

대도시 기존 사면의 안정화 연구

A Study of the Existing Slope Stability in a Big City

이수곤¹⁾, Su-Gon Lee, 양홍석²⁾, Hong-Suk Yang

¹⁾ 서울시립대학교 토목공학과 부교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Seoul City University

²⁾ 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Seoul City University

SYNOPSIS : Excavation in a big city is different from excavation in a local area because construction methods and stability are directly connected in a loss of life. Especially, estimate of rock mass slope stability is executed by more detail and safety work.

In this study, we are made researches in rock mass slope stability and safety method that the slope is closed by elementary school in a big city. The result of many field study and numerical analysis is shown up direct reinforcement used to anchor.

Key words : Excavation, slope stability, field study, numerical analysis, anchor

1. 서 론

우리나라는 산지가 국토의 70%를 차지하고 있는 지형 특성상 대도시의 개발에 있어서도 절취 사면의 조성은 피할 수 없다. 특히 대도시에서의 절취사면에 대한 안정성에 대한 평가는 인구가 밀집해 있는 대도시의 특성상 더욱 세밀하고 안전한 평가가 이루어져야 한다.

본 연구는 기존에 시공된 절취면에 대해 현장조사를 실시하여 안전성을 평가하고 불안정한 부분에 대한 대책공법을 제시하려고 하였다. 또한, 본 연구의 대상 사면이 암질의 변화가 심한 편마암지대이며 초등학교에 위치하고 있는 등 상세한 조사와 안전한 보강 공법을 채택함으로써 아무리 작은 위험 요소라도 보완하는 방향으로 절취면의 보강방안을 채택하여 초등학교들이 안심하고 운동장을 이용하도록 하는데 그 목적이 있다.

절취면의 지질구조를 조사하는데는 탄성과 탐사, BIPS 및 시추조사를 실시하였고 지하수위는 실측을 통하여 장래 수위를 예측하여 사용하였다. 그리고 사면의 안정성을 분석하기 위해서 사면의 실제 실험자료를 근거로 하여 FLAC, UDEC, SLOPE/W등으로 사면을 모델링 하였으며 한계 평형법을 이용하여 암선을 따른 대규모 파괴 또한 고려하였다. 이를 통하여 가장 적절한 보강방법을 선정하여 사면의 안정성을 확보하고자 하였다. .

2 연구 대상 지역의 특성

2.1 연구 대상 지역의 지질학적 특성

1. 암석의 종류

본 지역의 지질은 선캠브리아기의 호상흑운모편마암이 분포하고 엽리구조가 잘 발달하고 있으며 기반암을 부정합으로 피복하고 있는 봉적층은 주로 점토질 모래와 자갈이 혼재되어 있으며 자갈의 크기는 약 10cm 내외가 대부분이지만 그 이상의 것도 포함되어 있다.

2. 풍화 상태

사면 하부 ~ 중간까지는 연, 경암이 분포하고 사면 중간 ~ 상부까지는 연암, 풍화암, 풍화토 순으로 분포한다. 풍화암, 풍화토의 두께가 약 10 ~ 5m까지 다양하게 분포하며 일부 계곡부에서는 풍화심도가 깊다.

3. 항공사진을 통한 불연속면 발달 상태

본 과업지역은 독립적으로 산계가 발달한 지역이기 때문에 선구조의 발달경향을 파악하기 어렵지만 정밀한 항공사진 판독결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 주 구조선의 방향 : N25 ~ 30E, N40 ~ 50E
- 본 과업지역을 지나는 구조선의 방향 : N40 ~ 50E, N80 ~ 85W의 교차

4. 현장 지표조사를 통한 불연속면 발달 상태

본 조사지역의 불연속면의 상태는 대부분 절리의 경우 연장성이 2m 이상으로 긴 수직절리가 분포를 하며 간격은 50cm-1m이고 경사는 70-90° 정도이다. 수평절리의 간격은 10~30cm 정도이며 연장성은 1m이하이다. 평사투영망 해석결과 수직절리는 사면의 경사방향과 반대인 전도파괴의 위험성이 있는 절리가 간혹 있으나 부분적인 보강으로 안정성을 확보할 수 있으며 수평절리의 경우는 대부분 연장성도 짧고 빈도수도 많지 않으나 간혹 평면파괴의 위험성이 있는 절리들이 분포한다.

