

단층파쇄대지역에서의 암반사면 파괴특성 연구

이수곤, 최우일
서울시립대학교

1. 서론

일반적으로 대규모 단층대에서는 단층활동시의 영향으로 지질구조가 대체적으로 교란되어 있으며 그 단층파쇄대 주위로 파생되는 크고 작은 단층들로 인해 다른 지질특성을 보이는 지역보다 풍화 및 파쇄가 심하고 불규칙하여 절취사면 굴착시 또는 굴착후에 크고 작은 붕괴가 발생하는 것이 일반적임에도 불구하고 그 조사방법 및 안정성분석에 많은 어려움이 따른다. 이에 용인단층을 따라 시공 중인 OO-OO간 도로공사에서 대규모로 붕괴된 사면을 대상으로 정밀 지표지질조사를 통하여 각종 불연속면과 지반공학적 특성을 파악하고 기 조사된 자료와 실내시험 및 현장시험자료를 바탕으로 각종 해석프로그램을 이용하여 해석한 후 사면의 안정성 분석을 수행함으로써 단층파쇄대에서 조성되는 절취사면의 합리적인 조사방법 및 안정성 분석방법을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1 지반조사

본 지역의 지질은 편마암류와 편암류 및 이를 관입한 암맥들이 주로 분포하며 대규모 용인단층이 50km 이상의 연장선을 갖는다. 용인단층에 의해 파생된 수많은 크고 작은 단층들이 사면 전반에 걸쳐 나타나고 있으며 단층을 관입하는 암맥들도 다수 분포하기 때문에 이러한 단층이 사면의 안정성에 영향을 줄 것으로 판단 정밀 지표지질조사를 통하여 단층과 불연속면의 특성을 조사하였다.

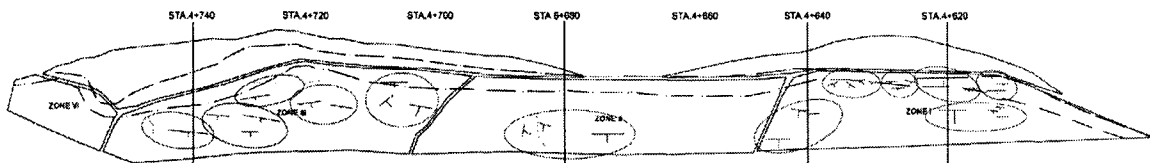
2.1.1 우측사면

조사사면은 용인단층의 방향과 사면의 주향이 비슷하게 절취되어 조사된 전 구간에서 용인단층에 의해 형성된 크고 작은 단층들이 많이 분포하고 있으며, 일부구간에서는 단층면을 따라 산성 또는 염기성 암맥이 후에 관입한 양상을 보이고 있다. 또한 조사구간에서 관찰되는 연장성이 비교적 작은 절리들 역시 단층활동 시에 파생된 불연속면으로 절리면이 단층면과 유사한 특성을 보이고 있다. 조사사면에 분포하는 암반은 대체적으로 편마암 내지는 편마암질 편암으로 편리가 단층활동에 의해 다양한 방향으로 교란되어 있고 비교적 엷리면이 단층면이다. 그밖에 산성암맥과 염기성 암맥이 일부구간에서 관입한 양상이 관찰된



