

한계평형법을 이용한 3차원 사면안정해석

- 적용사례를 중심으로 -

서용석

충북대학교 지구환경과학과

백 용

한국건설기술연구원 지반연구부

김광식

충북대학교 지구환경과학과

이경미

충북대학교 지구환경과학과

1. 서 론

사면은 다양한 기하형상과 구성 물질로 이루어져 있으며, 지하수 및 지표수의 영향을 받고 있어 동일 사면공간내에서도 위치에 따라 물질의 분포와 강도 특성을 달리한다. 이에 따라 하중의 작용 및 응력집중 양상도 달라진다.

사면의 활동성에 대한 안정해석의 경우, 해석의 편의를 위해 기하형상을 단순화하여 활동영역을 지정하고, 구성 물질 및 활동면의 전단강도를 균일하다고 가정하여 해석하는 것이 일반적이다. 사면안정 해석법으로 자주 인용되고 있는 간편법이 그 예로써 2차원적인 해석으로 분류된다. 이러한 2차원적인 해석은 실제 활동면의 기하형상을 극단적으로 표현하고 있으므로 최소의 안전율을 입력 자료로 사용할 경우 대책공법의 물량산정시 과다해질 우려가 있다.

3차원적 사면안정해석은 보다 현장상황에 맞는 기하형상과 강도분포, 2차원에서 나타낼 수 없었던 지하수면의 평형관계를 적용할 수 있으므로 안정해석결과에서 차이를 보이게 된다(서용석, 윤운상, 2004; 서용석 외, 2004; Duncan, 1996; Stark, 1998).

본 연구는 3차원 사면안정해석 사례를 중심으로 3차원 해석의 필요성과 장점 및 해석방법을 기술하고, 최근 일본에서 활발히 연구되고 있는 한계평형법을 이용한 3차원 사면안정해석에 관한 몇 가지 연구 결과들에 대하여 소개하고 그 효용성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 2차원과 3차원 사면안정해석의 차이

활동하는 또는 활동가능성이 있는 사면의 안정성 해석은 기하형상과 구성 물질 및 강도특성의 단순화에서 출발한다. 이는 시간적·비용적면에서 사면의 모든 상황을 실제적으로 고려하여 반영하기 어렵기 때문이다.

2차원 사면안정해석은 사용의 편리성과 해석의 정밀성으로 쉽게 접근할 수 있는 반면, 가정된 기하형상에서 비롯된 왜곡으로 인해 입력 자료의 오차가 상당히 많이 발생할 수 있어 해석 결과에 대한 신뢰성이 다소 떨어진다고 볼 수 있다. 이러한 결과를 적용하여 설계된 사면의 대책공법 역시 불필요한 부분에 과다하게 시공되거나 필요한 부분에 시공되지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

3차원 해석 모델은 지형, 활동면, 지하수위면의 평형관계의 변화를 적절히 수용하므로 비대칭 활동면, 활동사면 말단부의 개방유·무, 활동면의 경계부(가장자리)에서의 형상변화 등 기하요소나 역해석에 산정되는 강도의 상대적인 반영을 포함하고 있어서 보다 현실적인 사면안정해석을 수행

할 수 있다.

다음 그림 1과 표 1은 2차원과 3차원 해석의 차이점을 나타내고 있다.

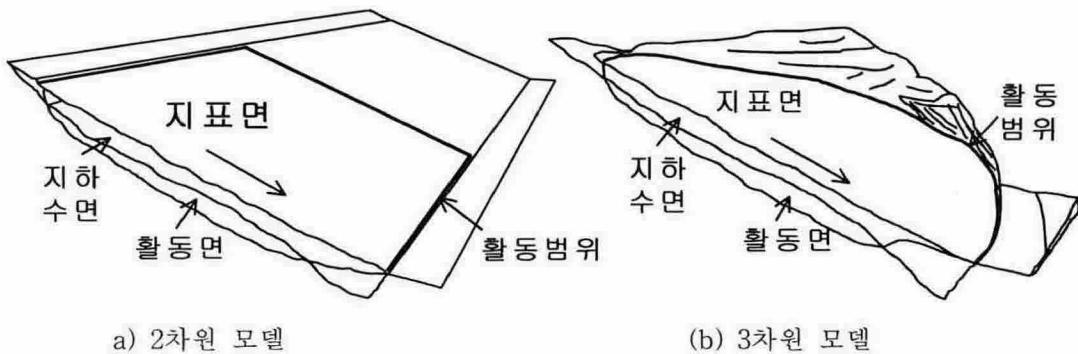


그림 1. 2차원과 3차원 사면안정해석시 이용되는 모델의 모식도.

