한국지반환경공학회 논문집
제8권 제5호 2007년 10월 pp. 57~65

강우시 토사사면의 불포화 특성을 고려한 간편 설계법

A Simple Design Method Considering Unsaturated Soils Characteristics of Slopes Under Rainfalls

한 태 곤[1] · 김 홍 택[2] · 백 승 철[3] · 강 인 규†
Han, Taekon · Kim, Hongtaek · Baek, Seungcheol · Kang, Inkyu

ABSTRACT : Slope collapse occurs mostly at the rainy season or thawing season in Korea. From a engineer point of view, the design criterion in recent of soil slopes during the rainfall have a conservative tendency because a slope stability is evaluated in the condition that ground water level is located in the surface. However, for the rational design of soil slopes during rainfall, the raining conditions and the unsaturated soil characteristics of soil slopes have to be considered. For the unsaturated soil characteristics of soil slopes, the laboratory tests for unsaturated soils and the seepage analyses for the raining conditions have to be performed. Due to these difficulties, a conservative design of soil slopes in the current design criterion has been carried out. In this paper, therefore, a simple design method is proposed. The method is considered to the unsaturated soil characteristics and the results of seepage analysis without numerical analysis. To verify the suggested design method, it is compared with both analysis results by current design criterion and analysis results based on the seepage analysis. Through the comparative study, it was found that the current design criterion has been excessively conservative. Hence, simple design method in this study was evaluated as the rational design for the soil slopes during rainfall.

Keywords : Simple design method, Soil slopes, Pore water pressure ratio, Unsaturated soils

요 지 : 국내의 사면붕괴는 대부분 우기 또는 해빙기에 집중적으로 되고 있는 실정이며, 이에 따라 최근의 강우시 토사사면의 설계기준은 보수적인 관점에서 지표면에 지하수를 위치시켜 놓고 사면안정성을 평가하고 있어 설계자의 관점에서 볼 때 지나치게 보수적인 경향이 있다. 그러나 강우시 토사사면을 합리적으로 설계하기 위해서는 강우조건 및 토사사면의 불포화 특성을 고려하여야 하며 이를 위해서는 토사사면의 불포화 특성을 파악하기 위한 실내시험 및 강우조건에 따른 침투류 해석 등이 수행되어야 하는 어려움이 있어 보수적인 관점에서 기존의 설계기준에 따라 토사사면의 설계가 이루어지고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 별도의 침투류 해석 없이 강우시 토사사면의 불포화 특성을 고려한 간편 설계법을 제안하고자 하며, 이에 대한 검증으로 실제 붕괴된 토사사면을 대상으로 현행 설계기준에 의한 설계방법과 침투류 해석에 의한 설계방법에 대한 비교연구를 수행하였다. 비교검증 결과 현행 설계방법은 지나치게 보수적인 설계방법임을 확인하였으며, 본 연구의 간편 설계법이 강우시 토사사면의 안정성을 평가하는데 있어서 현행 설계방법에 비해 합리적인 것을 알 수 있었다.

주요어 : 간편 설계기법, 토사사면, 간극수압비, 불포화토

1. 서 론

사면 붕괴는 우기에 집중적으로 발생되므로 각 기관에서는 강우시 사면 설계기준을 지표면 포화조건으로 제안하고 있어, 대부분 사면이 보강공법 적용대상으로 편입되어짐에 따른, 사면 공사비의 급격한 증가를 초래하게 되었다. 따라서, 본 연구에서는 강우시 토사 사면을 대상으로 안정성 및 경제성 확보가 가능한 간편 설계기법을 제안하기 위한 연구를 수행하고자 한다. 이를 위하여 본 연구는 강우시 사면의 조건을 별도의 침투류 해석 없이 편리하게 고려 할 수 있는 장점이 있는 기존연구(박성원, 2005)를 실무적인 차원에서의 활용이 가능하도록 확장하여 제안하였다. 또한 본 연구에서 제안한 간극수압비 예측도표에 의한 강우시 토사사면의 설계방안에 대한 적용성을 검증하기 위해 실제 붕괴된 토사사면을 대상으로 강우시 현행 설계기준(지하수위는 지표면에 위치)에 의한 설계방법과 침투류 해석(강우지속기간 48시간에 해당하는 재현기간 50년 확률강우량 적용)에 의한 설계방법에 대한 비교연구를 수행하여, 현행 설계방법은 지나치게 보수적인 설계방법임을 확인하였으며, 본 연구의 간편 설계방안을 이용하여 간편하게 강우시 사면안정성을 평가 할 수 있도록 하였다.

1) 정회원, 한진중공업 토목설계팀 부장
2) 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수
3) 정회원, 안동대학교 토목공학과 교수
† 정회원, (주)브니엘컨설턴트 대표이사(E-mail : kang-ik@vniel.co.kr)

2. 강우시 사면내 간극수압

2.1 한계강우강도

일반적으로 침투의 양상은 지표면에 가해지는 강우강도와 지반의 함수량분포에 의해 결정되는데, 지표면에 침투능을 능가하는 유량이 가해지는 경우의 침투는 지반의 함수량 분포에만 의존하지만 그렇지 않은 경우의 침투양상은 지반의 초기함수분포와 더불어 작용하는 강우강도에 영향을 받는다. Cai 등(2004)은 점성토, 실트, 모래지반의 사면을 대상으로 침투류 해석을 수행하여 지반의 포화투수계수와 같거나 큰 한계강우강도(critical rainfall intensity)가 작용할 경우 지반은 간극수압의 변화가 없는 정상류 상태에 도달되는 것을 확인하여 한계강우강도 평가식을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$\text{한계강우강도, } I_c = \frac{h_s k_s}{l_c \sqrt{1+m_s{}^2}} \quad (1)$$

여기서, h_s : 사면의 높이 l_c : 사면의 길이
m_s : 수두 - 사면 경사의 1.3배 k_s : 포화투수계수

2.2 간극수압비

집중호우시 사면의 안정성 문제는 대개 지반내부 함수비의 증가로 인한 활동토층의 단위중량 증가와 침투수에 의한 사면내 간극수압의 변화 등에 의해 발생한다. 이러한 간극수압의 영향은 간극수압비(pore water pressure ratio, r_u)를 이용하여 간단하게 고려할 수 있으나, 간극수압비는 각 절편마다 다르기 때문에 각 절편별로 간극수압비를 평가하여 해석하는 것은 번거롭고 어려운 일이므로 실제의 사면안정성 평가에 있어서 평균 간극수압비를 적용하여 간편하게 해석을 하고 있다. 따라서 평균 간극수압비의 결정이 중요한 문제이며, 간극수압비(r_u)는 그림 1 및 식 (2)와 같이 활동면상의 어느 주어진 위치에서 흙의 무게(전응력)에 대한 간극수압의 비로 정의된다.