본 지역에는 암맥과 단층이 분포하며 대체로 암맥의 경사방향은 불규칙하나 BH-6~9을 따라서 60-65° 정도의 경사를 가지는 10m 이상의 연장성을 가지는 단층이 분포를 하며 이에 대한 보강이 요구된다. 엽리의 주향과 경사방향은 사면과 반대방향으로 이에 대한 위험성은 없는 것으로 판단된다.

5. 사면의 위치 및 크기

본 사면은 운동장 끝부분에서 시작하여 도로변까지 이르는 약 300 ~ 350m 정도의 길이를 가지고 있다. 구배는 대부분의 사면에서 약 63° ~ 70° 정도로 매우 급하고, 절취면의 높이는 20 ~ 29m 이다. 사면의 약 250 ~ 300m는 운동장에 접해 있으나 나머지 부분은 초등학교 건물 우측부와 약 5 ~ 10m 정도의 간격을 두고 접해있기 때문에 사면의 붕괴시 직접적인 영향을 받을 수 있다.

2.2 연구 대상 지역의 수리현황

1. 수계로 본 수리현황

수계분석은 사면의 안정성에 많은 영향을 주는 물의 흐름과 지형구조를 판단할 수 있는 조사로써 본 조사지역에서는 두 개의 선구조가 ○○ 초등학교 절취면을 지나가고 있으며 수계를 분석한 결과 절취면 방향으로 흐르는 수계가 존재함을 알 수 있었다. 고지형도를 분석한 결과 1998년 붕괴된 사면쪽(BH-4~BH-5)으로도 수계가 존재함을 알 수 있었다

2. 지하수위 측정에 의한 수리현황

지하수위는 2000년 9월 15일부터 10월 15일까지 약 한 달간 측정하였으며 측정 초기에는 강우량이 많았기 때문에 수위가 상승하는 경향을 보였고 측정 중반 이후에는 수위가 일정해지는 경향을 보였다.

3. 시추공의 수위 조사 결과 및 분석

본 연구 기간 내에 집중호우(태풍 사오마이)가 있었으므로 이를 토대로 간단한 강우량 분석을 실시하여 지하수위와 강우량의 일차 관계식을 만든 뒤 서울 지역의 100년 빈도의 3일 강우 강도(평균적인 집중호우 기간)를 적용 그 수위를 추정하였다. 아래의 그림 1의 ○○산 수위분포는 한달간 수위를 측정한 평균수위와 집중호우에 의한 고수위를 표시하였으며(3일간 약 129.7mm의 강우량), 이를 토대로 100년 빈도의 강우강도 중첩합도가 가장 좋은 모델을

백하여 수위상승을 예측하였다. 수위예측 결과 본 연구에 고수위로 사용한 지하수위 지표 -3m는 안전측인 것으로 판단되었다.

