

단 보

3차원 사면안정해석에 관한 소고

서용석^{*1)} · 윤운상²⁾

¹⁾충북대학교 지구환경과학과, ²⁾(주)넥스지오

A Short Note on 3-Dimensional Slope Stability Analysis

Yong-Seok Seo^{*1)} · Woon-Sang Yoon²⁾

¹⁾Dept. of Earth & Environmental Sci., Chungbuk Nat'l Univ. ²⁾NEXGEO Inc.

서 론

사면활동은 삼차원적인 토괴 혹은 암괴의 입체적 움직임의 산물이며 여러 가지 복잡한 지질학적 요인에 의하여 발생하고 있다. 하지만 사면안정해석은 일반적으로 이차원적으로 수행됨으로써 해석모델을 극히 단순화 시키고 있다. 물론 지반해석에 있어서 단순한 모델을 구축하여 해석하는 것은 여러 가지 중요하고도 편리한 의미를 가지고 있다. 그러나 여러개의 블록이 서로 다른 움직임을 보이며 다양한 파괴형태를 표출하는 사면활동을 대상으로 2차원 해석과 같이 획일화된 이동방향만으로 계산하고, 계산단면에 따라서 서로 다른 안전율을 보이는 해석방법이 적절한 모델인가에 대해서는 검토해볼 필요가 있다. 특히 최근에는 컴퓨터 기술의 눈부신 발달로 계산의 양이나 시간적 제약이 거의 없어졌기 때문에 계산모델의 3차원화를 통한 계산결과의 신뢰성을 높이는 것이 필요한 시점이라 하겠다.

3차원 사면안정해석에서 안전율을 도출하기 위하여 가장 많이 사용되는 것이 한계평형이론을 이용한 접근법(Hovland, 1977; Chen & Chameau, 1983; Hung, 1987; Lam & Fredlund, 1993)이다. 수 개의 상용프로그램을 활용한 해석이 많이 시도되고 있다. 하지만 사면 형태의 표현, 구성물질의 성분표시 및 해석방법상의 한계에 의하여 엄밀한 해석결과를 얻지는 못하고 있다. 두번째로 상한이론(upper bound theory)

을 이용한 방법(Chen et al., 2001)으로서 변위의 속도장을 계산하여 에너지 분포를 구하고 안전율을 구한다. 암반에서의 불연속면을 취급할 수 있고 비교적 수학적으로 엄밀한 해를 구할 수 있지만 범용화에 이르지 못하고 있다. 본 소고에서는 최근 일본에서 활발히 연구되고 있는 한계평형법을 이용한 3차원 사면안정해석에 관한 다양한 연구 결과들에 대하여 소개하고 그 효용성에 대하여 몇가지 실례를 통하여 검토하고자 한다.

2차원과 3차원 안정해석의 차이

사면활동에 영향을 미치는 요소에는 지표면의 형상, 활동면의 형상, 활동면에 작용하는 간극수압의 분포, 지반물성의 분포 및 활동면의 강도 등이 있다. 이러한 다양한 요소들이 사면안정에 영향을 미치므로 2차원 사면안정해석을 수행할 때 아래와 같은 문제점들이 발생한다.

- 2차원 해석에서 사면안정 해석 시 입력되는 또는 역해석에서 산정되는 활동면의 강도는 단일 평균 강도가 이용되는 것이 일반적임. 하지만 활동저면의 강도와 좌우 측벽의 강도는 현실적으로 다른 경우가 많음.
- 2차원 해석에서는 비대칭 활동면 형상이나 활동사면의 말단부 개방유무 등을 고려할 수 없음.

* Corresponding author : ysseo@cbu.ac.kr

- 2차원 해석은 해석모델이 간단하고 정밀하게 표현되지만 평면적인 확장 정보가 무시되어 3차원적인 지질구조를 반영할 수 없기 때문에 정확한 해석결과를 얻기 어려움.
- 2차원 해석의 경우, 최대 층후 축선에 대하여 안정 해석을 수행하므로 일반적으로 파괴영역의 가장자리부분에서 층후가 얇아지는 썰기형에서는 필요역지력이 과다하게 산정됨.
- 활동방향이 계층 등에 의하여 판명되는 경우를

제외하면, 설정한 주축선방향과 전 활동토괴의 최소안전율을 나타내는 방향이 다를 가능성이 높음.

- 3차원적으로 분포하는 지형 · 활동면 · 지하수위의 평형관계의 변화를 적절히 수용할 수 없음.

