

## 암반구조물에서의 불연속면에 의한 붕락 및 붕괴 문제

박남서<sup>1)</sup>, Nam-Seo Park

<sup>1)</sup>대덕공영 주식회사 사장, President, Daeduk Consulting & Construction Co.

### 1. 서 언

자연상태의 암반은 암석으로 구성되어 있으며 여기에 공기나 물, 토사 또는 광물 등으로 채워진 균열을 내포하고 있는 복잡한 구성체이다. Knill(1976)은 이러한 암반의 공학적 특성을 표현하는 흥미로운 방정식을 제시한 바 있다.

$$\text{Material properties} + \text{Mass fabric} = \text{Mass properties}$$

암반의 역학적 성질은 암석의 광물조성 및 배열, 경도, 고화도 등과 같이 암반을 구성하는 암석 자체의 성질과 암반 내에 형성된 불연속면과 같은 지질 구조적 요인에 의해 지배된다고 할 수 있다. 이러한 불연속면에 의해 암반은 암괴로 분리되며 이로 인해 암반의 공학적 특성이 결정된다. 일반적으로 불연속면의 강도는 암석의 강도보다 약하므로 암반 파괴의 주 요인이 되며, 또한 불연속면 틈새의 압축에 의한 변형이 암반 압축변형의 주 요인이 된다.

### 2. 불연속면의 정의

불연속면이란 “암반 내에 존재하는 인장강도가 작거나 또는 거의 없는 역학적 불연속면의 총칭”(ISRM)이다. 불연속면에는 단층, 절리, 층리, 엽리, 벽개 등이 있으며 일반적으로 이들 전체를 통칭하여 균열(fracture)이라고도 한다.

#### ■ 단층(fault)

- 압축, 인장 또는 비틀림 등 지구조적 운동에서 기인한 전단파괴에 의해 형성된 면으로서 연장은 수 m에서 수백 km까지 다양하다.
- 이 면을 중심으로 양측의 암반에 상대적인 변위가 있으며 변위량은 수 mm에서 수 km에 이르기도 한다.
- 파괴면은 전단에 의해 매끄러운 면을 형성하기도 하는데 이 면을 단층경면(slickensides)이라 하며 강도가 잔류강도 수준에 불과하여 매우 취약하다.
- 단층을 따라 파괴가 반복되면 각력이나 점토로 충전된 파쇄대를 형성하는 경우가 많으며 토목구조물에 대규모의 파괴를 일으키는 요인이 되기도 한다.

#### ■ 절리(joint)

- 움직임이 매우 작거나 거의 없는 암반 내의 갈라진 면으로 대부분의 암반에서 가장 흔하게 발견되는 불연속면이다.
- 절리는 흔히 여러개가 함께 형성되며 이 중 유사한 방향성과 경사를 가지고 배열된 절리들을 절리조

또는 절리군(Joint set)이라 하며 거의 일정한 각으로 교차되는 두 개 이상의 절리군들을 절리계(Joint system)라 한다.

- 절리는 그 개개의 측면에서는 구조물에 영향을 미치는 경우가 드물지만 집합체로 되면 지배적으로 구조물의 안정성에 영향을 미친다.
- 단층에 비해 암반내에 매우 높은 빈도로 존재하므로 조사 및 평가에 있어 통계적 기법을 활용할 필요가 있다.

■ 층리면(bedding plane)

- 퇴적물이 층상으로 쌓여 만들어진 면으로 퇴적물의 광물조성, 조직, 경도, 응결 정도, 색 등의 차이로 인해 형성된다.
- 층리면을 경계로 상·하의 층이 완전히 밀착될 수도 있으므로 항상 불연속면을 형성하는 것은 아니다.

■ 벽개(cleavage)

- 습곡작용에 의한 응력 등으로 인하여 암석이 밀접한 간격의 면상구조를 따라 쪼개져서 형성된다.
- 주로 세일이나 점판암에 발달하며 일반적으로 간격이 매우 좁다.

■ 엽리면(foliation)

- 변성과정 중에 광물의 입자가 판상으로 재배열하여 형성된다.
- 개구성 절리의 형태로 존재하기도 하나 틈이 없이 단지 방향성만 보이는 경우도 있다.

위에 살펴본 불연속면 중 벽개, 엽리 등은 대체로 일반 구조물에 비해 그 규모가 작고 암반보다는 암석의 성질로 취급될 수 있으나 단층이나 절리는 암반의 공학적 특성을 규정하는 중요한 요인이 된다.

### 3. 불연속면과 지반의 변형

#### 3.1 암반의 변형성

암반의 변형은 암석 자체의 변형과 불연속면에 의한 변형의 합으로 볼 수 있다. 여기서 불연속면에 의한 변형은 불연속면의 폐합이나 개구, 불연속면을 따르는 미끄러짐 등에 의해 발생한다.

암반이 풍화변질을 받아 연약해질 경우 응력이 작용하면 암반의 거동상태는 불연속면 상태보다는 암석 자체의 상태에 영향을 받는다. 또한 신생대 제3기 퇴적암 등과 같이 완전 고화되지 않은 연질암은 암석의 구성입자의 결합력이 약하기 때문에 암질 재료 내부에서 변형이 발생하기 쉽고, 따라서 암반의 변형성은 비교적 암석의 변형성에 지배되기 쉽다. 그러나 신선한 화강암과 같은 경질 암반은 암석의 구성입자 사이의 결합력이 매우 강하므로 암석 자체의 변형에 의해서 보다는 절리로 대표되는 불연속면에 의해 변형이 일어난다.

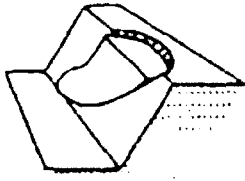
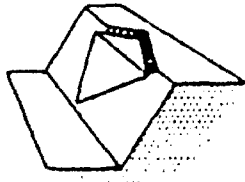
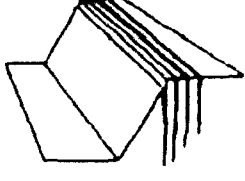
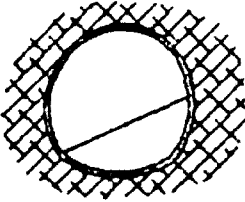
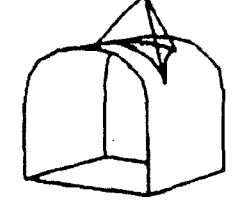
이와 같이 암반의 변형에 미치는 불연속면의 역할은 매우 크며 이 불연속면의 특성요소가 암반 변형에 미치는 영향으로는 주로 다음과 같은 것을 들 수 있다.

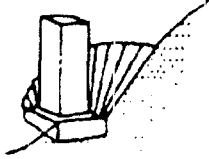
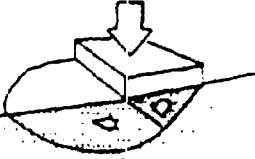
- 방 향 성 : 변형의 방향을 지배한다.
- 연 속 성 : 변형 범위를 지배한다.
- 간 격 : 변형량에 영향을 미친다.
- 틈 새 : 폐합할 때에 초기 개구폭이 변위량을 지배한다.
- 충 전 물 : 협재물의 변형성이 폐합할 때에 변위량을 지배한다.
- 거 칠 기 : 전단에 따라 dilatancy를 발생시킨다.
- 연 결 성 : 불연속면으로 둘러싸인 압괴의 변위에 대한 자유도를 지배한다.

