

사면경사와 표면 조건에 따른 사면안정성 해석

Change of Slope Stability due to Slope Inclination and Surface Conditions

황 영 철¹ Hwang, Young-Cheol

Abstract

Slope stability is affected by duration of precipitation, probable rainfall intensity, unsaturated soil property, and soil strength. The recent analyses of slope stability tend to include unsaturated analysis based on infiltration properties of soil, while researches of unsaturated soil slope tend to include the analysis of deformation and stress distribution of soil over time. However, infiltration property of unsaturated soil slope depends not only on intensity or duration of precipitation, but also on relief and surface condition, which is not considered in status quo. This research uses hydrologic model parameters of soil in order to consider effects of inclination on filtration, and carries out analysis of unsaturated soil slope to confirm the effects according to slope inclination and surface condition. In conclusion, using slope stability analysis, the need to consider infiltration rate according to inclination and surface condition was confirmed even under the same precipitation conditions.

요 지

비탈면의 안정성은 강우지속시간, 확률강우강도, 지반의 불포화특성, 지반강도 등에 의해 영향을 받는다. 최근 비탈면안정성 해석은 지반의 침투특성을 고려한 불포화해석을 수행하고 있으며, 불포화 토사비탈면에 대한 연구는 시간변화에 따라 지반의 변형과 응력분포해석을 고려할 수 있도록 하는 방향으로 진행되고 있다. 그러나 이와는 별개로 불포화사면의 침투특성은 강우강도나 지속시간 뿐만 아니라 비탈면의 지형여건과 녹화상태에 따라서도 침투정도가 다르지만, 이에 대한 영향은 고려하지 않고 있다. 본 연구에서는 비탈면경사 및 표면상태에 따른 침투를 고려하기 위하여 토양의 수리특성을 고려한 모형을 사용하고, 토사비탈면에 대한 불포화해석을 수행하여 비탈면 경사에 따른 영향을 파악하였다. 연구결과 비탈면 안정해석시 동일한 강우조건 하에서도 비탈면경사에 따른 침투율이 고려되어야 할 필요성을 제시하였다.

Keywords : Slope stability, Unsaturated soil analysis, Rainfall infiltration rate, Slope surface condition, Slope inclination

1. 서 론

최근 발생하는 얇은 사면 파괴는 우기에 집중적으로

발생하는 경향이 있으며, 주로 토사 비탈면에 발생한다. 사면에서의 강우침투는 경사와 토양의 성질에 따라 침투량, 유출량, 지하수위 등의 영향을 주며, 이에 따라 사

¹ 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept., of Civil Engrg., Sang Ji Univ., Tel: +82-33-730-0477, Fax: +82-33-738-7587, yhwang@sangji.ac.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

면의 얇은 파괴는 지표로부터 침투하는 강우에 의한 포화 깊이 증가에 의해 발생하게 된다. 나아가 시간이 경과에 따라 자연 회복이 이루어지지 않는 산사태지의 경우, 사면 층이 붕괴 당시 뿐 만 아니라 그 이후에 발생하는 강우에 의해서도 다량의 토사를 지속적으로 유출시킴으로써 하류지역에 피해를 야기하는 잠재적인 요인이 될 수 있다. 또한 현재 사면안정해석시 강우강도를 반영하여 해석을 하는데, 강우강도만을 사면에 적용하여 지하수위 변동을 예측하는 것은 다소 무리가 따르는 것으로 판단된다.