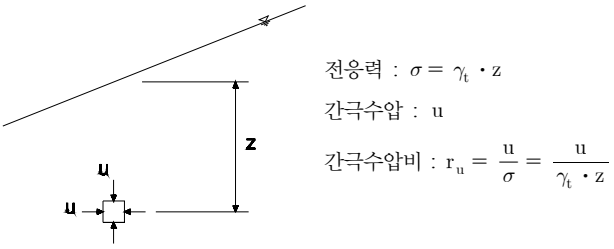


그림 1. 간극수압비에 대한 정의

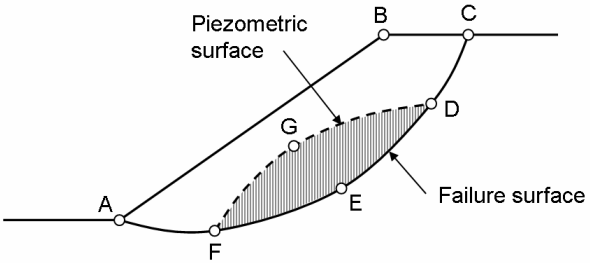


그림 2. 간극수압비를 결정하는 방법

$$r_u = \frac{u}{\gamma_t \cdot z} \quad (2)$$

여기서, u : 임의의 깊이에서 발생하는 간극수압
γ_t : 토체의 습윤단위중량
z : 지표에서 사면 내 임의의 위치까지의 깊이

사면내 평균 간극수압비는 그림 2 및 식 (3)과 같이 면적비로 평균값을 추정 할 수 있다. 또한 Turner와 Schuster (1996)는 간극수압비 r_u 범위가 일반적으로 0.0～0.5를 나타내며, 사면 안정성 검토시 평균적으로 0.25를 사용할 것을 제안하였다.

$$r_u = \frac{\text{Area FGDEF}}{\text{Area ABCDEFA}} \times \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \quad (3)$$

3. 지반정수에 따른 간극수압비의 변화

강우시 침투에 따른 토사사면 내의 간극수압 변화에 의한 사면의 안정성 평가는 지하수위의 가정에 의한 사면안정 해석방법, 강우를 고려한 침투류 해석에 의한 해석방법, 간극수압비(r_u)를 이용한 사면안정 해석방법 등이 있다. 이 중 간극수압비를 이용한 사면안정 해석방법이 해석이 간편한 장점이 있음에도 불구하고 간극수압비의 평가가 정량적이지 못한 단점이 있어 박성원(2005)은 강우조건, 지반조건 및 사면조건 등에 따라 정량적으로 간극수압비를 평가할 수 있는 절차 및 예측도표를 제시한 바 있다. 그러나 박성원(2005)이 제시한 간극수압비 예측도표는 대상 토사사면의 지반정수 값이 단위중량 1.9tf/m^3, 점착력 1.0tf/m^2, 내부마찰각 28°로 제한하고 있어 각 계수 값이 변화될 경우 활용에 제한이 있는 문제가 있었다. 따라서 기존연구에서 제시한 절차를 활용하여 대상 토사사면의 다양한 지반정수의 영향을 반영할 수 있도록 단위중량, 내부마찰각 및 점착력을 변화시켜 매개변수 변화연구를 수행하였으며, 이에 대한 보정식 및 예측도표를 제시하였다 (한태곤, 2006). 이를 분석하기 위해 우선 지반의 다양한

불포화 특성(흙-수분 특성곡선 계수 n=0.403～1.400(총 20종류) 및 포화투수계수 k_{sat}=1.0×10^{-6}～1.0×10^{-4}m/sec(총 5종류)) 및 사면조건(H=5～15m(총 3종류))에 따른 SEEP/W프로그램을 이용, 침투류 해석을 실시하여 한계강우강도 이상으로 강우가 24시간 이상 지속된 상태에서의 간극수압을 평가하였으며, 평가된 토사사면 내의 간극수압을 불러들여 한계평형해석을 수행하여 강우시 토사사면의 사면 활동에 따른 안전율을 산정하였다. 한계평형해석은 SLOPE/W 프로그램을 이용하였으며, 해석방법은 Morgenstern-Price의 해석기법을 적용하였다. 궁극적으로 침투류 해석결과를 이용한 한계평형해석결과와 동일한 안전율 분포를 나타내는 간극수압비를 찾기 위해 간극수압비를 변화시켜가면서 한계평형해석을 반복적으로 수행하였다.

3.1 단위중량의 영향

단위중량의 변화에 따른 간극수압비의 영향을 분석하기 위해 표 1과 같이 토사사면의 내부마찰각은 28°로 고정시키고, 토사사면의 점착력 및 단위중량을 각각 1.0～5.0tf/m^2(총 3종류) 및 1.7～1.9tf/m^3(총 3종류)으로 변화시켜가며 간극수압비의 변화를 분석하였다.

그림 3은 흙-수분 특성곡선 계수 n값이 0.854인 경우에 대하여 k_{sat}/H값의 변화에 따른 간극수압비의 변화를 도시한 것이며, k_{sat}/H값 및 n값의 변화에 따라 평가된 간극수압비(r_u) 중 최대값을 별도로 도시한 결과는 그림 3(d)와 같다.

