

강원산간지방 도로확장 절토부 사면 안정 처리에 관한 연구

이승호⁽¹⁾, Seung-Ho, Lee, 황영철⁽²⁾, Young-Cheol, Hwang, 송요원⁽³⁾, Yo-Won, Song, 정응환⁽⁴⁾, Eung-Hwan, Jeong, 지영환⁽⁴⁾, Young-Hwan, Gi, 노홍제⁽⁴⁾, Heung-Jae, Noh

⁽¹⁾ 상지대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sangji

⁽²⁾ 상지대학교 토목공학과 전임강사, Full time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sangji

⁽³⁾ 강원도 횡성군청 토목계장, Chief Clerk, Hoengseong Office of Kang-won Do

⁽⁴⁾ 상지대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Course, Dept. of Civil Engineering, Univ. of Sangji

개요(SYNOPSIS) : In domestic case occurrence of cut slopes according to construction and expansion of road is necessary more than 70% of country has been consisted of mountain area. In the case of Kang-won Do, there are much mountains locals in road wiping away a disgrace and expanded and slant is connoting collapse danger of incision side by each kind calamity being urgent. When route alteration enforces disadvantageous road extension, stability examination and processing way about large slope happened are serious.

During road extension work in the Kang-won DO secure stability for falling rock of road slope and failure that happen and established suitable reinforcement and countermeasure in reply in necessity.

The Slope is divided rock slope and soil slope, and then in order to analysis soil slope apply LEM theory. And rock slope examined stability about stereographic projection and wedge failure.

Is going to utilize in reinforcement and failure prevention if it is efficient cutting as reinterpreting stability and secure stability and wish to consider effective and robust processing plan of great principle earth and sand side, and present countermeasure inside with these data hereafter applying suitable reinforcement countermeasure about unstable section.

주요어(Key words) : Slope Stability, Wedge failure, Wedge Analysis, SWEDGE

1. 서론

일반적으로 산간지역에서 도로를 확장할 경우 절개지의 발생은 필연적이다. 사면 굴착 수행시 작업자의 실수로 인하여 국부적인 붕괴나 파괴가 발생될 수도 있으며, 기후적인 영향을 받아 집중호우로 인한 지하수위의 상승, 시공시 발생하는 진동 등은 사면안정화에 대한 위험요소이다. 그러나 현실적으로 다양한 지반조건, 기후, 주변 환경 등에 대한 처리 방안 및 지침이 부족한 현실이다.

본 연구는 강원산간지방에서 도로확장공사 중에 발생한 도로사면의 낙석 및 파괴에 대한 안정성을 확보하고, 필요시 이에 대한 적절한 보강 및 대책을 수립하여 절개면의 파괴로 인한 인명 피해를 줄이고 효율적인 절개지의 관리 및 처리를 위한 것이다.

산악도로절개사면의 주변에는 자연환경에 노출되어 있는 암반의 풍화, 강우, 해빙시 암반블록의 이탈 등으로 인한 낙석 또는 산사태의 위험이 존재한다.

강원도의 지형여건상 도로건설시 많은 절토사면이 발생하고 있으며, 또한 이러한 절토사면에 의해 매년 크고 작은 사면붕괴로 인하여 직·간접적인 인명피해 및 재산피해가 발생하고 있는 실정이다. 이러한 피해를 최소화하기 위하여 각 연구단체 등에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 강원도 산간지방에 도로확장으로 인한 절개사면 발생시 이에 대한 공학적 조사와 절개면의 안정성 확보를 위한 절개면 처리 방안을 연구하였다.

2. 연구대상사면

2.1 지형 및 지질

본 연구대상지역은 도로건설 중 낙석과 붕괴가 발생한 군도128(지방지역 집산도로)에서 분기되어 횡성군 갑천면 추동리를 기점으로 종점부인 병지방리를 연결하는 도로로서 노선의 남으로는 갑천면 대관대리가 위치하고 북으로는 홍천군 동면 경계와 인접하고 있는 병지방리로서 대부분 산지로 하천과 잘 어우러져 자연경관이 빼어난 지역이다. 또한 지질현황은 한국동력자원연구소에서 발행한 강원도 횡성군 갑천면의 지질도를 참고하면 조립질 흑운모화산암 층이 산재해 있으며, 추동에서 병지방리 방향에 석영반암 그레노파이어가 분포하고, 충적층이 존재해 있다.

