

## 복잡한 지질의 대규모사면 안정성연구

### A study Analysis of large-scale slope with complicated geological structure

이수곤<sup>1)</sup> Lee, Su Gon, 손경철<sup>2)</sup> Son, Kyoung chul

<sup>1)</sup>서울시립대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul

<sup>2)</sup>서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Doctor's Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Seoul.

**synopsis** : Generally gneiss regions catagolized as metamorphic ground are very complicated and difficult for geotecnical engineer to establish stability, this slopes include falt zone and many folding structures. therefore the slope in this study is very complicated and highly wheathered and framentation conditions are irregular.

by this study, we hope that geotechnical engineers who are confronted with the same complicated slope as this slope are doing his job easily and they know which system are adequate to establish the slope stability in large-scale slope with complicated geological structure, and besides through our work flow and modeling prosess , we hope that our study can be useful for geotecnical engineer who may work slope design and construct in complicated ground.

Key words: gneiss regions, slope stability, fault zone, folding, complicated

## 1. 서 론

일반적으로 변성암인 편마암 지역은 변성작용에 의한 습곡과 단층작용의 영향으로 지질구조가 대체적으로 교란되어 있다. 또한 대규모 단층대가 존재하고 있으며 그 단층파쇄대 주위로 파생되는 크고 작은 단층들로 인해 다른 지반구조를 가진 사면보다 풍화 및 파쇄가 불규칙하여 사면의 안정성 분석에 큰 어려움이 있다. 이에 본 사면은 지질구조가 복잡한 경기편마암지역내 존재하고 높이30m, 폭200m의 대규모사면이며 사면내부에서 수많은 단층이 교차하고 지질이 매우 복잡하여 효과적으로 안정성 분석을 수행하기 위해서는 어떻게 이러한 사면을 mapping하고 또한 어떻게 정밀 지표지질조사를 수행해야하는가 그리고 기 조사된 자료들을 가지고 어떻게 모델링하여 최종 안정성해석을 수행하는가의 과정이 매우 어렵다. 이에 본 대상 사면의 해석과정을 제시함으로써 앞으로 복잡한 지질의 대규모 단층파쇄대지역내에 존재하는 사면해석시 도움이 되고자 하는 것입니다.

## 2. 정밀 지반조사를 통한 단층파쇄대 지역의 지반공학적 특성파악

본 지역의 지질은 편마암류와 편암류 및 이를 관입한 암맥들이 주로 분포하며 대규모 용인단층이 50km이상의 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 좌측사면의 지반공학적 특성파악

본 사면의 불연속면은 NS방향의 주절리와 EW방향의 절리와 사면주향과 일치하며 80~90°정도의 수직인장절리가 상부에 발달하고 있다. 이 주 방향 불연속면들은 사면 내 수많은 썩기 파괴를 생성하고

있으며 절리 간격이 좁기 때문에 썩기 파괴가 연속적으로 발생할 것으로 보인다. 연장성이 30m이상의 긴 단층이 사면 앞 방향으로 기울어져 발달하기 때문에 대규모평면파괴의 가능성이 있으며 특히 다수의 암맥과 단층이 관입하는 파쇄대구간의 불연속면은 절리면 사이에 전단강도가 매우낮은 단층점토가 충전되어 더욱 위험하다. 풍화상태는 보통 보통풍화에서 심한풍화까지 다양한 양상을 보이고 있으며 강도가 약한 연암수준의 모암과 그 사이에 분포하는 풍화암 정도의 강도를 가지고 있는 단층파쇄대 구간이 양 옆으로 크게 분포하고 있다. 또한 파쇄대를 통하여 산성암맥이 관입되어 있어 풍화 및 파쇄의 상태가 복잡하다. 본 사면의 암질상태(RQD)는 파쇄와 풍화가 심하기 때문에 하부 암반구간에서는 25-35%정도 상부 풍화암 구간에서는 10~30%정도로 매우 파쇄가 심하며 각 불연속면에서는 지하수의 유출이 심한 편이다. 암석의 강도는 대부분 낮은 편이며 특히 단층파쇄대주변은 슈미트해머 수치가 나오지 않은 곳이 파쇄대의 60%이상인 것으로 조사되었다. 본 사면에 나타나는 암반의 풍화상태는 심한 풍화가 약 70%, 보통풍화가 약 30% 정도 차지하며 신선한 암반은 부분적으로만 나타나는 것을 알 수 있다. 본 좌측 사면은 우측사면에 비해 풍화와 파쇄가 심한 것으로 나타났다.

