

## 3차원 사면안정해석법의 유효성 평가

### The Evaluation of 3-D Slope Stability Analysis

최영준<sup>1)</sup>, Young-Jun Choi, 이수현<sup>2)</sup>, Soo-Heon Lee, 황승현<sup>3)</sup>, Seung-Hyun Hwang, 안준상<sup>4)</sup>, Joon-Sang An, 사토 유지<sup>5)</sup>, Sato Yuji

<sup>1)</sup> 오대개발주식회사 시스템기술부, Godai Kaihatsu Co, Ltd. choi@godai.co.jp

<sup>2)</sup> (주)베이스소프트 대표이사, CEO, BasisSoft, Inc. jameslsh@basis.co.kr

<sup>3)</sup> (주)베이스소프트 상무이사, Director, BasisSoft, Inc. hwang@basis.co.kr

<sup>4)</sup> (주)베이스소프트 차장, Senior Manager, BasisSoft, Inc. joonsang@basis.co.kr

<sup>5)</sup> 오대개발주식회사 시스템기술부 사장, CEO, Godai Kaihatsu Co, Ltd. sato@godai.co.jp

**SYNOPSIS** : So far the Limit Equilibrium Method has been widely used by way of 2-D slope stability analysis for the evaluation of land slides and slope failures. However recently the evaluation of 3-D slope stability analysis has been comparatively possible owing to the developments of obtaining the terrain data and geological data and of 3-D slope stability analysis softwares. In Japan the evaluation of the 3-D slope stability analysis has been necessary for the stability analysis of the tunnel mouth. In this study we inspected the economic effects introducing the 3-D slope stability analysis for larger scale landslides and slope failures. In case of 3-D slope stability analysis of landslides we acquired the results that we reduce the cost of the countermeasure work of pile work by 40% comparing the 2-D slope stability analysis.

Moreover in case of the stability analysis of slope failures we figured out the results that we reduce the cost of the countermeasure work of anchor works by 20%. Furthermore we proved that 3-D slope stability analysis is effective for the stability analysis of tunnel mouths around the sides of landslides and large scale embankment which we could have not evaluated by conventional 2-D section stability analysis.

**Keywords** : 3-D slope stability analysis, Land slides, Slope failures, Countermeasure work, SSA-3D

## 1. 서론

지금까지의 산사태와 사면파괴를 대상으로 한 안정해석은, 파괴 형상 등을 간편하게 가정함에 중점을 둔 방법 즉, Bishop법, Fellenius법, Jaubert법에 의한 2차원 안정해석이 주로 이용되었다. 상기 기술한 방법들이 주로 사용된 이유는 비교적 계산이 간단하고 계산 양이 작았기 때문이다.

그러나 대규모 토괴활동과 타원형모양의 활동 등의 경우, 2차원 안정해석법으로는 보강공법에 대한 정밀도가 떨어지는 것을 알게 되었고, 보강공법 규모 산정에 대한 설명을 요구하는 경우가 많아졌다. 그래서 사면활동 상황에 적합한 안정해석 기법의 필요성이 대두되었고, 이러한 상황에 맞는 기법 중 하나로 활동면의 3차원 형상을 고려할 수 있는 3차원 안정해석이 있다. 지형과 지층데이터의 획득기술 발달과 3차원 안정해석 소프트웨어의 개발에 의해 비교적 간단히 3차원적인 안정 해석 평가가 가능해졌

다. 그러나 아직까지 실제 현장에 대한 사례가 적고, 산사태의 규모, 파괴 형상, 안정해석시 유의점 등 명확하지 않은 점이 많다.

이 연구는 비교적 규모가 큰 산사태와 사면파괴에 대한 대책공법 및 산사태 측면부에 존재하는 터널의 영향과 대규모 절토의 경우에 미치는 영향 등에 대해서, 3차원 안정 해석을 도입함으로써 얻을 수 있는 경제적인 효과를 검증했다.

## 2. 3차원 안정해석 방법

여기서는 3차원 안정해석방법 중 2차원 간편법을 3차원으로 확장한 Hovland법과 이 Hovland법을 수정한 수정 Hovland법을 소개한다.

