파괴면과 안전율을 얻지 못할 수 있다. 그러므로 이와 같은 경우에는 전단응력비나 전단변형률의 분포를 고려함으로써 적절한 초기파괴면을 가정하여 사면표면에 형성되는 비원호 임계단면을 탐색하는 것이 보다 좋은 결과를 주게 된다.

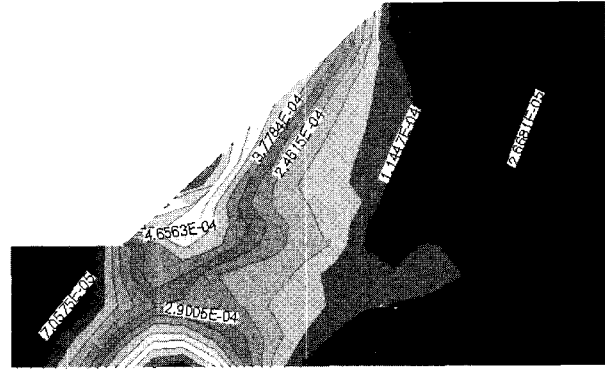
해석결과 중 많은 강우량이 지속적으로 발생함에도 사면의 안전율이 1.0이상이 되는 경우가 있는 것은 사면내에서 모관흡수력의 형성과정을 보여주기 위하여 가정한 사면상부에서의 비교적 큰 모관흡수력 분포에 기인하며 실제 사면의 거동을 예측하기 위해서는 선행강우에 의한 초기 모관흡수력의 분포를 현장에서의 측정값이나 초기 모관흡수력을 얻기 위한 별도의 해석으로부터 구해 사용하여야 실제 상태에 가까운 결과를 얻을 수 있다. 이렇게 초기상태를 얻기 위해 일정 강우강도를 가하여 해석을 실시할 경우 그 결과는 본문의 그림 2의 (a)(실제로 지배방정식



