

## 안전계수 변화를 고려한 사면거동의 3차원 분석기법 연구

## 3-Dimensional Analysis of Slope Behavior with Varying Safety Factor

한 희 수<sup>†</sup> · 백 용<sup>1)</sup> · 조 재 호<sup>2)</sup> · 황 찬 규<sup>3)</sup>

Han, Heuisoo · Baek, Yong · Jo, Jaeho · Hwang, Changu

**ABSTRACT** : Generally, slope behavior is analyzed by 2-dimensional creep model. Creep behavior shows the deformation variation as time goes by without stress increment. Convention 2-dimensional creep analysis does not have the term of stress variation, it means creep analysis could not figure out the relationship of shear strength variation according to the stress variation and displacement. The slope weight and shear strength is directly related and interlocked to the safety variation and displacement of slope, therefore, this phenomenon could be treated and analyzed as combining the hysteresis and creep, the iteration of this process will result in the slope safety. Furthermore, the combined analysis will be the slope analysis considering shear stress, displacement and shear strength with time variation. In real case, because the variation of shear stress and strength happen at the same time, they should be changed into safety factor which is function of them. This paper shows the 3-dimensional variation of unit weight of soil with hybrid analysis considering creep and hysteresis on the seepage and drainage of rainfall, futhermore variations of shear stress and strength which make the safety factor change.

**Keywords** : Slope behavior, Creep, Hysteresis, 3-Dimensional Analysis

**요 지** : 사면의 거동에 관한 종래의 해석 기법은 사면거동을 시간과 변위의 2차원 크리프로 해석하는 것이었으나, 이러한 해석 기법은 강우에 의한 응력변화를 고려 않고 시간에 따른 변위만을 고려하여, 강우 시 사면의 거동 및 붕괴를 설명하지 못한다. 또한 강우에 의한 이력현상으로 인해 파괴면내의 전단에너지가 감소한다. 크리프 해석은 응력항을, 이력현상 해석은 시간항을 무시한 해석이므로, 두 가지 해석을 결합하여, 사면의 거동을 해석한다면, 응력변화, 변위 및 시간을 모두 고려한 실제 사면의 거동해석이 됨을 알 수 있다. 그러나 응력변화에 관한 항은, 강우로 인한 실제 사면의 침투 및 배수 시, 전단응력의 변화 및 전단강도의 변화를 동시에 유발하므로, 이 두 항을 동시에 고려할 수 있는 안전계수항으로 바꾸어야 한다. 본 논문은 강우의 지반침투 및 배수로 인하여 사면의 단위중량이 변하는 과정에 대한 크리프와 이력현상을 고려할 수 있는 결합해석으로 고찰하고 이에 따른 사면붕괴에 관한 전단응력과 전단강도의 변화 및 안전계수변화를 3차원으로 나타내고자 수행한 결과이다.

**주요어** : 사면 거동, 크리프, 이력현상, 3차원 해석

## 1. 서 론

최근, 국가기반시설 확충에 따른 신설도로 건설로 인하여 도로사면의 수는 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 우리나라의 경우 국토의 70% 이상이 가파른 산지로 구성되어, 절토사면의 거동에 따른 안정성 문제는 매우 중요한 토목기술자들의 관심사이다. 사면거동을 유발하는 요인들은 지반 풍화, 지하수 유입, 대기온도 변화 등 매우 다양하며, 사면거동을 정량적으로 추정하는 예측기법이나 안정해석방법이 개발될지라도 영향을 끼치는 모든 인자를 고려하기는 어렵다. 이러한 이유로 사면 설계, 시공 및 유지관리는 많은 불확정 요인이 포함되게 된다.

사면 붕괴는 집중호우 시 많이 발생하는데, 이는 강우로

인한 지하수의 지반침투 및 배수로 인해 지반의 단위중량이 변화과정에 따른 사면의 전단응력(Driving Force) 및 전단강도(Resisting Force) 증감으로 인한 안전계수의 변화(한희수, 2005; Fukuzono, 1985; Fukuzono, 1990; Hayashi, 1988; Saito, 1996)로 이어진다.