Moon et al.(2008)은 사면의 경사는 국내 설계기준에 의해 많이 적용되는 경사에 대한 단면을 구성하였으며, 산정된 침투량을 바탕으로 경사보정을 한 후 수치해석을 통해 침투거동 및 지하수위양상에 대해 분석하였으며, Park et al.(2008)은 재현기간에 따른 강우강도와 지속기간이 고려되는 임의의 강우에 의해 유발되는 얇은 사면파괴의 가능성을 평가하기 위해서 일차원 침투모델인 Green-Ampt 모델(Green and Ampt, 1911)에 바탕을 둔 침투능에 따른 침투깊이를 산정 Pradel & Raad 방법을 이용하여 수치해석을 하였다(Pradel and Radd, 1993). 또한 Chun et al.(2013)은 산사태 발생 후 자연 회복이 거의 이루어지지 않은 산사태 붕괴면을 대상으로 표면침식에 영향을 미치는 강우강도를 파악하고, 붕괴사면으로 부터의 유출토사량 변화를 파악함으로써 산지토사재해 발생에 따른 2차 피해의 방지 및 복구를 위한 기초자료로 활용하고자 진행하였다.

강우시 포화깊이의 변화에 의해 사면의 파괴가 일어나게 되는데, 사면의 전단강도를 증가시키는 지표면에서의 음의 간극수압(Suction)의 감소로 인한 강도 저하가 얇은 사면파괴의 주요 원인인 것으로 알려져 있다 (Ng and Shi, 1998) 또한 지반의 함수특성을 얻게 되면, 이를 통해 불포화 지반의 전단강도를 예측할 수 있고 (Fredlund and Rahardjo, 1993; Vanapalli et al., 1996), 여러 연구자들에 의해 강우 시에 사면의 불포화 투수특성과 함수특성의 사이를 결정할 수 있는 관계식을 예측하였고, 단계적이지만 지반내의 침투와 그때마다 사면의 안정성을 해석하여 불포화 사면 파괴의 불안정성을 예측할 수 있게 되었다(Leong and Rahardjo, 1997).

기존의 연구에서의 사면 안정성 검토를 하는 경우 강우침투에 의한 침투량, 유출량, 지하수위, 불포화토 지반정수 등과 같이 강우 특성과 사면과의 관계를 주로 제시하고 있으나, 사면의 경사나 사면 표면의 조건에 따

른 영향은 고려하고 있지 않은 실정이다.

2. 사면경사 및 지표면 상태에 따른 침투율

2.1 사면 경사에 따른 침투율

강우시 지표면에 내린 우수는 일정부분이 지표면에 스며들어 지하수가 되고 나머지는 지표면을 따라 외부로 흘러들어 유출량에 따른 배수시설물의 용량을 결정하게 된다. 외부로 유출되는 정도는 유역면적, 유출계수, 지형의 경사도 등에 따라 산정하게 되며 유출되지 않고 지표면에 침투된 우수는 투수 과정을 거쳐 침윤선을 형성한 지하수를 형성하게 된다. 강우시 지표면에 내린 우수는 일정부분이 지표면에 스며들어 지하수가 되고 나머지는 지표면을 따라 외부로 흘러들어 유출량에 따른 배수시설물의 용량을 결정하게 된다. 유출계수(run-off coefficient)란 전강우량에 대한 총 유출량의 비율로 나타내며 지표면에 침투되는 지하수량은 유출계수와 밀접한 관계가 있다.

지반으로의 침투량의 산정은 대표적으로 Horton 모형을 이용하여 Rawls가 흙의 특성에 따른 매개변수를 제시하였고, 미국자연자원보호청(NRCS: National Resources Conservation Service)에서도 토양특성과 식생피복상태 등을 고려하여 유효강우량을 산정하는 방법을 제안하였다(Horton, 1939; 1940; Rawls et al., 1982; USDA, 1986; Hawkins et al., 2002).

미국자연자원보호청(NRCS)에서는 토양의 수리특성을 간편한 접근을 위해 수문학적 토양유형(Hydrologic Soilgroup)이라는 개념을 도입하였으며 수문학적 토양유형은 물이 잘 침투할수록 강우유출이 적게 발생한다는 사실에 기인하여 흙을 4가지로 구분하였다. 토양형 및 경사에 따른 NRCS 모형을 이용한 총 강우량과 누적 침투량의 비는 Sin(2008)에 의해 다음과 같이 제시되어 있으며, 토양모델 중 국내의 일반적인 비탈면 토질구성은 Type B 및 Type C에 해당한다(Table 1).