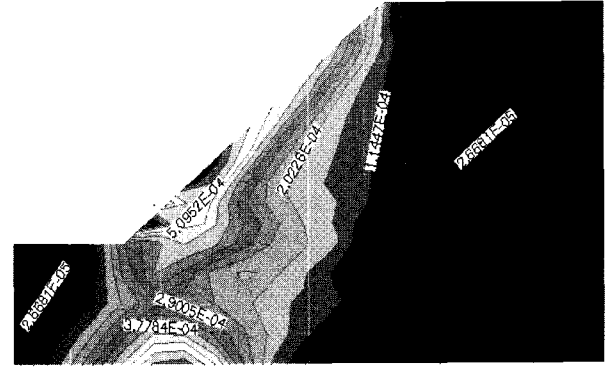
(a) 초기상태



(b) $k_{us} = 5 \times 10^{-5} m/s$

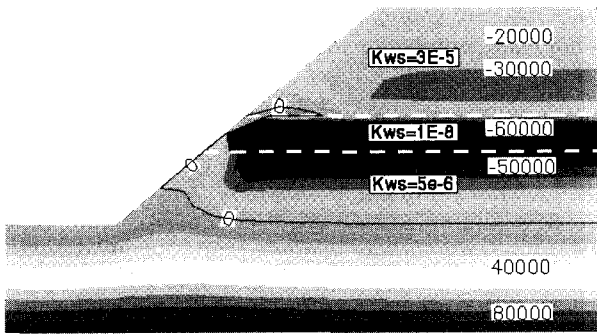


(c) $k_{us} = 1 \times 10^{-5} m/s$

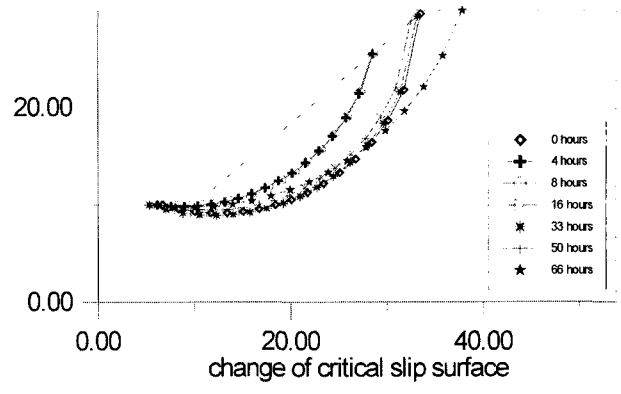


(d) $k_{us} = 5 \times 10^{-6} m/s$

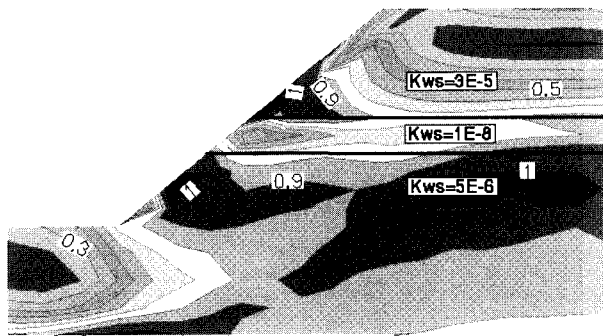
그림 6. 전단변형률 분포



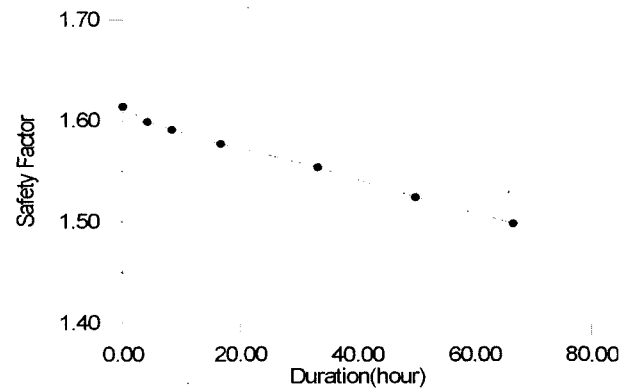
(a) 간극수압 분포(Pa)



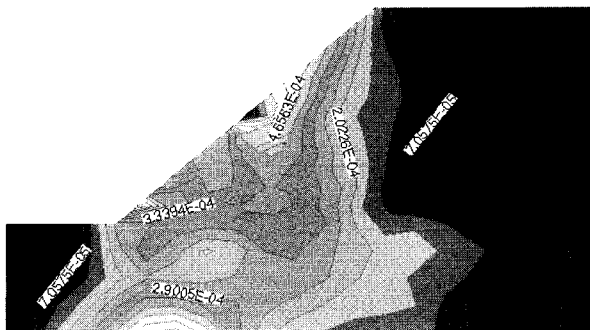
(d) 원호 임계단면



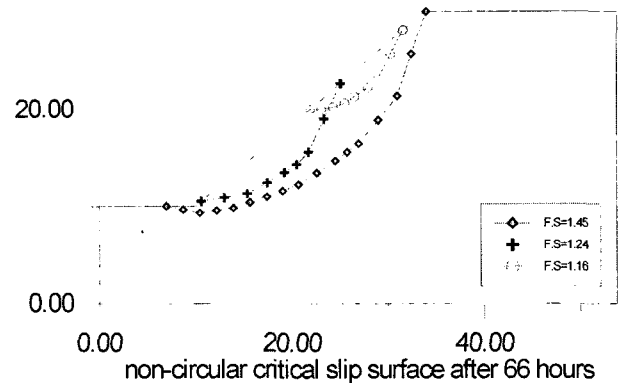
(b) 전단응력비 분포



(e) 안전율의 변화 (원호 임계단면)



(c) 전단변형률 분포



(f) 비원호 임계단면

그림 7. 수평층상 사면의 거동

을 만족시키지 않는 임의적으로 가정된 분포)보다는 (b) 나 (c)의 분포와 가까울 것이며 이러한 상태에서 추가적인 강우강도를 가하면 급격한 안전율의 감소를 보일 것이다.

4.2 투수계수가 다른 다층 사면의 안정해석

일반적인 토사사면에서 투수계수는 위치에 따라 그 값이 다르며 여러 층으로 이루어진 사면의 경우 각층의 투수계수 값에 따라 간극수압 분포와 흐름의 형태가 달라진다.