그림 3(d)에서 알 수 있듯이 단위중량(γ_t)이 증가함에 따라 간극수압비는 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있으며, 이를 수식화 하면 식 (4)와 같다.

$$r_u = r_{u(\text{도표값})} \times \frac{\text{도표의 단위중량}}{\text{토사사면의 단위중량}} \quad (4)$$

3.2 점착력의 영향

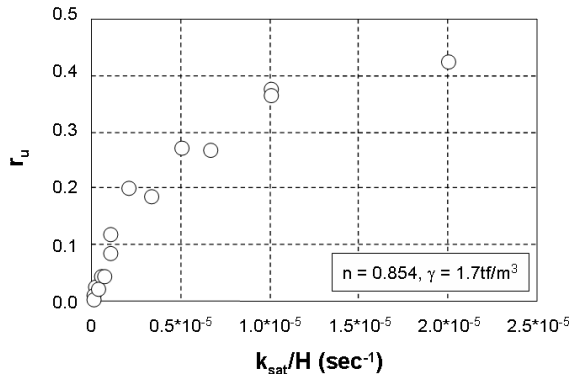
점착력의 변화에 따른 간극수압비의 영향을 분석하기 위해 표 2와 같이 토사사면의 내부마찰각은 28°로 고정시

표 1. 단위중량의 영향분석에 사용한 지반정수

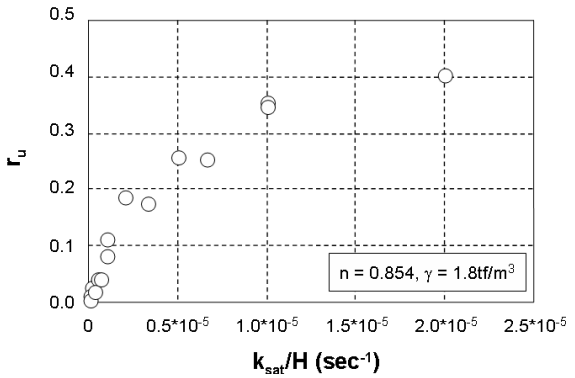
구 분	단위중량(tf/m^3)	점착력(tf/m^2)	내부마찰각(°)
토 사	1.7, 1.8, 1.9	1.0, 3.0, 5.0	28

표 2. 점착력의 영향분석에 사용한 지반정수

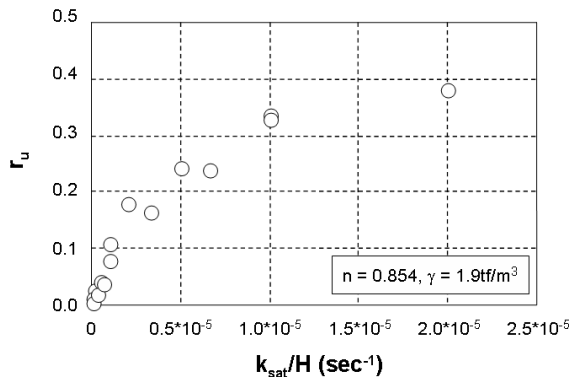
구 분	단위중량(tf/m^3)	점착력(tf/m^2)	내부마찰각(°)
토 사	1.7, 1.8, 1.9	1.0, 3.0, 5.0	28



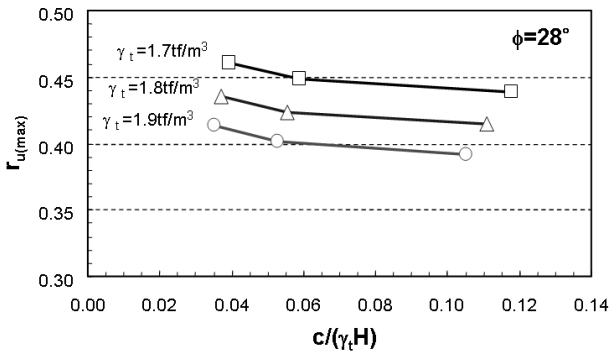
(a) γ=1.7tf/m^{3}인 경우



(b) γ=1.8tf/m^{3}인 경우

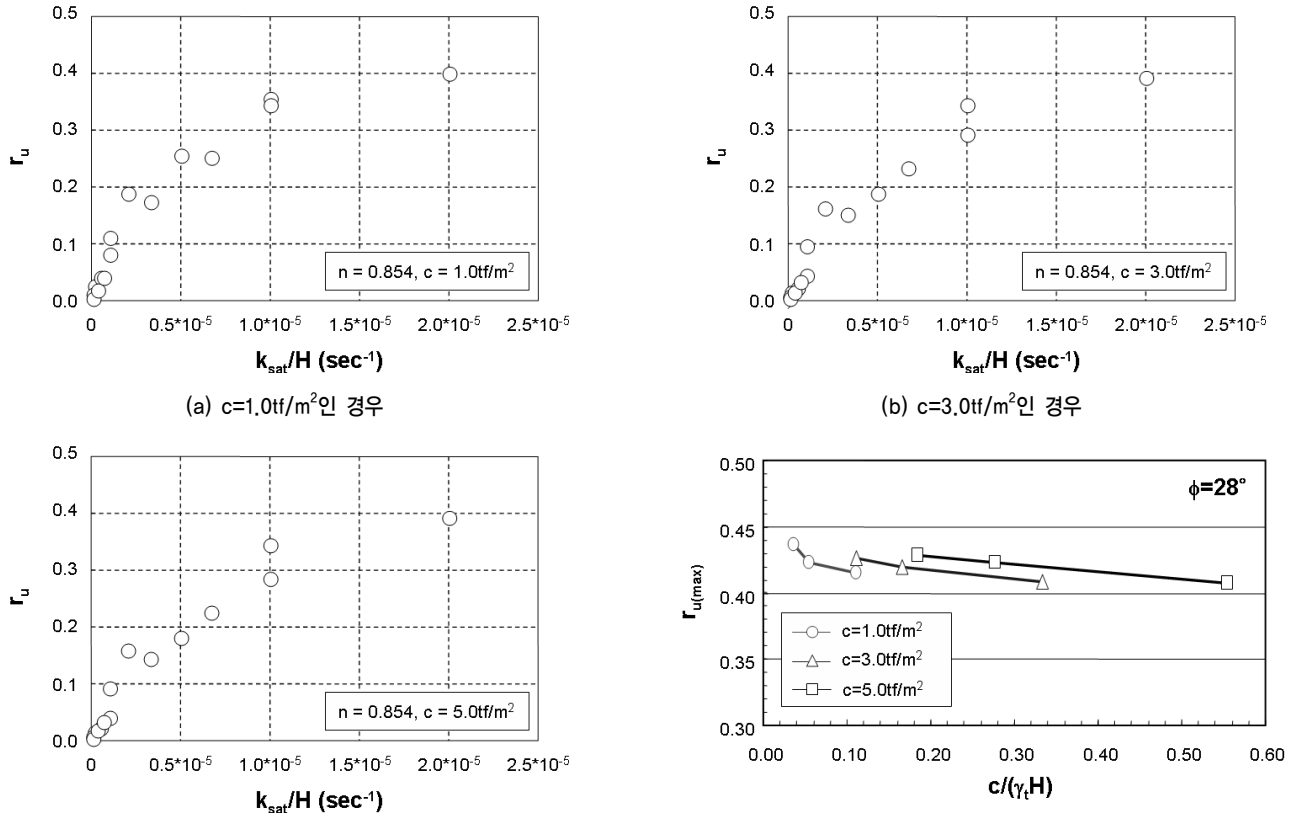


(c) γ=1.9tf/m^{3}인 경우



(d) 최대간극수압비의 변화

그림 3. 단위중량의 변화에 따른 간극수압비 및 최대 간극수압비의 변화(n=0.854인 경우)



