대절토사면의 현장계측 및 수치해석을 통한 사면 안정성 분석 사례

Stability Analysis of Large Slope Based on In-Situ Monitoring and Numerical Analysis

김병철[1] Kim, Byung-Chul, 황지훈[1] Hwang Ji-Hoon, 원지현[1] Won, Ji-Hyun
최문규[1] Choi, Mun-Kyu, 권오성[2], Kwon, Oh-Sung, 송치용[2] Song, Chi-Yong

[1] 대림산업(주) 기술연구소 연구원, Researcher, Daelim Industrial Co., Tech. Research Institute
[2] 대림산업(주) 기술연구소 대리, Assistant Manager, Daelim Industrial Co., Tech. Research Institute
[3] 대림산업(주) 기술연구소 과장, Manager, Daelim Industrial Co., Tech. Research Institute

SYNOPSIS : 본 연구대상 사면은 연장이 300m이고, 최대 사면높이가 80m에 달하는 대절토 사면으로서 총 11 소단으로 이루어져 있으며, 전 사면에 걸쳐 Soil Nail공법으로 보강이 되어있다. 사면 상단부에 설치된 2개의 경사계를 이용하여 주기적으로 사면의 수평방향 변위 계측을 실시하던 중, 사면 하부의 소단 굴착과정에서 상대적으로 급격한 사면경사 방향의 수평변위가 발생한 것을 확인하였다. 본 연구에서는 사면의 수평방향 변위 계측결과 분석 및 대상 사면에 대한 수치해석을 통하여 사면의 안정성 여부를 판단하고자 하였으며, 굴착단계별 수평방향 변위량 및 변위 양상을 분석함으로써 급격히 증가한 변위의 원인을 파악하였다. 수치해석을 통해 나타난 사면 굴착 단계에 따른 사면 토체의 소성영역을 도시한 결과, 사면 전체에 걸쳐 대규모 파괴면이 나타났으며 파괴활동면이 Soil Nail로 보강된 영역의 바깥쪽에 위치하여 사면 안정성 확보를 위한 대책방안이 수립되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 보다 자세한 원인 규명을 위한 확인 시추조사를 실시하여 하부 지층 특성을 파악하였으며, 하부에 풍화가 심하고 절리 및 균열이 심한 파쇄구간이 분포하고 있음이 확인되었다. 연구 대상 사면의 변위 계측 결과, 수치해석 결과, 확인 시추 조사 결과 및 예상되는 사면 활동의 규모 등을 고려할 때 사면의 안정성 확보를 위한 대책방안이 수립되어야 하며, 본 사면은 억지말뚝과 Ahchor공법 적용이 가장 적절할 것으로 판단되었다.

Key words : Large Slope, Soil Nailing, In-Situ Monitoring, Numerical Analysis, Slope Reinforcement

1. 서 론

본 연구 대상 사면은 OO도로 확·포장공사 중 조성되는 사면으로 연장이 300m이고, 최대 사면높이가 80m에 달하는 대절토 사면이다. 총 11개의 소단으로 이루어져 있으며, 전 사면에 걸쳐 Soil Nail공법으로 보강이 되어있다. 제 3단 소단 2개소에 지중경사계를 설치하여 주기적으로 사면의 수평방향 변위 계측을 실시하던 중, 제 10 ~ 11 소단 굴착과정에서 경사계에 20 ~ 60mm의 수평방향 변위가 급격히 증가하는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 사면의 수평방향 변위 계측결과 분석 및 대상 사면에 대한 수치해석을 통하여 사면의 안정성 여부를 판단하며, 굴착단계별 수평방향 변위량 및 변위 양상을 분석함으로써 급격히 증가한 변위의 원인을 파악하고자 한다. 보다 자세한 원인 규명을 위한 확인 시추조사를 실시하여 하부 지층 특성을 파악하였으며 실제 수평방향 변위 계측결과와의 비교·분석을 통해 본 사면에 적합한 사면보강공법을 제시하고자 한다.

2. 사면 변위 계측 및 결과 분석

2.1 계측기 설치 위치 및 단계별 사면 굴착

사면 상부 총 2개소에 30m 깊이로 경사계를 설치하여 계측을 진행하였으며 제 4 단 굴착단계부터 계측을 시작하였다. 경사계 사이의 간격은 60m이며 계측기 설치 위치는 아래의 그림 1, 2와 같다.

본 사면은 최대 높이가 약 80m인 대절토 사면으로 5m 높이마다 소단을 두어 총 11 단계에 걸쳐 사면을 굴착하였으며, 2003년 말부터 사면 굴착을 시작하여 2004년 11월 제 11 소단 굴착을 완료하였다. 단계별 사면 굴착 진행 상황은 그림 3과 같다.