Hovland법 및 수정 Hovland법에서는 2차원 안정해석의 절편(Slice)에 해당하는 계산단위로써 절주(Column)를 이용한다. Hovland법에서는 사각 절주, 수정 Hovland법에서는 삼각 절주를 사용해 계산한다. 이러한 요소로 산사태 및 사면파괴 발생시 토괴를 표현하는 것으로, 지표면 및 활동면의 3차원적 모양을 계산에 반영할 수 있다. 더욱이, Hovland법은 산사태 및 사면파괴의 방향을 미리 알고 있는 것으로 해석하지만, 수정 Hovland법에서는 좌표축을 회전시켜서 사면안전율이 최소가 되는 방향을 구해, 산사태 및 사면파괴 이동방향으로 판단하는 방법을 제안하고 있다.

## 3. 산사태 보강 공법(강관말뚝)에 대한 안정해석 비교

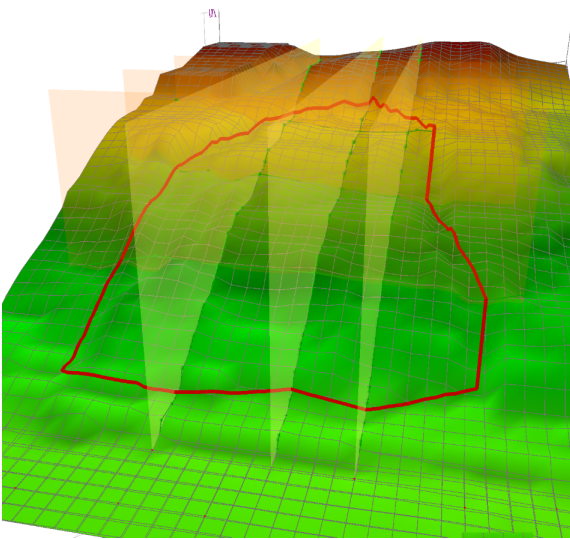


그림 1. 말단개방형 산사태 (SSA-3D)

일반적인 형태의 산사태(폭 80m, 길이 120m)에서 2차원 안정해석과 3차원 안정해석을 한 경우에 대해서 검증했다.

해석에 사용한 지형모델은 지반 조사 결과에 근거해서 설정했다. 산사태 모양은 위쪽은 좁고, 아래쪽은 넓은 말단개방형이다.

### 3.1 3차원 안정해석

#### ① 원지반 안전율 가정

먼저 원지반의 사면 안전율을 설정한다. 이 산사태는 현재 활동하지 않는 붕괴토~점성토활동으로 판단해서, 표 1에서 「 $F_s=1.03$ 」으로 가정했다.

표 1. 지층분류별 운동 상태에 따른 사면안전율의 범위 - 설계요령 제1집, 일본도로공단-

운동	분류	암반 활동	풍화암 활동	붕괴토 활동	점성토 활동
원지반(정지 상태) 안전율		1.10	1.05~1.10	1.03~1.05	1.00~1.03
활동 중 안전율		0.99	0.95~0.99	0.93~0.95	0.90~0.93

산사태 토괴의 단위중량은 토질시험결과로부터  $18\text{kN/m}^3$ 를 사용했다. 또한, 활동면의 토질정수(점착력(c), 내부마찰각( $\phi$ ))는 원지반 안전율( $F_s=1.03$ )로부터 역계산한다. 그 결과는 아래와 같다.

$$c=10.0(\text{kN/m}^2), \tan\phi=0.236883 (\phi=13.3267^\circ)$$

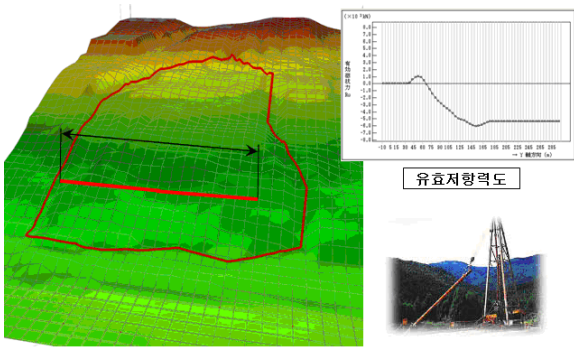


그림 2. 유효저항력도 (SSA-3D)

② 필요역지력 산정

계획안전율  $p.F_s \geq 1.200$ 을 만족하기 위한 필요역지력  $P_r$ 은 전체 산사태 영역에 대해서 105715.4kN으로 계산된다. 보강공법을 강관말뚝으로 결정한 경우, 말뚝의 유효한 설치 폭(유효 저항력도를 참고해서 결정)은 그림 2에서 보는 바와 같이 90m로 결정했다. 그러므로 단위폭당 필요역지력은  $105715.4\text{kN} / 90.0\text{m} = 1174.6\text{kN/m}$ 이 된다. 계산은 3차원사면안정 해석 프로그램인 SSA-3D를 사용했다.