2.2 사면현황

본 지역은 좌·우측이 산지로서 노선계획시 대절토구간의 발생이 불가피한 지형이며, 병지방에서 추동방향으로 우측에는 하천을 끼고 있다. 또한 암반사면의 경우 암석의 풍화가 심하며, 절리가 많이 발달해 있어 각별한 주의가 필요하다.

연구대상지역의 암반사면은 총 연장 260m, 높이가 약15~30m에 이르며, 절리가 많이 발달해 있고 파쇄대의 흔적이 보인다. 또한 사면 상단부에는 식생이 널리 분포되어 있다.

토사사면은 총 연장 180m, 높이가 약5~13m에 이르며, 입도가 고르지 못한 흙으로 구성되어 있다. 또한 사면 상단부에는 식생이 널리 분포되어 있다.

3. 지반물성치 추정

3.1 토질시험

흙의 성질을 파악하여 보다 정확한 토질정수 산정을 위하여 5개 시료를 채취하여 함수비, 체분석, 액·소성시험을 실시하였으며, 각 시험의 결과는 다음과 같다.

표 1. 토질시험결과

시료	함수비	NO.200체 통과량(%)	액성한계	소성한계(소성지수)	분류기호
I	22.92	3.18	30.51	N.P(-)	SP
II	38.54	2.02	36.09	20.00(6.09)	
III	31.86	0.2	33.09	25.00(8.09)	
IV	13.78	6.63	35.09	N.P(-)	
V	26.31	0.39	39.84	25.00(14.84)	

3.2 암석시험

암반사면 구간에서는 암석을 분류하기 위하여 Schmidt Hammer시험과 사면의 중단, 하단부에서 수집한 암석을 이용하여 암석 감정을 수행하였으며, 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 2. 암석의 일축압축강도와 분류

평균 슈미트 값	평균 일축압축강도 (kg/cm ²)
57.59	2515.21

표 3. 암반사면구간 암석 분류

시료번호	암석명
1	페그마타이트
2	페그마타이트
3	페그마타이트
4	화강암
5	화강암
6	화강암

3.3 지반정수 산정

3.3.1 토층의 강도정수

본 연구대상지역의 토사사면 안정성을 분석하기 위해 대상단면의 시료를 채취하여 실내시험을 통한 통일분류법을 이용하여 흙을 분류하였으며, 그 결과 SP(입도가 나쁜 것)로 분류되었다. 이는 도로설계요령(한국도로공사)에 따르면 $C=0 \text{ tf/m}^2$, $\phi=30^\circ$ 으로 제시되어 있으며, 이를 적용하였다.

3.3.2 암반의 강도정수

암반사면의 안정성 해석 수행을 위한 암반의 강도정수를 추정하기 위해 슈미트해머 시험을 이용한 압축강도시험에서 얻어진 일축압축강도와 암석분류 결과를 이용하여 암종을 분류하였으며, 이를 바탕으로 본 연구대상사면의 암석 강도정수를 안정적인 측면에서 해석하기 위해 단위중량은 각각 2.9 tf/m^2 이고, 대상사면에 절리가 많이 발생한 상태이므로 점착력은 0.5 tf/m^2 을 적용하였으며, 마찰각은 35° 를 적용하였다(표 4 참조).

표 4. 본 연구대상사면의 적용 암석강도정수

단위중량(tf/m ²)	점착력(tf/m ²)	내부마찰각(°)	비 고
2.9	0	35	단위중량실측치

4. 프로그램을 이용한 사면의 안정성 검토

4.1 토사사면의 안정성 해석

토사사면에 대한 안정해석은 보편적으로 사용되는 한계평형해석(LEM)을 이용하였다.

안전율은 사면이 파괴에 도달하거나 과도한 변형으로 인하여 더 이상 사용이 불가능 한 경우를 결정하기 위해 공학적으로 사용된다. 안전율은 사면의 활동면이 가지고 있는 전단강도에 대한 한계평형상태에서의 전단응력의 비를 뜻한다. 이론상으로 안전율이 1보다 크면 안정하다고 볼 수 있으나 실제 현장에는 지반의 강도정수, 하중, 사면의 기하학적인 조건 및 기타 조건이 불확실하기 때문에 안전율이 허용 안전율 이상이 되어야 안정하다고 볼 수 있다. 이러한 불확실한 요소들 때문에 안전율은 1보다 큰 값을 사용하여야 한다.