사면의 거동에 관한 종래의 해석 기법은 사면거동을 시간과 변위의 2차원 크리프로 해석(Fukuzono, 1985; Fukuzono, 1990; Hayashi, 1988; Saito, 1996)하는 것이었으나, 이러한 해석 기법은 강우에 의한 응력변화를 고려 않고 시간에 따른 변위만을 고려하여, 강우 시 사면의 거동 및 붕괴를 설명하지 못한다. 사면의 강우로 인한 침투 및 배수에 의해 사면내의 전단응력 및 강도변화에 의하여 사면의 거동이 발생하므로, 이로 인한 사면의 파괴면 전단강도는 지속적인 에너

† 정희원, 국립금오공과대학교 토목공학과 교수(E-mail : hanhs@kumoh.ac.kr)

1) 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원

2) 비희원, 국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정

3) 비희원, 서울벤처정보대학원대학교 유시티학과 교수

지 손실이 발생한다. 이는 강우에 의한 이력현상으로 인해 파괴면내의 탄성에너지가 감소하며 파괴면이 감당할 수 있는 에너지의 값이 감소하게 되는 것을 말한다.

본 논문은 강우의 지반침투로 인하여 사면의 단위중량이 변하는 과정을 고찰하고 이에 따른 사면붕괴에 관한 전단응력과 전단강도의 변화 및 안전계수변화를 Creep(크리프)와 Hysteresis(이력현상)이 결합된 해석으로 사면의 3차원 거동을 분석하고자 한다.

## 2. 사면의 안정해석

### 2.1 크리프(Creep) 거동 해석

사면의 거동에 관한 종래의 해석 기법은 사면거동을 크리프로 해석하는 것이었다. 사면의 크리프해석은 강우에 의한 사면의 전단응력의 변화와 전단강도의 변화를 무시하고, 장기간에 걸친 사면의 전단강도의 감소에 따른 진행성 파괴 거동을 시간과 관련하여 해석한 것이다. 즉, 사면 내의 강우에 의한 응력변화를 무시하고, 시간이 증가함에 따른 사면의 거동변화를 해석한 것이다. 이러한 해석 기법은 강우에 의한 응력변화를 고려하지 못하므로 강우 시 사면의 거동 및 붕괴를 설명하기 어려운 단점이 있다. 그림 1은 암반사면 및 토사사면의 크리프해석에 관한 일반적인 그래프로서

