

호우시 도로성토사면의 사면불안정 분석

Instability Analysis of Road Landfill Slope during Heavy Rainfall

김영묵* · 박향근** · 최문희***

Kim, Young - Muk · Park, Hyang - Keun · Chol, Mun - Hee

Abstract

The study of seepage behavior is very important to slope stability of road landfill for heavy rainfall season. This study is done to propose more stable of road landfill based on analysis of seepage behavior and slope stability for some cases of road landfill. The selected sections of collapsed road landfill are most general case of road landfill, a case is landfill on the ground area and another case is on the slope area. The results of this study is summarized as follows.

It is founded that the road landfill on the ground area is increased saturation region due to rainfall infiltration, and the seepage behavior of road landfill is solved by theory of unsaturated flow. The road landfill is more unstable due to rainfall infiltration at the slope surface, especially during heavy rainfall.

The case of road landfill on the slope area is analyzed in consideration of slope surface infiltration, and it is founded that the slope instability is increased because of rainfall infiltration. The drain layer located on the original ground which made by more permeable materials could be good action of slope stability in the case of road landfill on the slope area.

Keywords : Instability Analysis, Heavy Rainfall, Unsaturated Flow, Road Landfill, Landfill on the Slope

요 지

침투거동에 대한 연구는 우기시 도로성토사면의 안정성 여부에 매우 중요하다. 본 연구는 도로성토사면의 몇가지 사례들에 대한 침투거동과 사면안정성의 분석을 근거로 하여 좀더 안정적인 도로성토사면의 유지 방안을 제안한 것이다. 본 연구 사례에서 선택한 도로붕괴단면은 가장 일반적인 평지부 도로성토사면의 경우와 산지부에 대한 도로성토사면인 경우이다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

평지부 성토사면은 강우시 표면으로부터 침투가 시작되어 점차 성토 제체 내로 확대되었으며, 이때 도로성토사면의 침투거동은 불포화 흐름이론을 근거로 해석하였다. 특히 평지부 성토사면은 호우기간동안 사면표면에서의 강우침투로 인해 좀더 불안정하게 되었다.

산지부 성토사면의 경우 사면표면부로부터의 침투거동을 고려하여 해석하였으며, 사면표면부로부터의 강우침투로 인해 사면 불안정이 증가되었음을 알 수 있었다. 산지부 성토사면의 경우 투수성이 큰 재료를 이용하여 원지반에 설치한 배수층은 도로 성토사면의 안정성 증대에 유용한 영향을 줄 것으로 판단된다.

주요어 : 사면불안정성, 호우, 불포화 흐름, 도로성토사면, 편성토사면

* 정회원 · 한밭대학교 토목 · 환경 · 도시공학부 교수, 공학박사

** 비회원 · (주)일신엔지니어링 대리

*** 정회원 · 충청남도 도청 도로과

1. 서론

강우로 인한 사면 불안정에 대한 문제는 주로 자연재해, 즉 산사태에 대한 문제로 다루어져 왔다. 산사태를 비롯한 많은 사면파괴가 우기에 집중되고 있고, 특히 장기간의 강우가 계속되거나 집중호우가 발생하는 경우 사면파괴로 인한 피해는 더욱 커지고 있어 강우가 사면 불안정에 가장 중요한 요인으로 작용하고 있음은 이미 기존의 여러 연구에서도 밝힌 바 있다(홍원표, 1991; Kim, Hong and Kim, 1992).

강우가 사면 불안정에 끼치는 영향을 알기 위해서는 근본적으로 강우가 사면 내로 침투하는 과정에 대한 이해를 전제하고 있다. 즉, 강우가 발생하면 사면침투가 시작되는데 이 때 사면에서의 침투현상은 불포화 흐름으로 나타나며, 불포화 흐름이 계속되는 경우 지반내의 토질은 점점 포화가 발전되는 과정에서 부분적으로 지하수위가 형성되거나 존재하고 있는 지하수위의 상승으로 이어져 궁극적으로 사면이 불안정하게 되기 때문이다. 강우의 침투거동에 대한 연구는 일차원적인 흐름의 초보적인 연구로부터 불포화 흐름을 고려한 침투거동에 이르기까지 다양한 연구가 진행되었으며, Brooks and Corey(1964) 등 여러 예측 이론의 연구와 더불어 이에 대한 타당성이 정립되어 왔다.

Lumb(1975) 등 여러 학자들의 연구결과는 지표면으로부터의 강우침투가 발생될 때 습윤영역(Wetting Zone)의 확대에 의해 사면의 안정성이 급격히 저하됨을 밝히고 있다. Hong 등(1997)은 절토사면에서의 침윤전선의 확대와 지하수위의 상승에 의한 안정성 비교를 통하여 침윤전선(Wetting Front)의 확대가 안정성 감소에 큰 영향을 주고 있음을 밝히고 있다. 또한, 이승래 등(2004)은 강우가 지속되는 동안 침윤전선의 영향으로 사면활동의 위치가 다를 수 있으며, 특히 표면파괴의 가능성을 지적하고 있다. 이러한 연구들은 근본적으로 불포화 흐름을 전제하고 있으며, 또한 이를 고려하는 안정성 분석이 필요한 것이다.