Table 1. Total rainfall and accumulate infiltration ratio (NRCS Model)

Ground condition	Slope				
	1:1.0	1:1.2	1:1.5	1:2.0	CN
Type A	0.603	0.637	0.670	0.701	30
Type B	0.337	0.347	0.355	0.363	58
Type C	0.223	0.227	0.231	0.234	71
Type D	0.166	0.168	0.170	0.172	78

지반으로의 침투모형은 지면에서 중력 방향으로 침투되는 양을 산정하게 되며, 이를 그대로 사면에 적용시킬 경우 사면경사의 직각 방향으로 침투되는 것으로 고려되어 결국 침투량이 과대 산정되므로 사면의 침투 거동이나 안정성에 있어서 과대산정 될 가능성이 있다. 이를 위해 보정계수를 경사별로 산정하여 모형에 의해 산정된 침투량에 보정계수를 곱하여 최종적인 침투량을 산정하게 된다(Moon et al., 2008). 보정계수는 경사별 경사각을 이용하여 산정하였으며, 최종 보정되는 침투량은 다음의 식 (1)과 같다. 모형별 침투량 산정을 토대로 경사에 따른 침투량 보정계수를 사용하였다.

$$i = I \times \cos(\text{slope angle}) \quad (1)$$

여기서 i 는 보정 침투량이고, I 는 강우강도이다. 다음 Table 2는 보정 침투량을 산정하기 위한 경사별 보정계수를 나타낸다.

2.2 지표면 상태에 따른 침투율

인공사면의 경우, 사면의 안정성유지, 토양유실방지, 경관복원, 자연식생천이 유도, 이산화탄소 저감 등을 목적으로 결정하게 된다. 국내에서 적용되는 일반적인 사면 표면처리공법으로는 격자블럭 및 돌붙이기 공법, 콘크리트 뽑어붙이기 공법, 녹화공법 등이 있고, 녹화공법의 경우에는 잔디나 수목을 식재하는 경우, 종자뿌어붙이기, 식생매트 및 식생기반재 뽑어붙이기, 거적덮기공법 등이 적용된다. 이 중 콘크리트 뽑어붙이기 같은 경우는 강우침투가 불가능하고, 식생공법이 적용된 경우에는 식생상태 등에 따라 강우의 침투율이 달라지게 된다.

Table 2. Correction coefficient with respect to slope inclination

Slope inclination (V:H)	1 : 1.0	1 : 1.2	1 : 1.5	1 : 2.0
Correction coeff.	0.707	0.768	0.833	0.891

Table 3. Comparison of infiltration rate of cover crop after cultivation

Species	Infiltration rate (mm/hr)	Contrast bare land
Perennial Ryegrass	31.1	1.4
Chrysanthemum Zawadskii	31.0	1.4
White clover	28.1	1.3
Bare land (control)	22.1	1.0

농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구센터에서는 2009년에 파종하여 2011년에 조사한 결과를 토대로 피복작물에 따른 강우침투율에 대한 연구가 수행되었다. Table 3에서와 같이 강우시 침투율은 초종에 따라 차이가 많은 것으로 나타났으며, 대부분 나지상태에서 보다 침투율이 높은 것으로 분석되었다(Lee et al., 2011).

3. 경사 및 피복상태 별 사면안정성 검토

3.1 해석조건

본 논문에서는 강우재현기간 및 강우지속시간별 확률강우강도를 가정하여 적용하였으며 서울지역 강우재현기간 50년 빈도, 강우지속시간 48시간 조건을 가정하여 해석에 이용하였다(Table 4). 표준사면의 높이는 5.0m 토사사면으로 가정하고, 사면의 경사는 1:1.0, 1:1.2, 1:1.5, 1:2.0으로 가정하였다.

