

서울일원의 花崗岩과 片麻岩 切取斜面의 安定性 研究

- Engineering geological studies on the stability of granitic and gneissic rock cuts in Seoul, Korea. -

이 수 곤*
Lee, Su-Gon

Abstract

With the construction boom in Korea, many man-induced cut slopes are created by the various construction works. It is apparent however, that geotechnical engineers in Korea often fail to take into account the potential geological impact on cut slopes, and consequently numerous unstable rock cuttings are being left and overlooked on such areas as expressways and national roads as well as in major cities. The instability of rock cut faces in those congested areas is one of the major geological hazards encountered in Korea which may result in serious loss of life and property.

Several case studies on the effect of instability to cut slopes of less weathered rocks have been carried out intermitterly by the author since the late 1980's. The objectives of the research were twofold (1) to study the types and characteristics of the instability of cut faces in Korea with particular emphasis on the capital, Seoul and (2) to assess the cut slope instability and the application of possible remedial measures taking into consideration the geological nature of the Seoul region.

요 약

한국에서 건설공사가 활발히 진행됨에 따라 여러 토목공사와 관련된 많은 절취사면이 형성되고 있다. 그러나 종종 토목기술자들이 절취사면에 미치는 지질학적인 요인들의 영향을 충분히 고려하지 않아서 고속도로, 국도 및 대도시 인근에서 많은 불안정한 절취사면들이 방치되어 있는 경우가 있다. 그러므로 절취사면 붕괴시에는 심각한 인명과 재산의 피해가 발생할 수 있으므로 한국에서 절취사면의 불안정성은 중요한 지질학적 재해종의 하나이다.

암반 절취사면의 불안정성에 관한 수 차례의 사례연구가 1980년 후반부터 본 저자에 의해서 간헐적으로 수행되었다. 연구의 목적은 두 가지였다: (1) 한국, 특히 서울에서의 절취사면 불안정 형태 및 특성을 연구하고, 또한 (2) 서울의 지질특성에 적합한 절취사면의 불안정성평가에 관한 해석방법과 아울러 적절한 보강대책 방안을 연구하고자 하였다.

* 정회원, 한국자원연구소 환경지질연구실 선임연구원

1. 서 론

최근 서울 일원에서 많은 절취공사가 수행되고 있어서 이와 관련된 대규모 절취사면들이 형성되는데, 간혹 암반사면 불안정성의 문제가 발생하곤 한다. 이에 따라서 본 논문은 다음과 같은 여러 목적에서 서울 일원의 절취사면 안정성 연구를 수행하였다.

- 서울시 일원에 걸쳐 많은 기존 절취면들이 존재하는데, 매우 위험하게 느껴지는 절취면은 그대로 방치되어 있는 경우가 많으므로 위험절취면을 합리적으로 보강하여 절취면 인근의 비싼땅을 이용하고, (2번의 연구과제) 19, 30)
- 이미 붕괴된 절취사면을 조사하여 붕괴원인 및 양상을 판단하고, 차후에 서울 일원의 절취면 공사시에 보다 국내의 지반특성에 부합되는 설계와 보강시공을 도모하고자 하는 의도도 있었고 (13번의 연구과제), 6, 8, 9, 10, 13, 14, 21, 22, 25, 28, 29, 31, 32)
- 정밀 토목지질조사에 의해 사전에 절취면을 보다 안전하게 설계하여 붕괴에 따른 인명과 재산의 피해를 방지하는 것이다. (9번의 연구과제) 7, 12, 15, 16, 17, 18, 20, 26, 27)

본 논문에서 서술하는 내용은 지난 3년간에 걸쳐서 서울 일원에서 수행된 절취사면 안정성에 관한 24번의 연구과제 요약이고, 본 논문은 지면의 제약상 토목지질학적인 관점에만 주안점을 두고 서술한다.

2. 지 질 특 성

절취사면의 특성은 지질에 따라서 큰 영향을 받는다. 서울의 지질은 크게 두 부분으로 나뉘어진다. 강북지역의 중앙을 형성하고 있는 화강암은 일반적으로 토층이 1~3m로 얇게 피복되어 있고^{6, 23)} 그 하부의 암반은 파쇄가 적으며 절리(연장성이 수m로서 비교적 짧고 틈새에 충전물이 드물다)의 발달이 규칙적이다. 화강암내에 발달하는 절리는 두 종류(Set)의 수직절리(절리의 연장성이 10여m까지 길다)와, 다른 한 종류인 지표면에 평행한 판상절리(Sheeting Joint: 절리의 연장성이 수십cm~수십m로 다양하게 변함)가 발달하는 것이 특징이다.

화강암내에는 단층(연장성이 수십 m 이상으로 길고, 틈새에 점토가 수cm~수십cm로 두껍게 충전된 경우가 많다)의 발달이 적으므로 절취사면의 전부가 붕괴되는 경우는 적는데 비하여 부분적인 절리로 인한 낙반위험성이 존재하는 경우가 많다.

강북의 주변부와 강남 일원에 걸쳐서 넓게 분포하는 변성암은 주로 편마암(Gneiss)으로 구성되어 있고, 간혹 편암(Schist), 규암(Quartzite) 등이 협재한다. 변성암은

지난 수십억년 간에 걸쳐서 여러번에 걸친 지각변동에 의해서 절리가 많이 발달하는데 불규칙한 발달양상이고 연장성이 수십m로 길고, 단층틈새로 점토가 충전된 경우가 많다. 또한 1~2m 이내로 짧은 연장성의 무수한 절리의 발달이 특징이다.

3. 국내의 절취사면 안정성 현황

3.1 현황

국내에서 산사태가 매년 발생하여 많은 인명과 재산피해가 발생하는데 국내의 산사태는 자연적인 원인에 의한 것도 있으나 보다 심각한 피해는 인위적으로 지반을 절취함으로써 발생하는 절취사면의 붕괴와 관련이 있다.^{6.28.29)}

한국은 외국의 지질상태(가까운 일본과 홍콩)에 비하여서도 토층이 비교적 얇게 수 m로 피복되어 있고 거의가 풍화가 적은 암반으로 이루어져서 절취사면의 불안정성은 암반역학적인 개념으로 해석하여야 한다. 즉, 암반내에 발달하는 불연속면(절리, 단층)의 방향 뿐만 아니라, 틈새 충전물질, 지하수 발달상태, 불연속면의 연속성, 굴곡도, 틈새의 벌어진 정도, 일축압축강도, 식생상태, 암괴의 크기 및 모양 등을 종합적으로 고려하여서 암반 절취사면의 안정성 판단이 수행되어야 합리적이지, 비교적 균일한 물질로 이루어진 토층사면과 같이 불연속면의 효과를 무시하고 암반 절취사면의 붕괴가 토질역학적인 방법으로 발생한다고 판단하면 불합리한 접근 방법이다.^{26.27)} 그러나 현재 국내에서는 『표준절취구배』라는 규범이 있어서 각종 절취사면의 설계시에 일률적으로 발파암(극경암-연암)은 1:0.3(0.5), 리핑암(풍화암)은 1:1, 토층은 1:1.2 구배로 정한다.

4. 절취사면 불안정 원인의 고찰 및 합리적인 보강대책

사례연구로서 서울 일원에서 수행된 24연구과제 중에서 지질특성을 나타내는 대표적인 ⑦지역(2지역은 화강암이고 5지역은 변성암 지역)에 관한 토목지질학적인 조사⁴⁾ 및 대책제시에 관한 요약을 서술한다.

4.1 화강암 분포지역

강북 중심부에 분포하는 화강암 지역에서는 절리의 규칙적인 발달 특성에 주의를 기울여야 한다.

4.1.1. 수직절리가 우세한 경우

서울 종로구 평창동과¹⁸⁾ 서대문구 홍제동²⁰⁾ 일대에는 절리의 발달이 규칙적이고 파쇄가 보통인 편이다.

사 례 1: 대표적인 사례로서 종로구 평창동 대절취사면의¹⁸⁾ 절취구배 선정에 관하여 논한다. 현재(1993.11) 시공중에 있는 수직 높이가 80여m되는 대절취사면으로서 부분적으로 노출된 굴착면에서 조사한 우세한 절리의 발달상태와 풍화상태, 지하수상태를 고려하였다. 기존 설계된 바로는 연암-경암이 대부분이므로 1:0.5(63°경사) 구배로 설계되었는데, 수직 높이가 80여m로 매우 크며, 서울시 중심부에 형성되는 도시고속도로변이므로 암반절취사면을 보다 안전하게 하기 위하여 절취구배를 손쉽게 완만하게 하려고 하였다. 그러면 얼마나 재절취하여야 하는 방안을 강구하는 것이 연구과제였다.