통상적으로 도로의 사면 안정에 관련하여 사면의 강우침투에 대한 고려는 절토사면의 경우에는 지하수위의 상승 및 이로 인한 포화영역의 확대를 고려하여 해석하고 있으나, 성토 사면의 경우 특별한 경우를 제외하고 우기에 대해 별도의 고려를 하지 않는 경우를 여러 사례에서 볼 수 있다. 그러나 성토 사면의 경우에도 강우로 인한 침투가 발생될 때 성토재료가 포화되어 전단응력이 증가되고 지하수위가 상승하는 경우 간극수압의 변화로 인한 전단강도의 감

소를 초래하게 되므로 결국 사면의 안전율은 감소될 것이다. 즉, 지하수위의 상승여부 및 이에 대한 고려여부는 성토 사면의 안정성 판단에 중요한 요인이 되므로 성토 사면에서의 강우시 침투 과정 및 지하수위의 형성과정을 이해하는 것이 필요하다.

본 연구는 호우시 파괴된 충남 지역의 파괴 사면 중 평지부의 성토 사면과 산지부의 편성토 사면 두 곳을 연구대상으로 선택하였다. 성토 사면에서의 강우침투과정 및 지하수위의 형성과정을 이해하고 호우시 파괴된 사면의 불안정성을 분석하기 위해 대상단면에 대해 토질시험을 행하였으며, 이를 근거로 하여 침투거동에 대한 수치해석 및 안정해석을 행하여 그 결과를 분석하였다.

침투거동에 대한 연구는 불포화 흐름을 고려한 유한요소법에 의하였으며, 그 결과를 이용하여 안정해석을 행하여 강우가 사면 불안정에 주는 영향을 평가하였다. 이 때 강우의 크기는 중요한 인자로 작용하게 되는데, 본 연구에서는 실제 사면파괴가 발생하였을 때 인근의 측정자료를 활용하였다.

2. 강우침투와 사면의 안정성

2.1 침윤전선의 변화

지반 내 물의 이동으로 인한 함수상태의 변화과정은 그림 1과 같다. 여기서, 전이영역(Transmission Zone)은 일정한 크기로 거의 완전포화상태에 가까운 영역이며 습윤영역은 간극수압과 함수비의 관계가 급변하는 영역으로 이 영역이 확대됨에 따라 부(-)간극수압이 감소되어 사면의 안정을 저하시킨다. 이때 습윤영역이 확대되는 침윤전선에 대하여 Lumb(1975)는 실험을 통해 침윤전선 깊이를 구할 수 있는 간단한 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$z_w = \frac{k_s t}{n(S_f - S_o)} \quad (1)$$

여기서 z_w : 침윤전선 깊이

k_s : 투수계수

t : 강우지속기간

n : 공극률

S_f : 종기의 포화도

S_o : 초기의 포화도

조성은과 이승래(2000)는 Mein and Larson(1973)의 침투 이론을 이용하여 침윤전선 깊이를 강우강도로부터 구하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$z_w = \frac{k_s \Psi_f}{i - k_s} \quad (2)$$

여기서 Ψ_f : 침윤전선에서의 모관흡수력
 i : 강우강도

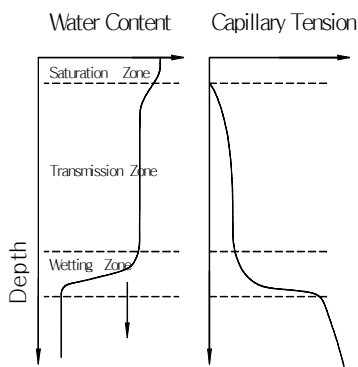


그림 1. 일반적인 침투특성

2.2 지배방정식

불포화 흐름을 고려한 침투거동해석을 위한 지배 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

여기서, H : 전수두

k_x : 방향의 투수계수

k_y : 방향의 투수계수

Q : 경계유량(boundary flux)

θ : 체적함수비

체적함수비에서의 변화는 방정식 내에서의 간극수압 변화와 관계가 있다.

즉,

$$\partial \theta = m_w \gamma_w \partial (H - y) \quad (4)$$

여기서, m_w : 함수곡선(Storage Curve)의 기울기

식 (4)의 $\partial \theta$ 를 식 (3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} = m_w \gamma_w \frac{\partial (H - y)}{\partial t} \quad (5)$$

위의 식에서 높이는 일정하고 시간에 대해 y 를 미분하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (6)$$

2.3 안정해석이론

불포화 흐름을 고려하는 사면안정해석을 위한 전단강도식은 Fredlund 등(1978)에 의해 제안된 식에 의한다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (7)$$

여기서, c' 는 유효점착력, σ 는 전응력, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, ϕ' 는 순연직력에 대한 유효마찰각, ϕ^b 는 모관흡수력의 증가에 따라 나타내는 겉보기점착력의 증가를 표현하는 유효마찰각이다.