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

항 목	2차원법	3차원법	설 명
블록의 범위 · 평면형	×	○	2차원에서는 활동 폭으로 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 계산정밀도	○	△	모델상의 정밀도는 입력 자료가 적은 2차원법이 우수하나, 2차원모델자체가 가지는 정보량이 적어 해석정밀도가 낮아짐

* ○: 고려, △: 약간고려, ×: 미고려

3. 3차원 사면안정 해석의 흐름

과거에 사면의 안정성을 해석함에 있어 가장 어려웠던 점은 해석에 사용되는 각종 면구조의 좌표를 구하는 작업과 같이 해석자체보다는 해석을 준비하는 단계에서 너무 많은 시간과 노력이 소요된다는 것이었다. 하지만 최근에는 3차원 사면안정해석의 모델을 CAD상에서 자동으로 작성할 수 있는 소프트웨어나 계산 양에 제약을 받지 않는 하드웨어적인 환경이 비약적으로 개선되어 짧은 시간 내에 안정해석을 수행할 수 있게 되었다.

3차원 사면안정해석의 과정에 대한 내용을 간략히 요약하면 다음과 같으며, 그림 2에 순서도로 나타내었다.

(1) 지형 데이터의 작성

지형데이터는 지형도로부터 일정 등고선간격으로 디지털화시켜 작성하고, 표고 속성을 가진 3차

원 데이터로 변환한다. 수치지형도가 있는 경우에는 변환기능을 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, 활동 면으로 구성되는 삼각주를 이용하여 해석을 수행한다.

(5) 안정계산 영역경계 조정

해석영역의 경계조건으로 항상 활동 면과 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 아래 식을 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.