본 대절취 예정사면에는 연장성이 매우 긴 위험한 단층들이 간혹 관찰되지만 다행히 도로쪽으로 경사되지 않고 절취사면과 주향이 크게 어긋나게 발달하므로 대체적으로 큰 위험은 없는것으로 판단되었다. 본 지역의 절리는 수직절리의 발달이 뚜렷하나(연장성이 길고 빈도도 많다), 도로쪽으로 기울어진 완만한 경사(30°~42°)의 절리도 보통정도로 발달하나 연장성이 1m 이내로 비교적 짧다. 전체적으로 암괴가 괴상인 형태이다. 본 지역에 발달하는 불연속면의 자료로서 전반적인 절취사면 안정성 판단을 위하여 평사투영해석법을^{2, 3, 5)} 적용하여 보면 기존에 설계된 연암-경암 1:0.5(63°경사)에서 전도파괴 뿐만 아니라 도로쪽으로 30°~42° 경사로 많은 평면파괴 가능성이 존재한다(그림 1(a)). 그러므로 이 평면파괴의 가능성을 거의 제거하려면 1:1(45°)구배로 하여도 미흡하고, 30° 정도까지 절취구배를 크게 낮추어야 효과가 발생하므로, 절취량이 너무 과다하다. 그러므로 재절취만으로 사면의 안정을 높이기 위한 방안은 비경제적이였다. 특히, 도로쪽으로 경사된 절리의 특성상, 절리의 발달 빈도는 많고 뚜렷하나 절리의 연장성이 비교적 짧으므로 이 절리로 인한 큰 위험요인은 적으므로 기존 설계된 1:0.5(63°경사) 구배를 거의 그대로 유지시키고(사부만 약간 완만), 차후에 완성된 최종 굴착면에서 정밀지질조사를 수행하여 위험암괴만 국부적으로 록볼트 등으로서 보강하는 것이 적절하다고 판단하였다. 다만, 절취사면 소단이 일반적으로 20m 마다 3m 폭으로 설치토록 기존에 설계되어 있었으나, 본 지역의 암반은 파쇄가 보통정도된 상태이고, 또한 본 절취사면은 대도시 중심부에 설치되는 현장여건상 10m 마다 2~3m 폭의 소단을 더 형성하여서 전체적으로 보다 안정된 사면을 형성할 뿐만 아니라 차후에 위험요인이 있으면 유지 및 보수가 용이할 수 있는 여유폭을 남겨두었다.(그림 1(b))

4.1.2 판상절리가 우세한 경우

화강암내에 수직절리의 발달이 적은 곳에서는, 연장성이 긴 지형에 평행한 뚜렷한 절리가 발달하는데, 서울 인근에서는 불암산,⁶⁾ 남산,¹⁵⁾ 성동구 하왕십리동³⁰⁾, 서대문구 홍은동,¹⁹⁾ 성북구 길음동,^{7, 16)} 서대문구 무악재 일대¹²⁾에서의 암반상태이다.

사 례 2:

대표적인 사례로서 서대문구 무악재 위험절개지의¹²⁾ 기본설계를 검토결과를 논한다. 1993년 1월 부터 1993년 11월 현재까지도 재절취 시공중인 수직높이가 40여m 되는 대절취사면이다. 본 지역은 절취사면의 기존구배가 1:0.3(70°경사)로서 교통량이 많은 도로 쪽으로 항상 낙반사고가 다발하여서 절취사면에 인접하여 근래에 설치된 견고한 펜스(Fence)가 낙반에 의하여서 파손된 부분들이 많이 관찰될 정도로 위험하므로 장기적인 안정대책으로서 절취사면구배를 높히려는 계획하에서 우선 1:0.5(63°경사)로 잠정적으로 설계되었다. 본 지역은 거의 암반으로 구성되어 있으며, 연장성이 수십 m되는 단층이 간혹 관찰되나 절취사면의 주향과 차이가 매우 클 뿐만 아니라, 단층의 경사방향도 절취사면과 다르므로 본 절취사면에 큰 위험요소가 아니므로 절취사면 안정성 설계에 고려를 하지않았다.

앞서 사례 1 의 평창동 대절취사면의 화강암지역에서와 같이 3종류의 절리(Joint Set)들이 발달하는데, 암괴들은 괴상도 있으나 판상형태가 우세하다. 고각인 2종류의 절리들은 경사도가 70° 이상인 고각으로서 그 중 한 절리종류는 암괴의 전도파괴를 야기시키는 역할을 한다. 또한 다른 한 종류의 절리는 도로쪽으로 기울어진 완만한 경사(35°~55°)를 지닌 판상절리(Sheeting Joint)로서, 절리 연장성이 3~10m로 길고 뚜렷하게 발달하여서 암반사면의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 절리이다. 판상절리는 지표면 지형에 거의 평행하게 발달하는데, 본 지역의 상부 지표면은 산정상으로서 지형경사가 완만하므로 판상절리 경사가 완만하고(38°~40°), 중간은 지표면 경사가 보통이어서 판상절리 경사가 보통이고(45°경사), 절취면 하부의 지표면은 산하부로서 지형경사가 급하므로 이곳에 발달하는 판상절리의 경사는 급하다(평균 50°경사)(그림 2(a)). 또한 장기간(30-40년)에 걸쳐서 안정을 이루고 있는 기존의 지형구배도 본 지역에 발달하는 판상절리의 경사각도와 거의 비슷한 각도로 상부에서 하부로 옅어질수록 급하여지는 양상이다. 그러므로 절취사면의 구배는 이 판상절리의 경사각도와 비슷하게 상부는 완만하게 하부로 내려올수록 급하게 함으로서 재굴착 후에 암반보강의 필요성을 줄여야 한다.(그림 2(b)) 그림 2(a)는 본 지역의 불연속면들에 대한 평사투영해석법으로서 본 지역의 1:0.3(73°경사) 절취구배에서는 전도파괴와 평면활동 파괴 가능성이 매우 커서 불안한 암반사면인것을 나타낸다. 또한 기존에 잠정적으로 설계된 절취사면 구배 1:0.5(63°경사)는 본 지역의 지질특성상 (뚜렷한 판상절리의

발달) 재 절취후에도 활동가능한 위험암괴가 많이 남아서 록볼트 등의 보강물량이 많이 소요될 것으로 판단되므로 불합리한 설계라고 판단된다.

4.2. 변성암

변성암에는 연장성이 작은 질리에 의한 국부적인 암석의 낙반과 연장성이 매우 긴 단층에 의한 대규모 암반붕괴의 가능성이 동시에 상존하므로, 상기 불연속면의 발달상태와 특성을 판단하여서 적절한 안전대책을 수립하는것이 변성암 절취사면에서 중요하다.

4.2.1 단층 및 단층파쇄대가 관련된 경우

변성암은 오랜 기간에 걸쳐서 동력 및 열변성작용을 받은 암석이므로 절리뿐만 아니라 단층의 발달이 빈번하므로 변성암에서 대부분의 대규모 절취사면 붕괴는 단층과 관련이 있다. 변성암 중의 대표적인 암석인 편마암으로 구성된 경기도 성남 한국도로공사 본사,²⁵⁾ 부천시 춘의-수주로,³¹⁾ 서울 강남구 도곡동,⁸⁾ 동작구 흑석동 명수대,¹⁰⁾ 강동구 암사동,¹³⁾ 서초구 방배동,³²⁾ 경기도 성남 분당지구 절취사면등의 서울 인근에서 매우 빈발하는 붕괴사례가^{21, 22)} 거의 편마암내의 단층과 관련된 경우들이다. 서울 일원에서 각기 다른 지역에서 발생하였으나 붕괴형태는 비슷하므로 대표적인 사례로서 다음 3지역을 서술한다.

