

## 강원도 태백지역의 붕적층 절토사면의 변형특성

### Deformation Characteristics of Cut-Slope Composed of Colluvial Soil in Tae Baek Area

김 경열<sup>1)</sup>, Kyoung-Yul Kim, 이 대수<sup>2)</sup>, Dae-Soo Lee, 홍 성연<sup>3)</sup>, Sung-Yun, Hong

<sup>1)</sup>한전 전력연구원 선임보안연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

<sup>2)</sup>한전 전력연구원 책임연구원, P.M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

<sup>3)</sup>한전 전력연구원 일반연구원, M.T.S, Korea Electric Power Research Institute

**SYNOPSIS** : Colluvial soil has a very unique deformation property, particularly when it is subject to the cutting work entailed in a variety of construction. In this study, the cut slope lying on a colluvial layer in which the transmission tower had been installed were investigated to find out the cause of deformation. In-situ tests such as boring, surface-wave analysis (MASW) were employed to look into the physical composition of underground layers and FEM including LEM were carried out to simulate the construction steps. The result shows that the stress relaxation followed by road construction induced the deformation of the slope and damage in the foundation of the transmission tower.

**Key words** : MASW, FEM, LEM, landslide, cut-slope

## 1. 서 론

우리나라는 전 국토의 70%가 산악지로 구성되어 있으며 그 중 대부분이 강원도와 경상북도지역에 분포하고 있다. 최근 들어 국토의 효율적인 이용과 관광자원개발차원에서 산악지를 개간하여 위락시설을 만들거나 사회간접자본시설 확충의 일환으로 산악도로를 개설하는 곳이 많아지고 있으며, 특히 산악도로공사로 인해 필수적으로 조성되는 절개사면에서 계절적인 영향과 지반 특성으로 사면붕괴가 자주 발생하고 있다. 강원지역은 산세가 높고 험난하여 여름철 집중호우와 이른 봄의 해빙기에 계절적인 영향으로 인한 산사태의 발생이 자주 목격되고 있는 지역이기도 하다. 강원지역의 사면붕괴 이력을 연구한 결과를 보면 붕괴가 발생한 지역 대부분이 도로시설 및 토목구조물 설치를 위해 절토사면을 조성한 지역에서 발생한 것으로 보고되고 있어(이승호외, 2002), 이 지역에서의 사면절개는 그 시행에 앞서 세밀한 조사와 설계가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 지방도로 확장을 위해 사면 절토공사를 수행하던중 사면변형과 철탑구조물 손상이 발생한 절토사면을 대상으로 현장물리탐사, 실내시험 및 전산해석을 실시하여 대상 사면의 변형특성을 분석하였다. 대상 사면의 토층별 형질을 파악하기 위하여 표면파탐사와 실내 물성실험을 수행한 결과 해당 사면의 표층은 붕적층으로 밝혀졌으며, 대상 사면 상부에 위치한 철탑하중이 사면변형과 안전율의 변화에 미친 영향을 파악하기 위하여 유한요소해석과 한계평형해석을 실시하였다. 이를 바탕으로 절토사면에 발생한 지반변형의 원인 규명과 붕적토의 거동특성을 분석하였다.

## 2. 현장조사 및 지반 특성

### 2.1 현 황

본 연구대상 현장은 행정구역상 강원도 태백시 일원에 위치하고 있으며, 태백-영월간 31번 지방도로가 본 현장과 인접하여 있다. 대상 사면의 규모는 약 43.0 m의 높이에 총 7~8개의 소단으로 구성된 대 절토사면(구

배 1:1.2)이며, 사면 정상부에는 현재 지반변형에 따른 추가붕괴 및 계통의 보호를 위해 송전선로 이설을 마친 상태의 154kV급 철탑구조물 1기가 위치하고 있다. 철탑을 기준으로 북쪽 및 북서쪽 지반은 31번 지방도에 인접한 절토사면 지역이며, 남쪽 및 남동쪽지역은 EL. 950m의 산악지로 형성되어 있다. 현재 철탑이 위치한 대 절토사면 일부 지역에서는 사면활동 징후가 나타나 사면붕괴 방지를 위해 사면 아랫부분 2개소단에 걸쳐 압성토를 해놓은 상태이며, 대상 사면의 지형도 및 전경을 그림 1과 그림 2에 나타내었다.

