

암반사면 안정성 평가를 위한 평사투영 해석법 적용상의 문제점

Merits and limitations of the stereographic
projection method for rock slope stability analysis
-(Theory and applications with case histories)-

이 수 곤*
Lee, Su-Gon

Abstract

Recently stereographic projection method has widely been adopted in Korea as a simple but effective way of analysing the rock slope stability at the preliminary stage of site investigation.

In practice, however, not a few cases have been noted where the method, even with the aid of computer programme, was improperly applied due to lack of experience in the process of collecting geological data, sorting them out and assessing the potential instability of rock block thereform.

This paper will briefly describe basic principles of stereographic projection method and present several instances to discuss its merits and limitations when it is applied to the geological conditions of Korea.

요 지

현장조사에서 암반사면의 안정성을 초기단계에서 파악하기 위해서는 간단하지만 매우 효과적인 평사투영 해석법이 국내에서도 최근에는 많이 알려져 있다. 그러나 실제 실무에 적용할 때, 야외에서 지질자료를 조사하고 분류하는 방법과 위험 가능한 암반을 추정하는 데 있어서 종종 컴퓨터 프로그램을 사용함에도 불구하고, 경험이 부족하여 평사투영방법이 종종 잘못 이용되고 있는 경향이 있다. 그러므로 본 논문에서는 평사투영방법의 기본 원리가 간략히 서술되고, 또한 그 방법의 장단점이 국내의 지질상태에서 최근에 적용된 몇 사례를 인용하여 논하여진다.

* 정희원, 한국자원연구소 환경지질연구실 선임연구원

1. 서론

암반의 거동은 토질과 다르게 암반내에 발달하고 있는 불연속면(단층, 절리)의 발달특성(불연속면의 방향, 간격, 연속성, 틈새, 충전물질, 투수, 강도 및 불연속면의 종류수, 암괴의 크기 및 모양)에 따라서 영향을 받으므로 암반을 절개하는 경우에 암반 절개사면의 안정성에 미치는 이들의 영향을 고려하여야 한다.

토질은 Mass가 비교적 균일한 특성을 지니지만 암반사면은 암반내에 불규칙하게 발달하고 있는 불연속면 때문에 한 Mass에서도 비교적 변화가 심하다. 그러므로 암반사면의 안정성은 한 Mass에서도 부분적으로 불안하거나 안전한 양상을 띄는 것이 특징이다. 또한 암반의 한 Mass에서도 수많은 불연속면들이 발달하여 그들이 형성하는 작은 암석덩어리는 다양한 크기와 모양을 지닌다. 이렇게 변화가 심한 작은 암석덩어리를 전부 수치해석한다는 것은 비현실적이며 과도한 시간의 낭비를 초래한다. 그러므로 암반내에 발달하고 있는 불연속면들의 분포상태 및 암반의 운동역학적 특성을 손쉽게 기하학적으로 파악하기 위해서 『평사투영망』을 이용하여 암반사면의 전반적인 안정성 상태를 판단하는 데, 이 방법은 여러 암반역학 관련 문헌에서 많이 소개되어 있다.(3), (5), (8) 최근 외국(홍콩, 일본, 영국, 미국등)의 각종 암반관련 토목공사시 조사, 설계, 시공 및 감리과정에서 기본 판단자료로서 널리 적용되고 있고 이와 관련된 컴퓨터 이용 program도 많이 소개되고 있다. 그러나 『평사투영망』을 이용한 암반의 사면안정성 상태를 초기에 신속하고 간단하게 파악할 수 있는 장점이 있으나, 실제 현장에 적용할 때에는, 평사투영해석법을 이용할 때의 문제점을 충분히 파악하여 검토한후 최종판단에는 신중을 기하여야 한다.

본 논문에서는 평사투영해석법을 이용하여 최근 수년간 서울시 일원에 걸쳐서 토목시공중에 있는 5지역의 암반사면의 안정성 평가, 분석 및 이에 따른 보강대책수립의 사례들과 경부 및 영동고속도로 확장공사의 높이 20~50m 이상의 50여 대절개 예정사면설계에 적용된 사례들에서 파악된, 평사투영해석법을 국내의 각종 토목공사 실무에 적용시의 장단점이다.

2. 본론

2.1. 평사투영법의 기본개념

암반사면의 사면안정검토는 암석의 강도에 의하는 것보다는 다음과 같은

불연속면의 발달상태를 조사하여 판단하여야 한다.: 불연속면의 방향, 간격, 연속성, 강도, 틈새, 충전물질, 투수, 종류수, 암괴의 크기 및 모양 등등(Fig.1).

상기의 10여가지 불연속면 특성을 한꺼번에 고려하여 사면안정성을 평가하는 것이 부적합하므로 불연속면의 방향(주향과 경사)과 불연속면의 전단각 및 암반절개면의 방향 (주향과 경사)이 특히 암반사면의 안정성에 중요한 역할을 하므로 상기 세요소에 의해서 암반사면의 안정성 기초평가가 우선적으로 수행한다. 이 방법을 수행하기 위해서는 먼저 암반절개면에서 발달하고 있는 불연속면을 조사하여 평사투영망(Fig. 2a)에 Computer Program을 이용하여 불연속면의 극점을 Stereo-net에 찍고 이 점들의 밀도를 파악하는 Pole Density Diagram을 그려 암반절개면에서 우세하게 발달하고 있는 불연속면의 방향을 파악한다(Fig. 2b). 그후에 암반이 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴하기 위해서는 불연속면의 방향과 불연속면의 전단각 및 암반 절개면의 방향들간에 암괴의 운동역학적인 붕괴 경험측면을 고려하여 볼 때 몇가지 필요충분조건들이 있는 데 (Fig.3), 이조건들을 기하학적으로 평사투영망에 도식하기 위하여 우세한 불연속면의 극점(Pole)과 교선의 극점(Pole), 절개면의 대원(Great circle) 그리고 Daylight Envelope, Friction cone, Toppling envelope를 작성한다. 이 작도법에 대한 Computer program은 외국에서 많이 보급되어 있고 『FABRIC』(9), 『ROSSAD』(10)등이 국내에도 소개되고 있다(Fig. 2c). 불안정 지역을 설정하여 이지역에 표시되는 불연속면을 따라서 암반붕괴 가능성이 있고, 그외지역에 표시되면 안정한 것으로 판단한다. 위험지역을 서술함에 있어서 『Possible』 stable(안정가능) 『Possible』 unstable(위험가능) 용어를 사용하는 의미에 주의를 요한다. 위험지역 안쪽만 『절대적』으로 위험하고 바깥쪽은 『절대적』으로 안정하다는 개념은 아니고 위험지역 인근지역에 분포하는 불연속면도 위험가능성을 차후에 현장에서 재검토하여 보아야 한다.

위험지역을 설정하는 필요충분조건을 결정할 때 다음 사항들을 고려하여야 한다.

2.2 활동파괴 위험지역 (Sliding zone)의 설정

Fig 3 .에서 나타난 바와같이 평면파괴(Plane failure)의 4가지 조건을 만족시키는 위험지역이 Daylight envelope의 내부와 Friction cone

의 외부의 공통부분이다. 여기에다가 Hoek & Bray⁽⁵⁾ 같은 사람은 불연속면과 절개면의 주향이 비슷한 $\pm 20^\circ$ 주향범위를 포함하는 것을 제시하는 데, 그 이유는 만약 $\pm 20^\circ$ 주향차이가 더 있으면 암괴가 평면 파괴 되려고 하는 Free-face가 다른 암괴로 막혀서 평면파괴의 가능성이 적다는 현장 경험치에 근거하고 있다. 그러나 Goodman⁽²⁾은 이 $\pm 20^\circ$ 조건은 언급하지 않고 있다. 췌기파괴(Wedge failure)의 2가지 조건을 만족시키는 위험지역은 Daylight envelope 내부와 Friction cone의 외부의 공통부분이다.

사용상 주의할 점은 상기의 활동파괴 위험지역에 표시되는 불연속면의 극점이나 불연속면의 교선의 극점은 항상 활동파괴 양상이라고 판단하면 안된다. 암괴가 판상이나 주상형태이면 활동파괴가 아니라 오히려 전도파괴가 발생할 수도 있으므로 현장조사를 다시하여 암괴의 모양을 확인하는 것을 잊지 말아야 한다(Fig. 4).

2.3. 전도파괴 위험지역(Toppling zone)의 설정

평사투영법에서 암괴가 전도파괴되려면 암괴가 휘어지게 되어서 (Flexural movement) 불연속면 상호간에 미끄러짐이 발생한다는 가설에 근거하고 있다^{(2), (3)}. 그러나 서울지역의 화강암인 기존 50여군데의 채석장에서 조사된 바에 따르면⁽¹¹⁾ 암괴자체는 휘어질 정도의 Ductile한 물질이 아니고 딱딱한 Brittle한 물질로서 Flexural movement보다는 단순히 암괴의 중력으로 Toppling이 일어난다는 사실이다. 이 경우에는 Goodman⁽²⁾이 설명한 가설 $90^\circ - \alpha + \Phi < \beta$ 을 따르기 곤란하다(Fig. 3). Toppling은 암괴의 무게중심이 암괴의 하단부에 위치하지 않고 앞으로 위치하므로 암괴의 자중으로 앞으로 전도되어 붕괴된다. 이 전도운동은 어느정도까지 서서히 (Creep) 일어나다가 갑자기 무너지거나, 또한 불연속면의 틈새로 수압이나 물의 결빙작용으로 인하여 측압이 발생하여 더 전도운동을 촉진시킨다. 그러므로 기존에 설정한 전도파괴 위험지역은 더 낮은 절리면의 경사범위에서도 발생할 수 있음에 주의하여야 한다. 또한 국내에서 토질의 산사태를 방지하기 위해서 많이 식생한 아카시아 나무뿌리는 불연속면의 틈새를 강력하게 침투하여 자라나는 특성이 있는데, 특히 수직 불연속면이 많이 발달하는 우리나라의 화강암 지역에서는 지표면에 발달하는 얇은 토질보다도 오히려 수직 불연속면을 침투하여 틈새가 벌어져서 암괴의 중력으로 오히려 전도파괴되는 경우가 많다 (예:서

을 미아동 산사태). 그러므로 아카시아가 지표면에서 무성하게 자라는 지역에서는, 절개면의 경사방향과 불연속면의 경사방향이 같더라도 불연속면의 경사 급한 경우에는 (약 80° 경사이상) 나무뿌리의 침투로 인하여 경사방향이 바뀔수 있다는 것을 고려하여(Fig. 5), 절개면 좌우 양쪽의 경사방향으로 Toppling zone을 설정하여야 한다. 이러한 국내 사례는 차후에 Fig.19에서 예시된다.

또한 Toppling zone의 설정시 Toppling 의 필요조건으로서 불연속면의 주향이 절개면의 주향방향과 $\pm 10^\circ$ 차이 이내에 있어야 한다는 조건이 제시되었다(3). 그러나 국내의 현장에서 적용하여 본 결과 $\pm 30^\circ$ 범위까지도 확대하여서 고려하여도 가능한 것으로 조사되었고(11), 또한 최근에는 Goodman(2)도 이 범위를 변경하여 채택하고 있다.