(a) c=1.0tf/m^{2}인 경우 (b) c=3.0tf/m^{2}인 경우

(c) c=5.0tf/m^{2}인 경우 (d) 최대 간극수압비의 변화

그림 4. 점착력의 변화에 따른 간극수압비 및 최대 간극수압비의 변화(n=0.854인 경우)

키고, 단위중량 및 점착력을 각각 1.7～1.9tf/m^3(총 3종류) 및 1.0～5.0tf/m^2(총 3종류)으로 변화시켜 간극수압비의 변화를 분석하였다.

그림 4는 흙-수분 특성곡선 계수 n값이 0.854인 경우에 대하여 k_{sat}/H값의 변화에 따른 간극수압비의 변화를 도시한 것이며, k_{sat}/H값 및 n값의 변화에 따라 평가된 간극수압비 중 최대값을 별도로 도시한 결과는 그림 4(d)와 같다.

그림 4(d)에서 알 수 있듯이 점착력(c)이 증가함에 따라 간극수압비는 전체적으로 다소 감소하는 경향으로 나타났으며, 변화율은 비선형적인 것을 알 수 있다. 따라서 점착력의 변화에 대해서는 별도의 간극수압 예측도표의 작성이 필요한 것으로 판단되었다.

3.3 내부마찰각의 영향

내부마찰각의 변화에 따른 간극수압비의 영향을 분석하기 위해 표 3과 같이 토사사면의 단위중량은 1.8tf/m^{3}로 고정시키고, 토사사면의 점착력 및 내부마찰각을 각각 1.0～5.0tf/m^2(총 3종류) 및 25～35°(총 3종류)로 변화시켜 간극수압비의 변화를 분석하였다.

표 3. 내부마찰각의 영향분석에 사용한 지반정수

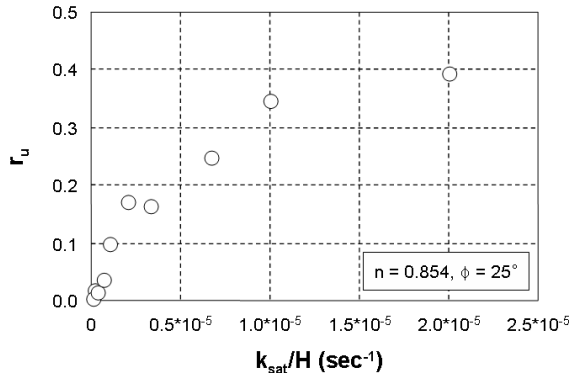
구 분	단위중량(tf/m^3)	점착력(tf/m^2)	내부마찰각(°)
토 사	1.8	1.0, 3.0, 5.0	25, 28, 35

그림 5는 흙-수분 특성곡선 계수 n값이 0.854인 경우에 대하여 k_{sat}/H값의 변화에 따른 간극수압비의 변화를 도시한 것이며, k_{sat}/H값 및 n값의 변화에 따라 평가된 간극수압비 중 최대값을 별도로 도시한 결과는 그림 5(d)와 같다.

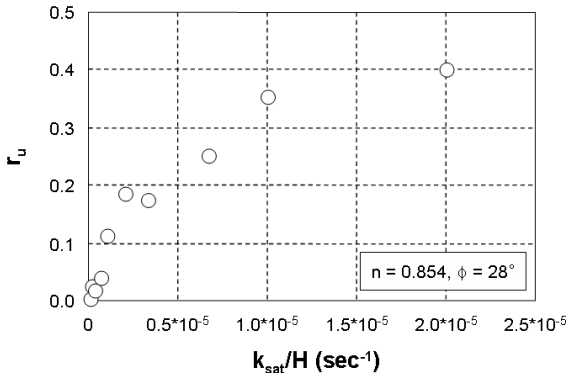
그림 5(d)에서 알 수 있듯이 내부마찰각(ϕ)의 변화에 따라 간극수압비의 변화는 거의 없는 것으로 분석되었다. 따라서 간극수압비 예측도표를 내부마찰각 28°로 설정하여 예측한 경우에 있어서 실제의 토사사면의 내부마찰각이 28°가 아닌 경우라도 간극수압비의 영향이 거의 없으므로 적용 가능함을 알 수 있다.

3.4 간극수압비 예측도표

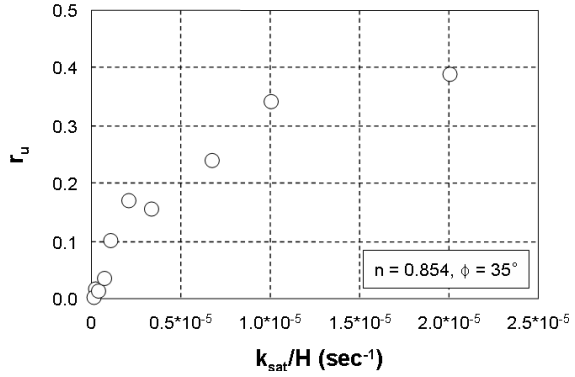
지반정수의 변화에 따른 영향분석 결과로부터 단위중량 변화에 대해서는 반비례적인 관계에 있으므로 단위중량을 1.8tf/m^{3}인 경우로 고정하여 단위중량 변화시 보정식으로 보정하는 방법을 제시하였다(한태곤, 2006). 또한 내부마찰각의 변화에 대해서는 간극수압비에 거의 영향을 미치지 않으므로 내부마찰각은 28°로 고정시켰으며, 점착력의 증가에 따라 간극수압비는 반비례적인 관계에 있으나 변화율이 일