대부분의 절리들은 5~10m 정도의 연장성을 가지고 있다. 본 구간의 불연속면의 간격은 대체로 20~60cm의 간격이 많이 나타나고 있다. 이것은 관입된 관입암이 많이 분포하기 때문으로 판단된다. 본 연구지역의 불연속면의 틈새는 대체적으로 벌어져 있는데 일반적으로 0.1mm~0.2mm정도 벌어져 있는 불연속면이 많으며 1cm이상으로 벌어져 있는 경우(점토등의 진물질이 존재함)도 간혹 분포한다.

이 지역은 산화철이 착색되어 있는 불연속면들이 많으며 간혹 단층면에는 점토나 실트가 충전되어 있거나 fault gouge 등이 충전되어 있는 경우도 간혹 분포한다. 우측사면에 비하여 충전물이 없는 불연속면의 비율이 높는데 이것은 하부에 분포하는 관입암 때문인 것으로 판단된다.

본 지역에 나타나는 불연속면을 따라 지하수 유출은 보통 DAMP에서 WET한 상태로 되어 있으며 단층면을 따라 지하수 유출이 많은 것으로 나타났다. 건기일이 많이 지나도 계속해서 용출이 일어나는 단층활면을 발견할 수 있는데 이는 평면파괴에 지대한 영향을 미칠 것으로 생각된다.

## 2.2 우측사면의 지반공학적 특성과악

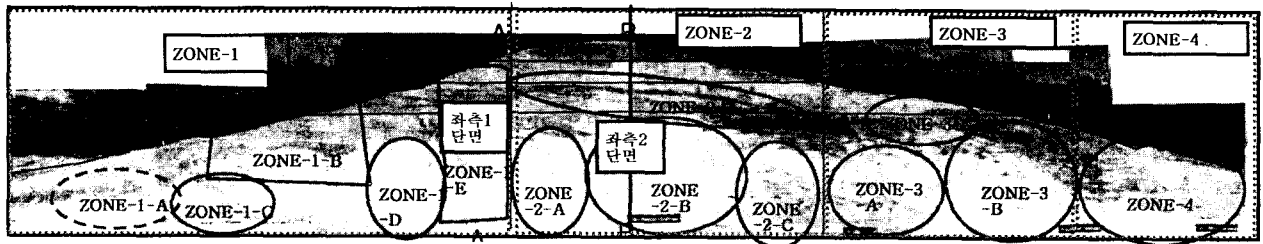
본 사면 또한 용인단층에 의한 영향을 생긴 연장성이 긴 단층들이 교차하여 불안한 지질 구조를 만들고 있으며 그에 따른 절리군의 생성되어 복잡한 사면 구조를 지니고 있다. 하지만 뚜렷하게 사면 앞방향으로 기울어진 엽리면들이 연장성이 20m이상으로 35~45°정도로 기울어져 발달하여 이에 따른 소규모 및 대규모의 평면파괴가 예상되는 바이다. 본 사면의 불연속면은 좌측사면과 비슷한 방향성을 가지고 있어 NS방향의 주절리와 EW방향의 절리와 사면주향과 일치하면서 80~90정도의 수직인장절리가 발달하고 있다. 엽리의 방향은 사면내 복잡한 지질작용에 의해 사면 전반에 걸쳐 많은 변화를 보이고 있으나 대부분 사면 앞쪽으로 기울어져 평면파괴발생의 가능성을 가지고 있다. 대부분이 썩기모양의 평면파괴를 일으키는 것으로 판단된다. 풍화상태는 보통 보통풍화에서 심한풍화까지 다양한 양상을 보이고 있으며 연암이상의 강도를 가지는 모암과 그 사이에 분포하는 풍화암 정도의 강도를 단층파쇄대 구간 사면중앙부에 있으며 파쇄대를 통하여 산성암맥이 관입되어 있어 풍화상태가 복잡하다. 본 사면의 암질상태(RQD)는 파쇄와 풍화가 심하기 때문에 하부 암반구간에서는 35-45%정도 상부 풍화암 구간에서는 10~30%정도로 매우 파쇄가 심하며 불연속면사이에 물의 유동이 많아 거의 대부분의 절리표면이 산화철로 착색되어 전단강도의 저하를 보인다.