2.4. 마찰원(Friction cone, Friction circle)의 설정

불연속면은 깨진틈이므로 불연속면의 전단강도는 점착력은 없다고 가정하고 마찰각만 고려하여 $\tau = \sigma_n \tan \Phi$ 로서 나타낸다(Fig. 6). 불연속면의 마찰각은 평사투영 해석법의 중요요소인데, 현장에서 간접적으로 추정하는 방법과 직접시험에 의해서 측정하는 방법이 있다(Fig. 7). 불연속면은 평평하면 약 30° 정도의 Basic friction angle을 지니지만, 굴곡도(i)가 많으면 Basic friction angle + i = Peak friction angle로서 높은 수치를 지니게 된다(Fig. 8a). 굴곡도를 간접적으로 추정하는 방법은 Profile gange로 불연속면의 굴곡도를 파악하여 Barton(1)이 제시한 실험관계식을 이용하여 마찰각을 추정하거나(국내 화강암, 편마암은 조사결과 41.5°로 추정), 또는 Tilt test로서 불연속면을 품고있는 두 암괴를 채취하여 기울여서 활동하는 각도를 파악하여 마찰각을 추정하기도 하나 시료채취상의 어려움과 작은 시료로 측정하므로 Scale effect가 있고 또 상재하중이 매우 작아서 간접측정 방법에 의한 마찰각의 신빙성이 떨어진다. 그러므로 직접전단시험이 많이 사용되는 데, 국내의 화강암과 편마암은 5-4cm 직경 크기의 시료에서 20m 높이의 하중(5.2kg/cm²)에서 연-경암인 불연속면은 편마암이 30°내외, 화강암은 30-32°이 일반적이고(간혹 35°), 때로는 인장절리(굴곡이 있다)에서는 40° 내외로 높게 나타나는 것으로 경부 및 영동고속도로변의 40여군데서 측정되었다. 이때의 Apparent cohesion은 0.1-0.2 MPa였다. 직접전단시험시 주의할 사항은 같은 불연속면이라도 변성암같은 암반에서는 좌우방향으로 불연속면의

차이가 클 수 있으므로 실제로 암괴가 활동하는 방향으로 시험하여야 하고, 또 불연속면의 전단각은 수직하중에 따라서 다르므로(Fig. 6) 실제의 상재하중 범위에서 전단각을 측정하여야 한다. 또한 직접전단시험으로 측정하는 시료는 5-10cm 정도의 작은 크기에서는 높은 전단각을 얻으나 실제로 붕괴되는 수m 크기의 암석에서는 굴곡도 영향이 적어서 전단각이 더 작아져서 30° 정도에 가까워지는 경향이 있다고 알려져(Scale effect) 있으므로 암반사면 안정성을 분석하는 데 있어서 작은 시료에 의한 시험 수치는 절대값으로 이용되기 보다는 토목기술자가 판단하는 Index인 참고 자료라는 것에 주의할 필요가 있다.

그리고 국내의 화강암반에서의 사면붕괴를 관찰한 바에 따르면(11) 암반은 절리가 딱 붙었던 것이 갑자기 무너지는 것보다는 서서히 절리표면에서 암반의 이완이 발생한 후에(예: 틈새에 물이 얼었다 녹으면서 압력으로) 갑자기 무너지는 경우가 많다는 사실이다. 이때의 이완된 틈이 벌어진 불연속면에서의 전단각은 불연속면의 Basic friction angle(약 30°)(5)에 가까운 것이지(Fig. 8d), 절리가 딱 붙어서 절리표면의 굴곡도가 실제로 암반붕괴시에 그대로 적용되는 Peak friction angle(절리의 굴곡효과인 i 와 Basic friction angle의 합한 각도)이 아니다(Fig.6).

상기와 같이 직접전단시험 결과 수치와 그 문제점, 그리고 실제 사면붕괴의 관찰에 의한 결과를 종합하여 판단해 볼 때 실제로 불연속면의 마찰각을 측정하지 못하였을 때, 충전물질이 틈새에 발달하지 않은 경우에는 Hoek & Bray(5)이 제시한 수치와 비슷하게 Basic friction angle에 가까운 30°-32°를 고려하여도 국내 화강암과 변성암에서 큰 무리가 없을 것으로 사료된다. 또한 불연속면 틈새 사이에 풍화토와 같은 이물질이 두껍게 많이 끼어있는 경우에는 불연속면의 굴곡도(i)를 측정하는 암반전단시험이 아니고 틈새물질을 채취하여 토질전단시험을 하여야 한다(Fig. 8e). 이 충전물질의 두께와 특성에 따라서 전단강도가 다양하게 변한다. 서울의 노량대교 현장에서 연-경암의 편마암반의 불연속면(단층)의 틈새에 발달하는 풍화토는 $\Phi=33.5^\circ$, $C=0.05$ MPa로 직접전단시험으로 측정된 적이 있으므로 참고바란다(17), (19).

불연속면의 굴곡도와 충전물질뿐만 아니라 불연속면의 전단력에 미치는 그 밖의 요소들이 있다. 절리의 연속성이 적으면 암괴가 붕괴시 암석도 깨지면서 붕괴되므로 암석의 점착력이 불연속면의 전단력에 부가된다(Fig. 8b). 불연속면의 일축강도도 크면 전단력을 증가시키나, 지하수가 불연

속면이나 인장절리에 충전되면 수압으로 인하여 전단력이 급격히 떨어진 다(Fig. 8f). 나무뿌리도 불연속면에서 썩기힘을 발생시켜 암반의 전단력을 감소시킨다. 상기와 같이 불연속면의 전단각은 복합적인 요소들에 의해서 결정되므로 직접 및 간접시험 뿐만 아니라 현장조사에 의한 자료를 종합 판단하여 결정하여야 한다.

2.5. 현장지질조사

(A) 지표지질조사

기존 절개면이나 주변의 야외에서 노출되어 있는 암반표면에서 발달하고 있는 불연속면을 전부 조사하는 방법과 몇개의 위험 중요 불연속면만 조사하는 방법이 있다(Fig. 9). 전자방법(Fig. 9a)은 불연속면의 발달방향만 일률적으로 통계적으로만 조사함으로써 불연속면의 중요도가 모두 동일하게 고려되므로 실제로 더 위험한 불연속면을 파악하기가 곤란하다. 예를들면, 연속성이 긴 불연속면은 연속성이 짧은 절리보다도 더 위험하고 불연속면의 틈새에 충전물질이 두껍게 끼어있으면, 지하수가 흐르고 있으면 더 위험하게 고려하여야 하나하나, 그냥 동일한 한개의 불연속면으로 파악되기 쉬우므로 토목기술자가 현장에서 다시 분석결과를 확인하는 조사를 하여야할 필요가 있다. 이 방법은 전반적인 경향을 알기위한 방법이지 직접적으로 부분보강를 하려고 할 때는 부분부분으로 나누어서 분석하여야 한다.

중요 불연속면만 조사하는 방법(Fig. 9b)은 암반의 노출이 좋은 사면에서 경험이 많은 토목기술자가 위험하다고 판단되는 중요불연속면만 조사하는 방법으로서 초보기술자는 수행상 오판을 하기 쉬운 방법이다. 그러므로 상기에서 언급한 두방법 모두를 현장에서 적용하여 불연속면들의 암반사면에 미치는 영향을 파악하여야 한다. 화강암에서의 불연속면은 대체로 절리로서 규칙적으로 발달하는 경향이 있으므로 절리를 비교적 쉽게 판단하여 분석이 용이한 편이다(Fig. 10a). 그러나 변성암에서의 불연속면은 절리가 대체로 불규칙하여(Fig. 10b), 큰 붕괴를 야기시키지는 않지만, 단층은 발달이 심하여 간혹 대규모 붕괴의 원인이 되므로 특히 단층의 인지에 주의하여야 한다. 암반사면은 전체적, 부분적인 안정성을 모두 판단하여야 하며 일반적으로 암반사면 안정성 평가방법 및 순서는 Fig. 11에서 서술되어 있다.

(B) 시추지질조사 :

시추조사는 한 지점에 대한 암반조사이므로 주변 지질조사에 의한 자료와 상호보완되어서 파악되어야만 시추조사의 정확도가 증가되는 것에 유의하여 한다. 일반적으로 토목공사의 지반조사로서 수행하는 시추조사는 연암-경암이 나타나는 깊이에서 약 1m 정도만 더 수행하고 중단한다(Fig. 12a). 이는 그 이하에서는 단단한 암석만 나온다는 개념에 근거한다. 그러나 암반이란 단단한 연암-경암 하부에서도 단층이 존재하면 그 틈새로 점토가 두껍게 충전하거나 열수변질작용이 심하면 토층이 두껍게 나타나서 이곳이 활동면이 되어서 암반사면의 붕괴요인이 될 수 있으므로 사면의 하단 계획고 깊이까지는 최소한 시추조사를 수행하여야 한다. 또한 시추조사로서 확인되는 시추코아에서의 불연속면들의 경사방향(주향)은 시추코아가 시추시 회전되므로 일반적으로 실제 경사 방향(주향)을 알 수 없으나, Borehole camera나 Impression packer 등의 특수장비를 시추공내에 삽입하는 경우에는 파악이 된다고 하나 국내의 경우에는 사용장비와 비용, 사업기간등의 문제로 실무에 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 불연속면들의 경사각도는 시추코아에서 파악이 되므로 차후에 지표지질조사에서 파악한 불연속면들의 비슷한 경사각도와 비교하여 불연속면의 경사방향(주향)도 간단히 추정할 수 있다. 암반의 대규모 붕괴를 야기시킬 수 있는 불연속면 틈새에 충전된 점토 등의 물질은 코아회수율이 매우 양호한 경우에만 회수될 수 있고 보통 수행하는 시추조사 방법으로는 회수되지 않으므로 중요한 사면안정성 분석을 위한 시추조사시에는 코아회수율에 거의 100%를 유지시켜야 함에 유의하여야 한다. 국내의 성공적인 시추지질조사 및 설계사례가 Fig.12b & 12c에서 보여진다.

2.6. 보강대책

현장지질조사와 평사투영 해석법에 의해서 불안정하다고 판단된 암반에 대해서는 현장조건에서 작업이 가능한 방법을 위험암석을 털어버리거나, 펜스설치, 절개면의 구배를 낮추거나, 사면의 높이를 낮추거나, 지하수를 제거, 시멘트 지지벽 설치, Rock-bolt 및 Anchor 시공중에서 선택하여야 한다(Fig. 13). 정면 및 측면모형을 고려보아서 전반적이고 개략적인 보강대책을 계획하는 데, 이 단계에서도 역시 평사투영해석법은 매우 유용한 수단으로서 사용된다(Fig. 14). 예를들면 절개면 각도를

줄여서 Daylight envelope를 작게하거나, 절개면 주향을 좌우로 변경시키거나, 록볼트나 배수관으로 마찰력 증대시키는 효과로 위험가능성을 벗어나게 한다. 보강대책중 위험암괴를 털어내는 경우는 암괴가 Key block으로서 뒷부분 암석까지 더 불안정하게 할 염려가 있을 경우는 직접보강을 하는 것이 더 효과적이므로 충분한 연쇄효과도 고려하여야 한다. 록볼트나 앵커등의 직접보강 시공이 불가피하다고 판단되면 위험암괴에 대하여서 한계평형법(Limit equilibrium method)으로서 수치적으로 안전율(Factor of safety)을 계산한다. 평면파괴나 췌기파괴처럼 암괴가 미끄러져서 붕괴되는 형태(Sliding)에는『F.S(안전율)=파괴면에서 저항하는 힘/파괴면에서 미끄러지는(활동하는)힘』으로 계산되고, 암괴가 전도되어서 붕괴되는 형태에는 상기 공식에서 힘(Force) 대신 모멘트(Moment)를 대입하여 판단한다. 현재의 위험암괴의 안전율과 필요한 보강의 안전율을 계산하여 보강량을 파악한다.