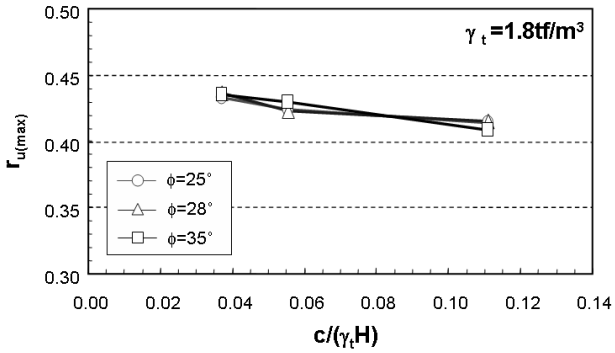
(a) ϕ=25°인 경우



(b) ϕ=28°인 경우

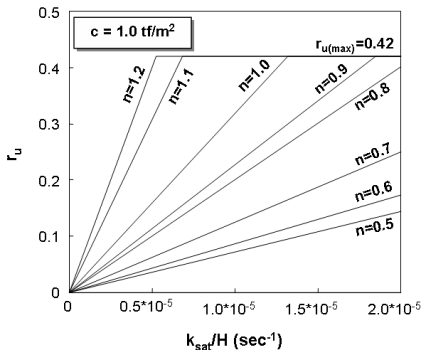


(c) ϕ=35°인 경우

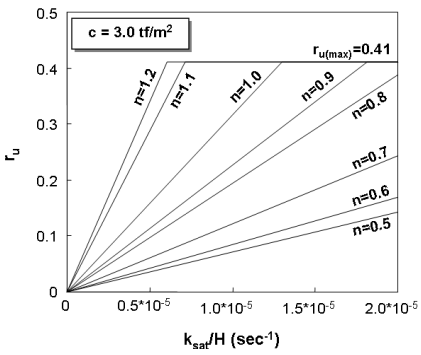


(d) 최대간극수압비의 변화

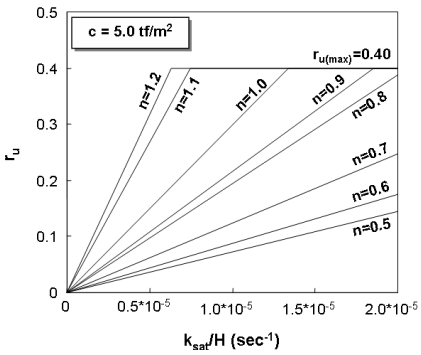
그림 5. 내부마찰각변화에 따른 간극수압비 및 최대 간극수압비의 변화(n=0.854인 경우)



(a) c=1.0tf/m^{2}인 경우



(b) c=3.0tf/m^{2}인 경우



(c) c=5.0tf/m^{2}인 경우

그림 6. 간극수압비 예측도표(한태곤, 2006)

정치 않아 1.0～5.0tf/m^2(총 3종류)에 대해서 예측도표를 그림 6과 같이 별도로 제시하였다(한태곤, 2006). 본 연구에서 제시된 간극수압비 예측도표는 강우강도가 지반의 포화투수계수 이상으로 24시간 지속될 경우에 대한 예측도표이다. 그림 6의 간극수압비 예측도표를 살펴보면 포화투수계수가 증가함에 따라 간극수압비가 증가하는 경향을 나타내는데 이는 포화투수계수가 클수록 사면내로 유입될 수 있는 강우량이 증가되어 간극수압이 증가되기 때문으로 판단된다.

그림 6의 예측도표는 토사의 단위중량(γ_t)이 1.8tf/m^{3}인 경우에 대해 제시된 값이므로 단위중량에 대해 보정이 필요하며, 이에 대한 보정은 식 (5)과 같다.

$$r_u = r_{u(\text{도표값})} \times \frac{1.8(tf/m^3)}{\text{토사사면의 단위중량}(tf/m^3)} \quad (5)$$

4. 강우시 토사사면의 간편설계기법 제시 및 검증

4.1 간편설계기법의 제시

강우시 토사사면의 포화시간은 박성원(2005)이 제시한

예측도표를 이용하여 예측할 수 있으며, 실내시험결과와 비교한 결과 적용성이 확인된 바 있다(박성원 등, 2007). 강우시 토사사면의 포화시간 예측도표는 별도의 침투류 해석 없이 사면의 기하학적 조건, 지반의 흙-수분특성, 및 포화투수계수를 이용하여 사면 포화에 소요되는 시간을 예측할 수 있는 도표이다. 본 도표의 강우조건은 강우가 지반의 포화투수계수 이상의 강도로 작용하는 조건에서 도출된 도표이며, 세로축은 강우로 인해 사면이 포화상태에 이르는 시간을, 가로축은 도표의 간편화를 위하여 지반의 포화투수계수와 사면의 높이의 비를 표시하였다.

예측도표의 활용방법을 정리하면 그림 7과 같으며, 강우시 토사사면의 포화시간이 24시간 이내로 예측된 경우에는 집중호우시 토사사면이 완전포화가 가능한 조건으로 판단하여 표 4의 현행 토사사면의 설계기준(지하수위는 지표면에 위치)을 적용한다. 만일 강우시 토사사면의 포화시간이 24시간 이상 될 경우에는 집중호우시 토사사면이 완전포화되지 못하고 불포화 상태에 있으므로 표 4의 현행 설계기준을 적용할 경우 불합리한 설계가 이루어질 수 있으므로 본 연구의 제안방법에 따라 간극수압비를 예측하여 토사사면을 설계하는 방식을 적용하는 방안을 제안한다.

본 연구에서 수행한 연구결과를 근거로 강우시 토사사면의 불포화 특성을 고려한 간편 설계법의 흐름을 요약하여 정리하면 그림 8과 같다.