### 3.2 불연속면에 의한 토목 구조물의 변형

암반에 하중이 가해지거나 또는 굴착에 의해 구속상태에 있는 부분이 제거되면 불연속면을 따라 변형이 발생한다. 변형은 불연속면뿐만 아니라 굴착방법, 굴착 규모, 굴착 중 지보방법, 지하수의 영향 등 여러 가지 복합적인 요인에 의해서 발생하나 사면, 터널 및 기초지반에서 불연속면과 관련하여 발생하는 대표적인 파괴의 형태와 영향 요인을 정리하면 다음과 같다.

표 1. 암반 구조물에서의 파괴의 형태 및 영향 요인

구 조 물	파 괴 형 태	주 영 향 요 인	
토사면 또는 파쇄 심한 암사면		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 토사면이나 파쇄가 심한 암사면에서 스푼 모양의 원호파괴면을 형성함</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사면 높이 및 경사각</li> <li>• 파괴면을 형성하는 물질의 전단강도</li> </ul>
절리가 발달한 암사면		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 불연속면이나 불연속면들의 교차선을 따른 평면 파괴 및 썩기 파괴</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사면 높이, 경사각 및 방향</li> <li>• 불연속면의 주향 및 경사</li> </ul>
수직절리가 발달한 암사면		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사면에 평행한 방향으로 발달하는 고경사의 불연속면에 의해 분리된 암괴의 전도파괴</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사면 높이, 경사각 및 방향</li> <li>• 불연속면의 주향 및 경사</li> </ul>
연암층내의 터널		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 과도한 응력 집중에 의한 암반의 파괴</li> <li>• 부적절한 지보에 의한 암반의 변형</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 암반 및 지질구조의 강도</li> <li>• 특히 퇴적암 지역의 지반 팽창 가능성</li> </ul>
절리가 발달한 터널		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 지질불연속면들의 조합에 의한 암괴의 중력 낙하</li> <li>• 부적절한 표면처리에 의한 암반의 붕락</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 암반 내 불연속면의 주향, 경사 및 전단강도</li> <li>• 굴착면 형태 및 굴착 방향</li> </ul>

<p>암사면 위의 기초</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 과도한 기초 하중에 의한 사면 파괴</li> <li>• 기초 암반의 역학적 이방성에 의한 부등침하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 기초를 형성하는 암반 내 불연속면의 전단강도 및 주향 경사</li> <li>• 변형에 대한 이방성을 보이는 층이 경사를 가지고 존재하는 경우</li> </ul>
<p>풍화암 혹은 토사 위의 기초</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 풍화암 혹은 토사의 전단강도를 초과하는 과도한 기초 하중</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 풍화암 및 토사의 전단강도</li> <li>• 기초의 하중 재하 상태</li> </ul>

### 3.3 응력분포에 대한 불연속면의 영향

불연속면이 형성되어 있는 지반에서의 응력분포는 Boussinesq 방법을 적용할 수 없다. 다음 그림은 규칙적인 불연속면이 발달하는 비등방성 암석에서의 응력분포를 보여주는 그림으로 Gaziev & Erlikman(1971)에 의한 모델실험의 결과이다. 응력분포의 형태는 불연속면의 경사와 내부마찰각과의 관계에 의해 좁고 깊게 변형된다.

불연속면이 수평인 경우 응력의 분포 범위는 좁아지고 심도는 깊어진다. 45° 이하의 경사에서는 대부분의 응력이 경사에 수직인 방향으로 움직이고 경사방향으로는 작은 양이 분포한다. 45° 내외의 경사에서는 경사 및 경사에 직각인 두 방향으로 분포가 거의 같으나 경사방향으로의 분포가 상대적으로 좁다. 45° 이상의 경사에서는 경사방향의 분포가 신장되는 형태이며 수직 불연속면에서는 분포범위가 상당히 좁아지고 영향 심도가 깊어진다.

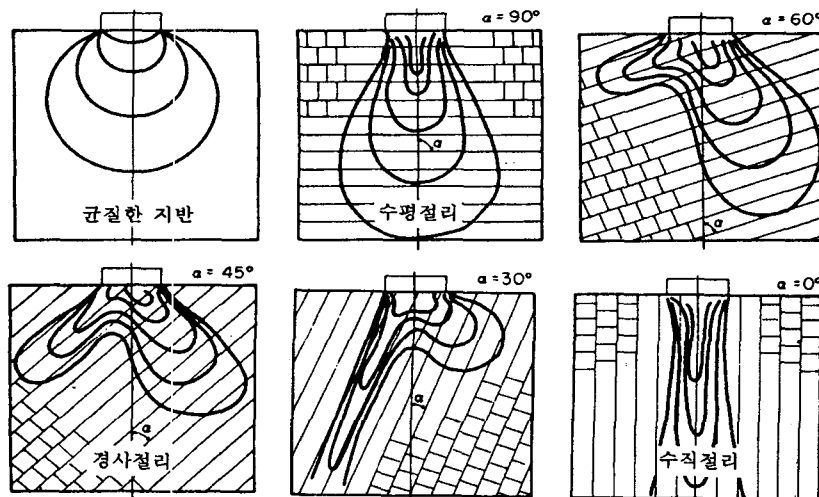


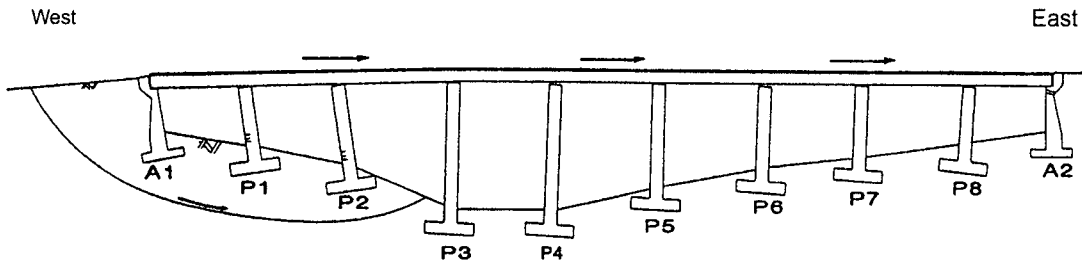
그림 1. 절리가 발달한 이방성 암반에서의 응력분포

## 4. 암반불연속면에 의한 구조물의 변형 및 붕괴사례

### 4.1 단층 위에 건설된 교량의 변형

#### 4.1.1 교량현황

본 교량은 경북 안동 임하댐 저수지 주변에 위치한 00교로 임하댐 건설 이전인 1989년 12월에 완공되었으나 건설 직후부터 교량의 서쪽 부분의 하부지반이 유동하여 교량에 변형이 발생하였으며 이로 인하여 교량으로서의 기능을 상실하게 되었다.



- 1번 교대 : 침하 (55cm)                      1번 교각 : 침하 (40cm)
- 1번 교대 및 2, 3번 교각 하부 지반 : 횡방향 활동 (70~90cm)
- 상부 구조 : 2번 교대 방향으로 유동 (A1 → A2 방향 ; 20~25cm)

그림 2. 00교의 변형 상태

#### 4.1.2 변형구간에 대한 지반조사

##### (1) 지표지질조사

대상 지역은 경상퇴적분지의 북쪽 연변부에 위치하며 주 층리가 모두 동쪽으로 저경사함으로써 경상 분지 내의 특징적인 단사 구조를 보여준다. 지층은 주로 적색 세일과 회백색 사암의 호층으로 구성되며 수 매의 역질 조립 사암 내지 역암층준이 협재되어 있다.