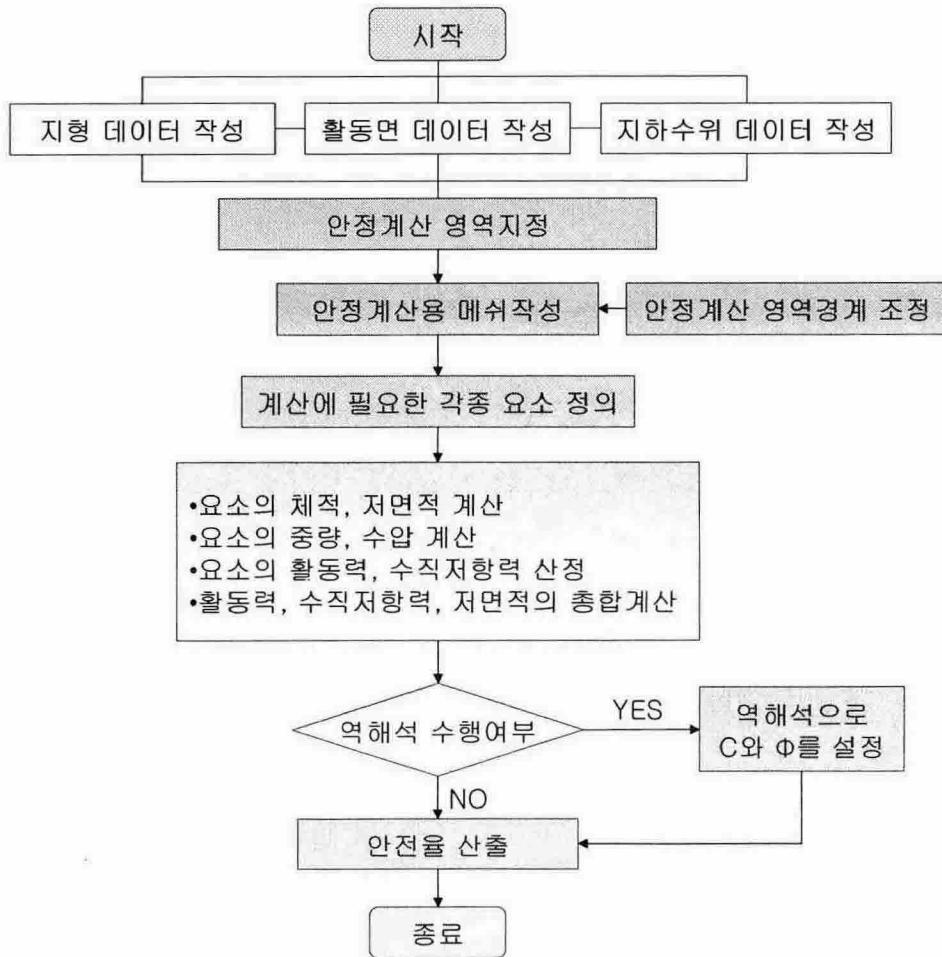


그림 2. 3차원 사면안정해석 흐름도.

4. 3차원 사면안정해석 사례분석

4.1. 건설비용 절감

2차원 사면안정해석에서는 주 단면에 대한 해석을 활동사면 전체에 적용하기 때문에 안전 쪽에 여유를 가진 대책 공사량의 견적이 산출되지만, 3차원 안정해석에서는 그 여유분을 안전성을 해치지 않는 범위 내에서 제거하는 것이 가능하다. 즉 필요억지력을 저감하는 것이 가능하며 결과적으로 대책비용의 삭감이 이루어 질 수 있다. 여기서 고려해야 할 사항은 3차원의 경우에는 2차원 보다 많은 현장조사 데이터 수를 필요로 하기 때문에 조사량이 증대되어 조사비용을 증가시킨다. 따라서 안정화 건설비용을 비교하기 위해서는 조사비용의 증가분과 대책비용의 감소분을 합하여 총 비용 개념으로 계산할 필요가 있다.

일본 건설성 토목연구소의 Sugimoto 등(2000)은 2차원 및 3차원 안정해석을 이용하여 대책공을 설계한 현장사례를 수집하여 보고서에 나타난 자료(활동형상, 조사수량, 대책공 수량, 안정해석 시의 요소)를 기초로 건설비용의 비교를 수행하였다. 조사의 비용은 2차원의 경우 주 측선 상의 조사수량만을 계상하였다.

그림 3은 조사된 20개의 사면현장에 대하여 2차원 안정해석에서 산출된 비용에 대한 3차원 안정해석에 의해 설계된 대책비용의 변화율을 나타낸 것이다. 20개 현장 중 16개 현장의 총 비용이

줄어든 것을 알 수 있다. 즉, 3차원 사면안정해석을 이용함에 따라 총 건설비용이 삭감된 것이다. 그림에서 비용절감이 큰 1-3번 사면은 도로 절토에 의하여 활동지반이 절단된 곳과 주 측선만이 하천이나 해안에 노출된 곳으로서 주 측선을 이용한 2차원 해석이 실제 조건과 차이가 큰 지역이었다. 조사비용은 대부분의 현장에서 큰 차이는 없었다. 3차원 해석을 위한 조사비용이 증가하더라도 전체 비용에서 차지하는 비중은 5%미만이므로 비용변화율에는 큰 영향을 미치지 않는다.

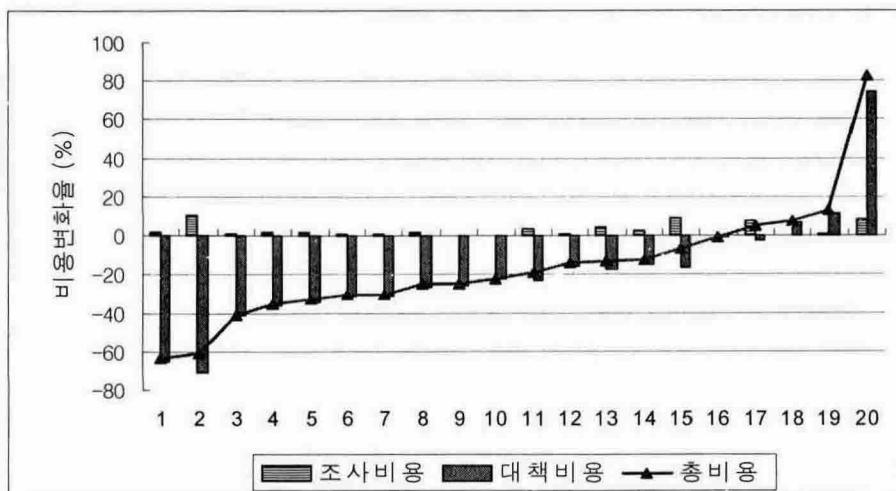


그림 3. 건설비용의 변화율.

