

## 강우침투에 따른 사면안정 해석에 관한 연구

### A Study on the Analysis of Slope Stability in Consideration of Rainfall Infiltration Effect

안종필<sup>1)</sup>, Jong-Pil Ahn, 오희주<sup>2)</sup>, Hee-Ju Oh, 김진택<sup>3)</sup>, Jin-Taek Kim, 박용훈<sup>4)</sup>, Yong-Hoon Park, 심태섭<sup>5)</sup>, Tae-Sub Shim

<sup>1)</sup>조선대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chosun University.

<sup>2)</sup>조선대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chosun University.

<sup>3)</sup>조선대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Chosun University.

<sup>4)</sup>대림산업 공무차장, Senior Manager, Daelim Co., Ltd.

<sup>5)</sup>조선대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chosun University.

**SYNOPSIS** : Most of current slope safety analysis consider only the effect of the rise of underground water level. However, because the infiltration of surface water into the ground is believed to have signification effect on slope stability, the present study performed slope safety analysis in case of the rise of underground water level, infiltration of surface water, and both resulting from rainfall, and examined their effect.

**Key words** : the fall of wetting front, the rise of underground water level, the stability of the slopes

## 1. 서론

최근 들어 전 세계적으로 자연재해가 빈번히 발생하고 있으며, 이로 인한 피해는 산업의 발달이나 인구의 증가 등 직·간접적인 요인에 따라 더욱더 증가하는 추세에 있다. 특히 우리나라는 지리적인 영향으로 연강수량 중 많은 부분이 여름철(6월~9월)에 장마 또는 태풍과 동반되어 집중됨으로 인해 강우에 의한 피해는 가장 큰 자연재해 중 하나이다.

현재 사면안정해석에 있어서 대부분의 경우 지하수위의 상승에 의한 영향만을 고려하여 안정검토를 실시하고 있다. 그러나 지표수의 지반내 침투량도 사면안정에 많은 영향을 미칠 것이므로 합리적인 안정해석 수행에 있어 고려되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 인근현장에서 수집한 자료를 토대로 사면붕괴가 발생된 대표구간을 선정하여 강우시 지표수 침투로 인한 습윤전선의 하강, 지하수위의 상승 그리고 습윤전선의 하강 및 지하수위의 상승을 모두 고려한 경우에 대한 사면안정해석을 수행한 후 해석 값을 분석 및 고찰하여 강우의 영향을 검토하고자 한다. 또한, 강우시 지표수 침투를 고려한 보다 합리적인 사면안정해석방법을 제안하고자 한다.

## 2. 강우침투에 따른 사면안정 해석

### 2.1 강우침투에 따른 사면안정 해석

강우시 사면붕괴는 지표수가 지반내로 침투하면서 사면의 함수비와 습윤 전선의 하강 또한 지하수위

의 증가로 인해 지반의 전단강도가 저하됨에 따라 주로 발생된다.

강우시 습윤전선의 하강 및 지하수위의 상승에 의한 사면의 안정성을 검토하기 위해 연구대상 사면은 전라남도 ○○~○○간 국가지원 지방도 확·포장공사현장의 토사사층 과 암반층으로 구분된 간단한 사면을 A, B 대상사면으로 구분하여 수행하였으며 사면안정해석에 적용된 지반의 토질정수는 기준안전율에 대한 역 해석 결과와 실내 및 현장시험을 통한 추정치를 이용하였다. 또한, 토사층과 암반층으로 구성된 A, B 대상사면에 강우시 습윤전선의 하강, 지하수위 상승 그리고 습윤전선의 하강 및 지하수위의 상승을 고려하여 사면안정성의 변화관계를 비교·분석하기 위하여 지표면으로부터 가상과괴면까지의 깊이를  $H_1$ 라 하고 지표면에서 침투되는 습윤전선까지의 깊이를  $H_2$ 이라 하였다. 지표면으로부터 침투되는 습윤전선까지의 범위를 습윤대라 하고 해석상의 편의를 위하여 지표면과 습윤전선은 평행하게 발생하는 것으로 가정하였다. 가상과괴면으로부터 지하수위가 상승하는 높이를  $H_2$ 라 하였으며 가상과괴면으로부터 지하수위가 상승하는 범위를 습윤대라 하고 가상과괴면과 지하수위면은 평행한 것으로 가정하였다.

본 연구에서는 대상현장에 일반적으로 사용되고 있는 대부분 이론이 적용된 프랑스의 TERRASOL사에서 개발된 프로그램인 TALREN97을 사용하여 해석을 수행하였으며 이 중 사면안정해석법으로 편리성 및 신뢰성이 검증된 Bishop의 방법을 적용하였다.