사면의 안정계산을 위해 사용된 이론은 붕괴면을 절편으로 가정하여 각 절편에 작용하는 힘과 모멘트의 평형을 취한 힘평형이론과 모멘트평형이론이다. 이 두 가지 이론에 의한 해석은 사면의 저면 붕괴면을 가정한 것이며, 불포화된 흙을 고려한 한계상태에서 안정에 대한 전단력의 크기는 Fredlund 등(1978)이 제안한 이론을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_m = \frac{\beta}{F_s} (c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b) \quad (8)$$

여기서, S_m 은 절편저면에 작용하는 전단력이며, F_s 은 안전율, 그리고 β 는 각 절편의 저면길이이다.

3. 해석모델

3.1 대상 모델

호우시 도로성토 사면의 불안정 해석을 위해 본 연구에 사용된 모델은 충남의 호우시 성토 사면붕괴가 발생된 지역을 선택하였으며, 이때 일반적인 평지부 성토 사면과 산

지부 성토인 편성토 사면(이하 편성토 사면)으로 나누어 선정하였다. 편성토 사면의 경우 토사 측구로부터의 침투 능력을 검토하기 위해 토사 측구만으로도 침투를 고려한 해석을 행하였다. 또한, 보다 안정된 편성토 사면을 구성하기 위한 방안의 하나로서 성토부 하부에 배수층을 설치된 모델을 추가하여 배수층이 성토체의 안정에 기여하는 바를 검토하였다. 이는 현장에서 실용적으로 시공할 수 있는 방안을 제시하기 위한 것이다.

그림 2는 평지부 성토 사면의 유한요소를 그린 것으로 1,565개의 절점과 1,184개의 유한요소로 구성되어 있다.

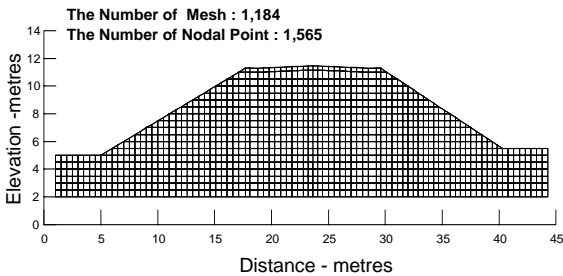


그림 2. 평지부 성토 사면의 유한요소

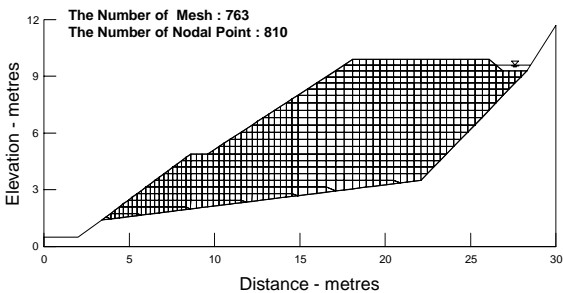


그림 3. 편성토 사면의 유한요소

편성토 사면은 그림 3과 같이 810개의 절점과 763개의 유한요소로 구성되어 있으며, 배수층이 설치된 편성토 사면은 그림 3의 사면 조건에서 성토 하단부에 배수층을 설치함으로 인해 854개의 절점과 803개의 유한요소로 되어 있다. 이 때 활용된 프로그램은 상용프로그램으로 불포화 흐름을 고려한 침투거동의 수치해석에서 SEEP/W이고 안정해석은 SLOPE/W에 의해 수행되었다.

3.2 토질조건

붕괴 지역의 현장시험결과 표 1과 같으며, 해석단면의

성토재료는 전형적인 화강풍화토로서 일반적인 토질특성 및 입도분포곡선은 각각 표 2 및 그림 4와 같다. 지반의 초기 조건은 대략 최적함수비 부근의 함수조건으로 일정하게 가정하였다. 이는 선행 강우가 성토체 내부에 균등한 함수조건이 되도록 영향 준 것으로 판단한 것이다.

불포화 흐름의 특성을 지배하는 함수특성곡선은 그림 5와 같이 본 지역의 토질 특성과 유사한 류지협(1995)의 안정풍화토 자료로부터 추정하였다. 불포화 흐름시 간극수압에 대한 투수계수의 함수특성곡선은 그림 6과 같이 실제 적용에 있어 여러 사례에서 검증되고 있는 Green and Corey의 방법(1971)으로 예측된 결과를 사용하였다.

평지부 성토 사면의 경우 성토 전 평지의 지표면으로부터 지표하 1m지점에 지하수위가 존재하는 것으로 했으며, 편성토 사면은 사면의 바닥을 불투수층으로 고려하였는데, 이는 현장의 구성조건을 참고로 하여 결정한 것이다.

표 1. 붕괴지역의 현장시험결과

위치	토 성 개 요							
	비 중	자연 함수비 (%)	액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	소성 지수 (%)	0.075mm 체 통과율	균등 계수	통일 분류
공주	2.72	13.8			N.P.	13.3	60	SM

표 2. 성토재료의 토질특성

전체 단위중량 (t/m ³)	투수계수 (m/hr)	강도정수		다짐시험결과 (A-다짐)	
		c(t/m ²)	φ(°)	최대건조 단위중량 (t/m ³)	최적 함수비 (%)
1.963	0.0161	1.0	31	1.725	9.5