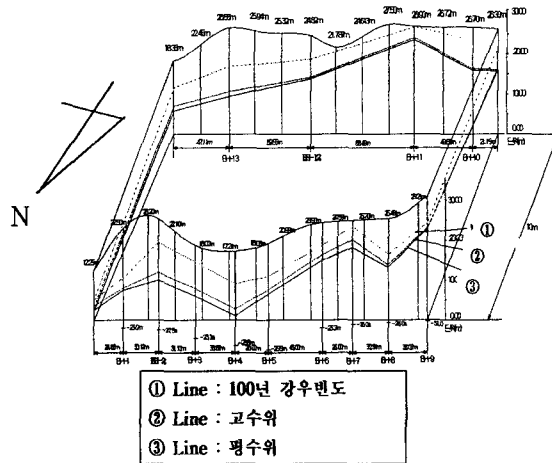


그림 1 ○○산의 지하수위 분포

3. 절취면의 안정성 평가

3.1 절취면의 지반 강도정수 산정

풍화암과 풍화토의 강도정수는 전단시험을 통하여 얻어진 값을 현장 응력 수준에 맞추어 조정하여 사용하였으며 GSI와 RMR방법을 사용하여 구한 암반의 C, ϕ 값과 절리면 전단 시험값을 사용하여 본 사면의 안전을 계산 및 설계에 사용하였다.

1. 매립층(BF:Back Fill)

BH-6, 7, 8, 9 인근에는 절취사면의 정상부 지표면에는 풍화잔류토의 상부에 매립층(Back Fill : 토층과 자갈의 혼합물)이 5~14.8m 정도의 두께로 존재하므로 BH-9 부근의 매립층내의 토사에 대하여 전단강도 시험을 수행하였다.

2. 풍화잔류토(CW:Completed Weathered soil)

실제 응력수준에 맞게 판단하기 위하여 전단시험의 자료중 높은 응력수준의 것을 채택하여 3~5m정도에서 채취된 시료의 현장조건을 반영하여 해석하였다.

3. 풍화암(HW:Highly Weathered Rock)

RMR, GSI, 토질전단시험에 근거하여 판단하였으나 잔류 절리와 잔류 단층내에 잔류점토가 얇게 충전되는 경우가 있어 내부마찰각과 C값은 약간 낮게 판단하였다.

4. 풍화암과 연암1의 경계층(Rock Head)

풍화암과 연암1의 경계층에는 파쇄대와 단층점토가 상당수 분포하고 있으며 또한 경계층의 경사가 ○○초등학교 운동장 방향인 절취면 방향으로 기울어져있기 때문에 이에 따른 평면파괴의 가능성이 있다고 판단되었다. 따라서 이 경계층에 대한 물성치는 잔류 풍화토층과 연암층 사이에 대한 전단시험과 현장조사에 따른 판단에 따라 산정하였다.

5. 연암(MW:moderated Weathered Rock)

T.C.R.과 R.Q.D를 근거로 하여 취약한 지반인 경우는 연암1(MW1:Moderated Weathered Rock 1)로 설정하였고, 양호한 연암으로 구성된 경우는 연암2(MW2 :Moderated Weathered Rock 2) 로서 구분하였다.

6. 경암(SW:Slightly Weathered Rock)

암석이 매우 신선하고 RQD(%)도 높아서 암반내에 파쇄가 적은 편이므로 절리에 대한 영향도 다른 풍화암이나 연암층에 비해 적으므로 경암층에서의 내부마찰각과 점착력은 intact rock의 수준으로 판단하였다.

표 1 본 연구에 사용된 지반 강도 정수

물성치 층구분	단위중량 (ton/m ³)	점착력 (ton/m ²)	내부마찰각 (°)
매립토층	1.5 (토층내의 자갈까지 고려하면 약 2.0)	0.3	23.5
*매립토층, 자갈+ 풍화잔류토층	1.9~2.0	0.3~0.7	23.5~28
풍화토	1.8	0.5~1.0	28
풍화암	2.0	1.5~2.0	29~30
풍화토, 암-연암1 경계	2.0	0~0.7	23~26.7
연암 I	2.2	3~5	30
연암 II	2.4	8	33
경암	2.6	10	35~38

*지표면부근에 매립층이 5~10m 두께로 풍화잔류토층의 상부에 불규칙하게 분포하는 경우가 있다. 이 경우에 강도 정수와 물성은 매립층과 풍화잔류토층과의 평균값을 산정하여서 결정하였는데 본 지역에서는 Back Fill+CW는 단위중량=1.9~2.0t/m², ϕ =23.5~28, C=0.3~0.7을 적용하였다.

