

터널갱구부 붕괴사면의 안정성해석 및 보강대책 사례연구

민경남, 윤진오, 이태선(대원토질)
고광태 (평화엔지니어링)
임대환 (두산산업개발)

1. 서론

터널 갱구부 사면에 대한 연구는 국내에서도 터널 설계와 병행하여 활발히 진행되고 있으며(구호본, 2002, 한국건설기술연구원), 붕괴사고도 적지 않게 보고 되고 있다.

본 연구지역은 도로확장 구간에 형성된 터널갱구사면으로 2004년 장마시의 집중강우로 토사 및 풍화암의 경계부를 따라 인장균열이 형성되면서 사면파괴활동이 시작되었다. 이후 Rock Bolt 보강공법을 적용하였고 터널 굴착을 위한 강관다단그라우팅을 시공하였으나 주변에 인장균열의 발생이 확인되는 등 추가 붕괴의 징후가 감지되어 사면의 안정성을 검토하였다.

일반적으로 Rock Bolt 및 강관다단공법이 적용된 터널 갱구사면에서 사면의 붕괴는 조사 및 대책공법 선정에 제약이 많다. 본 사례는 붕괴된 터널 갱구부 사면을 대상으로 현장조사를 실시하여 붕괴원인을 밝히고 이를 근거로 하여 안정성 해석과 영구적인 대책공법 제시를 목적으로 하여 시도되었다. 시공중인 터널 갱구사면의 검토사례는 많지 않은 실정이나 터널사면의 특이성과 시공의 특수성을 감안하여 대책방안을 수립하였다.

2. 지질 및 붕괴현황

2.1. 지질

조사지역은 충북 영동군 학산면 일대로 본 구간의 광역지질은 남동변에 북동주향의 영동단층이 영남육괴의 편마암류 기반암과 접하고 있으며, 북서부는 옥천계 변성암류가 분포하고 있어 조사지역 일대를 중심으로 좌우의 지질시대가 크게 다르다(그림 1).

산계는 노선을 중심으로 성주산(623.9m), 칠봉산(520.9m), 백하산(633.9m)이 둘러싸고 있다. 붕괴구간은 지형적으로 칠봉산과 백하산 사이의 계곡지역 집수지형에 위치하고 있다.

조사지역의 지질은 시대미상의 화강편마암 및 편마암류가 광범위하게 분포하고 있으며, 이를 백악기의 석영반암이 관입하였다. 노선 주위에는 변성퇴적암류, 반상화강암류 및 편암, 편마암류가 분포하며 이를 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 특히 화강편마암 및 편마암류는 단층과 관입작용에 의해 복잡한 지질구조를 가지고 있으며 지표면까지 파쇄대가 형성되어 있다. 붕괴구간은 화강편마암 및 화강암질암으로 구성되어 있으며 심하게 풍화를 받은 불연속면에 의해 썩기파괴가 발생하였다. 불연속면들의 방향은 사면의 방향과 직각을 이루고 있으며 경사는 75~90°로 고각을 이루고 있다.

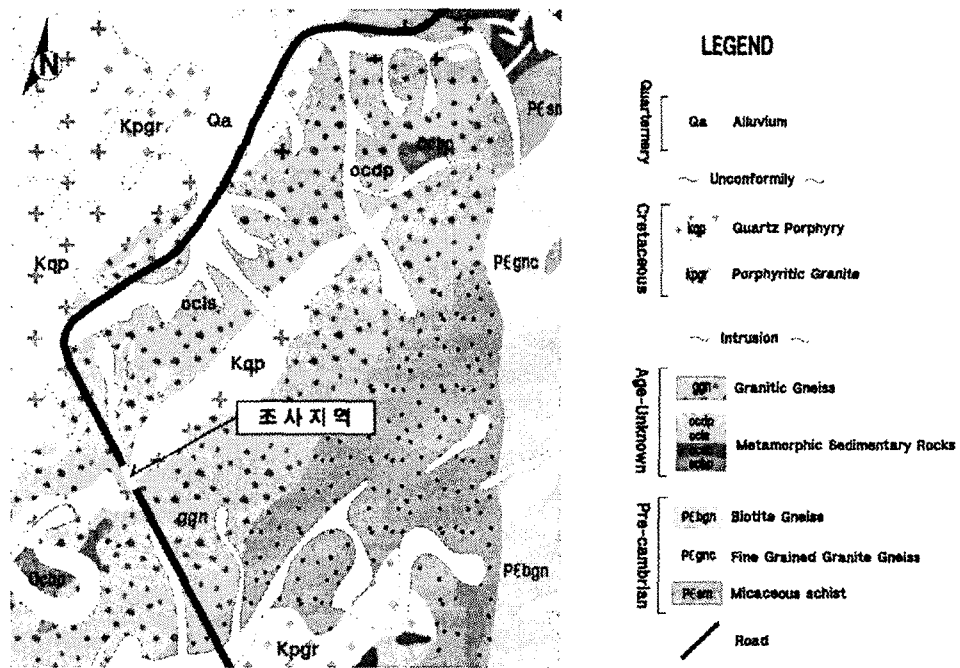


그림 1. 지질도(영동도폭, 한국지질자원연구원)

2.2. 붕괴현황

붕괴구간은 절취 직후 2004년 7월 장마시에 썩기형태로 발생하였다. 이후 전면부에 Rock Bolt와 Shotcrete가 설치되었고 터널굴착을 위한 강관다단그라우팅이 시공되었으나 터널정면부의 매립경계에서 슬라이딩이 다시 발생하였으며 배면 내에서도 인장균열이 계속 진행되어 현재 지반자립이 어려운 상태에 있다(그림 2, 3).