2.7. 적용사례

암반절개 공사도중, 공사후, 공사사전에 암반사면의 안정성을 평가하고 보강대책을 수립하기 위한 수단으로서 평사투영 해석법을 최근에 적용한 사례와 특성은 다음과 같다.

2.7.1. 공사중 붕괴된 사례로서 원인규명 및 대책강구

공사사전에 충분한 지질조사 부족으로 인하여 파괴면과 암반분포 및 지하수의 역할을 파악하지 못하였다.

사례 1) 한국도로공사 본사 사옥 신축공사 절개사면(Fig. 15)⁽¹³⁾.

특 징 : 단층이 활동면으로 작용하는 것을 파악못하여 붕괴됨 (1990.4).

내 용 : 30m 높이 및 70° 경사의 편마암 사면으로서 토질의 10m, 풍화암이 6m 두께로 발달한다. 암반의 파쇄가 심한곳(R.Q.D<10% 이하) 단층이 많이 발달하고 있다. 단층 틈새는 10cm 두께의 풍화토가 충전하고 있고 단층면의 경사방향이 절개면의 경사 방향과 같은 특성이므로 단층면이 평면파괴의 활동면으로서 작용할 수 있는 것으로 평사투영해석법에 의해서 해석된다. 시추지질조사가 경암 상부 깊이 까지만 수행하였으므로 경암 하부에서 발달하고 있는 단층 (29°경사)의 존재를 파악하지 못하였다.

그러므로 경암사면으로 1:0.3(73°)구배로 1차로 시공한바, 단층면으로 붕괴가 발생하고 상부 사면 뒷쪽 15m까지 인장철리가 발달하여 이완된 암석들을 제거하기 위해서 2차로 1:1(45°) 구배로 사면의 경사를 낮추고 동시에, 단층면과 인장철리에서의 지하수압을 고려하여 안전을 계산에 의해서 옹벽과 앵커로 보강하였다.

사례 2) 올림픽 대로변의 명수대 절개사면(Fig. 16)⁽¹⁸⁾.

특 징 : 핵석이 발달하는 풍화양상과 단층이 활동면으로 작용하는것을 파악못하여 붕괴됨(1991. 6).

내 용 : 31m 높이의 편마암 사면으로서 풍화토-풍화암이 4m 두께이고, 그 하부는 0.3-10m³ 으로 비교적 큰 크기의 연암-경암인 핵석이 풍화암-풍화토에 박혀있는 양상이다(Fig. 16a). 경암 1m 까지만 시추하여 1:0.3 구배로 설계하여 시공한 후 붕괴되었다. 핵석이 풍화토 풍화암 사이에 박혀있는 암반에서는 풍화토-풍화암에 기준으로 사면구배를 설계하여야지 핵석인 연-경암에 기준하여 설계하는 것은 무리이다⁽¹⁷⁾. ⁽¹⁹⁾.

또한 본 암반에는 단층들이 많이 발달하는 데 단층 틈새는 5-10cm 두께의 풍화토($\Phi=33.5^\circ$, $C=0.05\text{Mpa}$)가 발달하고 있고, 평사투영해석법으로 판단해볼 때 두 단층이 45° 교선에서 절개면쪽으로 췌기파괴의 가능성이 있고 전도파괴의 가능성도 있는 것으로 판단된다(Fig. 16b). 73° 사면에서 1차로 45° 교선에서 붕괴후 63° 경사로 높이려고 하였으나 역시 불안하여 최종으로 1:1(45°) 구배로 하였다. 이 지역에서의 주의점은 실제로 췌기파괴와 전도파괴가 동시에 발생가능성 있는 경우에는 전도파괴를 야기시키는 수직 불연속면의 틈새로 지하수가 유입되어 축압이 발생하여 평사투영법에서 파악된 췌기파괴의 불안정성이 예상하는 것보다도 매우 높다는 것을 지시하여준다.

시추지질조사에서 연-경암 암석으로 판단되므로 1:0.3 구배로 1차로 절개한바 국부적으로 췌기 파괴가 발생하였는 데 이때의 안전율은 $F_s=1.07$ 이었다. 그러므로 1:0.5($F_s=1.21$), 1:1(F_s =안정) 구배중에서 주변여건상 상부 1:1 구배로 2차로 절개하였다. 1:0.3, 1:0.5, 1:1 구배에서의 평사투영방법으로서의 암반사면 안정성 평가가 주는 의미는 Fig.16c에서 도식되었다.

사례 3) 도곡(쌍굴) 터널입구의 측면 절취사면(Fig. 17)⁽¹⁵⁾.

특 징 : 절리면에 과도한 지하수압이 발생하고 단층이 활동면으로 작용하는 것을 파악하지 못하여 붕괴됨(1990.6).

내 용 : 33m 높이 및 70° 경사의 편마암 사면으로서 약간의 풍화토-풍화암(5m) 과 거의 연암으로서 파쇄가 매우 심하여 R. Q. D. <10%이고, 단층이 많이 발달하고 있다. 단층은 Slicken-side로서 반들반들하여 $\Phi=30^\circ$ 정도로 추정된다. 평사투영 해석법으로 분석하면 대체적으로 안전하게 판단되나 90년 여름에 1차로 두 단층의 교선(20° 경사)에서 썩기 파괴가 발생하였다. 붕괴된 부분의 측면도에서 보여지는 바와 같이, 절개면에 평행한 수직절리가 발달하여, 인장균열로서 작용하여 썩기교선과 수직절리에 지하수가 침투하면, 정상시의 안전율 $F_s=1.5$ 가 강우시에는 $F_s=0.7$ 로 급격하게 낮아짐을 알 수 있다. 불연속면의 발달양상을 볼 때 차후에 대규모 위험 암괴로서 작용할 부분의 평상시 안전율은 $F_s=1.5$ 이고 강우시 $F_s=1.3$ 으로서 대체적으로 안전하게 판단된다. 그러나 1차 붕괴시 절개사면 상부표면에서 12m 뒷쪽지역까지 틈새가 1.5-2cm 폭으로 벌어져 있는 인장절리가 많이 발달한다. 즉, 사면의 전체적으로 볼때는 비교적 안전하나 국부적으로는 1차 붕괴시와 같은 파괴가 절개사면 부근에서 계속적으로 발생하여 서서히 사면전체를 위협하게 할 가능성이 크기 때문에 이완된 암석들을 제거하기 위해서도 1:1 구배(45°)로 경사를 낮춤과 동시에(정상시 $F_s=1.5$, 강우시 $F_s=1.2$) 산마루 측구로서 배수처방을 병용하였다.

2.7.2. 암반사면 절개후 부분적인 보강공사 방법 제시:

사례 4) 북악터널(쌍굴)입구 암반절개면(Fig. 18)⁽¹⁴⁾.

특 징 : 일률적인 보강이 아니고 안정성 판단에 의한 부분 보강으로서 보강공사의 비용절감 효과가 있음(1990. 8).

내 용 : 터널입구와 출구에 높이가 26m이고 경사가 80°이고 길이가 총 100여m 되는 화강암 절개사면으로서, 거의 연암-경암으로 이루어져 있고 절리의 발달이 비교적 규칙적이고 암괴가 크나 국부적으로 파쇄대가 발달하고 있다. 암반은 절개한 후에 최종으로 직접보강하려는 경우로서 절개사면을 몇개의 부분으로 나누어서

불연속면, 풍화 및 지하수의 발달 특성을 파악하여 서로 중첩시켜서 안정성 분석을 한다(Fig. 18a). 검토하여본 바 기존 방법대로 격자식으로 록볼트 시공하도록 설계되었으나 재검토 해본 바 어떤 위험압괴는 불충분하게 보강되어 위험요소가 그대로 남아있고 안전한 압괴는 불필요한 시공이므로 낭비로 판단되었다. 한 절개사면인데도 부분적으로 안정, 불안정 상태가 다르므로 위험한 부분만 선택적으로 록볼트 및 앵커를 할 필요가 있다. 보강예를 들면 (1),(2) 지역은 평면파괴 및 쉐기파괴 가능성으로 록볼트 추천하나 (3)지역은 경사가 급한 절리와 절개면의 주향방향이 많이 차이나서 안전하고, 또 완만한 절리는 평사투영법으로는 평면파괴 가능성이 있으나 실제로 재확인하니 절리의 연속성이 짧아서 위험가능성이 없는 것으로 판단되었다(Fig. 18b). 또한 본지역은 단층 파쇄대가 많이 존재하므로 그 틈새로 지하수의 용출이 많아서 슛크리트 타설시 배수관의 설치가 요망되나 시공상 부적합한 설치가 우려되므로 슛크리트 타설을 구태여 시공할 실효가 적다고 판단되었다.

사례 5) 하왕십리동 재개발지역 암반사면(Fig. 19)(12)

특징 : 위험 암반에 대하여 약간의보강공사만으로도 대도시 인근의 방치된 땅을 재활용함(1990. 6).

내용 : 기존의 화강암 채석장 지역으로서 높이가 30m, 길이가 200m 되는 수직암반절개면이 있고 절개면 하부에 낙반위험 때문에 방치된 8000여평을 아파트 부지로 활용하려고 안전진단에 의한 보강대책을 강구하였는데, 이지역은 절개면의 구배를 낮추기에는 주변에 기존아파트 및 가옥들이 인접하여서 직접 보강방법만이 유일한 선택이었다. 그러므로 불연속면, 암석풍화, 지하수유동과 아울러 식생상태도 주요 판단자료로서 사용하여, 이 자료들을 서로 중첩하여서 위험가능한 부분을 파악하였다(Fig. 19a). 지표면 부근에 1-2m의 얇은 풍화토와 불연속면 부근에 약간의 풍화암을 제외하고는 거의가 연-경암이고 지하수의 유동이 보통이다. 불연속면은 주로 절리로서 대체로 발달이 적고 완만한 수평적인 경사를 지니고 있어서 암괴들이 비교적 안정하지만, 국부적으로 Fig.19b의 (B)지역 같은 곳에서는 불규칙하게 수직

절리가 많이 발달하고 있다. 기존 평사투영해석법에 따르면 Fig. 19b의 (B)지역에서는 두절리의 교선으로 썩기파괴 가능성이 있다고 판단된다. 그러나 실제로 야외관찰에 의하면 암괴가 수직으로 긴모양으로서 수직절리 틈새로 아카시아 나무뿌리가 지표면에서부터 깊게 침투하여 썩기힘이 발생하여 오히려 전도 파괴될 위험이 있다. 그러므로 반대편 경사방향 쪽에도 Toppling envelope 지역을 선정하여야 올바른 판단을 할 수가 있다. 그러므로 보강대책으로서 아카시아 나무는 제거하고 지표면 가까이에 있는 틈이 많이 벌어진 수직암괴는 미리 제거하고, 중간 하부의 수직암괴는 좌, 우측에서 록볼트로 보강하였다.