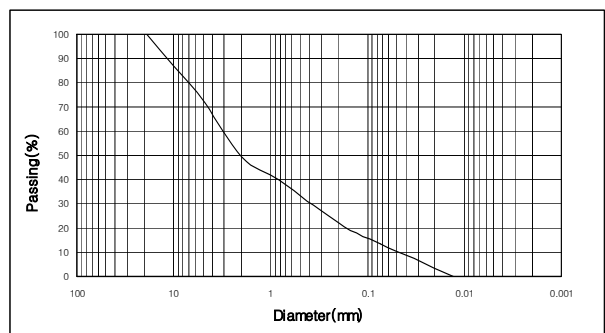


그림 4. 성토재료의 입도분포곡선

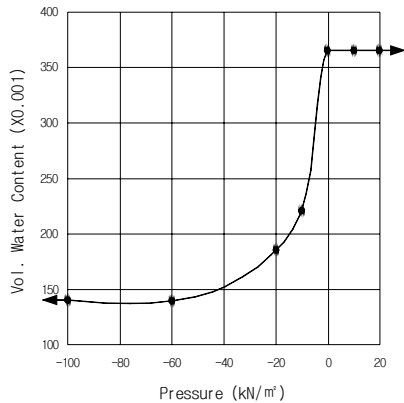


그림 5. 함수특성곡선

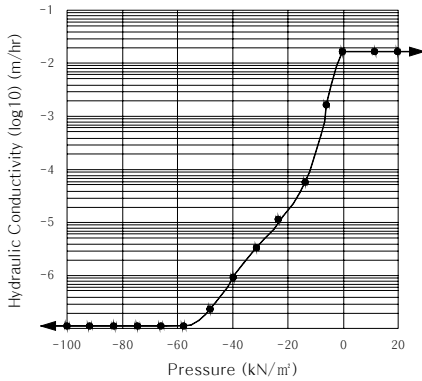


그림 6. 간극수압에 대한 투수계수의 함수곡선

3.3 강우조건

그림 7의 강우자료는 강우시 침투거동을 분석하기 위해 사용된 자료로서 모델의 해석에 사용된 인근지역의 붕괴당시 강우자료이다. 그림 5의 강우자료에 의하면 1일 180mm의 강우 후 3일 동안 무강우가 존재하였으며, 그 후 1일 45mm의 2일 동안 연속된 강우가 있다가 25일에는 1일 350mm의 강우가 내려 이 때 사면이 붕괴되었다.

강우침투는 근본적으로 강우시작으로부터 사면으로의 침투가 시작되는 것으로 하였으며, 사면활동에 직접적으로 영향을 준 것으로 판단되는 19일 강우발생 후 침투가 발생하는 것으로 하였다. 이때 유한요소해석시 강우조건은 일일강우량을 강우강도로 환산하여 적용하였다.

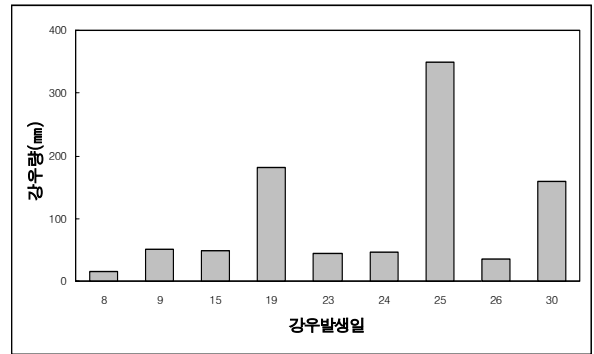


그림 7. 사면붕괴 전 후 일별 강우발생현황

4. 해석결과 및 분석

4.1 침윤전선의 변화

4.1.1 평지부 성토 사면의 경우

강우초기 지표면으로부터 침투가 시작되면 사면 표면으로부터 포화도가 상승하면서 모관력은 감소하게 된다. 점차 침투수의 영향이 체내로 확대되었으며, 초기 180mm의 선형강우가 발생된 후 3일간의 무강우 기간에 지하수위선은 불포화흐름으로 인해 성토 하단부에서 아주 느린 속도로 상승되었다.

강우가 다시 시작되면서 성토체 내의 침윤전선이 확대되어 1일 350mm의 호우가 시작되는 144hr에서는 체내로 거의 침윤전선이 도달되어 거의 대부분이 포화상태에 가까워 졌다. 그림 8은 침윤전선의 확대 모습을 그린 것으로 시간이 경과함에 따라 사면이 점차 포화되는 모습을 보이고 있다. 즉, 상토사면의 안정성 분석을 행하는 경우 절토사면과 달리 일반적으로 지하수위의 변화에 대해서는 고려되지 않고 있는데, 본 모델의 경우 체내로의 포화 영역이 확대됨에 따라 그림 9와 같이 지하수위가 상승되어 성토체의 안정에 중요한 영향을 줄 수 있음을 보여 주고 있다.