③ 강관말뚝의 설치 계획

강관말뚝 설치 위치를 그림 3에서 보는 것과 같이 결정하고, 계산에 적용한다.

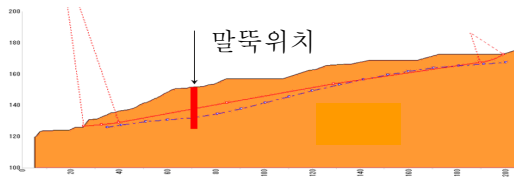


그림 3. 강관말뚝 설치 위치

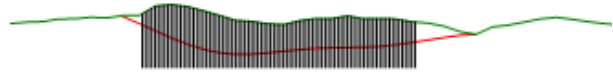


그림 4. 강관말뚝 배치 단면도(3차원 해석)

이 위치에서 가장 경제적인 강관말뚝의 규격은  $\phi 508$ ,  $t=12.7\text{mm}$ 이다. 보강공법에 의해 말뚝이 설치될 폭은 90.0m이므로,  $1,437\text{千円/m} \times 90.0\text{m} = 129,330\text{千円}$ 이 된다.

3.2 2차원 안정해석

산사태 주축선에서 2차원 안정해석을 실시한다. 해석조건은 3차원 안정해석과 동일하다.

① 원지반 안전율 가정

3차원 안정해석과 동일하게 원지반 안전율을  $F_s=1.03$ 으로 가정하고, 활동면의 강도정수를 역계산한 결과는 다음과 같다.  $c = 10.0(\text{kN/m}^2)$ ,  $\tan\phi = 0.210406(\phi = 11.8821^\circ)$ 으로 계산되며, 이 값은 3차원 해석에서 계산된 것보다 조금 작은 값이다.

② 필요역지력 산정

계획안전율  $p.F_s \geq 1.20$ 을 만족하기 위한 필요역지력  $P_r$ 은 전체산사태영역에 대해 1327.4kN/m가 된다.

③ 강관말뚝 계획

강관말뚝 설치 위치는 그림 3의 3차원 해석의 위치와 동일하며, 배치 단면도는 그림 5에서 보여주고 있다. 그림 4와 5를 비교해보면 알 수 있듯이 2차원 해석에서는 단면도 전체(산사태 전체 폭)에 강관말뚝을 타설한 것으로 보고 계산한다. 이렇게 배치한 상태에서 가장 경제적인 강관말뚝의 규격은  $\phi 508$ ,  $t=15\text{mm}$ 이다. 강관말뚝 타설 위치에서 산사태 전체 폭은 115.0m이므로,  $1,568\text{千円/m} \times 90.0\text{m} = 207,800\text{千円}$ 이 된다.

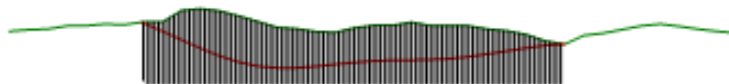


그림 5. 강관말뚝 배치 단면도(2차원 해석)

### 3.3 비교 검토 결과

상기 기술한 비교 내용을 요약하면, 표 2에서 보는 바와 같이 3차원 안정해석 결과는 2차원 안정해석에 비해서 공사비를 약 40% 정도 줄일 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

표 2. 3차원 해석 및 2차원 해석의 결과 비교 (강관 말뚝 시공)

	3D 해석	2D 해석
원지반 안전율	$F_s=1.03$	$F_s=1.03$
활동면의 강도정수	$c=10.0(\text{kN}/\text{m}^2)$ , $\tan\phi=0.236883$ ( $\phi=13.3267^\circ$ )	$c=10.0(\text{kN}/\text{m}^2)$ , $\tan\phi=0.210406$ ( $\phi=11.8821^\circ$ )
계획안전율	$p.F_s \geq 1.20$	$p.F_s \geq 1.20$
필요역지력	105715.4kN, 1174.6kN/m	1327.4kN/m
강관말뚝 규격	$\phi$ 508, $t=12.7\text{mm}$ , $L=20.0\text{m}$	$\phi$ 508, $t=15\text{mm}$ , $L=20.0\text{m}$
강관말뚝 개수	90개	115개
보강공법 공사비	129,330千円	207,800千円