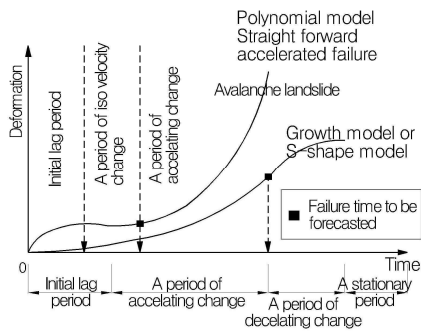


그림 1. 암반사면 및 토사사면의 크리프 해석

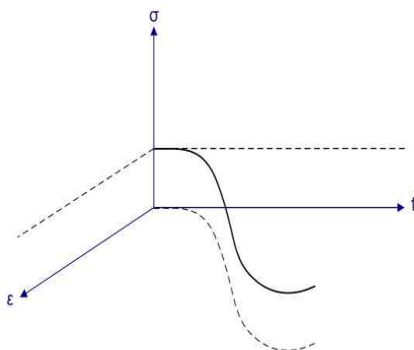


그림 2. 사면 내 응력변화를 무시한 사면거동의 3차원 해석

사면의 응력에 관한 항이 없음을 알 수 있다. 이를 응력변화를 고려한 3차원 그래프(한희수, 2005)로 나타내면 그림 2와 같으며, 이는 응력변화를 무시한 시간과 변위만을 고려한 사면의 3차원 해석임을 알 수 있다. 그림 2에서  $\sigma$ 는 강우로 인한 사면의 하중변화,  $\epsilon$ 는 사면 변위 그리고  $t$ 는 시간을 의미한다. 이 그림에서  $\sigma$  vs.  $\epsilon$  면에 투영된 점선은 이력현상을 보여주며, 하부의  $t$  vs.  $\epsilon$  면에 투영된 점선은 크리프현상을 나타낸다. 그리고  $\sigma$  vs.  $t$  면에 투영된 점선은 강우 침투로 인한 지반 내 전단응력 증가분을 나타낸다. 응력변화를 고려하지 않으면 이력현상을 나타내는  $\sigma$  vs.  $\epsilon$  면에 투영된 점선은 수평직선으로 나타나고, 지반 내 전단응력 변화를 나타내는  $\sigma$  vs.  $t$  면에 투영된 점선 역시 수평직선으로 나타난다.

### 2.2 이력현상(Hysteresis) 해석

강우 침투로 인한 사면내의 전단응력 및 강도변화에 의하여 사면변위가 발생하며, 이로 인한 사면 파괴면의 전단강도는 지속적인 에너지 손실(Energy Loss)이 발생한다. 이는 파괴면 전단강도의 시간 열화현상으로 파괴면 내부의 전단저항력이 지속적으로 감소하는 현상이며, 강우에 의한 이력현상으로 인해 파괴면내의 탄성에너지가 감소하여 파괴면이 감당할 수 있는 외부 에너지의 값이 감소하게 되는 것을 의미한다. 그림 3은 사면의 강우로 인하여 발생한 이력현상으로서 사면의 전단 에너지가 감소되어 파괴에 이르는 과정을 나타내고 있다. 그림 3에서 응력변화와 변형률에 관한 항만 있으며, 시간에 관한 항이 없음을 알 수 있다. 그림 2의  $\sigma$  vs.  $\epsilon$  면의 그래프는 직선이나, 이력현상을 나타낸 그림 3의  $\sigma$  vs.  $\epsilon$  면의 그래프는 에너지 손실을 포함한 곡선임을 알 수 있다.

### 2.3 크리프와 이력현상에 대한 결합 해석

하중의 변화 없이 시간에 따른 변위량 변화만을 나타내

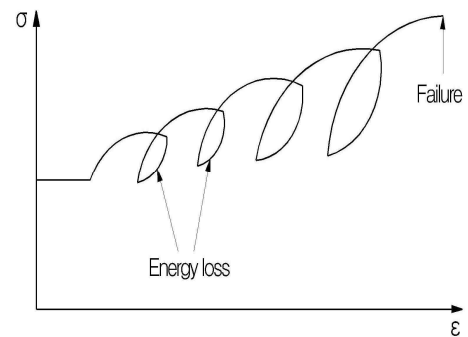


그림 3. 이력현상으로 인한 사면의 전단 에너지 감소

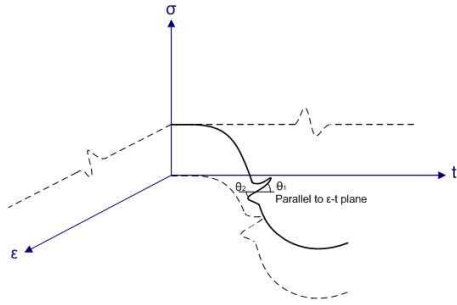


그림 4. 응력변화를 고려한 3차원 실시간 사면의 거동해석

는 크리프 현상은 일반적으로 사면해석에 적용되어 왔으나, 강우 침투로 인한 사면 내 지반의 단위중량변화를 설명하지 못하는 약점이 있다. 침투로 인한 단위중량변화는 사면 내 전단응력의 변화를 유발하므로 사면안정 해석 시 이로 인한 응력 증가분을 설명할 수 있어야 한다. 이를 위해 이력현상 개념을 응용하고자 하나 이력현상은 응력과 변위에 대한 상관관계만을 설명하므로, 두 가지 개념을 결합하여 사면의 거동을 해석한다면, 응력변화, 변위 및 시간을 모두 고려한 방법임을 알 수 있다.