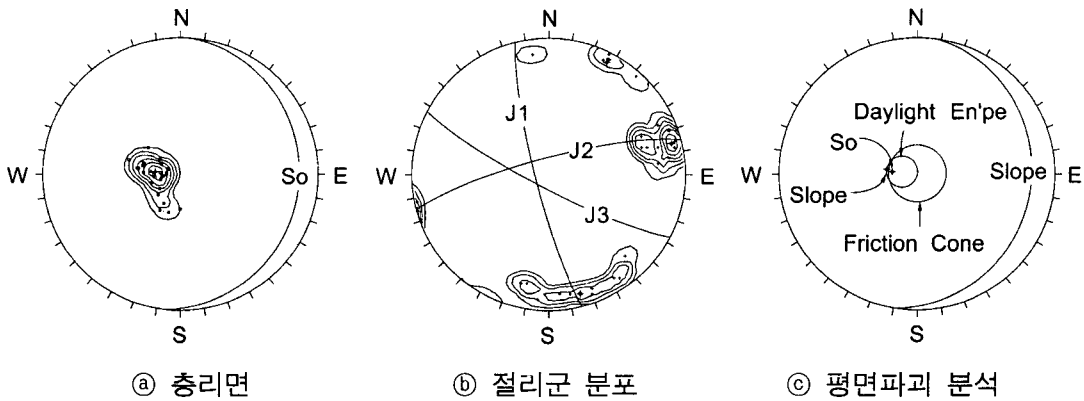


그림 3. 불연속면에 대한 평사투영 결과

일반적으로 세일은, 고화가 덜 된 경우, 건설에 대한 내구성이 상당히 떨어지게 된다. 특히 세일이 사암과 호층을 이루고 있는 경우에는 침투수가 층리면을 따라 흐르면서 윤활 작용을 할 수 있으며, 상대적으로 투수성이 낮은 세일 층준 내에 간극수압이 유발될 수도 있다. 특히 대상지역의 경우, 저수위의 급격한 하강은 사면 내의 간극 수압의 소산이 늦어지면서 사면의 전단 강도를 낮추게 되는 영향을 끼치게 됨으로 사면 불안정의 주요 원인으로 작용하였을 가능성도 있다.

그림 3의 ㉔는 이 지역에서 발달하는 층리면에 대한 사면의 기하학적 불안정성을 투명한 결과이다. 이에 의하면 마찰각의 크기에 따라 평면 파괴의 가능성이 존재하는 것으로 해석되며, 실제로 지표에서 소규모의 평면파괴가 진행중인 것이 관찰되기도 하는데, 사암 층준 내에 발달하는 그림 3 ㉕의 J1이 인장균열 (tension crack)의 역할을, J2와 J3가 release surfaces 역할을 하여 세일 층준을 따라 미끄러짐이 진행중인 것이 관찰된다. 또한 지표면의 표토층에서 원호 붕락 파괴 (circular slump failure)가 발생한 흔적이 관찰되며, 수곡교 부근 절개사면에서 암반층 내에 발생한 고기 붕락(sliding)면이 관찰된다

## (2) 시추조사

수곡교 하부의 지반 상태를 확인하기 위하여 6개 공의 시추조사를 실시하였다.

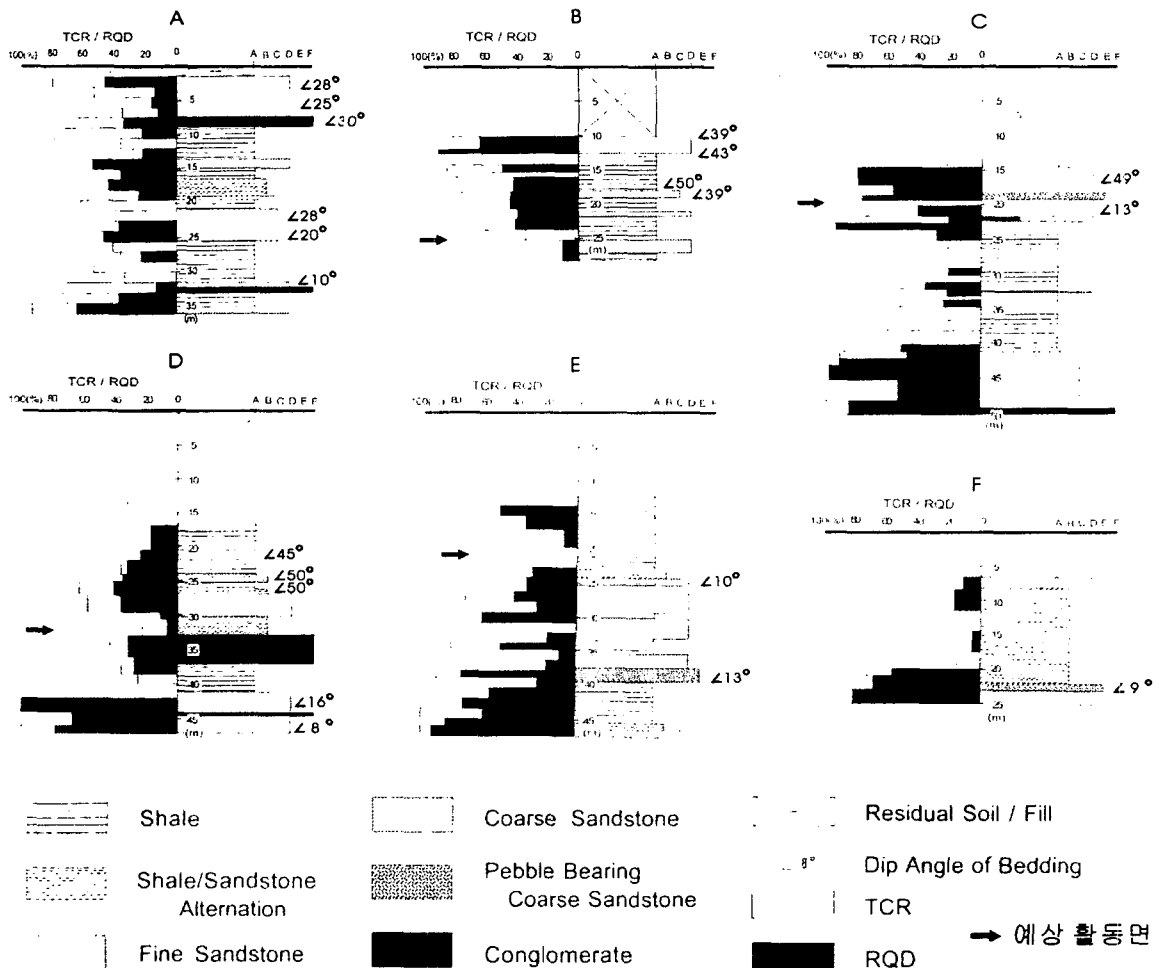


그림 4. 시추 코아 logging 결과

TCR(total core recovery, 코아 회수율) / RQD(rock quality designation, 암질지수)는 암종과 심도에 따라 그림 4와 같은 분포 양상을 보이며, 사암은 셰일에 비하여 TCR / RQD가 높은 경향을 보인다. 사암은 괴상의 조직을 가지고, 셰일에는 쪼개짐(fissility)이 발달하지 않은데다가 RQD가 낮아 코아에서 층리면의 관찰은 용이하지 않으나 층간 경계면, 혹은 암괴 내에 발달하는 엽층(laminae)으로부터 관찰이 가능하다.

시추조사 결과 코아에서 관찰되는 층리면의 경사는 일정한 심도까지 약 50°의 급한 경사를 보이다가 그 심도 이하에서는 다시 15° 내외로 지표면에서와 같은 경향을 보인다.