사 례 3: 성남분당지구 택지개발사업 조성공사(2-2공구)와 관련되어서 신설도로 옆의 높이 30여 m인 편마암 절취사면이 여름 집중 강우시 1993년 11월 1개월간 3차례에 걸쳐서 연속적으로 붕괴되었다.²¹⁾ 본 절취면은 얇은 풍화암-풍화토의 피복과 아울러 하부는 거의 파쇄가 보통인 연암-경암으로 구성되어 있고, 절취사면의 경사는 하부인 연암-경암에서는 일반적인 1:0.5(63°경사) 구배로서 절취시공이 거의 완료된 상태였다.

사진 1에서 보여지는 바와 같이 편마암 절취사면의 붕괴는 장기간에 걸쳐서 붕괴 규모가 서서히 확대 발전하는 특성이 있다. 초기(1993.7.1: 현황사진 1(a), 그림 3(a))에는 작은 규모의 낙반현상이 국부적으로 본 절취사면의 ①과 ②부분에서 발생하고, 중기(1993.7.11: 현황사진 1(b), 그림 3(b))에는 ②부분이 대규모로 붕괴되고 또 다른 새로운 ③부분에서 초기 낙반현상이 시작되고, 말기(1993.7.19: 현황사진 1(c), 그림 3(c))에는 ③부분이 대규모로 붕괴되고, 또 다른 새로운 ④부분에서 초기 낙반현상이 시작되면서 본 절취사면의 대부분이 불안해지는 양상이다.

붕괴원인은 연암-경암인 편마암내에 발달하는 단층들이 도로쪽으로 기울어져 단층을

따라서 암괴의 활동파괴(쇄기파괴 및 평면파괴)의 가능성이 있는데, 아울러 단층틈새에는 10cm 두께의 점토가 충전되어서 암괴의 활동성을 쉽게한다. 또한 절취사면과 주향이 비슷한 고각(거의 수직)인 절리가 발달하는데, 이 절리는 암괴의 후방에서 지하수가 유입되어서 큰 수압으로 인한 암괴의 붕괴를 촉진시키는 이 절리는 암괴의 후방에 위치하여 이 절리를 따라서 폭우시 지하수가 침투하여 수압이 크게 작용케되어 암괴의 후방에서 도로쪽으로 밀어주는 발생하여 활동가능한 암괴의 붕괴를 촉진시키는 위험한 역할을 하였다.

본 절취사면의 전반적인 사면불안정성은 그림 4(a)에서 나타나는 평사투영해석법에 의해서도 분석되는데, 전체적으로 볼때 도로쪽으로 기울어진 불안한 단층이나 단층교선의 각도는 38°~48°이다. 절취면 상부에 인장절리(Tension crack)가 매우 뚜렷하게 발달하고, 또한 금번 붕괴로 인하여 암반내에 균열들이 많이 발달하여 이완된 상태이고, 활동파괴가 발생한 단층충진물질의 전단강도가 최대강도(Peak strength)에서 잔류강도(Residual strength)로 약해졌으므로, 1) 위험부분은 직접보강보다도 재굴착하는 방안을 강구하였다. 재굴착하는 구배는 1:1.2구배(40°경사)가 바람직하다. 그러나 재절취 물량이 크게 늘어나는 경제적인 문제점과 공사기간의 촉박으로 인하여, 1:1(45°경사)로 재굴착한 후에 새로운 굴착면에서 정밀지질조사를 하여 판단되는 비교적 적은 크기의 국부적인 불안한 암괴는 록볼트 등으로 직접보강을 병행하는 방안으로 추천하였다. (그림 4(b))

13)

사 례 4: 올림픽도시고속도로 연장공사 (B 지구 : 서울 강동구 암사동)와 관련되어서 확장공사도로 옆의 높이 30m인 편마암 절취사면이 집중 호우 후에 1992년 5월과 8월의 2차례에 걸쳐서 단층면을 따라서 붕괴되었다. 본 절취사면은 4~10m의 큰 폭의 단층파쇄대내에 위치하는데, 풍화발달상태는 지표면 부근에 풍화토층, 그 하부에는 풍화암과 연암이 분포하고, 제일 하부에는 특이하게도 단층파쇄대(풍화암 및 점토가 연암내에 협재하는 불량한 암질)가 분포한다.

절취면상에서 매우 뚜렷하게 확장도로쪽으로 기울어진 평균 45° 경사의 절리 및 점토충진단층(수십 m의 긴 연장성이고, 10cm 두께의 점토가 충전됨)을 따라서 붕괴가 진행되고 있고, 역시 편마암내에는 절취면에 평행한 편리가 수직절리로서 전도성파괴양상도 보여주는데, 본 지역의 판상인 암괴형태상 본 수직절리는 암괴의 후방에서 암괴의 활동을 촉진시키는 역할을 한다.

금번에 붕괴된 암괴는 지하수위를 고려하지 않은 경우 뿐만 아니라 지하수위를 지표면까지 고려한 경우도 매우 불안한 것으로 판단되었다. (그림 5(a)) 또한 절취사면 전반에 걸쳐서 인장절리가 많이 발달할 뿐만 아니라 절리틈새도 0.5~3cm 정도로 벌어

저서 암괴들이 들떠있는 불안한 상태이고, 이 틈새로 차후 폭우시에 지하수압이 크게 발생하여 재차 붕괴될 여지가 크므로 록볼트 등으로 부분보강하는 것 보다는 위험암괴를 미리 제거시키는 것이 바람직하여서 본 지역에서 우세한 절리 경사인 1:1구배로 재절취하였다. 또한, 1:1구배는 본 지역의 원래 지형구배와 같은데, 장기간(기존 절개면을 완공한 후 약 20여년 동안)에 걸쳐서 안정된 구배로서 이 구배형성은 도로쪽으로 뚜렷하게 발달하고 있는 절리와 단층의 발달 때문인 것으로 판단된다. 절취사면의 하단부는 파쇄가 극심하여서 RMR %에 의하여 암반의 전단강도지수를 입력하여 새로운 1:1구배에서의 토층사면과 같은 원호활동 가능성도 고려하였으나 충분히 안전한 것으로 판단되었다.(그림 5(b)) 또한, 재절취한 후에는 절취면 하단부의 암반이 불량하므로 기존의 증력식 옹벽설계 방안보다는 하단의 단층파쇄암반을 보강하기 위하여 합벽철근콘크리트 시공을 추천하였다.

사 례 5: 편마암에서의 점토층진단층면을 따라서 암괴의 활동가능성이 관찰된 사례는 서울 서초구 방배동 임광아파트 부근의 지하굴착과 관련된 경우이다.³²⁾ 지하굴착공사를 수행하면서 굴착면 하단에서 관찰된 점토층진단층의 존재가 특징이 었다.(그림 6(a)) 현재의 일반적인 지하굴착공사의 설계는 지반을 균일한 암석상태로 판단하여 작용되는 수평력을 억지하는데 충분한 토류벽(엄지말뚝, 토류판 및 Earth anchor)을 설계하는데, 만약 단층이 굴착면쪽으로 위험하게 경사되어있으면 단층을 따라서 큰 암괴가 활동하여서, 기 설계된 수평하중보다도 실제로는 더 큰 규모의 수평하중이 작용할 수도 있으므로 단층을 따라서 활동할 수 있는 암괴의 수평하중이 실제로 굴착면쪽으로 가해지는 분력을 힘의 Vector분석으로 계산하여서(그림 6(b)) 기존 토류구조물의 안정성 및 추가보강의 필요성을 검토하였다.

4.2.2 불규칙적인 절리가 관련된 경우

편마암에서는 단층으로 인한 절취사면의 대규모 붕괴도 예상되지만, 국부적으로도 불규칙하게 발달하는 절리에 의하여 비교적 적은 암괴의 낙반 가능성도 부분적으로 상존하므로 록볼트 등으로의 대책수립이 필요한 경우가 있다. 경기도 부천시 춘의-수주로,³¹⁾ 경기도 성남 분당 신도시 택지개발단지,^{21, 22)} 서울 동작구 흑석동 현대아파트에서의¹⁷⁾ 절취사면안정성검토가 적용사례인데, 대표적인 경우로서 서울 동작구 흑석동 현대아파트 절취사면의 사례를 논한다.