그림 4는 그림 1(크리프), 그림 2(이력현상 없는 3차원 크리프) 및 그림 3(이력현상)을 모두 고려한 3차원 실시간 사면의 거동해석 모델(model)을 나타내고 있다.

강우로 인한 사면의 침투 및 배수 시, 함수비 변화에 따른 지반의 점착력, 내부마찰각 및 수직하중 변화를 유발하여 이에 따른 전단강도 변화를 유발한다. 또한, 강우로 인한 함수비 변화는 지반 단위중량의 변화로 인한 전단응력 변화를 유발하므로 두 가지 항을 동시에 고려할 수 있는 안전계수항으로 바꾸어야 한다.

$$\text{안전율(Safety Factor), F.S.} = \frac{\text{전단강도/전단응력} = \text{Resisting Force/Driving Force}}{\quad} \quad (1)$$

### 3. 사면 적용사례를 위한 해석

#### 3.1 사면의 영역구분

사면 상부가 건조한 상태일 경우, 내부는 건조영역, 불포화영역 및 포화영역의 세 형태로 구분할 수 있다. 사면 적용 사례와 관련해 해석을 간단히 하기 위해 파괴면을 그림 5와 같이 직선으로 가정한다면, 전단응력은  $W\sin\beta$ 임을 알 수 있다. 전단강도는 아래의 그림 5와 같이 건조(①), 불포화(②) 및 포화영역(③)의 3영역으로 구분하여 계산하였다. 파괴면 내의 건조(④), 불포화(⑤) 및 포화영역(⑥)의 합은 전체 사면의 무게(W)가 된다. 전단강도를 계산하기 위한 각 영역의 파괴면의 길이는 L1(건조), L2(불포화) 및 L3(포화)

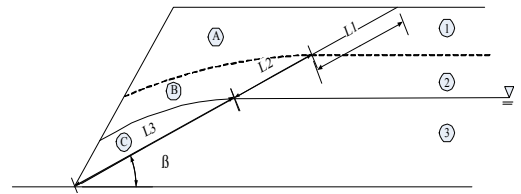


그림 5. 사면의 영역구분 및 파괴면 가정

표 1. 강우 침투로 인한 사면의 전단강도 변화

전단응력 (Driving F.)	$W\sin\beta$
전단강도 (Resisting F.)	① 건조영역 $\tau_{f1} = c' + \sigma \tan\phi'$
	② 불포화영역 $\tau_{f2} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan\phi' + (u_a - u_w)_f \tan\phi'$
	③ 포화영역 $\tau_{f3} = c_u$
사면의 무게	$W = \text{A} + \text{B} + \text{C}$
전단강도의 합	$T = \tau_{f1} + \tau_{f2} + \tau_{f3}$ $\tau_{f1}, \tau_{f2}, \tau_{f3}$ 강우에 의한 침투 및 배수로 변화
강우 침투시 안전계수의 변화	$FS = \frac{RF \downarrow}{DF \uparrow}, FS \downarrow$

의 합이다. 표 1은 그림 5에 보인 사면의 강우로 인한 침투 거동을 정리한 표이다.

강우로 인한 지반의 전단응력과 전단강도의 변화를 계산하기 위해 불포화 구간을 고려할 경우, 불포화구간의 전단강도를 나타내는  $\tau_{f2}$ 를 사용하고, 무시할 경우 건조포화영역에서의 전단강도인  $\tau_{f1}$  및  $\tau_{f3}$ 를 이용한다.