3.2 평사투영 해석

1. 각 세부구역별 평사투영망 해석결과

- 좌측사면 (BH-1, BH-2, BH-3, BH-4, BH-5)

본 사면은 전체적으로 절취사면의 주향방향과 30~50° 주향차이를 가지는 수직절리들이 다수 분포하며 본 절리들은 연장성이 2m 이상인 긴 절리들로서 절리표면이 매끈한 편인데 이 절리들은 사면의 안정성에 영향을 끼치지 않는다. 또한 시추공내 영상촬영자료에 따르면 BH-4, 5, 6에서는 N10~35E/35~36NW의 단층이 존재하는데 본 단층은 ○○ 초등학교 운동장쪽으로 기울어져서 평면파괴의 우려가 있다.

- 우측사면 (BH-6, BH-7, BH-8, BH-9)

본 사면은 좌측부와 거의 동일한 절리들이 많이 분포한다. 엽리의 방향은 다른 지역과 동일하게 20~30°의 경사방향으로 사면과 역경사로 발달하므로 본 엽리에 평행하게 발달하는 연장성이 짧은 절리들은 큰 위험요소가 아니다.

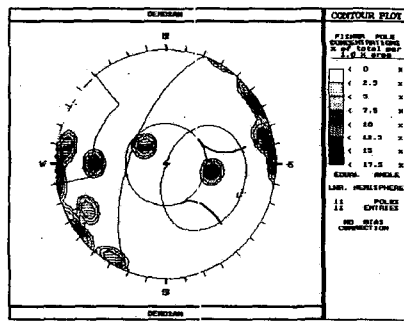


그림 2 좌측사면의 평사투영망

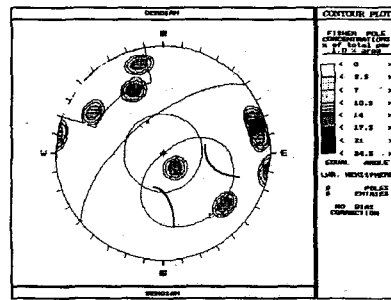


그림 3 우측사면의 평사투영망

3.3 FLAC 해석 및 UDEC 해석

1. 개요

본 연구에 사용된 수치해석의 사면의 안정성을 분석하기 위한 도구는 유한차분법을 이용한 FDM 해석기법의 FLAC과 암반을 절리나 단층 등으로 나누어진 블록들의 집합체라고 보고 블록들의 접촉면에서 발생하는 힘과 변위와의 관계를 운동방정식에 의거 해석함으로써 블록들의 거동을 예측하는 수치해석적 기법인 UDEC을 사용하여 해석하였다.

2. 해석결과

· UDEC의 해석결과

모든 경우에 있어 변위가 극히 작고 불평형력과 속도벡터가 모두 수렴하는 것으로 나타나 대체적으로 안정적인 것으로 판단되었다.

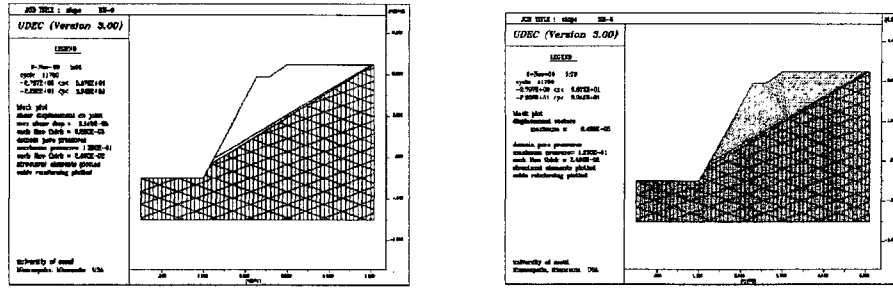


그림 4 UDEC 해석결과(BH-6 단면)

· FLAC의 해석결과

정상수위상태에서는 최대변위가 10mm 미만으로 대체적으로 안정적이나, 최고수위상태에서 BH-(7,10)과 BH-(8,10)을 제외한 다른 시추지역에서는 최대변위가 10~120mm 정도로 상대적으로 큰 변위를 나타내어 장기적인 안정성에 문제가 있을 것으로 판단된다.