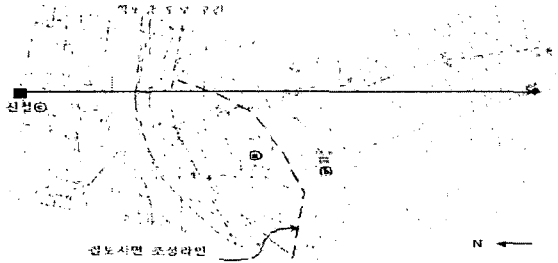


그림 1. 절토사면 주변 지형도

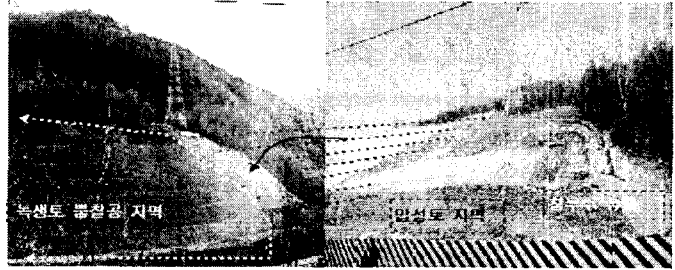


그림 2. 절토사면 및 154kV급 철탑구조물 전경

## 2.2 현장 조사 및 토질 특성

### 2.2.1 현장 조사

절토사면에 발생한 지반변형을 조사하기 위하여 총 3차례에 걸쳐 현장조사를 실시하였고, 대상 사면의 토층별 형질을 파악하기 위하여 표면파탐사를 수행하였다. 그림 3은 대상 절토사면의 평면도로써 절토사면 정상선단부에서 약 10m 안쪽에 철탑구조물 기초가 위치하고 있으며, 라인 A와 B는 표면파탐사를 수행하였던 측정라인이다. 본 절토사면은 4차선 도로 확포장공사를 수행하기 위하여 조성된 것으로써, 그 길이는 약 260m 정도이며, 그 중 약 230m지역은 녹생토 뽐칠공이 완료된 상태이다. 사면내 분포하는 토질의 종류는 자갈섞인 모래질 흙과 실트질 점토성분이 혼합되어 있는 토층으로 나타났으며 절토사면 하부지역 4번째 소단에서는 소량의 침투수가 유출되고 있는 현상도 목격되고 있다(그림 4). 사면 상부 철탑기초 사이로는 폭 30cm정도의 균열선이 보이고 있으며, '그림 3의 ㉔' 지역에서는 최대 1.0m정도의 단차가 보이고 있다. 또한 표면파탐사가 수행된 라인 B지역에서는 절토사면의 변형에 따른 소단내 수평배수구가 도로쪽으로 밀린 상태를 보여주고 있다(그림 5). 철탑구조물이 위치한 곳으로부터 동쪽으로 약 80m지점(그림 3의 ㉓, ㉔)에서는 녹생토뽐칠공이 완료된 사면상부에 특별한 외부하중이 없음에도 불구하고 절토부 상부지역에서 인장균열 및 활동(Sliding)의 징후가 보이고 있다(그림 6).

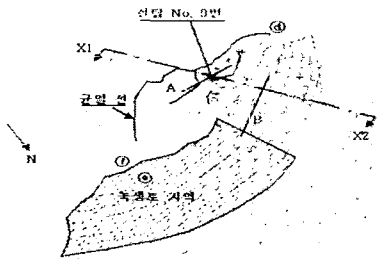


그림 3. 절토사면 평면도

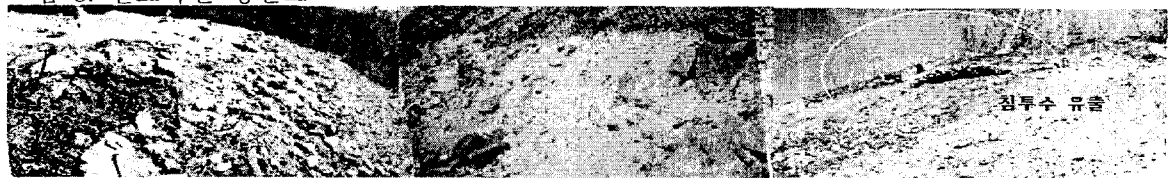


그림 4. 절토사면(상부, 중앙부, 하부)내에 분포하는 토질

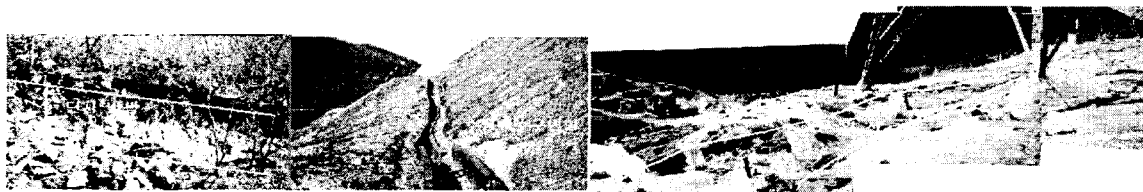
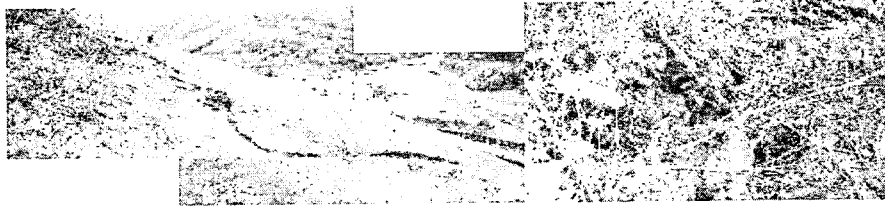