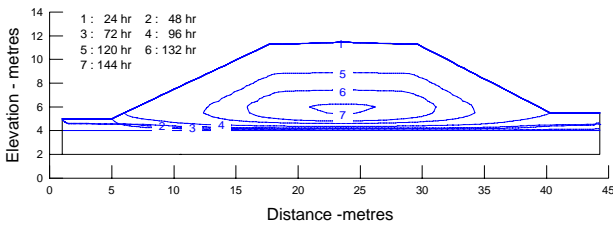


그림 8. 평지부 성토 사면의 강우개시 후 경과시간에 따른 침윤전선의 변화

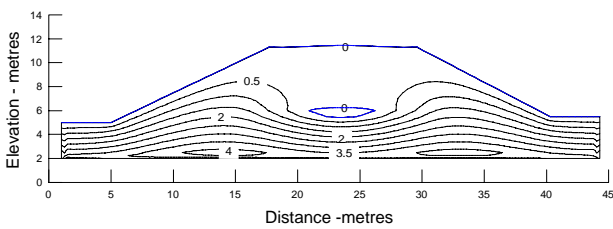


그림 9. 평지부 성토 사면의 강우개시 144hr 경과 후 압력수두의 변화

4.1.2 산지부 편성토 사면의 경우

편성토 사면의 표면 및 토사층구로의 침투를 고려한 경우 그림 10과 같이 강우시 편성토 사면 표면과 토사층구로부터 측면 침투가 발생될 때 사면 내 침윤전선의 거동을 보이고 있으며, 침투 발생 후 1일 350mm의 집중호우가 시작되던 강우개시 후 132hr에서 거의 포화되었다.

그림 11은 편성토 사면의 표면 및 토사층구에서의 침투를 고려하여 편성토 사면의 저부에 투수성이 큰 배수층을 설치한 경우로서 배수층으로의 배수가 진행됨에 따라 배수층이 설치되지 않은 경우보다 느리게 포화영역이 확대되는 것을 알 수 있다.

그림 12와 그림 13은 산지부 편성토 사면의 강우개시 132시간 경과후의 압력수두의 변화를 그린 것으로 배수층의 설치 유무에 따라 지하수위의 위치 및 압력수두가 달라 나타나고 있다.

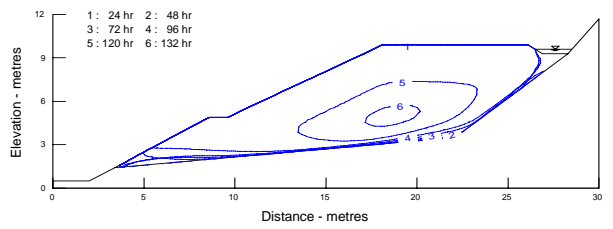


그림 10. 편성토 사면의 경과시간에 따른 침윤전선의 변화

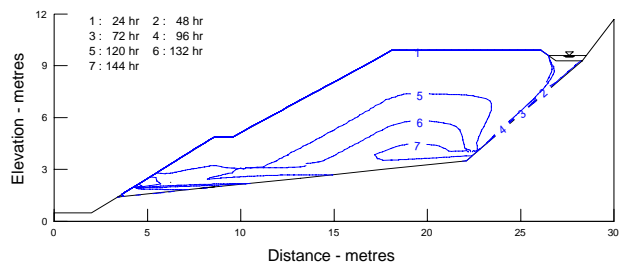


그림 11. 편성토 사면의 경과시간에 따른 침윤전선의 변화(배수층 설치)

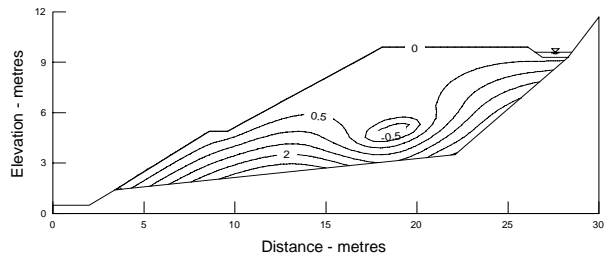


그림 12. 편성토 사면의 강우개시 132hr 경과 후 압력수두의 변화

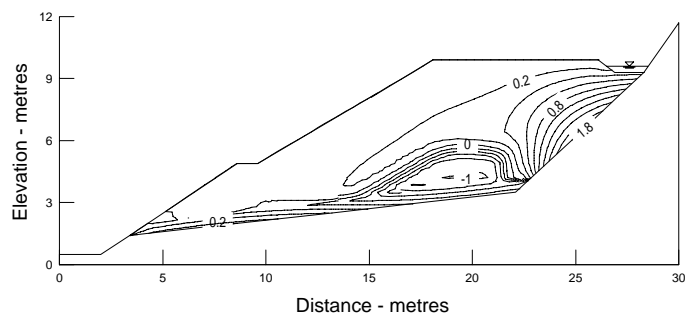


그림 13. 편성토 사면의 강우개시 132hr 경과 후 압력수두의 변화(배수층 설치)

4.2 간극수압의 변화

4.2.1 평지부 성토 사면의 경우

그림 14는 강우침투로 인한 성토체 내의 간극수압 변화를 알아보기 위해 선택한 점들의 위치를 표시한 것으로 그 결과는 그림 15와 같다. 여기서 간극수압의 크기는 수두(head)로 표시하였는데, 성토체의 표면에 가까운 No.1과 No.2는 강우 초기에 침투수에 의한 부간극수압의 감소 후 간극수압의 변화 폭은 적게 나타나며 표층에서 깊이가 깊어질수록 지하수위 형성 및 상승으로 인해 정수압의 크기가 증가하여 큰 변화 폭을 보이고 있다.

