일반적 이론을 벗어난 절토사면 붕괴 유형
Case study on the Collapse types get out of the General Theory

구호본[1], Hobon Koo, 김승현[2], Seunghyun Kim, 이종현[2], Jonghyun Rhee, 이정엽[2], Jungyup Lee

[1] 한국건설기술연구원 지반연구부 수석연구원, Researcher Fellow, KICT, hbkoo@kict.re.kr
[2] 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, KICT

SYNOPSIS : Most of rock slopes contain a lot of discontinuities which have a specific direction and various characteristics. In general, the collapses of the rock slopes occur when the sliding dip of the discontinuity is higher than the internal friction angle and also smaller than the free-air plane of the slope. If a general slope theory is only considered in the case of field exploration of the slopes, there is a possibility that dangerous slopes might be estimated as stable slopes. We mention problems that can easily fail to notice something in field exploration and propose the alternatives to solve the problems through the case studies.

Keywords : Rock Cut Slopes, field exploration, case study, stability analysis, countermeasure

1. 서 론

국내 산지 절토사면 지형, 지질 특성에 의해 대부분 암반으로 구성되어 있고, 토사사면의 구성비는 상대적으로 작다(한국건설기술연구원, 2004). 일반적으로 암반사면의 안정성 해석은 Hoek and Bray의 평사투영법을 이용한 안정성해석에 의해 파괴형태를 결정하고, 파괴형태에 대한 안전율을 산정하게 된다. 즉, 암반파괴 형태가 먼저 결정되고 이에 따른 안전율을 산정한다. 바꾸어 말하면 파괴 형태가 안전한 걸로 나타나면 안전율을 산정하지 않고 안정한 것으로 결정 되는 것이다. 이는 암반의 안정성 해석부분에서 현장조사의 중요성이 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있고 지반공학자들에게 현장조사의 중요성을 일깨워 주는 항목이다.

국내의 경우 최근 집중강우에 의한 암반절토사면의 파괴비율이 높아짐에 따라 암반절토사면의 안정성 해석과 대책방안 관련 중요성이 부각되고 있으며 이에 따른 지반공학자들의 역할이 어느 때 보다 중요해 지고 있다고 할 수 있다. 본고에서는 국내 암반사면의 현장조사, 안정성 해석, 대책(안) 관련 현장에서 자주 마주치는 문제점과 해결방안에 대해서 논의하고자 한다.

암반사면의 경우 파괴형태는 원호파괴, 평면파괴, 쐐기파괴, 전도파괴로 구분되는데, 이들 파괴형태 결정의 기초자료는 암반사면에 분포하는 단층, 절리, 엽리 등의 불연속면 조사에 의해 이루어진다.

사면에 발달하는 불연속면의 조사는 window method와 scan-line method로 대별된다. window method는 조사대상 암반사면 전체구간에 대해서 특정 위험구간에 발달하는 불연속면을 조사하여 안정성 해석을 수행하는 반면, scan-line method는 조사대상 전체 절토사면을 대상으로 불연속면을 조사하는 것이다. 이들 조사방법은 상대적 장단점을 가지고 있다. 조사자는 상기 window method와 scan-line method을 이용하여 사면에 발달하는 불연속면을 조사하는 과정에서 파괴형태를 대부분 인지하게 된다. 조사자가 현장에서 파괴형태를 인지하지 못하면 파괴를 예측하기가 어려운 경우도 있다. 또한, 지반공학은 불균질 재료로 구성된 사면을 대상으로 조사, 안정성해석을 수행함으로 경험적요소가 많은 비중을 차지하게 된

다. 경험적 요소는 실패과정을 겪으면서 우리에게 더 할 수 없는 교훈을 부여하기도 한다.
본 고는 붕괴된 사면을 중심으로 안전진단 과정에서 인지하기 어려운 현장여건을 중심으로 한 사례연구를 통하여 문제 해결을 위한 대안을 제시하고자 한다.

2. 강동지역 도로 제1절토사면 (연장 : 90 m, STA.11+942~12+032 구간)

2.1. 개요

울산에서 경주를 잇는 도로확장공사 진행 중에 도로변을 따라 다수의 절토사면이 형성되고 있다. 연구대상은 STA.11+942~12+032 구간 도로 좌측부에 존재하는 절토사면(제1사면)으로 2003년 8월 이 지역에 발생된 집중호우의 영향으로 STA.11+992~STA.12+032 구간에서 최초 붕괴가 발생되었다. 이 후 2003년 12월과 2004년 2월에 국지성 강우의 영향으로 붕괴 구간을 중심으로 추가적인 암반이탈이 있었다.

2004년 4월, 제1사면에 대한 지반특성을 파악하기 위한 상세한 현장조사가 이루어졌다. 제1사면은 총 연장 90 m, 최대높이 25 m의 규모로 사면의 경사방향(dip direction)은 144°였으며, 최초 설계시 사면 구배는 발파암 판정에 근거하여 1:0.5(65°) 구배를 적용 절취 중에 있었다(그림 1과 그림 2).

