

## 강우시 습윤전선 및 지하수위를 고려한 사면의 안정성 해석

송영석<sup>1\*</sup> · 홍원표<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국지질자원연구원 지구환경연구본부, <sup>2</sup>중앙대학교 공과대학 건설환경공학과

### Analysis of Slope Stability with Consideration of the Wetting Front and Groundwater Level During Rainfall

Young-Suk Song<sup>1\*</sup> and Won-Pyo Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Korea

본 연구에서는 도로시공을 위한 사면절개시 발생된 산사태 현장을 대상으로 강우시 침투를 고려한 사면안정해석 방법을 적용하였다. 강우시 침투를 고려한 사면안정해석법은 크게 세가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 지반내 습윤전선이 하강을 고려하여 해석하는 방법, 두 번째는 지반내 지하수위의 상승을 고려하여 해석하는 방법, 그리고 세 번째는 지반내 습윤전선 하강 및 지하수위 상승을 고려하여 해석하는 방법이다. Bishop의 간편법을 이용하여 해석한 결과, 강우시 습윤전선 하강으로 인한 사면안전을 감소가 지하수위 상승으로 인한 사면안전을 감소보다 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 또한, 습윤전선 하강 및 지하수위 상승이 동시에 일어날 경우 사면안전은 매우 급속하게 감소함을 알 수 있다. 따라서, 강우시 사면안정해석법은 지반내 지하수위 상승과 습윤전선 하강을 동시에 고려하여 해석하는 것이 보다 바람직하다.

**주요어** : 사면안정해석, 침투, 강우, 습윤전선, 지하수위

We applied a slope-stability analysis method, considering infiltration by rainfall, to the construction site where an express highway is being extended. Slope stability analysis that considers infiltration by rainfall can be classified into three methods: a method that considers the downward velocity of the wetting front, a method that considers the upward velocity of the groundwater level, and a method that considers both of these factors. The results of slope stability analysis using Bishop's simplified method indicate that the safety factor due to the downward velocity of the wetting front decreases more rapidly than that due to the upward velocity of the groundwater level. For the third of the above methods, the safety factor decreases more rapidly than for the other two methods. Therefore, slope stability during rainfall should be analyzed with consideration of both the downward velocity of the wetting front and the upward velocity of the groundwater level.

**Keywords** : Slope stability analysis, Infiltration, Rainfall, Wetting Front, Groundwater level

## 서 론

산사태 발생요인으로는 내적요인과 외적요인으로 크게 구분할 수 있다(山口貢一, 1967). 내적요인으로는 지질 구조, 지형, 토질, 임상 등의 자연적 요인을 들 수 있다. 그리고, 외적요인으로는 강우, 하천 및 해안의 침식, 지진 등과 같은 자연적 요인과 절성토, 벌목, 단지조성, 채석 개발 등의 인위적 요인을 들 수 있다. 즉, 내적으로 취

약한 지질구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토 등의 외적요인이 가하여 질 경우 산사태가 발생되기 쉽다. 따라서, 산사태의 발생기구를 규명하기 위하여는 이들 요인에 대한 조사연구가 필요할 것이다. 그러나 이들 요인을 모두 고려하여 산사태를 취급하기는 대단히 어려운 문제이므로 산사태 발생에 보다 큰 영향을 미치는 요인을 정리하여 연구하는 것이 바람직하다.

우리나라의 경우 대부분의 산사태는 우기에 집중적으로

\*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

발생되므로 우리나라 산사태의 발생요인중 가장 큰 요인은 강우임을 예측할 수 있다. 즉, 연평균 강우량의 대부분이 6월에서 9월 사이에 편중되어 있어 이 기간에 집중호우로 인한 산사태의 발생이 빈번하게 발생되고 있으며, 이로 인한 피해도 매년 급증하고 있는 실정이다. 1990년대의 10년간 자연재해로 인한 인명피해만 140여명이고 그중 산사태에 의한 피해가 전체의 16%인 22.7명으로 보고된 바 있다(박덕근, 1999). 특히 2002년에는 태풍 "투사"에 의해서 56명에 이르는 인명피해가 발생하여 그 피해가 날로 심각해지는 양상을 보이고 있다.

이와 같이 강우가 산사태의 가장 중요한 외적요인이 되고 있는 것은 사실이지만 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량이 산사태에 어떻게 관련되어 있는가는 아직 확실히 규명되어 있지 못하다. 홍콩의 경우 강우와 산사태의 관계에 있어 과거에는 Lumb (1975)에 의한 선행강우량 개념의 해석이 지배적이었으나, Brand (1985) 등의 지속적인 연구로 인하여 현재에는 강우강도에 의한 해석이 제안되었다. 홍원표 등(1990)은 우리나라의 강우기록과 산사태 발생기록을 연관지어 우리나라의 지역특성에 맞는 산사태 발생특성을 조사 및 연구한 바 있다. 이 결과에 의하면 우리나라의 산사태는 누적강우량과 강우강도에 모두 영향을 받는 것으로 나타났다.

현재 사면에 대한 일반적인 안정해석에 있어서 대부

분의 경우 지하수위의 상승에 의한 영향만을 고려하고 있다. 그러나 지표면에서 지표수의 지반내 침투량 등도 사면의 안정에 많은 영향을 미칠 것이므로 강우시 지반내 지하수위 상승, 지표수 침투 그리고 이들 두가지 경우가 동시에 발생하였을 경우에 대하여 각각 사면안정해석을 수행하여 이에 대한 영향을 검토하고자 한다. 본 연구에서는 강원도 동해고속도로 확장공사구간에서 발생한 산사태 현장을 대상으로 사면안정해석을 수행한다. 대상사면에 대한 지표수 침투시 사면안정성 변화를 고찰하기 위하여 습윤전선 하강의 경우, 지하수위 상승의 경우, 그리고 습윤전선 하강 및 지하수위 상승을 모두 고려한 경우에 대한 사면안정해석을 수행하고자 한다. 이를 토대로 강우시 지표수 침투를 고려한 합리적인 사면안정해석 방법을 제안하고자 한다.