## 4. 사면 보강공법(앵커)에 대한 평가

### 4.1 3차원 안정 해석

#### ① 원지반 안전율 가정

해석에 사용한 지형모델은 지반 조사 결과에 근거해서 설정했다. 사면 파괴 형상은 위쪽은 좁고, 아래쪽은 넓은 말단개방형이다. 원지반 사면의 안전율은 활동 중의 풍화암~암반활동으로 판단해서, 초기 안전율을 「 $F_s=0.98$ 」로 가정했다. 대상 지층(암반층)의 단위중량은  $20\text{kN}/\text{m}^3$ 로 한다. 활동면의 강도는 점착력  $c=5.0\text{kN}/\text{m}^2$ , 내부마찰각  $\phi=25.75^\circ$ 으로 적용(역계산에 근거)

#### ② 필요역지력 산정

계획안전율  $p.F_s \geq 1.20$ 을 만족하기 위한 필요역지력  $P_r$ 은 활동전체에 8157.8kN가 된다.

#### ③ 앵커 설계

3차원에서 구체적인 설치 위치를 검토한다. 앵커를 1개 증감할 때마다, 안전율을 파악할 수 있기 때문에, 기술자가 판단한 배치에 대한 안전율을 계산할 수 있다.

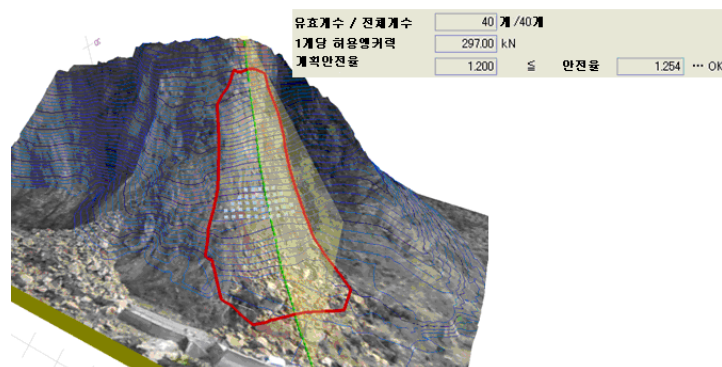


그림 6. 해석 대상 사면 형상 및 앵커 증감에 따른 안전율 계산창 (SSA-3D)

## 4.2 2차원 안정 해석

### ① 원지반 안전율 가정

주축선에서 2차원 안정해석을 실시했다. 3차원 해석과 동일하게 원지반 안전율을  $F_s=0.98$ 로 가정하고, 활동면의 강도정수를 역계산한 결과는 다음과 같다.  $c=5.0(\text{kN}/\text{m}^2)$ ,  $\tan\phi=0.541724(\phi=28.4455^\circ)$ 으로 계산되며, 이 값은 3차원 해석에서 계산된 값보다 큰 값이다.