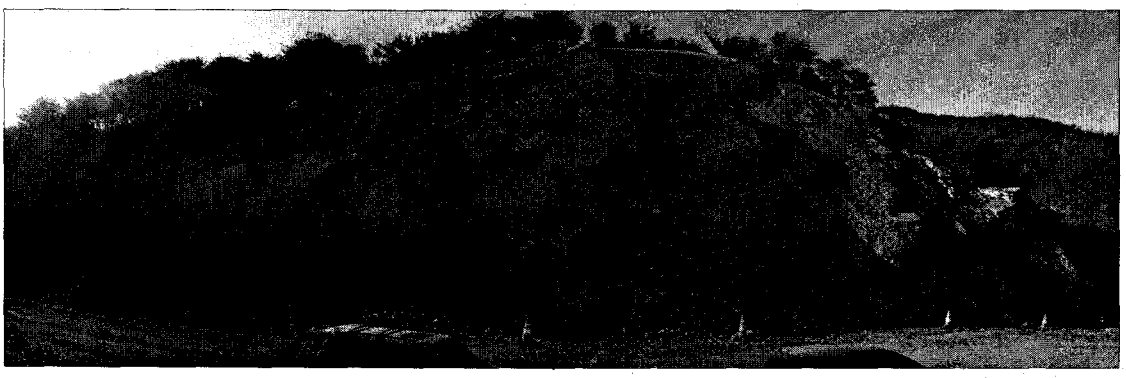

그림 1. 강동지역 도로 제1절토사면 전경

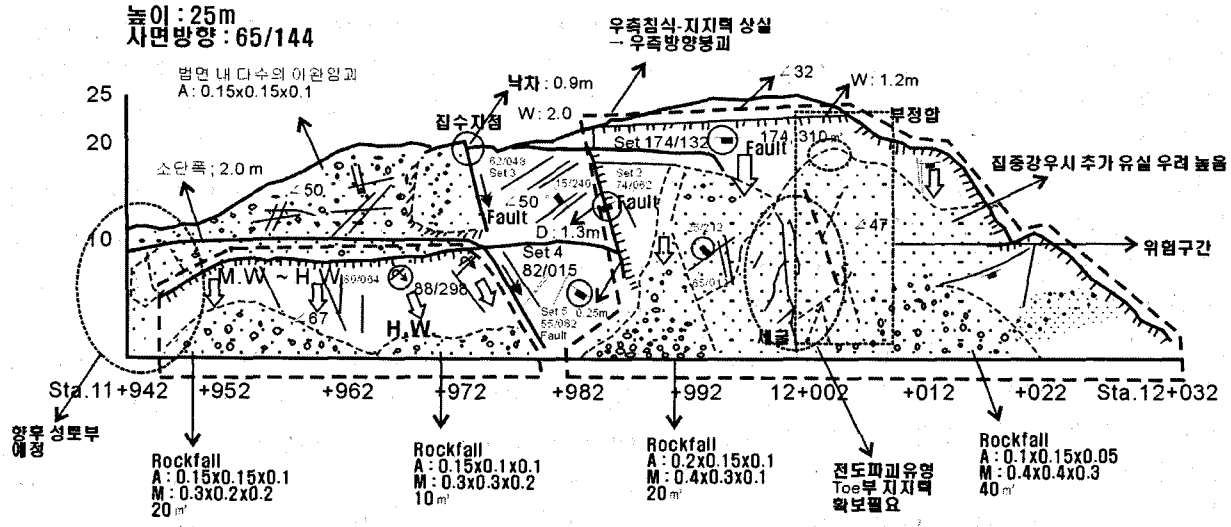

그림 2. 강동지역 제1절토사면 현황도

대상 사면은 높이 20 m 지점의 부정합면을 중심으로, 하단부는 혼펠스(울산층), 상단부는 제4기퇴적층

으로 구성되어 있었다. 울산층은 층리 발달이 뚜렷하며, 제4기 퇴적층은 주로 모래질로 이루어진 미고결 지층에 해당되어 암상 간 지반공학적 차이가 매우 큰 편이었다.

본 사면에 발달하는 주요 불연속면은 사면 방향과 유사한 방향의 절리와 STA.11+975 지점의 단층 등으로 구성되어 있다(그림 3). 층리의 경우, 연장성은 우수하지만, 절리의 틈새이완정도가 매우 미약하여 주요 불연속면에 포함시키지 않았다. 단층은 절토사면 STA.11+975 지점을 중심으로 약 1~2 m 간격으로 발달하고 있으며, 단층의 발달방향은 N28W/62NE에 해당되어 사면 경사방향에 대하여 약 90°정도 틀어져 있으므로 방향 측면에서는 안정적이라고 할 수 있지만, 단층면 내에 팽윤성 점토광물을 포함한 단층점토의 발달이 뚜렷하고, 틈새가 10 cm 정도 이완되어 있어 우기시 지표수 유입통로로 활용되고 있어 단층면을 중심으로 지반열화(deterioration) 가능성이 높았다.

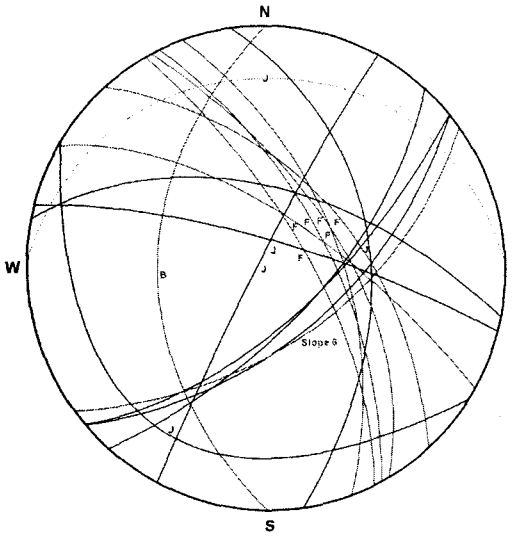

그림 3. 강동 제1사면 불연속면 방향
(F ; fault, J ; joint, B ; bedding)

2.2 안정성해석

강동지역 제1사면의 불연속면 발달 방향의 안정성을 평가하기 위하여 평사투영법을 이용한 해석을 실시하였다. 평사투영법 해석에서는 대상 암반의 내부마찰각이 요구되는데, 본 연구에서는 기존 문헌치, 실험결과, RMR에 근거한 경험식을 활용하여 마찰각을 추정하였으며, 이에 최소의 마찰각 산출값인 37°를 사용하였다.

쐐기파괴 안정성해석에서는 모든 불연속면 대원의 교점이 쐐기파괴 발생가능영역에 도시되지 않아 안정한 것으로 나타났다. 또한, 평면·전도파괴 안정성 해석에서도 모든 불연속면의 극점이 파괴영역에 도시되지 않아 안정한 것으로 나타났다(그림 4와 그림 5).