## 대상현장

### 현장상황

본 연구대상 현장은 동해~주문진간 동해고속도로 4차로 확장공사구간으로 연구대상사면에 대한 평면도는 Fig. 1과 같다. 본 구간내 N1교의 P2 기초터파기 공사중 공사차량 진입도로와 인근 상부사면이 도로방향으로 활동이 진행됨에 따라 N1교와 보강토옹벽 구조물에 치명적인 손상을

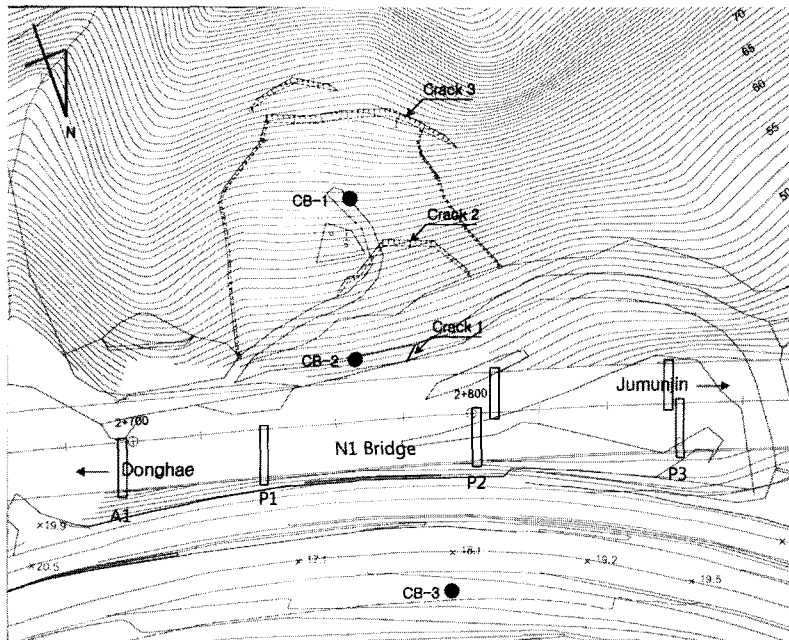


Fig. 1. Plan view of the study area.

미칠 수 있을 것으로 예상된다. 대상사면의 시점은 Sta. No. 2+730, 종점은 Sta. No. 2+830이므로 사면연장은 100 m, 사면의 길이는 87 m, 사면의 경사는 20~45°의 범위이며, 전체면적은 9,550 m<sup>2</sup>이다. 한편, 지질은 주로 셰일이 광역변성작용에 의해 형성된 천매암이며, 부분적으로 사암 및 석회암이 분포하고 있다.

2001년 4월 27일 N1교의 P2(주문진방향) 기초시공을 위한 사면절토시 공사차량 진입도로 및 사면상부에 총 3개소의 인장균열이 발생되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 3개소의 인장균열을 하부에서부터 각각 Crack 1, 2 및 3으로 나타내었다. 이후 대상사면에 대하여 역지막목, 쏘일네일링 및 앵커를 이용한 사면보강을 실시하여 2002년 태풍 “루사” 및 2003년 태풍 “매미”에 의한 집중호우시 인한 추가적인 산사태가 발생되지 않았으며 현재는 안정된 상태로 유지되고 있다(Kang et al., 2009).

### 지반조건 및 해석단면 선정

본 연구대상 지역은 행정구역상 강원도 옥계면 낙풍리에 해당하며, 한반도의 동북쪽에 위치한다. 그리고, 본 지역의 동쪽에 국도 7호선이 남북방향으로 지나가고 있다. 그리고, 서쪽에 청학산(337 m), 괴래산(753.9 m) 및 화산(307.6 m)이 남북방향으로 형성되어 있으며, 동쪽에 가마봉(383 m) 및 망운산(338.4 m)이 위치하고 있다. 본 지역의 수계는 낙풍천, 정동천, 주수천 및 옥계저수지 등 소지류들이 수지상 수계(Dendritic drainage pattern)의 특징을 보인다.

본 현장에서 자연사면의 경사방향은 N26E 방향이 우세하며, 대체로 사면의 경사각은 21~45° 정도를 보이고, 사면활동 예상부분은 약 20° 정도의 경사를 보이는 것으로 예상된다.

본 연구대상 지역의 지질조건을 살펴보면 평안계(Pyeongan system)의 고방산층, 사동층, 홍점층과 조선계(Joseon system)의 석빙산 석회암층이 분포하고 있으며, 이를 제4기 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 본 지역은 고생대 석탄기에서 페름기에 걸쳐 퇴적된 평안누층군의 하부 지층인 만항층(과거에는 홍점층이라 칭함)에 해당하는 퇴적암류이다. 이 지역은 남한에 분포하는 탄전층에서 가장 북동부에 위치한 소위 강릉탄전에 해당하는 부분으로 이 지역의 지질조사는 1962년 태백산 지구 지하자원 조사단에 의해 체계적으로 조사 발간되었으며 그 후 탄광을 중심으로 단편적으로 조사된 바 있다. 일반적으로 만항층은 약 250~300 m의 두께로 조선누층군의 석회암층을 부정합으로 덮는다. 강릉탄전에서의 이 층은

담회색~유백색, 담록색 조립사암, 담록색~녹색, 회색의 중립내지 세립사암, 적자색, 녹회색, 암회색의 셰일 및 실트암, 박층의 탄질셰일 등으로 구성되어 있으며 수매의 랜즈상의 분홍 및 석회암을 협재하기도 한다. 이 층은 금천층에 의해 정합적으로 피복되었다. 본 지역의 만항층 퇴적암류에 비해 변성작용을 받아 천매암질로 되어 있으며, 층리 뿐만아니라 엽리도 매우 잘 발달되었다.