그림 5. 지반변형 현황



㉔지역

㉕지역

그림 6. 녹생토 뺀채널공이 완료된 사면의 변형 및 사면 상부 침하

### 2.2.2 표면파탐사(Multi-Channel Analysis of Surface Waves)

대상 사면의 토층별 형질과 전산해석에 사용될 지반형상을 확인하기 위하여 철탍이 위치한 사면을 대상으로 ‘그림 3’에서 보는 바와 같이 사면 상부(EL. 715m) 및 중앙 소단(EL. 700m) 등 2개소에서 표면파탐사를 실시하였다(유원지질, 2002). 탐사 결과 나타난 사면의 지층구조는 상부에 약 5~8m 두께로 붕적층이 존재하고 있으며, 그 아래로 6~12m 두께의 풍화암층이, 그 아래엔 연암층이 존재하는 것으로 확인되었다(그림 7, 표 1). 더불어 사면내 붕적층의 지반물성치를 확인하기 위하여 현장에서 방사능밀도(RI)측정기를 이용하여 현장 단위중량을 측정하였으며(그림 8), 현장에서 채취된 교란시료를 이용하여 직접전단실험을 실시하였다(표 2).

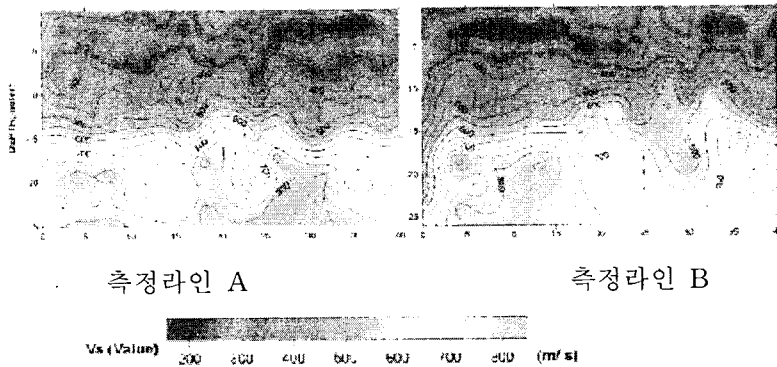


그림 7. 표면파탐사 측정결과

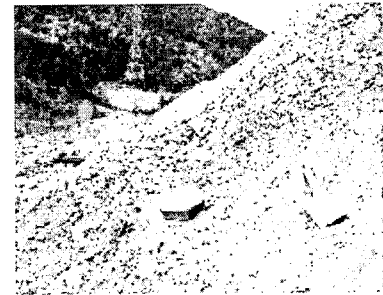


그림 8. 현장 단위중량 측정

표 1. 표면파탐사 측정결과

측정지역	측정라인 A (사면상부)	측정라인 B (중앙소단)
	심도 (m)	
붕적층	5~8	6~8
풍화암	13~15	12~20
연 암	13~15이상	12~20이상

표 2. 붕적층 지반물성치

전체 단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	내부 마찰각 (deg)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )
1.9	28.0	3.0

### 2.2.3 토질 특성

선형 시추자료 및 표면파탐사 측정결과 나타난 사면의 토질은 실트 섞인 모래, 자갈, 전석 및 세립질 모래가 함유된 붕적층으로 표준관입시험치(N값)가 대부분 16~50이상인 보통조밀이상의 지반으로 확인되었다. 붕적토란 산기슭에 퇴적된 흙이 온도변화와 동결융해의 반복작용으로 인해 사면내로 서서히 밀려 쌓이거나 풍화 등에 의해 약해진 절벽 등이 붕괴하여 인접지역에 쌓여 형성된 큰 투수성을 갖는 토질을 말하며 이것들이 쌓여 이루어진 층을 붕적층이라 한다.

붕적층은 원지반과의 경계부 상황이 매우 중요한 성질을 갖는데 그 이유는 붕적층의 생성과정이 풍화에 의해 계속 쌓인 전석과 풍화토로 형성되어 있어 절토시 입자끼리의 맞물림이 해제되어 슬라이딩 현상이 자주 발생하기 때문이며, 터널갱구부 등에서도 이러한 붕괴현상이 자주 목격되고 있다. 토질의 상태는 다짐이 잘 되지 않는 매립층과 비슷한 성질을 갖고 있으며, 특히 이동(활동)이 있었던 지역의 절토 및 성토는 매우 큰 위험성을 갖는 것으로 알려져 있다.

### 2.3 주요일정별 시공순서

본 절토사면에 발생되었던 주요일정별 시공순서가 사면의 안정성을 평가하는데 중요한 항목으로 판단되어 주요일정별 철타이설 경위 및 인근도로의 시공현황을 표 3에 나타내었다. 현재 절토사면 상부에 있는 철타구조물이 위치했던 최초의 위치는 절토공사가 수행되기 전인 '그림 1의 ㉠'지역이었으나, 도로확장을 위한 사면 절개를 위해 현재 위치인 '그림 1의 ㉡'지역으로 이설하게 되었으며, 철타이설이 완료된 후 사면구배 1:1.2의 법면 절토공사가 수행되었다.