Table 1은 2차원과 3차원해석시 반영되는 대표적인 항목을 중심으로 차이점을 나타낸 것이며, Fig. 1은 2차원과 3차원 사면안정해석시 이용되는 모델을 모식적으로 나타낸 것이다.

Table 1. 2차원과 3차원해석에 반영되는 항목의 차이 (Ohta et al., 2000)

항 목	2차원법	3차원법	설 명
블록의 범위 · 평면형	×	○	2차원에서는 활동폭으로 규정
지형의 평면적 기복	×	○	2차원에서는 최대단면을 이용함으로써 과다설계의 요인이 됨
지하수위면의 평면적 기복	×	○	2차원에서는 최대 간극수압 작용단면을 적용
활동면의 평면적 기복	×	○	3차원에서는 지질구조 · 지형 등의 영향을 반영하는 것이 용이
해석모델상의 정밀도	○	△	모델상의 정밀도는 입력자료가 적은 2차원법이 우수하나, 2차원모델자체가 가지는 정보량이 적어 해석정밀도가 낮아짐

* ○: 고려, △: 약간고려, ×: 미고려

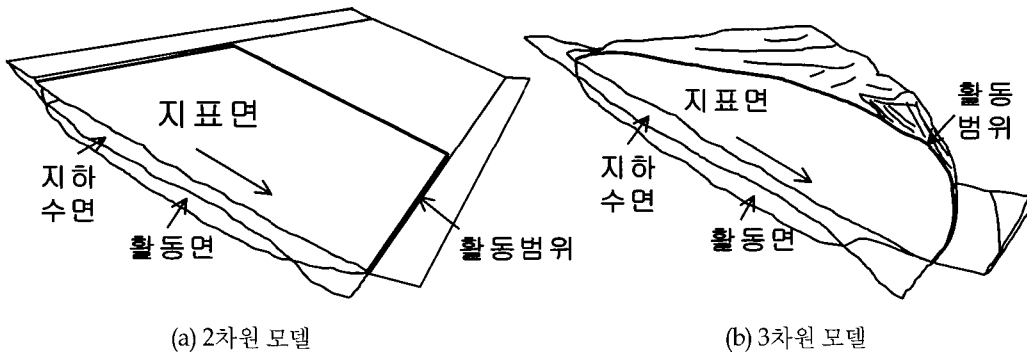


Fig. 1. 2차원과 3차원 사면 안정 해석시 이용되는 모델의 모식도

3차원 사면안정해석 방법

3차원 사면안정해석의 순서도는 Fig. 2와 같으며 해석과정에 대한 내용을 간략히 요약하면 다음과 같다.

1) 지형 데이터의 작성

지형데이터는 지형도로부터 일정 등고선간격으로 디지털화 시켜 작성하고, 표고 속성을 가진 3차원 데이터로 변환한다. 수치지형도가 있는 경우에는 변환 기능을 이용하여 즉시 활용할 수 있다.

2) 활동면 데이터 및 지하수위 데이터 작성

현장에서 조사, 측정 또는 탐사한 활동면 및 지하수위의 정보를 CAD를 이용하여 디지털화하고, 표고속성을 부여하여 3차원 데이터로 변환한다.

3) 안정계산 영역 지정

서로 다른 지반속성을 가진 활동영역을 구분하여 안정계산을 수행할 범위를 복수로 지정할 수 있다.

4) 안정계산용 메쉬 작성

해석범위내에서 100-3000개 정도의 삼각형요소로 분할하며, 지표면, 지하수면, 활동면으로 구성되는 삼각주를 이용하여 해석을 수행한다.

5) 안정계산 영역경계 조정

해석영역의 경계조건으로 항상 활동면과 지하수면이 표고보다 낮아야 하며, 높은 경우에는 지표면과 일치되도록 조정한다.

6) 요소의 체적·저면적 계산

요소별로 활동면·지표면사이의 체적과 활동면·지하수면 사이의 체적을 구한다.

7) 요소의 중량·수압 계산

입력된 계산영역내에 분포하는 물질의 단위중량과 구해진 체적을 이용하여 산출한다.

8) 개별요소의 활동력·수직저항력 산정

9) 활동력·수직저항력·저면적의 총합 계산

10) 역해석 수행여부

역해석을 수행하여 활동면의 강도특성을 추정할 경우에는 아래식을 이용하여 C(점착력)와 φ(내부마찰각)를 산출한다.

$$FS = \frac{(\sum T \times \tan\phi + \sum B \times C)}{\sum S} \quad (1)$$

여기서, FS: 안전율
T: 저항력

B: 활동면적

S: 활동력

11) 안전율 산출 및 결과 표시

최종 계산된 안전율을 산출하고, 활동력 벡터(크기와 방향)가 요소별로 표시되고 총합이 표시되며, 각 요소별로 활동력의 크기가 상대적 크기의 차로 표시되므로 활동력이 집중되는 위치를 파악하여 중점적으로 대책공법을 시공하는 것이 가능하다.

