
大切開 岩盤切取斜面의 安定性解析 및 補強方法에 관한 事例研究

A Case Study on Stability Analysis and Reinforcement Methods of Rock Cut Slope

○ 허 용환¹, 이 충래², 이 수근³, 이 송⁴

Abstract

Nowadays the cause of the rock slope failure in building site or road construction is due to design and apply uniformly by the strength of the intact rock and the rate of weathering of the slope constitution rock without the correct comprehension of the characteristics of the jointed rock mass. According to the field investigation of the areas in which rock slope failure occur, we can see that the rock slope failure occurred mostly along the discontinuity. Like this, the orientation, persistence, filling material, roughness and waveness, aperture and the seepage of the discontinuity look like the major cause of the rock slope failure. In this paper, the methods of the stability analysis and reinforcement of the rock cut slope are introduced through the case study of the rock cut slope failure occurred in the Seoul Outer Circulation Highway 4th section site.

要 旨

현재 우리나라 부지조성공사나 도로공사시에 문제가 되는 사면은 대개 암반의 특성에 대한 정확한 해석없이 사면구성암석의 강도나 풍화 정도에 따라서 일률적으로 설계하고 적용하고 있는데서 기인한다고 할 수 있다. 우리나라의 암반절취사면 활동지역 및 활동의 위험이 있는 지역을 현지 답사해 보면 대부분이 불연속면을 따라서 사면활동이 발생한 것을 볼 수 있다. 이와같이 불연속면의 방향, 연속성, 틈새 충전물질, 벌어진 정도, 지하수 발달상태 등이 암반사면활동의 주요 원인인 것으로 사료된다. 본 논문에서는 대절개 암반 절취 사면에 있어서의 안정성 해석방법과 그 효과적 보강대책에 대하여 서울 외곽순환 고속도로 제4공구에서 발생한 암반절취사면 활동사례를 모델로 하여 사례연구한 결과를 소개하고자 한다.

1.서울시립대학교 대학원 토목공학과 석사과정
3.한국자원연구소 선임연구원

2.육군제3사관학교 토목공학과 부교수
4.서울시립대학교 토목공학과 부교수

1. 서 론

절취사면의 붕괴로 인하여 실제 발생하는 피해규모는 붕괴정도에 따라 엄청난 규모에 이르기
도 하고 특히, 사면 하부에 있는 시설물의 중요성 여하에 따라 피해는 더욱 커질수 있다. 이와
같이 절취사면의 안정성여부는 공사비와 공기에 중대한 영향을 미칠 수 있으며 사면 하부의 시설
물이나 인명의 안전에도 큰 피해를 미칠 수 있다. 암반사면의 안정성에 대한 문제는 고속도로
건설현장 등 각종 건설공사현장과 부지의 협소로 인하여 사면을 절취하고 그 땅을 이용할 수 밖
에 없는 대도시 지역에서 자주 발생하는 문제이다. 따라서 암반사면의 안정성 검토에 필요한 세
요인들을 규명, 이에 대한 조사범위 및 방법을 고찰할 필요가 있다.

사면의 안정성을 분석하기 위해서는 사면의 안정성에 영향을 미치는 여러가지 요인들을 조사,
분석하여야 한다. 일반적으로 사면의 안정성은 사면자체의 지질 및 지반공학적인 영향에 의해 좌
우되지만 주변환경에 의해서도 영향을 받을 수 있으므로 사면의 안정성에 영향을 미칠 수 있는
모든 요인들을 조사, 분석하여 큰 영향을 미칠 수 있는 요인들을 선정하여야 한다. 그러나 현재
우리나라에서 실시되고 있는 대부분의 공사에서 암반절취사면의 절취구배는 이러한 여러가지 지
반공학적인 요인들에대한 정확한 이해없이 암석의 강도에 따라서 일률적으로 설계하고 있는 것이
현실이다. 최근 한국도로공사등에서는 이러한 일률적 설계에 따라서 시공된 암반절취사면들이 자
주 붕괴된다는 사실에 착안하여 각종 도로공사시에 암반절개각도를 더 낮게 정하고 있으며 암반
절취사면의 안정성 해석방법과 보강대책에 대한 각종 연구와 많은 사례들이 연구 발표되고 있다.

본 연구는 서울 외곽 순환 고속도로 제 4공구에서 발생한 암반절취사면의 활동을 사례분석한
것으로 본 연구에서는 사면체내에서 사면의 안정에 큰 영향을 미치는 지질 및 지반공학적인 요소
들에 대해 검토하였고, 특히 중요한 영향을 미치는 불연속면의 발달상태와 암반의 공학적 성질에
중점을 두어 연구하였다. 암반사면의 안정성에 영향을 주는 요인을 효율적이고 정확하게 조사하
는 방법을 제시하고 그 결과를 종합하여 조사결과를 분석하였으며 사면의 붕괴위험 가능성을 정
성적으로 판단하기 위하여 평사투영해석법을 이용하였고, Tilt Test, 슈미트햄머시험, Profile
Gauge Measuring 등의 현장시험과 실내에서 절리면 전단시험을 실시하여 강도정수를 구하여
안전율을 계산하여 사면의 안정성을 정량적으로 평가하여 보았다. 또한 위의 결과를 토대로 보강
대책에 대해서도 제시하였다.

2. 현장 조사

본 지역은 경기도 의왕시 내손동 산 26-3번지 일대의 서울 외곽 순환 고속도로 제 4 공구
(STA.2+380~2+780)로서 20~50m 높이의 대절취사면이 형성되고 있다. 본 지역은 해발 156m
인 작은 구릉을 절취하여 형성되는 절취사면으로서 절취사면의 최상부가 거의 구릉의 정상부이고
재절취를 하더라도 토공량이 많지 않은 상태이다. 본 지역의 암석은 선-캠브리아기(약 26억년전)
에 형성된 변성암의 일종인 세립질 편마암으로서 엽리와 편리를 뚜렷하게 보여주고 있다. 절취
면의 상부는 붉은 갈색의 전형적인 편마암으로 구성되어 있으나, 절취면의 하부는 검은색으로서

대규모의 단층파쇄대에서 발달하는 단층각력암으로 구성되어 있다. 전취공사 도중인 '94년 11월에 1차 붕괴가 발생하였고, '95년 3월 5일까지 4차례에 걸쳐서 붕괴가 발생하였다.