### (3) 교량 기초지반의 변형 원인 분석

지반 내에 관찰되는 불연속면은 다음 그림과 같은 과정을 거쳐 발달한 것으로 추정된다. 즉 사암층준 내에 발달하는 수직 절리들이 sliding plane의 역할을 한 셰일층준을 통과하여 서로 활성화되는 과정에서 원호 형태의 파괴가 전이되었던 것으로 추정되며, 이는 지표에서 관찰되는 여러 가지 형태의 사면 파괴를 고려할 때 그 가능성이 높다.

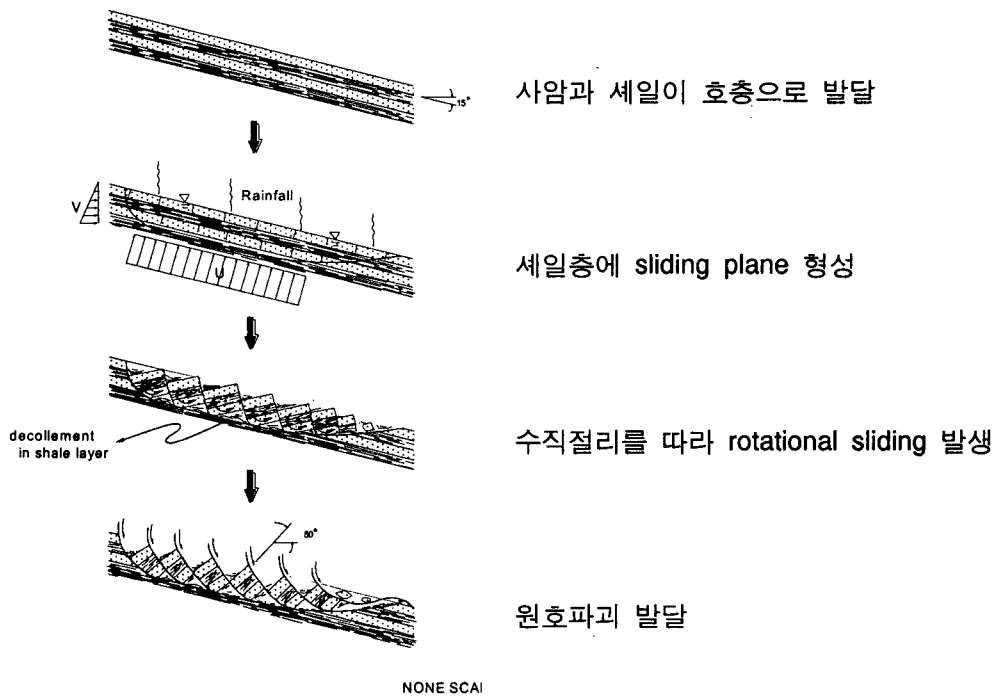


그림 5. 지반 파괴 모식도

지표지질조사 결과 확인된 단사구조는 그 경사 방향이 수곡교 하부 지반 사면에 대하여 전형적인 평면 파괴를 일으킬 수 있는 가능성을 보여준다. 또한 시추조사에서 지층 경사가 급변하는 현상은 그 심도에 일종의 구조적인 불연속면이 존재할 가능성을 시사하는 것으로 해석된다. 단층은 사암에 비하여 풍화에 약한 셰일층준 위에 사암 암괴가 rotational sliding을 일으켜 형성된 지질 구조로 판단된다.

이 파괴면의 scarp는 교대 1의 서측에 위치하는 것으로 추정되고, toe는 2번 교각과 3번 교각의 사이에 위치하는데 이 때문에 3번 교각은 변형되지 않았으며, toe가 2번 교각과 3번 교각 사이에 위치하는 이유는 3번 교각이 수곡교가 건설된 골짜기의 최저 표고 부근이기 때문이다.

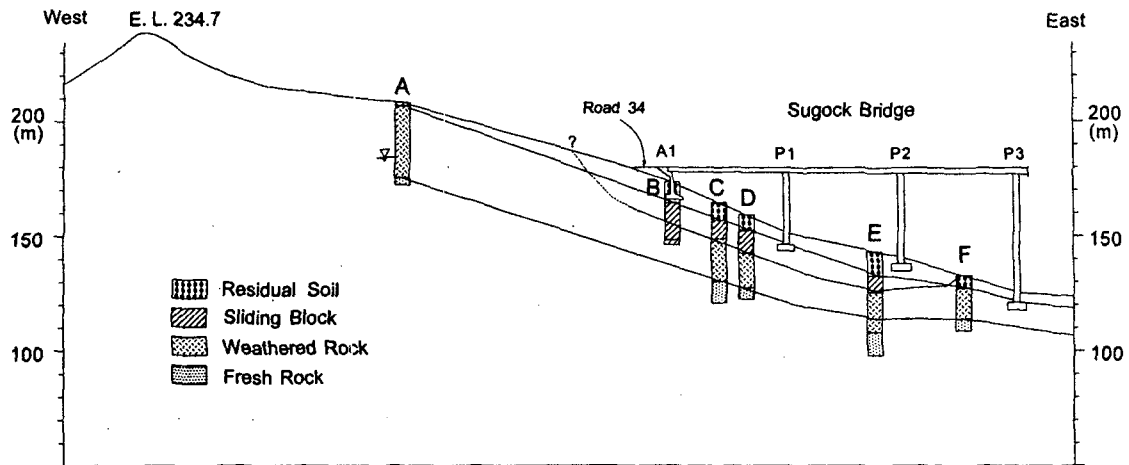


그림 6. 지반단면 및 예상 활동면

## 4.2 두 개의 교차 단층에 의한 대규모 터널 붕락

### 4.2.1 터널 현황

본 터널은 천안~논산간 고속도로에 위치하는 oo터널로 2차선 단선 병렬의 산악터널이며 터널 총연장은 2,420m 이다. 시공 중 하행선 굴진 막장에서 암반 붕락이 발생하였다. 막장 전면에 걸쳐 붕락된 암괴가 밀려 내려와 붕락대의 규모와 형태를 육안으로 직접 관찰할 수 없었으며 암괴를 제거할 경우 추가적인 붕락이 예견되었다.

붕락구간에 대한 별도의 보강조치가 없이는 굴진을 진행할 수 없는 상황이었으므로 붕락구간을 포함한 터널 전구간에 걸쳐 조사를 실시하여 붕락의 원인을 규명하고 보강대책을 수립하였다.

### 4.2.2 터널에 대한 지반조사

현장 여건상 시추조사를 실시할 수 없었으며 막장관찰조사, 중·횡단 전기비저항탐사 및 지표지질조사를 실시하였다.

#### (1) 막장관찰조사

막장조사 결과 막장 전면에 걸쳐 불연속면이 매우 발달해 있으며 부분적으로 맥암 및 파쇄대가 분포하였다. 불연속면은 광화작용의 영향으로 방해석, 녹니석이 피복되어 있으며 이들이 풍화를 받아 일부는 점토화되어 있었다. 또한 불연속면에서 다수의 전단면(sheared plane) 및 경면(slickenside)이 확인되었다.

특히 붕락 막장의 붕락 부위에서 남북방향으로 고경사하는 젖은 상태의 단층경면을 확인하였으며, 붕락 암괴에서 단층 파쇄암, 흑연화된 유기질 충전물 및 단층 경면이 다수 관찰되어 큰 규모의 단층 파쇄대가 발달해 있는 것으로 예상되었다.