사면안정성 검토는 사면의 경사에 따라 지표면이 녹화되어 있는 경우와 Shotcrete가 표면 처리 되어있는 경우로 구분하여 수행하였다. Shotcrete는 강우침투가 발생하지 않으므로 절취면 상부로의 유입만을 고려하고 Shotcrete가 시공된 표면의 침투는 고려하지 않았으며, 녹화가 된 것으로 가정한 경우는 페레니얼라이그라스의 나지대비 침투율(140%)을 기준으로 산정하여 적용하였다. 각 사면경사 및 표면상태별로 적용된 강우강도는 Table 5와 같다.

지반조건에 따른 강우침투특성을 분석하기 위하여 투수계수 $1 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 의 조건에 대하여 해석을 수행하였으며 기타 지반조건은 사면의 높이는 5m이며, 지반의 조건은 단위중량($\gamma_t = 18 \text{kN/m}^3$), 내부마찰각($\phi = 30^\circ$), 점착력($c = 10 \text{kPa}$), 함수비($w = 25\%$)로 가정하여 해석을 실시하였다.

불포화지반은 흡입자, 물, 공기, 물-공기 접촉면의 4상으로 이루어져 있기 때문에 불포화토의 흐름, 변형 및

Table 4. Probability rainfall intensity for seepage analysis

Rainfall duration time	Recurrence interval		50 years
	50 years		
1 (hr)	Rainfall intensity		99.2 mm/hr
24 (hrs)	Rainfall intensity		14.3 mm/hr
48 (hrs)	Rainfall intensity		8.8 mm/hr
	Rainfall intensity	100% infiltration	8.8 mm/hr

강도특성을 고려하기 위해서는 간극수와 간극공기사이의 압력차이로 유발되는 모관흡수력을 고려해야 한다. 함수특성곡선은 흙속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의되며 불포화 정도에 따른 모관흡수력을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 함수특성곡선식은 다음의 식 (2)를 이용하였다.

$$\theta = \frac{1}{\left[\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right]^m} \quad (2)$$

여기서, θ : 정규화된 함수특성곡선
 ψ : 모관흡수력
 e : 자연수, 2.71828
 a, n, m : 매개변수

불포화토의 투수계수와 체적함수량은 Fredlund & Xing의 식을 이용하였으며, 각각 $a=43.539$, $n=0.754$, $m=1.426$,

투수계수는 $k=5 \times 10^{-6}$ cm/sec를 가정하여 적용하였다 (Fredlund et al., 1994).

3.2 경사에 따른 침투율 고려

사면경사에 따른 침투율을 고려하여 재현기간 및 강우지속시간별 확률강우강도를 토대로 각 사면의 표면에 적용하여 해석을 실시하였다. 해석은 사면의 경사에 따라, 사면의 경사에 의한 침투율의 변화를 고려하지 않는 경우는 강우 침투율을 100%로 하여 적용시키고, 사면 경사에 따른 침투율의 변화를 고려하는 경우는 각 사면경사별로 침투율을 산정하여 해석한 후 결과를 비교하였다. 사면의 경사만을 고려할 경우, 경사면에서의 강우침투율은 경사에 따라 강우량의 70% 정도(1:1.0)에서 90% 정도(1:2.0)로 침투되는 것으로 하였다(Fig. 1, Table 6).