2.7.3. 절개공사전에 암반사면의 최적안정 절개구배 제시:

사례 6) 경부 및 영동고속도로 확장공사시 예상되는 대절개사면(Fig. 20)(17), (19)

특 징 : 사전에 최적안정구배를 설계하여 사면붕괴 가능성을 예방하려는 목적이다(1991.3 & 1991.6).

내 용 : 기존 절개사면이나 주변의 노두 및 시추코아에서 우세하게 발달하고 있는 모든 불연속면의 방향을 통계처리하여서 우세한 방향을 파악하여 사면불안정 요소를 최대한 줄일 수 있는 최적안정 절개구배를 설계하였다. 또한나의 본 설계 개념의 특징은 불연속면의 발달빈도가 매우 많아서 암반이 매우 파쇄되어 있으면 토질사면과 같은 원형파괴의 가능성도 고려하여 설계하였다. 이 설계방법은 기존의 국내에서 설계하던 암석강도에 의한 절개사면의 구배 설정보다는 암반의 사면 붕괴의 거동에 보다 부합하는 합리적인 접근이다. 그러나 주의할 점은 실제적인 절개면을 보지 않은 상태에서 주변의 불연속면의 발달로서 암반 내부의 상태를 추정하는 것이므로 차후에 절개공사시에 감리단계에서 실제 불연속면 상태와 추정사이의 오차를 확인하여 보정할 수 있는 여지를 남겨두어야 할 필요가 있다.

3. 결론 및 제안

(1) 암반내에 발달하고 있는 불연속면들을 조사하여 사면 불안정을 야기

시키는 압괴를 불연속면의 방향과 마찰각 및 절개면의 방향간에 압괴의 운동역학적인 개념에서 간단히 평사투영법을 사용하여 판단하는 방법은 기존 절개공사 현장이나 절개예정 사면설계등의 다양한 현장에서 적용하기에 매우 효과적인 큰 장점이 있다. 그러나 이 방법에 의해서 확일적으로 사면안정, 불안정성을 판단하여서는 안된다. 국내의 암반사면에 적용하여 본 바, 이 방법은 불연속면의 마찰각에 영향을 주는 여러 요소들 (연속성, 틈새, 충전물질 등등)과 압괴의 기하학적인 모양; 또 환경요인(나무뿌리 및 빙압의 효과)들을 고려하지 못하고 있으므로 이들의 암반사면 불안정성에 미치는 효과를 다시 현장에서 판단하는 보완대책이 병행해서 수행되어야만 할 필요가 있는 것으로 판단되었다.

- (2) 평사투영해석방법을 이용하여 암반사면의 안정성을 평가하기 위해서는 노두에서 불연속면의 발달상태에 따라서 부분적으로 나누어서 평사투영해석 방법을 적용하여야 한다. 또한 시추지질조사시에는 좋은 코어 회수율을 유지시키는 상태에서 사면계획고 깊이까지 시추하여 불연속면의 발달상태를 평사투영해석법을 적용하여야 한다.
- (3) 절개공사 지역을 형성하고 있는 암석종류에따라서 불연속면의 발달특성이 다르므로, 각 암석특성에 부합되게 지질조사 및 사면안정성 해석이 수행되어야 한다. 예를들면 화성암은 비교적 규칙적인 절리들이 발달하고 단층의 발달은 적은 편이어서 화강암 지역에서는 암반 절개시에 압괴가 연장성이 비교적 짧은, 규칙적인 절리에 의해서 부분적으로 붕괴될 요인이 있으므로 이에 대한 지질조사 및 안정성분석이 중점적으로 수행되어야 하나(예:서울의 강북지역), 변성암은 화성암에 비해서 비교적 오래된 암석이므로 여러번에 걸쳐서 지각변동을 많이 받아서 파쇄가 심한 불규칙한 절리뿐만 아니라 단층을 많이 포함하고 있으므로 암반절개시에 연장성이 비교적 큰 단층에 의해서 대규모 붕괴가 발생하는 경우가 많으므로 이에 주안점을 두고 지질조사 및 안정성분석이 수행되어야 한다(예: 서울의 강남지역)
- (4) 국내의 암반내에는 수직절리들의 발달이 심하다. 이 수직절리들이 공교롭게도 절개면의 주향방향과 비슷하면 이 수직절리들이 인장절리 역할을 하여서 수직절리 틈새로 침투하는 지하수가 축압으로서 작용하여 암괴들, 특히 절개면 근처에 있는 암괴들의 안전율을 급격히 떨어뜨리는 경향이 있다. 이 경우에는 평사투영해석법에서 안전하게

판단된 암괴도 실제로는 붕괴될 위험이 많으므로 지질조사시에 이 수직절리들의 역할을 판단하여야 한다. 이 위험성을 간과할 경우에는 절개면 근처에서의 국부적인 작은 붕괴가 비교적 안전한 암반전체의 붕괴로도 발전될 수 있다. 이러한 지역에서는 보강대책으로서 배수시설의 설치가 다른 대책보다도 매우 효과적으로 적용될 수 있다는 사실을 첨언한다.

감사의 말씀

본 논문에서 언급한 적용사례들을 수행함에 있어서 사업참여 기회를 주신 서울시 종합건설본부 이동 본부장님, 한국도로공사 강재수 과장님 및 지동한 과장님, 또한 한양대학교 정형식 교수님, 남원건설 김주범 부사장님, 고려대학교 이인모 교수님, 서울시립대 이송교수님, 대림기술연구소 김선기 부장님, 현대엔지니어링 임만빈 부장님들께서 많은 도움을 주신것에 대하여 깊은 감사 드립니다.

참고문헌

1. Barton, N.(1976). "The shear strength of rock joints," Int. J. rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp. 255-79.
2. Goodman, R.E.(1989). "Introduction to rock mechanics (2nd ed.)," John wiley & Sons, pp. 562
3. Goodman, R.E. and Bray, J.W. (1977). "Toppling of rock slopes," proceeding, speciality conference on Rock Engineering for Foundations and slopes, ASCE(Boulder, Colorado), Vol.2, pp. 201-234.
4. Hencher, S.R. (1987). "The implications of joints and structures for slope stability," Slope Stability, Wiley & Sons. Ltd., pp. 145-186.
5. Hoek, E & Bray, J.W. (1981). "Rock slope engineering," 3rd ed., The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 358.
6. ISRM(1978). "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses," Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abstr., Vol.15, pp.319-68
7. Patton, F.D.(1966). "Multiple modes of shear failure in rock," Proc. 1st Int. Congr. Rock Mechn., Lisbon, Vol. 1, pp.509-13.

8. Richards, L.R. & Atherton, D.,(1987). "Stability of slopes in rocks,"
In Ground Engineer's Reference Book, Butterworths, London, pp.
12.1-12.16
9. Starkey J. (1989). 『FABRIC』, Univ. of Western Ontario Ontario,
Canada
10. 산업기지개발공사, (1986). "암반사면의 안정성분석을 위한 사용자 지침
서," pp. 72
11. 이수곤, (1988). "한국의 산사태 조사연구," 한국동력자원연구소, pp. 165
12. 이수곤, (1990.6), "서울 하왕십리동 일대의 암반사면 안정성 조사보고
서," 한국동력자원연구소, pp.127
13. 이수곤외 (1990.6). "본사사옥 증축 절토부 사면안정성 조사보고서," 한국
도로공사, pp. 72
14. 이수곤외, (1990.8), "서울 북악터널(쌍굴)입구 암반사면에 대한 안정성
검토서," 서울시 종합건설본부, pp. 71
15. 이수곤, (1990.11), "서울 도곡터널(쌍굴)입구 절취사면의 안정성 분석
및 대책과 도곡(쌍굴)터널의 안정성 검토서," 서울시 종합건설본부, pp.
76
16. 이수곤(1990.12). "경기일원의 암반사면 안정성 조사연구," 과학기술처,
pp. 250.
17. 이수곤외, (1991.3), "경부고속도로(수원-남이간) 확장공사 실시설계를
위한 토목지질조사보고서," 한국동력자원연구소, pp.676
18. 이수곤, (1991.5), "올림픽 대로의 노량대교변 암반사면 안정성 검토서,"
서울시 종합건설본부 pp. 129
19. 이수곤외, (1991.6), "영동고속도로(신갈-원주)확장공사 실시설계를 위
한 토목지질조사보고서," 한국동력자원연구소, pp. 901

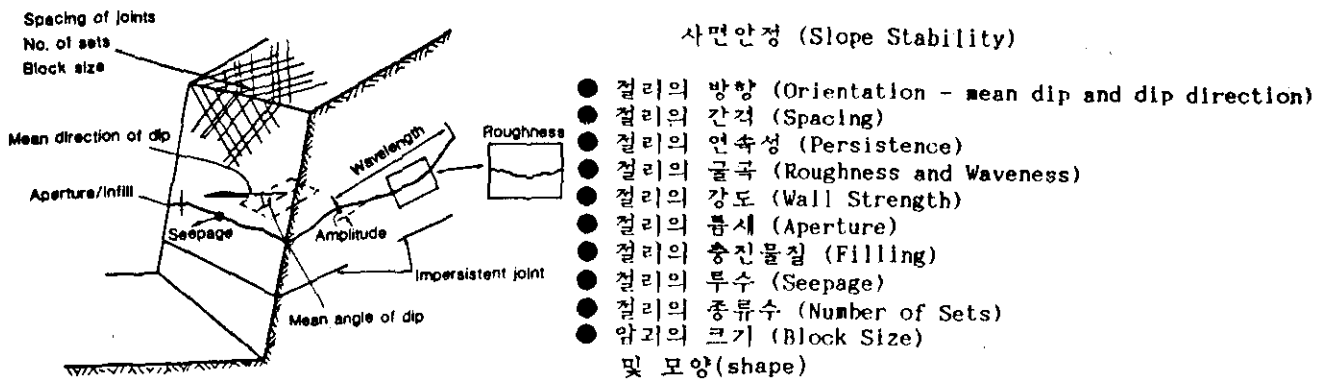


Fig.1. 암반의 불연속면의 토목지질공학적인 특성을 파악하기 위한 조사요소 (ISRM, 1978).