2.1 현장 조사 방법

본 절취면에 대한 현장조사는 '94년 6월, '95년 2월, '95년 3월 등 3차례에 걸쳐서 수행되었다. 조사 항목은 암괴의 크기 및 모양, 절리의 연속성 상태, 절리틈새의 벌어진 정도, 절리 충전 물질, 지하수 유출 상태 등을 관찰 하였고^{11,3)}, 대표적인 암반상태는 단점 사진촬영을 하여 사진위에 현장에서 조사한 불연속면의 특성자료를 병기하였다. 절리의 방향은 칼리로메터를 사용하여서 주향과 경사를 측정하였고, 절취사면의 방향과의 상관관계를 평사투영망 해석법을 사용하여 암괴가 붕괴될 가능성을 정성적으로 판단하였다. 절리 충전 물질은 시료를 채취하여 실내에서 토성 및 직접전단시험을 실시하였다. 암석의 강도는 현장에서는 슈미트해머로서 측정하였고 대표적인 암석시료를 채취하여서 실내에서 점하중 강도시험과 절리면 전단시험을 실시하였다.

2.2 현장 조사 결과

2.2.1 풍화발달 특성

본 지역의 암석은 편마암으로서 편마암은 대기에 노출되면 빗물등에 의하여 풍화가 급속하게 진행되는 특성이 있다. 또 다른 특징은 암반의 수직적인 풍화 발달을 들 수 있다. 암반 절취면의 하부에는 경암이 존재하고, 중간부에는 연암이 존재하며, 절취면의 상부에는 풍화암과 토층이 각각 4 - 6m 이내와 1m 이내의 두께로 얇게 분포한다.

3.2.2 불연속면의 발달 특성 및 사면안정성

(1) 절리 발달 상태

① 절리:(도로쪽으로 기울어진 위험한 절리):

본 지역의 절취면에서 도로쪽으로 40°~50°기울어진 절리가 전 절취면에 걸쳐서 광범위하고 뚜렷하게 발달한다. 이 절리들의 방향은 N50~80E/40~50SE 로서, 절취면의 주향(N80E)과 비슷하게 도로쪽으로 향하고 있고, 절리의 연속성도 2~5m 로 길편이고, 또한 절리면의 마찰각보다도 크기 때문에 도로쪽으로 붕괴될 위험성이 매우 높은편이다.

이 절리는 편마암의 편리에 평행하게 발달하는 경향이 있으며, 급면에 대규모의 붕괴들이 발생한 지점에서는 절리면들이 소규모의 단층면의 특징인 매끈매끈한 표면인 단층활동면을 보여 주고 있으며, 간혹 Silt 와 점토가 1-2mm 정도로 얇게 피복되어 있는 경우가 있다.

② 절리: (절취면과 비슷한 고각의 절리):

주향이 N70~85E, N80W/60-80SE 인 절리들로서, 도로 절취면의 주향(N80E)과 비슷하며, 경사가 60-85°인 고각의 절리로서 일반적으로 전도파괴를 야기시키는 절리로서 알려져있으나¹¹⁾ 본 지역의 암괴들은 판상으로 누워있는 형태이므로 실제로 암괴의 전도파괴가 발생하지는 않고, 대

신에 암괴가 활동과괴 형태로 붕괴될때 암괴의 후방에서 끊어주는 역할을 하는 절리로서 일반적으로 절리의 연장성이 1-2m로 짧지만, 간혹 단층면으로서 절리의 연장성이 10m 이상되는 지역에서는 암괴가 대규모로 붕괴되도록 촉진시키는 역할을 하는데, 암면에 대규모로 붕괴된 암괴의 후방에는 인장절리로서 작용을 한다.

③ 절리: (절취면과 이긋나는 고각의 절리):

주향이 N20-50W/70-80NE,80SW 인 절리들로서, 도로 절취면의 주향(N80E)과 크게 어긋나면서 절리 경사가 70°-80°인 고각의 절리로서, 암괴가 활동과괴 형태로 붕괴될때 암괴의 측면에서 끊어주는 역할을 하는 절리로서 일반적으로 절리의 연장성이 1-2m로 짧지만, 간혹 단층면으로서 절리의 연장성이 10m 이상되는 지역에서는 암괴를 대규모로 붕괴시키는 역할을 하며, 대규모로 붕괴된 암괴 절리의 틈새에는 점토가 1cm정도로 두껍게 충전 된것이 관찰된다.

(2)절취 사면의 특성

(가)절취면 ; 축점 2+740~2+780

도로의 주향(N80E/63-45SE)과 비슷하면서 도로쪽으로 기울어진 절리(N60E/55SE)가 발달하는데, 절리의 경사가 55° 정도로 급한편이어서 기존설계는 1:0.5 (63° 경사)이나 시공중에 절리의 경사를 고려하여 1:0.7 (55°)구배로 시공되어있다. 또한 도로쪽으로 55°정도로 경사진 절리들의 연속성은 2~3m 정도이나 절리의 틈새가 치밀하고 절리틈새에 충전물질이 거의 없어서 절리면의 전단강도는 비교적 높을뿐만아니라, 대규모의 암괴를 붕괴시킨 인장절리 역할을하는 연장성이 긴 단층이나 측면에서 암괴를 끊어주는 연장성이 긴 단층들도 관찰되지 않으므로 본절취면은 장기적으로 안정한 것으로 판단된다.

(나) 절취면: 축점 2+640~2+740

도로쪽으로 기울어진 위험절리는 2~4m 의 절리 연장성으로서 절리의 틈새가 치밀한편이고, 절리틈새에 충전물질이 없는 편이다. 대규모의 암괴를 붕괴시킬 수 있는 인장절리 역할을하는 연장성이 긴 단층이나 측면에서 암괴를 끊어주는 연장성이 긴 단층들은 관찰되지 않는다. 소단 상부의 절취면은 우세한 절리의 경사(40° 정도)와 비슷하므로 대체적으로 안정되나, 소단 하부의 절취면은 경사가 1 : 0.5 구배 (63° 경사)로서 우세한 절리의 경사 (40° 정도)보다는 급하므로 소단부근에서 국부적인 소규모의 붕락이 관찰된다.

(다) 절취면 (중앙 우측 절취면)과 (라) 절취면 (우측절취면): (축점 2+380~2+640)

지반이 취약한 상태로서 절취공사 도중에 연속적으로 대규모의 암반붕괴가 발생하는 지역으로서 절리와 단층의 발달이 뚜렷하여서 앞으로도 계속적인 암반 붕괴가 가능한 지역이다.