또한 본 사면에서는 하부에서도 슈미트 해머강도 SHV: 30~40 정도인 연암이상 강도를 가지는 편마암과 SHV:20이하의 풍화암수준의 강도를 가지는 단층파쇄대와 상부에서는 SHV: 15-20 정도의 풍화암 정도의 강도를 가지고 있으며 상부소단은 편마암의 잔류구조를 가지는 암반으로 이루어져있는데 이의 슈미트해머강도가 나오지 않았다. 그리고 암반의 풍화상태는 하부가 심한풍화가 약 50%, 보통풍화가 약 50% 정도 차지하며 2소단이상은 심한풍화가 80%이상으로 풍화암층임을 알수 있었다. 본 구간의 절리들의 간격은 대체로 30~100cm의 간격이 많이 나타나고 있다 대규모 단층군은 약 2~3m간격으로 존재하고 있다.

이 지역의 불연속면의 틈새는 대체적으로 벌어져 있는데 일반적으로 0.1mm~0.2mm정도 벌어져 있는 불연속면이 많으며 1cm이상으로 벌어져 있는 경우(점토등의 충전물질이 존재함)도 간혹 분포하며 본 지역의 불연속면은 산화철이 착색되어 있는 불연속면들이 많으며 간혹 단층면에는 점토나 실트가 충전되어 있거나 fault gauge 등이 충전되어 있는 경우도 간혹 분포한다. 본 사면은 전체가 대부분 wet한 상태이나 용출이 심하지는 않다.

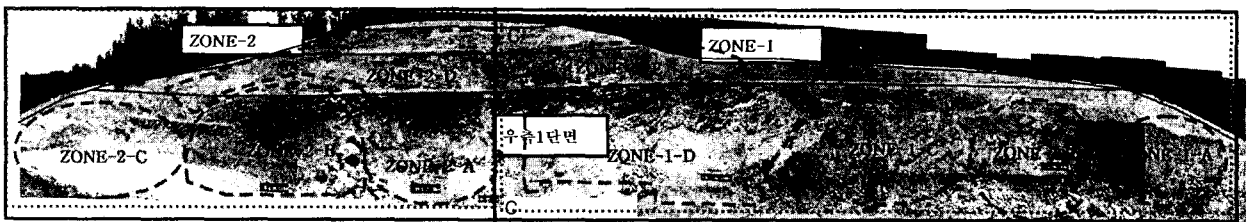
### 2.3 정밀지표지질조사 결과

수차례의 정밀 관찰을 통하여 본 좌우측사면구간별 특징을 명확히 파악하여 정리하였는데 이를 토대로 본 사면의 특징 및 모델링을 결정하였다.



<p>■ZONE-1-B: 단층할면이 크게 지나가고 있다.상부의 대규모 정면파괴의 가능성</p>	<p>■ZONE-1-E: 풍화와 파쇄가 극심하여 하부가 붕괴될 가능성이 있으며 상부의 암반이 연속적으로 붕괴될 가능성이 높다.</p>	<p>■ZONE-2-A: 하부의 암리가 붕괴 평면파괴를 일으킨 수 상부의 지지력을 잃은 암리가 전도하여 붕괴될 가능성이 있다.</p>	<p>■ZONE-2-C: 하부의 암리가 붕괴 평면파괴를 일으켜 붕괴될 수 있다.</p>	<p>■ZONE-3-A: 단층이들 상하 좌우로 끊어져 있는 불안한 지층구조를 이루고 있다.</p>
<p>■ZONE-1-D: 풍화와 파쇄가 극심하여 하부가 붕괴될 가능성이 있다.</p>		<p>■ZONE-2-B: 대규모 체기파괴의 가능성이 높다.</p>	<p>■ZONE-2-A(2소단): 상부에 완전토사화된 암석층이 위험을 더하고 있다.</p>	<p>■ZONE-3-B: 지하수가 계속 흘러내리고 있다.</p>