해석결과 사면의 경사가 급해질수록 지반으로의 침투

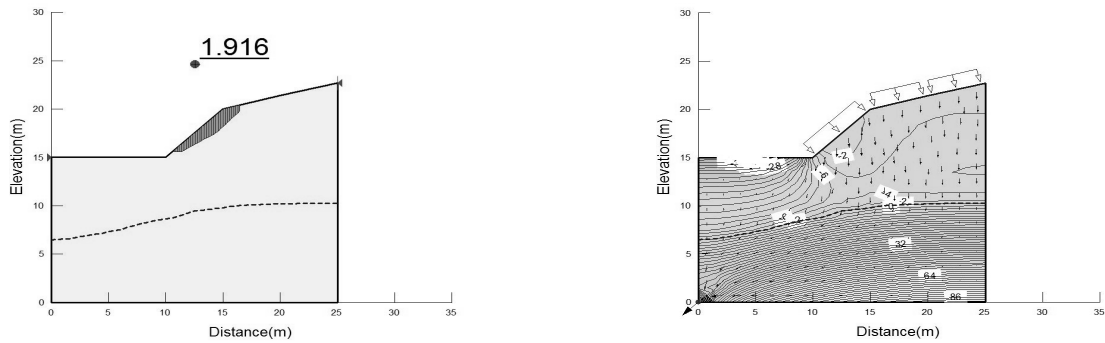


Fig. 1. Factor of safety with respect to slope inclination (1:1.0 (V:H) - 100% infiltration)

Table 5. Return period and the probability rainfall intensity to be penetration due to the surface treatment of the slope

Rainfall duration time		Recurrence interval	50 years	Slope			
				1 : 1.0	1 : 1.2	1 : 1.5	1 : 2.0
48 (hrs)	Rainfall intensity (mm/hr)	100% infiltration	8.8 mm/hr	8.8 mm/hr	8.8 mm/hr	8.8 mm/hr	8.8 mm/hr
		Consider inclination	8.8 mm/hr	6.22 mm/hr	6.76 mm/hr	7.33 mm/hr	7.84 mm/hr
		Consider vegetation	12.32 mm/hr	12.32 mm/hr	12.32 mm/hr	12.32 mm/hr	12.32 mm/hr
		Vegetation + inclination	12.32 mm/hr	8.68 mm/hr	9.46 mm/hr	10.26 mm/hr	10.98 mm/hr
		Shotcrete	0 mm/hr	0 mm/hr	0 mm/hr	0 mm/hr	0 mm/hr

Table 6. Factor of safety with respect to slope inclination

Slope	Normal state		Consider inclination		F.S change (%)
	Infiltration ratio	F.S	Infiltration ratio	F.S	
1 : 1.0	100%	1.801	70.7%	1.92	6.6
1 : 1.2	100%	1.987	76.8%	2.089	5.1
1 : 1.5	100%	2.297	83.3%	2.383	3.7
1 : 2.0	100%	2.731	89.1%	2.791	2.1

율이 감소하게 되므로 사면의 경사를 고려하지 않고 강우량의 100%를 침투시켰을 경우와의 안전율 변화가 크게 나타났다. 본 가정단면에서의 안전율 변화는 1:1.0(V:H) 경사의 경우 약 6.6% 정도 차이가 발생하였으며, 1:2.0 경사의 경우는 약 2.1% 정도의 안전율 변화가 있는 것으로 계산되었다. 안전율 변화정도는 지반의 특성이나 강우특성 등에 따라 달라질 수 있을 것이나 이러한 정도의 차이는 사면의 안정성 검토시 고려해야 할 필요성이 있다고 판단된다.

3.3 표면처리에 따른 침투율 고려

사면의 표면처리에 따른 영향은 표면이 녹화되었을 경우와, Shotcrete와 같이 지표면으로의 침투를 허용하지 않는 경우에 대하여 안정성을 비교검토 하였다. 표면이 녹화된 경우는 녹화에 사용된 초본류의 종류에 따른 침투율 결과를 활용하여 사면안정해석에 적용하고자 하였으며, 본 연구에서는 초본류 종류 중 페레니얼라이그라스의 침투율을 고려하여 비교하고자 하였다. 시험 결과에 의하면, 페레니얼라이그라스의 침투율은 녹화공법이 적용되지 않은 나지상태의 침투율 대비 1.4배를 적용하였으며, Shotcrete의 경우는 침투가 허용되지 않으므로 표면 침투를 고려하지 않고 해석하였다(Lee et al., 2011).