2.2.3 절취공사의 현황

최초 절취구배 설계는 하부 및 상부 암반에서는 1 : 0.5 구배 (63° 경사), 풍화암은 1 : 1 구배, 토층은 1 : 1.2 구배(40° 경사)였다. 그러나 사면 굴착공사 도중에 설계된 대로 절취구배가 형성되지 않고 부분적으로 암괴가 붕락하므로 기존의 설계된 절취구배로는 위험하다고 판단하여

경암절취면은 원래대로 1 : 0.5로하고 상부의 연암 절취면은 1 : 1로 낮추었으며 그 상부의 풍화 암은 원래대로 1 : 1.2 구배로 하였다. 그러나 본 지역의 지반특성상 도로쪽으로 기울어진 연장 성이 길고 뚜렷한 절리와 단층의 발달이 현저하므로 1차로 변경된 절취구배로 시공될 경우에도 부분적으로는 암괴가 자연적으로 붕락하여서 실제 시공구배는 기존에 설계된 구배보다 약간 낮게 시공된 부분도 있었다.

3. 현장시험 및 실내시험결과 분석

3.1 현장조사 결과

본 지역의 절리에는 약간의 점토와 실트가 피복되어 있거나 점토가 1cm두께로 충전되어 있는 경우도 있으므로 문헌연구를 통하여 이 지역의 절리면의 마찰각을 잔류 마찰각을 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단하였다^{1),3),5)}.

3.1.1 경동시험 (Tilt test)

절리틈새에 충전물질이 거의 없는 두개의 암석으로 경동시험을 수행한 결과 암괴가 활동하는 경사는 30° ~ 32° 였다. 0.5 ~ 1cm 두께의 점토가 충전된 경우도 있으므로, 이런 절리면을 대표 하는 두개의 암석으로 수행한 경우에는 활동하는 경사는 28° ~ 32° 였다. 상기의 두 경우 중에서 실제로 활동할 수 있는 절리면에 대한 활동경사인 28° ~ 30°를 본 연구의 마찰각 계산에서 고려하였다. 경동시험시의 활동하는 상부 암괴의 크기는 높이가 약10cm이고 약 800kg/cm²의 압축강도를 가진 평편한 연암이었다.

3.1.2 직접전단시험

본지역의 절리면의 특성을 대표하는 암석시료를 3 Set 현장에서 채취하여 절리면의 요철정도를 Profile gauge로서 측정하였는데 JRC (Joint Roughness Coefficient)가 2 - 3 정도이고, 절리면의 만곡도(Waviness)도 약간 있는 편이다. (1)충전물질이 없는 경우, (2)점토가 약간 Coating된 경우, (3)점토가 1cm정도로 충전된 경우의 3가지 시료를 채취하여 영국 ELE 회사 제품의 Hoek암석직접전단시험기를 사용하여서 ISRM기준에 의하여 시험하였다^{1),2)}.

절리면의 전단강도지수는 암괴의 수직하중의 범위에 따라서 달라지므로, 본지역에서 대규모로 붕괴가 발생한 경우의 암괴 깊이가 3m정도가 되므로 수직하중 7.5ton을 포함하여서, 수직응력을 5.0 - 15.0 kg/cm² 의 범위에서 시험하였다. 각 시험단계에서 응력-변형도 곡선을 그려서 Peak 점이 확인되면 전단을 멈추고 반대방향으로 잔류강도를 측정하고, 다른 하중단계에서 전단시험을 다시 수행하는 방법으로 최대전단강도와 잔류전단강도를 측정하였다. 절리면의 직접전단 시험결과와는 다음과 같다.

(표 1) 절리면 전단시험 결과

SAMPLE	TRIAL NO.	NORMAL STRESS (kg/cm ²)	PEAK SHEAR STRENGTH (kg/cm ²)	RESID. SHEAR STRENGTH (kg/cm ²)	ϕ_p (degree)	ϕ_R (degree)	C (kg/cm ²)
1	A	5	6.1	5.5	35	31	0.25
	B	10	9.7	8.7			
	C	15	12.9	11.6			
2	A	5	5.2	4.7	33	30	0.19
	B	10	8.4	7.8			
	C	15	11.1	10.3			
3	A	5	4.1	3.7	31	28	0.11
	B	10	7.0	6.4			
	C	15	9.9	9.1			

다. 시험결과들의 비교 검토

절리면 전단시험에 의한 전단강도지수는 $\phi = 28^\circ - 31^\circ$ 이고, Tilt test 로서 추정된 전단강도 지수는 $\phi = 28^\circ - 30^\circ$ 로서 상호 매우 근사함을 알 수 있다. 이는 이 지역의 암석이 비교적 굴곡도가 적은 편마암이기 때문이라고 생각되었다.

3.2 붕괴지역의 규모 및 분석(도표 1)

가. 붕괴 A

- (1) 위치: 측점 2+560~2+600)
- (2) 붕괴규모: 9,500m³
- (3) 불연속면의 발달:

본 지역에는 도로쪽으로 40° 기울어진 연장성이 4 - 8m로 길며, 절리틈새로 Silt가 약 1 - 2mm로 피복된 절리를 따라서 평면형태의 활동파괴가 발생하였다. 붕괴 후방에는 도로 절취면의 주향과 비슷하면서 고각인 절리가 존재하여서 암괴가 붕괴되도록 암괴의 후방에서 암괴를 끊어주는 역할을 하였는데, 본 지역의 지반특성상 붕괴 B(3)과 비슷한 양상이므로 본 수직절리의 연장성은 2~3m 정도로 판단된다.

본 A지역에서는 암괴의 측면에서 끊어주는 단층들이 뚜렷하게 발달하지 않기 때문에 B지역에서와 같이 한꺼번에 신속하게 암괴가 붕괴되지 않을 것으로 판단되지만, 본 절취면에는 도로의 주향과 평행하면서 고각인 단층과 같은 수직절리들 (N70E/75NW: 절리의 연장성이 1-2m 이내로 짧은 절리도 있고, 간혹 연장성이 5-8m 로 긴 단층들도 있음)이 많이 발달하여서 암반의 파쇄를 촉진시켰으므로, 차후에 이미 균열이 크게 벌어진 인장절리의 틈새에는 강우시 빗물이 침투하여서 지하수압이 과도하게 발생하면 본 고각의 수직절리들로 인하여 절취면의 중간부에서도 소규모의 제2차 붕괴의 가능성도 있으며, 또한 본 절취면 상부의 단층(N70E/70SE: 인장절리)에 의해서

현재의 불안정한 암괴가 또 다시 대규모로 급속히 2차 붕괴될 수도 있을 것이라 판단되었다.