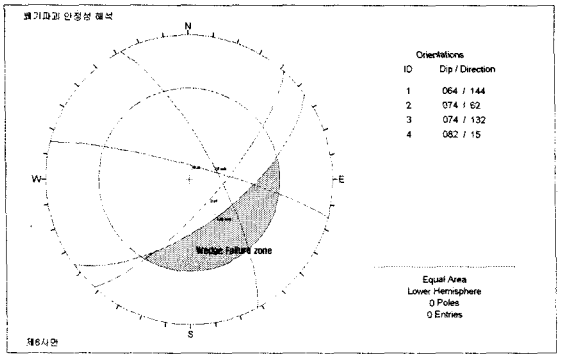

그림 4. 쐐기파괴 안정성 해석(안정)

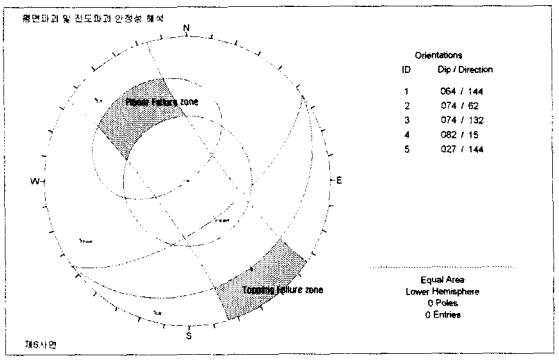

그림 5. 평면·전도파괴 안정성 해석(안정)

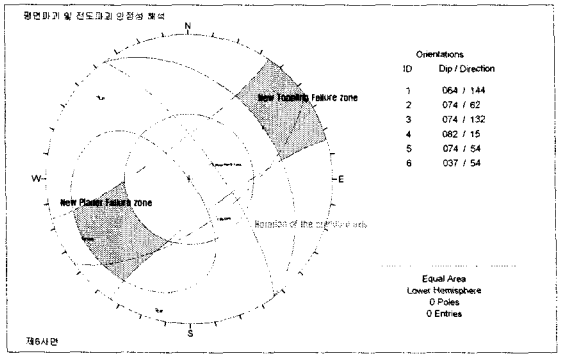

그림 6. 붕괴부를 고려한 평사투영 재해석
(평면파괴 ; 불안정)

실제로 제1사면에 발달하는 불연속면들은 사면과의 경사방향 차이가 크고, 급경사를 이루고 있어 암반사면에서 발생할 수 있는 파괴모드를 인지하는 데 한계가 있다.

조사대상 절토사면의 주요단층면을 중심으로 절토사면을 정면으로 바라보았을 때, 우측 10 m 지점에서 1차 원호파괴가 발생하였으며, 원호파괴에 의해 개방된 좌측 자유면을 중심으로 안정성해석을 다시 실시한 결과, 그림 6과 같이 평면파괴 가능성이 있는 것으로 나타났다.

2.3 붕괴원인

조사대상 절토사면의 경우, 절토사면 중앙부에 위치하는 주요 불연속면인 단층방향과 절토사면의 방향이 90°를 이루는 것으로 안정성 해석상 파괴유형을 파악하기 어려운 상황이었다. 그러나, 단층의 우측 사면에서 침식성 원호파괴가 발생하여 파괴에 대한 자유면이 생성되어 설계단계에서 예상치 못한 사면 붕괴가 발생하였다. 붕괴 원인은 원호파괴에 의해 생성된 N18W/60NE 방향의 개방면을 중심으로 절토사면 중심부에 위치하는 단층면을 따라 낙차 10 cm의 붕괴가 발생하였다.

절토사면을 가로지르는 방향의 10 cm 낙차 붕괴는 시공단계에서 대수롭지 않게 생각할 수 있지만, 지속적인 우수의 붕괴면 내 침투는 자칫 대형붕괴로 이어질 수 있으며, 이에 대한 대책강구가 반드시 이루어져야 할 것이다.

실제 본 사면의 경우, 단층대를 따라 대규모 암괴 이탈이 발생되었는데, 이는 상대적으로 침식을 받기 쉬운 단층대로 용수가 주입됨에 따라 단층면 내 스멕타이트 및 녹니석 등의 점토광물이 팽윤하여 활동을 야기시켰던 것으로 판단된다.

2.4 소론

절토암반사면 안정성 해석은 사면에 분포하는 절리, 단층 등 불연속면의 방향성과 절토사면의 방향성과의 상관관계를 중심으로 파괴유형을 파악하고, 안정성 해석을 수행하게 된다. 본 조사대상 절토사면의 경우, 절리, 단층 등 대규모 불연속면들이 절토사면을 자르는 방향 내지 급경사로 이루어져 있어 일반적인 붕괴형태를 가지지 않는다.

조사대상 절토사면의 경우, 하부 혼펠스층 위에 두꺼운 미고결층(두께 : 약 5 m)의 분포와 단층파쇄대 등의 발달로 암반의 풍화가 비교적 급속하게 이루어져 절토사면 표면의 침식 내지 원호파괴가 발생된다. 이들 원호파괴는 또다른 절토사면을 구성하며 2차 붕괴를 유도하게 되는데, 기존의 절토사면 조사, 안정성 해석 부분에서는 이러한 부분에 대한 고려가 제대로 이루어지지 않고 있는 게 현실이다.

STA.11+942~12+032 구간 중 STA.11+985～12+032 구간에 나타나는 단층파쇄대와 원호파괴에 의한 절토사면과의 조합에 의해 2차 붕괴가 발생하였다. 1차 원호파괴에 대하여는 대책방안을 비교적 쉽게 대처할 수 있다. 그러나, 단층면 발달에 따른 2차 파괴는 10 cm 정도의 단차를 가져 대책수립시 고려해야 할 사항으로 미미하다고 생각할 수 있으나, 향후 대규모 붕괴로 발전할 수 있으므로 이를 고려한 대책공법 선정이 필요할 것이다.

3. 강동 지역 도로 제2절토사면 (연장 : 120 m, STA. 12+045~12+165 구간)

3.1 개요

강동지역 도로 제1절토사면의 우측에는 총연장 120 m, 최대높이 35 m의 대형사면(제2사면)이 존재한다. 제2사면 역시 제1사면과 마찬가지로 2003년 8월 최초 붕괴가 발생되었다. 이 후 2003년 12월과 2004년 2월에 국지성 강우의 영향으로 추가 붕괴가 발생되었다.

제2사면의 경사방향은 150°이었으며, 최초 사면의 절취 구배는 발파암 판정에 근거하여 1:0.5(65°)로 비교적 고각을 형성하였다. 본 사면의 구성암석은 높이 25 m 지점의 부정합면을 중심으로, 하단부는 화강암과 혼펠스(울산층), 상단부는 제4기퇴적층으로 구성되어 있다. 울산층은 층리 발달이 뚜렷하며, 제4기 퇴적층은 주로 모래질로 이루어진 미고결지층(두께 : 10 m) 에 해당되어 암상 간 지반공학적 차이가 큰 편이다(그림 7과 그림 8).