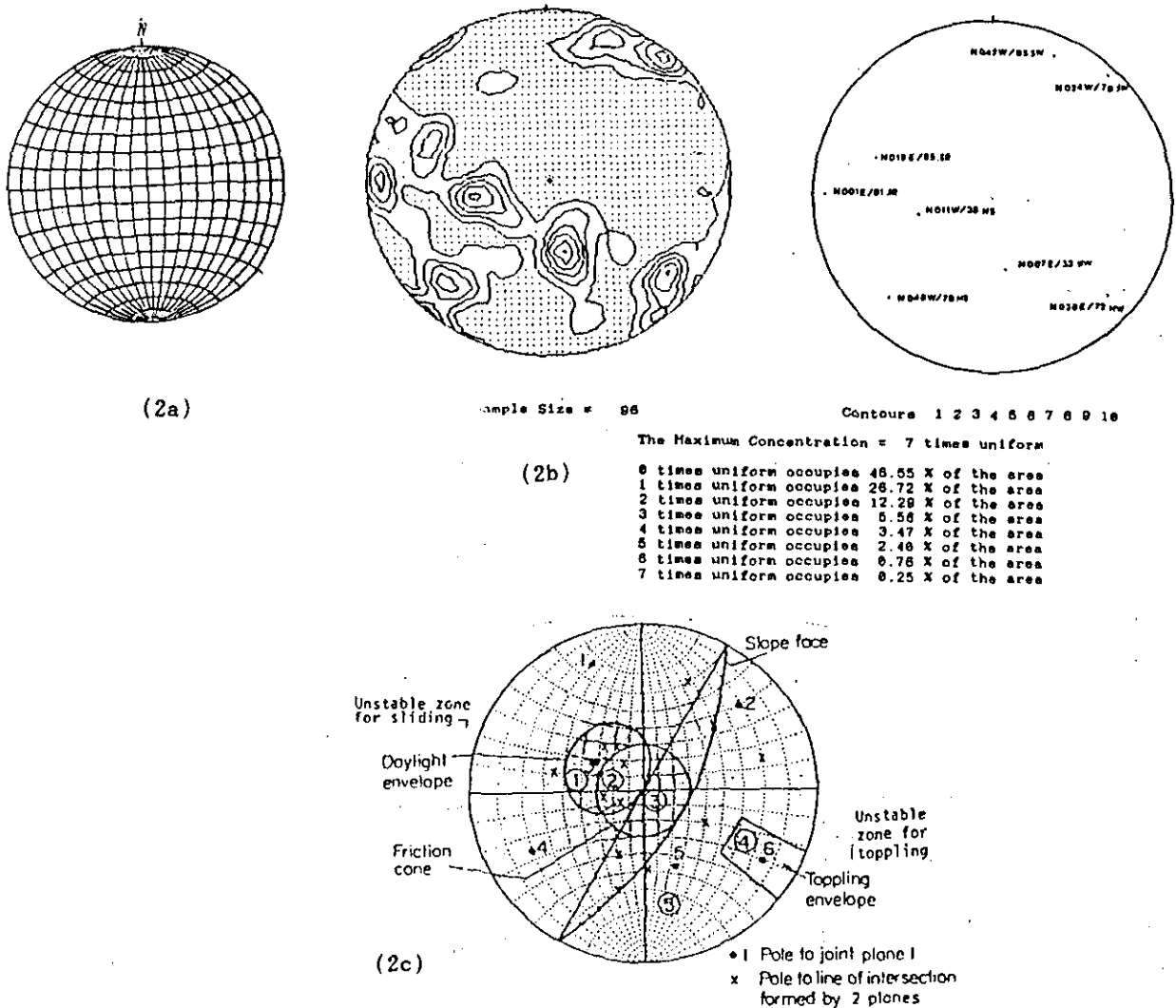
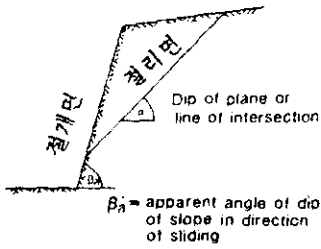


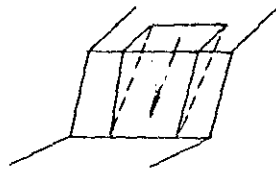
Fig.2. 평사투영 해석법을 이용한 암반사면의 안정성분석
(2a) 평사투영망 (2b) 불연속면의 분포밀도 (2c) 안정성 해석

Fig. 3. 평사투영 해석법의 중요요소 (절개면의 주향 및 경사, 절리면의 주향 및 경사, 절리면의 마찰각) 및 사면불안정 조건

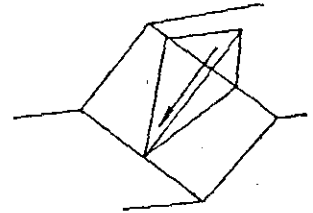
(A) Conditions for sliding



절리가 한 방향으로 발달한 암반



절리가 두방향으로 발달한 암반

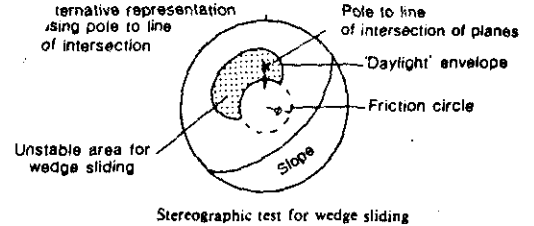
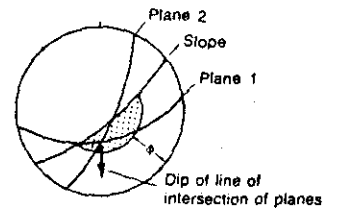
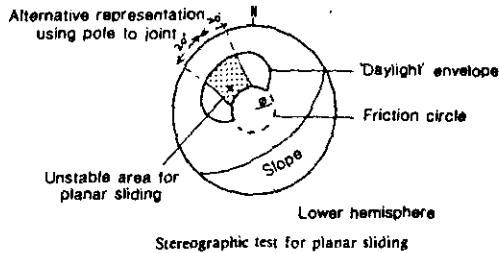
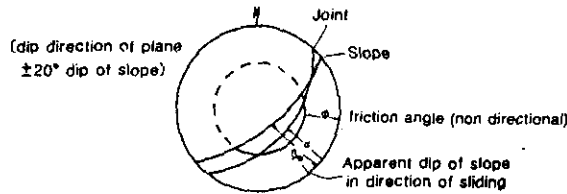


평면파괴의 조건 (Plane Failure)

1. 절리와 절개면의 경사방향이 같고
2. 절리와 절개면의 주향이 비슷 ($\pm 20^\circ$ 의 주향차이 이내)
3. 절개면의 경사 > 절리의 경사 > 절리의 마찰각 ($\beta_a > \alpha > \phi$)
4. 붕괴되는 암괴의 양쪽 측면이 절단되어서 암괴가 무너지는데 측면의 영향이 없어야 한다.

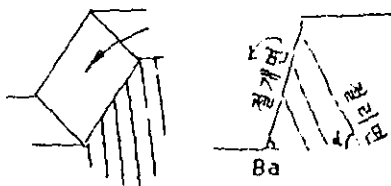
쇄기파괴의 조건 (Wedge Failure)

1. 절리의 교선과 절개면의 방향이 같고
2. 절개면의 경사 > 절리의 교선의 경사 > 절리의 마찰각 ($\beta_a > \alpha > \phi$)



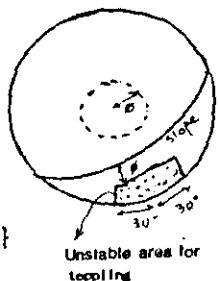
(B) Conditions for toppling

수직절리가 발달한 암반



전도파괴 (Toppling)의 조건

1. 절개면과 절리면의 경사방향이 달라야 한다.
2. 절개면과 절리면의 주향차이가 $\pm 30^\circ$ 이내
3. $(90^\circ - \text{절리의 경사}) + \text{절리의 마찰각} < \text{절개면의 경사}$ ($(90^\circ - \alpha) + \phi < \beta_a$)



Stereographic test for toppling

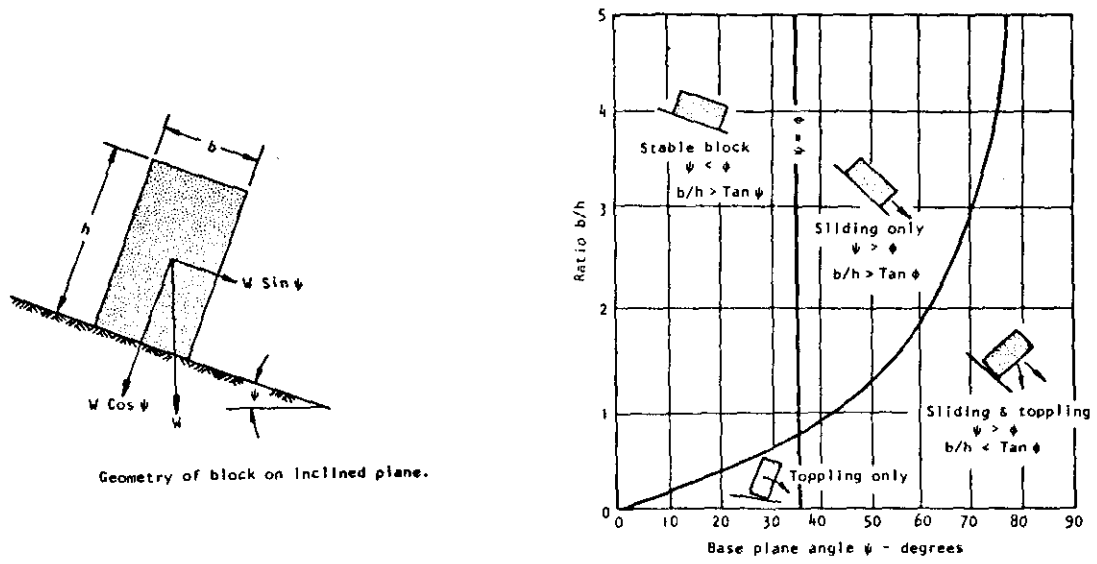


Fig. 4. 불연속면상에 놓인 압괴의 sliding과 Toppling의 조건

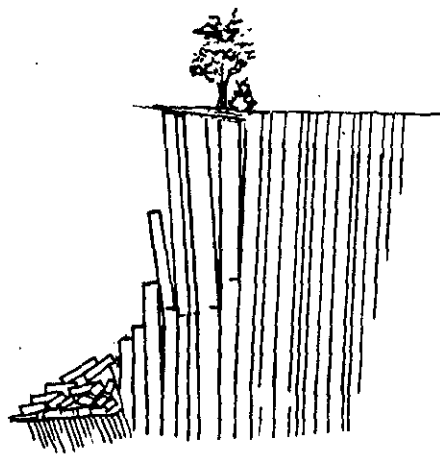


Fig. 5. 나무뿌리의 썩기압력에 의한 전도파괴

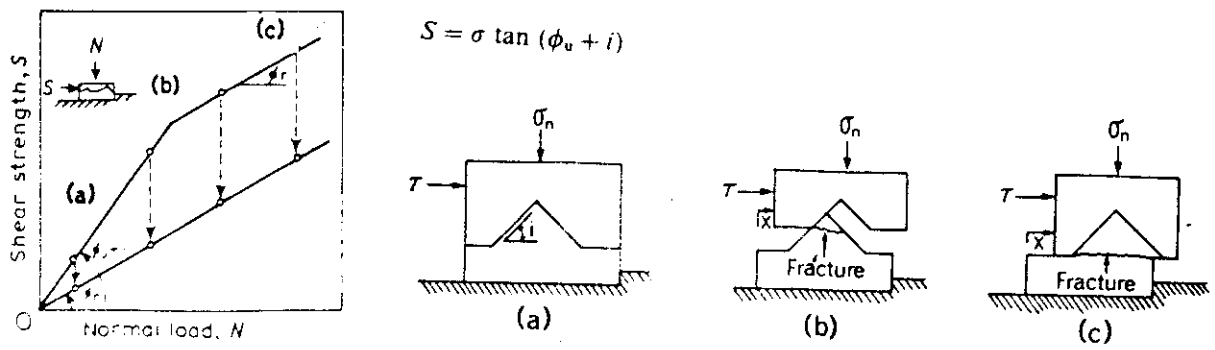


Fig. 6. 불연속면의 전단특성 (Patton, 1966)