Kimura 등(1999)은 주로 이암 및 사암의 호충으로 구성된 6개의 활동사면을 대상으로 3차원 해석을 실시한 결과를 보고하였다. 해석 대상 현장은 지반신축계를 이용한 계측으로 최대 75mm/일의 변동을 보이고 있으며, 주요 변동요인으로는 집중호우 또는 융설에 의한 지하수위 상승을 들고 있다. 2차원 해석결과에 비하여 3차원 해석결과에서는 계획안전율을 1.20으로 설정했을 때 필요억지력이 대체로 24%-54% 감소하는 것으로 나타났으며 (1개 현장의 경우 19% 증가한 경우도 있음), 앵커 대책공을 설치하는 데 필요한 건설비용은 3차원 해석결과를 채택할 경우 34-38% 삭감될 수 있는 것으로 나타났다.

4.2. Real-Time 3차원 안정해석

Noguchi 등(2000)은 과거 4회에 걸쳐 큰 활동이 있었고 현재는 대책이 완료되어 안정된 사면을 대상으로 “기록적 집중호우”에 의한 사면 붕괴에 대비하기 위하여 위기관리대책의 일환으로 실시간 안정도 평가방법을 발표하였다. 이들은 호우에 의한 사면 안정도의 저하를 그림 4와 같은 시나리오로 생각하였다.

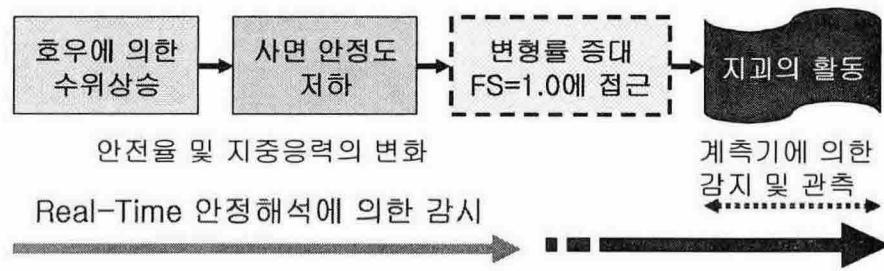


그림 4. 사면 안정도 저하에 따른 평가방법 시나리오.

활동사면에서 대체공이나 지반의 변형을 계측기로 인지하는 경우 계측기에서 변위가 감지될 때까지 사면의 안정도 변화를 파악할 수 없는 단점이 있다. 따라서 강우조건의 변화만을 고려하여 실시간 사면안정해석을 수행함으로서 계측에 의해 지반활동을 인지할 때까지의 상태를 추정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 또한 계측기기를 장시간 유지관리하기 위해서는 비용이 만만치 않으므로 3차원 Real-time 해석을 그 보조 또는 대체수단으로 고려하여 운용 중에 있다. 그림 5는 Real-time 3차원 사면안정해석의 흐름도를 나타낸다.