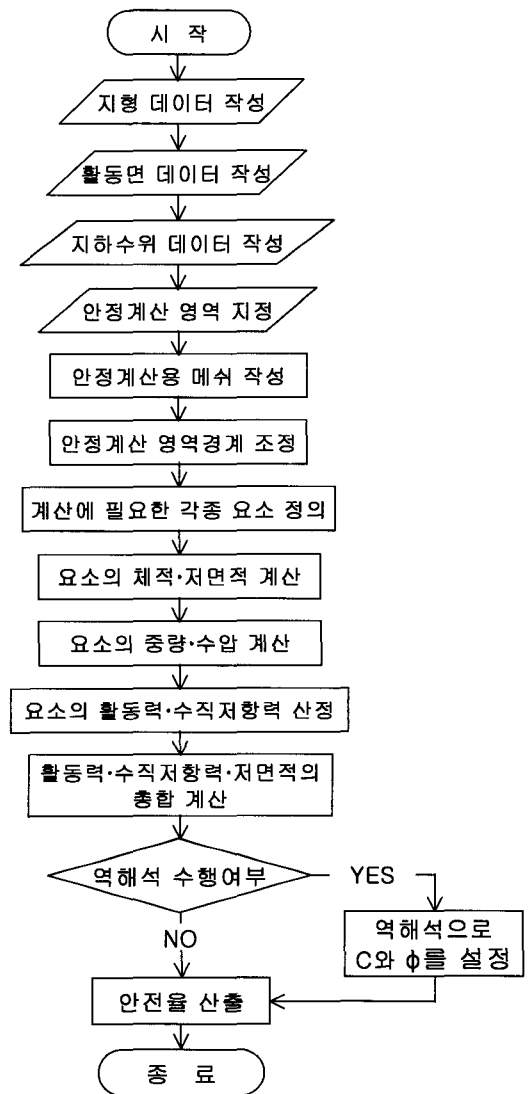


Fig. 2. 3차원 사면안정해석 흐름도

3차원 사면안정해석의 유효성

과거에 사면의 안정성을 해석함에 있어 가장 어려웠던 점은 해석에 사용되는 각종 면구조의 좌표입력이었을 것이다. 해석자체보다는 해석을 준비하는 단계에서 너무 많은 시간과 노력이 소요되었기 때문에 널리 보급되지 못하였다. 하지만 최근 컴퓨터와 CAD 소프트웨어의 비약적인 발전으로 이러한 장애물이 많이 제거되어 3차원 사면안정해석을 보다 쉽게 수행할 수 있는 환경이 준비되었다고 할 수 있다.

지금까지 수행되었던 3차원 사면안정해석을 살펴보면 사면의 규모가 큰 경우나 좌우 비대칭 사면 등의 특수한 경우에 많이 수행되었다. 하지만 소위 일반적인 경우에 2차원과 3차원 해석의 차이를 알아보기 위하여 수행된 사례(Ohta & Hayashi, 1998)를 살펴보면 다음과 같다.

1) 말단형상 차에 의한 해석결과의 차이

비교해석에 사용된 평면형상과 단면형상은 Fig. 3과 같다. 말단개방형 활동은 2차원해석에 가까운 결과를 보이지만, 말단부가 등쪽에서 폐쇄로 진행될수록 전 활동력이 2차원에 비하여 57%까지 급격히 떨어진다. 이는 등쪽을 이용하는 2차원 해석과 달리, 3차원 해석모델에서는 실제 활동체적을 이용함으로써 전체적으로 체적이 줄어들었기 때문이다. 3차원 말단 개방형 모델에서 2차원 해석결과와 거의 유사한 결과를 보이는 이유는 말단부 개방의 결과로 체적이 증가하는 효과와 양측벽부로 갈수록 층후가 얇아지는 효과가 서로 상쇄되었기 때문으로 해석된다. Table 2는 비교해

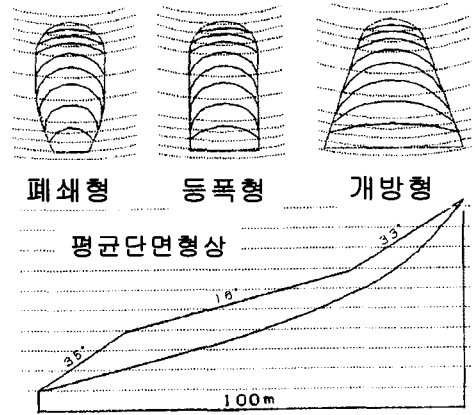


Fig. 3. 비교해석된 사면의 평면도 및 단면도

석의 결과를 종합하여 나타낸 것이다.