#### 3.2 사면의 적용

강우로 인한 지반의 침투 특성에 따른 거동해석 모델 사면은 그림 6에 보인 바와 같으며, 이 모델 사면을 이용하여 사면 바닥까지 건조된 사면이 지반의 침투 과정을 상부로부터 1m 단위로 침투되는 것으로 하여 계산하였으며, 사면의 배수과정 역시 강우가 그친 후 지반이 상부로부터 지하수가 배수되는 것을 1m 단위로 spread sheet를 이용하여 계산하였다. 시간에 따른 강우량 및 변위값은 건설기술연구원에서

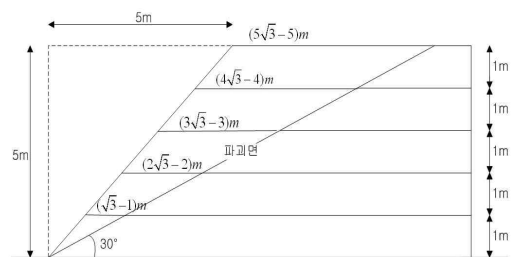


그림 6. 사면의 거동해석을 위한 모델 사면

표 2. 사면 안정계산의 입력데이터(Input Data)

건조 단위중량	15.7ton/m <sup>3</sup>
포화단위중량	19.6ton/m <sup>3</sup>
내부마찰각	30degree
접착력	4.9ton/m <sup>2</sup>
비배수접착력	49.1ton/m <sup>2</sup>

표 3. 안전율의 변화

조 건	침투깊이	안 전 율
침투과정	강우 전	1.68
	1m	1.50
	2m	1.35
	3m	1.23
	4m	1.11
	5m	1.00
조 건	건조대 깊이	안 전 율
배수과정	완전 포화	1.00
	1m	1.12
	2m	1.25
	3m	1.39
	4m	1.54
	5m	1.68

표 4. 사면 계측값과 강우에 따른 안전율 변화

시 간(hr)	변 위(mm)	강우량(mm)	안전율(F.S.)
0	11.43	0.00	1.683013
12	11.43	0.00	1.683013
24	11.43	32.00	1.501294
36	11.43	16.75	1.427288
48	11.43	1.50	1.353282
60	11.43	33.25	1.289536
72	11.43	65.00	1.225789
84	11.43	106.50	1.167976
96	11.43	148.00	1.110163
108	11.995	102.50	1.055082
120	12.56	57.00	1.0
132	12.59	39.25	1.0
144	12.62	21.50	1.0
156	14.83	10.75	1.0
168	17.04	0.00	1.0
180	17.065	0.50	1.058880
192	17.09	1.00	1.1177610
204	17.09	1.00	1.184204
216	17.09	1.00	1.250647
228	17.09	0.00	1.322346
240	17.09	0.00	1.394046
252	17.09	0.00	1.467523
264	17.09	0.00	1.541000
276	17.09	0.00	1.612006
288	17.09	0.00	1.683013
300	17.09	0.00	1.683013

획득한 경북 00면의 계측사면 실측값을 이용하였고, 모델 사면은 실측사면의 형상을 단순화하여 적용하였다. 표 2는 사면의 안정계산을 위한 지반조건의 입력데이터(Input Data)를 정리한 것이며, 표 3은 표 2의 지반조건과 강우 침투깊이에 따른 안전율을 정리한 것이다. 표 4는 사면 계측 데이터(data)와 강우에 따른 안전율 변화를 정리하여 시간에 따른 변위 및 안전율 변화를 정리한 것으로 이를 이용하여 사면의 3차원 거동해석을 할 수 있다.