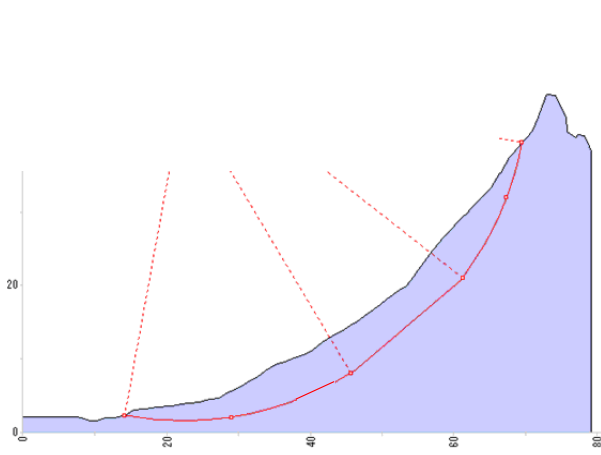


그림 7. 해석 대상 사면 형상

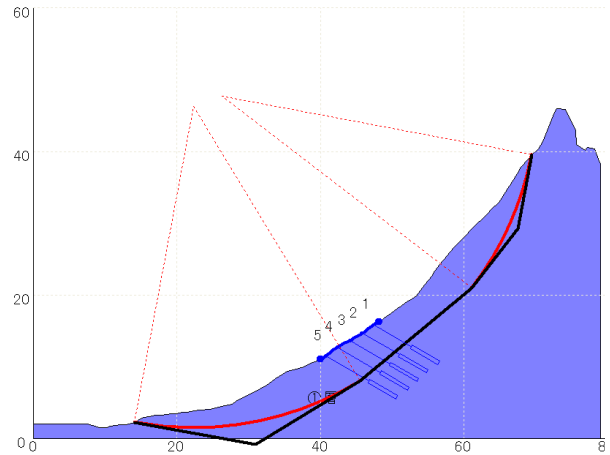


그림 8. 앵커 배치 형상

### ② 필요역지력 산정

계획안전율  $p.F_s \geq 1.20$ 을 만족하기 위한 필요역지력  $P_r$ 은 활동전체  $1327.4\text{kN}/\text{m}$ 가 된다.

### ③ 앵커 설계

앵커 설치 위치를 그림 8과 같이 고려해서 계산한다. 2차원에서 해석한 배치 상황을 3차원적으로 표현하면, 횡방향 앵커 배치 폭은 주단면 전체 폭과 동일하기 때문에 그림 9와 같이 배치가 된다.

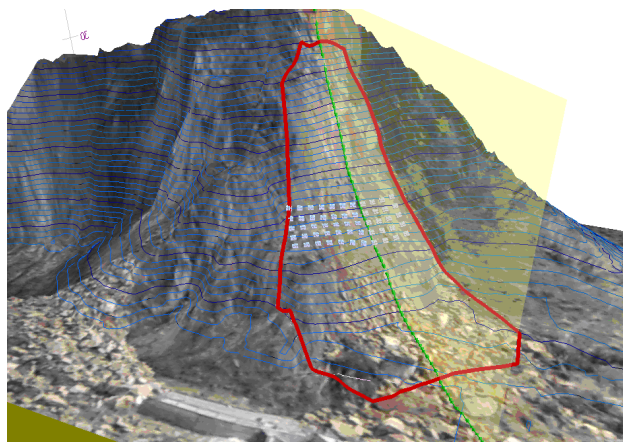


그림 9. 3차원으로 표현한 2차원 해석의 앵커 배치 형상

앵커개수는 55개이고, 공사비는  $510\text{千円}/\text{m} \times 22.0\text{m} = 11,220\text{千円}$ 이 된다. 2차원 안정성 평가를 한 경우의 보강공법에 대한 공사비는  $11,220\text{千円}$ 이다.

### 4.3 비교 검토 결과

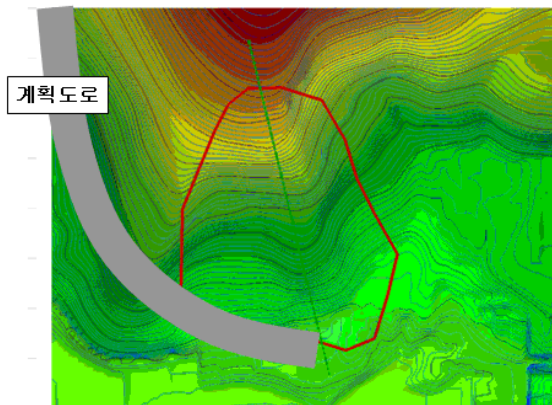
상기 기술한 비교 내용을 요약하면, 표 3에서 보는 바와 같이 3차원 안정해석 결과는 2차원 안정해석에 비해서 공사비를 약 22% 정도 줄일 수 있는 것으로 판단할 수 있다.

표 3. 3차원 해석 및 2차원 해석의 결과 비교 (앵커 시공)

	3D 해석	2D 해석
원지반 안전율	$F_s=0.98$	$F_s=0.98$
활동면의 강도정수	$c=5.0(\text{kN}/\text{m}^2)$ , $\tan\phi=0.482277$ ( $\phi=25.7469^\circ$ )	$c=5.0(\text{kN}/\text{m}^2)$ , $\tan\phi=0.541724$ ( $\phi=28.4455^\circ$ )
계획안전율	$p.F_s \geq 1.20$	$p.F_s \geq 1.20$
필요역지력	8157.8kN, 370.8kN/m	617.9kN/m
앵커 규격	PS복합연선 SEEE F50UA	PS복합연선 SEEE F50UA
앵커 개수	40개	55개
보강공법 공사비	8,785千円	11,220千円