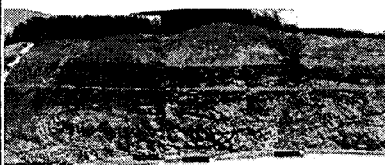
다. 풍화상태는 보통 보통풍화에서 심한풍화까지 다양한 양상을 보이고 있으며 점이적인 풍화상태이다. 하지만 본 사면에 분포하는 단층대에서는 풍화와 파쇄가 심하며 지하수의 유출도 심한 편이다. 본 사면의 암질상태 (RQD)는 파쇄가 심하기 때문에 하부 암반구간에서는 50~60%정도 상부 풍화암 구간에서는 10~40%로 매우 파쇄가 심한 편이다. 강도는 하부에서는 대부분 슈미트 해머 강도수치가 35~50정도로 연암을 나타내며 상부에서는 15~25 정도로 풍화암 정도의 강도특성을 나타내고 있다. 암반의 풍화상태는 약간풍화가 약 4%, 보통풍화가 전체의 약 40%정도 차지하며 심한풍화가 약 56%, 신선한 암반의 경우는 거의 없는 것으로 조사 되었다. 주로 심한풍화 또는 보통풍화가 가장 우세한 것으로 분석되었으며 이것은 단층파쇄대와 변성암지대에서의 복잡한 지질작용에 기인한 것으로 판단된다. 불연속면의 연장성은 상당히 불규칙하게 나타나고 있으나 사면과 비슷한 방향으로 40도의 경사를 단층과 수직단층면들이 20m 이상의 연장성을 가지는 특징이 보인다. 그 밖에도 전체적으로 다른 지역에 비해 매우 높은 연장성을 보이는데 이 역시 과거 지질시대의 단층활동에 기인한 것으로 추정된다. 불연속면의 간격은 엮리가 있는 변성암지대임에도 불구하고 20~60cm 간격이 가장 우세했다. 이는 암반구간에서 엮리면들이 단혀있어서 불연속면으로 간주되는 것들이 드물었기 때문에 여타의 변성암지대와는 다르게 비교적 간격이 넓게 나왔다. 그러나 단층에 의해 파쇄가 심한 구간들은 6~20cm 로 비교적 좁은 불연속면 간격을 나타내고 있다. 불연속면의 틈새는 매우 다양하게 벌어져 있는데 현장조사시 파괴가능성이 있는 것으로 보이는 절리면의 틈새는 대체로 많이 이완되어져 있는 것이 특징이다. 절리면들은 대개 산화철이 착색되어 있는 경우가 많으며 단층면에는 단층점토나 실트가 충전되어 있거나 fault gauge 등이 충전되어 있는 경우도 간혹 분포하며 편리방향의 절리에서는 보통 운모류같은 판상광물이 존재하는 것으로 관찰됐다. 지역에 나타나는 불연속면을 따라 지하수 유출은 보통 DAMP에서 WET 한 상태로 되어 있으며 특히 단층면을 따라 지하수 유출이 많은 것으로 나타났다.



(a) 지표지질조사 현황



(b) 위험 불연속면과 대표단면

		
<p>다른구간과 비교하여 비교적 암질이 양호하고 연장성 짧은 단층이나 절리들이 우세하며 지하수의 유출이 적음. 전반적으로 위험절리틈이 2~5mm 정도로 많이 이완되어 있어 전반적으로 소규모 내지 중규모의 평면파괴가 우세하나 좌측 상부에 일부 쉐기파괴 가능성 내포.</p>	<p>단층파쇄대 구간으로 파쇄가 심하고 풍화 역시 많이 진행되어 있음 단층들의 연장성이 매우 좋으며 일부 산성암맥이 관입해 있음. 지하수의 유출은 전반에 걸쳐 매우 많으며 특히 암맥의 경계부에서 집중적으로 유출된다. 사면의 높이는 비교적 작지만 단층면에 의해 대규모 내지는 중규모의 평면파괴 및 쉐기파괴가 예상된다.</p>	<p>암질은 다른구간과 비교하여 좋은편이나 연장성이 좋은 단층들이 잘 발달되어 있고 우측에 염기성 암맥이 관입하고 있음. 단층 또는 암맥 경계로 지하수의 집중적인 유출이 있음. 중규모 내지는 대규모의 평면파괴 및 쉐기파괴가 예상되며 특히 좌측부분에서는 사면 최하부에 사면경사방향으로 40°의 경사를 가진 단층면에 의해서 대규모 평면파괴가 진행중임.</p>
Zone I	Zone II	Zone III