그림 7. 강동지역 도로 제2절토사면 전경

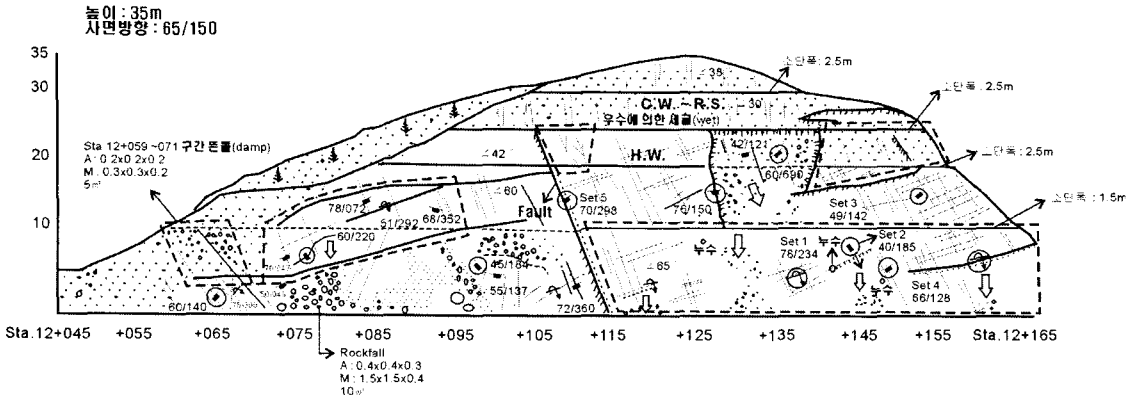

그림 8. 강동지역 제2절토사면 현황도

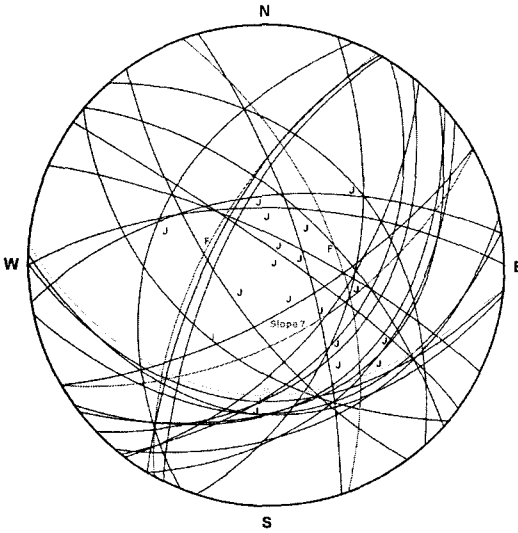

그림 9. 제2사면 불연속면 방향
(F ; fault, J ; joint, B ; bedding)

화강암으로 구성된 Sta.12+060~12+110 구간은 특정방향의 불연속면 발달이 미약한 반면, 혼펠스 암석으로 이루어진 구간은 단층 및 우측하향사교절리, 층리 등이 비교적 규칙적으로 발달되어 있다(그림 9). 따라서 본 사면의 붕괴는 쐐기파괴로 여러 지점에서 발생되었다.

본 사면에서 특이할 만한 구간은 절토사면 우측 90~110 m 구간(STA. 12+135~155 구간)의 1소단 하단부에 노출된 돌출암괴였다. 돌출암괴를 지탱하고 있는 불연속면은 혼펠스의 층리구조이며, 발달 방향이 사면방향에 대하여 역방향에 해당되어, 붕괴가능성이 낮다고 판단되는 경우가 많다. 그러나, 2004년 8월 발생한 집중호우에 의해 돌출암괴는 무너져 내렸다(그림 10과 그림 11).

그림 10. Sta.12+135~155 구간 붕괴이전 (2004년 4월 촬영)

그림 11. Sta.12+135~155 구간 붕괴발생 (2004년 9월 촬영)

3.2 안정성해석

90~110 m 구간은 단층 발달과 관련되어 형성된 78/234 방향 및 40/185 방향의 불연속면과 층리(60/315) 방향의 불연속면이 발달한다. 이를 대상으로 붕괴가 발생된 90~110 m 구간에 대한 안정성 해석결과에서 층리면 발달 방향은 파괴와는 무관한 결과를 보였다.

일반적으로 사면방향에 대해 역방향인 불연속면이 평사투영법을 통해 불안정요인으로 인지되는 경우는 전도파괴 해석시 불연속면의 경사방향이 사면경사방향에 대하여 180°±20°에 해당되고, 불연속면의 경사가 90°-(내부마찰각) 값보다 큰 경우로 잘 알려져 있어 본 구간의 붕괴는 일반적인 이론을 벗어나는 경우에 해당된다.

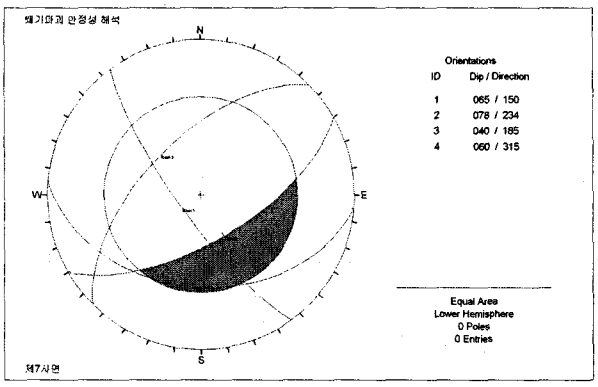

그림 12. 쐐기파괴 안정성 해석(안정)

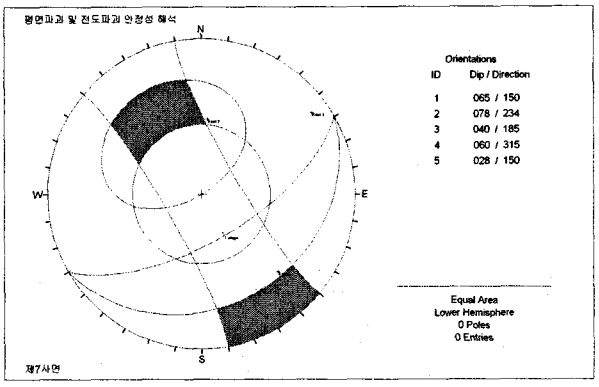

그림 13. 평면·전도파괴 안정성 해석(안정)

3.3 붕괴원인 및 소론

강동지역 제2사면은 2003년 8월, 2003년 12월, 2004년 2월 총 3차에 걸쳐 붕괴이력이 있었던 사면이다. 본 사면의 붕괴는 부정합면을 중심으로 하단부에만 제한적으로 발생되었다. 주요 붕괴구간은 STA. 12+125~145 구간으로 토석류가 집괴되어 있었다. 특히 2004년 8월에 발생한 STA. 12+135~155 구간의 돌출암괴의 붕괴는 반복적인 집중호우로 인하여 돌출암괴를 지탱하고 있던 층리면으로 지속적인 유수의 유입이 발생됨과 동시에 지지력 미확보에 따른 중력의 영향으로 붕괴된 것으로 판단된다.