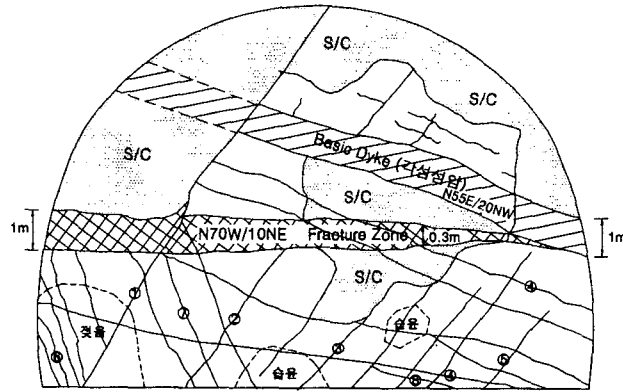


그림 7. 막장 mapping 결과(예: 상행선 STA. 1K+015지점)

## (2) 전기비저항 탐사

본 조사지역과 같이 편마암 지역에서의 전기비저항 값은 풍화를 받지 않은 신선한 경우에 103~105Ωm의 범위를 가지며, 풍화를 받은 경우 10~수백Ωm의 범위를 가지는 것으로 보고되어 있다. 따라서, 본 조사지역과 같이 지하수가 많지 않은 경우 103Ωm이하는 불연속면의 영향권으로 판단하였다.

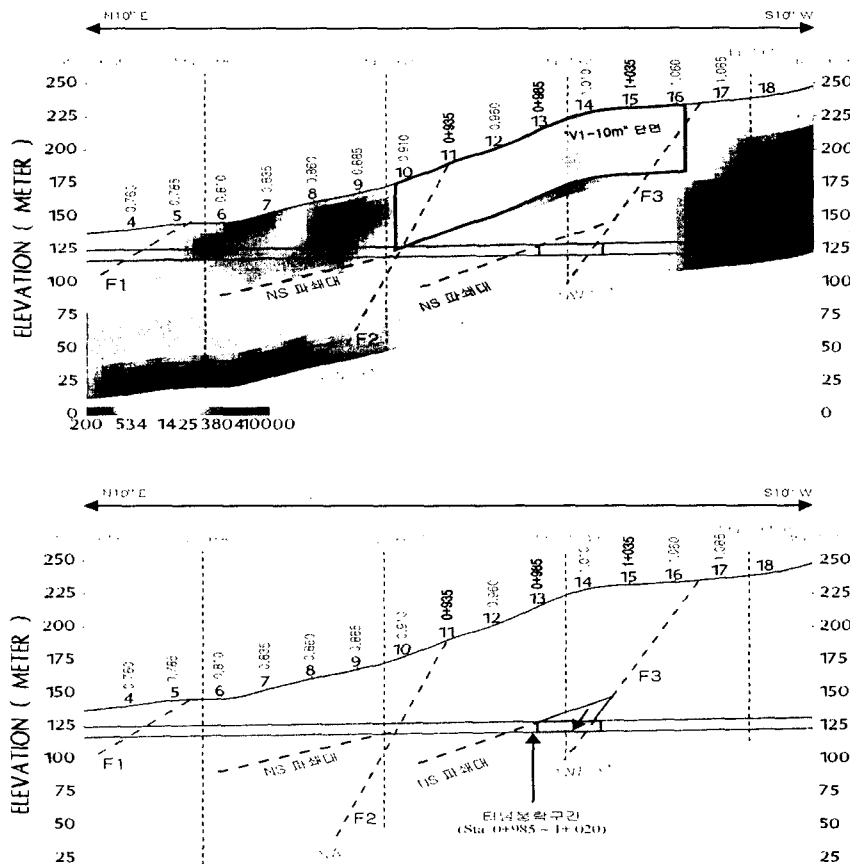


그림 8. 종단면 탐사결과 및 해석단면

이 기준에 의해 탐사결과를 분석한 결과 NS 방향의 불연속면과 NW 방향의 불연속면이 존재하는 것으로 확인되었다. NS 방향의 불연속면은 축선의 서쪽에서 고각으로 형성되어 터널부를 관통하는 것으로 판단되며, NW방향의 불연속면은 NE 방향으로 경사하는 것으로 분석되었다.

해석결과 본 터널에서 발생된 붕괴의 직접적인 원인은 NS방향 단층파쇄대(F4)와 NW방향인 F3 단층대에 의해 형성된 블록이 붕락된 것으로 판단되었으며 암반블록의 규모는 높이 15m내외, 수평거리 30m 내외의 삼각형 단면 형상을 가지고 있는 것으로 추정하였다.

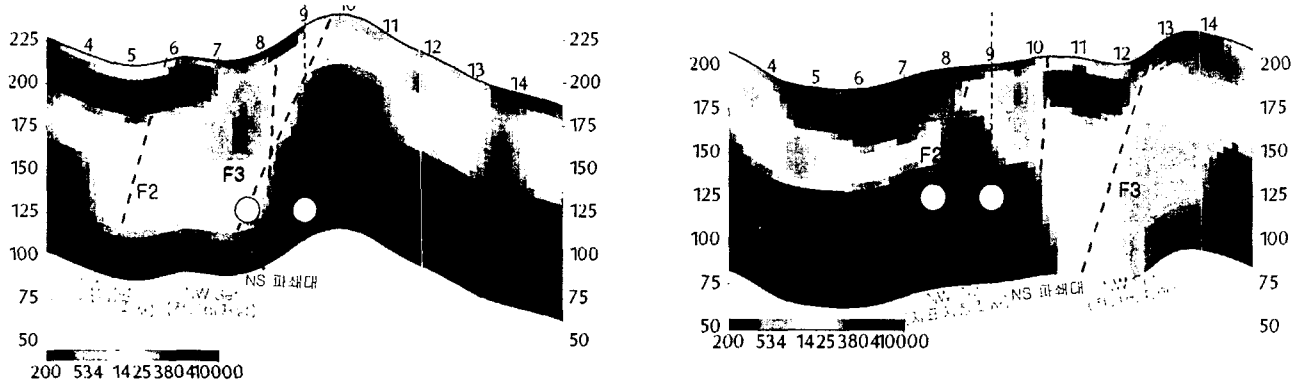


그림 9. 횡단면 탐사결과

횡단면 탐사에서도 종단면에서 확인되는 NS파쇄대 F4와 NW방향인 F3가 확인되었다. 종단면에서 터널 붕괴의 원인으로 확인되는 NW방향인 F3의 주향은 횡단면 탐사결과를 조합해 볼 때 N 15° ~ 25° W 정도일 것으로 추정되며 종단면과 같이 STA.0K+985~1K+035의 범위에서 두 단층파쇄대가 교차되는 것으로 판단하였다.

### (3) 지표지질조사

대상 터널지역에 대한 지표지질조사로부터 획득한 자료와 막장관찰자료 및 전기비저항탐사결과를 종합하여 작성한 지질 단면도는 다음 그림과 같다.