지표면의 녹화는 녹화되지 않은 상태에 비하여 강우의 침투율을 높이므로 사면의 전체 안정성을 저하시키게 된다. 사면에 식생되는 초종의 종류에 따라 침투율이 다르게 될 것이지만, 녹화되지 않은 상태의 침투율의 140%를 적용하여 사면안정해석을 수행한 결과 표면처리를 하지 않은 상태에 비하여 약 4%~6% 정도의 안전율 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 녹화되지 않은 지

반 대비 140%의 침투율은 일반적으로 절취사면의 녹화 상태를 고려하여 시험한 결과는 아니므로 적용성의 한계는 있을 수 있으나, 사면 표면처리 상태에 따라 사면의 안전율이 달라질 수 있으므로 이러한 영향을 고려할 필요가 있을 것이다

또한 Shotcrete가 시공되었을 경우는 사면의 강우침투를 허용하지 않으므로 사면 배면에서의 침투만을 고려하여 안정성을 검토한 결과 Shotcrete의 영향을 고려하지 않았을 때에 비하여 약 28~33% 정도 안전율이 증가하는 것으로 나타나, 매우 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

3.4 사면경사 및 표면처리에 따른 침투율 고려

앞에서 검토한 바와 같이 사면의 경사에 따른 침투율과 사면의 표면상태에 따른 침투율을 모두 고려하여 가정사면의 안정성을 비교하였다(Table 8 참조). 또한 Fig.

Table 7. Factor of safety with respect to surface condition (vegetation and shotcrete)

Slope	Infiltration condition	F.S	F.S change (%)
1 : 1.0	100%	1.801	-
	Vegetation (140%)	1.724	-4.27
	Shotcrete (0%)	2.305	27.98
1 : 1.2	100%	1.987	-
	Vegetation (140%)	1.888	-4.98
	Shotcrete (0%)	2.547	28.18
1 : 1.5	100%	2.297	-
	Vegetation (140%)	2.166	-5.70
	Shotcrete (0%)	2.941	30.52
1 : 2.0	100%	2.731	-
	Vegetation (140%)	2.573	-5.79
	Shotcrete (0%)	3.621	32.59

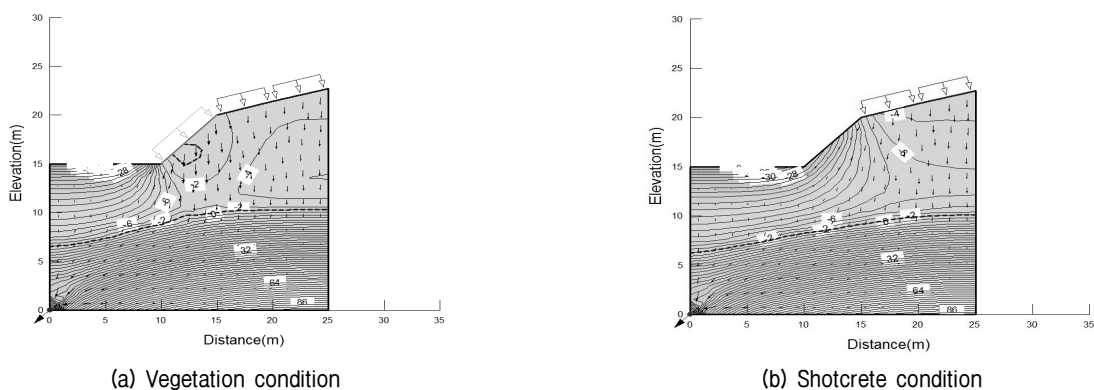


Fig. 2. Seepage analysis user two different infiltration condition

Table 8. Factor of safety according to slope inclination and surface condition (vegetation)