<표 5>를 참고하여 검토 대상 사면에 적용한 최소안전율은 건기시 1.5이상, 우기시 1.2이상으로 하였다. 해석시 사용된 파괴형태는 원호활동으로 가정하였으며, 지하수위 조건은 건기시와 우기시로 구분하여 수행하였고, 우기시에는 지하수위가 사면높이의 60%까지 상승하는 것으로 가정하였다. 이상과 같은 조건에 의해 사면안정해석을 수행한 결과, 사면의 최소안전율인 건기시 1.5, 우기시 1.2와 비교하여 사면의 안정성여부를 판단하였으며, 적용 물성치는 <표 6>과 같다.

표 5. 사면의 최소안전율 및 적용안전율

최소안전율		참 고	적용안전율
절 토	건기시	$F_s > 1.5$	$F_s > 1.5$
	우기시	$F_s > 1.1 \sim 1.3$	$F_s > 1.2$
	지진시	$F_s > 1.1$	-

표 6. 본 연구에서 적용한 토질정수

종류	단위체적중량 (tf/m ³)	1.8
밀실하지 않거나 입도가 나쁜 것	내부마찰각 ϕ (°)	30
	점착력C(tf/m ²)	0
	통일분류기호	SP

본 연구대상 토사사면을 한계평형을 이용한 사면안정해석을 수행하였다. 사면의 안정성 해석은 원호 파괴로 가정하였고, 현 사면의 구배는 1:1.0이며, 우기시 지하수위는 사면높이의 60%로 가정하여 안정성 검토를 수행하였다. 사면해석결과, 최소안전율은 건기시 0.76이고, 우기시의 안전율은 0.44으로 해석되었고, 최소기준안전율 건기시 1.5, 우기시 1.2에 만족하지 못하므로 불안정한 것으로 해석되었다.

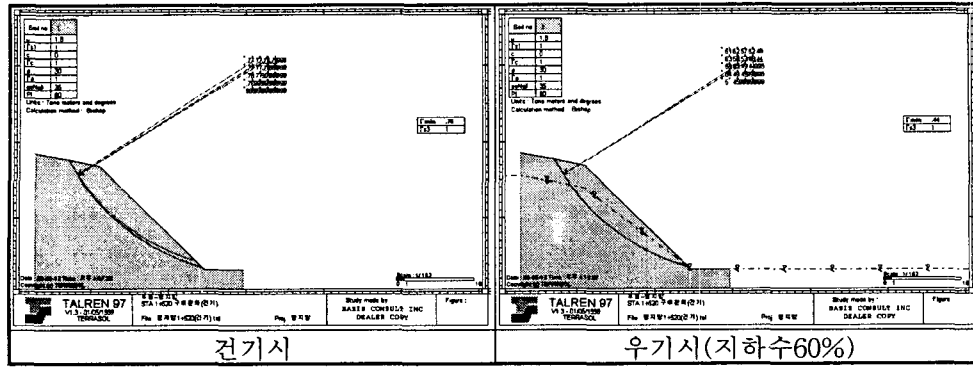


그림 1. 한계평형을 이용한 사면안정 해석결과

표 7. TALREN 97을 이용한 해석결과

지하수조건		안전율	안전여부
건기		0.76	N.G
우기	60%	0.44	N.G

4.2 암반사면의 안정성 해석

4.2.1 평사투영해석

본 연구대상사면의 사면방향은 각각 $60^\circ/294^\circ$ (Dip/Dip Direction), $45^\circ/90^\circ$ (Dip/Dip Direction)이고, 절취면 각도는 1:0.8로 이루어져 있다.