특히 흐름을 지연시키는 투수계수가 작은 층이 존재할 경우 일시적인 지하수위가 생기고 다중 침투면(multiple seepage faces)이 생기는 것으로 알려져 있다(Rulon 등, 1985). 이와 같이 투수계수가 다른 수평 층들로 이루어진 사면의 해석을 위하여 세 층으로 이루어진 해석 모델을 구성하였다.

이때 다른 조건은 4.1절의 예제와 같으며 다만 투수계수의 절대값만을 다르게 가정하였고(그림 7(a)의 점선으로 표시된 부분) 강우에 의한 시간에 따른 침투 양상과 임

계단면에 대하여 살펴보았다. 그림 7(a)는 66시간 후의 간극수압 분포로 투수계수가 작은 층의 존재로 침투의 지연이 이루어진 결과 사면의 하부와는 별도로 사면 상부에서도 침투면이 형성되고 있는 것을 알 수 있다. 그림 7(b)와 그림 7(c)는 전단응력비와 전단변형률의 분포를 나타낸 것으로 국부적인 응력집중이 지표의 두 부분에서 형성되고 있음을 볼 수 있다.

그림 7(d)는 원호 활동면을 가정한 경우 시간에 따른 임계단면의 탐색결과를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 원호 활동면을 가정할 경우 탐색과정에서 사면의 응력집중이 발생한 상, 하부를 모두 포함하는 임계단면을 탐색하는 결과를 준다. 따라서 원호 파괴면을 가정하면 다중 침투면이 형성될 때 표면에 형성되는 국부적인 파괴형상을 예측하지 못할 가능성이 있다.

그림 7(f)는 66시간 후의 응력장을 바탕으로 비원호 임계파괴면을 탐색한 결과를 나타낸 것이다. 다중침투면의 형성과 같은 문제의 경우 국부적인 최소(local minimum)가 여러 존재하므로 초기값의 선택에 따라 다른 최소값을 구하게 된다. 따라서 전단응력비와 전단 변형률 분포를 바탕으로 깊은 파괴면과 얕은 파괴면의 초기 파괴면을 가정하여 탐색을 실시하였고 그림과 같이 3개의 임계단면을 구할 수 있었다. 그림에서 알 수 있듯이 가장 작은 안전율을 주는 임계파괴면은 사면의 상부에서 형성되었고 깊은 파괴면은 얕은 파괴면보다 훨씬 큰 안전율을 주었다. 그러나 원호 임계단면을 가정할 경우 초기파괴면의 가정에 관계없이 상, 하부의 국부파괴면을 모두 포함하는 깊은 파괴면을 탐색결과로 주므로 그림 7(e)와 같이 안전율을 실제보다 과대 평가할 가능성이 있다.

4.3 토 의

일반적으로 지반재료의 투수계수는 유사한 구조를 가졌더라도 3~4 차수(order)의 큰 범위에서 그 크기가 변할 수 있다. 그러므로 사면에서의 투수계수는 위치에 따라 상당한 편차를 보이며 이러한 투수계수의 변화는 사면내의 국부적인 간극수압 증가를 유발하여 파괴에 이르게 할 수도 있다(Reid, 1997). 이와 관련하여 Reid 등(1992)은 다공질 탄성체에 대한 유한요소해석을 통하여 다층 포화사면의 안정성에 미치는 투수계수 크기의 영향을 연구한 바 있다.

불포화토의 경우 투수계수는 함수비 또는 모관흡수력(matric suction)의 함수이므로 포화상태의 투수계수값이

같은 균질한(homogeneous) 재료로 사면이 이루어졌을지라도 모관흡수력의 크기에 따라 실제 흐름과 관련되는 투수계수의 값은 불균질한(inhomogeneous) 분포를 갖게 된다. 따라서 모관흡수력이 사면내부에 비하여 상대적으로 큰 사면의 표면에서는 투수계수의 값이 작고 이러한 작은 투수계수는 강우의 침투시 흐름의 지체를 유발하게 되어 표면에서의 불안정을 유발한다. 이때 임의의 두 지점에서 투수계수차이는 함수특성곡선의 경사가 급할수록, 두 지점의 모관흡수력 차이가 클수록 더욱 커지게 된다.