표 3. 주요일정별 시공현황

시 공 현 황	주요일정	2000			2001												2002		
		10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	
지상철타이설을 위한 원인 발생	2000.11.04		■																
지상철타이설공사 시행	2001.04.20-06.18																		
도로확장을 위한 사면절토(1:1.2) 시행	2001.07-10																		
철타주변 침하 및 사면변형 발생 최초 확인	2001.11.10																		
철타 긴급이설 공사 시행	2001.11.30-12.20																		

### 3. 전산해석

철타이 위치한 절토사면의 지반 변형원인을 규명하기 위하여 유한요소해석을 주된 검토방법으로 이용하였으며, 철타하중의 유무에 따른 안전율의 변화를 분석하기 위하여 한계평형해석을 보조적 수단으로 이용하였다. 본 지반과 같이 복잡한 지형특성 및 시공순서에 따라 사면의 변형양상을 파악하여 절토사면의 변형원인을 규명해야 하는 곳에서는 시공단계별 응력-변형의 규명이 가능한 유한요소해석법이 필수적이다. 반면 한계평형 해석법은 파괴상태에서의 안전율만 보여주기 때문에 특정지점 및 시점에서의 변형의 크기, 방향, 발달상황을 보여줄 수 없는 제약이 뒤따르는 수법이다.

#### 3.1 지반 모델링 및 입력물성치

전산해석에 사용된 단면은 '그림 3'의 'X1~X2'라인을 주된 해석단면으로 이용하였으며, 표면과탐사(MASW)결과 나타난 지층형상을 이용하여 전산해석 모델링을 실시하였다(그림 9). 해석에 사용된 입력물성치 중 내부마찰각과 점착력은 불교란시료의 실내시험을 통하여 산정되는 것이 일반적이나, 본 토층은 전석이 혼재해 있는 관계로 불교란시료의 채취가 어려워 교란시료를 이용한 직접전단시험을 통해 산정되었으며, 단위중량은 RI측정기를 이용하여 현장에서 측정된 값을 사용하였다. 그 밖에 기타 입력물성치들은 문헌상의 대표값들을 가정하여 해석을 수행하였다(표 4). 사면 상단의 철타하중은 극한적인 해석의 수행을 위하여 사면 선단 부쪽에 가깝게 위치한 철타기초와 두 번째 기초에서 압축하중이 걸리는 것으로 가정하여 최대압축하중 108.5ton을 집중하중으로 상재하였다. 이때 지반굴착(약 5.0m)후 철타기초의 콘크리트 타설 및 잠석다짐의 효과를 고려하기 위해 하중이 작용하는 절점 부분의 일부 매쉬는 콘크리트 특성치를 사용하여 해석을 수행하였다.

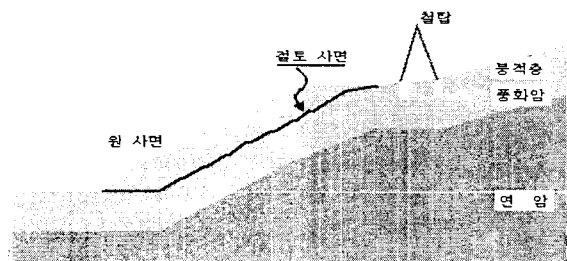


그림 9. 지층단면도 및 모델도

표 4. 입력물성치

구 분	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	포아송비 (ν)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (deg)	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )
붕적층	1,000	0.35	3.0	28.0	1.90
풍화암	10,000	0.30	5.0	28.0	2.20
연 암	50,000	0.30	10.0	32.0	2.30
콘크리트	2E+6	0.20	50.0	35.0	2.35

#### 3.2 유한요소 해석 및 결과 분석

복잡한 지형특성 및 시공순서에 따라 사면의 변형양상을 파악하여 절토사면의 변형원인을 규명하기 위해

유한요소해석 프로그램인 AFIMEX를 이용하여 탄소성해석(Mohr-Coulomb)을 수행하였다. 해석상 경계조건은 좌,우측은 수평방향 이동을 고정시키는 연직로울러로, 하단은 좌,우방향 모두를 고정시키는 고정단으로 설정하였다. 격자는 사각형격자를 주로 사용하였으며 시공순서별 사면의 거동해석을 수행하기 위하여 총 3단계의 단계별 해석(초기상태, 철탑건설, 사면굴착)을 실시하였다. 각 단계별 해석상태는 다음과 같다.