4.2 간편설계기법의 검증

본 연구에서 제안한 간극수압비 예측을 이용한 간편 설계방법에 대한 적정성을 확인하기 위하여 붕괴이력이 있는 사면을 대상으로 현행 설계기법 및 침투류 해석을 이용

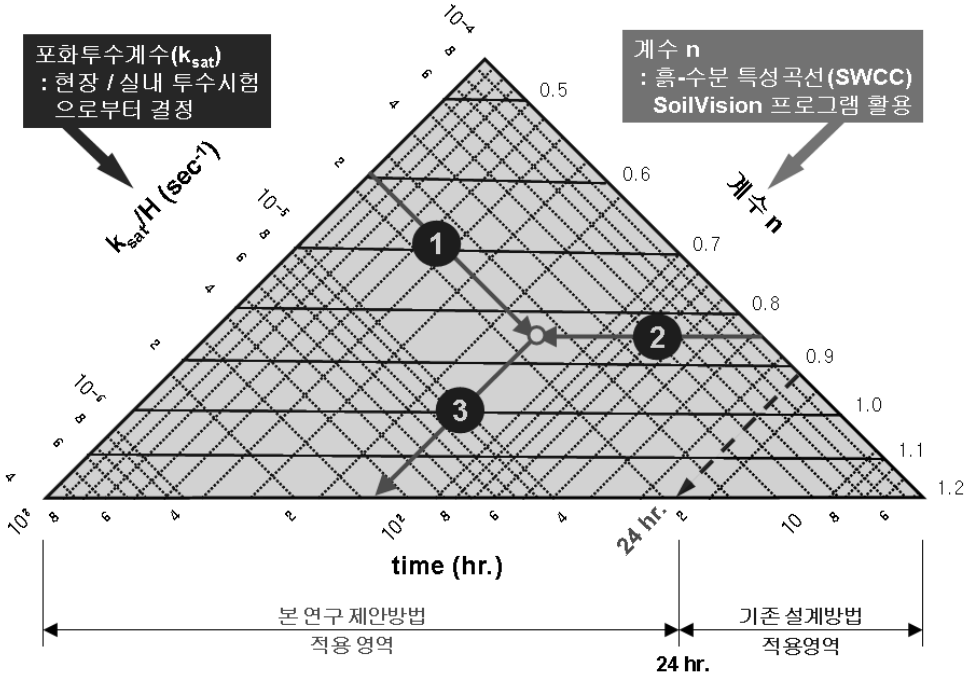


그림 7. 강우시 토사사면의 포화시간 예측도표의 활용방법

표 4. 장기적인 사면의 안정성을 확보하기 위해 해석에 적용하는 기준안전율(건설교통부, 2006)

구 분	기준안전율	참 조
건 기	Fs > 1.5	◦ 지하수가 없는 것으로 해석
우 기	Fs > 1.2 또는 Fs > 1.3	◦ 암반비탈면은 인장균열의 1/2심도까지 지하수를 위치시키고 해석 수행, 토층 및 풍화암은 지표면에 지하수를 위치시키고 해석 수행(Fs=1.2 적용) ◦ 강우의 침투를 고려한 해석을 실시하는 경우(Fs=1.3 적용) ◦ 위 2가지 조건 중 선택적으로 1가지 조건을 만족시켜야 함
지진시	Fs > 1.1	◦ 지진관성력은 파괴토체의 중심에 수평방향으로 작용시킴 ◦ 지하수위는 실제측정 또는 평상시의 지하수위 측정
단 기	Fs > 1.0	◦ 기간 1년 미만의 단기간의 안정성 검토시

* 강도정수를 한계강도가 아닌 잔류강도로 해석한 경우 : 위 기준에서 0.1 감소
* 비탈면 상하부 파괴범위 내에 가옥, 건물 등의 고정시설물이 있는 경우 : 위 기준에서 0.05 증가
* 비탈면 상부 파괴범위 내에 1, 2종 시설물의 기초가 있는 경우 : 별도 검토
* 상기 조건을 중복 적용하여 Fs < 1.0인 경우에는 최소안전율 1.0 적용

