

열수변질 점토맥이 사면 안정성에 미치는 영향에 관한 모델링 연구

조환주¹ · 조호영^{1*} · 정경문²

¹고려대학교 지구환경과학과, ²(주)도화종합기술공사

Modeling Study for Effects of Hydrothermal Clay Vein on Slope Stability

Hwan-Ju Jo¹, Ho Young Jo^{1*} and Kyung-Mun Jeong²

¹Department of Earth and Environmental Sciences, Korea University Seoul 136-713, Korea

²Dohwa Consulting Engineers Co. Ltd., Seoul, 135-080, Korea

Clay veins that occurred in a slope by hydrothermal alteration, can significantly affect its slope stability. The effect of clay veins on the slope stability was investigated by numerical modeling study. Various parameters such as cohesion, internal friction angle, orientation, groundwater level, rainfall intensity and duration, have been modelled. As shear strength increased, factor of safety increased. As groundwater level developed, factor of safety decreased. For the case of slip surface developed on interface, factor of safety was lower than that for case of slip surface developed on either weathered soil or clay vein. The effect of various soil types of the slope stability was also investigated by simulating seepage through the slopes with various soils. The groundwater level significantly increased on the slopes with silty and generic soils. For the slope with sandy soil, almost no change in groundwater level was observed due to rapid drainage.

Key words : clay vein, slope stability, groundwater level, numerical modeling

열수변질에 의한 점토맥이 존재하는 사면 발생시 사면의 안정성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 파괴면의 형성 위치에 따라 접촉면 조건과 비접촉면 조건으로 분류하여 점토맥의 점착력, 내부마찰각, 방향성, 지하수위, 강우강도, 강우 지속시간 등의 인자에 따라 점토맥이 사면 안전율에 미치는 영향을 수치 모델링 연구를 통해 조사하였다. 지반 정수가 클수록 사면 안전율이 증가하였다. 사면 내 지하수위가 상승하면 사면 안전율이 감소하는 것을 확인하였다. 다양한 도양에 대한 강우 침투 모델링 결과 이질토는 강우강도에 따라 다양한 지하수위 발달 경향을 보인다. 반면에 사질토는 빠른 배수로 인해 지하수위의 상승이 거의 나타나지 않았다. 따라서 점토맥이 존재하는 사면에서 사질토는 이질토에 비해 사면 안전율에 미치는 영향이 적었다.

주요어 : 점토맥, 사면안정도, 지하수위, 수치모델링

1. 서 론

우리나라는 지반 윤회 상 만장년기의 지형에 속하기 때문에 급경사면이 많으며, 토층간의 특성이 서로 다른 곳이 많으므로 산사태가 발생될 내적 요인을 구비하고 있다(Song and Hong, 2007). 또한 온대성 기후대에 위치하고 있어 6~9월 사이에 강우가 집중적으로 내리며, 1990년대 후반부터는 국지적인 집중호우가 잦아지고 있다. 국내 대부분의 산사태는 주로 이 시기에

발생하며 강우와 직접적인 연관성을 가지고 있다.

국내의 자연 토층 사면에서 나타나는 사면 파괴의 주된 형태는 사면 계곡부를 따라 발생하는 작은 규모의 쉐설성 유동 형태가 가장 많다(Kim *et al.*, 2000). 이는 국내의 토층 사면은 대부분 토양의 심도가 1~2 m 내외에 불과한 비교적 얇은 사면으로 이루어져 있기 때문이다. 이러한 형태의 사면에서 강우 시 지하수위가 상승함에 따라 지반 내 간극 수압의 증가로 사면의 거동이 유발되는 것으로 알려져 있다. 최근의 연구에

*Corresponding author: hyjo@korea.ac.kr

따르면 지하수위의 증가뿐만 아니라 강우가 지표로부터 침투하여 습윤 전선이 임계 깊이에 도달하는 것도 영향을 준다는 것이 밝혀졌다(Kim *et al.*, 2007).

국내의 경우 많은 수의 사면이 암반 사면이다. 암반 사면을 이루는 물질이 화강암, 편마암 등의 경암으로 이루어져 있다더라도 지층 내에 점토층 혹은 점토맥이 협재되어 있을 경우 사면파괴의 원인이 될 수 있다. 암반 사면 내의 점토맥은 열수 변질 작용에 의해 형성된다. 열수 변질대는 화강암질의 마그마가 관입하여 굳을 때 광역적으로 압력을 받거나 마그마가 급격히 식으면서 생겨난 열극을 후기에 열수가 채우면서 생기게 된다. 점토맥이나 점토층을 이루는 광물로는 스�멕타이트, 일라이트, 고령토, 녹니석, 석영, 방해석, 불석 등이 있다. 이 중 스�멕타이트는 물을 흡수할 경우 팽윤되어 암반을 분리시킬 수 있다. Opfergelt *et al.*(2006)은 니카라과 Casita 화산에서 발생한 산사태 연구를 통해 열수의 변질 작용에 의해 형성된 스�멕타이트가 사면 안전율에 영향을 끼쳤음을 밝힌 바 있다. 지질학적으로 화산 활동이나 여러 마그마의 관입 작용이 상대적으로 많은 일본의 경우, 열수 변질대가 사면안정에 미치는 영향에 대한 연구가 많이 진행 되어 왔다(Kamai, 1998, Paudel *et al.*, 2005). 이러한 연구를 통해 열수 변질대의 점토맥은 열수 변질대의 원인이 된 암맥과 함께 사면이나 터널 공사 시에 안전에 영향을 끼치는 중요한 인자로 작용하는 것으로 밝혀졌다.

국토의 많은 부분이 화강암 등의 심성암이나 편마암 등의 변성암으로 이루어진 우리나라의 경우도 이런 열수의 유입으로 인한 지각 내의 열수 변질대가 폭넓게 분포하고 있어, 자연사면이나 인공사면에서 열수 변질대 내에 생성된 점토맥이 사면 안정에 중요한 역할을 할 수 있다. Kim *et al.*(1993)는 우리나라 대부분의 산사태 발생지역에서 인장균열과 파이핑현상이 발견된다는 점에 착안해 사면 내부에 존재하는 균열을 따라 강우 시 발생하는 간극수압의 증가가 산사태 발생의 중요한 원인이 된다는 것을 밝혔다. 그러나 국내에서는 아직까지 사질 토양에서의 균열면에 대한 연구에 그치고 있어 사면 내의 열수 변질대와 점토맥에 따른 포화 및 비포화대 내에서 수리 체계의 변화와 그에 따른 사면 안정도 변화에 대한 연구가 매우 부족한 실정이다.

실제 지하에 열수 변질대가 존재할 경우의 사면파괴 사례가 Fig. 1에 나타나 있다. 국내에서 도로 사면 등의 사면 보강 공사 공법 결정을 위해 사면 안전을 산출 시 사면의 지하수위 변화는 중요한 인자로 인식되고 있다. 현재는 대부분 사면을 균일한 사면으로 가정

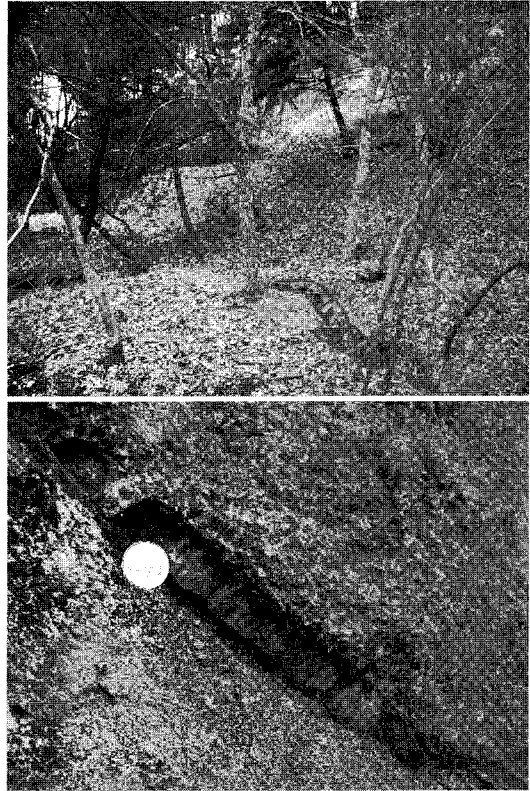


Fig. 1. Tension cracks of slope occurred landslide (above) and quartz and clay veins developed by hydrothermal alteration (below).