Slope	Infiltration condition	F.S	F.S change (%)
1 : 1.0	100%	1.801	-
	Inclination + vegetation	1.799	-0.11
1 : 1.2	100%	1.987	-
	Inclination + vegetation	1.960	-1.36
1 : 1.5	100%	2.297	-
	Inclination + vegetation	2.228	-3.00
1 : 2.0	100%	2.731	-
	Inclination + vegetation	2.619	-4.10

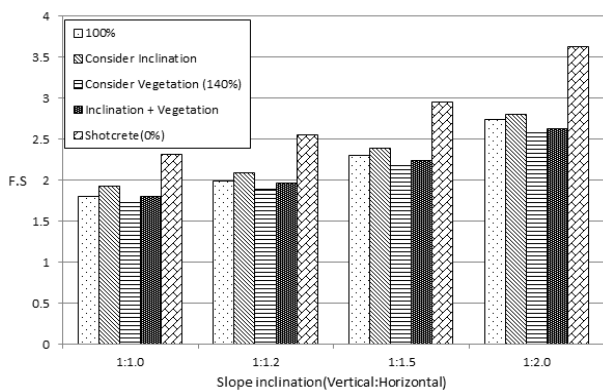


Fig. 3. Comparison of factor of safety according to slope inclination and surface condition (vegetation and shotcrete)

3은 각각의 경우에 대한 안전율 해석결과를 나타낸 것이다.

지표면의 경사가 급해질수록 강우의 침투율이 감소하고, 사면이 녹화되어 있을 경우는 강우의 침투율이 증가하게 된다. 이러한 영향을 모두 고려하여 해석을 수행한 결과 사면의 경사 및 녹화상태를 고려하지 않고 해석을 수행한 경우와 비교하여 최대 약 4% 정도의 안전율 감소가 있는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 사면안정성 해석시 사면의 안정성을 과대평가하게 될 수도 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