그림 15와 같이 강우개시 후 4일 동안 강우침투로 인해 성토체체는 초기 상태보다 부분적으로 포화도가 증가되면서 간극수압은 변화되나 전체적으로 부(-)의 간극수압 상태를 유지하고 있으며, 집중호우가 내리기 시작하는 6일 이후 지하수위는 빠른 시간 내에 상승하여 성토체체가 정(+)의 간극수압 상태가 되고 있다. 이는 강우침투수가 성토체체에 침투되어 완전포화에 도달되기까지 지속적인 불포화 흐름이 요구되기 때문이며, 제체가 거의 포화상태에 이르게 되면 지속적인 강우침투수에 의해 빠르게 포화되면서 정의 간극수압이 발생한다. 간극수압의 이러한 변화 형태는 기존의 연구에서도 증명된 바 있다(Saikajo and Kato, 1999).

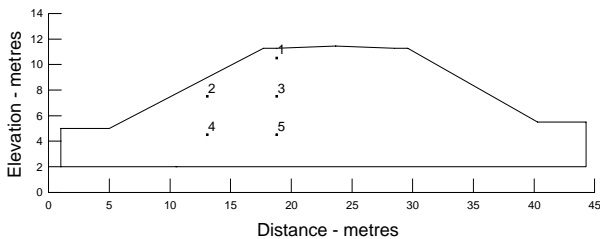


그림 14. 평지부 성토 사면 내 간극수압의 측정위치

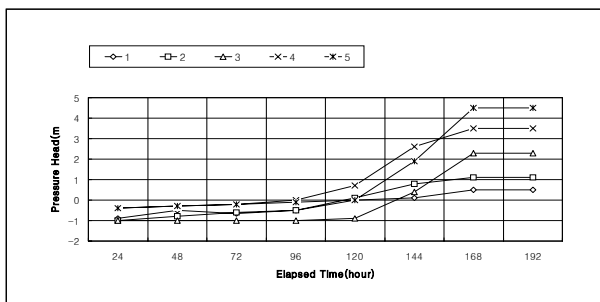


그림 15. 강우시 평지부 성토 사면 내 압력수두의 변화

4.2.2 산지부 편성토 사면의 경우

강우침투로 인한 편성토 사면의 성토체 내의 간극수압의 변화를 알아보기 위해 편성토 사면의 경우 그림 16과 같이 6개의 지점들을 선정하였다. 성토부 표면 및 토사측구로의 침투를 고려한 경우 강우지속시간에 따른 간극수압의 변화를 분석한 결과는 그림 17과 같다.

1일 180mm의 호우가 발생한 이후 3일간의 무강우 동안 성토체는 대부분의 측정점에서는 간극수압이 부(-)값을 유지하고 있었으나, 다시 강우가 시작되면서 불투수 경계층 근처의 No.3에서 정(+)의 간극수압이 발생하고 있다. 한편, 1일 360mm의 호우가 시작되기 전 이미 성토체 대부분은 지하수위 상승과 더불어 지표면 부근까지 정의 간극수압을 보이고 있다.

한편 토사측구로부터의 측면침투만 고려한 경우에는 그림 18과 같이 간극수압은 서서히 느리게 상승되며, 사면 표면에 가까운 부분은 강우의 영향이 적어 대부분 부간극수압의 상태를 보이고 있다. 이는 토사 측구로의 침투 영향은 사면으로의 침투에 비해 상대적으로 적을 수 있다는 것을 의미하며, 편성토 사면의 안정성 유지를 위해서는 사면 표면부의 보호공법을 활용할 수 있음을 추론할 수 있다.