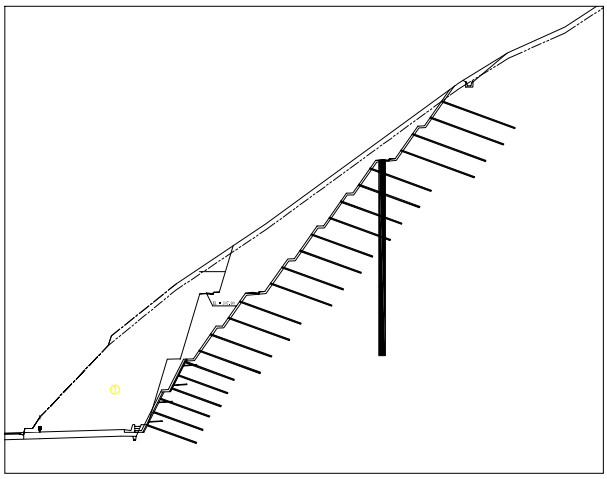

그림 1. 제 1 경사계 위치(STA.3+400)

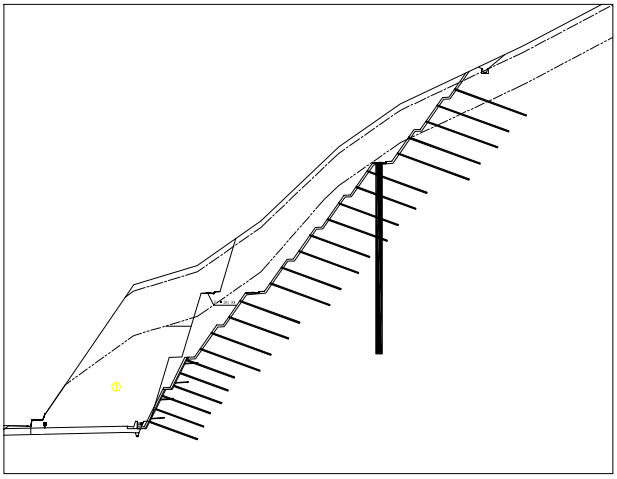

그림 2. 제 2 경사계 위치(STA.3+460)

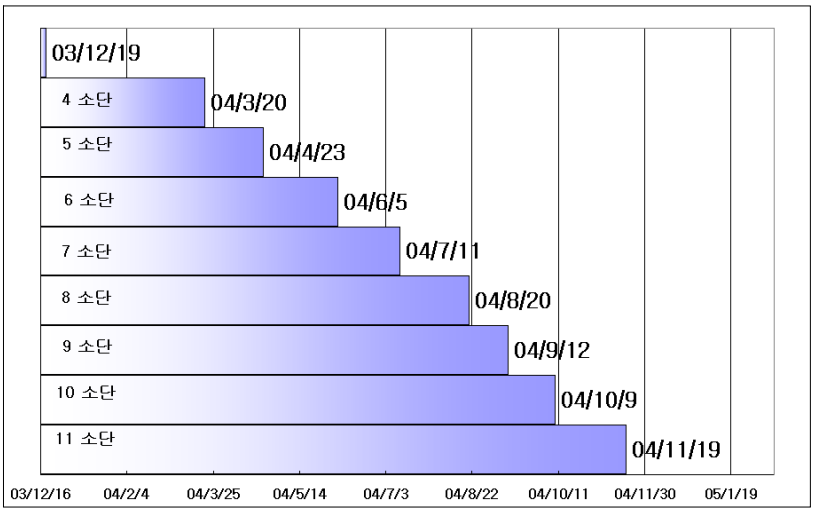

그림 3. 단계별 사면 굴착 현황

2.2 계측 결과 분석

2.2.1 제 1 경사계 계측 결과 분석

그림 4에서 보는 바와 같이 2004-11-02 까지의 계측 결과를 살펴보면 굴착단계에 따라 변위가 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 대부분의 변위는 2004-11-02 ~ 2004-11-23 (11소단 굴착)사이에 발생하

여 이 기간 동안 25 ~ 60mm의 변위가 발생하였으며, 이후 동절기를 겪는 동안 약 10mm의 변위가 추가적으로 발생하였다. 전반적인 변위형상을 살펴보면, 5 ~ 10m 깊이에서 갑작스럽게 큰 변위가 유발되었으며, 그 외 다른 위치에서는 최하단부로부터 점진적으로 변위가 증가하는 경향을 보였다.

2.2.2 제 2 경사계 계측 결과 분석

2004년 6월까지는 큰 변위가 발생하지 않았으나, 이후 2004년 10월 까지(7~10소단 굴착) 굴착단계에 따라 변위가 증가하고 있음을 알 수 있었다(그림 4). 이후 2004-11-02 ~ 2004-11-23 사이에(11소단 굴착) 45mm 내외의 변위가 발생하였으며, 이후 동절기를 겪는 동안 약 20mm의 변위가 추가적으로 발생하였다. 27m 깊이 이하에서는 변위가 거의 발생하지 않았으며, 25 ~ 27m 깊이에서 변위가 급증하였다. 15 ~ 25m 깊이까지는 점진적으로 증가하며, 그 이상 깊이에서는 거의 비슷한 변위량을 보였다.