- ① 초기 상태 : 철탑 이설전의 원사면 지반
- ② 철탑 건설 : '그림 3의 X1~X2'단면에 철탑하중이 재하된 상태
- ③ 사면 굴착 : 철탑하중이 재하된 후 절토구배 1:1.2로 사면굴착을 완료한 상태

더불어, 사면굴착시 철탑하중이 지반변형에 어느 정도의 영향을 주는지를 확인하기 위하여 두 번째 단계 해석(철탑건설)을 제외한 2단계 해석(초기상태, 사면굴착)을 실시하고 선행 결과와 비교하였다.

### 3.2.1 3단계 해석 결과

해석결과 나타난 시공단계별 지반모델도와 변형도를 그림 10에 나타내었다. 그림 10의 '단계 2:철탑건설'의 변형도를 살펴보면 철탑건설에 따른 지반변위는 철탑기초 하부지역에서만 발생하는 것으로 나타났을 뿐, 그 이외의 지역에서는 변형이 발생하지 않는 것으로 나타나고 있다. '단계 3:사면굴착'의 변형도에서는 사면굴착에 따른 응력의 해방으로 사면전체가 왼쪽으로 쏠리며 변형이 크게 일어나고 있음을 보여주고 있다.

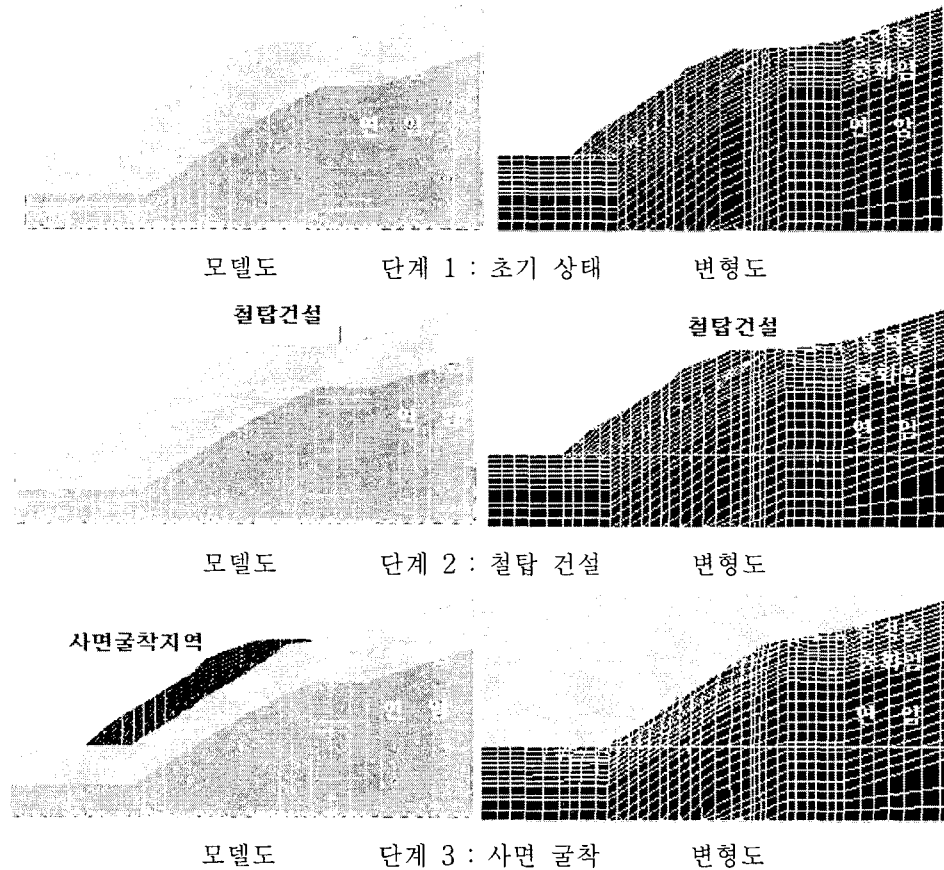


그림 10. 3단계별 지반모델도 및 변형도

시공단계별로 발생한 지반의 변위량을 파악하기 위하여 변위벡터도(총 변형량)와 수직 변위도를 그림 11에 나타내었으며, 단면내 3개지점 지표면(A:사면하부, B:사면중앙부, C:사면상부)에서 발생한 변형량의 크기를 표 5에 나타내었다. 철탑건설에 따른 지반변형은 철탑기초 하부지반에서만 약간의 변형이 발생하고 사면에서는 변형이 발생하지 않는 것으로 나타났으며, 철탑기초가 위치한 지표면(C지점)에서의 최대 침하량은 약 4.6cm로 계산되었다. 사면굴착에 따른 지반변형은 절토사면 전체가 좌측으로 이동하고, 붕적토와 풍화암과의 경계면을 따라 활동면이 형성되어 사면에 용기가 발생하는 것으로 나타났으며 이때 사면중앙부(B점)에서의 벡터변위량은 19.9cm로 계산되었다.