조사대상 절토사면의 90~110 m 구간의 경우, 괴상의 암반이 역방향의 절리면을 가지고 있어 안정한 상태로 해석된 결과이다. 그러나 이들 괴상 암반 직하부의 암반 내지 토층들은 절토사면 시공과 함께 다년간 강우, 공기, 온도 변화 등에 노출되어 침식이 이루어진 것으로, 상부 괴상암반에 대한 지지력 상실 및 전반적인 절토사면 붕괴로 이어진 것으로 판단된다.

4. 영천 지역 절토사면 (STA. 8+620~8+835)

4.1 개요

연구대상은 경상북도 영천지역 붕괴 절토사면이며, 절토사면의 종점부에 해당되는 STA. 8+801.0~STA. 8+826.0 구간에서 2004년 8월 18일 15호 태풍 메기로 인한 집중호우에 의해 약 200 m^3의 암반절토사면이 붕괴되었다.

연구대상 사면의 설계절취 구배는 리핑암으로 판단되었으며, 추가적으로 안정성을 고려하여 STA. 8+650.0~STA. 8+720.0 구간은 1:1.2 구배, STA. 8+740.0~STA. 8+835.0 구간은 1:1.0 구배를 적용하였다. 연구대상 사면은 총연장 215 m, 최대 절취고는 약 25 m 였으며, 사면방향은 40/207(dip/dip direction)이다. 상부자연사면의 경사는 -25°로 역구배를 이루고 있어 강우시 지표수의 유입은 심각하지 않을 것으로 판단된다. 현재 최종 굴착면까지 절취가 완료된 상태에서 붕괴가 발생되었다(그림 14와 그림 15)). 붕괴구간은 STA. 8+801~STA. 8+826 구간이며, 집중호우에 의해 유수가 층리면을 따라 침투하였고, 층리면을 따라 붕괴가 발생되었다. 평면파괴 지점에서 관찰된 층리는 절토사면 하단에서부터 절토사면 전체에 분포하고 있다.

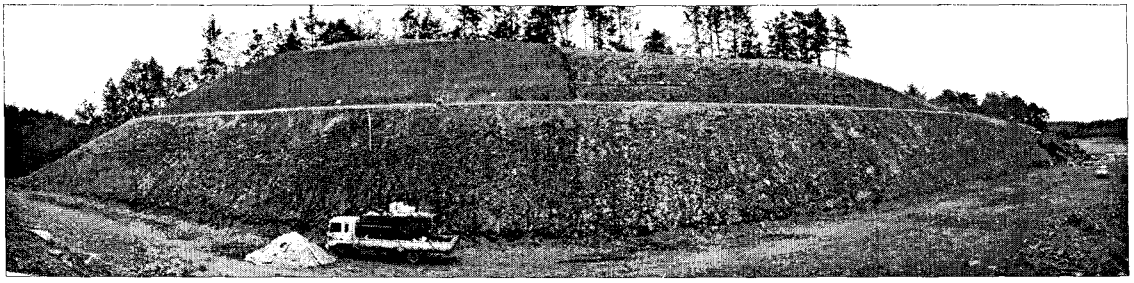

그림 14. 영천 지역 절토사면 전경

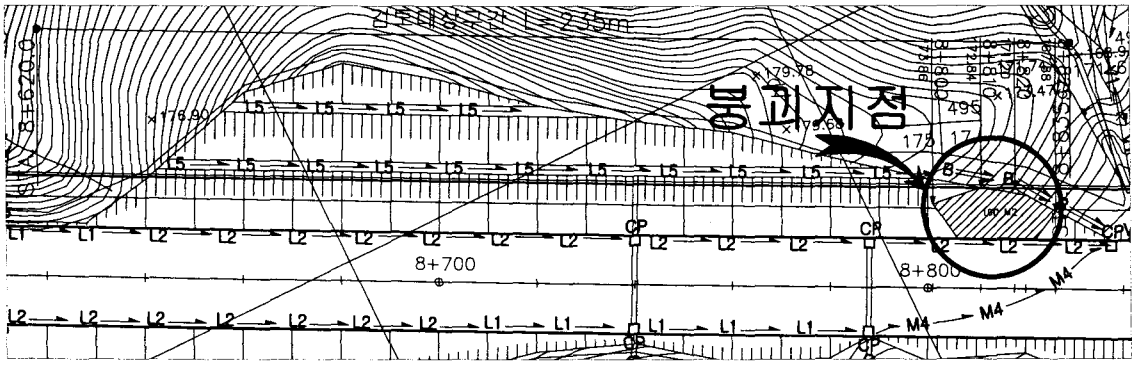

그림 15. 영천 지역 절토사면 단면도

절토사면의 구성암석은 적색셰일과 실트층으로 지반공학적으로 비교적 열악한 암반층에 해당된다. 암반의 경우, 층리가 잘 발달하고 있으며, 지질햄머에 의한 타격시 층리 또는 절리를 따라 약간 부스러지는 상태 또는 깨지지 않는 상태로 전반적인 절토사면 구성암반의 풍화등급은 약간풍화(slightly weathered)~보통풍화 상태(moderately weathered)를 해당되지만, STA. 8+760.0 지점의 단층대 주변으로는 심한풍화 상태(highly weathered)에 해당된다.