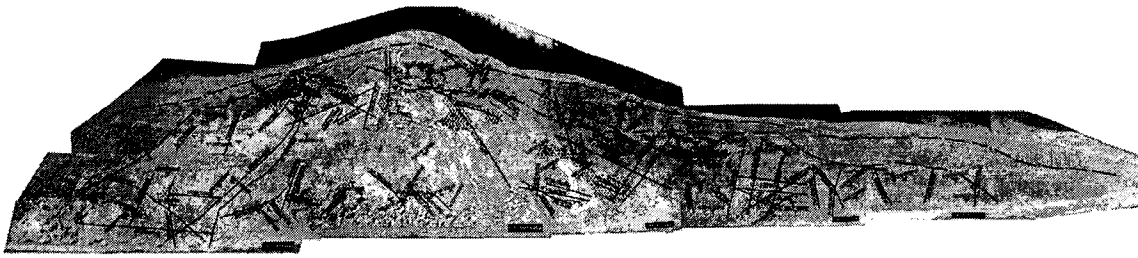
(C) 구간별 현황 및 파괴 가능성

그림 1. 우측사면 정밀지표지질조사 결과

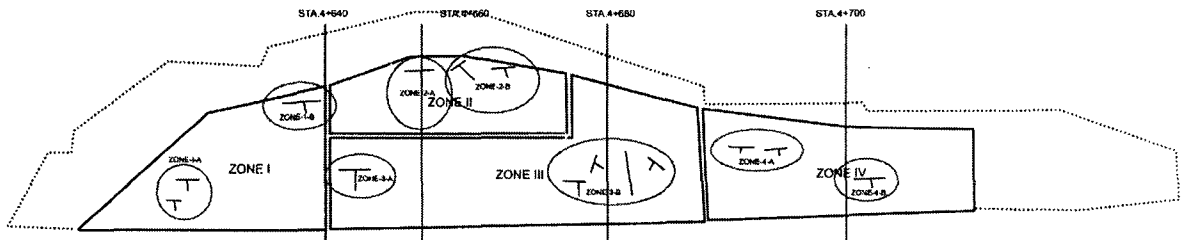
2.1.2 좌측사면

조사사면은 2소단부에서 대규모의 사면붕괴가 발생했으며 인접지역에 추가적인 붕괴가 진행 중이거나 가능성이 있다. 붕괴구간을 중심으로 좌측은 불연속면이 비교적 연장성이 작고, 틈이 단허었고, 또한 우측에 비해 신선한 암반이 존재한다. 반면에 우측은 연장성이 매우 긴 단층들이 매우 잘 발달되어 있으며 풍화도비교적 빠르게 진행되어 있다. 용인단층의 방향과 사면의 주향이 비슷하게 절취되어 조사된 전 구간에 걸쳐 용인단층활동에 의해 형성된 크고 작은 단층들이 많이 분포하고 있으며, 일부구간에서는 단층면을 따라 후에 산성 또는 염기성 암맥이 관입한 양상을 보이고 있다. 또한 조사구간에서 관찰되는 절리군들 역시 단층활동 시에 파생된 불연속면으로 절리면이 단층면과 유사한 특성을 보이고 있다. 풍화상태는 보통 보통풍화 (MW: Moderately Weathered)에서 심한풍화 (HW: Highly Weathered)까지 다양한 양상을 보이고 있으며 점이적이다. 암질상태(RQD)는 파쇄가 심하기 때문에 하부 암반구간에서는 40~50%정도 상부 풍화암 구간에서는 10~30%로 매우 파쇄가 심한 편이다.

암반의 강도는 하부에서 SHV: 40~55정도의 연암이상의 강도를 보이고 상부에서는 SHV: 15~20 정도의 풍화암 정도의 강도를 가지고 있으며 풍화상태는 약한풍화 6%, 보통풍화 60%, 심한풍화 34%로 보통풍화가 가장 우세하고 심한풍화가 다음으로 우세한 것으로 나타났다. 본 사면은 좌측에 비해 우측이 풍화와 파쇄가 심한 것으로 관찰됐다. 불연속면의 양상은 상당히 불규칙하게 나타나고 있으며 20m 이상의 연장성을 가지는 단층이 많이 분포하고 있으며 대부분의 절리들은 3~10m 정도의 연장성을 보인다. 편리방향은 단층에 의해 매우 교란되어 있다. 좌측사면 역시 엽리가 있는 변성암지대임에도 불구하고 20~60cm 간격이 가장 우세했다. 그러나 단층에 의해 파쇄가 심한 구간들은 6~20cm 로 비교적 좁은 불연속면 간격을 나타내고 있다. 불연속면의 틈새는 여타사면의 절리틈새보다 매우 심하게 이완되어 있는데 보통 1~5mm 정도가 가장 우세하게 관찰된다. 단층은 보통 1cm 이상으로 벌어져 있는 경우(점토 등의 충전물질이 존재함)가 대부분이다. 이 지역의 불연속면은 산화철이 착색되어 있는 불연속면들이 많으며 대개 단층면에는 점토나 실트가 충전되어 있거나 fault gauge 등이 충전되어 있다. 우측사면에 비하여 충전물의 비율이 높아 육안관찰시 더욱 더 위험한 양상으로 관찰된다. 본 지역에 나타나는 불연속면을 따라 지하수 유출은 보통 DAMP에서 WET 한 상태로 되어 있으며 단층면을 따라 지하수 유출이 많은 것으로 나타났다.