해 자유면 대수층으로 취급하여 강우 시에 지하수위가 사면의 지형과 동일한 높이까지 상승한다는 가정 하에 사면 안전율을 산정하고 있다. 그러나 우리나라는 화강암의 관입 등에 의한 열수 변질대가 존재하며, 이에 따라 열수 변질 작용에 의해 생성된 점토맥이 존재하는 사면이 있다. 이러한 점토맥이 존재할 경우 국지적인 간극수압의 급격한 증가가 발생할 수 있으므로 지하수위를 자유면대수층으로 가정하여 산출된 사면 안전율은 실제보다 과소평가 될 수 있다.

그러므로 국토의 많은 부분이 심성암이나 변성암으로 이루어진 우리나라의 경우 이런 열수의 유입으로 인한 지각 내의 열수 변질대에 의한 점토맥이 존재하는 사면에서 강우에 의한 지하수위 변동, 간극수압의 변화와 사면의 안정성과의 상관관계 규명에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 점토맥이 하부에 존재하는 사면에서 강우 시 사면 내부의 간극 수압 변화를 모델링 프로그램을 통해 조사하고 사면의 안정도에 영향을 미치는 인자를 정량적으로 규명하는 것이다.

2. 연구 방법

2.1. 대상 사면

본 연구에서는 Min *et al.*(2007)에서 연구한 사면을 기본으로 하여 일부 조건을 수정하여 모델링 연구를 수행하였다(Fig. 2). 대상 사면의 지반 정수는 Min *et al.*(2007)의 자료를 참고하였다(Table 1).

Min *et al.*(2007)의 연구 지역은 경북 예천군 일대로 다양한 지질 구조를 보이는 지역이다. 대상 사면 내에 단층, 절리, 엽리 등의 불연속면이 발달해 있고, 점토로 이루어진 층이 사면 안전율에 유리한 방향으로 존재하고 있다. Min *et al.*(2007)에서 연구한 사면은 사면 전체의 높이는 약 37.9 m이며 사면의 토층부의 높이가 약 20 m이다. 이는 Baek *et al.*(2005)에서 제시한 사면 붕괴 빈도가 가장 높은 사면 높이에 해당한다. 또, Baek *et al.*(2005)에 의하면 토층의 두께가 두꺼울수록 지하수의 영향을 많이 받아 사면 안전율이 낮아지는 결과를 나타낸다. Min *et al.*(2007)의 대상 사면은 이러한 조건을 충족시키는 사면으로써 본 연구의 대상 사면으로 선정하였다. Min *et al.*(2007)은 실내 전단 실험과 수치 해석을 통해 파괴가 발생한 실제 사면의 파괴 상황을 재현하여 점토맥의 존재를 고려해야 합리적인 사면 안전율을 구할 수 있다는 연구 결과

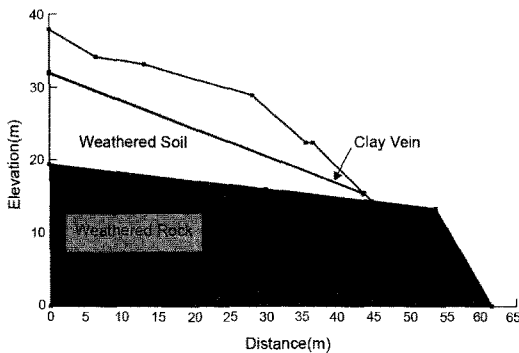


Fig. 2. A conceptual slope used in the study (revised from Min *et al.*, 2007).

Table 1. Shear strength parameter in the slope used by Min *et al.*(2007)

Soil	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
Weathered soil	18.6	5.6	28.0
Clay vein	17.1	11.0	18.6
Soft rock	23.0	60.0	35.0
Interface	-	1.1	17.2

를 제시하였다. 그러나 Min *et al.*(2007)은 점토맥과 경계부의 물리적 특성이나 지하 수위 조건 등 다양한 인자의 영향에 대한 연구는 수행하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 점토맥과 경계부, 풍화토층의 물리적·수리적 특성이나 강우 조건과 같은 외부 조건에 따른 사면 안전율의 변화에 대한 연구를 수행하였다.

Min *et al.*(2007)는 점토맥에 대한 직접 전단 실험 시 점토맥 내부에 파괴면이 존재하는 경우와 점토맥과 풍화토 경계부에 존재하는 경우의 두 가지 실험을 수행하였다. 직접 전단 실험 결과 점토맥의 강도는 점토맥 내부에 파괴면이 존재하는 경우가 점토맥과 풍화토의 경계면에 파괴면이 존재하는 경우에 비해 점착력은 10배 크게 나타났으며 내부 마찰각도 크게 나타났다. 이에 따라 Min *et al.*(2007)는 대상 사면을 사면 파괴 시 활동면이 점토맥과 풍화토의 경계부에 존재하는 경우(접촉면 조건)와 점토맥 내부에 존재하는 경우(비접촉면 조건)의 두 가지 사례로 분리하여 한계평형해석 모델링을 수행하였다. 따라서 본 연구에서도 접촉면 조건과 비접촉면 조건으로 나누어 다양한 지반 정수를 사용하여 한계평형해석 모델링을 실시하였다. 접촉면 조건에서는 파괴면이 점토맥과 풍화토층 사이에 존재하는 접촉면층의 중간에 위치하며 비접촉면 조건에서는 파괴면이 점토맥의 중간에 위치한다(Fig. 3). 본 연구에 사용된 대상 사면의 구성 물질의 전단 강도는 Table 2와 같다.

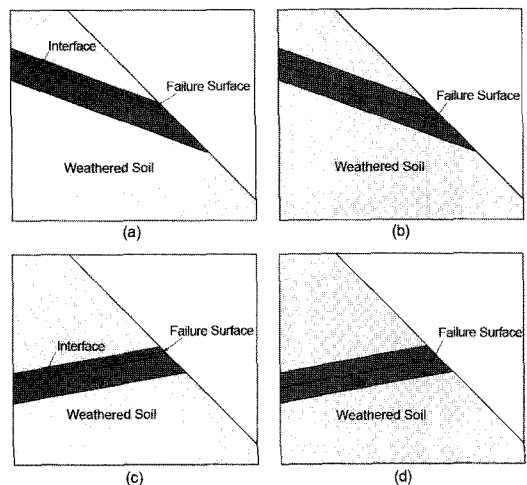


Fig. 3. Interface and no-interface conditions used in this study. (a) Interface condition and (b) no-interface condition with clay vein by direction of 20°. (c) interface condition and (d) no-interface condition with clay vein by cross direction to slope surface.