대상사면에 대하여 총 14회의 시추조사를 실시하였으며, 시추조사 결과 연구대상지역의 지층은 상부로부터 붕적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 붕적토층은 상부사면이 붕괴, 또는 침식되어 쌓인 층으로 전석, 모래, 암편, 점토 등으로 구성되어 있으며, 갈색~회색을 띠고 있다. 표준관입시험 결과 N치가 13/30~50/3으로 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이나, 자갈의 분포정도에 따라 N치가 과대 측정되는 경향이 있다. 분포심도는 GL(-)0.0~6.5 m이며 완전 누수상태이다. 풍화잔류토층은 천매암의 차별 풍화에 의해 형성된 층으로 연직투수성은 크지 않을 것으로 판단되나 수평방향으로는 파쇄가 심한 연암층의 영향으로 투수성이 매우 큰 것으로 나타났다. 지표면으로부터 GL(-)12.0~15.5 m 부분은 활동의 예상층으로서 함수비가 높은 실트질 점토(CL)인 것으로 나타났다. 표준관입시험 결과 N치가 13/30~50/26로 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이며, 부분적으로 누수현상이 심한 상태이다. 풍화암층은 습윤, 회색의 천매암이 상부 풍화대로 모래, 실트 및 암편 등으로 이루어져 있으며, 표준관입시험 결과 N치가 50/2로 상대밀도는 매우 조밀한 상태이다. 풍화정도는 완전풍화상태이며, 층후는 2.3~5.7 m이다. 파쇄심한 연암층은 천매암의 파쇄대로서 회색~갈색을 띠며 시추시 주로 암편으로 채취된다. 부분적으로 풍화대도 나타나며 시추시 누수현상이 심한 상태를 보인다. 채취된 코아의 TCR = 14~80%이나 RQD는 평균적으로 0% 정도로 파쇄가 심하며, 분포심도는 GL(-)15.5~23.0 m이다. 그리고, 연암층은 회색~갈색의 천매암 및 일부 석회암으로 구성되어 있고, 시추시 암편~주상의 코아로 채취된다. 채취된 코아의 TCR = 42.1~100%, RQD는 평균적으로 50% 정도로 비교적 신선한 편이며, 분포심도는 GL(-)23.0 m 이하이다.

그리고 대상사면의 지하수위는 지표면으로부터 GL(-) 11.65~23.65 m에 위치하는 것으로 조사되었다. 지하수위는 상부사면부의 경우 연암층에 분포하며 하단부의 경우에는 자갈층내에 분포하고 있다.

한편, Fig. 2는 대상사면의 지형 및 지질특성, 지층구성, 지하수위 등을 토대로 대표단면을 선정한 것이다. 그

림에 도시된 지층은 사면상단부, 사면중앙부, 사면하단부 및 도로시공구간의 시추조사결과를 토대로 결정하였다 (Kang et al., 2009).

**지반정수 산정**

사면안정해석에 적용된 지반의 토질정수는 토사층의 경우 역해석 결과를 적용하였으며, 암반층의 경우 각종 경험치 등을 검토하여 적용하였다. 먼저 토사층의 경우 역해석을 수행하여 활동면의 강도정수를 추정하였으며, 역해석시 적용안전율은 Table 1에 나타난 한국도로공사 (1996)의 연구자료를 참고하였다. 붕적토층은 교량 기초 시공시 굴착으로 발생한 인장균열(Crack 1, 2)을 고려하고, 현재 사면이 활동중인 점을 감안하여 사면안전율은 0.99-0.95를 적용하였다. 이에 대한 역해석을 실시한 결과 붕적토층의 강도정수는 점착력  $0.44 \text{ t/m}^2$ , 내부마찰각  $27^\circ$ 로 산정할 수 있다. 그리고 실제 사면파괴가 예상되는 점토층의 경우 사면이 활동중인 점을 감안하여 사면안전율은 0.90-0.93을 적용하였다. 이에 대한 역해석을 실시한 결과 점토층의 강도정수는 점착력  $1.5 \text{ t/m}^2$ , 내부마찰각  $20^\circ$ 로 산정할 수 있다(송영석과 홍원표, 2007). 한편, 암반층의 경우 Hoek and Brown (1980)과 Hoek and Bray (1977)의 경험치, 도로설계실무편람(한국도로공사, 1996) 등의 자료를 비교 검토하여 암반의 강도정수를 산정하였다.

**Table 1.** Safety factors of slope applied to back analysis (Korea Expressway Corporation, 1996).

layer	Rock	Weathered rock	Colluvium	Clay
after sliding	1.10	1.05~1.10	1.03~1.05	1.00~1.03
during sliding	0.99	0.95~0.99	0.93~0.95	0.90~0.93

**Table 2.** Geotechnical properties of the ground layer.

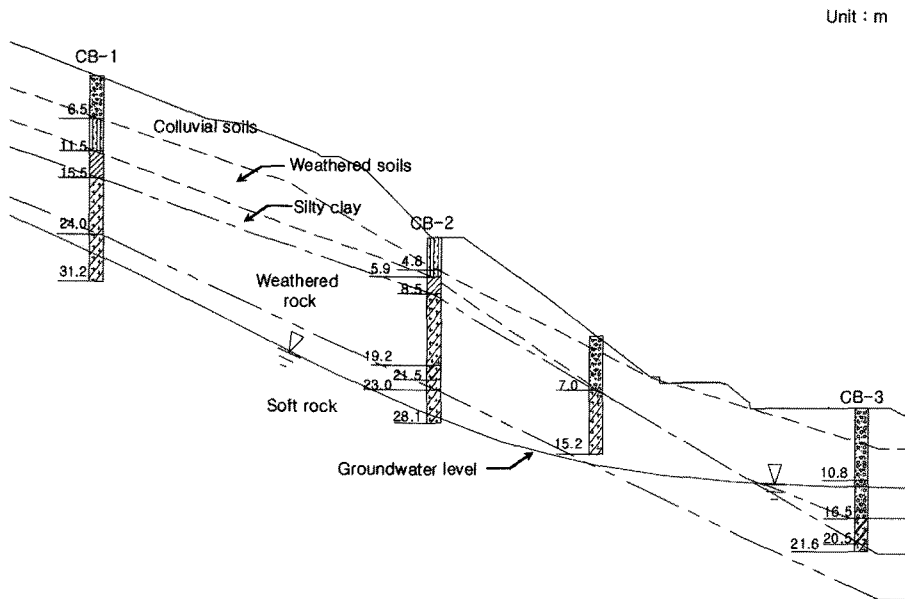
Ground layer	Geotechnical properties	c (t/m <sup>2</sup> )	$\gamma$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
Colluvial soils		1.85	0.5	27
Weathered residual soils		1.9	1.0	30
Clayey soils		1.7	1.5	20
Weathered soft rock		2.2	5.0	35
Soft rock		2.5	10.0	40