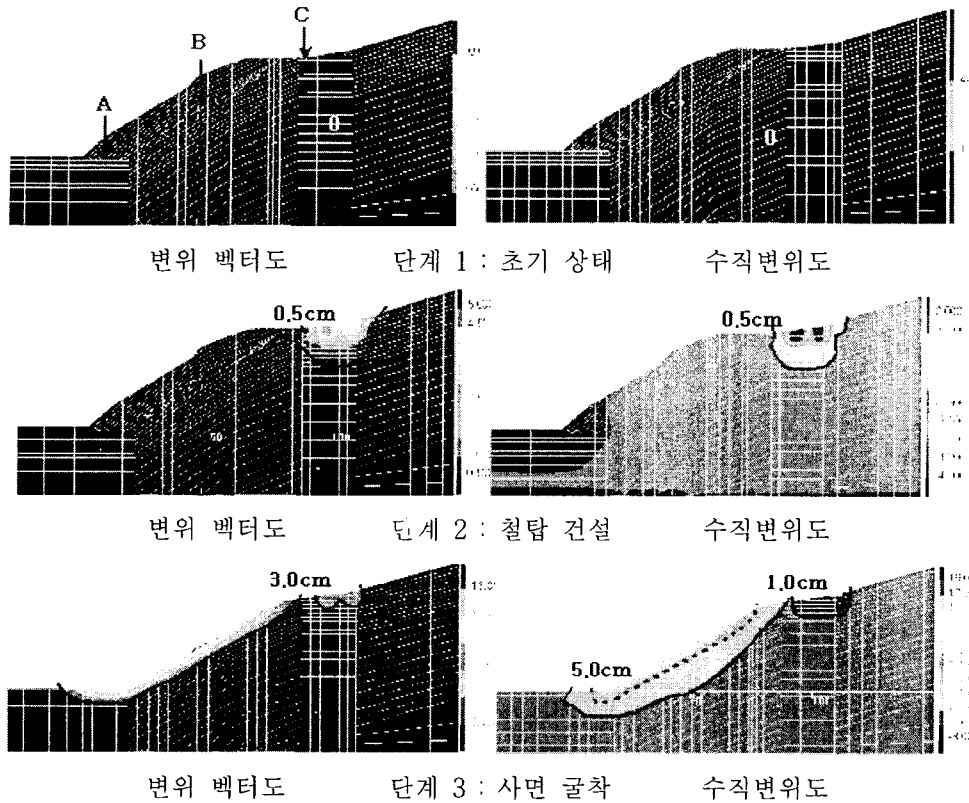
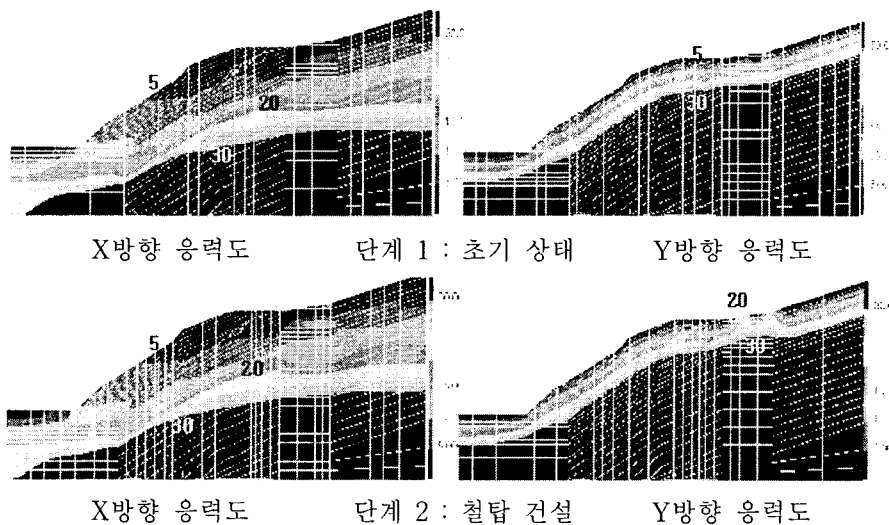


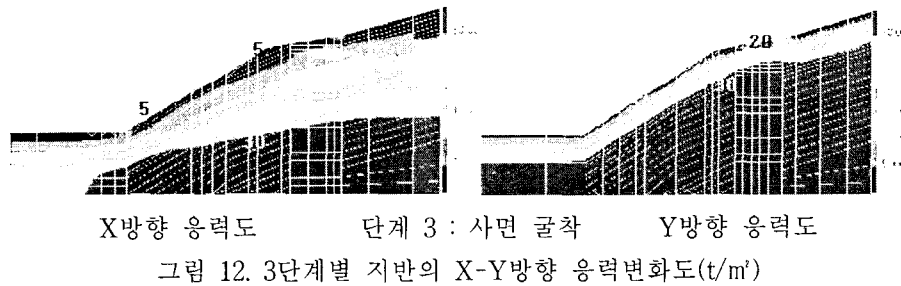
그림 11. 3단계별 지반의 변위벡터도 및 수직변위도(cm)

표 5. 시공단계별 벡터 및 수직 변위량 (cm)