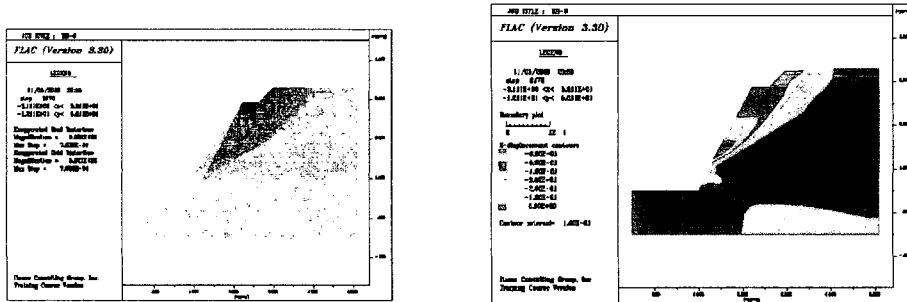


그림 5 FLAC 해석결과 (BH-6 단면)

3.4 원형파괴를 고려한 한계평형해석

1. 개요

사면을 여러개의 절편(Slice)으로 나누어 임의의 가상파괴면(Potential Slip Surface)에서의 한계평형 상태를 가정하여 활동모멘트(Driving Moment)와 저항모멘트(Resisting Moment)의 비를 안전율로 계산하며, 가상파괴면중 최소의 안전율을 나타내는 가상 파괴면을 예상 파괴면으로 가정한다. 본 연구지역과 같이 절취사면에 인접하여서 주벽과 운동장이 있는 경우에는 붕괴시 매우 위험하므로 사면의 안전율은 $F_s=1.5$ 가 안전측인 것으로 고려하였다.

2. 전체적인 해석결과

SLOPE/W 해석결과는 원호파괴가 토층까지의 파괴와 연암 I 까지 파괴를 구분하여 검토하였다. 구배 완화전의 안전율이 최고수위(사면정상부에서 -3m적용)의 경우 $F_s=0.31 \sim 1.08$, 정상수위(실제 현장수위계측결과)의 경우 $F_s=0.5 \sim 1.22$ 의 범위로 전체적으로 안전율이 낮은 것으로 판단되었다. (그중 BH-7변은 안전율이 최고수위시 1.08로 여전히 불안하며 단층 활동면이 있어 위험하다고 판단된다.)

3.5 불연속면에 의한 직선적인 파괴를 고려한 한계평형해석

사면내의 활동력과 저항력사이의 관계로 안전율을 구하고 총 보강량을 산정할 수 있는 방법으로 인장균열이 있거나 없을시 평면파괴에 대해 적용할 수 있다.

평면파괴의 경우에 안전율은 “안전율=저항력/활동력항”으로써 구하며 수식으로 안전율 1.5를 고려한 후 총 보강량을 산정하였다

여기서 직선파괴시 위험암괴의 후방에 인장균열이 있는 몇 가지 경우(①:첫 번째 인장균열 ②:두 번째 인장균열, ③:인장균열이 없는 경우)를 가정하여서 우기시 인장균열에 지하수압이 발생하는 것도 검토하였다.

4. 결과 및 고찰

1. 전체적인 구배 완화

절취면의 하단부에서부터 상부로 10m까지는 현재 1:0.5의 구배를 그대로 유지하고, 그 상부의 풍화암/연암의 10m는 1:1로 완만하게 하고 그 상부의 풍화토는 5~10m는 1:1.2로 완만하게 재절취한다. 여기서 10m 높이마다 소단을 2m폭으로 두는 방법을 고려하였다.