(a) 지표지질조사 현황



(b) 위험 불연속면과 대표단면

<p>다른구간에 비해서 비교적 암반이 신선하고 절리의 발달이 미약 단층면을 따라 일부 지하수 유출, 비교적 연장성이 짧은 단층면에 의해 소규모 평면파괴가 진행중이거나 가능성 내포, 최하부에 경암의 관입암 흔적</p> <p style="text-align: center;">Zone I</p>	<p>사면절취시 평면파괴에 의한 대규모 붕괴가 발생한 구간, 단층의 연장이 매우 길고 이완되어 있어 추가적인 붕괴예상, 단층면내에 열수변질광물 1cm 내외로 충전, 암맥경계 또는 단층면을 통해 지하수 유출</p> <p style="text-align: center;">Zone II</p>
<p>단층파쇄대로 파쇄가 심하고 풍화가 많이 진행, 관입경계면과 단층면을 통해 지하수가 매우 많이 유출, 대규모 내지는 중규모의 쉐기파괴와 소규모 내지는 중규모의 평면파괴 진행중 또는 가능성 내포</p> <p style="text-align: center;">Zone III</p>	<p>사면의 높이는 낮고 절리의 발달이 미약하나 조사사면구간에서 가장 풍화가 심함, 연장성이 짧은 절리에 의해서 소규모 평면파괴 가능성 내포</p> <p style="text-align: center;">Zone IV</p>

(C) 구간별 현황 및 파괴 가능성

그림 2. 좌측사면 정밀지표지질조사 결과

2.2 실내시험을 통한 토질 및 암석의 강도특성파악

현장 정밀조사를 통해서 사면 전반에 걸쳐 존재하는 위험절리군과 절리 및 풍화특성을 완전히 파악했다고 판단되면 실내실험과 현장시험 등으로 통하여 암석 및 암반의 강도 및 공학적특성을 파악해야 하는 과정이 필요한데 본 연구에서 아래와 같은 몇 가지 실험을 통하여 그 특성들을 규명하였다. 먼저 실내시험에서는 편마암이 가지는 편리구조에 따른 강도 특성을 분석하기 위하여 점하중 강도시험을 수행하여 편리방향에 평행한 경우와 수직인 경우 2가지의 강도특성을 분석하였다. 분석한 결과 편리구조에 수직과 수평으로 점하중시험을 실시한 결과 수평일 때의 강도가 적게 나왔으며 이러한 특징들을 해석시 적용하였다. 암석의 절리면 전단시험에서는 본 사면에서 빈번하게 나타나는 불연속면 사이로 충전물질이 끼여져 있으므로 절리면 전단시험을 수행하여 충전물이 끼여져 있는 경우와 충전물이 없는 경우를 분석하여 불연속면의 전단특성을 분석한 결과 충전물이 있는 경우에 점착력은 충전물이 없을 때보다 약 $1.5(t/m^2)$ 가 작게 측정 되었으며 내부마찰각은 약 10° 정도 낮게 측정되었다. 또한 본 사면에 나타나는 수많은 단층들을 고려하여 절리면에 산화철이 coated 되어 있는 편마암과 slicken-sided 편마암, 신선한 편마암을 나누어 채취하였으며 이러한 전단강도특성을 불연속면의 지반강도정수로 산정하여 한계평형 해석과 수치해석(UDEC)에 적용시켰다.