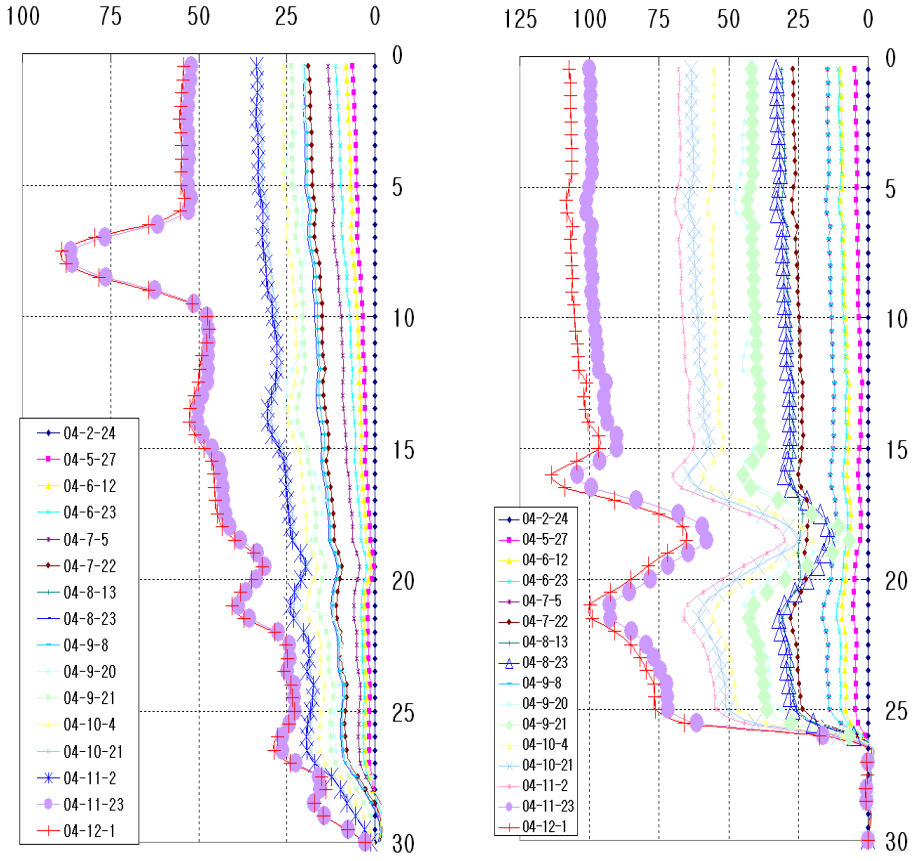

그림 4. 시간별 발생 변위 계측 결과 제 1 경사계(좌), 제 2 경사계(우)

수평 변위가 급격히 증가하기 이전 단계에서는 우기(7 ~ 8월)를 거치면서 강우의 영향으로 수평 변위가 증가하였다고 생각할 수 있다. 그러나, 11월에 급격히 발생한 변위의 경우 굴착시기가 강우의 영향이 크지 않은 때이며 변위 증가량이 상대적으로 큰 것을 고려할 때, 그 원인은 굴착으로 인한 응력해방 및 이로 인한 수평 방향 변위 발생, 절취사면 하단부 굴착으로 인한 전체 사면의 활동 발생 때문인 것으로 판단되었다.

3. 수치해석 프로그램을 이용한 사면 안정 해석

본 사면은 수평방향 변위 계측을 통하여 사면활동 여부 및 예측이 가능하나 계측된 변위량만을 이용하여 사면의 안정성 여부를 판단하기는 어려우며, 수평변위 계측만으로는 신뢰성 높은 판단의 기준을 마련할 수 없다. 또한 사면의 안전성을 예측하는 방법으로 한계평형 해석방법을 일반적으로 이용하나 한계평형 해석법으로는 굴착단계별 사면활동의 양상을 파악하는 것이 불가능하며, 가상 활동 토체의 전반적인 안전율의 도출만이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 해석 대상의 변위와 함께 사면을 구성하는 각 요소별 파괴여부를 파악할 수 있는 수치해석적 방법을 이용하여 변위발생의 원인파악 및 사면의 안정성을 평가해 보고자 하였다. 이를 위해 유한차분법(FDM)을 이용한 지반 범용해석 프로그램인 FLAC 2D(Ver. 5.0)를 이용하여 사면에 대한 해석을 수행하였으며 사면의 굴착 단계별 사면내 소성영역 및 변위양상의 분석을 통해 각 단계별 사면의 거동을 분석하였다.