사 례 6: 본 절취사면은 동작구 흑석동 현대아파트에¹⁷⁾ 인접하여서 부근의 10~15m 높이의 1993.10월에 조사와 보강 및 시공이 완료되었다. 본 절취사

면은 동작구 흑석동 현대아파트에 인접한 절취사면으로서, 본 절취사면 하부에 상수도관을 매설하고 도로를 신설하기 위하여 기존의 암반 절취사면 하단을 5m폭으로 더 굴착하여서 암반절취사면의 안정성을 다시 검토하여서 적절한 보완대책을 강구하였다. 구성암석은 편마암석으로서 주로 연암-경암으로 구성되어 있다. 간혹 점토(10-20cm 두께)를 충진한 단층이 존재하나 절취사면과의 주향차이가 거의 90°이므로 절취사면의 안정성에 위험요인이 아니다.(그림 7(c))

절취사면내의 절리발달방향은 불규칙한 편으로서 암괴가 서로 엮여있는 형태로서 낙반위험요소는 적은편이나 국부적으로 도로쪽으로 경사진 절리들이 존재하여서 부분적인 위험암괴들의 활동 및 전도파괴 가능성이 있다.(그림 7(d)) 기존에 설계된 L-형 옹벽 시공은 절취면 하단부를 3m 깊이로 굴착하는 시공상 어려움이 있고, 또한 일률적인 격자식 록볼트의 시공도 본 지역의 암반특성상 불필요한 것으로 판단되었다.(그림 7(a)) 또한 본 절취사면은 한강수위와 거의 가까이에 위치하므로 여름의 장마철에 한강수위가 본 절취면까지 상승하리라 판단되므로 파쇄가 심한 암반의 장기적인 이완을 방지하기 위하여 보강슛크리트(Reinforcing-shotcrete)로 타설하고 부분적인 Random 형태의 록볼트 사용을 고려하였다.(그림 7(b)) 국부적인 위험암괴를 록볼트로 보강하기 위해서는 암괴크기를 계산하여 한계평형법으로 암괴의 전도나 전단 활동을 억제할 수 있도록(그림 7(d)) 충분한 안전율을 지니는 록볼트의 총 보강량을 계산한 후에, 록볼트의 인장 및 전단강도, 록볼트와 Grout 상호간 및 암석과 Grout 상호간의 Bond strength, Rock mass의 Pull out 가능성까지 고려하여 필요한 록볼트의 갯수, 근입방향 및 근입깊이를 결정하였다. 또한 슛크리트 타설 후에는 지하수의 유로가 되는 단층을 따라서 배수공(유공관)을 깊게 천공한 후에 설치하였다.

4.2.3 규칙적인 절리가 관련된 경우

서울 일원에 광범위하게 분포하는 변성암은 대부분 편마암(Gneiss)이고 간혹 편암(Schist)이 협재한다. 간혹 국부적으로 작은 봉우리를 형성하는 규암(珪岩; Quartzite)이 돌출되는데, 서울의 암석중에서 이 암석은 아주 드물게 관찰된다. 규암은 석영입자를 주성분으로 하는 사암(Sandstone)이 큰 압력을 받으면 석영립들이 서로 끼안은 굳은 규암이 생성되는데 세립질의 석영으로 이루어져 있다.

사 례 7:

규암과 관련된 지역은 올림픽 도시고속도로 확장공사 1공구 중 서울 강서구 염창동 증산절취사면의 안정성 검토사례이다.¹⁴⁾ 본 지역의 풍화상태가 미약하여서 절취사면 상부지표면에 약 2~5m 두께의 토층이 있고, 그 하부는 약 2~5m 두께의 풍화암이 분포하고, 그 하부의 대부분은 연암-국경암이 분포한다.

본 절취사면은 올림픽 확장공사 쪽으로 매우 뚜렷하게 경사된 (평균 45°) 연장성이 10여 m되는 긴 절리들이 발달하고 절리틈새는 수mm 두께로 실트질이 얇게 Coating되어 있고, 축축하게 지하수를 함유하고 있다. 이 절리와 아울러 이 절리들을 수직으로 끊는 연속성이 수 십cm되는 비교적 짧은 절리가 또한 발달하여서 암괴가 활동할때 암괴의 뒤쪽에서 끊어주는 보조적인 역할을 한다.

암반은 전체적으로 볼때 매우 뚜렷한 판상형태의 암괴들로 구성되어 있다. 올림픽 확장도로변을 따라서 상수도 매설공사를 위하여 본 절취사면의 하부를 2~3m 굴착하면서 도로쪽으로 뚜렷하게 기울어진(평균 45°) 절리면을 따라서 암괴가 붕괴되었는데, 암반사면의 안정성분석을 위하여서 사용된 평사투영해석법으로도 평면활동파괴의 가능성이 매우 뚜렷한 것으로 판단된다.(그림 8(a)) 그러므로 재절취하려면 1:1구배로 재절취하여야 하나 절취사면 상부에 공동묘지가 위치하므로 묘지 이전에 따른 민원발생이 우려되므로 재절취가 곤란하여서 직접보강하는 방안을 강구하였다. 위험암괴의 보강 범위를 파악하기 위하여 절취사면의 각 축점에서 횡단면도로서 각 축점별로 차이가 나는 보강량의 변화를 분석하였고, 또한 시공성을 감안하여서 절취사면 상부 암괴의 부분적인 붕괴를 방지하기 위하여 상부에서는 록볼트를 사용하고 전체 암괴의 붕괴를 방지하기 위하여서는 하부에서 앵커를 병행하여 사용하였다.(그림 8(b), 8(c))

보강량 계산을 위한 수치계산에서는 절리면의 전단강도지수는 $\phi=28^\circ$ (현장 및 실내에서의 Tilt Test 결과 수치)와 $C=2 \text{ ton/m}^2$ (지질조사에 의한 불연속적인 특성, 금번에 붕괴된 양상 및 기존 절취사면들의 안정상태도 고려)을 사용하였다.1.24) 또한 절취사면 하단부에 기 설계된 증력식 옹벽은 증력옹벽을 위한 하부의 굴착시에 진동으로 인한 상수도관의 파괴가 우려될 뿐만 아니라, 보다 안전한 하단부의 보강을 위하여 합벽철근콘크리트로 변경하여서 시공하였다.

5. 결 론

① 서울 인근에서의 화강암과 편마암 절취사면의 안정성은 불연속면의 발달형태가 상이하므로 뚜렷하게 구별된다. 화강암 절취사면은 절리에 의한 비교적 소규모인 것이 특징이나 편마암 절취사면의 붕괴는 단층(특히 점토층진)을 따라서 발생하며 대규모인 것이 특징이다.

② 서울 인근의 화강암 절취사면은 비교적 규칙적인 3종류의 절리가 발달하므로 절리의 발달방향 측정과 절리면의 전단강도 등을 파악함으로써 사면설계 및 보강방안이

비교적 쉽게 수행될 수 있다. 단, 서울 화강암의 지질특성상 절리의 연속성이 지역에 따라 변하므로, 이 연속성의 발달양상에 따라서 사면설계의 주안점을 이 절리의 연속성에 두어야 할 경우도 있음을 유의하여야 한다.

③ 서울 인근의 편마암 절취사면은 대규모로 붕괴가 발생하기전에 작은 규모의 낙반현상이 초기에 수반되고, 그 후에 점차로 큰 규모로 절취사면 붕괴가 서서히 확대되어 발전하는 경향이 있다. 이는 편마암에서 암반붕괴가 시작될수록 암반이 굴곡된 활동면을 따라서 움직이면(Dilation 되므로) 파쇄가 심한 편마암반의 암괴들이 서로 이완되므로 암반전체의 절리 틈새가 더욱 벌어져서 이 틈새로 지표수 및 지하수의 유입이 쉽게되어 폭우시 활동면과 암괴 후방 절리에 지하수압이 크게 발생하여 재차 붕괴가 크게되는 것으로 판단된다. 그러므로 편마암의 붕괴는 가능한 초기에 원인을 파악하여 적절한 보강대책을 수립하는것이 효율적으로 판단된다.

④ 편마암과 화강암에서, 절취 후에 수 십년동안에 걸쳐서 이미 안정된 기존 절취사면의 구배를 신설 절취사면의 구배결정에 매우 소중한 자료로서 참고할 필요가 있다.