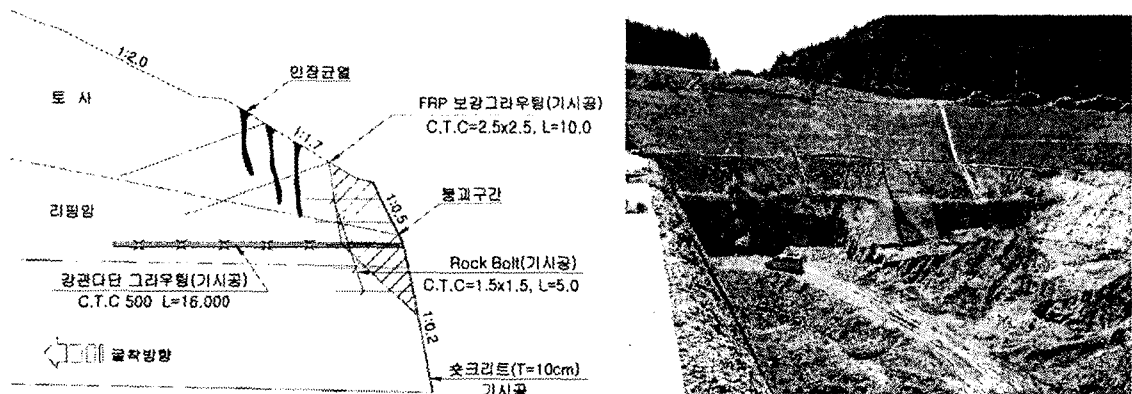


그림 2. 붕괴단면 및 현장전경

Rock Bolt는 일반적인 경향에 비해 짧게 설치되었으며 타입각은 수평으로 타입되어, 강우시에 불연속면을 따라 유동하는 지하수의 공극수압이 Rock Bolt와 Shotcrete의 보강효과를 감소시킨 것으로 판단된다. 붕괴현황을 요약하면 (표 1)과 같다.

표 1. 붕괴현황

구 분		상행방향	하행방향
사 면 현 황	절개면 특성	매립, 풍화암	매립, 풍화암
	기울기	1: 0.5(63°), 1: 0.2(79°)	1: 0.3(73°)
	방향 / 높이	N80E / 19m	N80E / 19m
지 질	암종	화강편마암	화강암질암, 화강편마암
	주불연속면	엽리 및 절리, 단층	엽리 및 절리, 단층
	풍화정도	심한풍화	심한풍화
	지형	계곡부	계곡부
수 리 조 건	함수상태	습함	습함
	지하수	Flowing	Dripping
붕 괴 이 력	규모	연장: 6m, 부피: 30m³	
	파괴형태	쇄기 및 인장균열	천층파괴
	붕괴시기	2004. 7	
시 공 현 황	Rock Bolt	C.T.C : 1.5×1.5m L : 5m Angle : 수평	
	강관다단그라우팅	C.T.C : 0.5×0.5m L : 16m Angle : 수평	
	Shotcrete	10cm	10cm
특 이 사 항		유기물 협재	유기물 협재