3.1 모델링 및 지반물성

해석단면은 아래 그림 5에서 보는 바와 같이 원지반을 굴착하면서 지반을 보강하는 단계를 모사할 수 있도록 모델링하였다. 「00도로 확·포장공사 사면안정대책 연구보고서(2002. 2.)」에서 산정한 암반의 강도정수 및 변형계수를 적용하였으며(표 1 참조), 지층구분은 풍화암과 연암으로 단순화하였다. 또한 사면 굴착시 제거되는 표토층(두께 1.0m)은 풍화암 물성으로 대체하였으나 해석결과에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다. 각 소단 굴착단계에 따라 11단계로 나누어 해석을 수행하였으며, 계측기가 위치한 요소의 수평변위를 각 단계별로 산정하였다.

3.2 수치해석 결과 및 분석

제 7 굴착단계부터 원호형태의 사면 활동이 발생하기 시작하였으며 제 9 굴착단계부터 수평방향 변위가 증가하기 시작하였다. 제 10, 11단 굴착 이후 지반의 변위가 현저하게 증가하여 사면 전체의 활동이 발생하게 되는 양상을 보였으며 사면 굴착 단계에 따라 사면 토체에 발생하는 소성영역을 도시한 결과, 아래 그림 6 ~ 9에서 보는 바와 같이 사면 상단 배면측으로 10m 내외의 위치에서 사면 하부 끝단에 이르는 대규모 파괴면이 나타났다.

또한 소성영역 및 요소의 변위 형상(그림 10)으로 미루어 보아 활동파괴면이 Soil Nail로 보강된 영역 바깥쪽에 위치하는 것을 알 수 있었다. 사면 계측결과 확인된 급격한 변위 발생의 원인을 추정해 본 결과, 본 사면에 적용된 Soil Nail공법은 표면의 얕은 활동을 억제하는 기능은 있으나 사면의 전체 활동을 저항하기에는 어려워 사면 안정성 확보의 효과가 크지 않았기 때문인 것으로 나타났으며, 보다 자세한 지반조사를 통해 사면 하부의 지층 상태를 파악하는 것이 필요할 것으로 판단되었다.

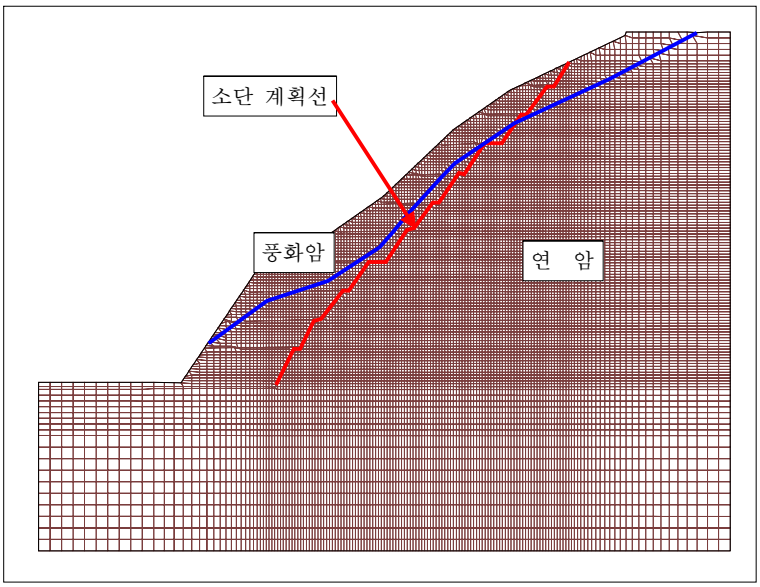

그림 5. 해석사면의 Mesh

표 1. 수치해석시 적용한 지반물성

지층구분	단위중량 (tf/m^3)	점착력 (tf/m^2)	내부마찰각 (°)	변형계수 (tf/m^2)	Poisson's ratio
풍화암	2.1	2.0	30	100000	0.3
연암	2.6	3.2	32	200000	0.3