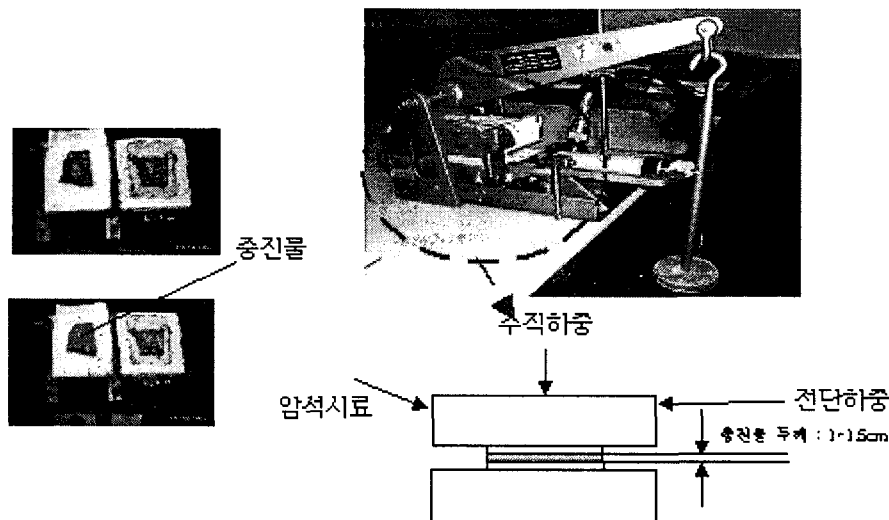


그림 3. 충전물을 포함한 불연속면의 전단강도 특성을 분석하기 위한 전단시험 전경

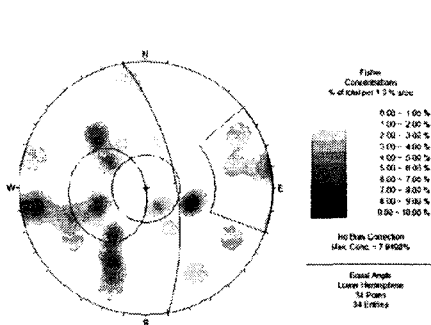
2.3 수치해석을 위한 지반강도정수 산정

복잡하고 불규칙적인 암반의 수치해석을 위한 강도정수는 각종 현장 실험과 실내실험의 결과를 비교 분석하여 결정하는데 본 사면의 지반강도정수 산정은 풍화잔류토층의 경우에는 토질/풍화암 전단시험에 의한 수치로 해석하였으며 암반에서는 RMR 분류와 Hoek &

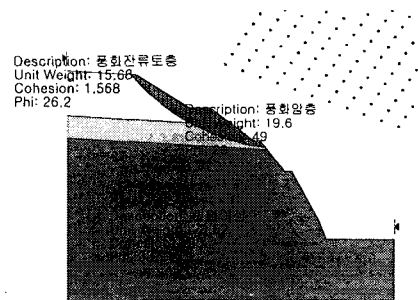
Brown 파괴기준식 해석결과의 비교분석을 통하여 산정하였으며 지반조사자료를 참고하여 가장 본 사면에 적합한 물성치를 산정하였다. 불연속면의 강도정수의 산정은 암석절리면 전단시험과 BARTON의 경험식을 사용하였으며 프로그램에 사용된 강도정수는 절리면 전단시험 결과를 사용하였다. 절리면은 산화철이 착색된 편마암과 단층활면(slickenside)이 포함된 편마암, 신선한 편마암의 절리를 채취하였다.

2.4 사면안정성 분석

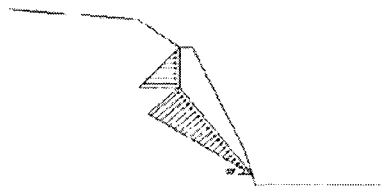
먼저 기 조사된 절리군들의 기하학적인 안정성을 검토하기 위하여 평사투영망과 켄기 파괴해석 프로그램인 SWEADGE를 사용하여 안정성을 검토하였다. 그리고 본 암반사면은 풍화와 파쇄가 심한 특징이 현저하여 원형형태의 파괴가능성도 같이 검토하는 것이 타당하다고 판단되어 원형파괴 프로그램인 SLOPE/W을 사용하여 안정성분석을 수행하였으며 연속체해석프로그램인 FLAC도 함께 사용하였다. 특히 불연속체적인 암반의 거동을 비교적 우수하게 해석한다고 알려진 불연속체해석 프로그램인 UDEC을 사용하여 절리면을 고려한 파괴영향을 검토하였다. 이에 적절한 암반모델링이 결정하는 것이 가장 중요한 핵심이라고 판단하였다. 이에 기존 조사된 FACE MAPPING 자료 및 현장DATA를 분석하여 본사면의 적절한 해석모델을 결정하였다.