2) 사면활동방향과 사교하는 절토의 경우

도로 등의 건설로 사면절토를 수행할 때 도로선형이 사면활동방향과 직교할 경우에는 2차원안정해석의 결과를 이용하여 대책공을 설계하는 경우가 많다. 하지만 많은 경우에 사면활동방향과 도로선형이 사교하는 경우가 많이 발생하여 안정해석 수행에 어려움을 겪는 경우가 많다. Fig. 4는 사면활동방향이 사면상부에서 하부로 갈수록 변하는 경우의 예로서 최대 24°까지 변하는 경우의 예이다. 이러한 경우 3차원 해석을 통하여 활동면의 방향을 정확히 설정함으로써 활동에 대한 정량적인 변화를 계산할 수 있다.

Table 2. 말단형상별 3차원안정해석 결과 비교

해석방법	사면길이 (m)	폭		점착력	내부마찰각 (deg)	전활동력 (ton)	필요억지력 (ton)	비율	
		중앙부	말단부						
2차원해석	100	50	50	0	21.57	22.04	4407	100%	
3차원 해석	100	50	말단 폐쇄형	25	0	20.81	12.65	2530	57%
			등쪽형	50	0	21.11	14.33	2865	65%
			말단 개방형	100	0	21.16	20.13	4025	91%

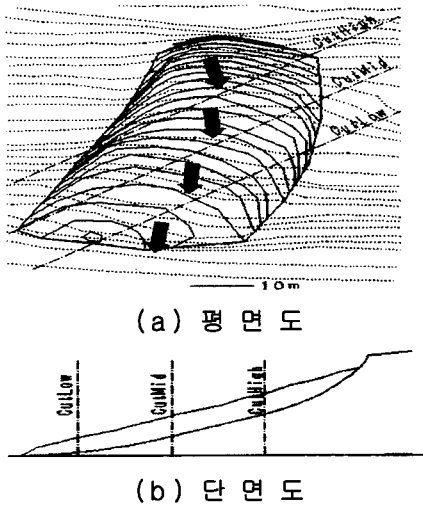


Fig. 4. 사면활동방향이 변하는 모델

3) 사면의 형상비

일본에서 취합된 기존 사면을 대상으로 한 통계자료(日本高速道路調査會, 1985)에 의하면, 사면활동이 시작되는 폭/깊이의 평균비는 자연발생사면에서 9.45, 토공에 의한 사면에서 8.32로 나타났다. 이것은 이러한 비를 초과할 때 안전율이 1이하가 되어 활동을 시작한다는 의미이다. 일본에서 발생한 고베지진시 兵庫縣六甲山 산록부 성토사면을 대상으로 발생한 사면파괴를 살펴보면 폭/깊이의 비가 10을 넘을 경우 매우 심한 피해를 받은 것을 알 수 있다(Fig. 5; 釜井等, 2000). 또한 일반적으로 사면활동 저면의 강도는 사면의 측면보다 약한 경우가 많이 있다. 이러한 경우를 가정하고 해석을 실시한 결과 폭/깊이의 비가 커질수록 안전율이 저하하는 결과를 보인다. 이와 같이 사면의 안정에는 사면 측부의 강도가 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

구분	카테고리	카테고리 스코어				
폭/깊이 비	0.5					
	5~7.5					
	7.5~10.0					
	10.0~12.5					
	12.5~15.0					
	15.0~20.0					
	20.0 이상					
		-1	-0.5	0	0.5	1

* 카테고리 스코어가 클수록 안전함.