Table 2. Conditions and parameters used in the modeling study

	Shear strength		Orientation of Clay vein	Groundwater level	Rainfall Intensity	Rainfall duration (hour)	
	Cohesion (c, kPa)	Internal friction angle(ϕ , kN/m ²)					
Interface condition		1	Cross to slope surface (Cross)	Low	1 mm/hr	0.03	
		2					
	1	4					
	2	6					
	4	8					
	6	10					
	8	12					
	10	14					
	11	16					
		18					
		18.6					15°
No-interface condition		1	20°	Saturated	50 mm/hr	7.1	
		5					
		10					
		10	25°		100 mm/hr	28.4	
		15					
		15					
		20	30°				56.9
		20					
		25					
	30						
	30				113.8		
	40						
	40						
		50					

2.2. 모델링 프로그램

본 연구에 사용된 프로그램은 GeoStudio 2007 (Geo Slope사, 캐나다)로서 다양한 모델링을 할 수 있는 프로그램이다. SEEP/W는 지하수의 흐름이나 간극수압의 소산을 계산하는 유한요소해석 프로그램으로 단순한 포화-정상류부터 복잡한 포화/불포화-시간변화흐름까지 계산이 가능하다. 비정상상태에서의 지하수위와 간극 수압은 시간 단계별로 위치가 변하는 지하수위의 형상으로 나타내준다. 저수지 수위 강하 후의 과잉간극수압의 소산과정이나 강우에 의한 사면 내 간극수압의 변화, 담수구조 하부 지반의 지하수위 변화, 지층에서의 배수 및 주입효과(터널), 펌핑에 의한 지하수위 강하(우물), 굴착면으로의 지하수 유출 등의 계산에 적용이 가능하다.

SLOPE/W는 토사/암반사면의 안전율을 계산하는 한계평형해석 프로그램으로 Ordinary법, Bishop간편법, Janbu간편법, Morgenstern & Price법 같은 해석법을 이용하여 사면의 형상, 지층구조, 외부하중이 복잡한 경우에도 해석이 가능하다. 또한 다수의 지층, 사면의 부분적 침수, 지층 두께의 변화 및 불연속성, 활동불가능 지층, 건조 또는 포화 인장균열 등의 지층에 대한 분석이 가능하고, 원호파괴와 원호-직선의 조합, 직선의 조합에 의한 파괴에 대한 분석이 가능하다. SEEP/W의 유한 해석을 통하여 얻은 간극수압 자료를 SLOPE/W

에 적용하여 보다 정확한 계산이 가능하다.

본 연구에서는 Morgenstern & Price법과 Bishop간편법을 혼용하여 사면 안전율을 계산하였다. 또한 점토맥의 존재로 인하여 사면 파괴가 비원호 형태로 발생하는 것을 가정하였다. Morgenstern & Price법은 모든 평형조건을 만족시키는 방법이며, 모든 형태의 사면 파괴에 적용이 가능한 한계평형해석 방법으로 가장 정확한 사면 안전율을 계산할 수 있다. Morgenstern & Price법은 사면 붕괴의 역해석을 통하여 사면 파괴의 원인을 파악하는데 유용하다(Lee *et al.*, 2002). 한계평형해석 방법에서 Bishop간편법은 Morgenstern & Price법에 비하여 간단한 수식을 이용하여 사면 안전율을 계산한다. 원호 파괴에 대한 해석이 비교적 정확한 계산이 가능하며 비원호 파괴에 대해서도 가상의 회전 중심을 설정함으로써 모델링 프로그램을 통해 계산이 가능하다. 수식이 간단하여 계산 시 인자의 영향을 파악하기 쉬운 장점이 있다.

비정상류 해석 결과와 연계된 SLOPE/W 모델링 수행 시 사면 파괴 형태는 원호 파괴 형태를 적용하였다. 원호 파괴 적용 시 Slip Radius와 Slip Grid는 모델링 과정에서 동일한 좌표를 지정하여 수행하였다.

점토맥의 전단 강도와 방향성, 지하수위의 변화에 따른 사면 안전율을 파악하는 모델링은 접촉면과 비접촉면 조건의 차이를 파악하기 위하여 Block-specified 방

법을 이용하였다. 접촉면 조건은 파괴면이 점토맥 내부에 존재하도록 설정하였고, 비접촉면 조건은 풍화토층의 경계면 부근에 위치하게 적용하였다.

2.3. 모델링 조건

2.3.1. 점토맥의 전단강도

활동면이 경계부에 존재하는 경우(접촉면 조건)는 경계부의 전단강도가 점토맥의 전단강도보다 크지 않는 범위로 하여 점착력(c)은 1~11 kPa을 적용하였고, 내부마찰각(ϕ)은 1~18.6 kN/m²을 적용하였다(Table 2). 점착력과 내부마찰각은 Min *et al.*(2007)에서 직접 전단 실험을 통해 구한 값을 최대값으로 하여 일정한 간격으로 설정하였다.

활동면이 점토맥 내부에 존재하는 경우(비접촉면 조건)는 점토맥의 전단강도가 풍화토의 전단강도를 초과하지 않는 범위에서 점착력(c)은 1~40 kPa을 적용하고, 내부마찰각(ϕ)은 1~50 kN/m³을 적용하였다(Table 2). 전단강도의 최대값은 풍화토의 전단 강도와 동일하다. 풍화토의 전단강도는 접촉면 조건과 동일하게 전단강도 값을 사용하였다.

2.3.2. 점토맥의 방향성

사면 내 점토맥의 방향성에 따른 사면 안전율의 변화를 알아보기 위하여 교차방향(Cross), 풍화암층에 평

행한 방향(Parallel), 15°, 20°, 25°, 30° 6가지 조건에 대하여 접촉면 조건과 비접촉면 조건의 모델링을 각각 수행하였다(Table 2). 사면과 점토맥의 교차방향(Cross)은 Min *et al.*(2007)와 동일한 조건이다. 15°, 20°, 25°, 30° 은 수평면 기준으로 설정하였다.

2.3.3. 지하수위 변화

지하수위의 변화가 사면 안전율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 사면 내 점토맥이 교차방향으로 존재하는 경우와 20° 방향으로 존재하는 경우에 대하여 세 가지 지하수위 조건을 적용하였다. 파괴면은 Block Specified 방법을 이용하여 사면 안전율을 계산하였다. 교차방향은 Min *et al.*(2007)에서 조사한 실제 사면의 조건과 동일하며 교차방향을 제외한 5가지 조건의 평균 각인 20°의 방향성을 선정하여 지하수위 변화에 대한 모델링을 실시하였다. 지하수위 조건은 총 세 가지로 포화된 경우, 지하수위가 점토층 상부에 존재하는 경우, 지하수위가 점토층 하부에 존재하는 경우이다(Table 2, Fig. 4). 교차방향의 경우 지하수위는 20° 방향으로 존재하는 경우에서 설정된 세 가지 지하수위와 동일한 조건을 적용하였다.