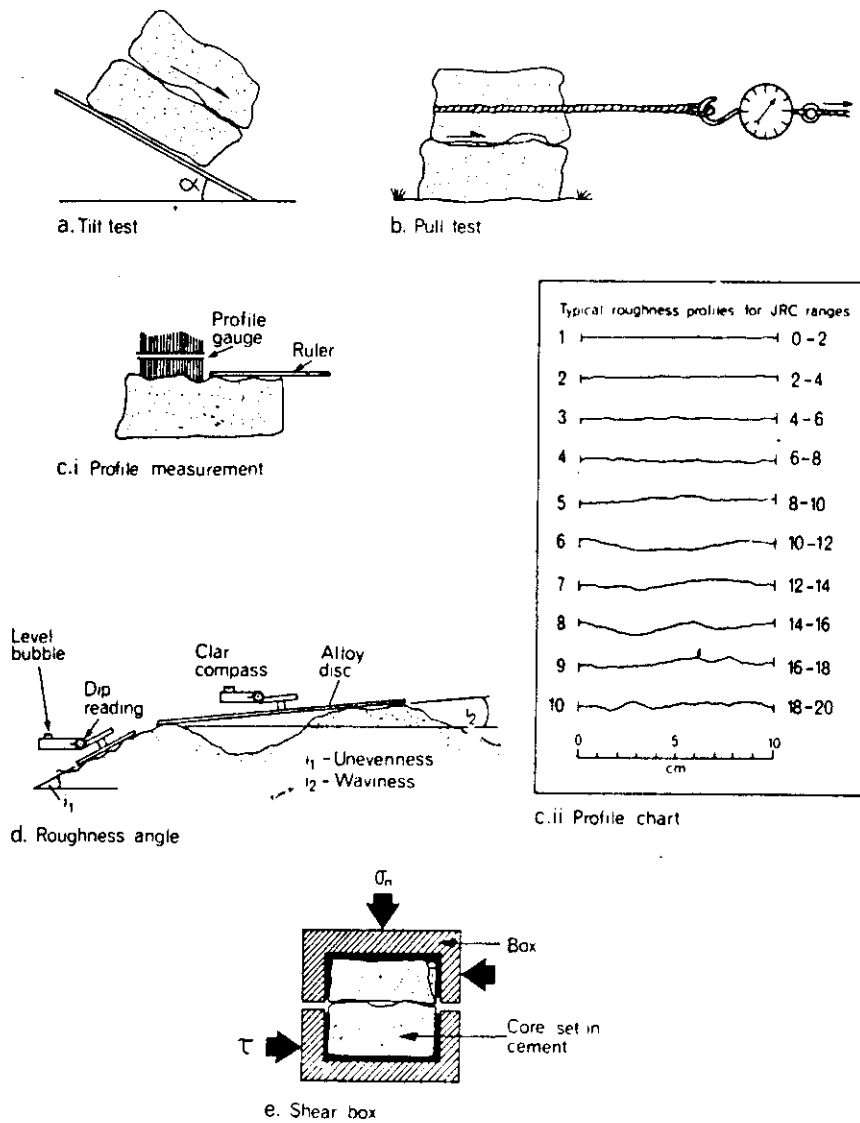
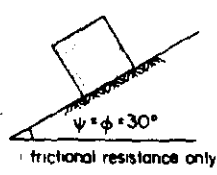
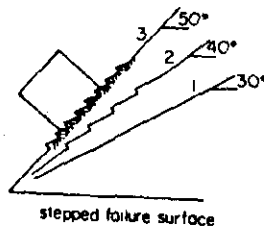


Fig. 7. 불연속면의 전단강도(마찰각)를 측정하는 방법

Fig. 8. 불연속면의 전단력에 영향력을 미치는 요소

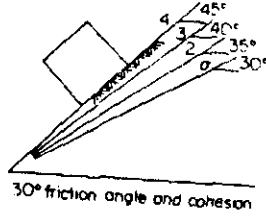


(a) 굴곡도



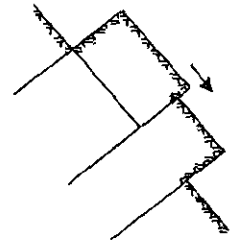
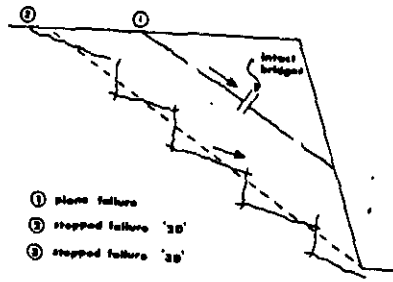
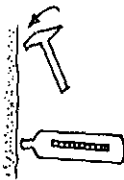
- 1. $i = 0$
- 2. $i = 10^\circ$
- 3. $i = 20^\circ$

(b) 연속성



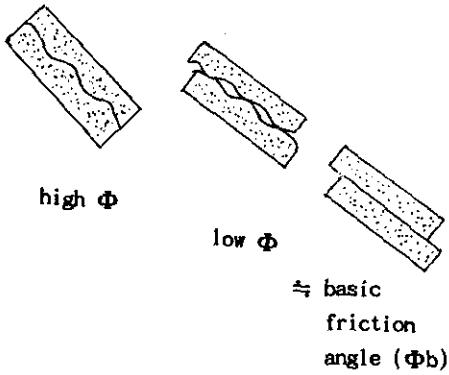
- 1. $c = 0$
- 2. $c = 2.5 \text{ kPa}$
- 3. $c = 5.0 \text{ kPa}$
- 4. $c = 7.5 \text{ kPa}$

(c) 일축강도

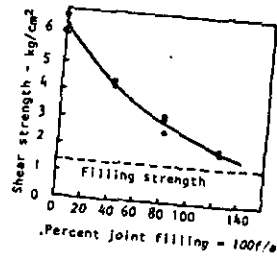
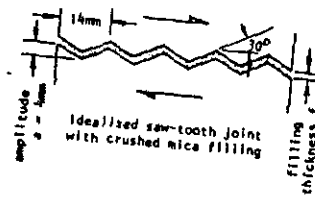


연속성이 없으면
앞쪽의 압력이
지탱하여 뒤쪽의
압력이 안무너진다.

(d) 틈새



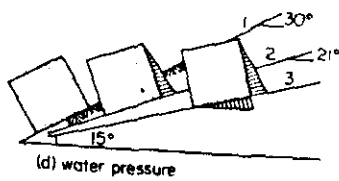
(e) 충전물질



두껍게 충전되면
전단강도가
작아지고

변형량
이 크다

(f) 지하수, 나무뿌리



- 1. No water forces
- 2. Water force on rear face of block
- 3. Water forces on rear and base planes of block

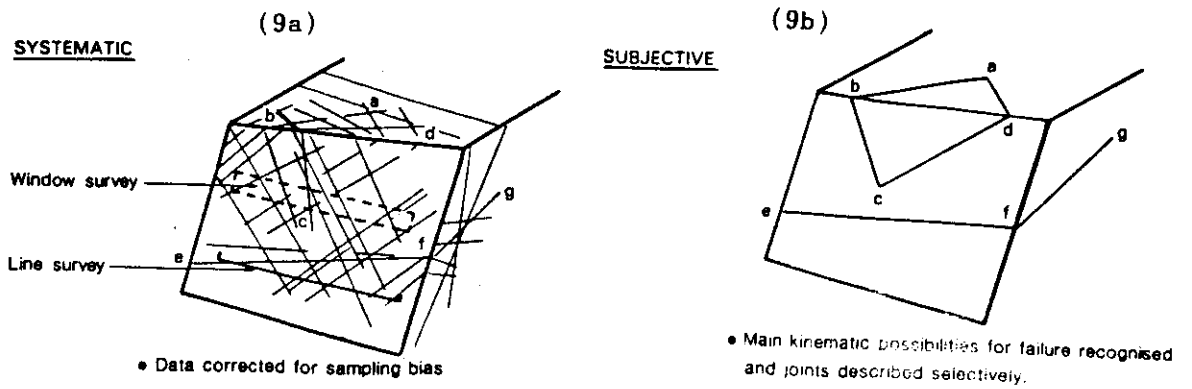


Fig. 9. 암반사면에서 불연속면의 발달분포를 조사하는 방법 (Hencher, 1987)

Fig. 10. 암반내의 불연속면의 발달

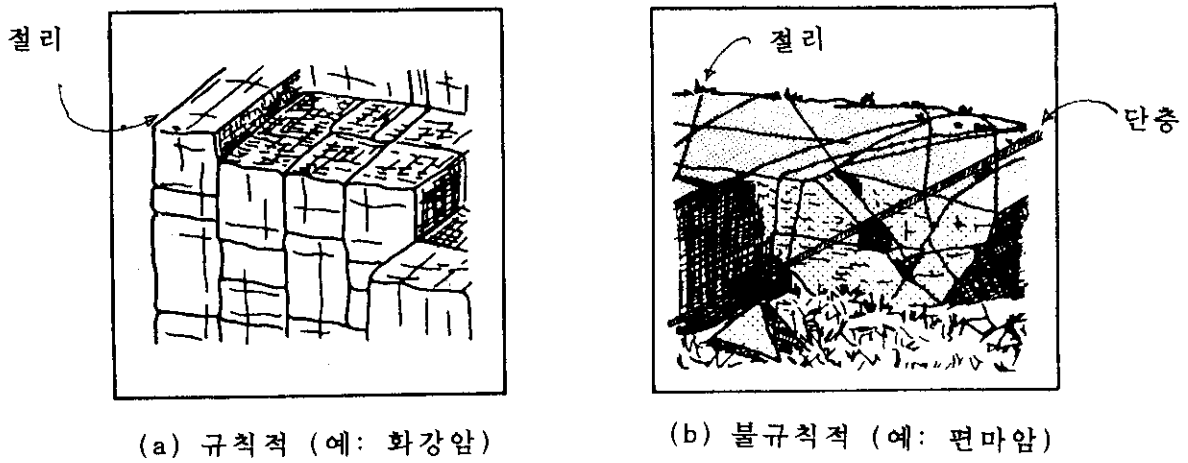
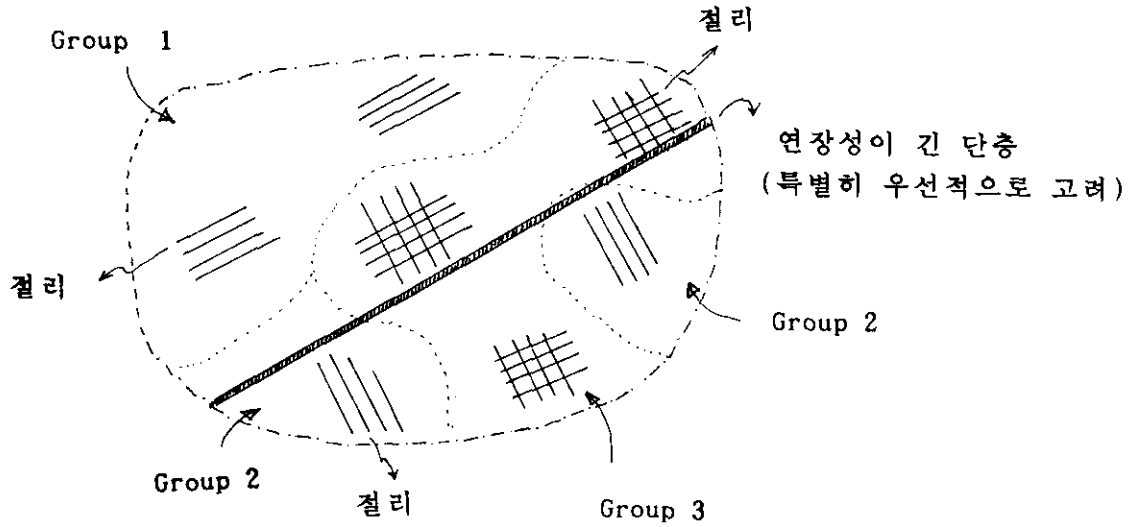