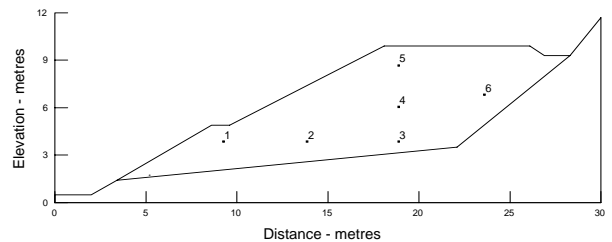


그림 16. 편성토 사면 내 압력수두의 측정위치

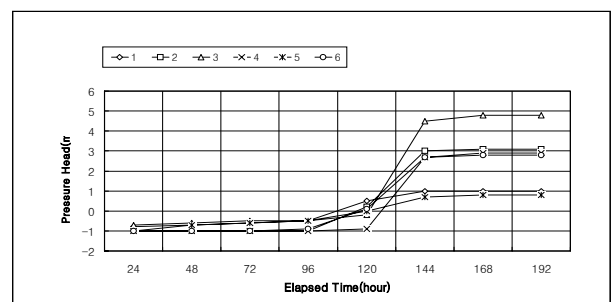


그림 17. 강우시 편성토 사면 내 압력수두의 변화

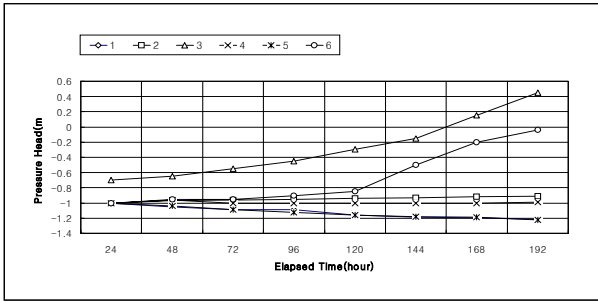


그림 18. 강우시 편성토 사면 내 토사측구로의 유입만을 고려한 경우 압력수두의 변화

그림 19는 배수층이 설치된 편성토 사면에서 성토부 표면과 토사측구로부터의 강우침투를 고려한 경우 강우지속 시간에 대한 압력수두의 변화 값을 나타낸 것으로 강우개시 후 132hr이 지난 후 성토부는 거의 포화상태에 도달하였으나 성토 하단부에 설치된 배수층으로 인해 지하수위의 상승은 그리 크지 않아 그림 15에서의 배수층이 설치되지 않은 경우에 비해 큰 값의 압력수두 증가는 보이지 않았으며, 이는 투수성이 큰 배수층으로 인해 성토체 내의 침투수가 배수되기 때문이다.

성토 하단부에 배수층이 설치되어 있는 경우에는 전반적으로 지하수위의 형성 및 상승이 배수층의 배수효과에 기인하여 보다 느리게 형성되고 있으며 그 크기도 작았다.

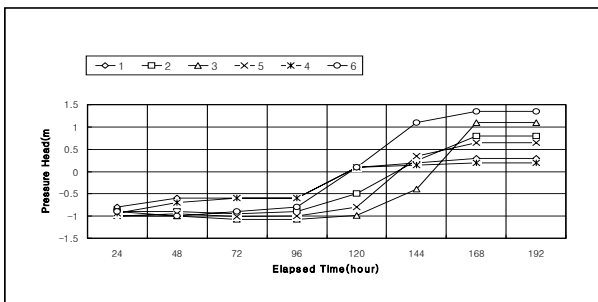


그림 19. 강우시 편성토 사면 내 압력수두의 변화(배수층 설치)

4.3 강우조건에 따른 안전성의 평가

4.3.1 평지부 성토 사면의 경우

그림 20은 평지부 성토 사면의 강우조건에 따른 안전율 변화를 나타낸 것으로 성토 사면의 경우 180mm의 선행강

우가 있는 후 3일 동안의 무강우 기간은 안전율의 변화가 거의 없었으나 강우가 다시 시작됨에 따라 안전율은 감소하기 시작하여 1일 350mm의 집중호우기간 동안 안전율이 1이하로 감소하였다.

즉, 초기 1일 180mm 호우 시에는 큰 강우에도 불구하고 제체 내로의 침투량이 크지 않아 안전율 변화가 거의 없었으나 그 후 3일 무강우 후 1일 45mm의 2일 동안 연속된 강우로 제체가 포화됨에 따라 급격히 안전율이 감소하여 계속된 호우로 인해 사면이 불안정하게 됨을 알 수 있다.

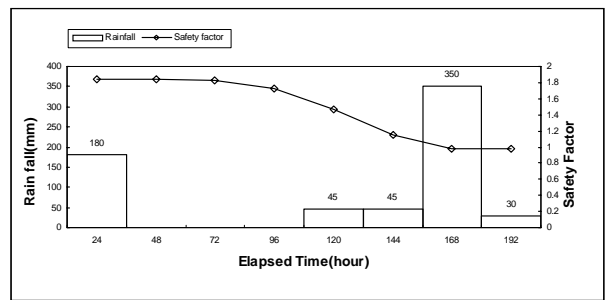


그림 20. 평지부 성토 사면의 강우지속시간에 대한 안전율 변화

4.3.2 산지부 편성토 사면의 경우

그림 21은 편성토 사면에 대해 성토부 표면 및 토사측구로부터의 강우침투를 고려하는 경우와 성토부 표면과 토사측구로부터 침투가 발생될 때 사면의 저부에 배수층이 설치된 경우의 안전율 변화를 나타낸 것으로 성토부 표면 및 토사측구로부터 침투가 발생하는 정의 간극수압이 발생하는 동안 초기 강우 후 3일 무강우 동안 안전율의 변화는 미미하였지만 강우가 다시 시작되면서 2일 동안 사면의 안정성은 급격히 감소하여 불안정하게 되었다.

1일 360mm의 호우가 발생하기 전 이미 사면은 불안정하게 되어 평지부 성토사면에 비해 상대적으로 쉽게 사면이 불안정하게 되었으며, 이는 평지부 성토사면에 비해 지형조건상 불리기도 하지만 근원적으로 침투수가 사면 끝단으로 집중되기 때문으로 판단된다. 그러나 이 때 배수층을 설치한 경우에는 사면의 파괴에 대한 안전율은 1.3 정도를 유지하였다.