2.3.4. 강우강도와 강우 지속시간

강우의 지속시간이나 시간 당 강우량에 따른 사면

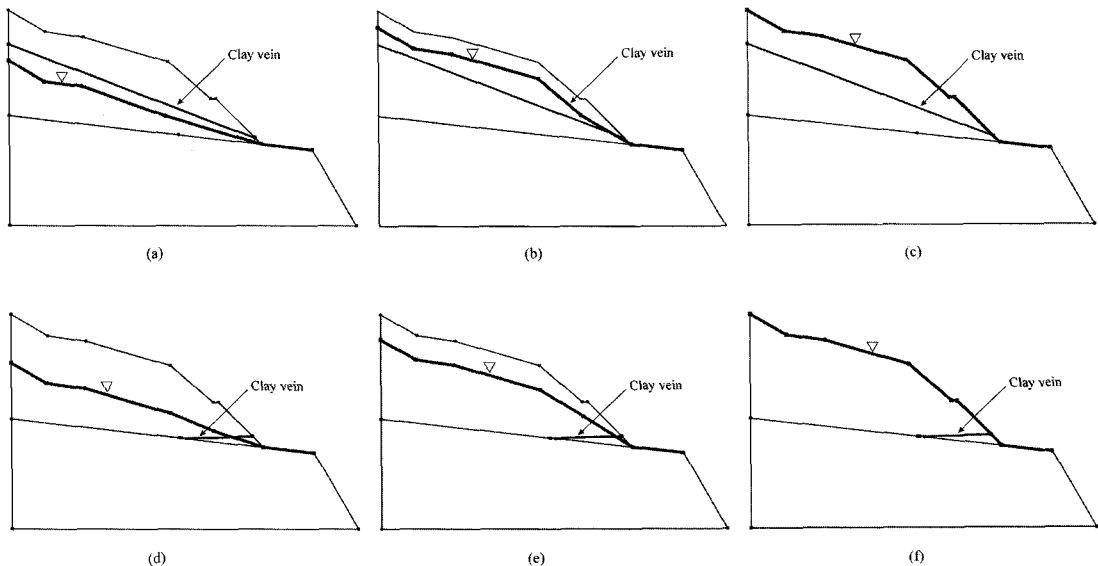


Fig. 4. Three different conditions of water table with various orientation of clay vein. (a) low, (b) medium and (c) saturated conditions with clay vein by direction of 20°, (d) low, (e) medium, (f) saturated conditions with clay vein by cross direction to the slope surface.

안전율의 변화를 파악하기 위하여 사면 내 점토가 교차방향으로 존재하는 경우와 20°의 방향성을 가지고 존재하는 사면에 대해 모델링을 수행하였다. 모델링은 비정상류 조건으로 진행하여 시간에 따른 변화를 관찰하였다. 초기 지하수위는 점토층하부에 존재하는 경우를 적용하였다. 경우는 113.8 시간까지 일정량이 내리는 것으로 설정하였으며, SEEP/W 프로그램을 이용하여 비정상류 해석을 통해 0.03~113.8 시간에서의 사면 내의 지하수위와 침윤전선의 자료를 획득하였다. 경우 지속시간은 0 초를 시작 값으로 하였다. 시간 증가 값은 100 초를 초기 값으로 설정하여 단계에 따라 경과 시간이 두 배씩 증가하는 것으로 하였다, 113.8 시간까지 모델링을 수행하여 대부분의 사면이 포화되는 것을 확인하였다. 이에 따라 모델링은 113.8 시간까지 수행하였다.

강우강도는 국내 강우의 특징을 고려하여 각각 1~100 mm/hr로 설정하였다. 기상청에서는 12시간 강우량이 150 mm 이상일 경우 호우 경보를 발령하고 있다. 이를 시간당 강우량으로 환상할 경우 12.5 mm/hr에 해당한다. 2002년 태풍 ‘루사’에 의해 강원도 삼척지역에는 일일강우량이 870.5 mm가 내린 기록이 있으며 이는 평균 36.3 mm/hr에 해당한다. 본 연구에서 적용한 강우강도는 호우 경보 수준의 강우강도인 10 mm/hr와 태풍과 같은 기상 조건에서 나타나는 50 mm/hr를 포함하고 있다. 현재까지 국내에서 기록된 최대 시간당 강수량은 지난 1998년 순천에서 기록된 145 mm/hr이며(Korea Meteorological Administration, 2008), 본 연구에서는 100 mm/hr까지 강우강도를 설정하여 이와 같은 극단적인 강우 상황도 고려하였다(Table 2).

2.3.5. 토양 수분 특성 곡선

토양 수분 특성 곡선은 토양의 불포화 투수계수 등 전단 강도와 밀접한 관련을 가지고 있는 인자이다. 토양 수분 특성 곡선의 경우 각 토양의 수분 함량은 Fredlund and Xing(1994, Fig 5)을 참고하였다. Fredlund and Xing(1994)은 식-(1)을 통해 계산되는 일반적인 토양의 흡-수분 특성 곡선을 제안하였다.

$$\theta = \left[\frac{1}{\ln \left\{ e + \left(\frac{s}{a} \right)^n \right\}} \right]^m \tag{식-(1)}$$

이 식에서 θ 는 토양 수분 함량, e 는 간극비, s 는 흡

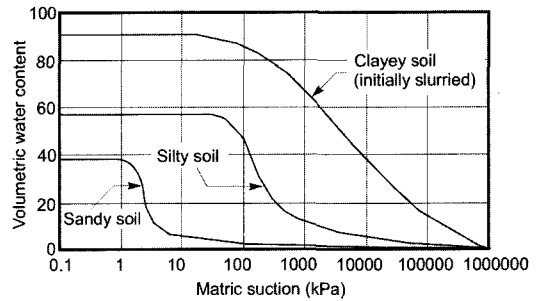


Fig. 5. Soil-water characteristic curves of unsaturated soils (Sandy soil, Silty soil, Clayey soil) (Fredlund and Xing, 1994).

입력, a , n , m 은 불포화 지반의 주요 특성을 알 수 있는 중요한 매개변수이다. 각각의 매개변수는 공기함입치(Air Enter Value)와 경사, 잔류함수비를 조절한다. 본 연구에서는 Fredlund and Xing(1994)의 Sandy Soil과 Silty Soil을 각각 사질토와 이질토로 명명하였다. 사질토는 이질토에 비해 낮은 공기 함입치(Air Entry Value)와 함수비를 가지고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 점토맥의 전단 강도의 변화가 사면 안전율에 미치는 영향

3.1.1. 활동면이 점토층과 풍화토의 경계부에 있는 경우(점촉면 조건)

점촉면 조건에서 사면안전율은 내부마찰각(ϕ)이 1°에서 18.6°로 증가할 때 점착력(c)이 1 kPa일 경우 0.27에서 0.51로 증가하며, 점착력(c)이 11 kPa일 경우 0.45에서 0.63로 증가한다. 점착력(c)이 1 kPa에서 11 kPa로 증가함에 따라 내부마찰각(ϕ)이 1°일 경우 0.27에서 0.45로 증가하며, 내부마찰각(ϕ)이 18.6°일 경우 사면 안전율은 0.51에서 0.63로 증가한다(Fig. 6(a)).

유효 응력에 의한 토양의 전단강도는 식-(2)과 같이 정의된다(Das, 2002).

$$\tau_f' = c' + \sigma' \tan \phi' \tag{식-(2)}$$

여기서, τ_f' 는 유효전단강도를 나타내며, c' 는 유효 점착력, σ' 는 활동면의 유효수직응력, ϕ' 는 내부마찰각을 나타낸다. 점착력과 내부마찰각이 증가하면 물질의 전단강도는 증가하며 이는 사면안전율의 증가로 이어진다.