Fig.11. 암반사면의 안정성을 평가하는 방법 및 순서

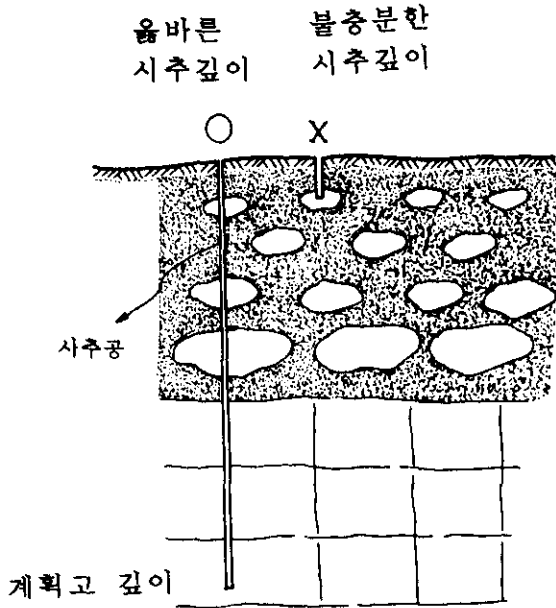


* 평가방법 : 불연속면 조사시 각 불연속면 종류마다 나누어서 각 종류별로
만 불연속면의 주향과 경사를 조사하여 평사투영법에 적용하여 ① 전체
적인 안정성 검토와 아울러 ② 부분적인 안정성 검토도 하여야 한다.

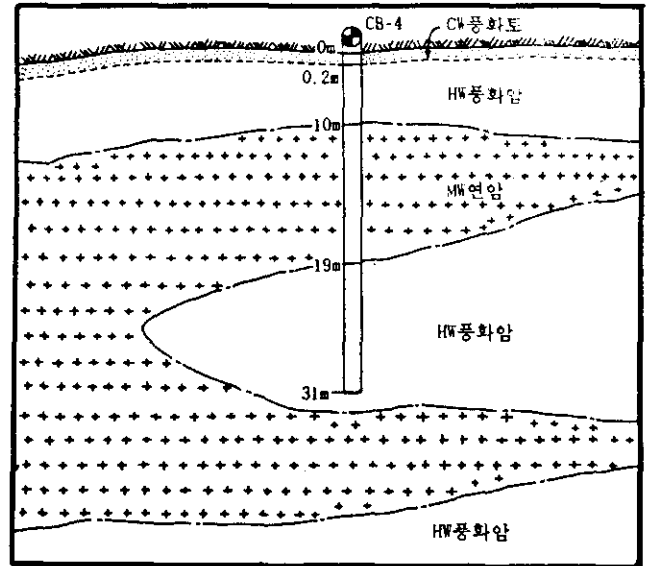
* 평가순서 : 암반의 사면안정성 해석에 접근하는 순서는 다음과 같다.

- (1) 한 노두지역에서도 불연속면의 방향이 부분부분 국부적으로 변하면 그
변하는 지역을 **GROUP**으로 나누어서 따로따로 부분적인 암반사면 안정
해석한다. 전체적인 안정성검토는 연장성이 긴 절리나, 특히 단층의
특성을 부분적인 안정성 해석보다도 우선적으로 고려하여 판단한다.
- (2) 그리고 평사투영법에 의해서 개략적으로 위험, 약간위험, 중간위험지역
으로 몇개의 위험 **ZONE**으로 나눈다.
- (3) 현장답사를 다시하여서 암반의 모양이나, 불연속면의 마찰각에 영향주
는 (불연속면의 지하수유동, 연결성, 틈새, 충전물질, 굴곡도, 나무뿌
리 등등) 요소들을 다시 현장 재확인하여서 최종적으로 안정성을 재검
토한다.
- (4) 그후에 위험암반만 모식적으로 그림을 그려보고, 수치분석을 위하여 안
전율을 계산한 후 현장작업조건(작업조건에 타당하고)에 맞고 경제적인
사면안정대책을 강구한다(예 : 위험암석을 털어버리거나, rock-bolt,
anchor, 방책설비, 절개면의 경사를 낮추거나, 사면높이를 낮추거나,
지하수를 제거한다).

Fig.12. 사면안정성 조사를 위한 시추조사 깊이



(12a) 보통의 시추깊이 (경암 1m까지 시추)



(12b) 계획고까지 시추한 사례

(영동고속도로 확장공사, 1991. 6)

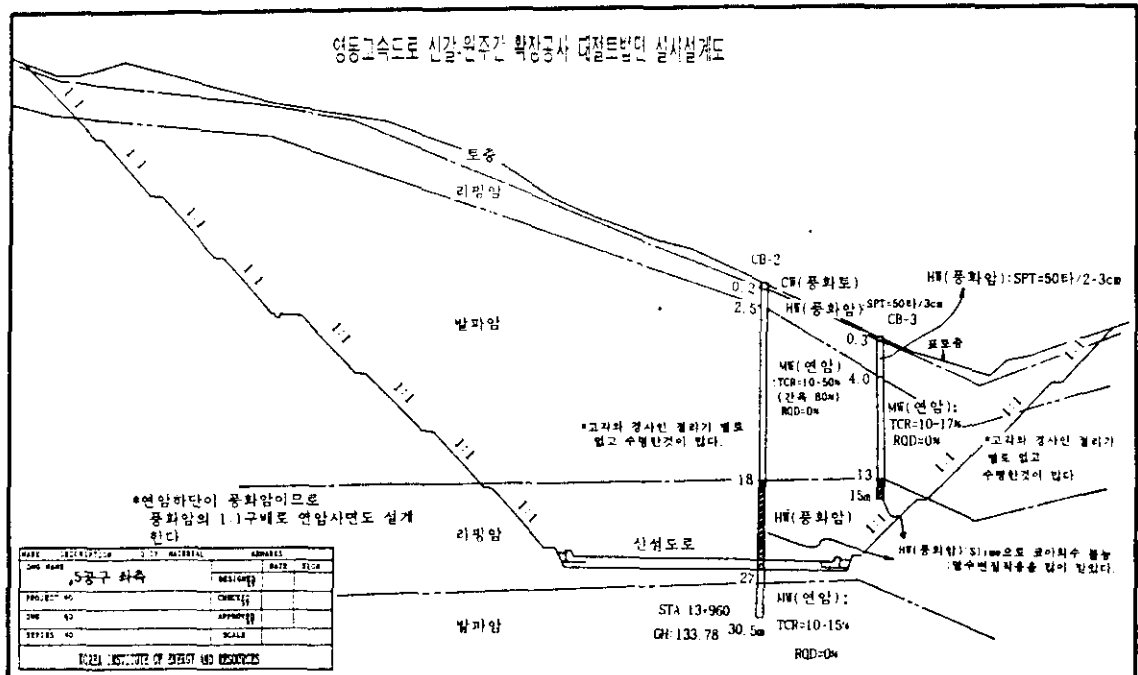


Fig.13.86 Execution drawing of the Site 5(차축).

(12c) 12b의 조사에 입각한 설계사례

Fig. 13. 암반사면의 안전대책 방법(하왕십리동 보강사례: 1990.6)

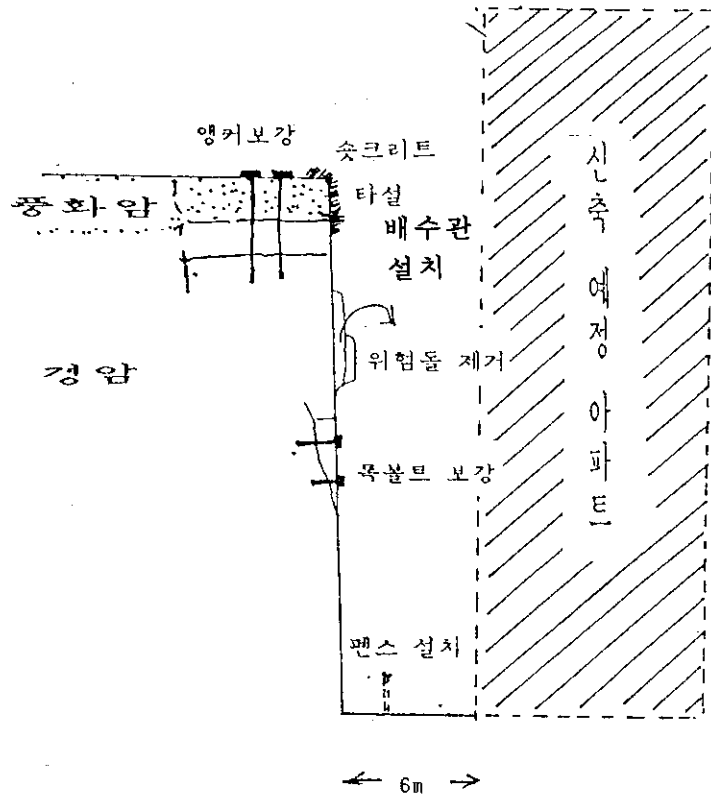
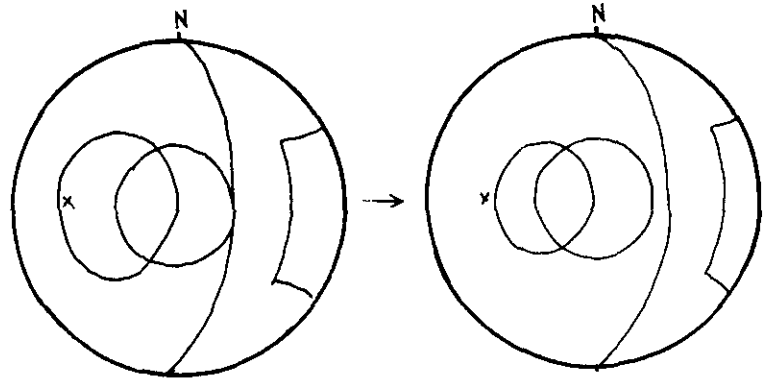


Fig.14. 보강대책을 수립하기 위한 평사투영 해석방법의 응용:

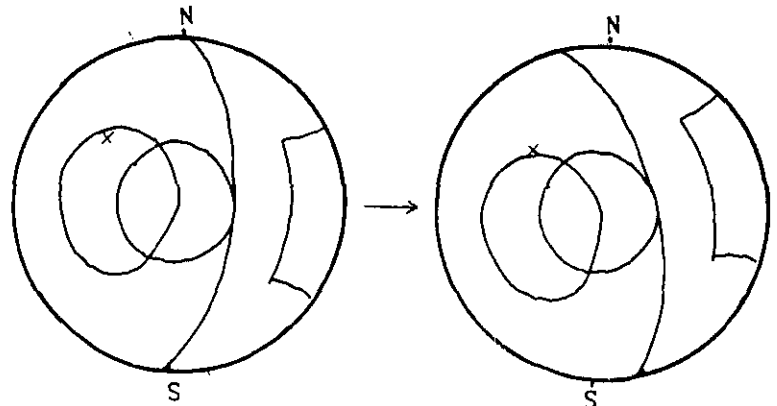
불연속면의 방향은 자연상태이므로 변경불가능하나 절개면의 방향과 절개면의 경사 또 불연속면의 마찰각은 인위적인 변경이 가능하므로 이 변경함수를 이용하여 암반의 안정성을 높이기 위한 보강대책을 기초적으로 고려해본다.