## 5. 도로 시공 계획을 고려한 3차원 사면안정 해석

### 5.1 검토 개요



3차원 사면안정해석에 적용한 지형모델은 그림 10과 같다. 사면 파괴 형상 측면으로 신설 도로가 계획되어 있다. 이러한 경우에 터널로 시공해야 하는지 아니면 대규모 절토에 의한 도로 시공을 해야 하는지 검토를 수행했다. 이 검토는 2차원 안정 해석으로는 불가능하기 때문에, 3차원 안정 해석을 수행했다. 이 케이스의 경우에 원지반 상태는 안정한 상태의 풍화암~암반활동으로, 초기안전율을  $F_s=1.05$ 로 가정했다. 산사태 토괴의 단위중량은  $20\text{kN}/\text{m}^3$ 로 한다. 활동면의 강도는 점착력  $c=6.6\text{kN}/\text{m}^2$ , 내부마찰각  $\phi=26.4285^\circ$  (역계산에 근거)이다.

그림 10. 신설 도로를 고려한 3차원 사면안정해석 형상

### 5.2 터널 시공시 사면안정 검토

신설 도로계획을 터널로 결정한 경우에 대해서 검토한다. 터널굴착에 의한 이완영역은 그림 11에서 보는 바와 같다. 이완영역 설정은 다음과 같은 절차로 결정했다. 터널굴착에 의한 활동면의  $c$ ,  $\phi$ 의 감소 범위는 터널로부터 반경 2D 이내 또는 터널지반으로부터  $\alpha=45^\circ+\phi/2$ 의 외각선의 범위내가 된다. 이 범위내의 활동면  $c$ ,  $\phi$ 를 터널굴착에 의해 강도감소가 최대로

일어나는 경우에 대해서 검토했다.

내부마찰각 $\phi$ 의 감소 $\beta\phi = 0.75 \sim 0.85 \Rightarrow \beta\phi = 0.75$ 로 계산	점착력 $c$ 의 감소 $c\phi = 0.4 \sim 0.6 \Rightarrow \beta c = 0.4$ 로 계산
---	---

표 4. 터널 굴착을 고려한 사면 안전율 결과 및 필요역지력

가정안전율(Fs)	계산안전율(Fs)	계획안전율(p.Fs)	필요역지력(Pr(kN))
1.05	1.021	1.200	73778.2

터널 시공 후 계산된 안전율은 가정안전율에 비해서 2.9% 정도 낮게 계산되었음을 표 4를 통해서 알 수 있다. 터널 시공 후 안정해석을 실시한 형상은 그림 12에서 보여주고 있다.