⑤ 여러 사례 연구를 통하여, 서울 일원에서 빈번히 발생하는 암반절취사면의 붕괴는 거의 지질구조(불연속면)와 깊은 관련이 있는 것을 알수있다. 그러나 암반을 굴착하여 신설 절취사면을 계획하고자 할때, 서울의 지질특성에 부합되도록 암반절취사면의 안정성에 영향을 주는 지질요인을 충분히 고려하여 조사, 설계, 시공되지 않는 경우가 많은것이 현실이다. 시추조사에만 의존하지 말고 절취예정사면 주변의 노출된 암반(Face mapping) 등에서 광역적인 지질조사를 수행하는 것이 바람직하고, 또한 절취한 후 새로운 사면에서도 지질조사를 다시 수행하여 절취사면의 안정성 여부를 재검토하여 신속한 보강대책을 강구하는 것이 절취사면의 장기적인 안정성을 위하여 매우 필요하다.

⑥ 암반절취사면의 전반적인 안정성을 파악하기 위해서 사용되는 평사투영해석법은 비교적 합리적이고 신속한 방법으로 외국에서 널리 사용되고 있다. 다만, 절리의 중요성, 즉 절리는 한점으로 표시되고 그밖의 중요한 요소들(절리의 연속성, 절리 틈새의 충전상태 등)은 표시될수 없는 약점이 있고, 또한 암괴의 크기 및 형태도 고려가 안되는 약점은 있다.¹¹⁾ 그러나 장·단점을 충분히 이해하고 활용하면 현장에서 실제로 간단히 초기의 사면안정성 분석 목적에서 사용하기에는 편리한 방법으로 서울 일원의 지질에서도 충분히 입증되었다.

감사의 말씀

본 논문에서 언급한 적용사례들을 수행함에 있어서 사업참여 기회를 주신 서울시 종합건설본부와 지하철건설본부 관계자님들께 깊은 감사를 드립니다. 또한, 인하대 강병희 교수님, 서울시립대 이 송 교수님, 단국대 김학문 교수님, 남원건설 김주범 부사장님, 대림기술연구소 김선기 부장님, 우보엔지니어링 김성열 이사님들의 깊은 이해와 진지한 토의 및 많은 협조에 대하여 감사드립니다.

참고문헌

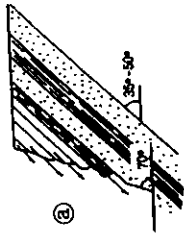
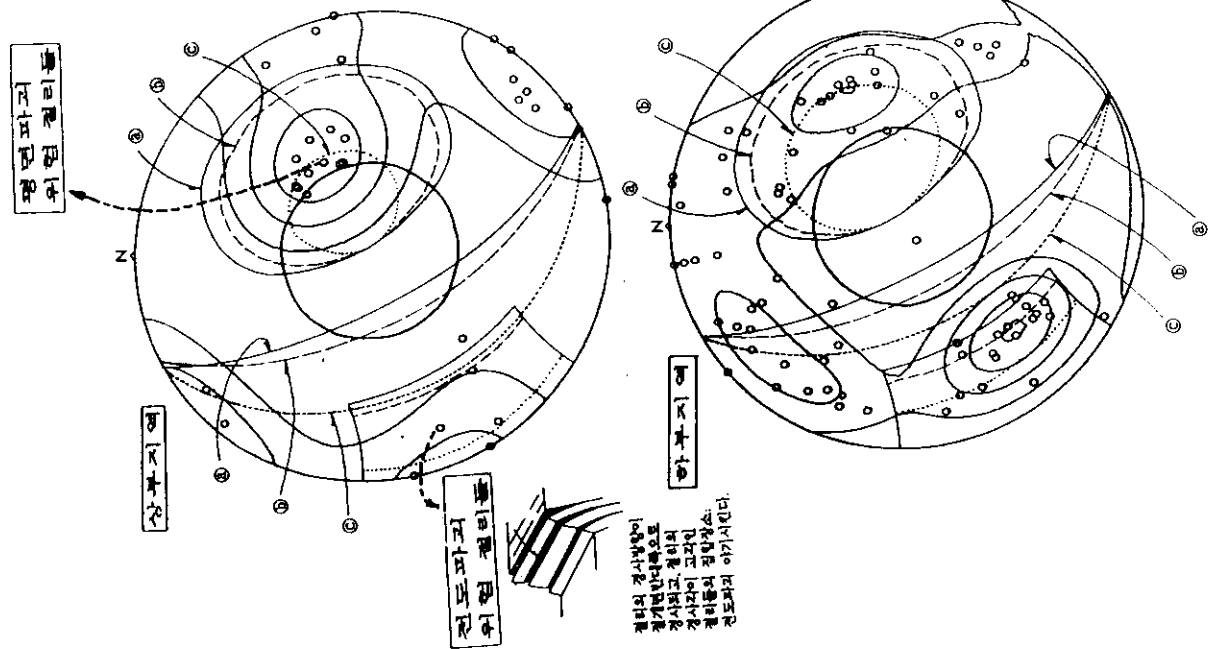
1. Barton, N.(1976). "The shear strength of rock joints," Int. J. rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp. 255-279.
2. Hencher, S.R. (1987). "The implications of joints and structures for slope stability," Slope Stability, Wiley & Sons. Ltd., pp. 145-186.
3. Hoek, E. & Bray, J.W.(1981). "Rock slope engineering," 3rd ed., The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 358.
4. ISRM(1978), "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses," Int. J. Rock Mech. Mining Sci. Geomech. Abstr., Vol. 15, pp.319-368.
5. Richards, L.R. & Atherton, D., (1987). "Stability of slopes in rocks," In Ground Engineer's Reference Book, Butterworths, London, pp. 12.1-12.16.
6. 이수곤 (1988), "한국의 산사태 조사연구," 한국동력자원연구소, pp. 165.
7. 이수곤 (1990.8), " 북악터널(쌍굴) 입구 암반사면에 대한 안정성 검토," 서울시 종합건설본부.
8. 이수곤 (1990.11), " 강남구 도곡동 매봉터널(쌍굴) 입구 절취사면의 안정성분석 및 대책과 매봉(쌍굴)터널의 안정성 검토," 서울시 종합건설본부.
9. 이수곤 (1990.12), "경기일원의 암반사면 안정성 조사연구," 과학기술처, pp.250.
10. 이수곤 (1991.5), "올림픽대로변의 동작구 흑석동 명수대 암반사면 안정성 검토," 서울시 종합건설본부.
11. 이수곤 (1991.11), "암반사면 안정성 평가를 위한 평사투영해석법 적용상의 문제점," 한국지반공학회 '91년도 추계학술발표회 논문집, pp. 376-408.

12. 이수곤 (1992.4), “무악재 위험절개지의 기본 설계 및 실시설계검토”, 서울시종합건설본부.
13. 이수곤 (1992.11), “올림픽 도시고속도로 연장공사 B,C 지구(서울 강동구 암사동) 대절취 사면의 안정성 검토”, 서울시 종합건설본부.
14. 이수곤 (1993.1), “올림픽 도시고속도로 확장공사 1공구 (서울 강서구 염창동) 종산절개지의 안정성 검토”, 서울시 종합건설본부.
15. 이수곤 (1993.1), “남산 1호 터널내의 지질상태 검토,” 서울시 종합건설본부.
16. 이수곤 (1993.3), “서울 북부도시고속도로 건설공사 (제2,3공구:평창동,길음동) 터널 입구 암반사면 안정성 및 대책검토,” 서울시 종합건설본부.
17. 이수곤 (1993.5), “동작구 흑석동 현대아파트 부근의 절취사면 안정성 검토”, 서울시종합건설본부.
18. 이수곤 (1993.7), “종로구 평창동 대절취사면의 절취구배 선정에 관한 의견,” 서울시 종합건설본부.
19. 이수곤 (1993.8), “서대문구 홍은동 미성아파트 절개지의 안정성 현황 및 대책,”
20. 이수곤 (1993.8), “북악터널 배수지 건설공사(서대문구 홍제동) 대절취사면의 안정성 및 대책검토,” 서울시 상수도 사업본부.
21. 이수곤 (1993.8), “성남 분당지구 택지개발사업 조성공사(2-2공구)의 대절취사면 안정성 및 대책검토,” 한국토지개발공사.
22. 이수곤 (1993.9), “분당 신도시 택지개발사업(2-1공구) 내의 대3-18도로 법면의 안정성에 대한 의견서,” 한국토지개발공사.
23. 이수곤 (1993.8), “화강암의 풍화,” 지질학회지 제29권 제4호, pp.396-413.
24. 이수곤 (1993.9), “한국에 분포하는 화강암 풍화토의 토질공학적 특성,” 한국지반공학회지, 제9권, 제3호, pp.5-21.
25. 이수곤외 (1990.6), “본사사육 중축 절토부 사면안정성 조사보고서,” 한국도로공사, pp.72.
26. 이수곤외 (1991.3), “경부고속도로(수원-남이간) 확장공사 실시설계를 위한 토목 지질조사보고서,” 한국동력자원연구소, pp.676.
27. 이수곤외 (1991.6), “영동고속도로(신갈-원주간) 확장공사 실시설계를 위한 토목 지질조사보고서,” 한국동력자원연구소, pp.901.