절리의 방향성에 의한 사면분석결과 사면의 주절리군을 나타내는 Pole Density가 Daylight Envelope 내에 분포하고 있지 않으며, 주절리군의 방향성이 각각 NE와 NW로 구분되어 분포된 것으로 조사되었다. 조사된 절리에 대한 평사투영해석결과 사면의 파괴형태는 평면파괴와 썩기파괴에 대한 가능성이 있는 것으로 판단되며, 평면파괴는 아주 국부적인 파괴 양상을 보이므로 안정성 해석을 수행하지 않았다. 평사투영해석결과 위험한 썩기파괴에 대한 구체적인 안전율을 추정하기 위해 본 연구에서는 SWEDGE 프로그램을 활용한 안정성 검토를 수행하였다.(그림 2 참조)

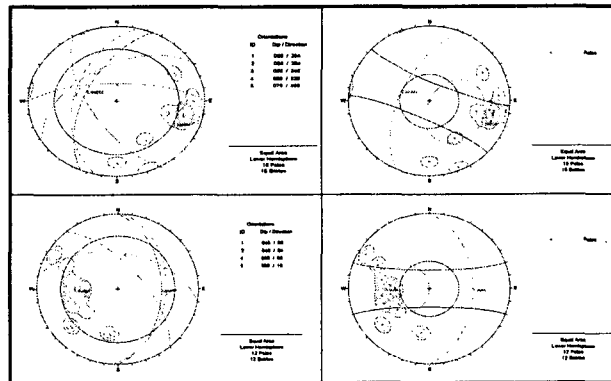


그림 2. 평사투영법에 의한 사면안정해석

4.2.2 SWEDGE 프로그램을 이용한 썩기블럭에 대한 해석

본 사면의 경우 절리가 사면에 많이 발생한 상태이며, 평사투영해석결과 현재 구배인 1:0.8에서는 조사된 대부분의 절리면에서 썩기파괴 가능성이 있는 것으로 나타났다. 사면 구배를 1:1.0으로 할 경우 썩기파괴는 2지점에서 발생한 것으로 나타났고, SWEDGE 프로그램을 이용하여 이 지점에 대한 썩기파괴 안정성을 분석하였다. 단 Wedge의 높이인 15m, 30m로 제한하였고, 점착력과 마찰각은 각각 $c=0.5$, $\phi=35^\circ$ 를 적용하였다. 그리고, 현장에서 조사한 절리면의 방향을 이용하여 썩기의 형상을 표현하였다(그림 3 참조).

표 8. 조사위치의 절리현황

SITE	SLOPE		수직절리(1)		수직절리(2)	
	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction	Dip	Dip Direction
1	45	294	38	316	60	0
2	45	294	36	274	58	20
3	45	294	38	282	88	44
4	45	90	58	68	30	142
5	45	90	32	50	72	124

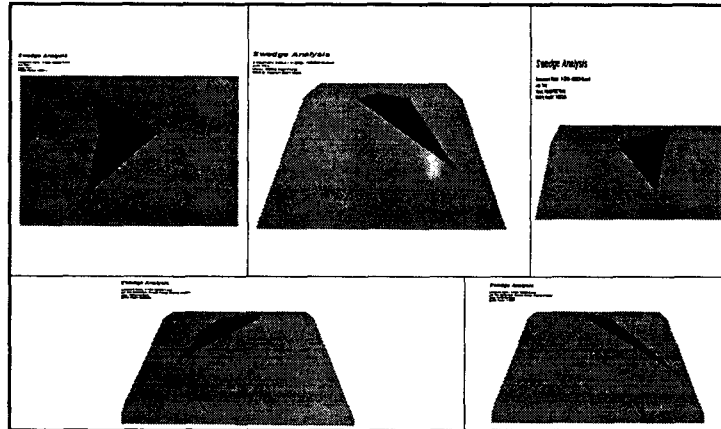


그림 3. 썩기형상

본 사면의 썩기파괴에 대한 안정성 분석은 tension crack이 발생하지 않는 조건으로 해석하고 사면에 대한 지하수 조건은 건기시에는 0%, 우기시에는 60%를 적용하였다. wedge 안전율을 계산한 결과는 <표 9>와 같다.