## 2.2 Bishop 방법

Bishop 방법은 Fellinius 방법보다 정밀한 해석을 수행하기 위해 절편과 절편 사이에서 작용하는 전단력( $X$ )과 연직력( $E$ )을 고려하여 해석을 실시하는 방법이다. 절편의 바닥에 작용하는 전단응력은 절편 바닥에 작용하는 전단강도를 안전율로 나눈 값은 다음과 식(2.1)과 같다.

$$T = \frac{1}{F_s} [c'l + N' \tan \phi'] \quad (2.1)$$

연직방향의 합력은 다음 식(2.2)와 같다.

$$W = N' \cos \alpha + ul \cos \alpha + T \sin \alpha \quad (2.2)$$

식(2.2)에 식(2.1)을 대입하여 정리하면

$$W = N' \cos \alpha + ul \cos \alpha + \frac{c'l}{F_s} \sin \alpha + \frac{N'}{F_s} \tan \phi' \sin \alpha \quad (2.3)$$

위 식(2.3)을 정리하여  $N'$ 를 구하면

$$N' = \frac{W - c' \frac{L}{F_s} \sin \alpha - ul \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi' \sin \alpha}{F_s}} \quad (2.4)$$

여기서,  $l = b \sec \alpha$ 이므로 이 값을 식(2.4)에 대입하고 다시 정리하면

$$F_s = \frac{1}{\sum Ws \sin \alpha} \sum [c'b + (W - ub) \tan \phi'] \left[ \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F_s}} \right] \quad (2.5)$$

식(2.5)을 식(2.6)로 변화시켜 아래 식을 얻을 수 있다.

$$F_s = \frac{1}{\sum Ws \sin \alpha} \sum [c'b + (W - ub) \tan \phi'] \frac{1}{m_\alpha} \quad (2.6)$$

$m_\alpha$ 의 계산 편의를 위해 제안된 도표인 그림 2.1을 이용하여 안전율( $F_s$ )을 쉽게 구할 수 있다. Bishop방법도 정역학적으로 해석하기 위해서 가정 설정이 많기 때문에 정해가 될 수 없다, 식(2.5)과 같이  $F_s$ 가 양변에 있기 때문에 우변의  $F_s$ 를 가정하여 좌변의  $F_s$ 와 같은 값이 나올 때까지 시행착오법을 활용하여 결정하여야 한다.

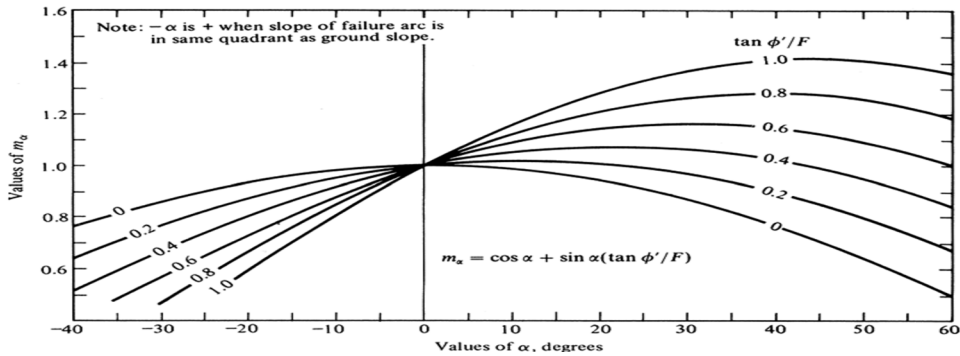


그림 2.1  $m_\alpha$ 를 구하는 도표

### 3. 사면안정해석조건 및 해석프로그램

#### 3.1 강우에 따른 해석조건

본 연구에서는 강우에 따른 침투영향을 고려하고자 강우시 습윤전선의 하강, 지하수위 상승을 고려하기 위하여 지표면으로부터 가상과괴면의 깊이를 H라 하고 지표면에서 침투되는 습윤전선의 깊이를  $H_1$ 이라 하였다. 지표면으로부터 침투되는 습윤전선의 범위를 습윤대라 하고 지표면과 습윤전선은 평행하게 발생하는 것으로 가정하였다. 또한, 가상과괴면으로부터 지하수위가 상승하는 높이를  $H_2$ 라 하였으며 가상과괴면으로부터 지하수위가 상승하는 범위를 습윤대라 하고 가상과괴면과 지하수위면은 평행하게 상승하는 것으로 가정하였다.