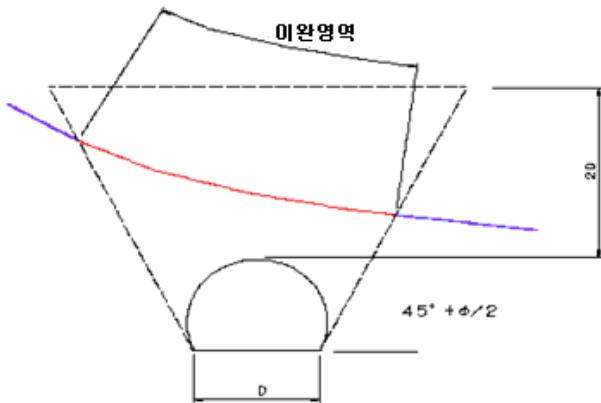


그림 11. 터널의 이완 영역

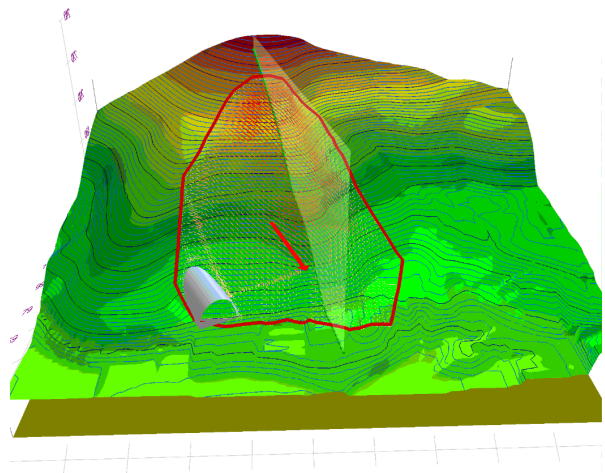


그림 12. 터널 시공 후 3차원 사면안정해석 형상

### 5.3 대규모 절토 시공시 사면안정 검토

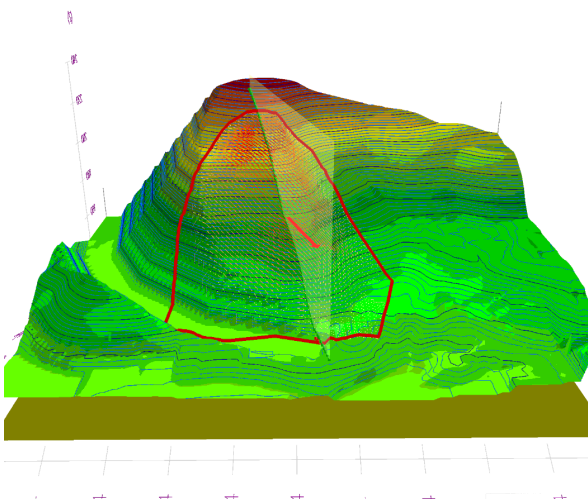


그림 13. 대규모 절토 시공 후 3차원 사면안정해석 형상

신설 도로계획을 대규모 절토 시공으로 결정한 경우에 대해서, 시공 후 안정해석을 실시한 형상은 그림 13에서 보여주고 있다.

그리고 대규모 절토 시공 후 계산된 안전율은 가정 안전율에 비해서 1.4% 정도 낮게 계산되었음을 표 5를 통해서 알 수 있다.

표 5. 대규모 절토를 고려한 사면 안전율 결과 및 필요역지력

가정안전율(Fs)	계산안전율(Fs)	계획안전율(p.Fs)	필요역지력(Pr(kN))
1.05	1.036	1.200	56793.4

## 5.4 비교 검토 결과

상기 기술한 비교 내용을 요약하면, 표 6에서 보는 바와 같이 대규모 절토에 의한 시공이 산사태에 대한 영향이 비교적 작은 것으로 판단할 수 있다. 이러한 해석은 2차원 해석으로는 불가능하고, 3차원으로 해석했을 경우만 비교가 가능하다.

표 6. 터널 및 절토 시공에 의한 도로신설을 포함한 3차원 사면안정해석 결과 비교

	터널 시공	대규모 절토 시공
원지반 안전율	Fs=1.05	Fs=1.05
활동면의 강도정수	c=6.6(kN/m <sup>2</sup> ), tanφ=0.504782 (φ=26.7838°)	c=6.6(kN/m <sup>2</sup> ), tanφ=0.504782 (φ=26.7838°)
시공 후 안전율	Fs=1.021	Fs=1.036
감소한 안전율 %	2.9%	1.4%

## 6. 결론 및 향후 과제

이 연구에서는 산사태와 사면 파괴에 대해서 대표적인 모델을 선정해서 2차원 안정해석과 3차원 안정해석에 대해서 비교, 검토했다. 그 결과, 3차원 안정 해석은 보강공법 규모에 대해서 비교적 합리적인 공사비를 산정하는 경우가 많았다. 하지만, 3차원 안정 해석에 대해서는 앞으로 보다 많은 다양한 경우에 대해서 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 이 연구에서 계산에 이용한 안전율(원지반 안전율, 계획안전율 등)을 2차원 안정해석과 동일한 값으로 가정해서 사용하는 것에 대한 당위성을 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 일본도로공단 설계요령 제1집 3장 pp 3~28
2. (주)베이스소프트, 오대개발(주), SSA-3D(Slope Stability Analysis-3D) 프로그램 사용자 매뉴얼
3. 유병욱, 김낙영, 장현익 외, 2008년 6월, “3차원 해석에 의한 사면안정 검토사례”, 2008년도 사면안정 학술발표회, (사)한국지반공학회
4. 申潤植(平成元年 11月), 地すべり工學-理論と實題-, 山海堂, pp 583~587.
5. トンネル掘削を誘因とする地すべり対策に関する基本指針, 高速道路技術センター, pp 22~42
6. Examination of preciseness of 3D slope stability analysis methods using several idealized sliding masses : comparisons of Hovland method and 3D simplified Janbu method, Landslides - Journal of the Japan Landslide Society Vol.42, No.1(2005), May, pp 63~68