표 9. SWEDGE 해석결과

Site	지하수조건		안전율	안전여부
1	건기		1.539	O.K
	우기	60%	1.055	N.G
2	건기		0.911	N.G
	우기	60%	0.396	N.G
3	건기		1.502	O.K
	우기	60%	1.181	N.G
4	건기		1.244	N.G
	우기	60%	0.657	N.G
5	건기		1.121	N.G
	우기	60%	0.483	N.G

5. 보강대책안 분석

5.1 한계평형을 이용한 분석

본 토사사면의 구배를 1:1.0으로 하여 안정성을 수행하였다. 그러나 구배가 1:1.0일 때도 기준최소안전율을 만족하지 못하였다. 또한 현장 특성상 더 이상의 구배완화는 대규모 절취면이 발생하게 되므로 Soil Nailing등의 보강공법을 적용하여 토사사면의 원호활동해석을 수행한 결과, 건기시 안전율 1.57, 우기시 안전율 1.2로 나타나 기준안전율을 만족하는 것으로 계산되었다.(그림 4 참조)

따라서, 토사사면의 보강방법으로는 안정해석에 적용한 Soil Nailing공법과 그 밖에 FRP사면보강 Grouting공법 등이 적합하며, 이들 보강후 친환경적이고 미관을 고려하여 표면보호공(텍솔보호공, 녹생토 등)으로 보강하는 것이 필요하다.

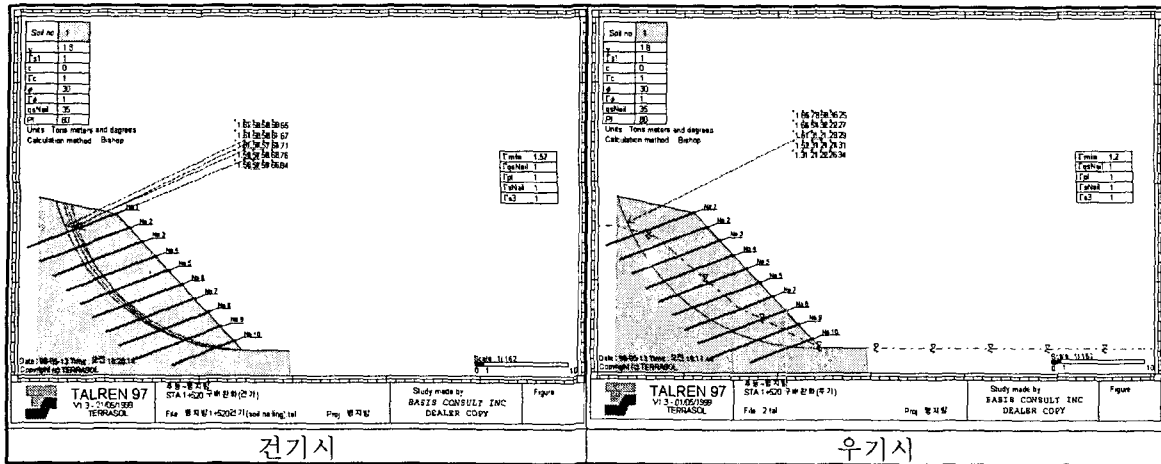


그림 4. 대표단면 보강 후 해석결과

5.2 SWEDGE 분석

본 연구대상 암반사면에 대한 안정성 분석은 tension crack이 발생하지 않는 조건으로 보고 모든 사면에 대해서 지하수조건을 건기시(0%), 우기시(60%)에 대해 분석하였다. 따라서, 본 검토에서는 대표적으로 Rock bolt에 대해서 검토하였다. 사면의 보강용으로 사용되는 Rock Bolt의 경우 D25mm(SD40) 강봉을 사용하였으며, 강봉의 항복강도는 $4000 \times \frac{\pi \times 2.5^2}{4} = 19.634\text{ton}$, 허용강도는 $2000 \times \frac{\pi \times 2.5^2}{4} = 9.817\text{ton}$ 이다. 또한 Rock bolt가 9.817ton의 허용축력을 안전하게 받기 위해서는 충분한 정착길이를 확보해야 한다.