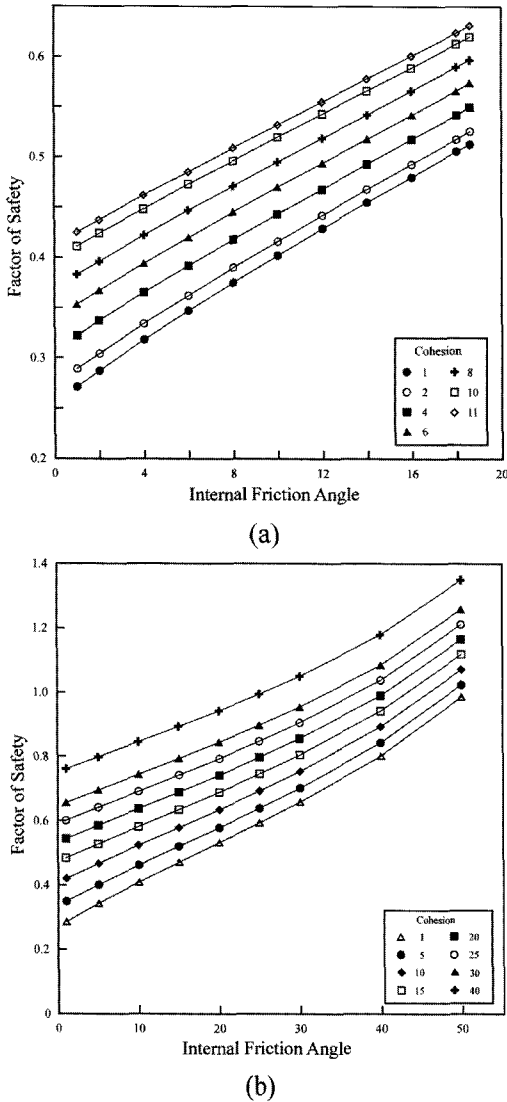


Fig. 6. Effect of internal friction angle and cohesion on factor of safety. (a) interface, (b) no-interface.

3.1.2. 활동면이 점토층 내부에 있는 경우(비접촉면 조건)

활동면이 점토층 내부에 있는 경우(비접촉면 조건)에서도 접촉면 조건과 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 사면 안전율은 내부마찰각(ϕ)이 1°에서 50°로 증가할 때 점착력(c)이 1 kPa일 경우 0.29에서 0.99로 증가하며, 점착력(c)이 40 kPa일 경우 0.76에서 1.35로 증가한다. 점착력(c)이 1 kPa에서 40 kPa으로 증가함에 따라 내부마찰각(ϕ)이 1°일 경우 사면 안전율은 0.29에서 0.76로 증가하며, 내부마찰각(ϕ)이 50°일 경우

사면 안전율은 0.99에서 1.35으로 증가한다. 즉, 점착력과 내부마찰각(ϕ)의 값이 커짐에 따라 전단강도 값이 증가하여 사면 안전율이 증가하는 결과를 확인할 수 있었다(Fig. 6(b)).

3.1.3. 접촉면 조건과 비접촉면 조건의 비교

비접촉면 조건은 접촉면 조건에 비하여 높은 지반 정수를 가지므로 사면 안전율의 값이 높게 나타난다. 동일한 지반 정수를 가진 조건에서도 비접촉면 조건은 접촉면 조건에 비하여 큰 사면 안전을 값을 가진다. 비접촉면 조건에서 내부마찰각(ϕ)이 30° 이상으로 증가할 경우 사면 안전율의 증가율이 커지는 것으로 나타났다(Fig. 6).

비접촉면 조건과 접촉면 조건의 점착력에 따른 내부마찰각의 영향을 서로 비교해보면 접촉면 조건은 점착력이 1~11 kPa, 내부마찰각은 1~18.6°의 값을 가지는데 반하여 비접촉면 조건은 점착력이 1~40 kPa, 내부마찰각은 1~50°의 값을 가진다.

접촉면 조건과 비접촉면 조건이 동일한 지반 정수에서는 동일한 사면 안전율을 나타낼 것이다. 그러나 일반적으로 접촉면 조건에서 점토맥과 풍화토층 사이의 접촉면의 지반 정수가 점토맥에 비해 작은 값을 가지게 된다. 따라서 접촉면 조건의 파괴면이 비접촉면 조건의 파괴면에 비하여 낮은 전단 강도를 가지게 되어 낮은 사면 안전율을 가지게 된다.

3.2. 사면 내 지하수의 수위변화가 사면 안전율에 미치는 영향

지하수의 수위가 상승함에 따라 사면 안전율은 감소하였다(Fig. 7). 이는 간극 수압이 증가하여 유효 전단 강도가 감소하기 때문이다. 유효 전단 강도의 감소는 사면 안전율 감소의 원인이 된다. 모든 경우에서 접촉면 조건의 사면 안전율이 비접촉면 조건에 비해 낮은 값을 보인다.

점토맥이 20°방향으로 존재하는 경우는 지하수위가 낮은 조건(low)에서는 사면 안전율이 0.21, 중간 조건(medium)의 지하수위에서는 0.25, 포화 상태(saturated)에서는 0.15의 차이가 난다. 점토맥이 사면 경사에 교차하는 조건은 낮은 지하수위 조건에서는 0.03, 중간 조건의 지하수위는 0.07, 포화 상태에서는 0.01의 차이가 난다. 이는 점토맥이 교차하는 방향으로 존재하는 경우 파괴면이 점토맥을 따라 생성되지 않고 점토맥에 교차하는 방향으로 생성되는 것에 기인한다(Fig. 8). 사면 파괴면에 점토맥이나 접촉면이 차지하는 부분이 줄어들

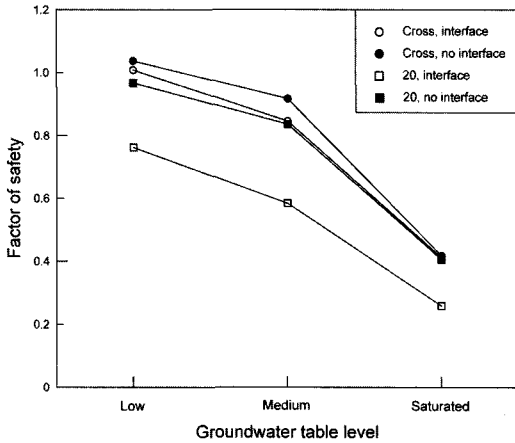


Fig. 7. Effect of groundwater table level.

들게 되어 집중면 조건과 비집중면 조건의 차이에 따른 영향이 상당 부분 제거되는데 따른 것으로 보인다.

지하수위의 높이에 따른 사면 안전율의 변화를 살펴 보면 지하수위가 낮은 조건에서 중간 조건이 될 때 보다 중간 조건에서 포화 조건이 될 때 사면 안전율의 감소 폭이 크게 나타난다(Fig. 8). 이는 사면 파괴 활동체의 유효 응력 감소에 기인한다. 지하수위가 낮은 조건과 중간 조건에서는 지하수위가 파괴면 하부에 있거나 일부분만 포화상태가 되나 포화 조건에서는 활동체가 전부 포화상태가 되어 유효 응력이 감소하기 때문이다.