붕괴발생 구간인 STA. 8+801~STA. 8+826 구간은 도로방향과 평행한 방향의 파쇄대 점토성분(1~3 cm 두께)이 협재된 층리(20/200)와 파쇄대 절리면(75/200)의 교호작용에 의해 붕괴가 발생하였다(그림 16과 그림 17). 암반 파괴면의 경사가 20° 내외의 완경사임에도 불구하고 지표수의 유입으로 파쇄대 점토분 층리면을 따라 붕괴가 발생한 것이다. 퇴적암의 특성인 층리의 경우 20° 내외로 비교적 완만한 경사를

가지고 있어 강우가 침투되지 않으면 안식각을 유지한다고 할 수 있다. 평면파괴가 발생할 수 있는 암반의 내부마찰각을 20°이하로 판단하기에는 한계를 가진다고 할 수 있다.

그림 16. 붕괴발생부 정면

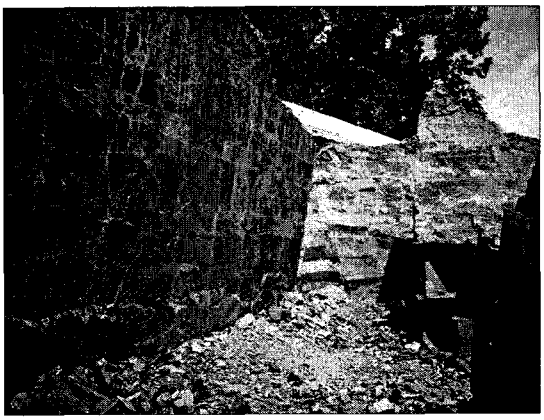

그림 17. 붕괴발생부 측면사진

4.2 안정성해석

불연속면 발달 방향의 안정성을 평가하기 위하여 평사투영법을 이용한 해석을 실시하였다. 평사투영법 해석에서는 대상암반의 내부마찰각이 요구되는데, 본 연구에서는 기존 문헌치, 실험결과, RMR 에 근거한 경험식 등을 활용하여 내부마찰각을 외삽하였으며, 이에 최소의 내부마찰각 산출값인 27°를 사용하였다.

쐐기파괴 안정성해석에서는 모든 불연속면 대원의 교점이 쐐기파괴 발생가능영역에 도시되지 않아 안정한 것으로 나타났다. 또한, 평면파괴 안정성 해석에서도 모든 불연속면의 극점이 파괴영역에 도시되지 않아 안정한 것으로 나타났다(그림 18과 그림 19). 이러한 결과는 평면파괴가 발생된 층리의 경사가 암반의 내부마찰각보다 작기 때문에 나타난 결과로 안정해석결과만으로는 붕괴가 발생되지 않는다는 오류 판단을 할 수 있는 사례이다.

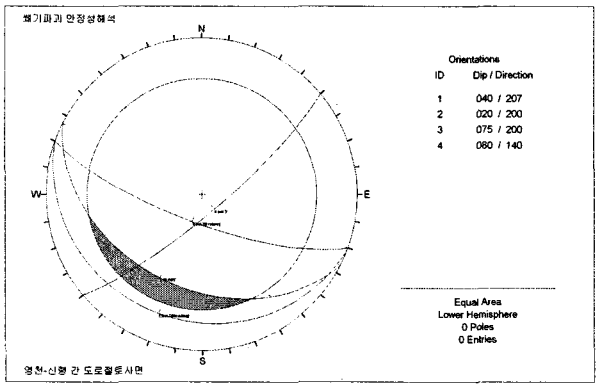

그림 18. 쐐기파괴 안정성 해석
(안정)

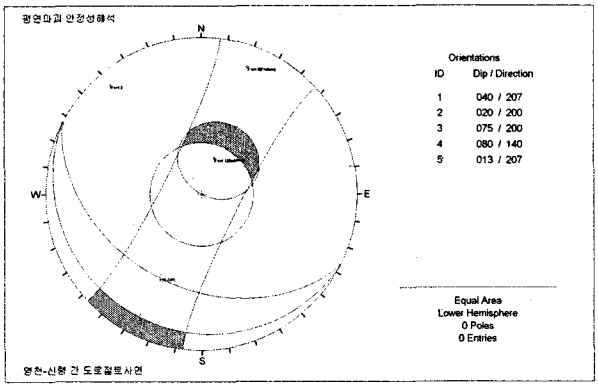

그림 19. 평면·전도파괴 안정성 해석
(안정)

4.3 붕괴원인

연구대상 사면의 붕괴원인은 소단 하단부에 분포하는 파쇄대(75/200)에 집중호우시 유입된 침투수가 수압으로 작용하여 절토사면의 지반강도를 급격히 저하시켜 전반적으로 발달된 층리절리면(20/200)을 따라 암괴의 평면파괴가 발생된 것이다.

절토사면 전구간에 동일 경사방향을 갖는 층리가 발달되었고 수직절리 또한 1단 소단 인근에 불규칙

적으로 발달된 것으로 추정되므로 미붕괴구간이라도 집중호우시 추가적으로 붕괴가 발생할 가능성이 잠재되어 있는 상황이었다.

4.4 소론

안정성 해석결과 절토사면의 불안정성이 확인된 경우에는 보호 및 보강공법을 통해 절토사면의 안정성을 확보하여야 한다. 그러나, 절토사면 안정해석 결과, 안정하게 판정된 절토사면에 대해서도 예상치 못한 낙석 발생 등 현장여건을 고려하여 최소한의 보호공법에 의한 재해 피해를 예방하여야 한다.

연구대상 사면의 경우 파쇄대 점토분이 협재된 20°의 층리와 수직절리의 교호작용에 의해 붕괴가 된 것으로 절토사면이 붕괴되기 전에 적절한 대책을 강구하게 되면 비교적 쉽게 적은 비용으로 충분히 대책을 강구할 수 있으나 일단 붕괴가 발생하면 절토사면을 20° 경사로 절취해야 하는 등 매우 제한적인 항구대책에 의존해야 한다는 문제점을 안고 있다. 상기와 같은 지반특성을 가지는 절토사면의 경우 절토사면 절취 직후 붕괴가 발생하기보다 1년 이상 일정기간이 지난 뒤 붕괴가 발생하는 사례가 많으며, 추가적인 안전진단에 의한 대책을 수립하지 않으면 도로공사 준공시기에 붕괴가 발생하여 공사기간 연장 등의 문제점을 발생하는 사례가 있다.