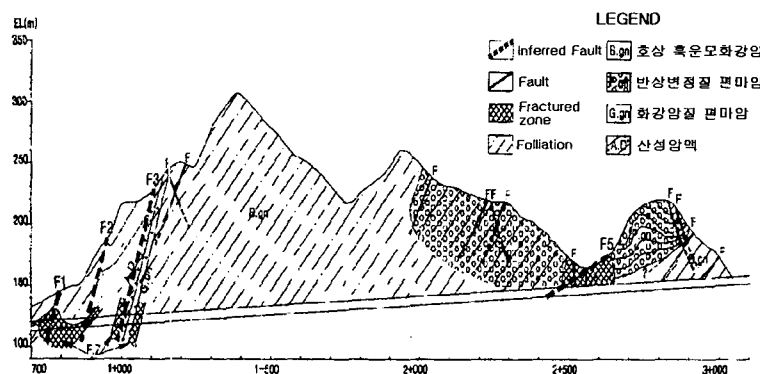


그림 10. 지질 단면도

#### 4.2.3 터널 붕락 원인 분석

현장조사결과에 근거하여 차령터널 붕락원인을 분석하면 붕락구간을 통과하는 2개의 단층파쇄대 (F3

와 F4)가 직접적인 원인이 된 것으로 판단되며, 단층들의 방향성으로 추정할 수 있는 붕락형태는 붕락 구간에서 두 단층이 교차하면서 형성된 썩기 형태의 키블럭의 붕락이거나 파쇄대 구간에서의 압괴붕락 일 것으로 추정된다.

표 2. 붕락원인 분석결과

구 분	조 사 결 과
막장관찰 조 사	붕락버럭에서 단층파쇄암(0.5m×0.7m size), 흑연화된 불연속면 층진물 및 경면이 다수 확인되며 붕락부에 주향 NS/경사90° 인 젖음 상태의 경면 관찰됨.
전 기 비 저 항 탐 사	탐사결과 터널구간에 4개 정도의 큰 규모의 단층대가 분포하는 것으로 추정되며 붕락구간에는 2개의 단층대(F3:N15W/70NE, F4:NS/90)가 분포하는 것으로 추정됨.
지표지질 조 사	지표 1K+100 부근에서 관찰된 노두에 발달하는 관입암 및 단층은 탐사에서 나타난 F3 단층대(N15W/70NE)와 연관이 있는 것으로 추정됨.

#### 4.2.4 붕락 규모 및 이완영역 추정

##### (1) 붕락 규모 추정

터널에서의 붕락규모를 추정하기 위하여 터널파괴의 직접적인 원인이 된 것으로 판단되는 2개의 단층대를 터널 평면도 및 단면도상에 도시하여 가장 가능성이 높은 파괴의 형상을 추정하였다.

예상구조지질도에서 나타난 바와 같이 0K+980 부근에서는 터널 굴착 진행방향 우측 측벽부에 위치하는 NS주향 단층대(F4)와 터널측벽에서 다소 이격된 거리에 있던 NW주향 단층대(F3)가 터널 굴착 방향인 1K+020 지점으로 가면서 교차하며 터널 단면내로 단층대의 중심선이 통과하는 방향성을 나타낸다.

UNWEDGE 프로그램을 이용하여 이들 단층대의 조합에 의해 형성되는 썩기형상의 위치 및 규모(높이, 연장, 부피 등)를 추정하였다. UNWEDGE 해석결과 천단부에서 901 ton 중량의 키블럭(Key Block)이 발생하는 것으로 해석되며 키블럭의 높이는 12.12m, 터널축방향 길이는 40.18m 정도인 것으로 해석된다.

##### (2) 이완영역 추정

터널붕락에 따른 터널상부암반의 이완영역은 암반의 강도, 파쇄암의 부피팽창성, 붕락구간의 크기에 좌우된다. 이에 더하여 상반내에 발달한 절리, 단층 등의 연약면도 붕괴를 유발시키거나 붕괴과정에 커다란 영향을 미치게 된다.

본 붕락 구간에 대하여 상부 암반의 이완 영역을 계산하기 위하여 Piggott & Eynon (1977)이 Karfakis의 응력아치 이론을 지반침하에 적용한 응력아치-체적 팽창 이론을 적용하였다.

이 이론은 지하에 채굴공동이 생기면 채굴적의 직상반은 응력해방 상태에 놓이게 되며 지층이 아래로 처지면서 붕괴되며, 이는 자립 가능한 응력아치가 형성되면서 중지되거나, 붕괴된 지층이 암편으로 파쇄되면서 체적팽창을 일으켜 공동을 채울 때까지 상부로 진행되고, 이 과정에서 응력아치의 높이가 상반의 두께를 초과하거나, 붕락고가 안정한 응력아치의 높이를 능가한다면 붕괴는 지표까지 전이되어 침하가 발생된다는 개념이다.

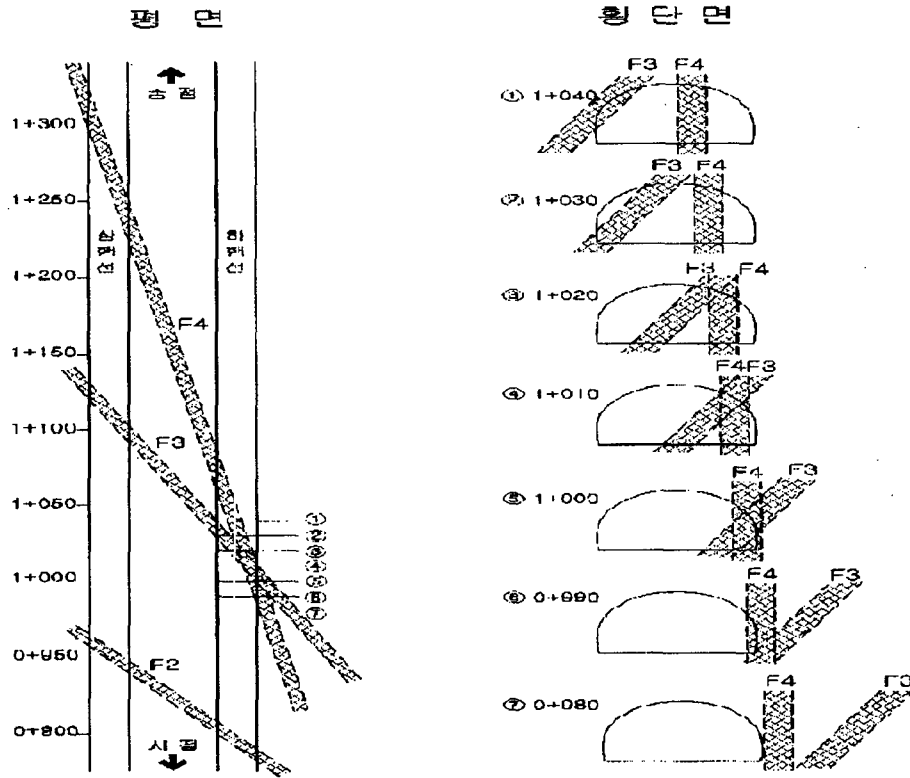
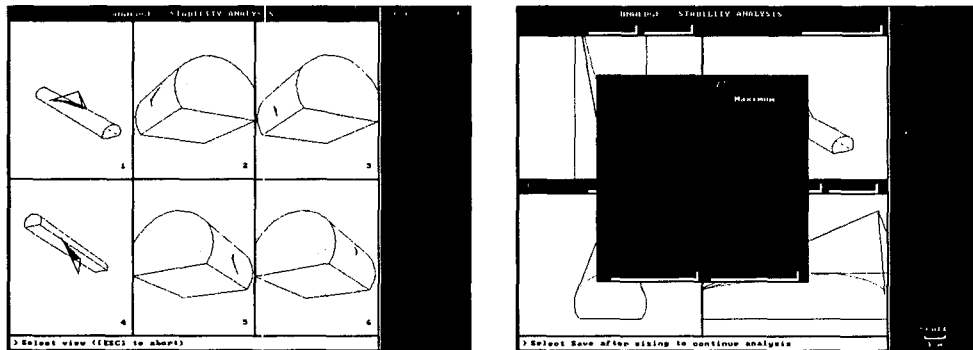


그림 11. 봉락구간의 단층 발달 양상



위치별 키블러크형상 및 안전율

천단부 키블러크의 규모

그림 12. UNWEDGE 해석결과

본 터널 봉락구간에 대하여 터널굴착고( $t$ )를 8.6m, 체적팽창률( $B$ , bulking factor)을 1.4(건설 표준품셈 연암 기준)로 가정하였을 경우 봉락대의 기하학적 형상에 대한 각각의 이완영역 ( $H$ )는 다음과 같이 계산되어진다.