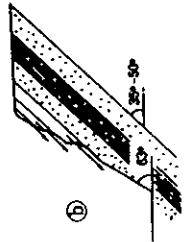
28. 이수곤외 (1992.8), “도로와 가옥주변의 절취면 붕괴위험 평가 및 보강대책 연구 (Part I),” 과학기술처, pp.88.
29. 이수곤외 (1993.10), “도로와 가옥주변의 절취면 붕괴위험 평가 및 보강대책 연구 (Part II),” 과학기술처, pp.134.
30. 이수곤, 이인모(1990.6), “성동구 하왕십리동 일대의 암반사면 안정성 조사보고서,” 한국동력자원연구소, pp.127.
31. 이수곤, 이송 (1992.12), “부천시 춘의-수주로 도로개설공사에 따른 지질조사 보고서,” 부천시와 풍림산업.
32. 홍성목, 강병희, 김학문, 이수곤, (1992.11), “서초구 방배동 태경오피스텔 지하굴착에 따른 입광아파트 안전진단 연구보고서”, 한국지반공학회, pp.447.

그림 2. 서대문구 무악재 절취사면의 안정성검토 및 대책(1992.4)

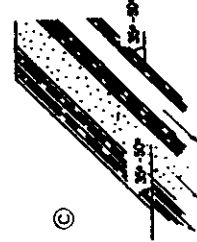
(a) 정사투영해석법을 이용한 사면안정성 검토



70(1:0.3)인 절리 절기면의 경사에서는 암석이 35-50경사의 판상 절리를 따라서 도로쪽으로 붕괴 및 폐기파괴 위험성있다.



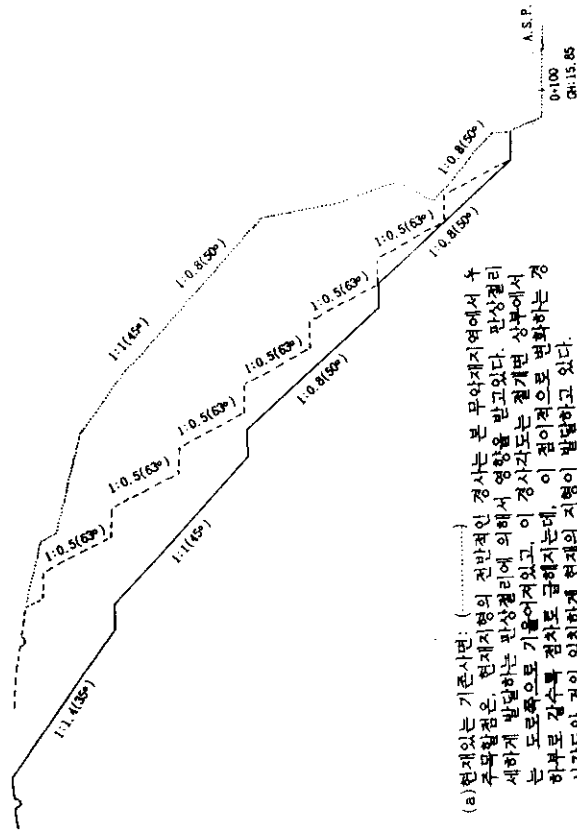
실시설계에서 제시된 03(1:0.5)의 경사도 절기면을 형성할때, 암석이 35-50경사의 판상절리를 따라서 역시 도로쪽으로 붕괴 및 폐기파괴 위험성있다.



35-50(1:1.4-1:0.8)경사로 절기 하면 도로쪽으로 낙반될 암석이 미리 거의 제거되므로 안전하다.

LEGEND	
○	절리의 방향을 극점으로 표시한것
×	두절리의 교선을 극점으로 표시한것
◎	절리의 방향이 많은 방향을 Contour로 표시한것

(b) 기준, 실시설계, 최종검토된 사면구배

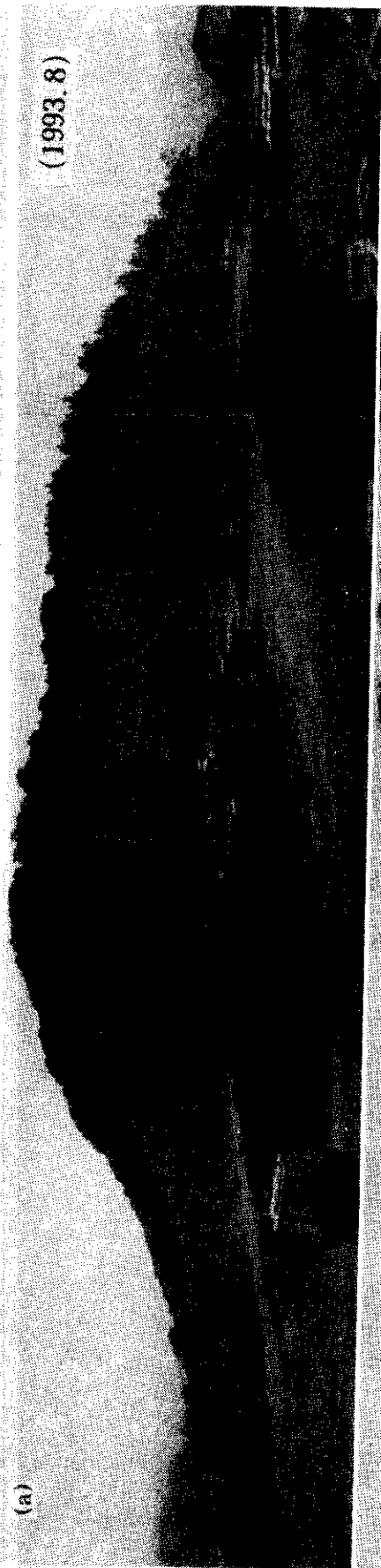


(a) 현재있는 기준사면: (.....) 주무할점은, 현재지형의 전반적인 경사는 본 무악재지역에서 새롭게 개발하는 판상절리에 의해서 영향을 받고있다. 판상절리는 도로쪽으로 기울어져있고, 이 경사각도는 절기면 상부에서 하부로 갈수록 점차로 급해지는데, 이 절이적으로 변화하는 경사각도와 거의 일치하게 현재의 지형이 발달하고 있다.

(b) 실시설계사면: (-----) 이지역에 발달하고있는 절리가 암반사면의 안정성에 미치는 영향을 고려안하고 임률적으로 설계하였다.

(c) 금년에 본연구의 재검토에 의해서 추천되는 사면: (---) 본지역에서 제일 암반의 사면안정성에 위험요소로서 작용하는 판상절리의 영향을 고려하여 최적으로 합리적인 안전설계이다.