Fig. 5. 통계해석에 의한 성토사면의 안전율

4) 대규모 산사태지역에서의 터널굴착

Kimura & Itou(2003)는 터널 갱구부에서 약 150m 굴착지점까지 산사태의 영향권인 OO터널을 대상으로 터널굴착에 따른 대규모 산사태의 위험성에 대하여 3차원적인 안정성 해석검토를 수행하였다. 수행결과에 의하면 터널굴착후의 안전율에서 2차원의 경우 0.72, 3차원의 경우 0.92를 보였으며, 보강에 필요한 억지력 분석에서는 3차원의 경우가 2차원 해석결과의 약 36%로 나타났다. 이와 같은 차이의 원인은 터널과 산사태의 해석영역의 차이에 있다. 즉 2차원해석의 경우 산사태의 전구간이 터널 굴착에 의한 영향권에 들어가지만, 3차원해석의 경우에는 굴착의 영향을 받지 않는 산사태 측부를 해석구간에 포함시킴으로서 산사태 영역에서 터널의 영향을 받는 부분이 상대적으로 감소한다. 이것이 2차원해석에서 터널 굴착의 영향이 과다하게 평가되는 이유다. 두 번째 이유로는 지형적 영향으로서, 주축선 부근의 층후는 측부에 비하여 극단적으로 두껍게 나타나기 때문에 2차원의 경우 주축선을 연장하여 해석하기 때문에 이동토사의 양이 크게 산출된다. 따라서 2차원안정해석에서는 활동력이 과다하게 평가된다.

결 론

2차원안정해석법에서 행해지고 있는 해석의 정밀도는 단지 해석모델의 정밀도에 불과하며 사면활동 구조를 충분히 반영한 해석 정밀도는 아니다. 그리고 비대칭 활동면, 말단 개방형, 말단 폐쇄형과 같은 해석 모델상의 특징들은 모두 무시되고 있다.

현재 행해지고 있는 2차원안정해석결과와 같은 정도의 해석결과를 얻는데 필요한 3차원 해석을 위한 지질조사는 그다지 많은 양을 요구하지 않는다. 지표지질조사를 통하여 산사태의 분류를 실시하고, 대규모의 경우 항공사진 판독 등에 의하여 산사태 범위를 결정하며, 토괴의 중앙부 부근에 1개정도의 시추조사를 실시하면 2차원 해석결과와 동등이상의 해석결과를 얻을 수 있다.

최근 국내에서도 추가적인 조사 없이 3차원 사면안정성 평가를 수행하기에 충분한 정밀 지질조사를 수행하고 있고, 수치해석에 필요한 복잡한 과정이 컴퓨터의 활용에 힘입어 많이 단순화 되고 있어 3차원 사면안정해석의 적용환경이 조성되었다고 할 수 있다.

사면붕괴에 대한 보다 정밀하고 경제적인 보강대책

수립을 위하여 3차원 사면안정성 해석기법이 널리 보급되기를 기대하며, 현재 국내에서 수행중인 연구결과가 도출되면 발표할 예정으로 있다.

참고문헌

- Chen, R. and Chameau, J.L., 1983, Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes, *Geotechnique*, 33, 31-40.
- Chen, Z., Wang, X., Haberfield, C., Yin, J. and Wang, Y., 2001, A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, Part I: theory and methods, *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.*, 38, 369-378.
- Hovland, H. John, 1977, Three-dimensional slope stability analysis method, *J. Geotech. Engng. ASCE*, 103, GT9, 971-986.
- Hung, O., 1987, An extension of Bishops simplified method of slope stability analysis to three dimension, 37, 113-117.
- Kimura, T., Itou, T., 2003, Evaluation by three-dimensional slope stable analysis of tunnel digging in the landslide area, *日本地すべり学会研究発表会*, 181-184.
- Lam, L. and Fredlund, D.G., 1993, A general limit-equilibrium model for three-dimensional slope stability method in practice, *Can. Geotech. J.*, 30, 905-919.
- Ohta, H., Hayashi, Y., Kokugan, S., 2000, A study of three-dimensional analysis of slope stability(part 2), *日本地すべり学会研究発表会*, 59-60.
- Ohta, H. and Hayashi, Y., 1998, A study of three-dimensional analysis of slope stability (part 1), *日本地すべり学会研究発表会*, 441-444.
- 釜井俊孝 等, 2000, 都市域における地震時斜面災害のハザードマップ, *日本応用地質学会シンポジウム論文集*, *日本応用地質学会*
- 日本高速道路調査會, 1985, 地すべり地形の安定度評価に関する研究報告書, *일본고속도로조사회*.

투 고 일 2004년 4월 23일
심 사 일 2004년 4월 24일
심사완료일 2004년 5월 30일

서용석

충북대학교 지구환경과학과

361-763 충북 청주시 흥덕구 개신동 산48

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-276-9645

E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

윤운상

(주)넥스지오

137-060 서울시 서초구 방배동 938-7

유니온빌딩 8층

Tel: 02-522-6116

Fax: 02-584-6117

E-mail: gaia@nexgeo.com