(4) 평사투영망해석:

도로 전취면의 주향(N80E)과 비슷하면서 전리의 연장성이 4-8m 로 길며, 도로쪽으로 약 40° 경사로 발달하는 전리(N65-80E/ 35-45SE)를 따라서 평면파괴의 가능성이 크고, 암괴의 후방에서 인장전리의 역할을하는 고각(70° -80°)의 연속성이 매우 긴 단층이 발달(N50-70E/ 70-80SE,75NW)하여서 평면활동파괴를 촉진시키는 것으로 판단되었다. 다만 암괴의 측면에서 끊어주는 단층들이 뚜렷하게 발달하지 않기 때문에 B지역에서와 같이 한꺼번에 신속하게 암괴가 붕괴되지 않은것으로 판단된다.

(5)안전율 계산

① 인장균열내에 지하수압을 고려하지 않는 경우

$$F S = \frac{C \times A + (W \times \cos\phi_p - U - V \times \sin\phi_p) \times \tan\phi}{W \times \sin\phi_p + V \times \cos\phi_p}$$

여기서, A = 활동면의 단면적

W = 활동토괴의 무게

U = 양압력

V = 인장균열면내에 작용하는 지하수압

$$\begin{aligned} A &= (H - Z) \times \operatorname{Cosec} \phi_p \\ &= (27 - 3) \times \operatorname{Cosec} 40^\circ = 37.4 \text{ (m}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W &= 1/2 \times \gamma \times H^2 \times \{(1 - (Z/H)^2) \times \cot \phi_p - \cot \phi_f\} \\ &= 1/2 \times 2.5 \times 27^2 \times \{(1 - (3/27)^2) \times \cot 40^\circ - \cot 63^\circ\} \\ &= 433 \text{ (Ton)} \end{aligned}$$

지하수압을 고려하지 않으므로

$$U = 0, \quad V = 0$$

안전율은,

$$\begin{aligned} F S &= \frac{0.19 \times 37.4 + (433 \times \cos 40^\circ \times \tan 29^\circ)}{433 \times \sin 40^\circ} \\ &= 0.71 \end{aligned}$$

② 인장균열내 지하수위를 고려할 경우: FS = 0.66

나. 붕괴 B

(1) 위치: 측점 2+450~2+530

(2) 규모: $440 + 320 + 400 = 1160 \text{ m}^3$

(3) 불연속면의 발달:

1995년 3월5일에 비가 오지 않았는데도 공사중 B(1) 측점 2+510~2+530, B(2) 측점 2+480~2+500, B(3) 측점 2+450~2+470 에서 3차례의 붕괴가 생하였다. 이 붕괴는 도로쪽으로 약 40° 경사된 절리를 따라서 발생하였는데, 본 절리면에는 점토와 실트가 1-2mm정도로 피복된 형태로서 연장성이 3 - 6m정도되는 일종의 소규모 단층이다. 이 3곳의 붕괴는 정면에서 볼 때는 독립적인 별개의 붕괴형태로 보이지만 절취면의 상부에는 서로 연결된 인장절리가 발달하는 것으로 미루어 3번에 걸친 붕괴는 하나의 대규모 붕괴현상이지만 암괴내부에서 발달하는 절리들의 연속성이 끊어지기 때문에 대규모의 붕괴가 동시에 발생하지 않은것으로 판단되는데, 차후 단시일 내에 연속적인 붕괴가 후방에서 발생할 수 있는 가능성이 있다.

(4) 평사투영망해석:

B 지역에서 발생한 3곳을 평사투영망법으로 해석하여보면 도로절취면의 주향과 비슷하면서 도로쪽으로 40° -45° 기울어진 절리를 따라서 평면파괴의 가능성이 매우 높았는데, 더구나 암괴후방에서 인장절리역할을 하는 연장성이 긴 단층이 발달하여서 암괴를 후방에서 끊어주며 동시에 암괴의 측면에서 끊어주는 연장성이 긴 단층들이 발달하여서 암괴의 평면활동파괴를 촉진시킨것으로 판단된다.

< 붕괴 B(1) >

(1) 위치: 측점 2+510~2+530

(2) 붕괴규모: 440m^3

(3) 불연속면의 발달:

도로 절취면의 주향과 비슷하면서 도로쪽으로 약 40° ~42° 경사진 절리가 4 - 7m 연장성으로 뚜렷하게 발달하는데, 절리표면에는 점토와 실트가 약1 - 2mm Coating된 단층의 일종인데, 이 절리를 따라서 평면형태의 활동파괴가 발생하였으나 붕괴상부에는 인장절리가 발생하지 않았다. 또한 도로 절취면(N80E)과 주향이 비슷하지만 고각의 절리(N70E/80SE)도 간혹 발달한다. 아울러서 도로의 주향과 거의 90° 로 어긋나는 절리(N50W/68NE)도 발달하는데 본 절리는 암괴가 붕괴될 때 측면에서 끊어주는 보조적인 역할을 하였는데, 표면에는 단층점토가 약 1cm 두께로 충전되어 있다.

본 지점에는 폭이 20 - 30 cm인 단층파쇄대(N60E / 70SE)가 존재하는데 경사가 급한편이고, 주향은 절취면의 주향과 비슷하므로 본지역에서 발달하는 인장절리들과 같은 종류들인 것으로 판단되며, 이 단층으로 인한 활동파괴 양상은 없을 것으로 생각된다.

(4) 평사투영망 해석:

도로절취면의 주향과 비슷하면서 도로쪽으로 40° -42° 기울어진 절리(N55-65E/40-42SE)를 따

라서 평면파괴의 가능성이 매우 높았는데, 더구나 암괴의 중간부에서 인장전리역할을 하는 연장성이 긴 단층(N60E/70SE)도 약간 발달하여서 암괴를 중간부에서 끊어주며 동시에 암괴의 측면에서 끊어주는 연장성이 긴 단층(N50W/68NE)이 암괴의 우측에서 발달하여 암괴의 평면활동파괴를 촉진시킨것으로 판단된다.

(5) 안전률 계산

① 인장균열내 지하수압이 없는 경우

$$A = (21 - 4) \times \text{Cosec } 40^\circ = 26.8 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$W = 1/2 \times 2.5 \times 21^2 \times \left\{ (1 - (4/21)^2) \times \text{Cot } 40^\circ - \text{Cot } 63^\circ \right\}$$

$$= 251 \text{ (Ton)}$$

$$U = 0, \quad V = 0$$

$$FS = \frac{0.19 \times 26.8 + (251 \times \cos 40^\circ \times \tan 29^\circ)}{251 \times \sin 40^\circ}$$

$$= 0.73$$

② 인장균열내 지하수압이 있을 경우 : FS = 0.67

< 붕괴 B(2) >

- (1) 위치: 축점 2+480~2+500
- (2) 붕괴규모: 320m³
- (3) 불연속면의 발달:

도로 절취면의 주향과 비슷하면서 도로쪽으로 약 40° ~43° (40° 가 우세)경사진 연장성이 4-6m되는 긴 절리를 따라서 평면형태의 활동파괴가 발생하였고, 붕괴상부에는 인장절리가 발생하지 않았다. 본 절리면에는 약 1 - 2mm의 실트와 점토가 피복되어 있다.