이와 같이 산정된 해석시 지반정수는 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

**강우시 사면안정해석법**

**습윤전선 하강시 사면안정해석법**

강우시 습윤전선 하강에 의한 사면의 안정성을 검토



**Fig. 2.** Cross sectional view of soil profile and geometry of the study area.

하기 위하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 토사층과 암반층으로 구분된 간단한 사면의 경우를 고려하였다. 그림에서 보는 바와 같이 지표면으로부터 가상파괴면(potential sliding surface)까지의 연직깊이를  $H$ 라 하고 지표면으로부터 침투되는 습윤전선까지의 깊이를  $H_{w1}$ 라 하였다. 이때 지표면으로부터 침투되는 습윤전선까지의 범위를 습윤대라고 하고, 지표면과 습윤전선이 평행하게 발생하는 것으로 가정하였다. 예를들면,  $H_{w1}/H=0.3$ 인 경우는 지표면으로부터 침투가 30% 발생한 경우로 지표상부층이 30%만 포화된 것으로 가정한다.

**지하수위 상승시 사면안정해석법**

강우시 지하수위 상승에 의한 사면의 안정성을 검토하기 위하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 토사층과 암반층으로 구분된 간단한 사면의 경우를 고려하였다. 그림에서 보는 바와 같이 가상파괴면으로부터 지하수위가 상승하는 높이를  $H_{w2}$ 라 하였다. 이때 가상파괴면으로부터 지하수위가 상승하는 범위를 포화대라고 하고, 가상파괴면과 지하수위면이 평행한 것으로 가정하였다. 예를들면,  $H_{w2}/H=0.3$ 인 경우는 가상파괴면으로부터 지하수위면이 30% 증가한 경우로 가상파괴면으로부터 상향으로 30%만 포화된 것으로 가정한다.

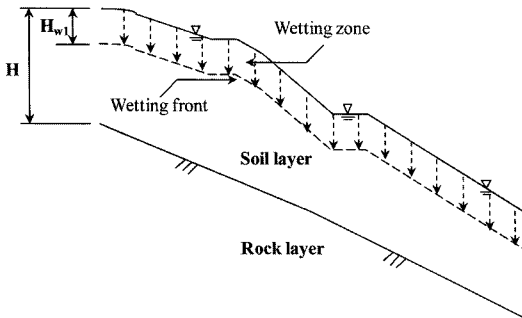


Fig. 3. Downward velocity of the wetting front during rainfall.

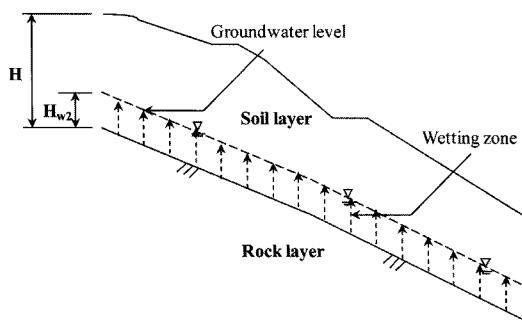


Fig. 4. Upward velocity of the groundwater level during rainfall.

**사면안정해석결과**

**대상사면의 안정해석**

전 절에서 산정된 각 지층의 지반정수를 적용하여 대상현장의 사면에 대한 안정해석을 수행하고자 한다. 대상사면에 대한 안정해석은 SLOPILE (ver 3.0)프로그램 (홍원표와 송영석, 2006)을 이용하여 수행하였으며, 실제 파괴형상을 고려하여 원호파괴시 안정해석법을 적용하였다(홍원표 등, 2003). 그리고 원호파괴시 안정해석법으로는 편리성 및 신뢰성이 검증된 Bishop의 간편법 (Bishop, 1955)을 적용하였다.

Fig. 5는 대상사면의 안정해석을 위하여 선정된 대표단면을 SLOPILE (ver 3.0) 프로그램으로 모델링한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대상사면의 지층조건 및 지하수위를 모두 고려할 수 있도록 하였다. 그리고, 실제 파괴형상 및 파괴면 깊이를 고려하여 사면안정해석을 수행하도록 하였다.

Fig. 6은 대상사면에 대하여 강우의 영향을 고려하지 않고, 현재의 지하수위 위치만을 고려하여 사면안정해석을 수행한 결과를 도시한 것이다. 이 그림은 Bishop의 간편법을 적용하여 해석한 결과를 도시한 것으로, 최소사면 안전율은 1.15의 값을 갖는 것으로 나타났다.

사면의 소요안전율은 대상지역과 규모, 구조물의 중요성 등에 따라 서로 다르지만 도로사면의 경우에는 일반적으로 1.1~1.5정도 범위의 사면안전율을 적용하고 있다. 만약 사면의 소요안전율을 1.3으로 가정할 경우 현재 대상사면은 안정성에 의문이 있는 것으로 판단된다. 현 상황

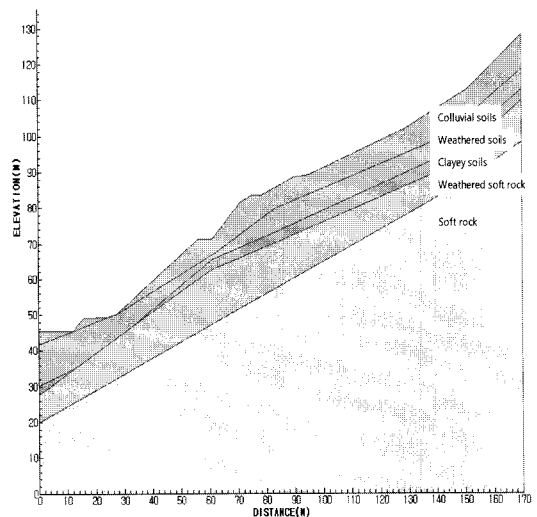


Fig. 5. Modeling of the slope using the SLOPILE program.