정착길이, $L = \frac{F \cdot S \times P_u}{(\pi \cdot d) \times \tau_u} = \frac{1.5 \times 9.817}{(\pi \cdot 5.0) \times 6} \approx 156\text{cm}$, [Where, P_u = Rock Bolt 1개의 항복강도, 9.817ton, d = Rock Bolt의 지름, 50mm, τ_u = 주면마찰저항 6kgf/cm²]

표 10. 앵커체의 주면마찰저항

지반의 종류		주면마찰저항(kgf/cm ²)	
암반	경 압	15~25	
	연 압	10~15	
	풍화암	6~10	
	이 암	6~12	
사력	N치	10	1.0~2.0
		20	1.7~2.5
		30	2.5~3.5
		40	3.5~4.5
		50	4.5~7.0
모래	N치	10	1.0~1.4
		20	1.8~2.2
		30	2.3~2.7
		40	2.9~3.5
		50	3.0~4.0
점성토		1.0c(c는 점착력)	

표 11. Rock bolt 보강 후 해석결과

Site	지하수조건	안전율		안전여부
		보강전	보강후	
1	건기	1.539	1.695	O.K
	우기 60%	1.055	1.202	O.K
2	건기	0.911	1.82	O.K
	우기 60%	0.396	1.208	O.K
3	건기	1.502	1.52	O.K
	우기 60%	1.181	1.201	O.K
4	건기	1.244	1.92	O.K
	우기 60%	0.657	1.209	O.K
5	건기	1.121	2.022	O.K
	우기 60%	0.483	1.208	O.K

사면의 안정성 확보를 위해 강봉의 허용강도 및 Rock Bolt의 충분한 정착길이를 적용하여 우기시 사면 높이의 60%지하수위를 기준으로 2×2(가로(m)×세로(m)) 간격으로 Rock Bolt를 보강하였을 경우 적용기준안전율을 만족시켰다. 또한, Rock bolt 보강지역은 암반사면 전 구간에 걸쳐 2×2(가로(m)×세로(m)) 간격으로 보강되어야 할 것으로 판단된다.