또한 도로의 주향과 거의 90° 로 어긋나는 절리(N20W/80NE)도 발달하는데 이 절리는 급면에 암괴가 붕괴될 때 측면에서 끊어주는 보조적인 역할을 하였는데, 30cm 간격으로 발달하고 있다. 절리의 표면에는 점토가 약 1cm 두께로 충전되어 있고, 절리의 틈새는 급면의 붕괴로 인하여 1-2cm정도 벌어져 있다. 본 붕괴면의 상부에 올라가서 관찰하여보면, 붕괴면상부의 후방에도 인장절리가 발달하여서 인근의 붕괴된 B(1)과 B(3)의 후방으로 연결되는 것이 관찰된다.

(4) 평사투영망해석:

도로절취면의 주향과 비슷하면서 도로쪽으로 40° -50° (40-43° 가 우세) 기울어진 절리(N60-80E/40-47SE)를 따라서 평면파괴의 가능성이 매우 높았다. 또한 암괴의 중간부에서 인장전리역할을 하는 연장성이 긴 단층(N60E/70SE)이 발달하고 있어 암괴를 중간부에서 끊어주며 동시에 암괴의 측면을 끊어주는 연장성이 긴 단층(N20W/80NE)이 암괴의 우측에서 발달하여 암괴의 평면활동파괴를 촉진시킨것으로 판단된다.

(5) 안전률 계산

① 인장균열내 지하수압이 없는 경우

$$A = (17.4 - 4) \text{ Coec } 40^\circ = 20.8 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$W = 1/2 \times 2.5 \times 17.4^2 \times \{(1 - (4/17.4)^2 \times \text{Cot } 40^\circ - \text{Cot } 63^\circ)\}$$
$$= 161.8 \text{ (Ton)}$$

$$U = 0, \quad V = 0$$

$$FS = \frac{0.19 \times 20.8 + (161.8 \times \cos 40^\circ \times \tan 29^\circ)}{161.8 \times \sin 40^\circ}$$

$$= 0.75$$

② 지하수압을 고려하는 경우 : FS = 0.71

< 붕괴 B(3) >

(1) 위치: 축점 2+450~2+470

(2) 붕괴규모: 400m³

(3) 불연속면의 발달:

붕괴된 형태가 삼각형모양으로서, 길이 16m, 폭 22m, 깊이는 좌측이 70cm 이고 우측과 중앙부는 2m로 안쪽이 약간 깊다.

도로 절취면의 주향(N80E)과 비슷하면서 도로쪽으로 약 40° ~43° 경사진 절리(N65E/40SE, N80W/40SW)를 따라서 평면형태의 활동파괴가 발생하였다. 본 절리는 연장성이 4-8m로 긴편이고, 편마암에서 전형적으로 관찰되는 절리들과 같이 약간 크게 굴곡된 형태이나, 작은 Scale로 볼 때는 거의 평편한 편이며 점토와 실트가 약 1mm 정도 피복되어 있다. 붕괴면의 상부에는 고각인 인장절리(N85E/70SE~N80W/70SW)가 약 2-2.5m 깊이로 발생하였고, 그 하부에는 경사가 약 40° 도로쪽으로 기울어진 절리가 존재한다. 이 절리는 암괴가 붕괴할 때 후방에서 끊어주는 역할을 하였는데, 차후에 빗물이나 지하수가 침투하면 지하수압이 이 인장절리의 틈새에서 발달하여서 암괴의 붕괴를 급속하게 촉진시키는 역할을 한다. 이 인장절리가 암괴의 붕괴를 촉진시킨 경우는 앞서 설명한 A붕괴와 비슷한 양상이다. 본 B(3) 절취면 상부에는 붕괴면 상부에서 3m 후방에 인장절리가 또 발달하는데 이 인장절리는 B(2) 붕괴와 B(1)붕괴로 절취면 상부의 후방에서 연결될 뿐만아니라 A 붕괴면의 상부로도 연결되리라 판단되므로, A붕괴와 3번에 걸친 B붕괴들도 모두 하나로 연결되어 있는 양상으로 판단되므로 이미 암괴가 틀떠있는 것으로 보여지며 따라서, 본 지역에서 우세하게 발달하는 절리의 경사와 비슷하게 재절취를 하여야만 완공후에도 영구적인 안정성을 유지하리라 판단된다. 또한 절취면의 주향(N80E)에 크게 어긋나면서 고각인 절리가 발달한다.

(4) 평사투영망해석:

도로절취면의 주향과 비슷하면서 도로쪽으로 40° - 50° 기울어진 절리(N60-80E/ 40-47SE)를 따라서 평면파괴의 가능성이 매우 높았는데, 더구나 암괴의 후방에서 인장절리역할을 하는 연장

성이 긴 단층(N85E/70SE, N80W/70SW)도 뚜렷하게 발달하여서 암괴를 정상부에서 끊어주며 동시에 암괴의 측면에서 끊어주는 연장성이 긴 단층(N20W/80SW)이 암괴의 좌측부에서 발달하여 암괴의 평면활동파괴를 촉진시킨것으로 판단된다.

(5) 안전률 계산

① 인장균열내 지하수압을 고려하지 않는 경우

$$A = (13.6 - 2) \times \text{Cosec } 40^\circ = 18 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$W = 1/2 \times 2.5 \times 13.6^2 \times \{ (1 - (2/13.6)^2 \times \text{Cot } 40^\circ - \text{Cot } 63^\circ)$$

$$= 107.4 \text{ (Ton)}$$

$$U = 0, \quad V = 0$$

$$FS = \frac{0.19 \times 18 + (107.4 \times \cos 40^\circ \times \tan 29^\circ)}{107.4 \times \sin 40^\circ}$$

$$= 0.77$$

② 지하수압을 고려하는 경우 : FS = 0.73

본 조사지역에서는 같은 절취면인데도 비교적 안전한 지역과 붕괴가 발생한 지역을 비교검토하여 보면, 급변에 붕괴된 지역에서 다음과 같은 특징을 찾아볼 수 있다. 도로절취면과 주향이 비슷하며, 도로쪽으로 뚜렷하게 40° - 45° 정도로 정사진 절리가 기울어져있고, 절리는 연속성이 특별히 5 - 8m로 긴편이며 절리의 틈새에는 점토가 약 1mm 피복되어 있다. 또한 암괴의 후방에는 단층조흔면을 보이는 일종의 소규모 단층인 연속성이 5 - 10m로 긴 절취면에 평행한 절리가 발달하며 아울러서 암괴의 측면에도 점토가 1cm 정도로 두껍게 충전된 소규모의 단층 절취면의 주향과 크게 어긋나는 절리가 2 - 2.5m의 긴 연속성으로서 발달하는 것을 알수 있다. 이는 암괴가 활동파괴할 절리와 아울러서 암괴가 빠지도록 암괴의 후방과 측면에서도 모두 연속성이 긴 절리나 단층들이 발달하여야만 대규모의 암반 붕괴가 가능하다는 사실을 보여주고 있다.