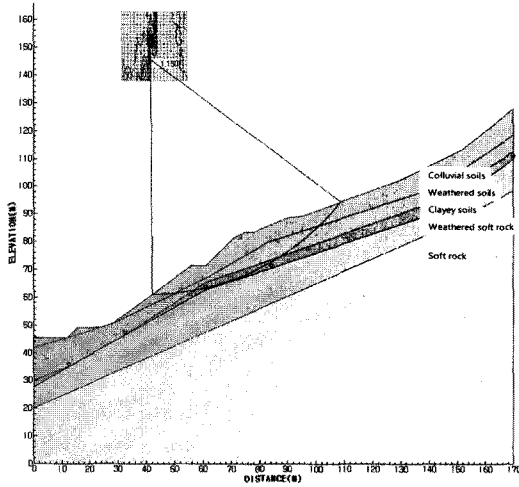


Fig. 6. Slope stability analysis without considering the effect of rainfall.

에서는 사면활동이 발생되지 않더라도 강우 혹은 사면 절개와 같은 외적요인에 의하여 사면활동이 갑자기 일어날 가능성이 매우 큰 것으로 판단할 수 있다.

**습윤전선 하강에 따른 사면안정성**

강우시 습윤전선 하강에 따른 사면안정성의 변화를 조사하기 위하여 대상사면에 대한 습윤전선을 하강하면서 사면안정해석을 수행하였다. 대상사면의 경우 실제 사면활동면은 암반층위에 존재하는 점토층에서 발생되었으므로 암반층내의 지하수위 변화는 사면안정성에 영향을 미치지 않는 것으로 예상할 수 있다. 따라서, 습윤전선 하강에 따른 사면안정해석은 습윤전선이 지표면으로부터 시작하여 암반층인 파쇄심한 연암층의 상부에 위치하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다(Fig. 2 참조). 이를 통하여 토사층에서의 지하수위 상승에 따른 사면안정성과 비교검토가 가능할 것이다.

지표면으로부터 습윤전선의 하강에 따른 사면안정성을 구하기 위하여 지표면으로부터 암반층 상부까지의 연직깊이를 H, 지표면으로부터 습윤전선까지의 연직깊이를  $H_{w1}$ 으로 정의하고,  $H_{w1}/H$ 의 비를 0에서 1까지 0.1씩 증가시켜가며 해석을 수행하였다.

Fig. 7은 토층내의 습윤전선 하강시 즉,  $H_{w1}/H$ 의 변화에 따른 사면안전율을 도시한 것으로, Bishop의 간편법으로 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 습윤전선이 하강함에 따라 사면안전율은 감소하는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 그리고, Bishop간편법의 경우

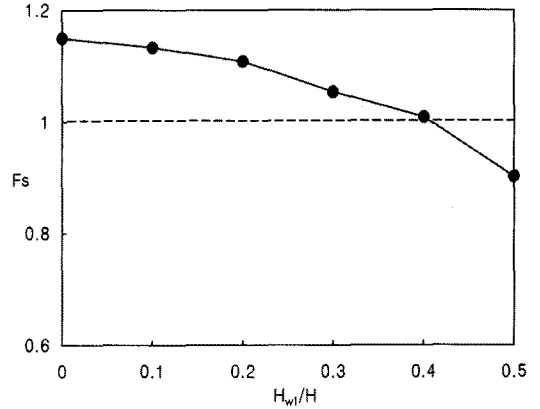


Fig. 7. Variations in the safety factors of a slope when considering the downward velocity of the wetting front.

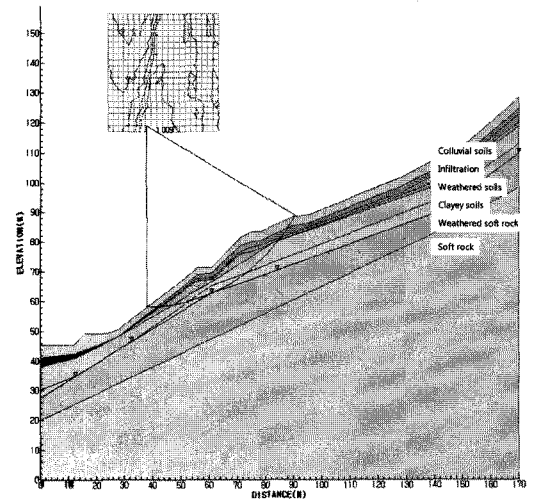


Fig. 8. Analysis result in the case of  $H_{w1}/H = 0.4$ .

$H_{w1}/H$ 의 비가 0.4이면 사면안전율은 1.01의 값을 갖는 것으로 나타났다.  $H_{w1}/H=0$ 인 경우 사면안정해석결과는 Fig. 6과 같으며,  $H_{w1}/H=0.4$ 인 경우 사면안정해석결과는 Fig. 8과 같다.

**지하수위 상승에 따른 사면안정성**

강우시 지하수위 상승에 따른 사면안정성의 변화를 조사하기 위하여 대상사면에 대한 지하수위를 상승하면서 사면안정해석을 수행하였다. 대상사면의 경우 실제 사면활동면은 암반층위에 존재하는 점토층에서 발생되었으므로 암반층내의 지하수위 변화는 사면안정성에 영향을 미치지 않는 것으로 예상할 수 있다. 따라서, 지하수위 상

승에 따른 사면안정해석은 지하수위가 암반층인 파쇄심한 연암층의 상부에 위치하는 것으로 시작하여 지표면까지 상승하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다(Fig. 2 참조). 이러한 해석을 통하여 토층에서의 습윤전선 하강에 따른 사면안정성과 비교검토가 가능할 것이다.