사진 1: 경기도 성남 분당지구 택지개발사업 조성공사(2-2공구) 대절취사면의 불안정현황



(1993.8)



(b)



(c)

추경

그림 4. 성남 분당지구 대질취면의 안정성 검토(1993.8)

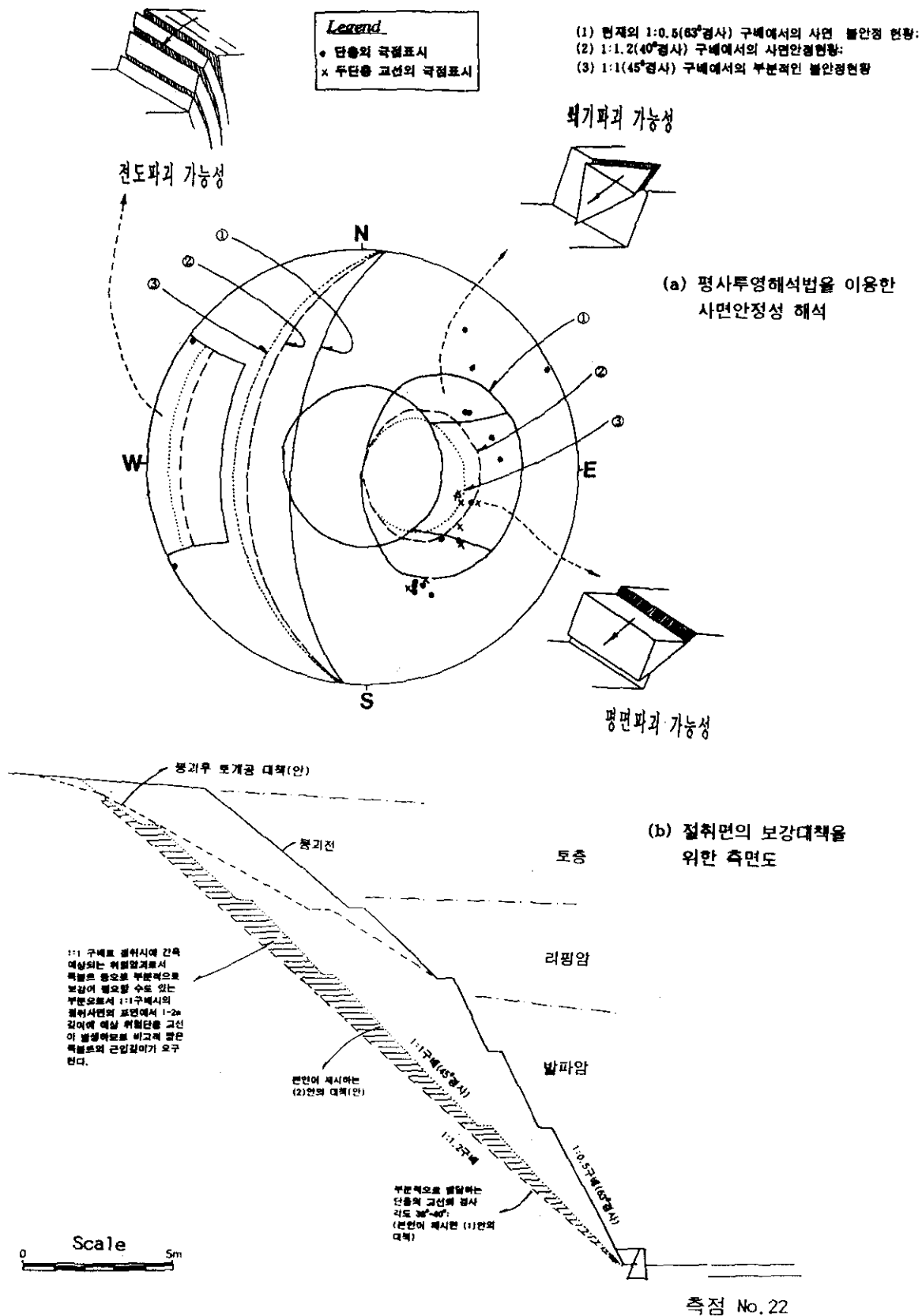
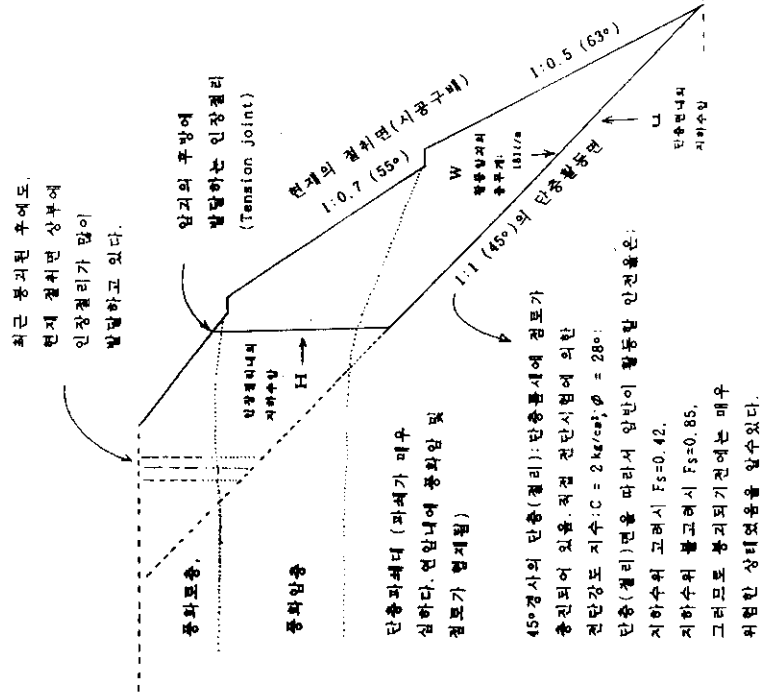


그림 5. 올림픽 도시고속도로 연장공사 B지구 대절취사면의 안정성 검토 및 대책 (1992. 11)

* 지질특성 : 지표면 부근에 풍화토층, 그 하부에는 풍화암과 연암이 분포하고 계질 하부에는 폭이하게도 단층파쇄대가 분포하여 풍화암이 연암 사이에 협재하고 있다.

(a) 단층을 따라서 굽반에 붕괴 사례의 안전을 수치해석 (1992년 5월과 8월)



(b) 1:1구배 (45°)로 재절취하는 경우에, 파쇄가 심한 절취면 하단의 단층파쇄대를 따라서 토층과 같은 원호활동 가능성을 검토한 안전을 수치해석

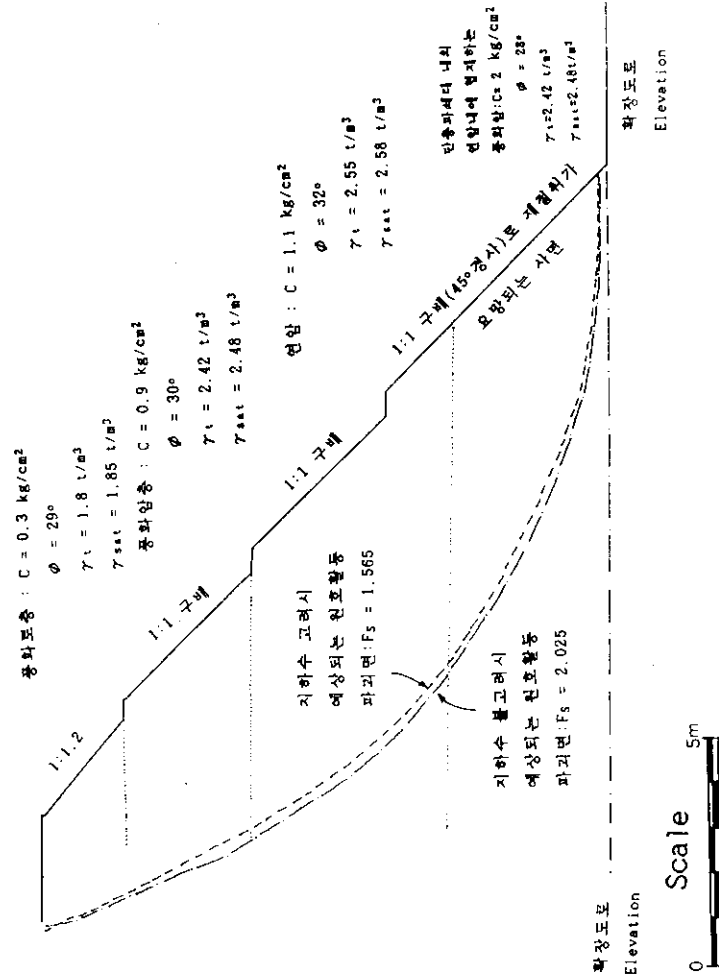


그림 6. 서초구 방배동 임강아파트 지하급락면의 안정성 검토(1992.11)