· 직각기둥형 :  $\frac{H}{t} = \frac{1}{B \cos \theta} + \frac{w}{t} \frac{\sin \theta}{2} = \frac{1}{B} = 2.5, H = 8.6 \times 2.5 = 21.5\text{m}$

· 타원형 :  $\frac{H}{t} = \frac{3}{2B \cos \theta} + \frac{w}{t} \frac{3 \sin \theta}{4} = \frac{3}{2B} = 3.75, H = 8.6 \times 3.75 = 32.25\text{m}$

· 쉐 기 형 :  $\frac{H}{t} = \frac{2}{B \cos \theta} + \frac{w}{t} \sin \theta = \frac{2}{B} = 5, H = 8.6 \times 5 = 43m$

· 원 뿔 형 :  $\frac{H}{t} = \frac{3}{B \cos \theta} + \frac{w}{t} \frac{3 \sin \theta}{2} = \frac{3}{B} = 7.5, H = 8.6 \times 7.5 = 64.5m$

위에서 계산된 바와 같이 붕락대의 형상에 따라 터널 천단부에서 21.5m~64.5m 범위의 이완영역이 형성되어지며 본 구간의 파괴를 쉐기형 파괴로 가정할 경우 본 구간의 이완영역은 H = 43m 정도일 것으로 추정되어진다.

그러나 여기서 H는 1차 붕락에 의한 이차적인 암반이완발생으로 붕락암반이 터널내부를 모두 채우는 것으로 가정하여 계산한 최대 이완영역이므로 실제 붕락 규모와는 많은 차이가 있을 것이다. 따라서 1차 붕락고는 붕락구간에서 예상되는 최대 키블릭의 높이인 터널상부 약 12m정도로 보아야 할 것이며 이완영역은 추가적인 정밀조사를 수행하여야 정확한 파악이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4.2.5 보강공법 선정

조사자료 분석 결과를 바탕으로 붕락구간에 대하여 다음과 같은 보강방법을 제시하였다.

- 터널상부 약 12m지점부터 붕락이 발생한 것으로 추정되므로 시멘트 밀크 그라우팅은 붕락구간 전체를 대상으로 하여 실시한다.
- 붕락구간중 터널주변에서 터널폭의 약 0.5D(6.5m) 구간은 터널의 Arching 효과에 큰 역할을 하는 부분이므로 이 구간은 1.5m 간격으로 중점적으로 시멘트 밀크 그라우팅을 실시하여 지반을 고결 강화시켜주며, 터널주변 6.5m에서 12.5m 구간은 약 3m 간격으로 시멘트 밀크 그라우팅을 실시하여 공동부 충전 및 보강시키도록 한다.(그림 13 참조)
- 보강영역은 터널 아치부 120° 를 대상으로 실시하며 붕락구간을 보강 및 굴착하면서 붕락상태를 파악하여 보강범위 및 보강방법 등을 조정하여 실시하여야 한다.
- 시멘트 밀크 그라우팅 완료후에는 터널 S.L상부에 강관보강 다단 그라우팅을 실시하여 추가적인 시멘트 밀크 주입 및 강관의 Beam 작용으로 지반을 강화시키며 상부하중을 경감시키도록 한다.

아래 그림 14는 시멘트 밀크 그라우팅의 시공 결과를 보여준다. 터널 아치의 우측부에 상대적으로 주입이 집중되었으며 비교적 많은 양의 밀크가 주입된 것으로 나타났다. 이러한 결과는 우측부 지반이 공극이 큰 느슨한 상태이기 때문인 것으로 분석된다.

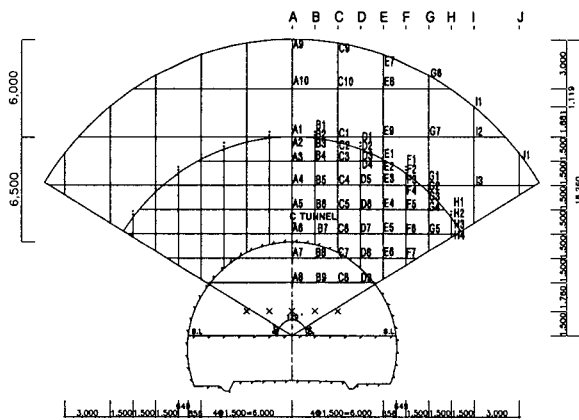


그림 13. 시멘트 밀크 그라우팅 보강단면

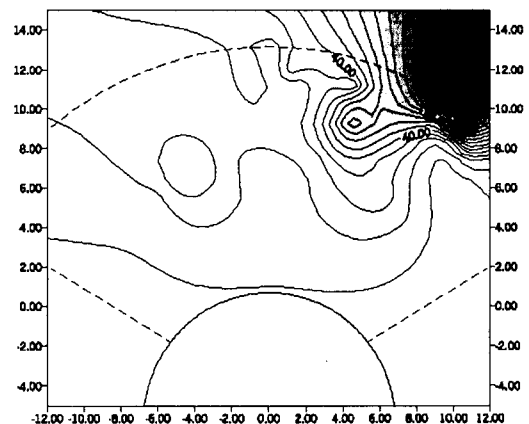


그림 14. 시멘트 밀크 그라우팅 주입 분포도

### 4.3 단층 파쇄대의 영향에 의한 도로사면의 붕괴

#### 4.3.1 사면현황

본 사면은 광주-화순간 국도 66 I.C 진입로 입구에 인접한 사면으로 사면 경사는 1:0.3~1:0.5, 최대 사면고는 30m 내외, 사면 연장은 150m 정도이다. 사면이 형성된지 4년이 경과한 시점에서 인접도로에 융기현상과 단속적인 도로 균열 및 측벽 균열이 발생하였으며 사면 상부의 산능선부에도 인장균열이 형성되어 그 균열부위가 점진적으로 확대되는 양상을 보였다.

이와 같이 사면 활동과 관련한 징후들이 지속적으로 발견됨에 따라 지반조사를 실시하여 예상 활동면을 추정하고 이에 대한 대책을 수립하였다.

#### 4.3.2 지반상태

대상 사면에 대하여 수직시추 8개공과 경사시추(40~50°) 10개공의 시추조사를 실시하였다. 사면의 지반은 상부로부터 풍화암층, 연암층, 경암층의 순으로 구성되어있다.

풍화암층은 실트질 모래로 구성되어 있으며 부분적으로는 풍화에 강한 모암의 일부가 차별풍화를 받아 핵석 상태로 산출되기도 하였다. 연암층은 코어회수율(TCR)이 30~100%, 암질지수(RQD)는 30% 이하로 파쇄대가 매우 발달하고 균열의 틈새에 점토물질이 협재하는 경우가 많으며, 부분적으로는 암석이 완전 풍화되어 풍화암에 가까운 상태를 보이는 등 전반적으로 암질이 불량하였다. 연암층내에는 평균 GL-(5.0~10.0)m 내외의 심도에서 점토가 협재된 파쇄대가 밀집되어 분포하는 것으로 나타났다. 그 하부의 경암층은 코어회수율(TCR)이 65~100%, 암질지수(RQD)가 25~55% 정도로 비교적 양호한 상태를 보였다.