3.3. 강우강도와 지속시간, 풍화토층의 수리적 특성이 사면 안전율에 미치는 영향

3.3.1. 강우강도와 지속시간의 영향

모든 토양 조건에서 점토맥이 사면 내에 20° 방향으로

로 존재하는 조건에서 초기 사면 안전율이 1.03을 나타내는 사면이 강우에 의해 사면이 포화될 경우 사면 안전율이 최저 0.62까지 감소하였다. 점토맥이 사면 경사에 교차하는 방향으로 존재하는 경우는 초기 사면 안전율이 1.07이나 사면이 포화된 조건에서는 최저 0.58을 나타낸다. 점토맥이 사면 경사에 교차하는 방향으로 존재하는 경우 강우 초기와 사면 포화시의 사면 안전율의 차이는 0.49이며 점토맥이 20° 방향으로 존재할 경우에는 강우 초기와 사면 포화시의 사면 안전율 차이는 0.42로 점토맥이 사면 경사에 교차하는 경우가 사면 안전율의 차이가 포화됨에 따라 더 크게 나타난다(Fig. 9, Fig. 10). 이는 강우 발생 전에는 점토맥이 사면 파괴 방향에 평행하는 방향으로 존재하여 낮은 사면 안전율을 나타내지만 사면이 포화될 경우에는 교차하는 방향으로 존재하는 점토맥이 지하수의 배수를 방해하여 점토맥과 풍화암층이 만나는 부분을 중심으로 간극 수압이 20° 방향에 비해 크게 발달하여 낮은 전단 강도를 유발하여 사면 안전율을 낮추는 것으로 보인다.

3.3.2. 사면 풍화토층 종류의 영향

사질토와 이질토의 토양 수분 특성 곡선의 결과를 비교하였다. 사질토의 토양 수분 특성 곡선을 이용한 연구에서는 강우강도와 지속시간에 따른 사면 안전율의 변화가 거의 나타나지 않았다. 사질토의 시간에 따른 SEEP/W의 비정상류 해석 결과를 보면 점토맥의 방향에 상관없이 10 mm/hr까지는 113.8 시간이 경과해도 지하수위는 사면의 하부에서만 약간 발달하였다. 20° 방향으로 존재할 경우는 50 mm/hr와 100 mm/hr의 경우에도 지하수위는 포화 상태에 도달하지

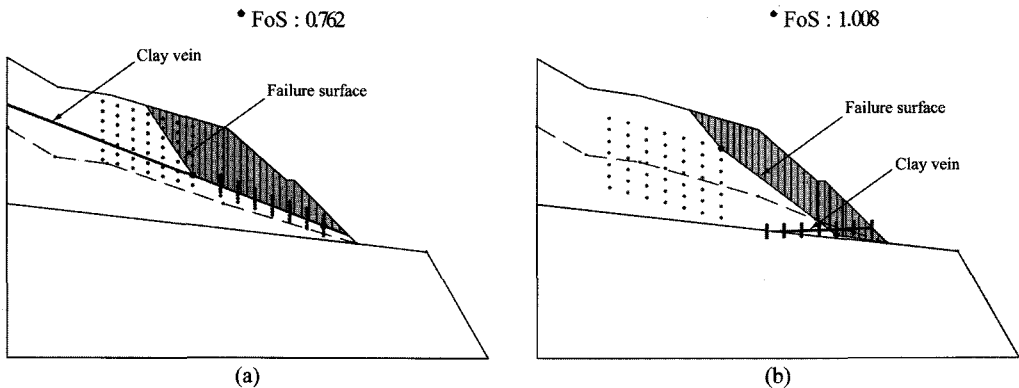


Fig. 8. Different shapes of failure surface between (a) clay vein by direction of 20° and (b) clay vein by cross direction to the slope surface. (a) and (b) have interface and low groundwater table condition.

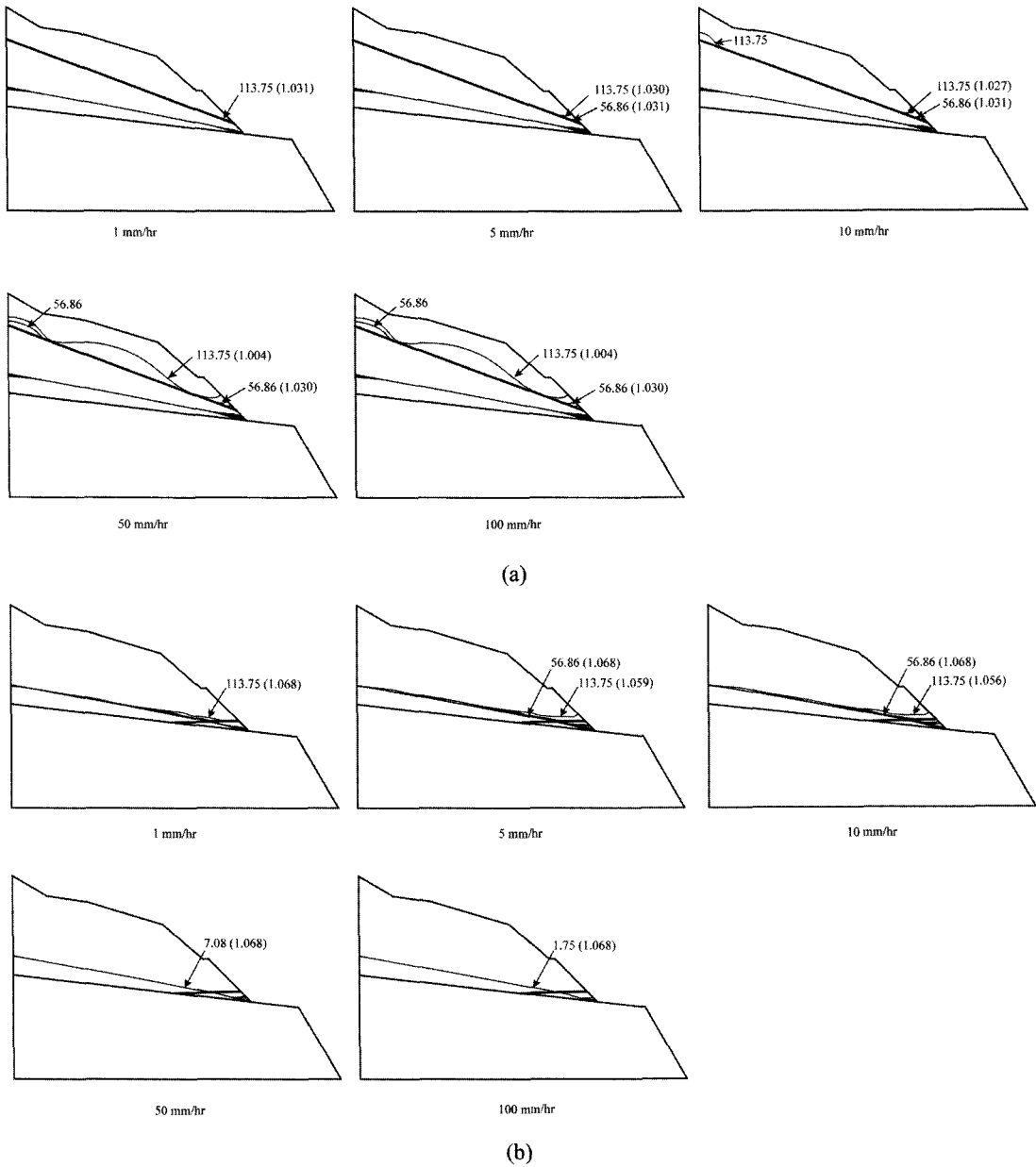


Fig. 9. Results of transient analyses by SEEP/W for sandy soil slope with clay vein which cross direction to the slope surface. Value in parenthesis is a factor of safety. SWCC of sandy soil (Fredlund and Xing, 1994) has conducted. Numbers in parenthesis represents time (hour).

못했다(Fig. 9). 사면 안전율은 두 가지 경우 모두 강우강도가 5 mm/hr 이상일 경우 강우 지속시간이 113.8 시간에 도달해서야 사면 안전율이 처음으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 11).