그림 1 좌측사면의 정밀지표지질조사 결과



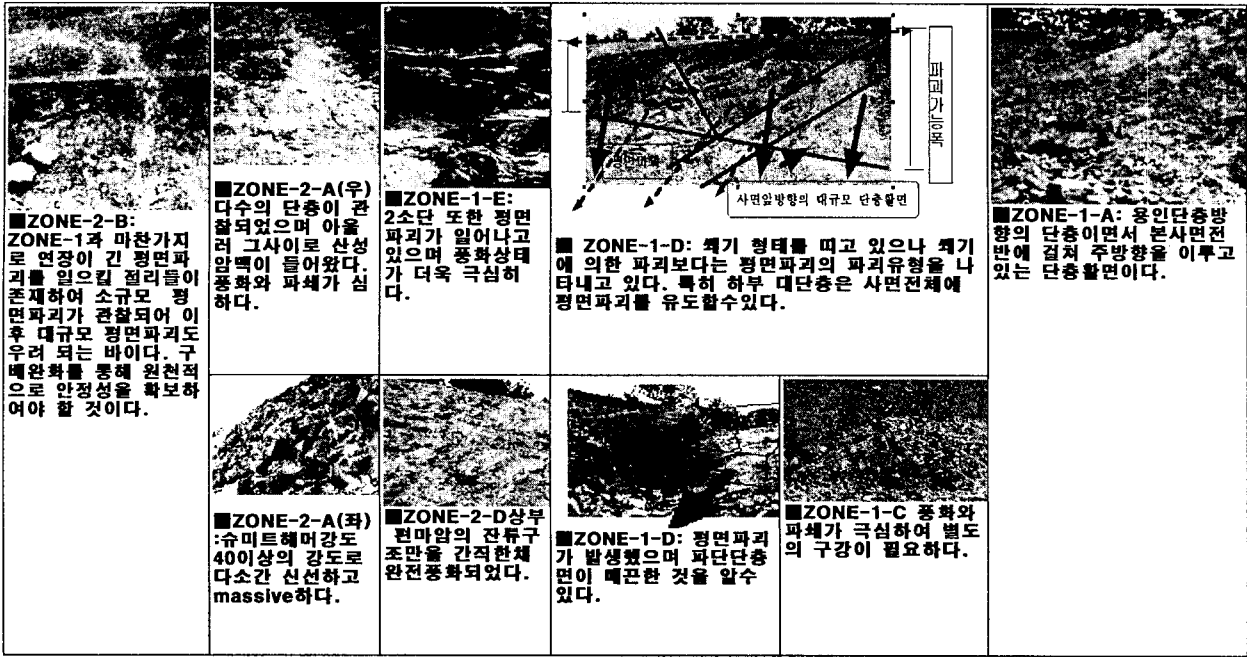


그림 2 우측사면의 정밀지표지질조사 결과

### 3. 실내시험을 통한 토질 및 암석의 강도특성과악

현장정밀조사를 통해서 사면 전반에 걸쳐 존재하는 위험절리군과 절리 및 풍화특성을 완전히 파악했다고 판단되면 실내실험과 현장시험등으로 통하여 암석 및 암반의 강도 및 공학적특성을 파악해야 하는 과정이 필요한데 본 연구에서 아래와 같은 몇가지 실험을 통하여 그 특성들을 규명하였다. 먼저 실내시험에서는 편마암이 가지는 편리구조에 따른 강도특성을 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  $10^\circ$  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. 다음으로는 현장 실험이 있는데 현장 Tilt Test와 슈미트반발강도 시험이 있다.

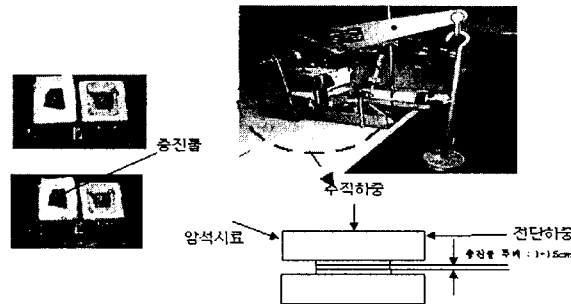


그림 3 충전물을 포함한 불연속면의 전단강도 특성을 분석하기 위한 전단시험 전경

#### 4. 수치해석을 위한지반강도 정수 산정

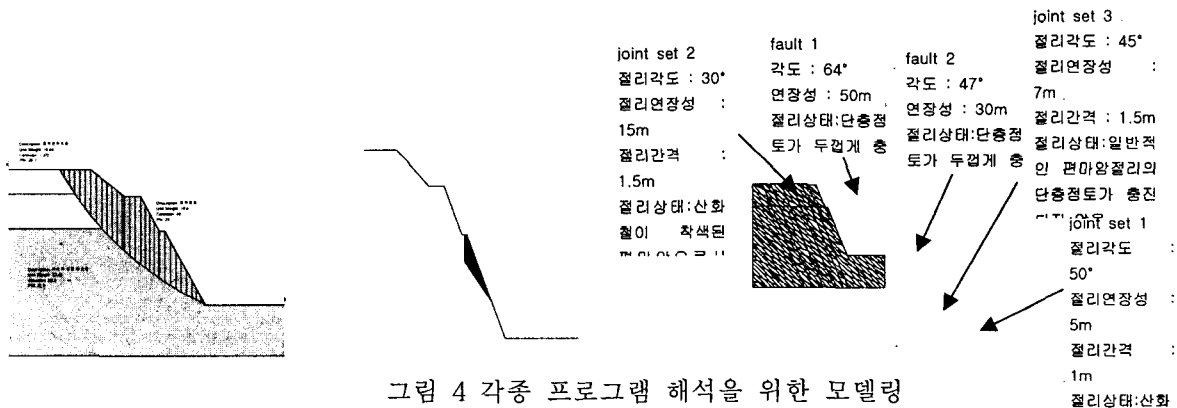
복잡하고 불규칙적인 암반의 수치해석을 위한 강도정수는 각종 현장 실험과 실내실험의 결과를 비교 분석하여 결정하는데 본 사면의 지반강도정수 산정은 풍화잔류토층의 경우에는 토질/풍화암 전단시험에 의한 수치로 해석하였으며 암반에서는 RMR 분류와 Hoek & Brown 파괴기준식 해석결과의 비교분석을 통하여 산정하였으며 지반조사자료를 참고하여 가장 본 사면에 적합한 물성치를 산정하였다. 불연속면의 강도정수의 산정은 암석절리면 전단시험과 BARTON의 경험식을 사용하였으며 프로그램에 사용된 강도정수는 절리면 전단시험 결과를 사용하였다. 절리면은 산화철이 착색된 편마암과 단층활면(slickenside)이 포함된 편마암, 신선한 편마암의 절리를 채취하였다.