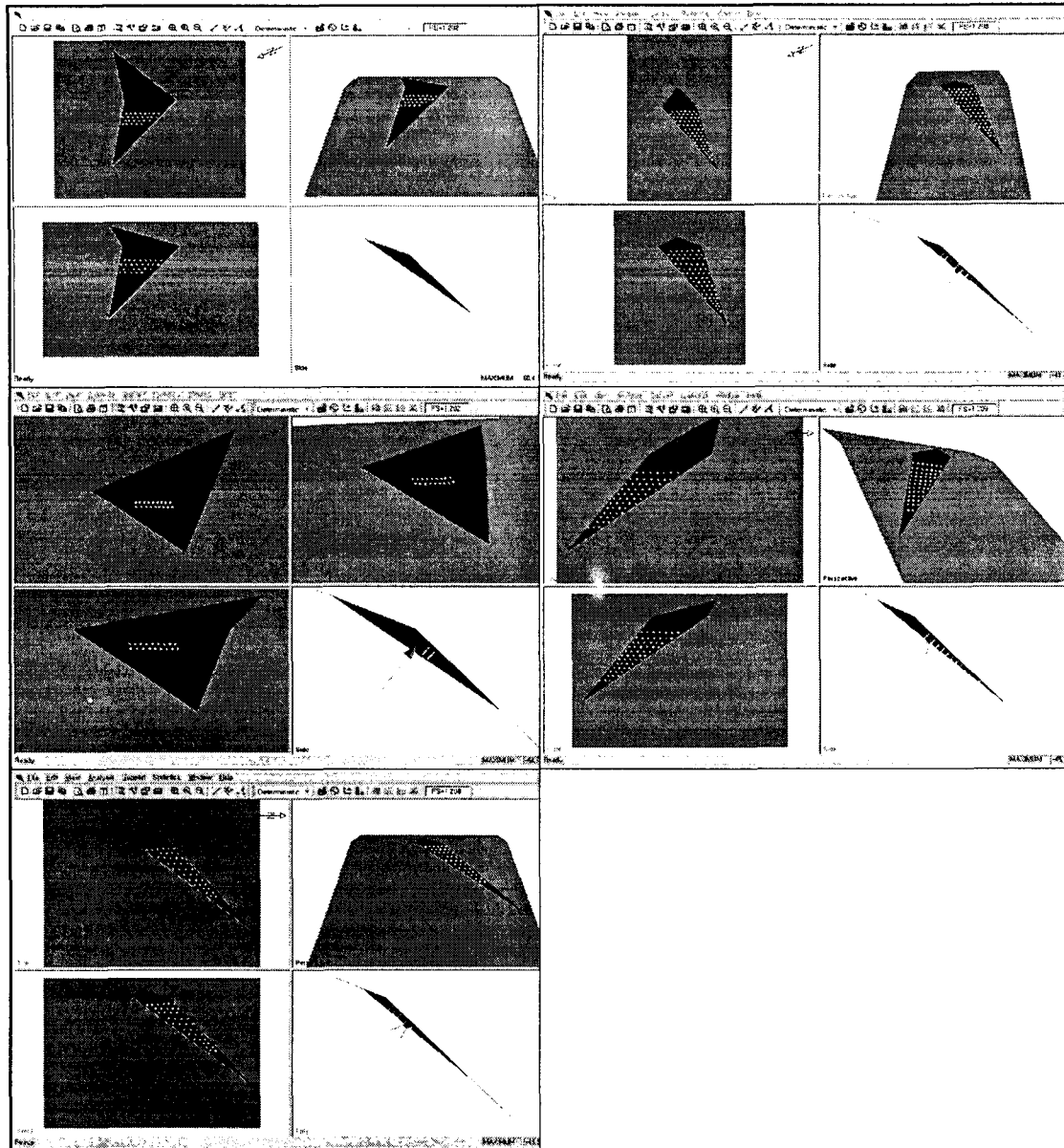


그림 5. SWEDGE에서의 Rock bolt보강 현황(SITE 1~5)

6. 결 론

본 연구대상지역인 강원도 횡성군 갑천면 추동~병지방 도로확·포장공사 구간 중 암반사면과 토사사면에 대한 안정성 분석과 사면처리 방안에 대한 연구를 수행하였으며, 이에 따른 보강대책 및 연구결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1. 암반사면에 대한 지표지질조사를 수행한 후 절리면의 방향과 경사를 이용하여 평사투영해석을 실시하였으며, 평사투영 결과 쉐기과괴에 대한 안정성 분석이 필요하였다.
2. 암반사면에 대한 쉐기블럭 분석 결과 기준안전율(건기시 :F.S≥1.5, 우기시 : F.S≥1.2)에 미달하였다.
3. 불안한 암반사면에 대해서는 우기시 지하수위가 사면높이의 60%일 때를 기준으로 하여 Rock bolt보강을 하여 사면의 안정성을 검토한 결과 기준안전율을 만족한 것으로 나타났다.
4. 암반사면에 2×2(가로(m))×세로(m))간격으로 Rock Bolt보강을 실시하였을 때 안정성이 확보된 것으로 나타났으며, 낙석 방지책과 낙석 방지망 등의 낙석에 대한 안전시설이 필요하다.
5. 토사사면은 TALREN 97프로그램을 이용한 토사사면에 대한 안정성 검토를 수행한 결과 안전율이 건기시 0.76과 우기시 0.66으로 매우 불안한 것으로 나타났다.

6. 이는 기준안전율에 만족하지 못하여 불안정한 사면이므로 대표적으로 Soil nailing공법을 적용하여 보강한 후 재해석한 결과 기준안전율을 만족하였다.
7. 사면 표면보호를 위하여 텍솔녹생토공법 및 일반녹생토공법을 적용도 적절한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 상지대학교(2002), 지경~김화간 도로확장 및 포장공사 대절토부 사면안정 검토연구
2. 상지대학교(2002), 추동~병지방간 도로확장 및 포장공사 대절토부 사면안정 검토 보고서
3. 정형식, 이승호, 황영철(1999), "암반역학(Rock Mechanics)", 새롬출판사, pp.375~442
4. 정형식, 이승호, 유병옥, 황영철(1999), "절개사면의 안정성평가를 위한 점검항목 제안", 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회, pp.88~97
5. 이승호, 황영철, 이재기, 지영환, 심정훈(2002), "강원도 산악도로 절개사면의 파괴특성 분류에 관한 연구", 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회, pp. 111~120
6. 한국도로공사(1992), 제2권 토공 및 배수, 도로설계 요령
7. 한국도로공사(1996), 토질 및 기초, 도로설계실무편람
8. Braja M. Das, 모래질 흙에 대한 분류기호, 토질역학, 사이텍미디어, pp. 101