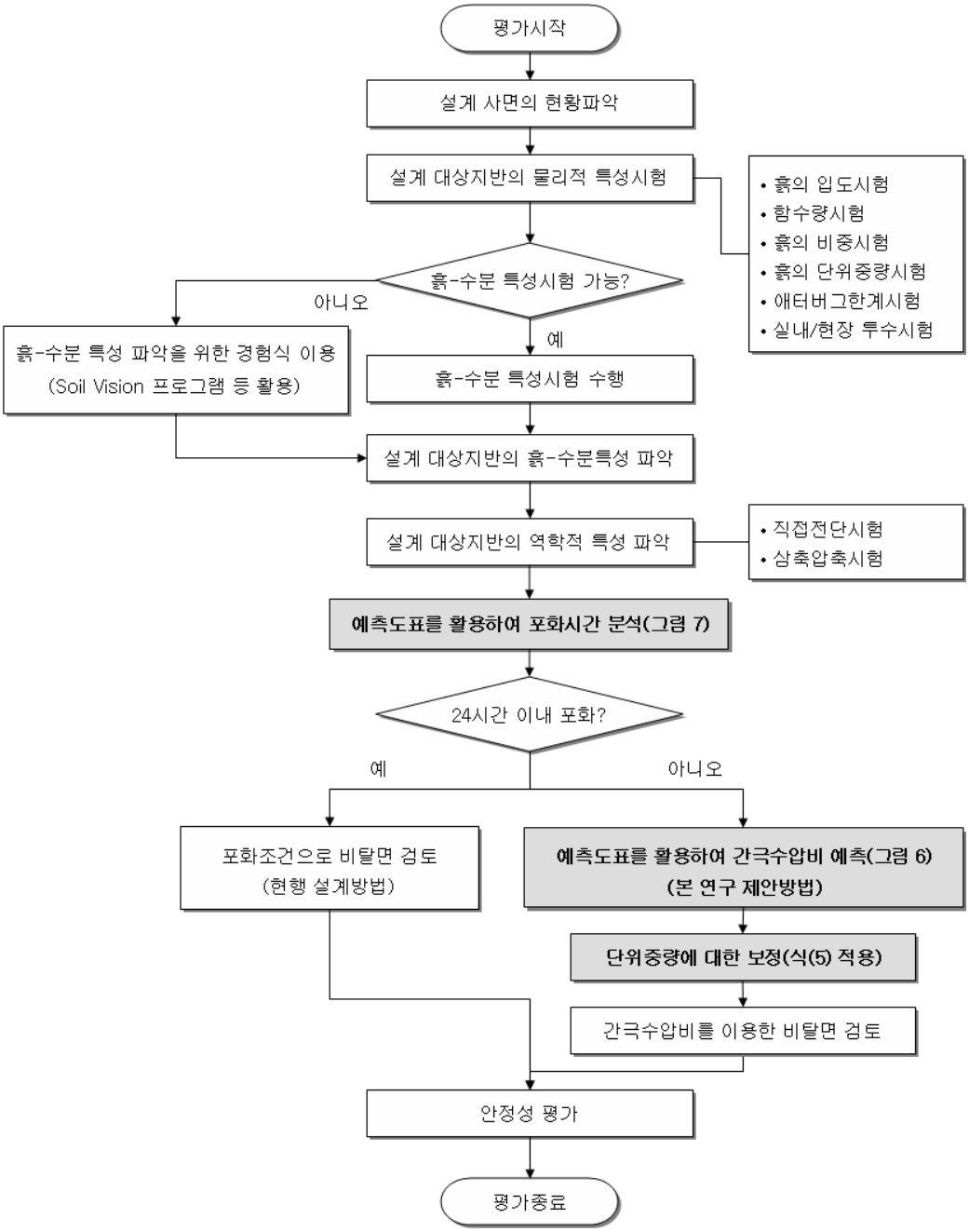


그림 8. 강우시 토사사면의 간편 설계절차

한 설계방법을 이용하여 사면의 안정성 평가를 수행하였다(한태곤, 2006). 침투류 해석시 강우조건은 1999년도 수자원 관리기법 연구개발 조사보고서(건설교통부, 2000)에 적시되어있는 전국주요지점의 확률강우량자료의 50년 빈도를 강우지속기간은 48시간을 이용하여 해석하였다. 침투류 해석에 사용한 프로그램은 SEEP/W이며, 시간에 따른 간극수압의 변화 예측을 위해 Transient Mode로 해석을 실시하여 시간경과에 따른 사면내부의 지하수위 변화, 간극수압의 변화 및 유속의 변화 등을 분석하였다. 경계조건으로 양쪽 측면 및 하부는 무한요소로 설정하여 지반의 연속성을 모델링 하였고 지표면은 강우자료를 바탕으로 강우조건을 재현하여 모델링 하였다. 연구대상 지반의 물리, 역학적 특성은 보링조사 결과와 대상지반에서 채취된 교란시료를 대상으로 실시된 실내토질시험 결과 및 문헌자료를 이용하였다. 흙-수분 특성 분석은 Soil Vision 프로그램을 이용하였으며, 한계평형해석은 SLOP/W을 이용하였다. 각 검증사례에 대한 대상지반의 흙-수분 특성곡선의 계수(Fredlund & Xing 모델) 및 강도정수를 요약하여 정리하면 표 5와 같다.

그림 7의 예측도표를 활용하여 포화에 소요되는 시간을 예측한 결과는 표 6과 같으며, 포화시간은 100～200시간으로 예측되었다. 즉, 강우강도가 지반의 포화투수계수 이

상으로 집중호우가 100～200시간 동안 지속적으로 발생할 때 사면내 포화가 발생하는 것으로 이는 현실적으로 강우로 인한 사면의 포화는 발생하지 않을 것으로 판단되므로 본 사면의 안정성 평가는 강우시 부분포화조건으로 간극수압비를 이용한 사면안정성 평가를 실시하였다. 만일 포화시간이 24시간 이내로 예측될 경우에는 토사사면의 강우시 현행설계기준인 지표면까지 완전포화조건으로 하여 사면안정해석을 실시한다. 또한 그림 6의 간극수압비 예측도표를 활용하여 검증사례 사면의 간극수압비 예측 및 단위중량에 대한 보정을 실시한 결과를 정리하면 표 6과 같다.

이상의 간편 설계절차에 의한 간극수압비 예측결과를 이용하여 사면안정 해석결과를 요약하면 표 7과 같다. 표 7에서 Case 1(건조시)은 비교를 위해 수행된 간극수압이 없는 상태에서의 사면안정해석결과이며, Case 2(완전 포화시)는 토사사면의 강우시 현행설계기준인 지표면까지 완전포화조건으로 하여 사면안정해석을 실시한 경우에 해당된다. 또한 Case 3(침투류 해석)은 재현기간 50년 확률강우량(지속기간 48시간)을 적용하였으며 지하수 유출상황

표 5. 흙-수분 특성곡선의 계수 및 강도정수

검증 사례	지 층	USCS	k_{sat} (m/s)	흙-수분 특성곡선 계수				강도정수		
				S	a	n	m	γ_t (tf/m^3)	c (tf/m^2)	ϕ (°)
No. 1	풍화토	ML	1.37×10^{-4}	0.523	2499.79	1.22	0.53	1.750	1.20	32.9
No. 2	붕적토	SC	4.20×10^{-5}	0.350	155.43	1.20	1.51	1.800	0.88	21.0
	풍화토	GM	1.00×10^{-4}	0.333	0.92	4.74	0.72	1.900	2.00	33.0
No. 3	풍화토	SM	4.00×10^{-5}	0.394	1.83	12.62	0.14	1.820	0.60	20.0
No. 4	풍화토	SM	4.00×10^{-5}	0.394	1.83	12.62	0.14	1.752	1.11	25.2
No. 5	붕적토	SM	1.00×10^{-4}	0.394	1.60	20.0	0.11	1.700	1.00	28.0
	풍화토	SM	2.00×10^{-4}	0.394	2.35	2.24	0.28	1.800	2.50	33.0

표 6. 간편 설계절차에 의한 사면 포화시간 및 간극수압비 예측

검증 사례	지 층	H (m)	k_{sat} (m/s)	포화시간 예측(그림 7)			간극수압비 예측(그림 6)		단위중량에 대한 보정(식 (5))	
				계수 n	k_{sat}/H (sec^{-1})	포화시간 (hr.)	c (tf/m^2)	r_u	γ_t (tf/m^3)	r_u
No. 1	풍화토	40	1.37×10^{-4}	1.2	3.4×10^{-6}	120 > 24	1.0	0.27	1.750	$0.27\times\frac{1.8}{1.75}=0.28$
No. 2	붕적토	12	4.20×10^{-5}	1.2	3.5×10^{-6}	120 > 24	1.0	0.28	1.800	보정 필요 없음
No. 3	풍화토	10	4.00×10^{-5}	1.2	4.0×10^{-6}	110 > 24	1.0	0.31	1.820	$0.31\times\frac{1.8}{1.82}=0.31$
No. 4	풍화토	19	4.00×10^{-5}	1.2	2.1×10^{-6}	200 > 24	1.0	0.17	1.752	$0.17\times\frac{1.8}{1.752}=0.17$
No. 5	붕적토	45	1.00×10^{-4}	1.2	2.2×10^{-6}	200 > 24	1.0	0.18	1.700	$0.18\times\frac{1.8}{1.7}=0.19$
	풍화토	45	2.00×10^{-4}	1.2	4.4×10^{-6}	100 > 24	3.0	0.30	1.800	보정 필요 없음

주) 포화시간 예측도표에서 계수 n의 최대값은 1.2를 적용하였음.