사면의 안정성은 강우조건에 따라 크게 영향을 받으며, 지반내부로의 강우침투는 사면의 다양한 조건에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 사면경사 및 지표면 보호공이 사면안정성에 미치는 영향을 비교하고, 이러한 인자의 고려 필요성을 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 사면의 경사와 표면보호공의 상태에 따른 사면안정율을 변화를 계산하기 위하여 높이 5m의 표준 토사사면을 가정하고, 서울지역 50년 빈도의 강우강도를 고려하여 안정성 검토를 수행하였다. 토사사면의 경사는 각각 1:1.0(V:H), 1:1.2, 1:1.5, 1:2.0의 경우를 가정하고 강우침투에 따른 침투해석 후 사면안정성을 분석하여 비교하였다.
- (2) 사면에서 강우침투는 사면경사에 따라 영향을 받게 되며, 경사에 따른 강우침투율 보정계수를 적용하여 사면안정성을 분석한 결과, 사면의 경사를 고려하지 않고 강우를 100% 침투시키는 경우에 비하여 약 2%~6% 정도의 안전율이 감소하는 것으로 계산되어 사면안정 해석시 사면경사에 따른 강우침투율을 고려할 필요가 있는 것으로 판단된다.
- (3) 사면 표면이 녹화되었을 경우는 식생에 의해 지반 침투율이 증가하게 되며, 표면이 Shotcrete 등과 같이 침투가 불가능한 공법으로 시공되었을 경우에는 실제적으로 경사면에서의 침투가 발생하지 않게 고려하였으며, 지표면이 녹화되어 침투율이 증가하게 된 경우와 표면상태를 고려하지 않고 강우침투가 100% 발생하는 경우의 사면 안전율을 비교한 결과 4%~6% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 또한 Shotcrete 등으로 인해 침투가 발생하지 않는 조건에서는 약 27~33%의 안전율이 증가하는 것으로 예상되기 때문에, 사면표면상태의 고려가 필요한 것으로 판단된다.
- (4) 사면경사에 따른 강우침투율의 감소와 녹화에 따른 강우침투율의 증가를 모두 고려하여 녹화된 경사면에서 침투율을 산정하고, 사면안정해석을 수행한 결과, 사면경사에 따라 각각의 안전율 차이가 달라지게 되나 최대 약 4% 정도의 안전율 감소가 있는 것으로 해석되었다. 이러한 안전율 변화는 사면의 안정대책수립에 큰 영향을 미치는 정도이므로 강우침투를 고려한 사면안정해석시 경사와 지표면 상태에 따른 강우침투율을 반영할 필요가 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 상지대학교 교수연구년제 지원에 의한 것이며 이에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Chun, K.W., Kwon, S.M., Seo, J.I., Cho, H.H., Kim, S.W., and Lee, D.K. (2013), "Rainfall Intensity Regulating Surface Erosion and Its Contribution to Sediment Yield on the Hillslope Devastated by a Shallow Landslide", *Journal of Forest Science*, Vol.29, No.4, pp.314-323. (in Korea)
2. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), "Soil Mechanics for Unsaturated Soils", John Wiley & Sons, New York, pp.560.
3. Fredlund, D.G. Xing, A., and Huang, S. (1994), "Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, 31, pp.533-546
4. Green, W.H. and Ampt, G.A. (1911), "Studies of Soil Physics I. The Flow of Air and Water through Soils", *J. Agr. Sci.*, 4, pp.1-24.
5. Hawkins, R.H., Jiang, R., Woodward, D.E., Hjelmfelt, A.T., and Van Mullem, J.A. (2002), "Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio", *Proceedings of the Second Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, Nevada (U.S. Geological Survey).
6. Horton, R.E. (1939), "Analysis of Runoff-plat Experiment with Varying Infiltration Capacity", *Transactions of the American Geophysical Union* 20, pp.693-711.
7. Horton, R.E. (1940), "An Approach Toward a Physical Interpretation of Infiltration Capacity", *Soil Science Society of America Proceedings*, Vol.5, pp.399-417.
8. Leong, E. and Rahardjo, H. (1997), "Permeability Functions for Unsaturated Soils", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol.123, No.12, pp.1118-1126.
9. Lee, G.J., Lee, J.T., Ryu, J.S., Kim, J.S., Lee, Y.G., Kim, J.I., and Ji, S.N. (2011), "Effect of Cover Crop Cultivation to Improve Soil Physical Property in Highland", Highland Agriculture Research Center, National Institute of Crop Science. (in Korea)
10. Moon, Y.I., Lee, I.J., and Oh, T.S. (2008), "Estimation of Infiltration and Simulation of Seepage Behavior in Slope using the Rainfall Data in Seoul", *The Korean Society of Societal Security*, Vol.8, No.5, pp.103-109. (in Korea)
11. Ng, C.W.W. and Shi, Q. (1998), "A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage", *Comput. Geotech.*, Vol.22, No.1, pp.1-28.
12. Park, J.J., Kim, K.W., and Kim, B.J. (2008), "A Study of Stability Analysis on Unsaturated Soil Slopes Considering Rainfall", *Korean Geosynthetic Society*, Vol.7, No.4, pp.9-18. (in Korea)
13. Pradel, D. and Raad, G. (1993), "Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes", *J. Geotech. Engrg. ASCE*, Vol.119, No.2, pp.315-332.
14. Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Saxton, K.E. (1982), "Estimation of Soil Water Properties", *TRANSACTIONS of the ASAE* Vol.25, No.5, pp.1316-1320.
15. Sin, D.J. (2008), "A Study on the Analysis of the Groundwater Level Considering the Slope Angle and Calculation of Infiltration According to the Rainfall Intensity", University of Seoul, Master's thesis, pp.1-80.
16. United States Department of Agriculture (1986), *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55 (TR-55) (Second Edition ed.). Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division.
17. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., and Clifton, A.W. (1996), "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33 pp.379-392.

Received : February 28th, 2014

Revised : February 11th, 2015

Accepted : February 12th, 2015