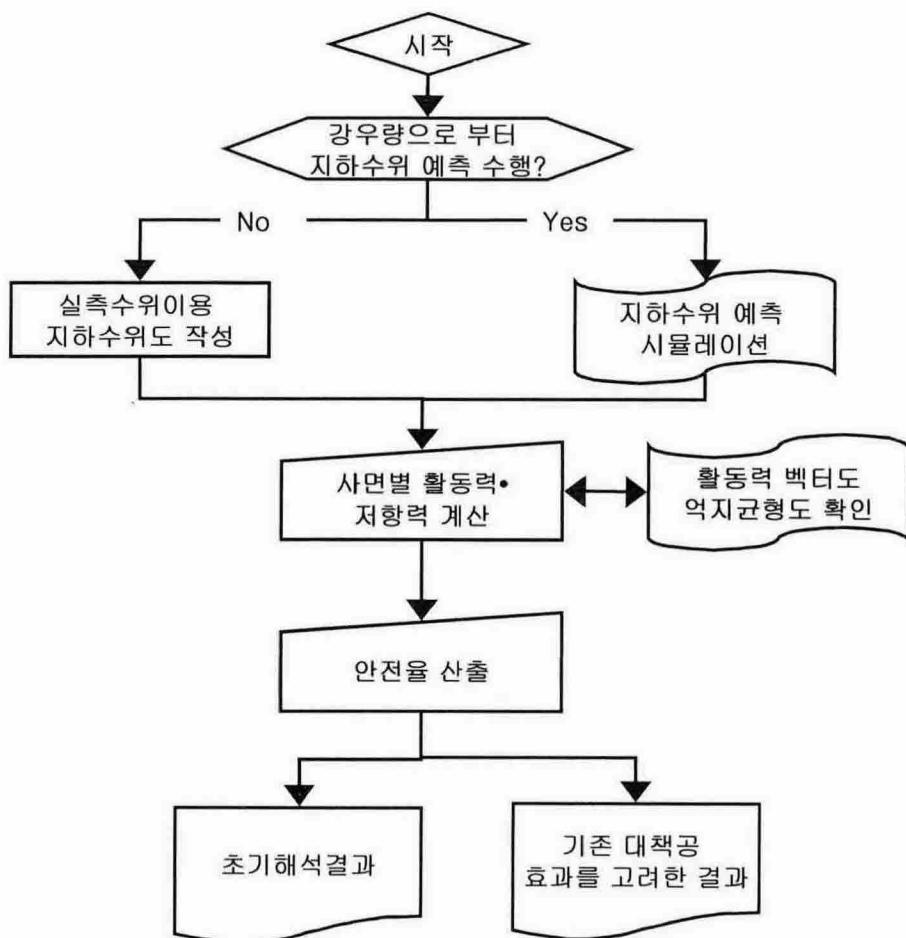


그림 5. Real-Time 3차원 안정해석 흐름도.

4.3. 대규모 산사태지역에서의 터널굴착

Kimura & Itou(2003)는 터널 쟁구부에서 약 150m 굴착지점까지 산사태의 영향권인 OO터널을 대상으로 터널굴착에 따른 대규모 산사태의 위험성에 대하여 3차원적인 안정성 해석검토를 수행하였다. 조사지역은 폭이 약 100m, 길이 약 130m, 최대 이동층후 약 25m로 조사되었으며, 화산쇄설암 및 이암, 역암의 호층으로 구성되어 있다. 시추결과 층후 10-25m의 연약층이 확인되었다. 그림 6은 당 현장의 단면도를 나타낸 것이다. 현장에서는 과거 큰 지반활동의 흔적이 존재하며, 지질학적으로도 깊은 심도까지 연약층이 분포하여 조사당시 지반의 변위는 관찰되지 않았으나 터널굴착에 의하여 지반의 재활동 가능성이 매우 높은 것으로 판단되었다. 따라서 2차원 및 3차원 안정해석을 수행하였으며, 그 해석결과를 비교하면 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, 3차원 해석의 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 상대적으로 두껍게 나타나기 때문에 2차원의 경우 주축선을 연장하여 해석함으로써 이동토사의 양이 크게 산출된다. 따라서 2차원 안정해석에서는 활동력이 과다하게 평가된다.

이와 같이 규모가 크고 지형적으로 기복이 심한 지역에서의 터널굴착에 따른 사면활동은 3차원 안정해석을 이용할 경우 매우 경제적이고 정확한 해석을 기대할 수 있다. 하지만 국부적 연약대에서 활동이 시작되고 이것이 점차 확대되어 나가는 경우에는 2차원 해석이 보다 현실적으로 적용될 수도 있다.