구 분	벡터 변위량			수직변위량(-는 하향)		
	A	B	C	A	B	C
단계 1:초기 상태	0	0	0	0	0	0
단계 2:철탑 건설	0	0	4.6	0	0	-4.6
단계 3:사면 굴착	14.1	19.9	4.3	9.3	17.4	-4.3

시공단계별 지반의 응력변화를 확인하기 위해 X-Y(수평-수직)방향별 응력변화도를 그림 12에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 '단계 2:철탑건설'에 따른 응력의 변화는 사면 상부의 철탑기초가 들어서는 지점에서만 Y방향 응력의 증가가 다소 보이고 있을 뿐, 다른 지역에서의 응력증가는 보이지 않고 있다. 사면굴착에 따른 응력의 변화는 사면부와 사면하부지역에서 굴착에 따른 원인으로 응력의 크기가 작아지는 변화를 보이고 있는데, 이는 사면내 절토에 따른 응력의 해방으로 그 크기가 작아지고 있음을 보여주는 것이다.



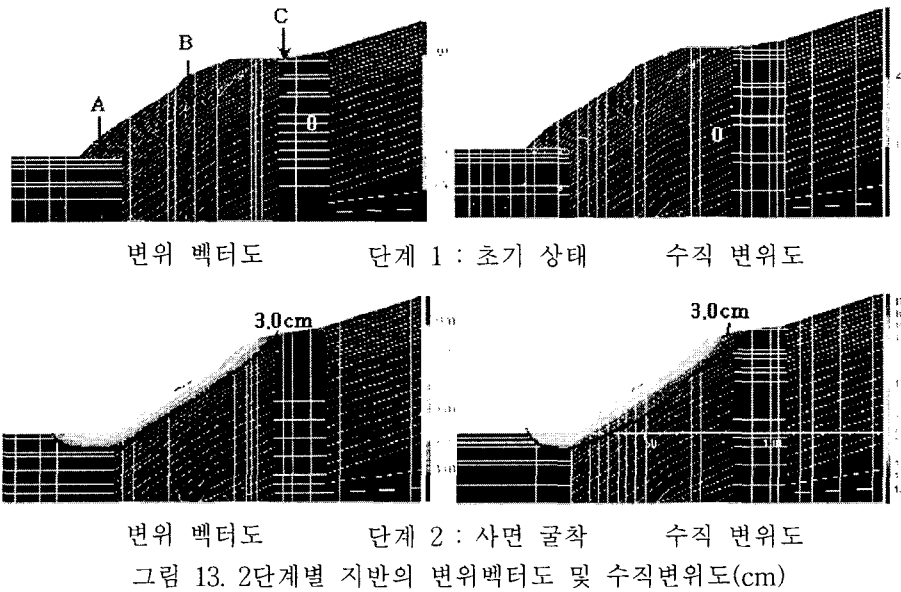


X방향 응력도      단계 3 : 사면 굴착      Y방향 응력도  
그림 12. 3단계별 지반의 X-Y방향 응력변화도(t/m<sup>2</sup>)

### 3.2.2 2단계 해석 결과 비교

철타하중이 사면굴착시 지반변형에 어느 정도의 원인으로 작용하는지를 확인하기 위하여 시공단계별 해석을 2단계(초기상태, 사면굴착)로 설정하여 동일한 방법으로 해석을 수행하였으며, 이 결과는 사면굴착이 지반 변형에 미치는 순수한 영향을 보여주게 된다. 철타하중 무시에 따른 지반의 변위량중 단면내 3개지점(A,B,C)에서 발생한 변위의 크기를 철타하중 고려(3단계 해석)에 따른 지반의 변위량과 비교하여 표 6에 나타내었다. 표 6에서 보는 바와 같이 철타하중을 고려한 경우와 무시한 경우 모두 사면내(A, B지점)에서 발생하는 수직 변형량의 크기에는 차이가 없으며, 단지 사면정상부(C지점)에서만 철타의 유무에 따른 약간의 변형만이 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 철타하중은 사면변형에 영향을 주지 않고 있음을 알 수 있다.

이 결과들을 종합해 볼 때, 절토사면에 나타난 지반변형의 주원인은 도로 확장공사를 위해 봉척층으로 구성된 사면을 굴착하던중 지반내에 상호 맞물려 있던 자갈, 전석들이 사면굴착에 따른 응력의 해방으로 조립자끼리의 엇물림이 해제되면서 사면에 변형이 발생된 것으로 판단된다.