4. 보강 대책

본지역의 지반특성상 도로쪽으로 기울어진 절리의 연장성이 4 - 7m 정도로 길고 뚜렷하게 발달하고 있으며, 틈새에 점토가 피복되어 있거나 간혹 1cm두께로 얹혀있는 절리와 단층의 발달이 현저하기 때문에 이 지역의 절리와 단층은 활동하기가 쉽고 또한 위험 암괴의 규모도 크기 때문에 절취면의 구배를 재조정하여서 절취하는것이 바람직하다. 특히 본지역에서는 '94년 하반기부터 '95. 3. 5일까지 연속적으로 4차례에 걸쳐서 대규모의 붕괴가 발생하였으며 절취면 상부에는 대규모의 인장절리들이 발달하고있어 앞으로 이 인장절리 틈새로 빗물이 침투하여서 암괴의 후방에 수압이 과도하게 발생하여서 이 축압으로 인하여 대규모 붕괴의 발생 위험이 우려될 뿐만 아니라, 절취면상에 무수한 절리들의 틈새가 대부분 1 - 3cm 정도로 벌어져 있고, 이미 절리면을

따라서 활동과괴가 발생하여 전리면의 전단강도는 급격히 감소하였으므로 록볼트나 앵커만으로 보강을 하는것보다 구배를 낮추어서 재절취하는 방법이 경제적으로도 바람직하리라고 생각된다. 그러나 과도한 토공 작업을 수반하는 절취사면의 구배만을 낮추는 단순한 방안보다는 다른 보강 방법을 혼합하여 경제적이고 효과적인 보강방법을 고려해 보았다.

4.1 직접보강

상기와 같이 현재의 지반특성 때문에 재절취가 필요한데, 절취시공시에 사면의 구배는 계획고에서 인공적인 구배를 형성하여야 되므로 이러한 절취시공성까지 고려하여 다음과 같은 방안을 고려하였다.

● 우측 절취면 (측점 2+450 ~ 2+530):

금번에 B(1), B(2), B(3) 3 곳의 붕괴가 발생한 취약한 지반이고, 절취사면의 높이가 낮아서 절취사면의 최정상이 분지형의 최정상이므로 재굴착하더라도 토공량이 비교적 적으므로 장기적인 관점에서 볼때 본구역은 1 : 1 구배(45° 경사)로 재절취하는 것이 바람직하다고 판단된다.

● 중앙 좌측 절취면 (측점 2+640 ~ 2+740):

도로쪽으로 기울어진 위험절리는 절리의 연장성이 2 - 4m이나 간혹 1 - 2m 로 짧은 경우도 있으며, 특히 절리의 틈새가 치밀한 편이고 충전물질이 거의 없어서 절리의 전단강도가 높으므로 비교적 안전하다. 아울러 암괴 붕괴시 후방에서 암괴를 끊어주는 역할을 하는 절리와 암괴가 빠지도록 측면에서 끊어주는 역할을 하는 절리의 발달도 미약하므로 본 지점에서는 암괴가 대규모로 붕괴될 위험성이 적다. 그러므로 절취면의 소단하부는 1 : 1 구배, 절취면의 소단상부는 1 : 1.2 구배로 재조정하여도 비교적 안정하리라고 판단되나 소단 부근에서 국부적으로 소규모의 붕괴가 발생할 수 있으므로 록볼트 등의 부분적인 보강이 필요할 수도 있다.

● 중앙부 (측점 2+545 ~ 2+640)

'94년 6월에 붕괴된 A 지역은 도로계획고에서부터 상부로 20m까지는 1 : 1로 굴착하는 경우 약간의 암괴가 떨어질 가능성이 있으므로 1 : 1 구배로 재굴착한 후에 다시 확인 하여 위험요인이 있다고 판단되면 록볼트로 부분적인 보강을 하여야 할 필요가 있으리라 판단된다. 보강부위는 도로계획고에서 20m높이까지의 절취면중에서 특히 낙반이나 활동의 가능성이 큰 상단부 10여m의 범위이다. 절취면 상부는 1 : 1.2 구배로 절취한다.(그림 1)

● 중앙 우측부 (측점2+530 ~ 2+545)

절취면 하부에서, 도로쪽으로 기울어진 절리의 경사가 절취면의 소단하부에는 경사가 45° ~ 50° 로 약간 높은 경향이 있으므로 본 지점에서는 절취면의 소단 하부는 1 : 1 구배로 하면 안정하고, 또한 절취면의 소단 상부에서는 약 40° 가 우세하므로 절취면의 소단상부는 1 : 1.2 구배로 재조정하는 것이 유리하리라고 생각된다.

4.2 부분 보강

소단하부의 절취면은 1 : 1(45° 경사)구배로 절취하면 우세한 절리가 40° 경사로 뚜렷하므로 절취후에도 약간의 부분적인 붕괴 가능성이 있으리라고 판단되므로, 재절취면을 다시 확인하여서 위험한 단면이나 암괴에 대하여는 $\phi=25\text{mm}$ 목분토로 보강하는 것이 필요하며 이 목분토는 Untension-type으로 Cement grout를 사용하고, 10 - 30° 하향으로 천공하여 3 - 4m 길이로 약 2m 간격으로 설치하여야 하는 것으로 나타났다. 보강범위는 도로계획도에서 10m~20m 높이의 절취면에만 집중적으로 보강하여야 하는데 왜냐하면 우세한 절리면과 절취면과의 거리가 상부로 갈수록 멀어지기 때문에 활동하려는 힘이 그 부분에서 크기 때문이다.

좌측 절취면(측점 2+740~2+780)에서는 도로 절취면의 주향과 비슷하면서 도로쪽으로 기울어진 절리의 경사(50°)가 우세하므로 기존 설계된 바와같이 절취시공된 현재의 절취면 경사(1 : 0.7)에서 비교적 안정하다. 또한 본 절취면에서 우세한 절리의 연장성이 1 - 3m로 짧고 또한 절리의 틈새가 치밀하고 점토가 충전되지 않았으며, 위험한 단층도 발견되지 않으므로 암괴의 낙반위험성이 낮기때문에 펜스만으로도 안정하리라고 판단된다.