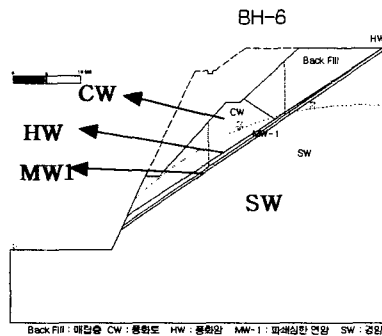


그림 6 구배완화방안 (BH-6 단면)

2. 전체적인 앵커보강 + 부분적인 록볼트

· 전체적인 앵커 보강

① 원형 파괴의 검토: 매립층, 풍화토, 풍화암, 파쇄가 극심하고 풍화가 심한 연암(T.C,R=50%, R.Q.D=30%미만인 암석)에 대해서 원형파괴의 가능성을 검토하였다. 지하수위는 정상수위와 고수위(지표 -3m)를 고려하였다.

② 직선파괴의 검토: 암반의 전형적인 파괴형태인 직선, 켜기, 평면파괴의 가능성을 검토하여서 위험요소가 있으면 암괴가 앵커로 보강될 수 있도록 대책을 강구하였다. 위험암괴 후방에 존재하는 절리나 단층의 틈새로 지하수가 유입되어서 발생하는 몇 가지 인장균열에 의한 양압력도 고려하여 안전율 $F_s=1.5$ 를 만족시키는 보강량을 산정하였다. 상기의 ① 원형파괴의 검토와 ② 직선파괴의 검토를 동시에 만족시키는 보강량을 제시하였다.

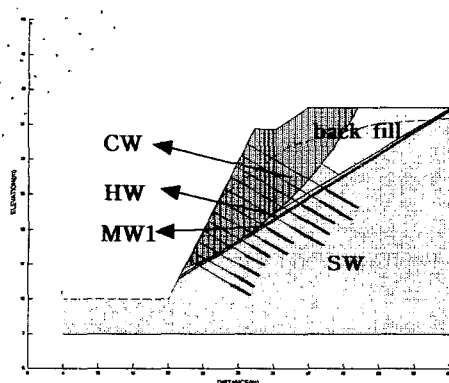


그림 7 원형파괴를 검토한 앵커보강 (BH-6 단면)

표 2 인장균열별 보강량

시추공	Fs=1.5의 안전을확보를 위한 각 시추공별 보강량(ton)		비 고
BH-1	①	16.58	
	②	19.21	최종보강대책
	③	10.06	
BH-2	①	84.87	
	②	125.51	최종보강대책
	③	105.68	
BH-3	①	27.25	
	②	48.59	최종보강대책
	③	45.71	
BH-4	①	22.75	
	②	43.96	최종보강대책
	③	32.12	
BH-5	①	24.41	
	②	44.60	최종보강대책
	③	29.75	
BH-6	①	127.21	
	②	221.40	최종보강대책
	③	201.47	
BH-9	①	49.53	
	②	53.42	최종보강대책
	③	20.31	

① 첫 번째 인장균열, ② 두 번째 인장균열, ③ 인장균열이 없는 경우

● BH-7, 8 은 단층에 의한 파괴가능성을 검토함

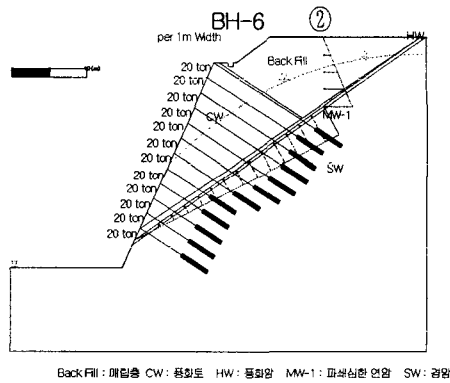


그림 8 직선의 파괴를 검토한 앵커보강(BH-6 단면)

· 록볼트에 의한 부분적인 보강

(가) 부분적인 위험암괴를 보강

본 지역에는 BH-3과 BH-4 사이에서 두 단층으로 인하여 간혹 켜기 파괴가 가능하고, 또한 BH-5 부근에는 위험 단층으로 인하여 평면파괴가 가능하므로 록볼트 보강을 설계하였다.