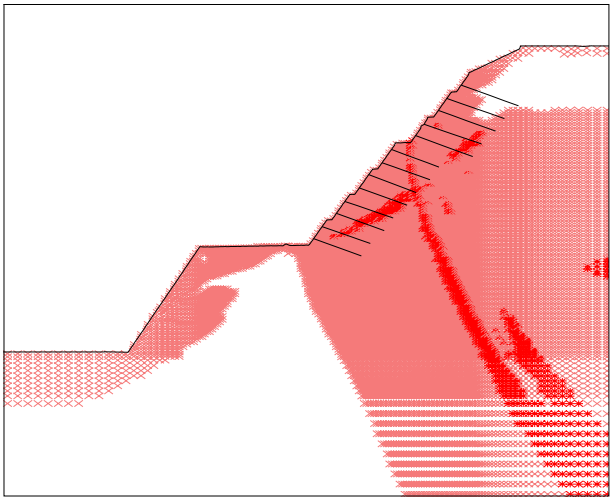

그림 6. 제 7 굴착 단계의 소성영역

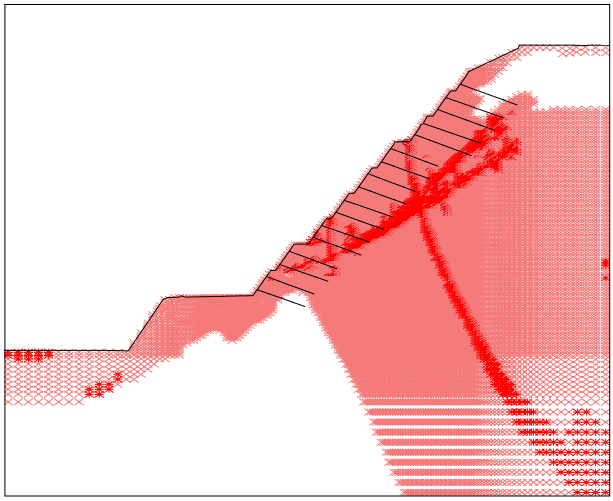

그림 7. 제 9 굴착 단계의 소성영역

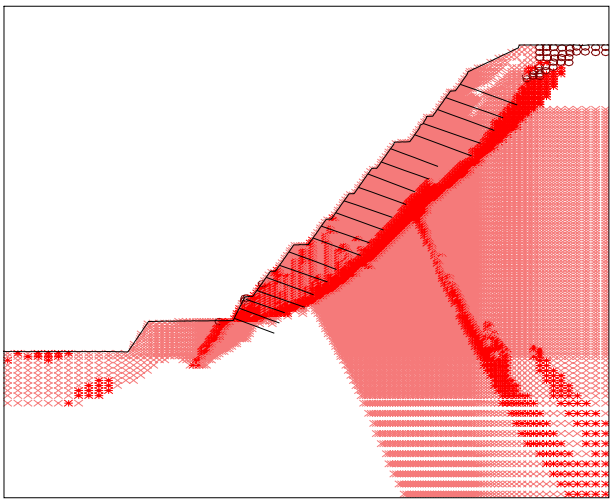

그림 8. 제 10 굴착 단계의 소성영역

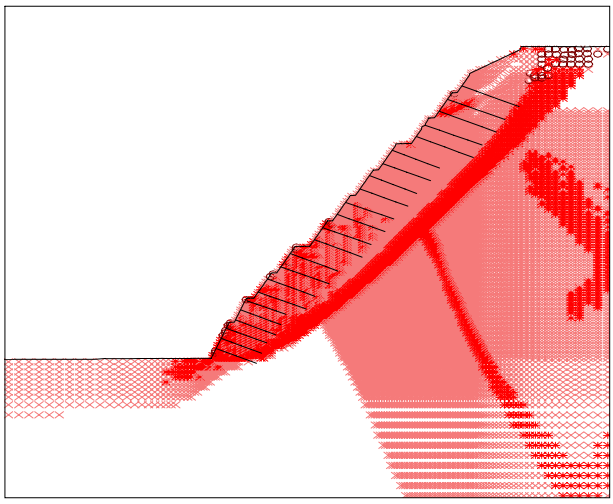

그림 9. 제 11 굴착 단계의 소성영역

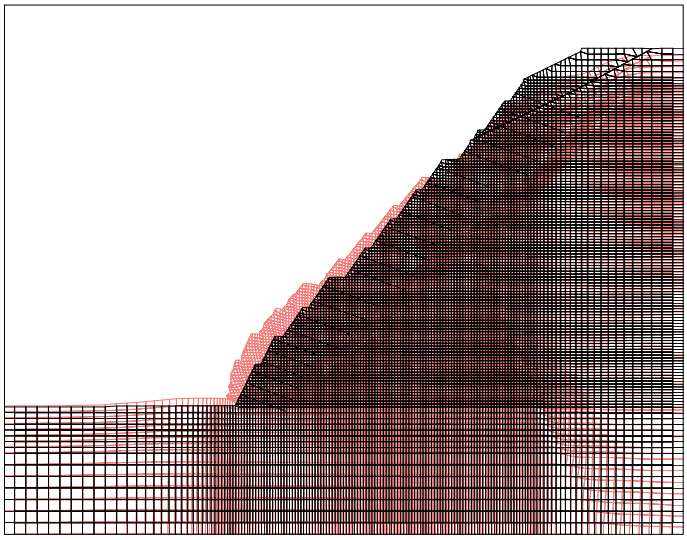

그림 10. 제 11 굴착 단계의 요소 변위 형상

그림 11은 사면에 설치된 경사계와 같은 위치의 요소에서 수평방향 변위를 산정하여 도시한 것이다. 계측결과와 비교한 결과, 변위량은 정량적으로 일치하지 않지만 제 10 단 굴착 이후에 변위가 급격히 증가하는 경향은 서로 비슷한 것으로 나타났다.