## 4. 사면거동의 3차원 해석

### 4.1 안전율의 변화

강우의 침투 및 배수에 따른 안전율의 변화는 지속적으로 변한다. 전단응력의 경우 침투과정에서 사면 내 지반의 단위중량의 증가로 말미암아 지속적으로 증가하며, 배수과정에 따라 다시 지속적으로 감소한다. 이와 반대로 전단강도의 경우 침투과정에서 지속적으로 감소 후, 배수과정에서 지속적으로 증가한다. 3차원 그래프를 그려주는 상용 프로그램(Origion Pro 6.1)을 이용하여 만든, 그림 7은 강우에 따른 사면안전율의 변화(SF) 및 전단응력(DF)과 전단강도(RF)의 변화과정을 보여준다. 이는 3차원 공간상에서 SF, DF 및 RF의 변화과정이 동시에 모두 고려된 그래프이다. 본 그래프를 각 평면상에 투영하면 각 항목들의 변화과정을 알 수 있다. 즉, 그림 7의 3차원 공간에서, 각 평면을 분할하면, SF-DF 평면, SF-RF 평면 및 DF-RF 평면의 3가지 평면으로 분할 할 수 있다. 세 평면내의 그래프 모두 폐곡선을 이루는 것을 볼 수 있으며, 이는 전단응력, 전단강도 및 안전율 모두가 강우에 의해 지속적으로 증가 혹은 감소되는 폐곡선의 형태로 순환됨을 알 수 있다.

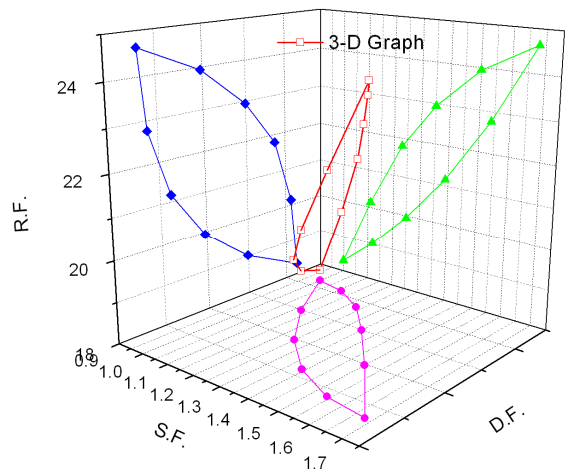


그림 7. 강우에 따른 안전율의 변화

## 4.2 안전율 변화를 고려한 3차원 이력현상 해석

그림 8은 강우에 따른 사면의 변형 및 안전율의 변화를 3차원 그래프로 도시한 것이다. 사면의 침투 및 배수과정에 따른 안전율의 변화는 사면의 전단응력 및 전단강도 변화에 따른 사면의 이력현상 및 크리프 거동과 관련된다. 그러므로 그림 8에 도시된 3차원 그래프를 세 종류의 평면으로 나누면, 1) 시간(time)과 안전율(safety factor), 2) 시간(time)과 변위(displacement) 그리고 3) 안전율(safety factor)과 변위(displacement)로 구분할 수 있다.

첫째, 시간과 안전율 관계곡선의 경우, 시간에 따른 사면의 전단응력 및 전단강도의 변화과정을 보여주며, 강우의 침투과정이 지속 될수록 안전계수가 감소한 후, 다시 배수과정에 따라 안전계수는 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 사면의 안전계수 변화과정을 변위해석에 첨가함으로써 종래의 크리프해석을 넘어서 사면의 응력변화 조건을 고려한 3차원 거동해석의 중요한 입력데이터(Input data)로 사용할 수 있음을 알 수 있다.

둘째, 시간과 변위 관계곡선의 경우, 그림 1에서 보여준 바와 같이 일반적으로 사용하는 사면의 크리프해석이 되며, 그림 8에 보인 바와 같이, 이 현장의 경우 강우 침투과정에서 거의 변위발생이 없다가 사면의 안전계수가 1에 가까울 때 사면의 변위가 급격히 발생하며, 강우 후 배수과정에 따라 사면 내 지반의 단위중량이 감소하면서 전단응력의 감소에 따라 변위발생이 정지하는 것을 볼 수 있다.