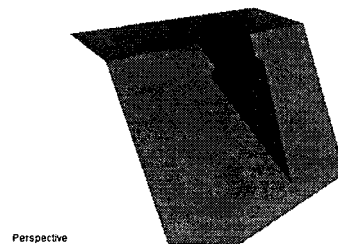
(a) 평사투영



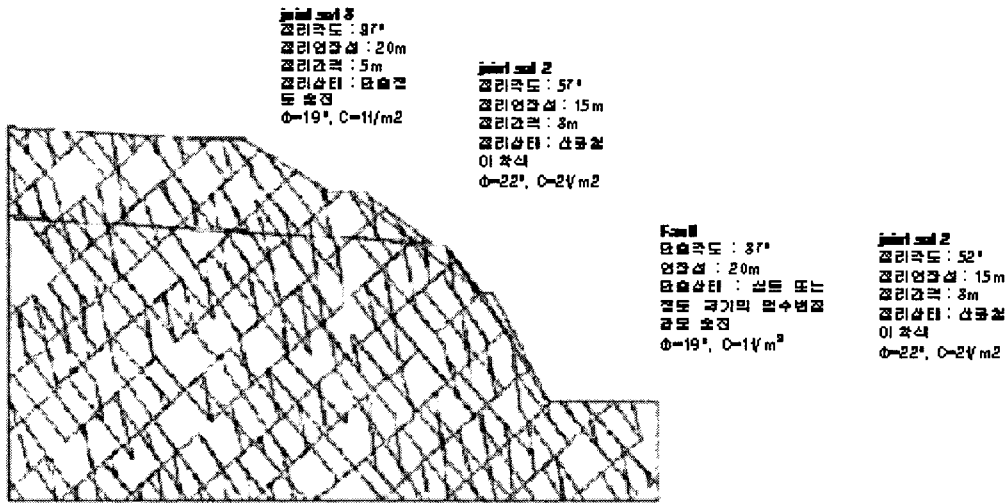
(b) SLOPE/W에 의한 원형파괴 해석



(c) 평면파괴해석



(d) SWEDGE에 의한 켄기파괴해석



(E) UDEC에 의한 직선파괴 해석

그림 4. 각각의 프로그램 해석 및 모델링

2.4.1 원형적인 파괴형태로 사면이 붕괴될 가능성을 검토

원형파괴 해석은 한계평형 해석프로그램인 SLOPE/W 와 연속체 사면의 수치해석프로그램인 FLAC을 사용하여 해석하였다. SLOPE/W 해석결과 좌·우측사면 모두 안전율이 건기시에는 대체적으로 안전측으로 나타났으나 우기시에서는 좌·우측사면 모두 풍화잔류토층에서 위험한 것으로 나타났다. 구배완화(1:1)후 해석에서는 좌측사면과 우측사면 모두 건기시와 우기시 안전율이 안전측으로 확보되었다.

2.4.2 직선적인 파괴형태로 사면이 붕괴될 가능성을 검토

직선적인 파괴해석에서는 평면파괴를 고려한 한계평형식을 사용하였으며 평면파괴 해석은 수계산으로 썩기파괴 해석은 SWEDGE 프로그램을 사용하여 해석하였다. 평사 투영 해석에 의해서 판단한 결과로서 평면파괴 및 썩기파괴 전도파괴의 구간을 나누어 각 단면과 위험불연속면군을 분석한 후 해석을 실시하였다. 평면파괴와 썩기파괴의 가능성이 있는 불연속면군들이 많이 분포하였으며, 용인단층에 의한 전도파괴의 가능성이 있는 불연속면군도 부분적으로 분포하였다.

우측사면에서는 도로쪽으로 40~55° 기울어진 절리 (연장성 2~6m)와 단층 (경사 : 35~40°, 연장성:20~30m)이 많이 발달하므로 현재 구배완화전의 사면에서 평면파괴와 썩기파괴의 가능성이 높은편이다. 그런데 1:1의 경사로 구배완화 후에는 대부분의 위험불연속면군들이 제거되지만 우측사면 STA.4+730~ STA.4 +750 구간에서는 대규모 평면파괴 가능성이 여전히 존재하게 되므로 이 구간은 재절취 후에 국부적인 보강방안이 필요할 것으로 판단된다.

좌측사면에서는 도로쪽으로 기울어진 절리 (경사:40~55°, 연장성:2~6m)와 단층 (경사:35~50°, 연장성:20m이상)이 많이 발달한다. 그러므로 평사투영 해석결과 현재 대규모로 이미 발생된 붕괴유형과 같은 평면파괴가 많이 발생할 것으로 나타났으며 또한 단층에 의한 썩기파괴 가능성도 있는 것으로 나타났다. 그런데 1:1의 경사로 구배완화 후에는 대부분 위험불연속면 군들이 제거되는 것으로 판단될 수도 있다. 그러나 본 지역에서 절리가 규칙적

으로 발달하는 지질 특성상 (부록 11의 UDEC 지질모델 참조) 1:1로 재절취한 후에 새롭게 형성되는 사면에서도 1:1 (45°) 경사이므로 완만한 35~40°의 경사인 절리와 단층들도 발달할 수가 있다. 또한 단층파쇄대의 특성상 1:1로 새롭게 형성되는 사면내에서 불규칙한 단층들이 노출될 수 있다. 그러므로 절취후에도 정밀한 사면지질조사를 다시 실시한 후 필요시 국부적인 보강을 검토하는 것이 바람직하다.