5. 진주 지역 절토사면 (STA. 4+660~4+910 구간)

5.1 개요

연구대상은 경상남도 진주에서 합천을 연결하는 신설국도 건설 공사 구간 내 붕괴 절토사면으로, 2005년 2월 국지성 집중호우에 의해 STA. 4+790~STA. 4+810 구간에서 약 1,000 m^3의 암반이 붕괴되었다. 붕괴 형태는 평면파괴였으며, 붕괴물의 추가이동을 제어하기 위하여 현장의 잡석을 붕괴부 하단에 집적시켜, 추가 붕괴에 대비한 응급대책을 강구한 상태이다.

연구대상 사면은 총연장 250 m, 최대높이 72 m이며, 총 6개의 소단이 설치되어 있다. 제3소단 하단부는 암반으로 구성되어 있으며, 제3소단 상단부는 식생공으로 피복되어 있어 직접적인 법면 관찰이 불가능한 상태였다(그림 20). 사면경사의 경우, 최하부로부터 제3소단까지는 약 1:0.5 구배(63°)로 조성되어 있고, 제3소단 상단부는 약 1:2.0 구배(30°)로 형성되어 있다. 진주 지역 절토사면방향은 104°에 해당되어 동쪽을 바라보고 있는 형상이며, 상부자연사면의 경사는 -22°로 역구배의 지형을 이루고 있었다.

그림 20. 진주지역 절토사면 전경

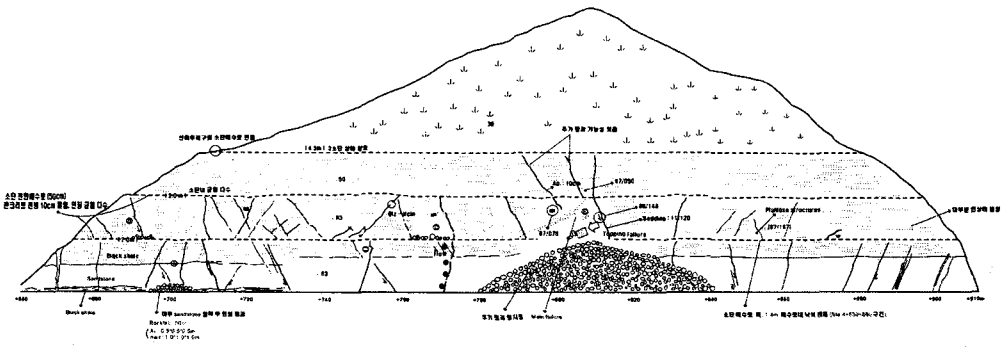

그림 21. 진주지역 절토사면 현황도

연구대상 사면의 구성암석은 퇴적암류이며, 흑색셰일과 백색알코스질사암의 호층으로 이루어져 있으며, 층리 발달이 매우 양호하다. 층리의 방향은 11/120의 자세로 층리면을 따른 대규모 붕괴를 발생시킬 정도의 경사도를 가지고 있지는 않다. 또한 층리면 외 대규모 단층파쇄대와 수반된 다양한 방향의 규칙적인 수직절리가 발달한다.

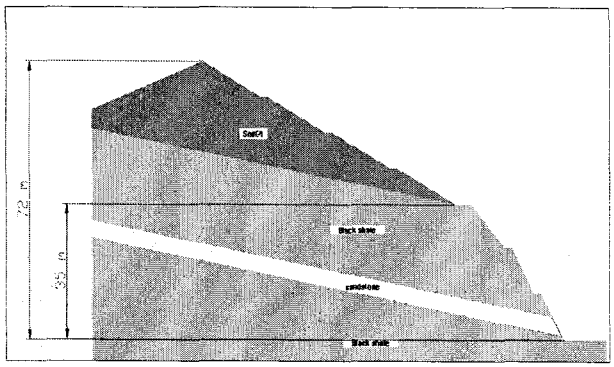

그림 22. 진주지역 절토사면 대표단면

STA.4+790～STA.4+810 구간은 가장 큰 붕괴 구간으로 연장성이 뚜렷한 67/050～87/076 방향의 수직절리가 Sta.4+810 지점의 88/148 방향의 수직절리와 만나는 부분에서 약대를 형성시켜 층리면을 따라 이탈되어 붕괴가 발생된 것이다. 붕괴부 폭은 약 20 m 이며, 붕괴부 길이는 10 m, 붕괴부 깊이는 최대 3 m 이다. 87/076 방향의 수직절리의 경우, Mode Ⅰ 타입의 헤켈마크(hackle mark)가 발견되며(그림 23), 88/148 방향 수직절리면 내에는 석영세맥과 빗살구조(comb structure)가 발견되는 것으로 보아(그림 24), 수직절리는 지질작용의 산물로 판단되며, 지중에 지속적으로 존재할 수 있다고 판단된다. 붕괴 발생과 더불어 붕괴부 주변의 암반은 좌측 아래로 회전되어 지지력이 상실되었다. 붕괴부 주변 제3소단～제4소단 사이 법면의 잔존암반의 경우, 이완이 뚜렷하여 추가적인 붕괴가 발생될 가능성이 높을 것으로 판단된다.