또한 계측결과와 수치해석결과를 비교하였을 때 하부 변위양상이 다른 것을 알 수 있었다. 수치해석결과에서는 하부 20m 내외에 사면 활동면이 존재하는 것으로 나타났으나 계측 결과에 의해 추정된 사면 활동면은 계측기 설치위치 하부 25 ~ 30m에 존재하는 것으로 나타났다.

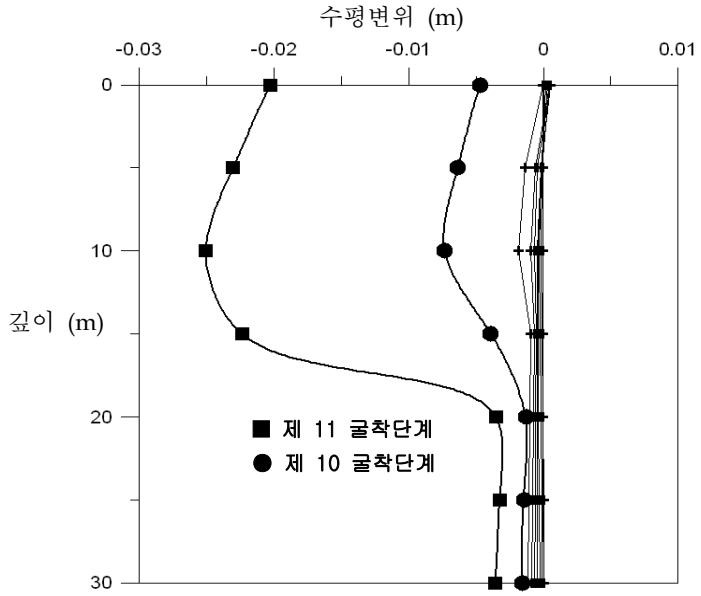

그림 11. 수치해석 결과 산정된 수평방향 지반변위

4. 확인시추조사 및 활동원인분석

앞서 언급한 수치해석과 계측 결과의 차이를 규명하고 사면 하부의 지층 상태를 파악하기 위한 확인 시추조사를 실시하였으며 시추조사 위치도는 아래 그림 12와 같다. DB-4번 시추조사 결과에 의하면 약 5m 두께의 풍화암층 하부에 수직절리와 파쇄대가 존재하는 연암층과 풍화 정도가 매우 심한 파쇄대가 점토 및 암편의 혼합된 형태로 분포하는 것으로 나타났다(표 2 참조). 또한 공번 BC-1의 시추조사 결과, 풍화토층 하부에 풍화가 심하며 전반적으로 절리 및 균열이 심한 파쇄구간이 분포하고 있음이 확인되었다(표 3 참조).

본 사면의 활동은 그림 12에 점선으로 표시된 바와 같이 사면 연암층 내부에 존재하는 파쇄대와 점토가 충진된 단층 위치에서 발생한 것으로 추정되었다. 단계별 굴착으로 인하여 응력해방이 되면서 수평방향의 변위가 발생한 것으로 생각되며 연암층 내부에 존재하는 파쇄대가 제 10 ~ 11 소단과 거의 같은 위치에 존재하기 때문에 10 ~ 11 소단 굴착 이후에 급격한 사면의 활동이 발생한 것으로 판단되었다.

표 2. 사면의 지층개요(DB-4)

심 도(m)	지층구분	특 성
0.0 ~ 5.0	풍화암	- 편마암 풍화대
5.0 ~ 27.0	연암	- 심함~보통 풍화 - 부분적으로 심한 풍화 - 파쇄대 발달로 코아회수율이 낮음 RQD = 0%, TCR = 20 ~ 50% - 엽리 발달, 부분적 수직절리 및 파쇄대 존재 - 불연속면 충전물질 없음 - 일축압축강도 148~299 kg/cm^2
27.0 ~ 35.5	파쇄대	- 점토와 암편의 혼합형태로 구성 - 심한 풍화상태 - 시추조사시 암편이 섞인 실트질 모래 형태로 채취

표 3. 사면의 지층개요(BC-1)

심 도(m)	지층구분	특 성
0.0 ~ 1.2	붕적층	- 실트질 모래, 암갈색, 소량의 잔자갈 함유
1.2 ~ 19.5	풍화토	- 실트질 모래, 느슨~매우 조밀한 상대밀도
19.5 ~ 38.0	연암	- 기반암인 석영장석질 편마암의 연암층 - 심한풍화~보통풍화, 약함~보통강함 - 전반적으로 절리 및 균열이 심한 파쇄구간 - 36.4~36.5m 단층 점토 충진
38.0 ~ 51.5	보통암	- 기반암인 석영장석질 편마암의 보통암층 - 45.7~45.9m : 파쇄구간 - 46.0~51.5m : 전반적으로 절리 및 균열 심한 파쇄구간
51.5 ~ 62.0	경암	- 기반암인 석영장석질 편마암의 경암층 - 심한풍화 ~ 약간풍화, 약함~강함 - 60.4~62.0m : 파쇄구간