예: 쇄기파괴
 $\Phi = 30^\circ$

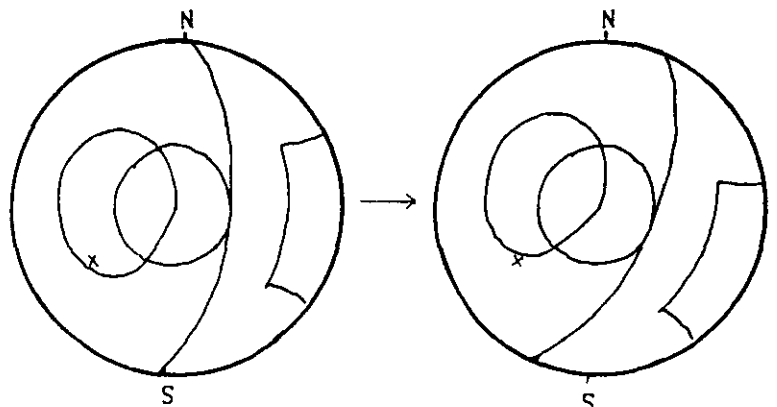
예 1. 절개면의 경사를 줄이는 것이 효과적



예 2. 서쪽(왼쪽)으로 절개면의 주향을 바꾸는 것이 효과적



예 3. 동쪽(오른쪽)으로 절개면의 주향을 바꾸는 것이 효과적



예 4. rock bolt와 배수관으로 불연속면을 보강하여서 마찰력 (Φ)을 증가시키는 것이 효과적

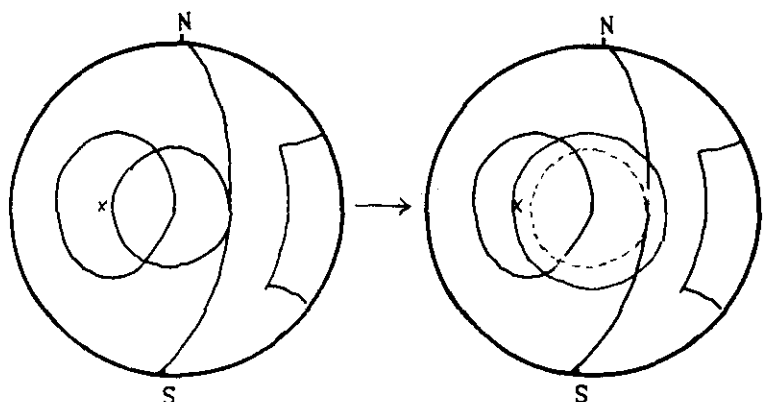


Fig. 15. 한국도로공사 본사 사육중축 절개지(1990.6)

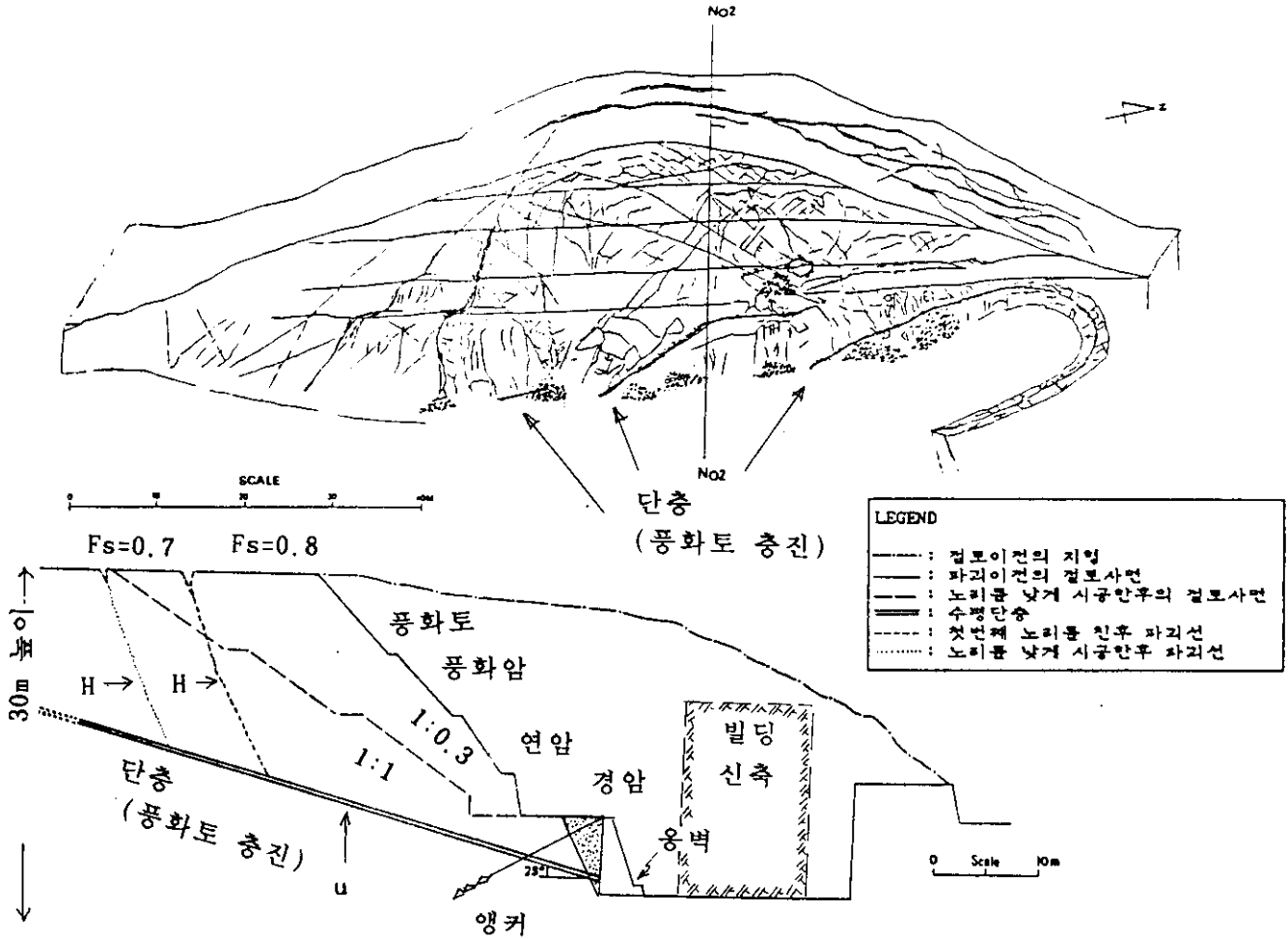
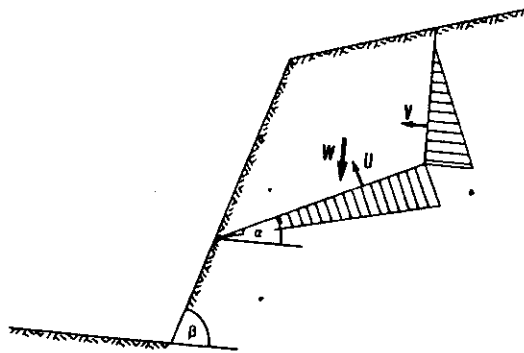
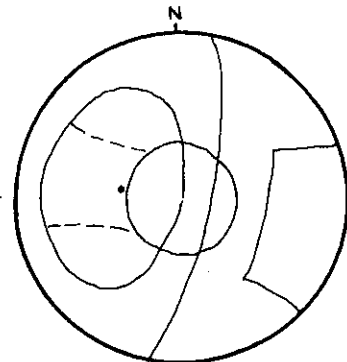


그림 1.5 No.2선에서의 횡단면도 및 파괴 양상



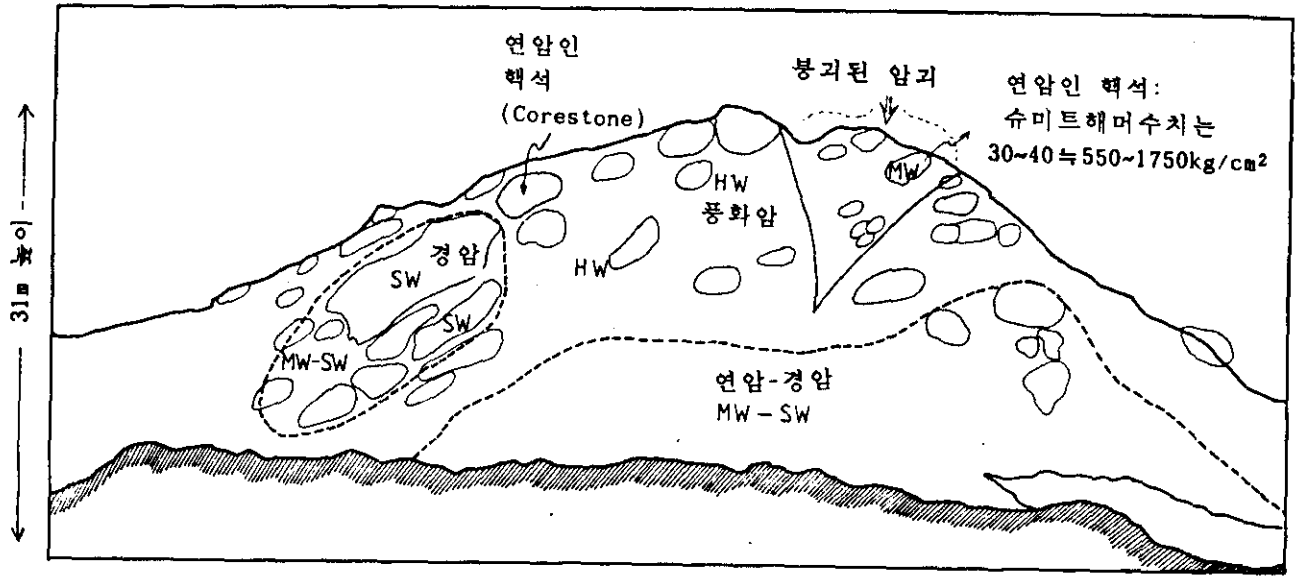
평면파괴 가능성



절개면: NISE/75SE
 단층면: NISE/29SE
 마찰각: 28°

Fig.16. 올림픽대로의 노랑대교변 절개사면(1991.5)

(16a) 핵석풍화상태



(16b) 불연속면(절리, 단층)의 발달상태