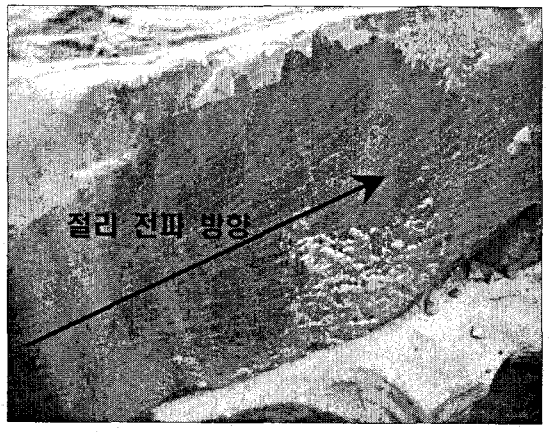

그림 23. 87/076 절리면 상의 헤켈마크

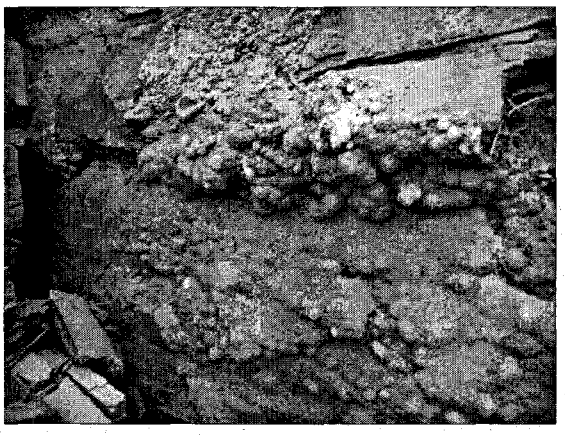

그림 24. 88/148 절리면 상의 빗살구조

5.2 안정성해석

불연속면 발달 방향의 안정성을 평가하기 위하여 평사투영법을 이용한 해석을 실시하였다. 평사투영법 해석에서는 대상암반의 마찰각이 요구되는데, 본 연구에서는 기존 문헌치, 실험결과, RMR 에 근거한 경험식을 활용하여 마찰각을 추정하였으며, 이에 최소의 마찰각 산출값인 20°를 사용하였다.

쐐기파괴 안정성해석에서는 모든 불연속면 대원의 교점이 쐐기파괴 발생가능영역에 도시되지 않아 안정한 것으로 나타났다. 또한, 평면파괴 및 전도파괴 안정성 해석에서도 모든 불연속면의 극점이 파괴영역에 도시되지 않아 안정한 것으로 나타났다(그림 25와 그림 26). 이러한 결과는 평면파괴가 발생된 층리의 경사가 마찰각보다 작기 때문에 나타난 결과로 안정해석결과만으로는 붕괴가 발생되지 않는다는 오류 판단을 할 수 있는 사례이다.

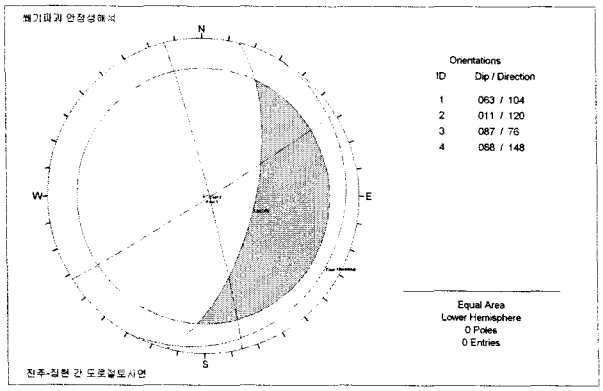

그림 25. 쐐기파괴 안정성 해석
(안정)

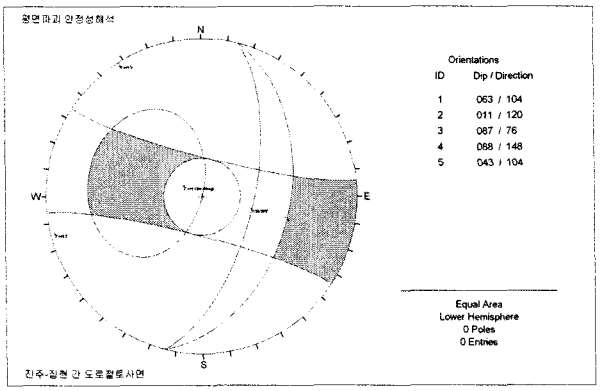

그림 26. 평면파괴 및 전도파괴 안정성 해석
(안정)

5.3 붕괴원인 및 소론

연구대상 사면 각각의 불연속면 발달 방향은 사면안정성 측면에서 안정한 것으로 평가되지만, 수직절리(파쇄대) 발달 구간을 중심으로 암괴 이완이 뚜렷하며, 수직절리의 연장선상을 따라 인장균열이 발생된 점 등 내적위험요인을 포함하고 있다. 또한 두꺼운 셰일층과 얇은 사암층의 반복 노출로 인하여, 구성 암석의 이질성에 기인한 불안정요소가 잠재되어 있는 상황이다. 즉 셰일층은 사암층에 비하여 풍화가 빠르게 진전되는 것이 특징이며, 이로 인하여 셰일층 내에서는 세굴 현상이 발생될 가능성이 높다.

진주 지역 절토사면은 앞서 기술한 영천 지역 절토사면과 붕괴양상이 유사하다. 진주 지역 절토사면의 경우, 층리의 경사가 영천 지역 절토사면 현장에 비하여 약 10°정도 완만하여 경사만 고려했을 때는 보다 안정적이라고 판단할 수 있다. 그러나, 본 사면의 경우, 퇴적암의 특징 차이가 뚜렷하여 차별풍화(differentiated weathering)라는 위험요인이 추가된 경우이다.

6. 결 론

일반적으로 알려진 붕괴 발생 이론을 벗어난 붕괴사면에 대하여 분석하고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강동 제1사면 사례를 통하여, 사면을 구성하는 불연속면의 발달 방향이 비록 안정적이라고 할 지라도, 풍화 침식에 의한 지반 열화로 붕괴가 발생되어 새로운 자유면이 형성될 경우, 새로운 자유면에 대한 불연속면 방향의 불안정성으로 인하여 2차 붕괴가 발생될 수 있다.
2. 강동 제2사면 사례를 통하여, 역방향으로 조성되어 안정하다고 판단되는 경우라도, 퇴적암 층리 구성 물질의 상대적인 차별풍화에 의해 지지력이 상실되어 붕괴가 발생할 수 있다.

3. 영천 지역, 진주 지역 절토사면 사례를 통하여 층리의 경사가 10~15°로 완만하여 안정하다고 판단할 지라도, 수직방향의 절리가 발달하는 부분에서는 위험블록이 형성될 수 있으며, 층리 불연속면의 지반강도가 약할 경우, 붕괴가 유발되기도 한다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2004) 2003년도 도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용. 건설교통부.
2. 한국건설기술연구원(2005) 울산-강동간 도로확장 및 포장공사 절토사면 안정성 해석 및 보강방안 제시. 삼성엔지니어링.
3. 한국건설기술연구원(2005) 진주-집현 간 도로확포장 공사 절토사면 안정성 해석 및 대책안 제시. 흥화공업.
4. Hoek, E. and Bray, J. W.(1981), Rock Slope Engineering, Institute of Mining and Metallurgy.
5. Priest, S. D.(1993), Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman & Hall.
6. Turner A.K., Schuster R.L.(1996) Landslides : Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, p.675.