이질토의 토양 수분 특성 곡선을 이용한 연구에서는 강우강도와 지속시간에 따른 사면 안전율 변화가 조건

에 따라 다양한 형태로 발생하였다. 점토맥이 20° 방향으로 존재하는 경우의 SEEP/W에 의한 비정상류 해석 결과를 살펴보면, 이전 실험과 동일하게 점토맥 하부의 지하수위는 시간 경과에 따른 변화는 관찰 되지 않았다. 점토맥 상부에서만 강우의 침투로 인하여 간극수압이 형성되는 것을 관찰할 수 있었다. 10 mm/hr

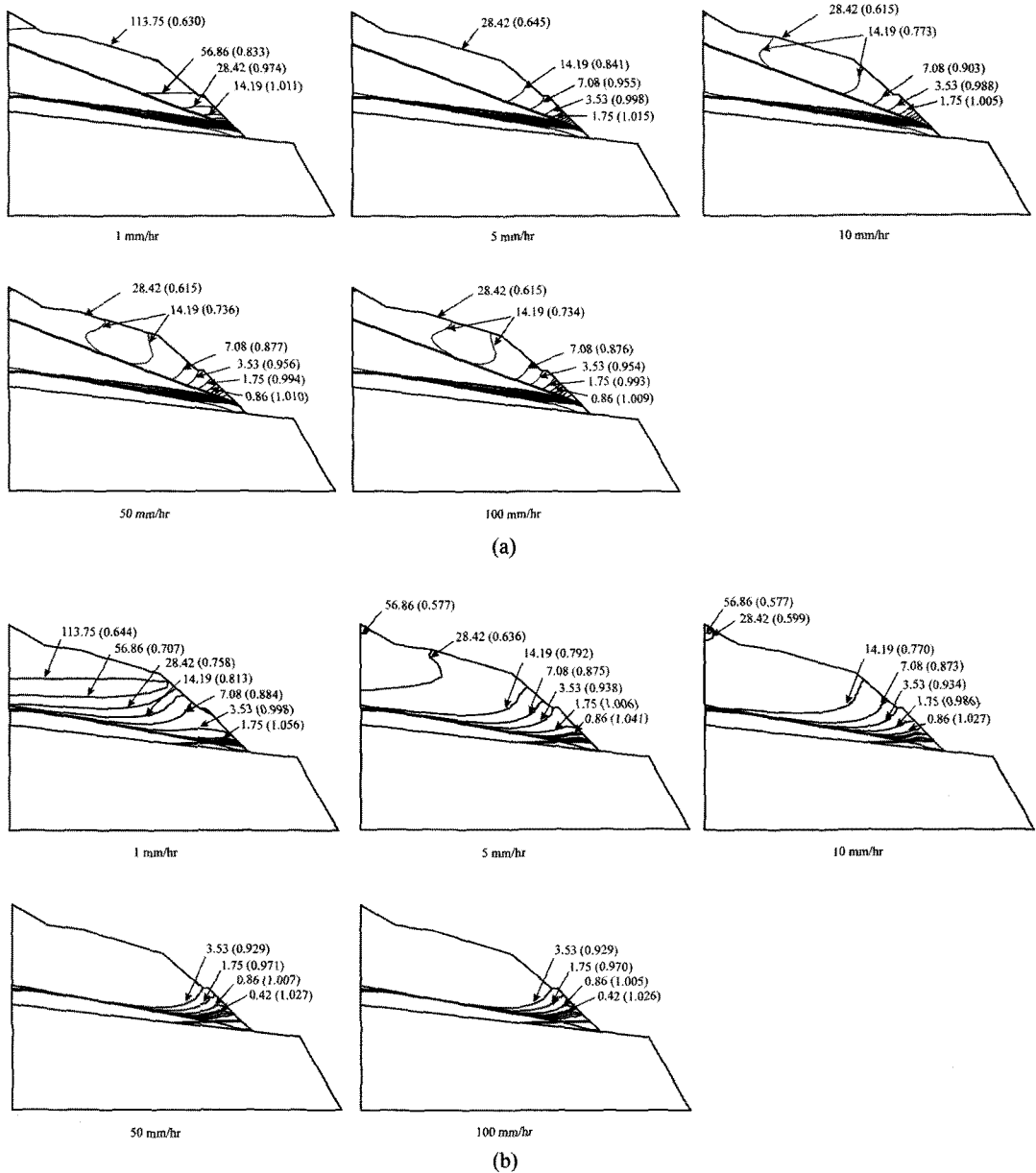
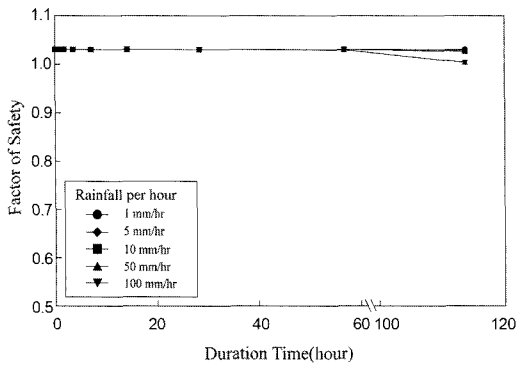


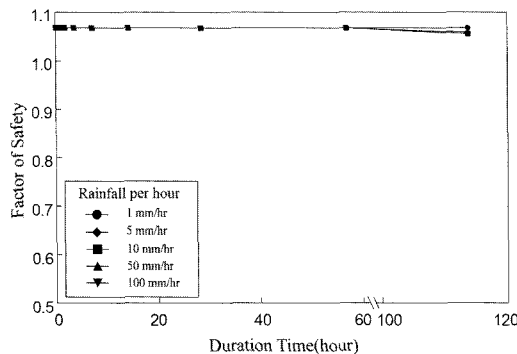
Fig. 10. Results of transient analyses by SEEP/W for silty soil slopes with (a) 20° and (b) cross direction of clay vein. Value in parenthesis is a factor of safety. SWCC of silty soil (Fredlund and Xing, 1994) has conducted. Numbers in parenthesis represents time (hour).

이상의 강우강도에서 지하수위의 발달 형태는 사질토와 다른 형태로 발달하는 경향을 보인다. 14.2 시간에서 지하수위 즉, 간극수압이 0인 지점이 사면 중심에서 양 옆에 위치하는 형태를 보인다. 점토막이 교차하는 방향으로 존재하는 경우 지하 수위는 시간에 따라 점차적으로 상승한다(Fig. 10). 사면 안전율은 사질토가

비교적 일정한 사면 안전율을 변화 양상을 보였던 것과는 달리 강우강도와 강우 지속시간의 변화에 따른 사면 안전율의 변화 양상이 다양하다. 20° 방향으로 존재할 경우 1 mm/hr의 강우강도에서는 28.4 시간이 경과한 후에 사면 안전율이 1 이하로 떨어졌다. 다른 강우 조건에서도 사면 안전율의 변화 기울기가 완만하게

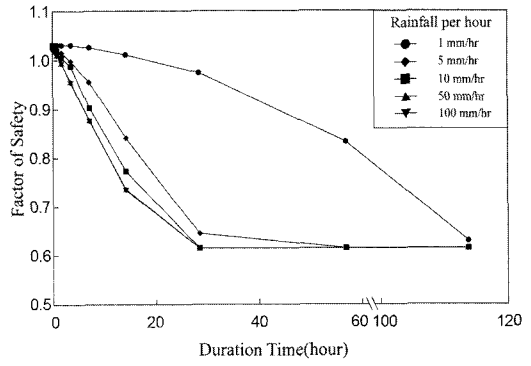


(a)

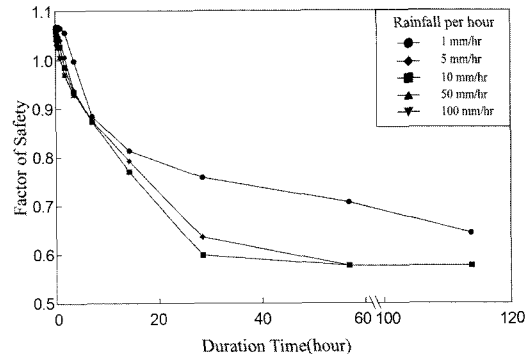


(b)

Fig. 11. Effect of rainfall intensity and duration on sandy soil slopes with (a) 20° and (b) cross direction of clay vein.