(나) 절취사면 하부의 여굴된 부분을 보강

본 절취사면의 하부 BH-6,7,8,9 지점에는 시공시 발파로 인하여 역구배가 된곳이 많으며 하부지반이 파쇄와 풍화가 심하고 사면 전방으로 기울어진 단층이 단층균을 형성하고 있어 암반이 매우 취약하므로 평면파괴의 우려가 있는 암괴에 대하여 록볼트와 합벽(철근합벽콘크리트)으로서 보강하여야 한다.

5. 결론

1. 본 연구는 대도시에서 굴착공사시 적절한 암반안정성평가를 위하여 ○○구에 위치한 ○○초등학교 절취사면을 예로 들어 안정성을 평가하였다.
2. 본 연구지역은 흑운모호상편마암으로 이루어진 지역으로써 파쇄가 많고 절취면의 전면으로 수계가 존재하는 등 많은 위험요소를 내재하고 있는 것으로 판단되었다. 따라서 안정성을 도모하기 위해서는 지층의 상태나 지질 구조를 알아야 했기 때문에 시추와 BIPS, 현장탄성파등을 실시하였고 지하수위는 실측하여 장래 호우시 수위를 예측하여 설계에 반영하였다.
3. 설계시에는 본 지역의 위치가 초등학교 운동장사면이라는 특수한 상황을 고려하여 발생할 수 있는 확률이 아주 작은 위험요소라도 제거하고자 하였으며 보강 방법간의 비교를 통하여 최선의 보강 방법을 선정하도록 하였다. 초등학교생의 시각을 고려하여 미관상 녹생토를 실시하도록 설계하였다.
4. 본 사면의 안정성을 확보하기 위한 공법들을 비교하면 다음과 같다.

표 3 보강방법 비교검토

구분		구배완화공법	Anchor 공법
공법 범요	주 공 법	· 절취면에 대한 영구 안정성 확보 · 절취면의 구배를 완화하여 활동력을 줄임으로서 안정 성을 확보	· 절취면의 현재구 배 유지 · Anchor의 인장력 에 의해 전단 · 저항력을 증가시켜 사면안정성 확보
	보조공법	녹생토+배수공	배수공+띠장+녹생토
장점		· 안정성을 확실히 얻을 수 있는 공법 · 시각적인 안정감을 부여 · 장기 안정성 확보	· 추가 용지 불필요 · 원지반 물성의 강화 효과 · 평면파괴에 대한 보강 고려
단점		· 용지 보상의 문제 · 절토량 과다	· 시공후 지속적 유지관리필요 · 대형천공장비로 시공성 저하
시공성		· 시공 난해(학교 운동장) · 공기 짧음	· 시공 용이 (학교 운동장으로 부지 넓음) · 건물 인접부는 인력시공 가능 · 공정이 간단하고 양호
안정성		매우 우수, 장기안정	우수
외관		· 시각적인 안정성 우수	· 녹생토로 시각적인 문제해결

보강방법별로 비교검토 결과 제2안인 앵커보강방법이 가장 우수한 보강방법으로 판단되었다.

* 참고문헌

1. 한국동력자원연구소,(1982), 서울지질도폭
2. Lee.S.G and de Freitas.M.H(1989), " A revision of Description and classification of weathered granite and its application to granite in Korea " Quarterly Journal of Engineering Geology, London, Vol.22, pp. 31-48
3. E. Hoek & E. T. Brown(1980), " Underground Excavations in Rock ", The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 131-149
4. E. Hoek & J. W. Bray(1981), " Rock Slope Engineering " , The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 83-90II