첫 번째로 지표면에서 침투되는 습윤전선의 영향만을 고려하여  $H_1/H$ 의 값을 0에서부터 0.1씩 증가시켜 1이 될 때까지 안정해석을 수행하여 그 결과를 검토하였다(조건 I).

두 번째로 가상과괴면에서 상승되는 지하수위의 영향만을 고려하여  $H_2/H$ 의 값을 0에서부터 0.1씩 증가시켜 1이 될 때까지 안정해석을 수행하여 그 결과를 검토하였다(조건 II).

마지막으로 강우시에 토층내의 습윤전선의 하강과 지하수위의 상승이 동시에 발생되어 사면파괴가 발생되므로  $H_1/H$ 와  $H_2/H$ 가 0에서 0.1씩 증가시켜 사면전체가 포화가 일어나는 시점까지 안정해석을 수

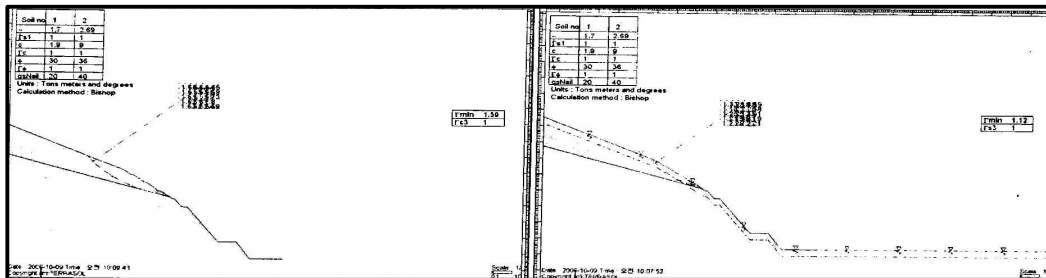
행하여 안정성의 변화양상을 비교·검토 하였다(조건Ⅲ).

표 3.1 사면안정해석에 적용된 조건

| 구 분  | 조 건Ⅰ              |                   | 조 건Ⅱ              |                   | 조 건Ⅲ              |                   | 비 고 |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----|
|      | H <sub>1</sub> /H | H <sub>2</sub> /H | H <sub>1</sub> /H | H <sub>2</sub> /H | H <sub>1</sub> /H | H <sub>2</sub> /H |     |
| 해석1  | 0.0               | 0.0               | 0.0               | 0.0               | 0.0               | 0.0               |     |
| 해석2  | 0.1               | 0.0               | 0.0               | 0.1               | 0.1               | 0.1               |     |
| 해석3  | 0.2               | 0.0               | 0.0               | 0.2               | 0.2               | 0.2               |     |
| 해석4  | 0.3               | 0.0               | 0.0               | 0.3               | 0.3               | 0.3               |     |
| 해석5  | 0.4               | 0.0               | 0.0               | 0.4               | 0.4               | 0.4               |     |
| 해석6  | 0.5               | 0.0               | 0.0               | 0.5               | 0.5               | 0.5               |     |
| 해석7  | 0.6               | 0.0               | 0.0               | 0.6               | -                 | -                 |     |
| 해석8  | 0.7               | 0.0               | 0.0               | 0.7               | -                 | -                 |     |
| 해석9  | 0.8               | 0.0               | 0.0               | 0.8               | -                 | -                 |     |
| 해석10 | 0.9               | 0.0               | 0.0               | 0.9               | -                 | -                 |     |
| 해석11 | 1.0               | 0.0               | 0.0               | 1.0               | -                 | -                 |     |