(a)



(b)

Fig. 12. Effect of rainfall intensity and duration on silty soil slopes with (a) 20° and (b) cross direction of clay vein.

나타난다(Fig. 12).

이러한 사질토와 이질토에서의 지하수위 변화와 이에 따른 사면 안전을 변화의 차이는 토양 성질의 차이에서 비롯된다. 사질토는 이질토에 비하여 동일한 수분 함량에서 모관흡수력의 크기가 훨씬 작으며 이로 인해 사질토는 토양으로부터 수분을 제거하기 위해 필요한 모관흡수력이 이질토에 비해 작다(Fredlund and Xing, 1994). 또 사질토는 최대 수분 함량이 이질토에 비하여 작은 값을 보인다(Fig. 5). 따라서 사질토의 경우에는 사면 내에 침투한 강우의 배수가 용이하여 지하수위의 증가가 둔화된다. 그러나 침윤 전선은 이질토에 비하여 빠른 속도로 침투하기 때문에 비교적 짧은 강우 지속시간에도 얕은 깊이의 전도성 파괴가 발생할 가능성이 높은 것으로 보인다.

점토맥이 사면 경사에 교차하는 방향으로 존재하는 조건에서는 20° 방향으로 존재하는 조건에 비하여 사면 안전율의 감소가 빠른 시간에 이루어지며 이는 점토맥의 방향성에 의해 사면 내에 침투한 강우가 배수가 잘되지 않는 것에 기인하는 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 접촉면 조건과 비접촉면 조건을 이용하여 지반 정수, 지하수 수위, 강우 조건, 토양 수분 특성 곡선 등 여러 조건에 따른 사면 안전을 변화를 조사하였다.

사면 안전율은 지반 정수가 커지면 접촉면 조건과 비접촉면 조건에서 모두 사면 안전율이 상승하였다. 비접촉면 조건은 접촉면 조건에 비하여 높은 지반 정수를 가지므로, 사면 안전율이 높게 나타난다. 비접촉면 조건에서 내부마찰각(ϕ)이 30° 이상으로 증가할 경우 사면 안전율의 증가율이 커지는 것을 확인할 수 있었다.

사면 내의 지하수위 변화에 따른 사면 안전율의 변화 양상을 파악하였다. 기존의 사면 연구는 지하수위를 포화 상태로 가정하고 모델링을 수행하는 것이 보통이나 대부분의 경우 포화되기 전에 파괴되는 것이 일반적이다. 점토맥이 20° 방향으로 존재하는 경우 점토맥이 사면 경사에 교차하는 방향으로 존재하는 경우에 비해 접촉면 조건과 비접촉면 조건의 사면 안전율

의 차이가 크다. 이는 점토맥이 20° 방향으로 존재하는 경우 파괴면은 접촉면이나 점토맥의 방향에 평행하게 형성되며 접촉면에서의 전단 강도가 점토의 전단강도에 비해서 매우 낮기 때문이다. 점토맥이 사면 경사에 교차하는 방향으로 존재하는 경우 파괴면은 접촉면이나 점토맥을 따라 형성되지 않으며 이로 인해 사면 안전율의 값이 상대적으로 작은 차이가 나는 것으로 보인다.

강우강도와 지속시간이 사면 안전율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 사질토는 강우강도와 강우 지속시간이 증가함에도 사면 안전율의 값이 변화가 거의 없었다. 반면에 이질토는 강우강도와 강우 지속시간에 따라 사면 안전율이 변화한다. 사질토는 이질토에 비해 모관흡수력에 따른 수분 함량이 매우 낮은 값을 보인다. 이로 인해 강우 침투 시 사질토는 토양 내에 많은 수분을 함양하지 못하고 빠른 속도로 배수가 발생하여 지하수위의 발달이 일어나지 못한다.

사 사

이 논문(저서)은 2007년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음(KRF-2007-511-C00077)

참고문헌

- Baek, Y., Kwon, O.I., Kim, S.H. and Koo, H.B. (2005) Characteristics of Slope Failure Due to Local Downpour and Slope Stability Analysis with Changing Soil Depth and Groundwater Level, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.15, No.1, Mar., 2005, pp.57-66.
- Das, B. M. (2002) *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th edition, Brooks/Cole, p.447.
- Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994) Equations for the soil-water characteristic curve, *Can. J. Geotech.* Vol.31, 1994, pp.521-532.
- Kamai, T. (1998) Monitoring the process of ground failure in repeated landslides and associated stability assessments, *Engineering Geology*, Vol.50, pp.71-84.
- Kim, S.H., Kim S.P., Son, Y.H., Heo, J. and Jang, B.W. (2007) Saturation Depth and Slope Stability considering Unsteady Rainfall in Natural Slope, *JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEER*, JAN. 2007, pp.57-65.
- Kim, S.K., Ryu, C.H., Jang, Y.S. and Seo, H.S. (1993) Influence of internal fissures in slope on the landslide, Korea Geotechnical Society, Technical Division of Slope Stability, Conference, 2nd, pp.99-117
- Kim, W.Y., Kim, K.S., Chae, B.G. and Cho, Y.C. (2000) Case study of landslide type in Korea, *Korea Society of Engineering Geology*, Vol.10, no.2, pp.18-35.
- Korea Meteorological Administration (2008) Extreme Weather value (Max value).
- Lee, S., Lee, G.H. and Chae, J.S. (2002) Design and Construction of Slope, *Yeamooonsa*, p.4.
- Min, K.N., Ahn, T.B., Yang, S.J., Baek S.G. and Lee T.S. (2007) A Study on the Analysis of the Slope Stability Considering Clay Filling in Discontinuity, *TUNNEL & UNDERGROUND SPACE*, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol.17, No.3, 2007, pp.1-11.
- Opfergelt, S., Delmelle, P., Bolvin, P. and Delvaux, B. (2006) The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua: Investigation of the role of hydrothermal smectite in promoting slope instability, *Geophysical Research Letters*, vol.33, L15305, DOI 10.1029/2006GL026661, 2006
- Paudel *et al.* (2005) Spatio-temporal patterns of historical shallow landslides in a volcanic area, Mt. Aso, Japan, *Geomorphology*, Vol.88, Issues 1-2, pp.21-33.
- Song, Y.S. and Hong, W.P. (2007) A Case Study on the Analysis of Cause and Characteristics of a Landslide at the Sedimentary Rock Area, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.17, No.1, Mar., 2007, pp.101-113.
- Yu, N.D., Jeong, S.S., Kim J.H. and Park, S.W. (2004) Effect of Rainfall-Induced Infiltration on Unsaturated Weathered Soils with Varying Clay Contents, *Journal of Korea Geotechnical Society*, Vol.20, No.8, 2004.10 pp.159-166.