표 7. 사면안정해석결과 비교

검증사례	사면의 활동에 대한 안전율				비 고
	Case 1(건조시)	Case 2(완전 포화시)	Case 3(침투류 해석)	Case 4(본 연구)	
No. 1	1.285	0.410	0.820[*1]	0.825	
No. 2	1.096	0.650	1.096[*2]	0.794	
No. 3	1.347	0.609	1.026[*3]	0.969	
No. 4	1.204	0.598	1.170[*3]	1.019	
No. 5	1.482	0.760	1.146[*4]	0.857	

주) [*1] 실제 강우기록자료 적용
[*2] 재현기간 50년 확률강우량(지속기간 48시간) 441.8mm(태백지점) 적용
[*3] 재현기간 50년 확률강우량(지속기간 48시간) 427.9mm(강릉지점) 적용
[*4] 재현기간 50년 확률강우량(지속기간 48시간) 427.2mm(홍천지점) 적용

을 고려하여 지하수위를 가정하여 침투류해석을 실시하고 이를 바탕으로 사면안정해석을 실시하였다. Case 4는 본 연구에서 제시한 간편 설계절차에 따라 예측된 표 6의 간극수압비를 이용하여 사면안정해석을 수행하였다.

표 7의 검증사례 사면에 대한 사면안정해석결과를 분석해 보면, 강우시 현행 설계방법(Case 2) 및 본 연구에서 제시한 방법(Case 4) 모두 우기시 기준안전율 1.2 미만으로 평가되어 붕괴된 사면의 불안정성을 알 수 있었다. 그러나 현행 설계방법에 의한 사면안정해석결과는 재현기간 50년 확률강우량(지속기간 48시간)을 바탕으로 침투류 해석을 수행하여 계산된 간극수압을 적용한 사면안정해석결과(Case 3)에 비해 지나치게 과소 평가되는 경향으로 분석되었다. 반면 본 연구에서 제시한 간극수압 예측도표를 활용한 사면안정해석결과(Case 4)는 현행 설계방법(Case 2) 보다는 크고 재현기간 50년 확률강우량(지속기간 48시간)을 바탕으로 침투류 해석을 수행하여 계산된 간극수압을 적용한 사면안정해석결과(Case 3) 보다는 대체적으로 작게 평가되어, 본 연구에서 제시한 간극수압 예측도표를 활용한 사면안정해석방법이 강우시 토사사면의 안정성을 평가하는데 있어서 현행 설계방법에 비해 합리적인 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 제언

본 연구는 강우시 토사사면을 대상으로 간편 설계기법을 제안하고자 기존연구(박성원, 2005)의 포화시간예측도표를 실내실험 및 SWCC시험을 통해, 검증함과 아울러 매개변수 분석을 이용한 간극수압비 예측도표를 제시, 실무적인 차원에서의 활용이 가능하도록 확장하여 강우시 토사사면의 간편 설계기법을 제시하였으며, 본 연구에서 제안한 간극수압비 예측도표에 의한 강우시 토사사면의 설계방안에 대한 적정성을 검증하기 위해 실제붕괴현장을 대상으로 비교연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 기존연구(박성원, 2005)의 간극수압비 예측도표는 지반정수 값이 단위중량 1.9tf/m^3, 점착력 1.0tf/m^2, 내부마찰각 28°으로 제한하고 있어 매개변수 변화연구를 수행하여 보정식 및 예측도표를 제시하였다.

(2) k_{sat}/H값 및 n값의 변화에 따라 평가된 간극수압비 중 최대값을 도표화하여, 분석한 결과 토사의 단위중량이 증가함에 따라 간극수압비는 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한 토사의 점착력이 증가함에 따라 간극수압비는 다소 감소하는 경향으로 나타났으며 변화율은 비선형적으로 나타나 별도의 간극수압 예측도표를 작성하여 제시하였다. 반면 내부마찰각(ϕ)의 변화에 따른 간극수압비의 변화는 거의 없는 것으로 분석되었다.

(3) 본 연구에서 수행한 연구결과를 근거로 강우시 토사사면의 사면 안정성 평가를 위해 간극수압비의 정량적인 예측을 통한 간편 설계기법을 제시하였으며, 제시된 간편 설계기법을 이용하여 붕괴이력이 있는 5개의 사면에 대해 사면안정해석을 수행한 결과 강우시 토사사면의 안정성을 평가하는데 있어서 현행 설계방법에 비해 합리적인 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2000), *1999년도 수자원관리기법개발연구보고서*, 한국건설기술연구원, pp. 185～254.
2. 건설교통부(2006), 건설공사 비탈면 설계기준, p. 127.
3. 박성원(2005), *강우를 고려한 화강풍화토 사면의 설계방법에 관한 연구*, 박사학위논문, 홍익대학교, pp. 60～141.
4. 박성원, 한태곤, 김홍택, 백승철(2007), 지속적인 강우에 의한 토사사면의 포화시간 예측, *한국지반환경공학회 논문집*, 제8권, 제4호, pp. 67～74.
5. 한태곤(2006), *실내모형실험 및 매개변수 분석에 의한 강우시 토사사면의 간편 설계기법 제안*, 박사학위논문, 홍익대학교, pp. 113～167.
6. Cai, F. and Ugai, K.(2004), Numerical Analysis of Rainfall Effects on Slope Stability, *International Journal of Geomechanics*, ASCE, Vol. 4, No. 2, pp. 69～78.
7. SEEP/W User's Guide(2002), GEO-SLOPE International Ltd. 452 pp.
8. SLOPE/W User's Guide(2002), GEO-SLOPE International Ltd. 502 pp.
9. Soil Vision User's Manual(2004), Soil Vision Systems Ltd. 126 pp.
10. Turner, A. K. and Schuster, R. L.(1996), Landslides : Investigation and Mitigation, *Transportation Research Board Special Report 247*, National Research Council, National Academy Press, p. 521.

(접수일: 2007. 8. 1 심사일: 2007. 8. 24 심사완료일: 2007. 9. 14)