셋째, 안전율과 변위의 관계곡선에서 강우의 침투과정 초기에 안전율이 감소하지만 사면 변위가 없다가, 안전율의 값이 한계치에 도달하는 경우(critical safety factor), 변위가 발생하는 것을 알 수 있었다. 이 후 다시 강우의 사면 내 배수과정에 따라 안전율이 증가하여 사면이 안정화되면서 사면의 변위가 없어지는 현상을 볼 수 있다. 이처럼 사면의

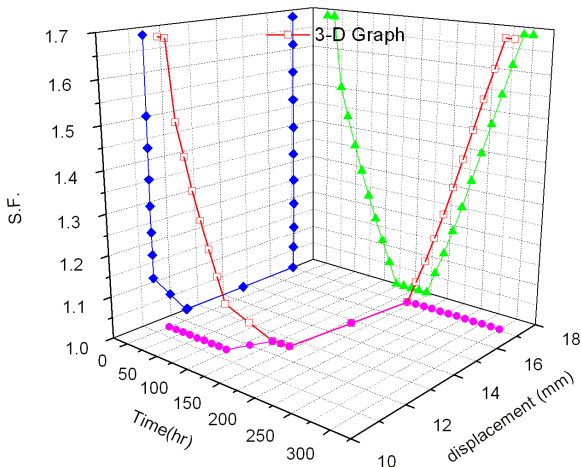


그림 8. 안전율변화를 고려한 3차원 이력현상 해석결과

변위는 전단응력 및 전단강도와 관련된 안전율의 변화와 연동하는 현상을 볼 수 있으며, 이러한 연동과정을 시간에 따른 이력현상으로 해석할 수 있으며, 이 과정이 반복되면서 사면의 안정성이 저하되므로, 강우의 침투 및 배수과정에 의한 사면의 전단강도 감소 현상을 사면의 시간 열화 현상의 하나로 정의 할 수 있을 것이다.

## 4.3 사면 파괴면의 에너지 손실

종래에 해오던 2차원 크리프해석의 경우, 그림 1과 2에서 보이는 바와 같이, 응력변화에 관한 항이 없으므로, 응력변화와 변위발생에 따른 사면의 전단저항력감소, 즉 사면의 파괴면의 저항 에너지 손실에 관한 개념을 도시할 수 없다.

그러나 크리프 그래프에 시간에 따른 사면의 안전율변화를 함께 도시하면, 이력현상에 의한 사면 파괴면의 에너지 손실을 설명할 수 있다. 그림 9와 같이, 초기에 한계치에 도달하기 전의 안전율 감소에는 변위가 발생하지 않다가, 한계치의 안전율에 도달하면 변위가 급격히 발생 후, 배수에 따른 안전율의 증가에 의하여 변위가 발생하지 않는 과정을 강우의 침투 및 배수에 따라 지속적으로 반복됨을 알 수 있다. 이러한 안전계수 변화를 고려한 3차원 거동 그래프를 이용하여 정확한 사면 해석과 이력현상에 의한 시간열화현상을 규명할 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

기존의 사면 안정해석은 크리프 거동 해석으로서 강우에 의한 사면의 전단응력의 변화와 전단강도의 변화를 무시하고, 장기간의 사면 변위량 변화에 따른 진행성 파괴 거동을 시간축과 관련하여 해석한 크리프해석이었다. 이러한 해석 기법은 강우에 의한 응력변화를 고려하지 못하여 강우 시 사면의 거동 및 붕괴를 설명하지 못한다. 이력현상해석은 응력변화와 변형률에 관한 인자만 고려하며, 시간에 관한

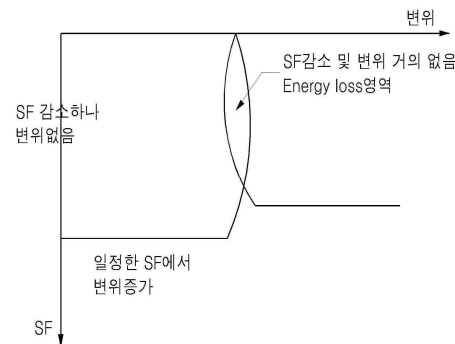


그림 9. 이력현상에 의한 사면 파괴면의 에너지 손실

인자는 고려되지 않았다. 두 가지 해석을 결합하여, 사면의 거동을 해석한다면, 응력변화, 변위 및 시간을 모두 고려한 실제 사면의 거동해석이 됨을 알 수 있다.