#### 4.3.3 인장 균열의 발생

1차 인장균열은 폭 0.3m 정도, 깊이는 2~3m 로 절취사면 최상부의 산마루 측구에 인접하여 발생하였다. 약 한달 뒤 1차 인장균열로부터 약 80m 정도 이격한 산능선에서 폭 1m 내외, 깊이 최대 4m 정도의 2차 인장균열이 발생하였다. 이 균열은 최초에는 1차 인장균열과 거의 평행한 형태로 발생하였으나 이후 사면방향을 향하여 좌·우측부로 균열이 점점 연장되었다. 균열면을 경계로 약 40cm의 단차로 변위가 발생하였으며 이는 지표부위 토사층의 포행성 변형과 연관된 것으로 추정되었다.

#### 4.3.4 활동 예상면의 추정

조사결과를 종합하여 보면, 본 사면에서의 활동의 주원인은 연암층내에 빈번하게 분포하는 암반 파쇄대의 활동이며, 이와 같은 활동은 사면형성 이후 4년 이상에 걸쳐 전단응력의 변화, 이완영역의 확대, 암석의 Creep변형 등에 의한 저항력의 감소에 따라 진행성파괴의 형태로 진전되었으며, 이러한 활동력의 일부가 응력집중부인 사면전단 파쇄대 및 노체에 추가로 작용하여 측벽의 균열과 노면의 융기현상을 일으킨 것으로 추정된다.

지표지질조사자료, 시추조사자료 및 1, 2차 인장균열을 종합적으로 분석하여 다음과 같은 전제를 근거로 예상활동면을 추정하였다.

- 파쇄가 심한 암반은 토사층과 유사한 거동을 보일 것이다.
- 파쇄구간은 전단파괴에 대한 저항력이 현저히 감소하므로 활동은 이들 파쇄대(특히 규모가 크거나 연약한 점토물질이 협재하는)를 따라 발생할 가능성이 매우 높을 것이다.

- 2차 인장균열은 파쇄가 심한 연암층에서의 원호파괴와 함께 표층부 토사구간의 포행성 변형이 복합되어 형성되었을 개연성이 있는 것으로 판단된다.
- 상부사면에서 지하수의 유출이 관찰되었는 바, (3)항과 관련되어 현재 진행 중인 활동은 이 약선대를 따라 진행될 것이며, 따라서 파괴면의 선단은 제1소단과 제2소단의 사면에 형성될 가능성이 있을 것으로 추정된다.

이와 같은 가정을 근거로 예상파괴면을 추정한 결과는 다음 그림과 같다.

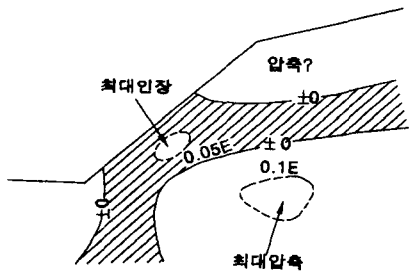


그림 15. 급사면에서의 주응력  $\sigma_1$ 의 분포도(Müller)

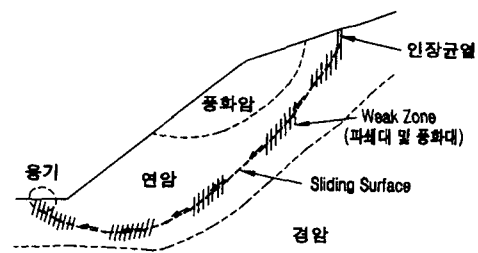


그림 16. 예상활동모드

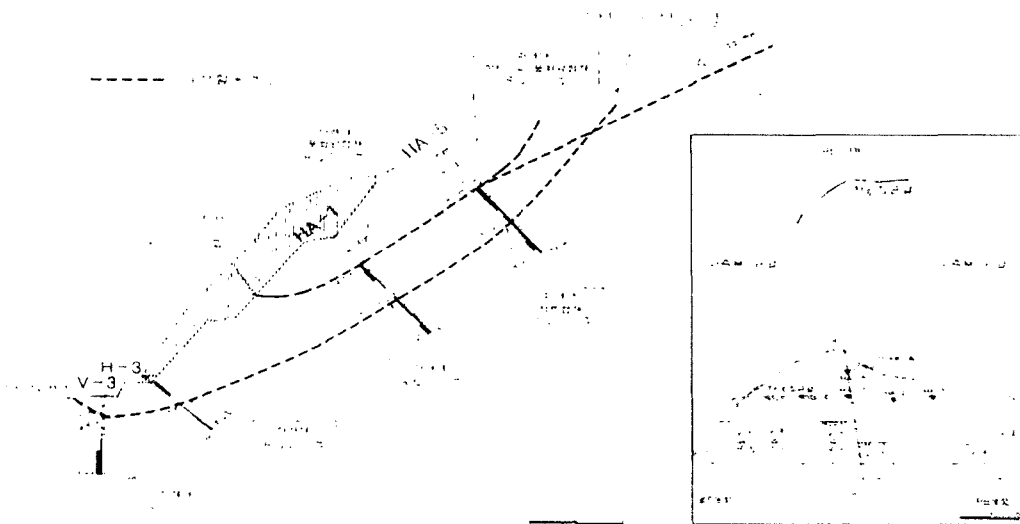


그림 17. 예상 활동면 분석

#### 4.3.5 대책 검토

예상파괴면의 추정 결과에 따라 다음과 같은 대책을 제안하였다.

- 1차 인장균열에서 시작하여 연암층의 파쇄대를 따라 형성될 것으로 예상되는 원호파괴면은 활동면의 심도가 깊어 인접 국도에 용기 및 균열을 발생시킬 것으로 추정되며 따라서 사면 하부에서 활동을 억제하기 위한 사면 억지공(예: 뿌리말뚝, 억지말뚝, Soil nailing)을 적용한다.
- 풍화암층 또는 연암층의 상부를 따라 형성될 것으로 예상되는 활동면의 심도는 1소단을 기준으로 7m 미만으로 예상되며 2차 인장균열을 발생시킨 토사층의 포행에 의해 활동이 촉진될 가능성이 크므로 Earth anchor, Rock bolt, Soil nailing, Micro pile 공법 등을 적용하여 보강한다.

## 참고문헌

1. 강상호, 1999, 기존 사면 붕괴면의 재활성에 의한 교량의 변형-안동 임하댐 주변 수곡교의 예, 서울대학교 석사학위 논문
2. 광주광역시청, 1998, 광주-화순간(국도 15호선)도로 응급조치공사 지반조사
3. LG건설주식회사, 2000, 천안-논산간 고속도로 건설공사 제2공구 차령터널 보강공사 준공보고서
4. 윤지선 역, 1994, 토목지질공학, 구미서관
5. (주)대우, 1999, 천안-논산간 고속도로 건설공사 제2공구 차령터널 조사 및 보강 설계 보고서
6. Evert Hoek, 1999, Rock Engineering course notes
7. Roy E. Hunt, 1984, Geotechnical Engineering Investigation Manual, McGraw-Hill Book Company
8. Roy E. Hunt, 1986, Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation, McGraw-Hill Book Company
9. S. H. Kang, J. H. Kim, N. S. Park, 2000, A Case Study on the Deformation of a Bridge by the Reactivation of a Pre-Existing Sliding Plane, LANDSLIDES in research, theory and practice vol 2, the 8th International Symposium on Landslides