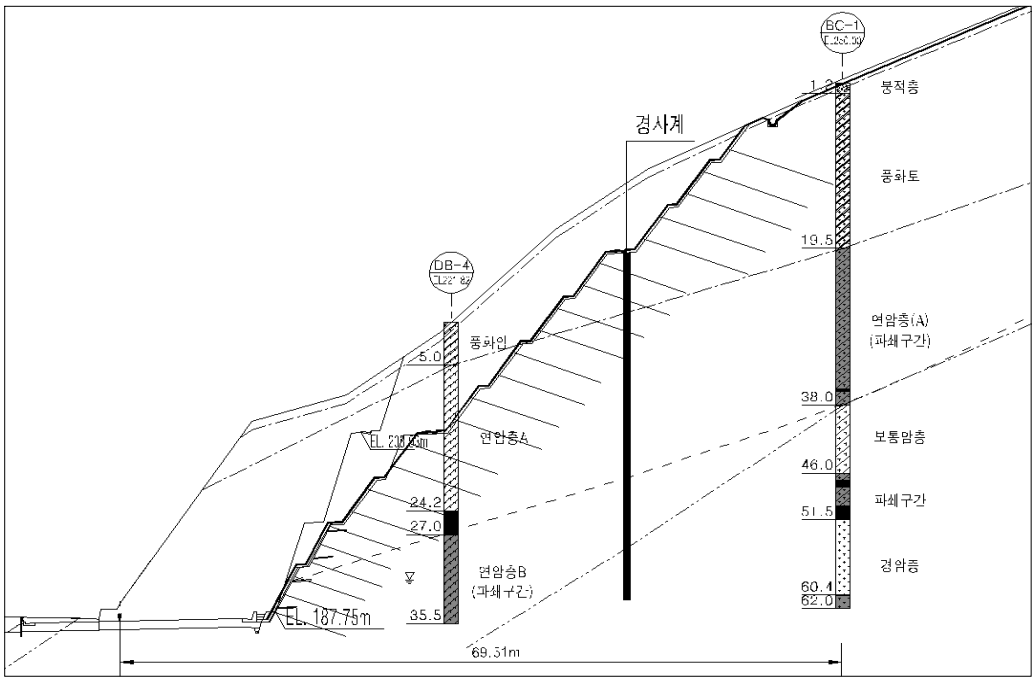

그림 12. 시추조사 위치 단면도(STA.3+460)

5. 사면 안정화 방안

사면의 안정성 확보를 위한 보강공법은 사면안정 시설물을 시공하여 주변지반의 붕괴와 그 외의 피해를 최소화하고 시공시 발생하는 소음 및 진동 등의 문제를 충분히 고려하여야 하며, 현장의 여건에 적합한 공법을 채택하여야 한다. 일반적인 사면 보강 공법의 개요 및 특징은 표 4와 같다.

표 4. 사면보강공법의 종류 및 특징

	개 요	특 징
억지말뚝 공법	- 억지말뚝 공법은 절토사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 받아 활동을 억지시키는 공법	- 억지말뚝 공법은 기초부 암반이 토압으로 인해 활동현상이 발생한 지역, 토층 사이의 경계면에서 평면파괴가 발생하거나 풍화층의 유실과 침식으로 표면 붕괴의 우려가 있는 지역, 급경사의 토사사면으로 경사완화가 불가능하거나 단층파쇄대 구간으로서 지하수위가 낮고 침투수 영향이 적은 구간에 적용
Anchor 공법	- 절토사면의 예상활동면이 깊은 심도에 위치할 때	- 쐐기활동 가능성이 있는 급구배 사면에 적합 - 사면표면의 암반이 연약할 경우에는 Shotcrete를 타설하거나 격자상 철근 콘크리트망을 한 후에 Anchor 시공
Nailing 공법	- 절토면에서 수평하향 방향으로 천공한 후, Steel Bar를 삽입하여 보강된 지반을 일체화시켜 작용 토압에 저항하도록 하는 공법	- 토사 또는 풍화가 심한 대절토 - 영구사면의 경우 Nail의 부식방지대책이 필요 - 평면활동이 우려되고 용출수가 있어얕은 활동이 발생하는 경우에 적합
Shotcrete + Rock Bolt 공법	- 절토사면의 지질구조가 부분적으로 불안정하거나 예상활동면이 깊지 않은 경우, 또는 암반이 이완되어나 급속한 풍화작용이 진행되어 사면이 불안정해질 가능성이 있는 경우, Shotcrete를 타설하고 Rock Bolt를 시공하여 안정을 확보하는 공법	- 예상활동면의 심도가 깊지않거나 낙반이 예상되는 경우 - 수압이 작용하지 않도록 수평배수공 설치 필요 - Shotcrete로 표면이 피복되므로 미관 불량 - 쐐기활동이 예상되거나 암반이 들떠 있는 경우에 적합
옹벽 공법	- 옹벽을 설치하여 절토사면의 토압에 저항하도록 설계하는 공법	- 절토고가 높지않은 구간에 적합 - 암반굴착량을 줄이기 위해 사면의 구배를 급하게 조절할 필요가 있는 경우에 적합
옹벽 + Anchor 공법	- 절토고가 높아 작용토압이 큰 경우 옹벽만으로는 토압에 저항할 수 없을 때 Anchor의 인장력에 의하여 토압에 저항하도록 설계하는 공법	- 작용토압이 큰 구간에서도 적용가능 - 얕은 활동, 쐐기활동, 엽리로 인한 평면활동이 우려되는 지역 및 핵석이 존재하는 지역에 적합 - 토사 및 풍화암층에 적합