파쇄심한 연암층 상부로부터 지하수위의 상승에 따른 사면안전을 구하기 위하여 지표면으로부터 암반층 상부까지의 연직깊이를  $H$ , 암반층 상부로부터 지하수위까지의 연직깊이를  $H_{w2}$ 로 정의하고,  $H_{w2}/H$ 의 비를 0에서 1까지 0.1씩 증가시켜가며 해석을 수행하였다.

Fig. 9는 토층내의 지하수위 상승시 즉,  $H_{w2}/H$ 의 변화에 따른 사면안전을 도시한 것으로, Bishop의 간편법으로 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수위가 상승함에 따라 사면안전은 감소하는 경향을 갖는 것으로 나타났다. 그리고, Bishop간편법의 경우

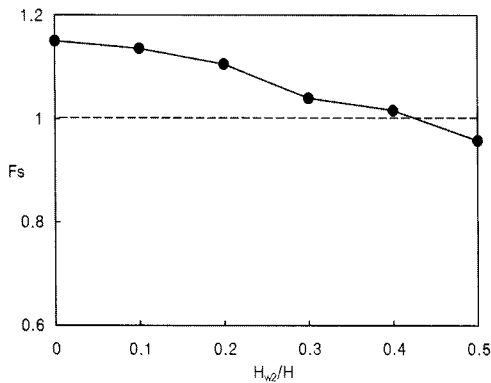


Fig. 9. Variations in the safety factors of a slope when considering the upward velocity of the groundwater level.

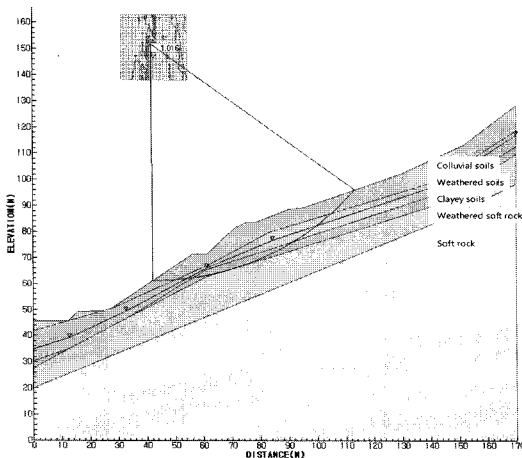


Fig. 10. Analysis result in the case of  $H_{w2}/H = 0.4$ .

$H_{w1}/H$ 의 비가 0.4이면 사면안전이 1.02의 값을 갖는 것으로 나타났다.  $H_{w2}/H = 0$ 인 경우 사면안정해석결과는 Fig. 6과 같으며,  $H_{w2}/H = 0.4$ 인 경우 사면안정해석결과는 Fig. 10과 같다.

**습윤전선 하강 및 지하수위 상승에 따른 사면안정성**

일반적으로 강우시에는 토층내의 습윤전선 하강과 지하수위 상승이 동시에 발생되어 사면활동이 일어나게 될 것이다. 즉, 습윤전선의 하강과 지하수위의 상승이 동시에 발생될 경우 토층의 포화 및 단위중량의 증가가 빠르게 진행되어 사면안정성이 저하되는 것이다.

강우시 습윤전선 하강 및 지하수위 상승에 따른 사면안정성의 변화를 조사하기 위하여 대상사면에 대하여 동시에 습윤전선을 하강시키고 지하수위를 상승시키면서 사면안정해석을 수행하였다. 이를 위하여 지하수위는 파쇄심한 연암층의 상부에서부터 상승하고, 습윤전선은 지표면으로부터 하강하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

Fig. 11는 토층내 습윤전선 하강 및 지하수위 상승시 즉,  $H_{w1}/H$  및  $H_{w2}/H$ 의 변화에 따른 사면안전을 도시한 것으로, Bishop의 간편법으로 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 습윤전선 하강 및 지하수위 상승에 따라 사면안전은 감소하는 것으로 나타났다. 특히,  $H_{w1}/H$  및  $H_{w2}/H$ 의 비가 0.07일 경우 사면안정성은 급격하게 감소되어 사면안전을 1이하로 감소되는 것으로 나타났다. Fig. 12는  $H_{w1}/H = 0.1$ 이고  $H_{w2}/H = 0.1$ 일때 사면안정해석결과를 나타낸 것이다. 이러한 결과는 습윤전선 하강만 고려한 경우, 지하수위 상승만 고려한 경우에 비해 매우 사면안정성의 저하속도가 매우 빠름을 알 수 있다.

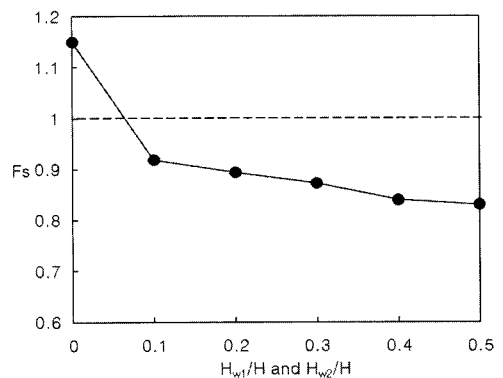


Fig. 11. Variations in safety factors of a slope when considering both the downward velocity of the wetting front and the upward velocity of the groundwater level.

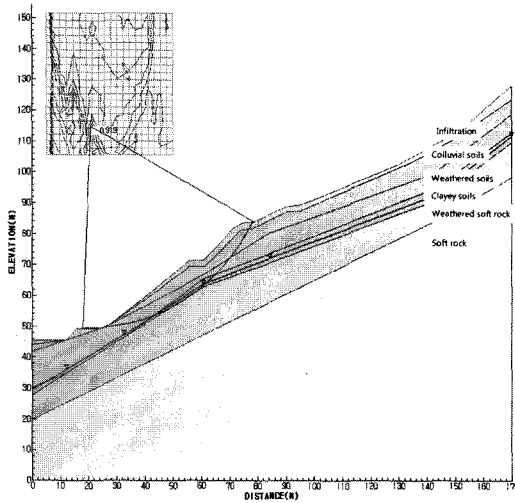


Fig. 12. Analysis result in the case of  $H_{w1}/H = 0.4$  and  $H_{w2}/H = 0.4$ .