4.3 절취면 보호

본 지역의 암석은 편마암으로서 절취면을 굴착한 후에 대기중에 일단 노출되면 빗물등에 의해서 지반이 쉽게 풍화되어서 연약해지는 특성이 있으므로 현재의 1 : 1 구배(45° 경사)인 풍화암과 1 : 1.2 구배(40° 경사)인 풍화토 부분에는 장기적으로 절취면이 연약해지는 것을 방지하기 위해서 녹생토나 Shotcrete등으로 피복을 하는 것이 좋다.

5.결 론

대도시 지역에서의 건축부지 조성공사 및 각종 도로공사 등에서 자주 발생하고 있는 대절개 암반절취사면활동에 대한 신속하고 효과적인 안정성 해석 및 보강방법에 관하여 알아보기 위하여 서울외곽순환도로 제 4공구에서 발생한 암반절취사면 활동에 대하여 현장조사를 실시하고 평사투영법으로 전반적인 안정성을 정성적으로 판단하고 현장 및 실내시험에서 구한 강도정수를 이용한 안전율을 계산하여 정량적인 안정성을 검토하였으며 이 결과를 가지고 효과적인 보강방안을 제시하였다. 본 사례연구를 통하여 얻은 연구결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

1.본 조사지역내에서는 절취면의 방향과 주향이 서로 일치하면서 고각의 절리들이 대규모 붕괴의 원인이 되고 있었으며, 암괴의 중간부에서 인장절리역할을 하는 연장성이 긴 단층도 암괴를 중간부에서 끊어주는 역할을 하여 암괴의 평면활동과괴를 촉진시킨 것으로 나타났다.

2.본 조사지역내에서는 전체적으로 평면활동과괴의 위험성이 매우 높으며 특히 B지역의 붕괴는

편마암반의 암괴들이 서로 이완되면서 절리면사이가 벌어져서 이 틈새로 지표수의 유입이 쉽게 되어 절리면 사이에 점토와 실트의 충전물이 내재되어 수압의 증가와 함께 절리면의 전단강도가 급격히 저하되어 강우에 관계없이 사면의 활동이 발생한 것으로 나타났다.

3.상기의 평가에 따라 절취면의 경사를 우선적으로 재조정하는 것이 필요하며 본 조사지역의 경우 역지공 중 앵커공만을 사용할 경우 비경제적이고 실효가 없으므로 전체적으로 절취면의 경사를 절리면의 경사에 가깝게 조정하고 부분적으로 췌기형태의 사면 활동이 우려되는 곳은 재절취 완료후 앵커공으로 보강하는 것이 경제적이고 시공성도 좋은 것으로 나타났다.

4.편마암 절취사면의 붕괴는 장기간에 걸쳐서 붕괴규모가 서서히 확대 발전하는 특성을 확인할 수 있었다. 따라서 편마암 지역에서 절취공사를 할 경우에는 절개면의 풍화 방지를 위하여 발파시 암반이 Opening되지 않도록 주의하여야 하며 절개면 시공후 신속히 식생공이나 슛크리트등으로 사면 표층부를 보호하는 등 장기적 보강이 필수적이다.

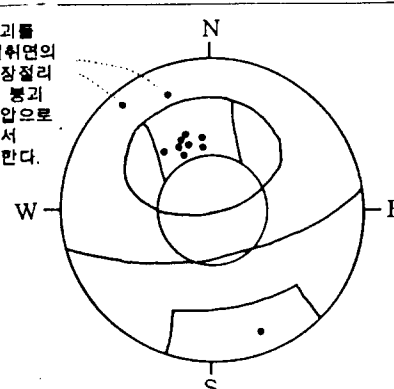
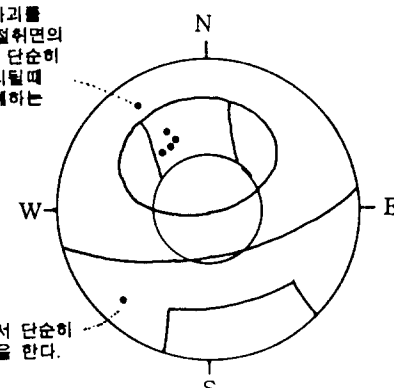
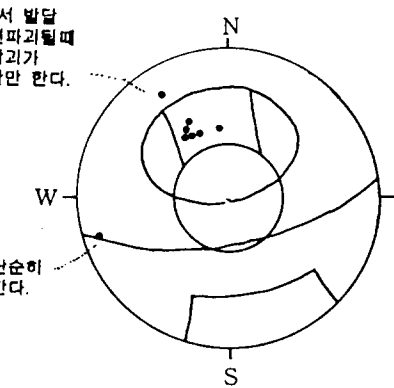
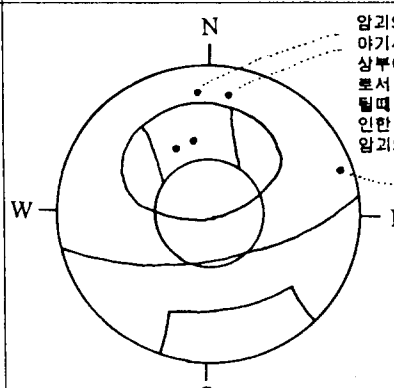
5.암반사면 안정성 해석을 위한 전단강도 추정시 여러가지 방법을 사용할 수 있으나 굴곡도 (Roughness)가 작은 편평한 편마암으로 이루어진 현장에서는 절리면의 전단강도를 얻기위하여 현장에서 쉽게 실시할 수 있는 Tilt Test의 결과도 절리면 전단시험등 실내시험의 결과와 近似하게 나타나고 있어 현장에서 합리적이고 신속한 방법으로 사용될 수 있다.