본 사면 상부에 인장균열 발생 흔적은 보이지 않으나 계측결과 지속적인 사면 거동이 관찰되고 있으며, 지반조사 결과 파쇄대가 존재하고 풍화에 따른 사면 안정성 문제가 발생될 수 있을 것으로 판단되어 전반적인 사면 안정성 확보를 위한 대책방안이 수립되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 현재 보강되어 있은 Soil Nail은 표면파괴에 대한 보강효과를 가지고 있으므로 현재의 보강상태를 유지하면서 추가적인 보강이 이루어져야 할 것이다.

본 사면의 지층 상태 및 사면의 수평 변위 계측 결과 등으로 미루어 볼 때, 사면 전체적으로 대규모의 파괴면이 나타나며 활동 파괴면이 비교적 깊은 경우이므로 억지말뚝과 Ahchor공법을 적용하는 것이 가장 적합하다고 판단된다. 지표에서 활동 토체를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 삽입하여 지반활동하중을 부동지반으로 전달시킴으로써 활동 토체의 이동에 대하여 역학적으로 저항할 수 있도록하며, 현 사면 상태에서 표면을 고르게 정리하고 Anchor를 시공하여 예상활동면의 전단저항력을 증가시킴으로써 사면의 안정성을 확보할 수 있도록 해야한다.

6. 결 론

본 연구에서는 사면 굴착과정에서 발생한 변위 계측결과를 분석하여 현재 사면의 활동 현황을 파악하고, 수치해석을 통하여 굴착단계별 수평방향 변위량 및 변위 양상을 파악하였다. 또한 보다 자세한 원인 규명을 위해 확인 시추조사를 실시하여 하부 지층 특성을 파악하여 본 사면에 적합한 사면보강공법을 제안하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 사면 상단부에 설치된 2개의 경사계를 이용하여 주기적으로 사면의 수평방향 변위 계측을 실시하던 중, 사면 하부의 소단 굴착과정에서 상대적으로 급격한 사면경사 방향의 수평변위가 발생한 것을 확인하였다.

(2) 수치해석을 통해 나타난 사면 굴착 단계에 따라 사면 토체에 발생하는 소성영역을 도시한 결과, 사면 전체에 걸쳐 대규모 파괴면이 나타났으며 파괴활동면이 Soil Nail로 보강된 영역의 바깥쪽에 위치하는 것을 알 수 있었다. 또한 본 사면에 적용된 Soil Nail공법은 표면의 얕은 활동을 억제하는 기능은 있으나 사면의 전체 활동에 저항하기에는 어려운 것으로 나타났다.

(3) 확인 시추조사를 실시하여 하부 지층 특성을 파악한 결과, 사면 활동은 연암층 내부에 존재하는 파쇄대와 점토가 충진된 단층 위치에서 발생한 것으로 나타났다. 단계별 굴착으로 인하여 응력해방이 되면서 수평 방향의 변위가 발생하였으며 연암층 내부에 존재하는 파쇄대로 인하여 10 ~ 11 소단 굴착 이후에 급격한 사면의 활동이 발생한 것으로 판단된다.

(4) 연구 대상 사면의 변위 계측 결과, 수치해석 결과, 확인 시추 조사 결과 및 예상되는 사면 활동의 규모 등을 고려할 때 사면의 안정성 확보를 위한 대책방안이 수립되어야 하며, 억지말뚝과 Ahchor 공법 적용이 가장 적절할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. (사)한국지반공학회(1997), **지반공학시리즈 5 사면안정**, 구미서관.
2. (사)한국지반공학회(2002), **OO도로 확장 및 포장공사중 사면안정대책 연구보고서**.
3. (주)브니엘컨설턴트(2003), **OO도로 확장 및 포장공사중 사면안정대책 연구보고서**.
4. Itasca Consulting Group(2005), **FLAC 2D Ver 5.0 User's Manual.**