### 3.2 사면안정해석 프로그램

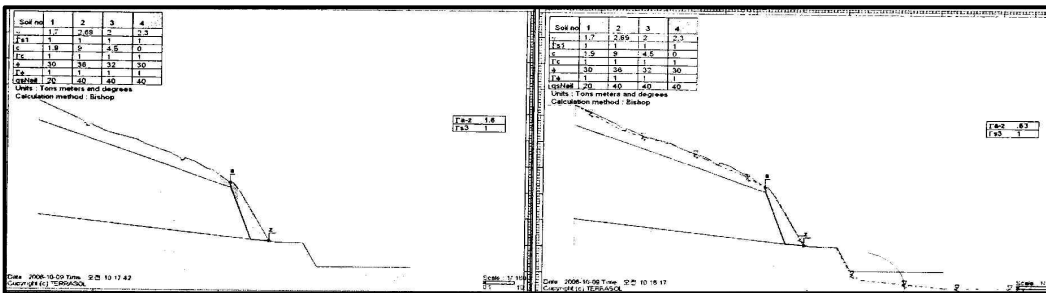
본 연구에서는 사면안정 해석시 널리 사용되는 한계평형이론에 근거한 TALREN97을 이용하여 파괴 형태는 원호파괴면으로 해석하였다. 이 해석결과를 바탕으로 강우시 침투영향에 따른 안정성의 변화관계를 비교·분석하여 합리적인 사면안정 해석방법을 제안하고자 한다. 다음 그림 3.1~3.2은 여러 해석조건 중 건기시조건과 우기시조건의 대표적인 해석결과를 나타낸 것이다. 해석결과 최소사면안전율은 대상사면 A의 경우 건기시 1.59, 우기시 1.12로 산정되었으며, 대상사면 B의 경우 건기시 1.60, 우기시 0.63으로 산정되었다. 건기시는 대상사면 A, 우기시는 대상사면 B가 최소사면 안전율이 다소 크게 산정되었다.



(a) 건기시(H<sub>1</sub>/H=0 or H<sub>2</sub>/H=0)

(b) 우기시(H<sub>1</sub>/H=1 or H<sub>2</sub>/H=1)

그림 3.1 프로그램 해석결과 대표적인 예(연구대상 사면 A)



(a) 건기시(H<sub>1</sub>/H=0 or H<sub>2</sub>/H=0)

(b) 우기시(H<sub>1</sub>/H=1 or H<sub>2</sub>/H=1)

그림 3.2 프로그램 해석결과 대표적인 예(연구대상 사면 B)

#### 4. 강우 침투에 따른 사면안정성 고찰

표 4.1~4.2와 그림 4.1~4.2는 대상 사면구간 A, B에 대하여 강우시 습윤전선 하강 및 지하수위 상승에 따른 사면안전율의 변화를 서로 비교·분석하기 위하여  $H_1/H$ 의 비가 증가하는 경우,  $H_2/H$ 의 비가 증가하는 경우 또한,  $H_1/H$  및  $H_2/H$ 의 비가 동시에 증가하는 경우에 대한 사면안전율을 같이 도시하였다.

표 4.1 습윤전선하강( $H_1/H$ ) 또는 지하수위상승( $H_2/H$ )에 따른 해석결과[사면A]

| 구 분                 | 0.0  | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H_1/H$             | 1.59 | 1.55 | 1.49 | 1.41 | 1.30 | 1.21 | 1.18 | 1.16 | 1.14 | 1.13 | 1.12 |
| $H_2/H$             | 1.59 | 1.56 | 1.51 | 1.44 | 1.35 | 1.27 | 1.22 | 1.18 | 1.15 | 1.13 | 1.12 |
| $H_1/H$ and $H_2/H$ | 1.59 | 1.22 | 1.18 | 1.15 | 1.13 | 1.12 | -    | -    | -    | -    | -    |

표 4.2 습윤전선하강( $H_1/H$ ) 또는 지하수위상승( $H_2/H$ )에 따른 해석결과[사면B]

| 구 분                 | 0.0  | 0.1  | 0.2  | 0.3  | 0.4  | 0.5  | 0.6  | 0.7  | 0.8  | 0.9  | 1.0  |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $H_1/H$             | 1.60 | 1.52 | 1.40 | 1.24 | 1.01 | 0.82 | 0.76 | 0.72 | 0.68 | 0.65 | 0.63 |
| $H_2/H$             | 1.60 | 1.55 | 1.47 | 1.36 | 1.24 | 1.09 | 0.91 | 0.79 | 0.70 | 0.65 | 0.63 |
| $H_1/H$ and $H_2/H$ | 1.60 | 1.08 | 1.00 | 0.90 | 0.74 | 0.63 | -    | -    | -    | -    | -    |

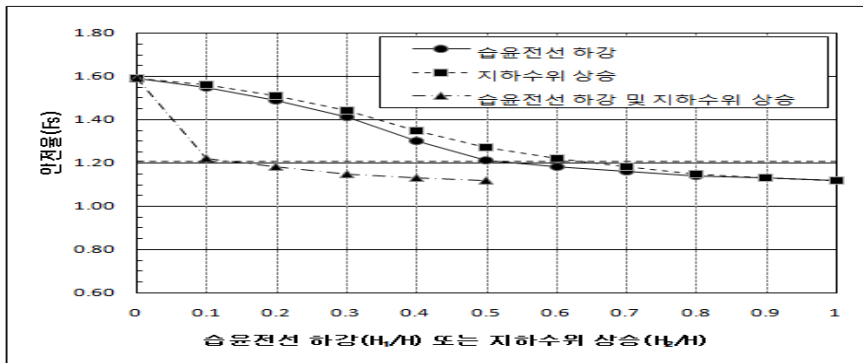


그림 4.1 강우시 조건에 따른 안전율의 변화(사면 A)