본 논문은 강우의 사면 침투 및 배수로 인하여 사면의 단위중량이 변하는 과정을 크리프와 이력현상을 결합한 해석 방법으로 분석하고 이에 따른 사면의 전단응력 및 전단강도의 변화 및 안전계수변화를 3차원 거동으로 해석하고자 한다. 이를 위해 모델사면을 1m 단위의 침투깊이로 가정 한 후, 시간에 따른 강우량 및 변위 데이터는 건설기술연구원의 실제 계측사면 데이터를 이용하였고, 모델 사면은 계측 사면의 형상을 단순화하여 적용하였다.

본 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 강우로 인한 실제 사면의 침투 및 배수 시 응력변화에 관한 항은, 전단응력(Driving Force)의 변화 및 전단강도의 변화를 동시에 유발하므로, 이 두 항을 동시에 고려할 수 있는 안전계수항으로 바꾸어야 한다.
- (2) 3차원 공간상에서 안전율, 전단응력 및 전단강도의 변화과정을 동시에 모두 고려된 그래프를 이용하여, 안전율-전단응력 평면, 안전율-전단강도 평면, 전단응력-전단강도 평면의 3가지로 분할할 수 있다. 세 평면 내의 그래프가 모두 폐곡선을 이루는 것을 볼 수 있으며, 강우에 의해 지속적으로 증가 혹은 감소되는 폐곡선의 형태로 순환됨을 알 수 있다.
- (3) 시간과 안전율 곡선관계 평면의 경우, 안전계수가 시간이 지날수록 지속적으로 감소한 후(침투과정), 다시 지속적으로 증가함을 알 수 있다. 시간에 따른 안전율(SF)의 변화과정을 사면의 변위해석에 첨가함으로써 종래의 크리프해석을 넘어서 시간에 따른 사면의 응력조건을 고려한 3차원 거동해석의 중요한 입력데이터로 사용

할 수 있다.

- (4) 기존의 사면의 크리프해석인 시간과 변위 관계곡선 평면을 사용하여 이 현장의 거동을 분석하면, 사면의 안전계수가 1에 가까울 때 사면의 변위가 급격히 발생하며, 배수과정에 따라 사면 내 지반의 단위중량이 감소하면서 변위 발생이 정지하는 것을 볼 수 있다.
- (5) 안전율과 변위 관계곡선 평면의 경우, 사면의 하중 및 전단조건과 관련된 안전율의 변화에 따라 사면의 변위 역시 같이 연동하는 현상을 볼 수 있으며, 이러한 연동과정을 이력현상으로 해석할 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국립금오공과대학교의 학술연구 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 대해 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 한희수 외 (2005), 수학적 모델을 이용한 사면파괴예측, *한국 지반공학회*, Vol. 21, No. 2, pp. 145~150.
  2. Fukuzono, T. (1985), A New Method for Predicting the Failure Time of Slope, *Proceedings of 4th I.C.F.L.*, Tokyo, pp. 145~150.
  3. Fukuzono, T. (1990), Recent Studies on Time Prediction of Slope Failure, *Landslide News*, Vol. 4, pp. 9~12.
  4. Hayashi, S. (1988), On the Forecast of Time to Failure of Slope(II)-Approximate Forecast in Early Period of the Tertiary Creep, *Journal of Japanese Landslide Society*, Vol. 25, pp. 11~16.
  5. Saito, M. (1996), Forecasting Time of Slope Failure by Tertiary Creep, *Proc. of 7th I.C.S.M.F.E.* Vol. 2, pp. 677~683.
- (접수일: 2009. 11. 27, 심사일: 2010. 1. 4, 심사완료일: 2010. 2. 22)