### 분석 및 고찰

#### 사면안정해석결과 비교분석

강우시 습윤전선 하강 및 지하수위 상승에 따른 사면안전율의 변화를 서로 비교하기 위하여  $H_{w1}/H$ 가 증가하는 경우,  $H_{w2}/H$ 가 증가하는 경우 그리고,  $H_{w1}/H$  및  $H_{w2}/H$  동시에 증가하는 경우에 대한 사면안전율을 같이 도시하였다. Fig. 13은 Bishop의 간편법을 적용하여 습윤전선 하강 및 지하수위 상승에 따른 사면안정해석 결과를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 강우시 습윤전선 하강으로 인한 사면안전율 감소가 지하수위 상승으로 인한 사면안전율 감소보다 빠르게 진행됨을 알 수 있다. 그리고, 습윤전선 하강 및 지하수위 상승이 동시에 일어날 때 사면안전율은 매우 급속하게 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 습윤전선 하강시 및 지하수위 상승시에는  $H_{w1}/H$  및  $H_{w2}/H$ 가 각각 0.37 및 0.42이하일 경우 사면안전율 1이하로 감소되지만, 습윤전선 하강 및 지하수위 상승이 동시에 발생될 경우에는  $H_{w1}/H$  및  $H_{w2}/H$ 가 0.07이하일 경우 사면안전율이 1이하로 감소됨을 알 수 있다.

이들 결과로부터 강우시 발생하는 사면활동은 지하수위 상승에 의한 영향보다는 습윤전선 하강에 의한 영향에 의해 발생되고 있음을 확인할 수 있다. 그리고, 습윤전선 하강 및 지하수위 상승을 동시에 고려할 경우 사면안전율은 급격히 감소됨을 확인할 수 있다. 따라서, 강우시 사면안정해석법은 지반내 지하수위 상승과 습윤전선 하강을 동시에 고려하여 해석하는 것이 보다 바람직하다.

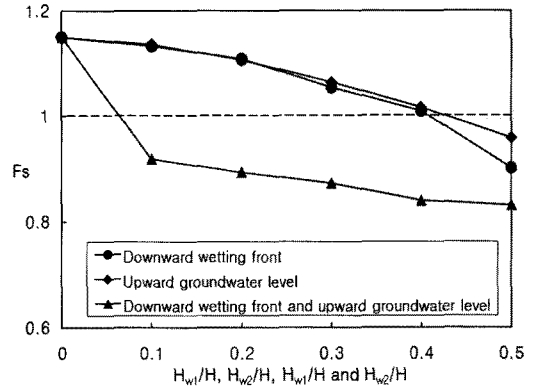


Fig. 13. Comparison of safety factors for slopes with various infiltration conditions.

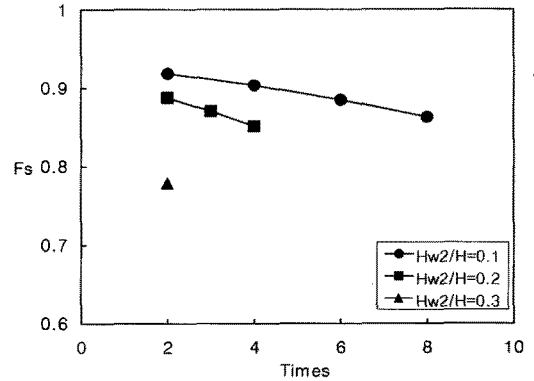


Fig. 14. Safety factor of a slope considering the downward velocity of the wetting front.

#### 습윤전선 하강 및 지하수위 상승속도를 고려한 사면안정해석 결과

강우시 습윤전선 하강 및 지하수위 상승의 속도에 따른 사면안전율의 변화를 서로 비교하기 위하여  $H_{w1}/H$  및  $H_{w2}/H$ 의 증가속도를 변화시켜 사면안정해석을 수행하였다. 이를 위하여 지하수위는 파쇄심한 연암층에서부터 상승하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다.

습윤전선 하강속도에 대한 영향을 살펴보기 위하여 강우시 지하수위의 상승속도보다 습윤전선의 하강속도가 더 크게 하여 사면안정해석을 수행하였다. 이를 위하여 지하수위 상승에 대한  $H_{w2}/H$ 를 각각 0.1, 0.2 및 0.3으로 고정시킨 후 습윤전선 하강에 대한  $H_{w1}/H$ 를  $H_{w2}/H$ 의 2배에서 8배까지 증가시켜 사면안정해석을 실시하였다. Fig. 14는 습윤전선 하강속도가 지하수위 상승속도보다 큰 경우 Bishop의 간편법을 이용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림의 횡축은 지하수위 상승에 대한 습윤전선 하



강의 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 습윤전선 하강속도가 증가함에 따라 사면안전율은 감소함을 알 수 있다. 그리고 습윤전선의 하강깊이가 깊을수록 사면안전율은 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 지하수위 상승속도에 대한 영향을 살펴보기 위하여 강우시 습윤전선의 하강속도보다 지하수위의 상승속도를 더 크게 하여 사면안정해석을 수행하였다. 이를 위하여 습윤전선 하강에 대한  $H_{w1}/H$ 를 각각 0.1, 0.2 및 0.3으로 고정시킨 후 지하수위 상승에 대한  $H_{w2}/H$ 를  $H_{w1}/H$ 의 2배에서 8배까지 증가시켜 사면안정해석을 실시하였다. Fig. 15는 지하수위 상승속도가 습윤전선 하강속도보다 큰 경우 Bishop의 간편법을 이용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림의 횡축은 습윤전선 하강에 대한 지하수위 상승의 비율을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수위 상승속도가 증가함에 따라 사면안전율은 감소함을 알 수 있다. 그리고 지하수위의