특히 4.2절에서와 같이 다층지반에서 투수계수의 절대값이 작은 층이 존재할 경우 투수계수의 차이에 의한 효과가 극대화되어 흐름이 지연되고 국부적인 간극수압의 증가로 사면이 불안정하게 된다. 이러한 국부적인 임계면은 일반적인 정적상태(steady state)의 안정해석에서는 전체 사면의 안정에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단할 수도 있지만 침투문제와 같은 시간의존적인 문제의 경우 국부적인 임계단면이 확대되어 결국에는 파괴에 이르게 되므로 더 이상 무시할 수 없게 된다.

5. 결 론

본 연구는 수치해석(numerical analysis)을 이용하여 강우의 침투로 인한 사면거동을 연구하고자 하였으며 불포화토에서의 물, 공기의 흐름과 평형방정식에 바탕을 둔 유한요소 해석을 이용하여 토사사면의 강우에 의한 시간의존적 침투 및 응력해석을 수행하였고 그 결과 얻어진 응력장을 바탕으로 안정성 검토를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 흐름과 변형이 연관된 해석을 강우의 침투에 적용하면 시간의 경과에 따른 모관흡수력 변화와 응력의 분포를 수치해석적인 방법에 의해 구할 수 있으므로 국소적인 항복영역의 진행과정을 파악할 수 있고 보다 합리적인 사면의 거동 파악이 가능하다.
- 2) 사면의 안정은 응력장과 밀접한 관련이 있으므로 강우의 침투와 같이 시간에 따른 점진적인 파괴가 발생하는 경우에는 한계평형법보다 유한요소법을 사용한 안정성 해석 절차가 실제 파괴기구(mechanism)에 보다 적합한 것으로 사료된다.
- 3) 강우가 지표로부터 지중으로 침투하게 되면 지반의 강도가 감소하게 되는데 투수계수가 작은 경우에는 침투의 지체가 발생하므로 표면부분의 강도가 깊은 부분보

다 크게 감소하여 임계단면이 표면에 형성될 수 있음을 알 수 있다.

- 4) 강우의 침투에 의해서 토사사면의 응력장과 간극수압 분포는 변하게 되는데 이에 따라 임계단면은 깊은 곳에서 얇은 곳으로 옮겨가게 된다. 이때 얇은 파괴의 경우는 원호 파괴면을 가정할 경우 적절한 파괴면과 안전율을 얻지 못할 수 있다. 그러므로 전단응력비나 전단변형률의 분포를 고려함으로써 적절한 초기파괴면을 가정하여 사면표면에 형성되는 파괴면을 탐색하는 것이 보다 좋은 결과를 줄 것으로 사료된다.
- 5) 지반 내 불투수층의 존재는 물의 흐름을 방해하여 사면 상단부의 간극수압을 급속히 증가시키고 다중 침투면을 유발하여 국부적인 파괴영역이 생성될 수 있으므로 강우강도, 사면 내 초기 간극수압의 분포와 더불어 지층의 구성, 흙의 투수계수에 대한 정보가 강우시 시간에 따른 사면거동 특성 파악에 반드시 필요하다.

본 연구에서는 강우 침투시 사면안정해석을 위한 수치 해석 기법을 마련하였다. 본 연구에 의해 마련된 수치해석 기법은 초기 포관흡수력 상태 및 강우로 인한 침투특성과 침투로 인한 강도감소 등을 적절히 묘사할 수 있다. 따라서 강우지속시간에 의한 침투효과 및 이전 강우효과 등을 적절히 고려함으로써 국내 토사지반에서의 강우로 인한 파괴현상을 적절히 예측하는 것이 가능할 것으로 사료된다. 그러나 이를 위해서는 국내 지반에 대한 침투 및 강도거동 특성 규명이 절대적으로 요구되므로 이에 대한 실험적 연구가 계속 진행되고 있으며 실제 현장 적용을 위한 현장시험을 계획하고 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술연구개발사업(과제번호: R&D/970007-2)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김문겸 (1997), "지하수 흐름을 고려한 지하구조계의 탄소성해석에 대한 전-후처리기법의 개발", 전산구조공학회, 학술발표회, pp.79-84
2. 김상규 (1995), 산사태 및 사면재해에 관한 연구, 한국과학기술재단보고서
3. 김상규, 김영목(1991), "강우로 인한 사면 불안정", 대한토질공학회지, 제7권 1호, pp.53-64
4. 김주용(1998), "유한요소법을 이용한 사면안정해석", 박사학위논문,