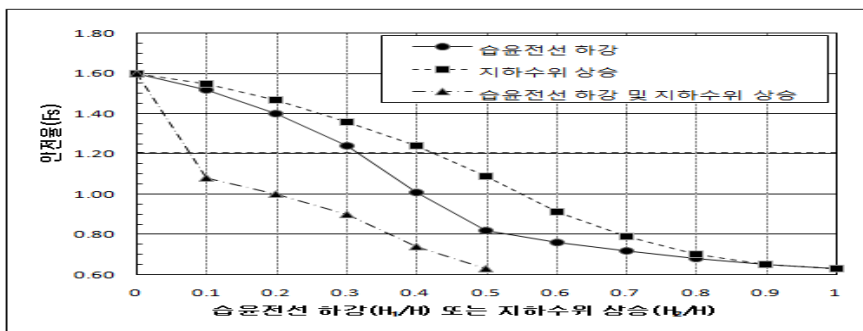


그림 4.2 강우시 조건에 따른 안전율의 변화(사면 B)

대상현장 A, B사면 해석결과 모두 지표면으로부터 습윤전선의 하강으로 인한 사면안전율의 감소가 지하수위 상승으로 인한 사면안전율의 감소보다 빠르게 나타남을 알 수 있다.

습윤전선의 하강 및 지하수위 상승이 동시에 일어날 때 사면안전율은 매우 급속하게 감소하는 경향을 보였다.

위의 분석결과로부터 강우시 침투영향을 받는 사면붕괴는 지하수위 상승에 의한 영향보다는 습윤전선 하강에 의한 영향에 의해 발생되고 있음을 알 수 있었으며 또한, 습윤전선의 하강과 지하수위 상승을 동시에 고려할 경우 사면안전율이 급격히 감소하여 사면붕괴를 초래함을 알 수 있다. 따라서, 강우에 따른 침투영향을 고려한 사면안정해석은 습윤전선의 하강과 지하수위 상승을 동시에 고려하여 해석을 수행하는 것이 보다 바람직한 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 강우로 인한 사면붕괴가 발생한 현장을 대상으로 대표 A, B사면을 선정하여 강우시 습윤전선의 하강 및 지하수위의 상승을 고려하여 사면안정해석을 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강우에 따른 습윤전선의 하강과 지하수위 상승으로 인한 사면안전율의 감소는 지표면에서 가상활동면의 연직깊이에 대한 습윤전선의 하강비( $H_1/H$ )는 0.3~0.5, 지하수위의 상승비( $H_2/H$ )는 0.3~0.6, 습윤전선의 하강비( $H_1/H$ )와 지하수위의 상승비( $H_2/H$ ) 동시에 고려시 0.0~0.10에서 급격한 사면안전율의 감소가 나타났다.
2. 강우에 따른 습윤전선 하강으로 인한 사면안전율의 감소가 지하수위 상승으로 인한 사면안전율의 감소보다 다소 빠르게 진행되는 것으로 나타났으며 따라서, 강우에 따른 사면붕괴는 지하수위의 상승보다 습윤전선의 하강에 의한 영향이 더 큼을 알 수 있었다.
3. 강우에 따른 습윤전선 하강 및 지하수위 상승을 동시에 고려할 경우 습윤전선 하강 또는 지하수위 상승만 고려한 경우에 비해 사면안전율의 감소가 매우 빠르게 진행됨을 알 수 있으며 따라서, 강우에 따른 침투영향을 고려한 사면안정해석은 습윤전선의 하강과 지하수위 상승을 동시에 고려하여 해석을 수행하는 것이 보다 바람직한 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김영목(1990), “강우시 무한사면의 침투거동”, 동국대학교 대학원 박사학위 논문.
2. 조성은, 이승래(2000), “강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성 평가”, **한국지반공학회**, 한국지반공학회지, 제16권, 5호, pp.107-116.
3. 이광모, 심태섭, 김선학, 최용준(2005), “강우강도에 따른 무한사면의 간극수압 변화 특성”, **대한토목학회**, 2005학술발표회 논문집.
4. 홍원표, 송영석(2005), “강우시 침투를 고려한 사면안정성 해석”, **한국지반공학회**, 한국지반공학회 사면안정 학술발표회 논문집“, pp.29~37.