변위 벡터도      단계 1 : 초기 상태      수직 변위도  
변위 벡터도      단계 2 : 사면 굴착      수직 변위도  
그림 13. 2단계별 지반의 변위벡터도 및 수직변위도(cm)

표 6. 시공단계별 수직 변위량 비교 (cm)

구 분		벡터 변위량			수직변위량(-는 하향)		
		A	B	C	A	B	C
철타하중 고려	단계 1:초기 상태	0	0	0	0	0	0
	단계 2:철타 건설	0	0	4.6	0	0	-4.6
	단계 3:사면 굴착	14.1	19.9	4.3	9.3	17.4	-4.3
철타하중 무시	단계 1:초기 상태	0	0	0	0	0	0
	단계 2:사면 굴착	14.1	19.9	1.0	9.3	17.4	0.4

※A:사면하부, B:사면중앙, C:사면상부

### 3.3 한계평형 해석

초기상태의 원사면에 철타이 건설됨으로서 사면의 안전율이 얼마만한 영향을 받았는지를 확인하기 위하여 한계평형해석을 실시하여 보조적인 판단수단으로 활용하였다. 해석에 사용된 지층단면 및 토질정수들은 유한요소 해석에서 사용된 동일한 값들을 적용하였으며, 원사면에 철타이 건설됨에 따른 안전율의 변화를 확인하기 위하여 2가지(초기상태 및 철타이건설) 조건으로 해석을 실시하였다.

초기상태에서의 한계평형 해석결과와 철타이하중을 재하한 후의 해석결과를 그림 14에 나타내었으며, 각각의 안전율(1.310, 1.309) 및 활동원의 형상에는 아무런 변화가 없는 것으로 나타났다. 이처럼 원사면에서의 안전율 및 활동원과 철타이하중을 재하한 후의 안전율 및 활동원에 아무런 변화가 없는 것을 고려해 볼 때, 철타이건설에 따른 철타이하중이 사면의 활동안전성에 미치는 영향은 없음을 알 수 있다.

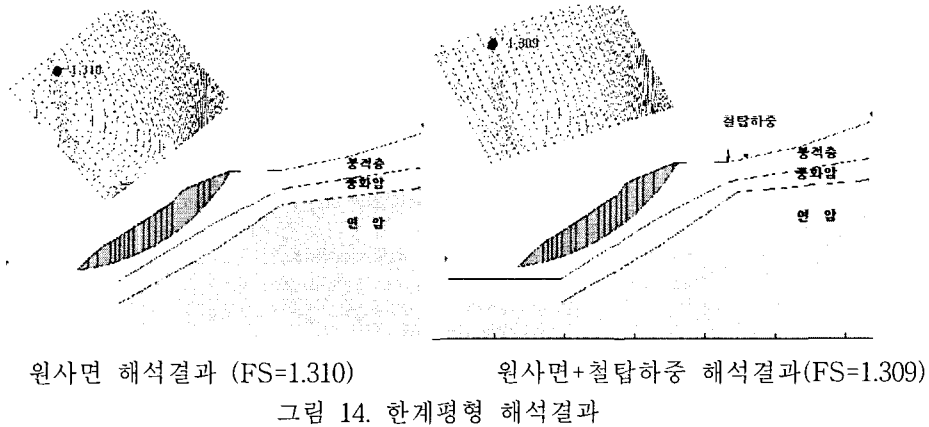


그림 14. 한계평형 해석결과

## 4. 결론

도로확장공사를 위해 절토사면을 조성하던중 발생한 지반변형과 철타이하중이 지반변형에 미치는 영향을 규명하기 위해 현장조사, 유한요소해석 및 한계평형해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 현장조사 및 표면파탐사(MASW) 결과, 철타이 위치한 절토사면의 표층을 구성하고 있는 토질은 자갈 및 전석이 섞인 실트질 모래층(붕적층)으로 확인되었으며, 상부에 있는 붕적층의 두께는 약 5~8m이며, 그 아래로 6~12m 두께의 풍화암층이, 그 아래엔 연암층이 존재하는 것으로 확인되었다
- 2) 유한요소해석 결과 나타난 지반변형의 주원인은 도로 확장공사를 위해 붕적층으로 구성된 사면을 굴착하던중 지반내에 상호 맞물려 있던 자갈, 전석들이 사면굴착에 따른 응력의 해방으로 조립자끼리의 엇물림이 해제되면서 사면에 변형이 발생된 것으로 나타났으며, 철타이하중이 지반변형에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었다.
- 3) 한계평형 해석결과 철타이하중의 유무에 따른 사면의 안전율에 변화가 없는 것을 볼 때, 철타이하중이 사면의 활동안전성에 미치는 영향은 없음을 알 수 있다.
- 4) 육안조사에서 확인된 사면내 수평배수구의 측방유동과 철타이 기초가 위치한 사면 상부의 균열 및 지반 침하경향도 전산해석결과와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 본 지반이 갖고 있는 붕적토의 공학적 특성과도 잘 일치하고 있는 것이 확인되었으며, 붕적층으로 구성된 사면의 굴착은 그 시행에 앞서 세밀한 조사와 설계가 선행되어야 함을 알 수 있다.

## 참고 문헌

1. 유병화외(2002), "표면파탐사 및 시험보고서", 유원지질
2. 이승호외(2002), "강원도 산악도로 절개사면의 파괴특성 분류에 관한 연구", 한국지반공학회 2002 사면학술 발표회 논문집