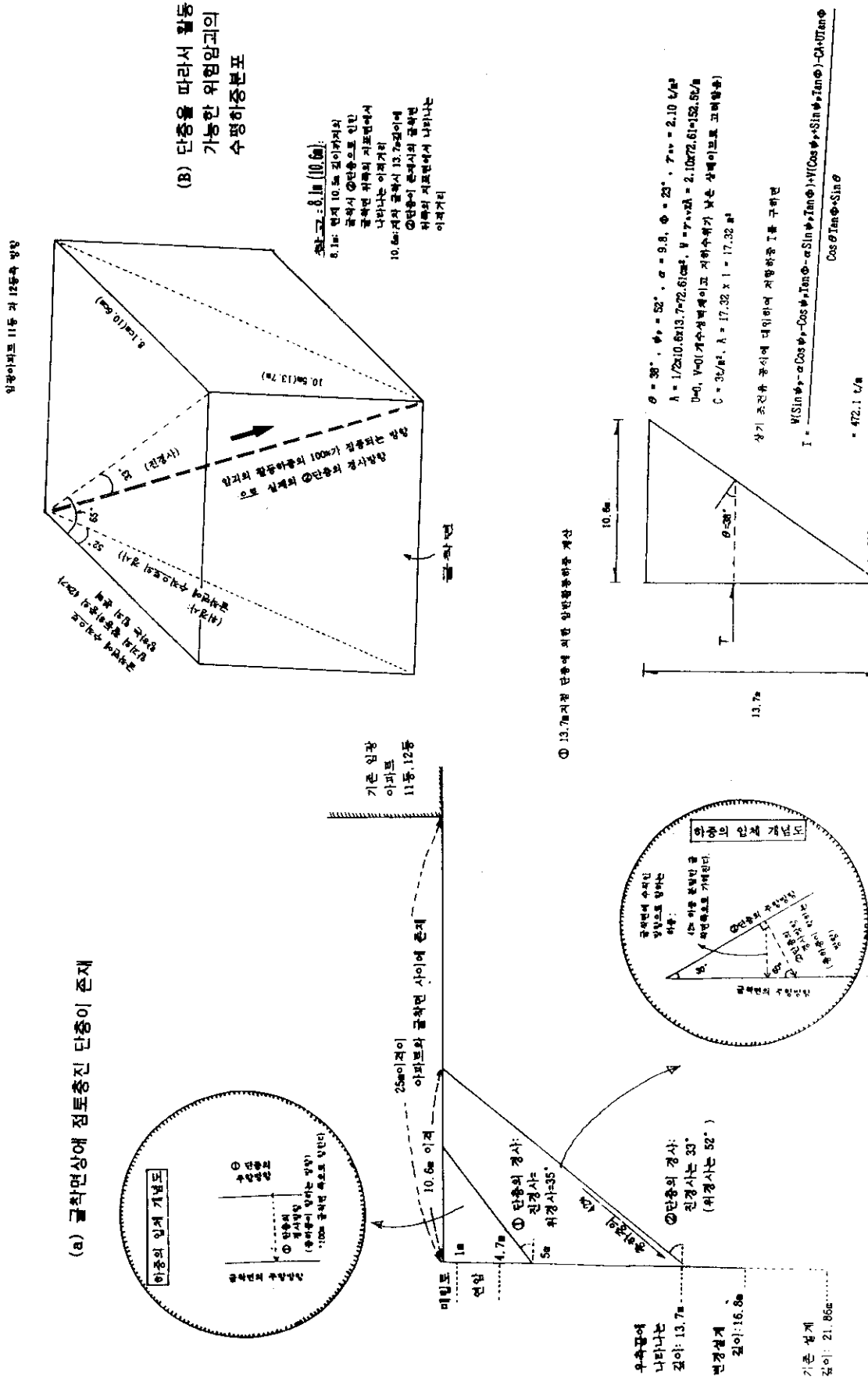
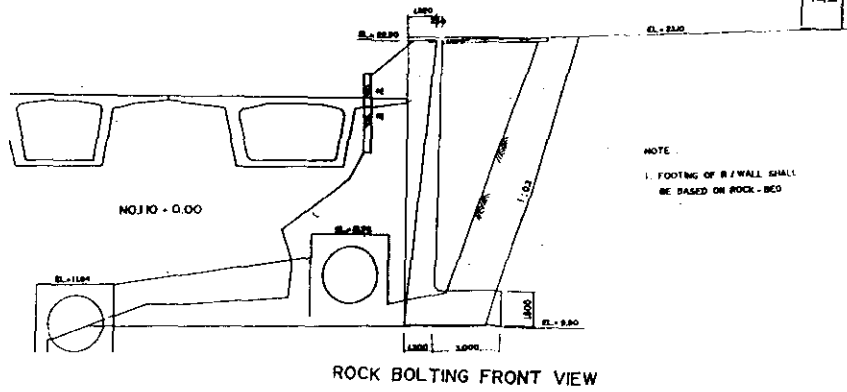


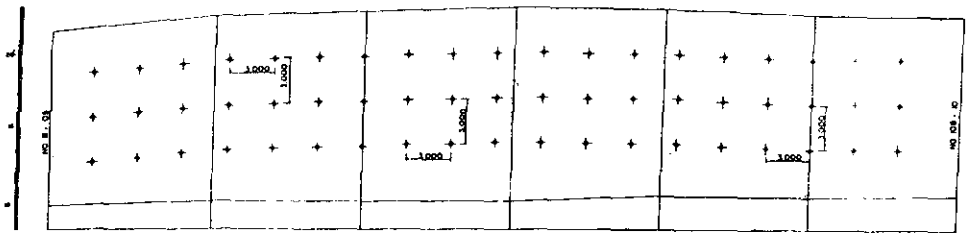
그림 4.11 13.7m이격 단층에 의한 암반lock 단면도

그림 7. 흑석동 현대아파트 부근의 절취사면 안정성검토(1993.5)

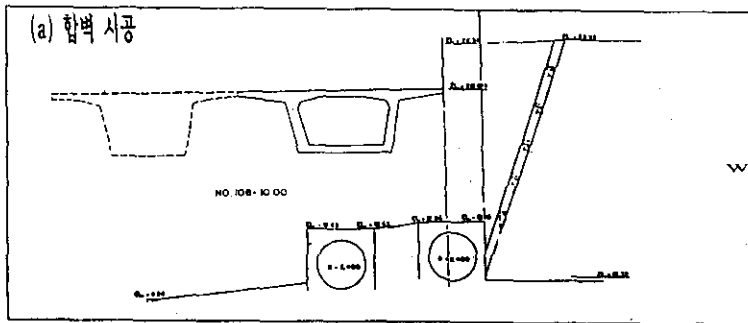
(a) 기존 옹벽구조물 및 Pattern 록볼트



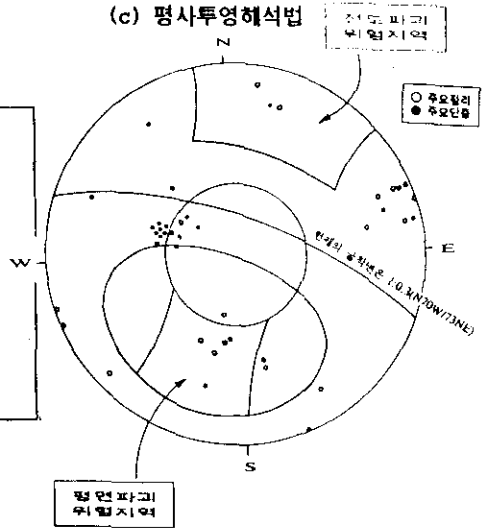
ROCK BOLTING FRONT VIEW



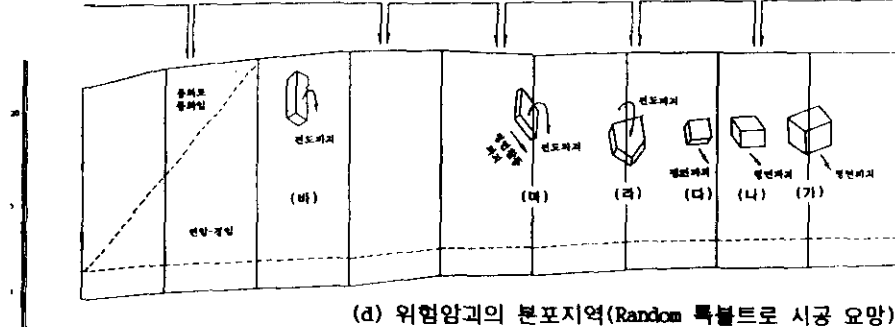
(b) 추천되는 합벽 및 Random 록볼트 설계



(c) 평사투영해석법



(A)지역 (B)지역 (C)지역 (D)지역 (E)지역 (F)지역



(d) 위험암괴의 분포지역(Random 록볼트로 시공 요망)

그림 8. 올림픽도시고속도로 확장공사 1공구(염창동) 증산절개지의 안정성현황 및 보강대책 (1993.1)