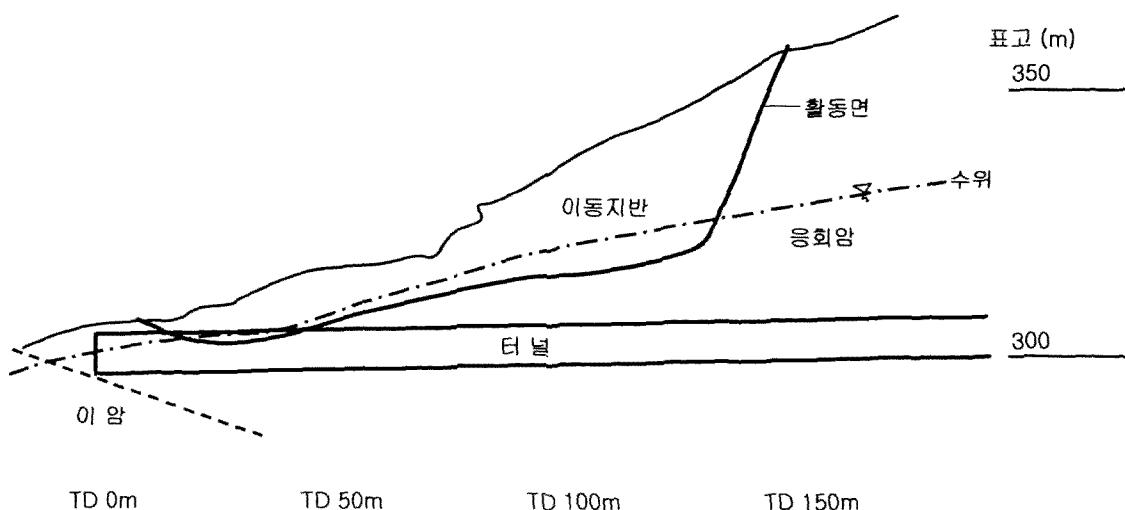


그림 6. 터널굴착에 의한 사면활동지의 단면도 예.

5. 결 론

(1) 3차원 사면안정해석은 해석의 정밀도 면에서 기존의 2차원 안정해석에 비하여 떨어진다는 지적이 있다. 하지만 2차원 해석의 정밀도는 단순한 해석모델을 사용하기 때문에 얻을 수 있는 정밀도에 지나지 않으며, 실제 현장의 해석정밀도 면에서는 3차원의 경우가 훨씬 우수할 수 있다.

(2) 3차원 사면안정해석을 수행하기 위해서는 보다 많은 양의 지질/지반조사가 필요한 것은 사실이다. 하지만 현재 국내에서 수행되고 있는 지질/지반조사가 상당히 우수한 수준에 도달해 있어 추가조사가 그다지 많지는 않으며, 앞에서 언급한 사례연구를 통해서 보더라도 지반조사의 추가비용은 크지 않으며 오히려 3차원 해석결과를 반영한 대책공 설계를 통하여 절감되는 비용이 훨씬 크다.

(3) 3차원 사면안정해석은 복잡한 지형, 전단강도 및 간접수압 조건을 가지는 사면의 안정해석에 큰 장점을 가지고 있으며, 도로선형 설계시 다양한 절취형태에 대한 안정성 해석에도 크게 활용될 것으로 기대된다. 또한 국부적 응력 분포상태를 정확히 파악할 수 있으므로 경제적이고 합리적인 대책공 설계에도 기여할 것으로 판단된다.

(4) 앞으로 국내에서도 3차원 사면안정해석이 많이 활용되어 보다 경제적이고 합리적인 대책공 설계에 크게 기여할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- 서용석, 윤운상, 2004, 3차원 사면안정해석에 관한 소고, 지질공학, 14, 2, 235-241.
서용석, 太田英將, 채병곤, 윤운상, 2004, 3차원 사면안정해석을 이용한 활동지괴 가장자리부의 전 단저항에 관한 연구, 지질공학, 14, 4, 451-460.
Duncan, J. M., 1996, State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slopes, J. Geotech. Engng., 122, 7, 577-596.
Kimura, T., Itou, T., 2003, Evaluation by three-dimensional slope stable analysis of tunnel digging in the landslide area, 日本地すべり學會研究發表會, 181-184.
Kimura, T., K. Kobori, K. Kawaba, 1999, The use of three-dimensional analysis of slope stability and reduction of construction cost in the large-scale landslide area, 日本地すべり學會研究發表會, 275-278.
Noguchi, T., T. Sakai, T. Ohnishi, 2000, Real-time three dimensional slope stability analysis, 日本地すべり學會研究發表會, 63-66.
Ohta, H., Hayashi, Y., Kokugan, S., 2000, A study of three-dimensional analysis of slope stability(part 2), 日本地すべり學會研究發表會, 59-60.
Stark, T., Eid., H, 1998, Performance of three-dimensional slope stability methods in practice, J. of Geotech. and Geoenvirons. Engng, 124, 11, 1049-1060.
Sugimoto, H., R. Tsunaki, 2000, Two-dimensional stability analysis and three-dimensional stability analysis in the countermeasure of landslide, 日本地すべり學會研究發表會, 325-328.