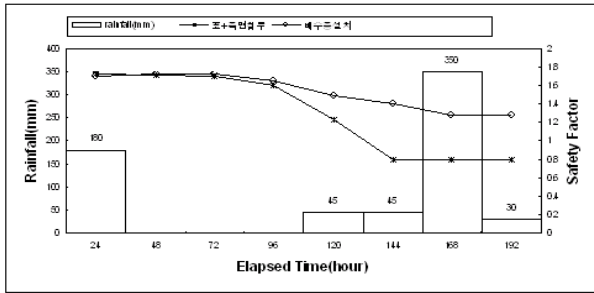


그림 21. 편성토 사면의 강우지속시간에 대한 안전율 변화

5. 결론

충남지역에서 호우시 파괴된 도로 성토 사면 중 전형적인 성토 사면인 평지부의 성토 사면과 산지부 성토시 주로 행하여지는 편성토 사면을 대상으로 하여 불포화 흐름을 고려한 사면불안정에 이르는 과정을 분석하였다. 이때 침투거동은 수치해석적으로 파악하였으며, 한계평형이론을 이용하여 안정해석을 행하여 분석 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평지부 성토 사면은 강우시 표면으로부터 침투가 시작되어 점차 성토 체체 내로 확대되었으며, 침윤전선이 체체 하단부에 도달된 이후 지하수위는 체체가 완전히 포화될 때까지 체체 하단부에 존재하고 있다가 짧은 시간 내에 빠르게 상승하였다.
- (2) 평지부 성토 사면의 경우 강우가 침투하여 체체 내로 거의 포화될 때까지 안전율 변화는 미미하였지만 지하수위가 빠르게 상승하는 시점에서 사면은 불안정하게 되었다.
- (3) 산지부 편성토 사면의 경우 강우시 주로 사면 표면에서의 침투가 지배하였으며, 측면침투의 영향은 상대적으로 작았다. 1일 180mm의 호우시 및 이후 3일간 무강우 동안 안전율의 변화가 미미하였지만, 강우가 다시 시작되면서 2일 동안 정의 간극수압이 빠르게 상승하여 사면은 불안정하게 되었으며, 평지부 성토사면에 비해 상대적으로 쉽게 불안정하게 되었다.
- (4) 편성토를 행할 때 성토 하단부에 배수층을 설치하는 경우 강우침투로 인해 포화영역이 확대되어 정의 간극수압이 부분적으로 발생하였으나, 그 크기는 배수층이 없는 경우에 비해 작았으며 사면의 안정성도 계속적으로 유지하였다.

(접수일자 : 2004년 7월 21일)

참 고 문 헌

1. 김영목, 최문희(2000), 강우시 도로 성토 사면의 불안정성 해석 및 대책, 2000년도 학술발표회 논문집(II), 대한토목학회, pp. 163~166.12.
2. 류지협(1997), 불포화 화강풍화토의 투수 및 강도특성, 공학박사 학위 논문, 동국대학교
3. 이달원(1994), 강우를 고려한 성토 사면의 안정해석, 농학박사 학위 논문, 충남대학교.
4. 조성은, 이승래(2000), 강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석, 한국지반공학회, 제16권, 제1호, pp. 51~64.
5. 이승래, 김윤기, 이성진(2004), 강우침투를 고려한 불포화 사면지반의 안정해석, 한국지반공학회 2004년 사면안정 학술발표회, pp. 19 ~28.
6. 홍원표(1991), 말뚝을 사용한 산사태 역지공법, 한국지반공학회, 제 7권, 제4호, pp. 75~87.
7. Brooks, R. H. and Corey, A. T.(1964), Hydraulic Properties of Porous Media, Hydrology Papers, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
8. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A.(1978), The Shear Strength of Unsaturated Soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 15, No. 3, pp. 313~321.
9. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1999), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, Jone Wiley and Sons, Inc.
10. Freeze, R. A. and Cherry, J. A.(1979), Ground Water, Prentice-Hall Inc..
11. Gardner, W. R.(1985), Some Steady State Solutions of Unsaturation Moisture Flow Equation with Applications to Evaporation from a Water Table, Soil Science Society American Journal, Vol. 85, pp. 228~232.

12. Green, R. E. and Corey, J. C.(1971), Calculation of Hydraulic Conductivity : A Further Evaluation of Some Predictive Methods, Soil Science Society American Journal..., Vol. 35, pp. 3~7.
13. Hong, W. P., Han, J. G., Choi, S. H., and Hwang, I. C.(1997), The Analysis of Slope Stability during Heavy Rainfall, International Symposium on Landslide Hazard Assessment, Xian, pp. 367~376.
14. Kim, S. K., Hong, W. P., and Kim, Y. M.(1992), Prediction of Rainfall Triggered Landslides in Korea, Proc. 6th Int. Sym. on Landslides, Christchurch, New Zealand, 2 : pp. 989~994.
15. Lumb, P.(1975), Slope Failure in Hong Kong, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.8, pp. 31~65.
16. Mein, R. G. and Larson, C. L.(1973), Modelling Infiltration during a Steady Rain, Water Resource of Research, Vol.10, No.4, pp. 795~800.
17. SEEP/W(1996), User's Guide for Finite Element Seepage Analysis, Geo-Slope Int. Ltd., Canada.
18. SLOPE/W(1996), User's Guide for Slope Stability Analysis, Geo-Slope Int. Ltd., Canada.
19. Sakajo. S., and Kato. K.(1999), Instability Analysis of Embankments on Tokaido-Shinkansen in Heavy Rainfalls, Slope Stability Engineering, Yagi, Yamagami and Jiang, pp. 527~532.