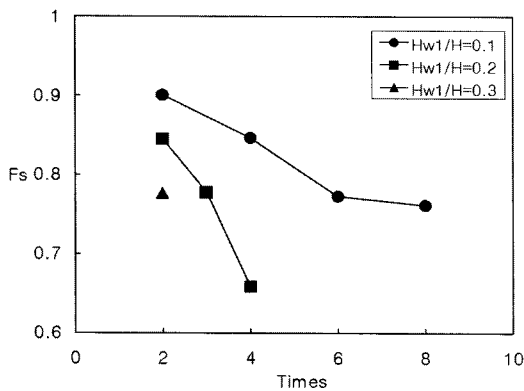


Fig. 15. Safety factor of a slope considering the upward velocity of the groundwater level.

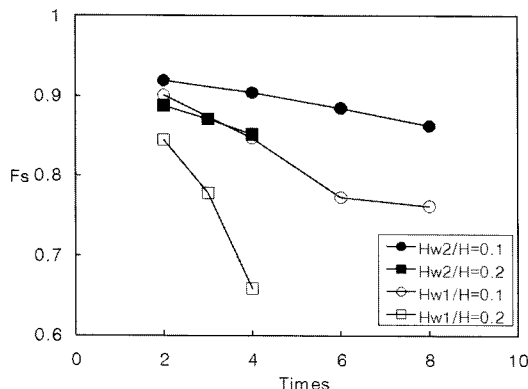


Fig. 16. Comparison of safety factors of slopes with various infiltration velocities.

상승높이가 높을수록 사면안전율은 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 16은 습윤전선 하강 및 지하수위 상승속도에 따른 사면안전율의 변화를 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지하수위의 상승속도에 따른 사면안전율은 습윤전선 하강속도에 따른 사면안전율에 비해 빠르게 감소하는 것으로 나타났다.

### 결론 및 요약

본 연구에서는 산사태가 발생한 현장을 대상으로 사면안정해석을 수행하여 강우시 사면안정성 변화를 조사하였다. 강우시 침투를 고려한 사면안정해석법으로는 토층내 습윤전선의 하강을 고려하여 해석하는 방법, 토층내 지하수위의 상승을 고려하여 해석하는 방법, 그리고 토층내 습윤전선의 하강 및 지하수위의 상승을 동시에 고려하여 해석하는 방법으로 구분할 수 있다. 이들 방법을 이용하여 사면안정해석을 실시하였으며, 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 강우시 습윤전선 하강으로 인한 사면안전율의 감소가 지하수위 상승으로 인한 사면안전율 감소보다 빠르게 진행되는 것으로 나타났다. 따라서, 강우시 산사태는 지하수위의 상승보다 습윤전선의 하강에 의한 영향이 더 큼을 알 수 있다.

2) 강우시 습윤전선 하강 및 지하수위 상승을 동시에 고려할 경우 습윤전선 하강만 혹은 지하수위 상승만 고려한 경우에 비해 매우 사면안전율의 저하가 매우 빠르게 발생됨을 알 수 있다. 따라서, 강우시 사면안정해석법은 토층내 지하수위 상승과 습윤전선 하강을 동시에 고려하여 해석하는 것이 보다 바람직하다.

3) 강우시 습윤전선 하강 및 지하수위 상승의 속도에 따른 사면안전율의 변화를 비교하기 위하여 습윤전선 하강 및 지하수위 상승속도를 변화시켜 사면안정해석을 수행하였다. 그 결과 지하수위의 상승속도에 따른 사면안전율은 습윤전선 상승속도에 따른 사면안전율에 비해 빠르게 감소함을 알 수 있다.

### 사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발”과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 박덕근, 1999, 우리나라 사면붕괴의 현황과 대책, 제4회 방재행정세미나 논문집, 177-214.
- 한국도로공사, 1996, 도로설계실무편람 -토질 및 기초-, 한국도로공사, 255p.
- 송영석, 홍원표, 2007, 퇴적암지역에서의 산사태 원인 및 특성분석에 대한 사례연구, 지질공학, 17(1), 101-113.
- 홍원표, 송영석, 2006, 활동역지시스템으로 보강된 사면의 안정해석 프로그램 개발, 지질공학, 16(1), 45-58.
- 홍원표, 한중근, 김상규, 김마리아, 김윤원, 1990, 강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측, 대한토질공학회, 6(2), 55-63.
- 홍원표, 한중근, 송영석, 신도순, 2003, 대절토사면에 보강된 역지말뚝의 활동역지효과에 관한 연구, 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회 논문집, 65-81.
- Bishop, A.W, 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 5, 7-17.
- Brand, E. W, 1985, Predicting the performance of residual soil slopes, Proc., 11th ICSMFE, Sanfrancisco, 2541-2573.
- Hoek, E. and Bray, J.W., 1977, *Rock slope engineering*, Institute of Mining and Metallurgy, London, 402p.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980, *Underground excavation in rock*, Institute of Mining and Metallurgy, London, 61-86.
- Kang, G.C., Song, Y.S. and Kim, T.H., 2009, Behavior and stability of a large-scale cut slope considering reinforcement stages, *Landslides*, 6(3), 263-272.
- Lumb, P., 1975, Slope failure in Hong Kong, *Journal of Engineering Geology*, 8, 31-65.

山口貢一, 1967, 地すべりの素因と誘因についで, 地すべり, 4(1), 4-11.

---

2011년 1월 11일 원고접수, 2011년 3월 2일 게재승인

## 송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실  
305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92  
Tel: 042-868-3035  
Fax: 042-868-3414  
E-mail: yssong@kigam.re.kr

## 홍원표

중앙대학교 공과대학 건설환경공학과  
156-756, 서울특별시 동작구 흑석동 221  
Tel: 02-820-5258  
Fax: 02-817-8050  
E-mail: wphong@cau.ac.kr