UDEC 에 의한 직선적인 파괴 해석에서 우측사면의 경우 건조상태의 경우는 변위 발생량도 적고 불평형력도 수렴하여 안전측으로 분석되었다. 우기시에는 지하수위를 만수위로 고려하면 단층 및 위험 불연속면을 따라서 변위가 커지고 불평형력이 수렴되지 않는 것으로 나타나 불안정측으로 분석되었다. 사면의 구배를 완화하였을 경우에는 건조상태시에는 안정측으로 나타나지만 우기시에는 불안정측으로 나타난다. 그러나 이는 사면 하부 Face의 얇은 블록에 의하여 발생하는 것으로 사면 재 절취 시공시에 제거되어 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 좌측사면의 경우 건조상태의 경우는 변위 발생량도 적고 불평형력도 수렴하여 안전측으로 분석되었다. 우기시에는 지하수위를 만수위로 고려하면 단층을 따라서 변위가 커지고 불평형력이 수렴되지 않는 것으로 나타나 불안정측으로 분석된다. 사면의 구배를 완화하였을 경우에는 위험 단층이 제거되어 건조상태나 우기시 양쪽 모두 대체적으로 안정측으로 판단되었다.

3. 결론

본 연구지역은 지질이 복잡하고 해석이 어려운 단층구간내 변성암사면이다. 이에 대한 해석단면결정 및 해석모델구성에 있어 최대한 객관적인 방법이 필요하였다. 이에 수차례의 정밀조사를 통한 세밀한 MAPPING자료와 실내,실외시험의 결과와 프로그램의 한계성을 적절히 조합하여 절리군생성하였으며 물성단면의 경계결정을 함으로써 현실성에 최대한 접근하려 노력하였다. 결과적으로 본 사면은 현 1:0.7의 구배시 단, 장기간의 안정성이 확보되지 않은 것으로 해석이 되었으며 이에 보강방안으로는 1:1 구배완화와 국부적인 파괴를 방지하기 위한 록볼트 보강방안이 안정성, 경제적인 측면, 현장여건 등을 고려해 볼 때 가장 적절한 보강방안으로 분석되었다. 특히 단층활동에 의해 다양한 방향의 불연속면이 발달하여 다른지역과 달리 좌우측이 모두 중규모 내지는 대규모 파괴를 내포하는 것이 조사지역의 특징이다. 이와같이 같은지역에서 조성되는 양쪽사면이라고 하더라도 단층파쇄대 지역에서는 서로 다른 지반특성을 나타내므로 사면 안정성 분석시 이러한 부분들을 면밀히 검토해야 한다.

또한 단층파쇄대 지역에서는 단층을 따라 발생하는 각종 풍화 및 지하수특성과 단층면에 존재하는 여러 가지 충전물(단층점토, clayey silt, 작은 암석알갱이 등이 충전됨)들이 사면의 안정성에 큰 영향을 미치기 때문에 지표지질조사를 통해서 충분히 조사하고 현장의 여건을 충분히 고려한 현장시험 및 실내시험을 통하여 지표지질조사와 비교, 분석하여 적절한 보강방안을 제시함으로써 복잡한 지질사면에 발생할 수 있는 여러 가지 파괴현상들을 미연에 방지할 수 있다고 생각한다.

참고문헌

1. 장기홍, 박병권, 1973, 오산도폭 설명서, 국립지질조사소
2. Hudson J.A & Harrison J.P, 1997, Engineering Rock Mechnics *Elsevier Science Ltd The Boulevard, Langford Lane Kidington, Oxford UK* pp113-140
3. 이수곤, 금동현, 2001, 단층파쇄대의 사면안정성 연구 한국지반공학회 봄 학술발표대회 논문집 pp183-190
4. 이수곤, 1994, “암석과 불연속면의 분류 및 공학적 특성”, 토목시공 고등기술강좌(series III), 대한토목학회, pp.253-338