#### 5. 사면안정성 분석

먼저 기 조사된 절리군들의 기하학적인 안정성을 검토하기 위하여 평사투영망과 쉐기파괴해석 프로그램인 SWEADGE를 사용하여 안정성을 검토하였다. 그리고 본 암반사면은 풍화와 파쇄가 심한 특징이 현저하여 원형형태의 파괴가능성도 같이 검토하는 것이 타당하다고 판단되어 원형파괴 프로그램인 SLOPE/W를 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.

##### 5.1 각종 프로그램 해석시 적용된 해석단면

본 연구대상인 좌우측사면은 정밀 조사결과 대표적인 3개의 단면으로 해석이 가능하다고 판단되었다. 즉 이 3개의 단면으로 본 좌우측사면의 안정성 해석이 충분하다고 판단되었다. 그중 좌측 1단면만을 예로 들기로 한다.



##### 5.2 원형적인 파괴형태로 사면이 붕괴될 가능성을 검토

원형파괴 해석은 한계평형 해석프로그램인 SLOPE/W와 연속체 사면의 수치해석프로그램인 FLAC을 사용하여 해석하였다. SLOPE/W 해석결과 우측사면에서는 안전율이 건기시 대체적으로 안전측으로 분석되었으나 우기시에서는 대부분의 층에서 위험한 것으로 분석되었다. 우측사면에서 또한 건기시에서는 대체적으로 안전측으로 분석되었으나 우기시에서는 전체적으로 위험한 것으로 분석되었다. 구배완화

(1:1)후 해석에서는 좌측사면과 우측사면 모두 건기시와 우기시 안전율이 안전측으로 판단되었으나 부분적인 층에서 약간 불안정한 곳이 존재하였다. FLAC 해석결과 우기시 좌측사면과 우측사면에 구배완화 전에서는 소성영역 및 변위가 상당히 큰 것으로 나타났지만 구배완화(1:1)후에서는 불평형력이 수렴하였으며 사면의 안정성에 영향을 미치는 소성영역이 발달하지 않아 비교적 안전측으로 판단되었다.

### 5.3 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. UDEC 에 의한 직선적인 파괴 해석에서 좌측사면과 우측사면은 구배완화 전 해석에서 우기시 불평형력이 수렴되지 않고 소성영역이 사면전반에 발생되어 위험측인 것으로 분석되었으나, 구배완화후(1:1)에서는 불평형력이 모두 수렴되었으며 사면의 안정성에 영향을 미치는 소성영역도 크게 줄어 대체로 안전측으로 분석되었다.

## 6. 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,실외실험의 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 썩기파괴를 방지하기 위한 록볼트 보강방안이 안정성, 경제적인 측면, 현장여건 등을 고려해 볼 때 가장 적절한 보강방안으로 분석되었다.

이와 같이 같은 지역에서 나타나는 사면이라고 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. Hudson J.A & Harrison J.P (1997) Engineering Rock Mechanics *Elsevier Science Ltd The Boulevard, Langford Lane Kidington, Oxford UK* pp113-140
2. 이수곤,금동현(2001) 단층파쇄대의 사면안정성 연구 한국지반공학회 봄 학술발표대회 논문집 pp183-190
3. 이수곤, "암석과 불연속면의 분류 및 공학적 특성"토목시공 고등기술강좌(seriesⅢ),대한토목학회 1994,pp.253-338