한국과학기술원

5. 박성재, 최재영, 정두휘, 유영인, 정경환 (1995), "FEM을 이용한 시간의존적, 포화상태의 지하수흐름의 해석", 토목학술발표회 논문집, pp.353-356.
6. 홍원표, 최승호, 한중근, 황인철 (1996), "강우시 사면안정해석법에 관한 연구", 토목학술발표회 논문집, pp.195-198.
7. Alonso, E., Batlle, F., Gens, A. & Lloret, A.(1988), "Consolidation analysis of partially saturated soils-Application to earthdam construction", Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, pp.1303-1308
8. Alonso, E., Gens, A and Lloret, A.(1995), "Effect of rain infiltration on the stability of slopes", Proceedings of the First Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, pp.241-249
9. Bishop, A. W. and Blight, G. E.(1963), "Some aspects of effective stresses in saturated and partly saturated soils", Geotechnique, Vol.13, No.3 pp.177-197
10. Blight, G. E.(1971), "Flow of air through soils", ASCE J. Soil Mech. Found. Eng. Div., Vol.97, SM4, pp.607-624
11. Cai, F., Ugai, K., Wakai, A. and Li, Q.(1998), "Effect of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis", Computers and Geotechnics, Vol.23, pp.255-275
12. Childs, E. C. and Collis-George, N.(1950), "The permeability of porous materials", Proceedings of the Royal Society of London, series A, Vol.210, pp.392-405
13. Fourier, A. B. Rowe, D. and Blight, G. E.(1999), "The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ashdump", Geotechnique, Vol.49, No.1, pp.1-13
14. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1995), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons Inc.
15. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, A.(1978), "Shear strength of unsaturated soils", Can. Geotech. J. Vol.15, pp.313-321
16. Hughes, T. J. R.(1987), The Finite Element Method, Prentice Hall
17. Jennings, J. E. and Burland, J. B.(1962), "Limitations to the use of effective stresses in partly saturated soils", Geotechnique, Vol.12, No.2, pp.125-144
18. Kim, J. Y. and Lee, S. R.(1997), "An improved search strategy for the critical slip surface using finite element stress fields", Computers and Geotechnics, Vol.21, No.4, pp.295-313
19. Matyas, E. L. and Radhakrishna, H. S.(1968), "Volume change characteristics of partially saturated soils", Geotechnique, Vol.18, pp.432-448
20. Ng, C. W. W. and Shi, Q.(1998), "A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage", Computer and Geotechnics, Vol.22 No. 1, pp. 1-28.
21. 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 Resour. Res., Vol.28, No.3, pp.939-950
22. Reid, M. E.(1997), "Slope Instability caused by small variations in hydraulic conductivity", J. of Geo. and Geoenv. Engrg., ASCE, Vol.123, No.8, pp.717-725
23. Rulon, J. J. and Freeze, R. A.(1985), "Multiple seepage faces on layered slopes and their implication for slope-stability analysis". Canadian Geotechnical Journal, Vol.22, pp.347-356
24. Spierenburg, S. E. J. & van Esch, J. M.(1995), "Slope stability during infiltration", Proceedings of the First Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, pp.309-314
25. Sun, Y.(1995), "A study on stability analysis of shallow layer slope due

to raining permeation”, Proceedings of the First Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, pp.315-320

26. Sun, Y.(1995), “A study on stability analysis of shallow layer slope due to raining permeation”, Proceedings of Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, pp.315-320

27. Thomas, H. R. & He, Y and Onofrei, C(1998), “An examination of the validation of a model of the hydro/thermo/mechanical behaviour of engineered clay barriers”, Int. J. for Num. and Anal. Meth. in Geomechanics., Vol.22, pp.49-71

(접수일자 1999. 7. 28)