6.암반절취사면의 안정성 해석을 위한 절리면의 강도정수를 구하는 방법에 있어서 현장 및 실내에서의 여러가지 방법이 연구되어야 하며 특히 현장 기술자들이 간편하게 사용할 수 있도록 여러가지 암종에 대한 현장시험과 사례연구가 지속되어야하며 보다 많은 자료가 축적되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. E. Hoek & J.W.Bray, "Rock slope engineering", The Institute of Mining and Metallurgy. London, 1981, pp32
2. G.P. Giani, "Rock slope stability analysis", A.A. Balkema, Rotterdam. Brookfield, 1992, pp85-98, pp119-136
3. Ian Farmer, "Engineering behavior of rocks", Chapman and Hall, 1983, pp158-167
4. The Institute of Mining and Metallurgy, "Rock engineering and excavation in a urban environment", 1986, pp 256-262
5. R.D. Lama & V.S. Vutukuri, "Handbook on mechanical properties of rocks", Trans Tech Publications, 1978, Vol I, III, IV

도표 1 붕괴된 절취사면 부위에서의 주요 不連續面의 發達과 平射投影法에 의한 斜面安定性 분석의 요약

붕괴 지역	절취 斜面의 方向	고각의 절리			平射 投影法에 依한 斜面安定性 評價 結果
		① 활동 파괴 형태의 절리	② 암괴 후방에서 인장절리 역할	③ 암괴 측면에서 끊어주는 역할	
A	N80E/63SE	N70E/40SE N80E/40SE N70E/42SE N80E/35SE N50E/40SE N65E/35-40SE N70E/40SE	N70E/75NW N50E/80SE N70E/70SE		<p>암괴의 후방에서 전도파괴를 야기시키는 절리이다. 절취면의 상부에서 발달하므로 인장절리로서 암괴가 평면파괴로 붕괴될 때 인장절리로서 수압으로 인한 축압이 발생케하여서 암괴의 평면파괴를 촉진한다.</p>  <p>● 평면 파괴 가능성</p>
B(1)	N80E/63SE	N55E/40SE N65E/40-42SE N60E/40-42SE N65W/50SE	N60E/70SE N50W/68NE		<p>암괴의 후방에서 전도파괴를 야기시키는 절리이다. 절취면의 중간부에서 발달하므로 단순히 암괴가 평면파괴로 붕괴될 때 중력에서 암괴를 북지게하는 역할을 한다.</p>  <p>● 평면 파괴 가능성</p>
B(2)	N80E/63SE	N60E/40-42SE N65E/47SE N60E/42SE N65E/50SE N60E/43SE N80E/40SE	N60E/70SE N20W/80NE		<p>절취면의 중간부에서 발달하므로 암괴가 평면파괴될 때 단순히 중력에서 암괴가 북지도록 하는 역할만 한다.</p>  <p>● 평면 파괴 가능성</p>
B(3)	N80E/63SE	N65E/40SE N80W/40SW	N85E/70SE N80W/70SW		<p>암괴의 후방에서 전도파괴를 야기시키는 절리이다. 절취면의 상부에서 발달하므로 인장절리로서 암괴가 평면파괴로 붕괴될 때 인장절리로서 수압으로 인한 축압이 발생케하여서 암괴의 평면파괴를 촉진한다.</p>  <p>● 평면 파괴 가능성</p>

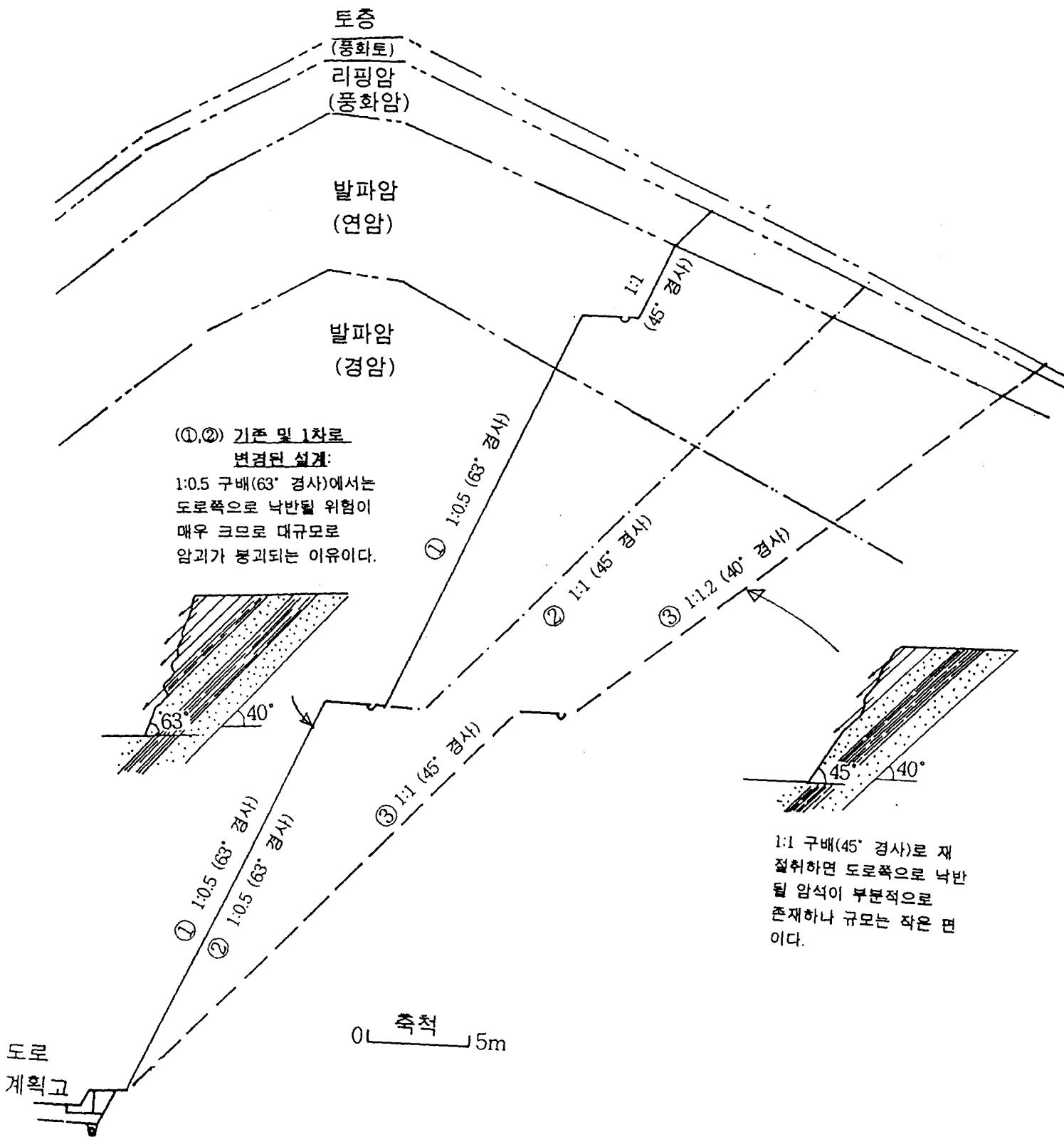


그림 1 대절토 법면의 구배 대비표 (STA.2+600)

- ① 기존 설계
- ② 1차로 변경된 설계로서 1995.2월 시공된 구배
- ③ 2차로 설계 변경시 추천되는 방안