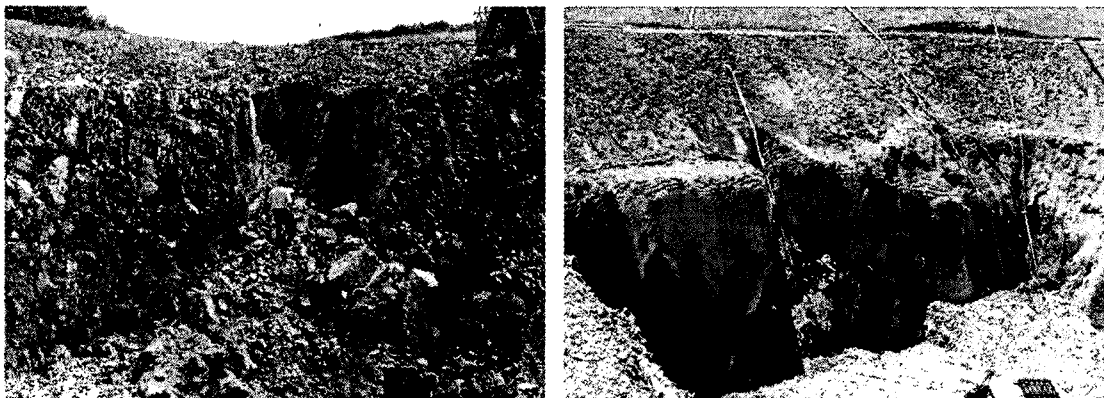


그림 3. 상행방향 붕괴 직후(좌)와 Rock Bolt, 강관다단 시공 후(우) 전경

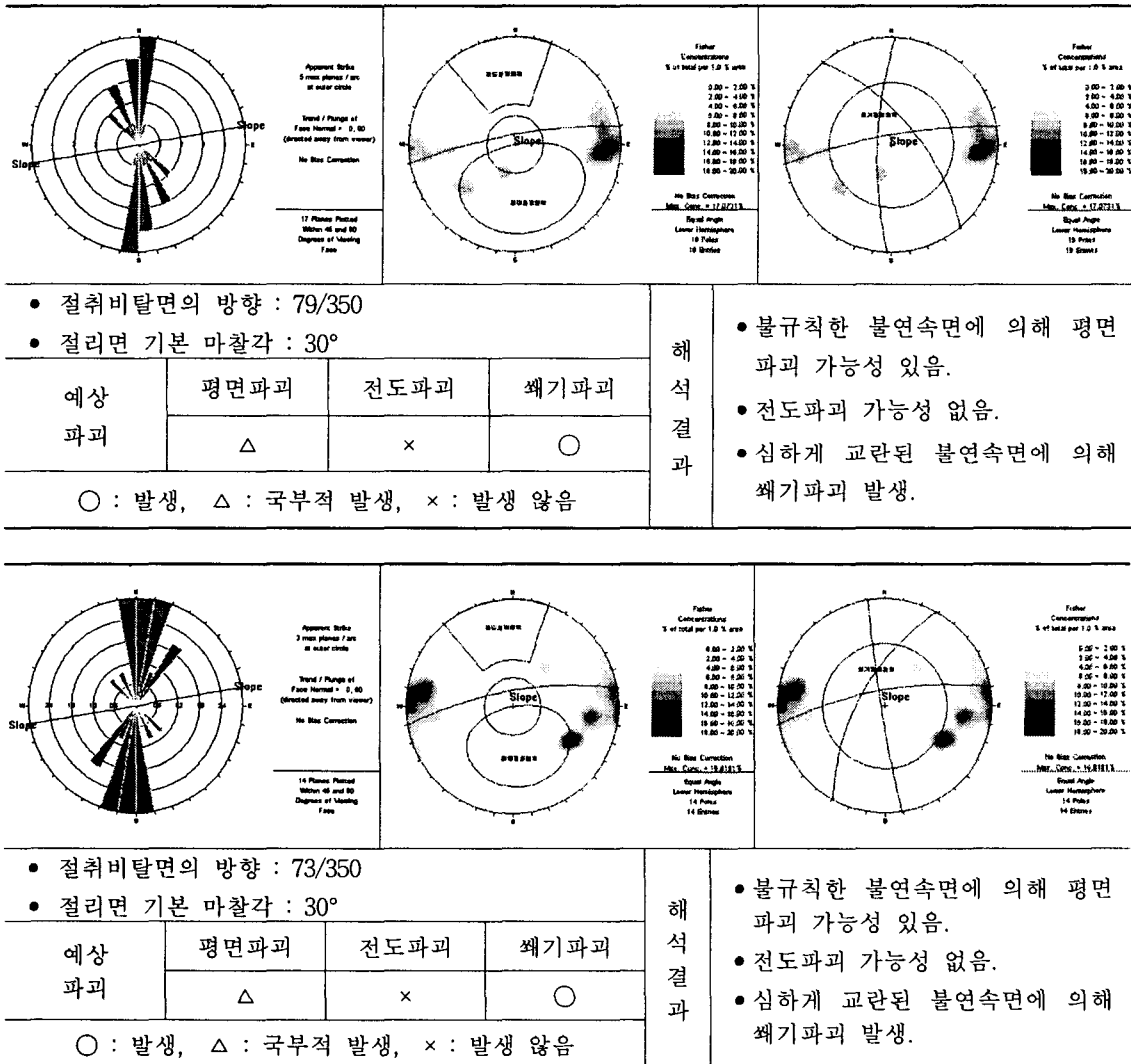
3. 현장조사

3.1. 지표지질조사

본 지역 암반사면의 안정성은 불연속면에 의해 크게 좌우되기 때문에 불연속면의 특성을 파악하기 위해 ISRM(1978b)에 제시된 기준에 의거하여 조사선조사를 수행하였다.

불연속면은 간격이 짧고 반복적으로 나타나며, 연장이 길어 사면안정에 아주 불리하게 작용하고 있다(표 2). 이들 불연속면의 빈도는 평균 20~30개/m 내외로 분포하는데 불연속면의 빈도가 높아지면 지하수에 의한 암반의 풍화가 집중되어 절리 내에 점토광물이 많이 형성되는 것으로 알려져 있다. 또한 불연속면의 상태는 대부분이 심하게 풍화되어 open 되어 있는 상태로 투수성질리로 작용하고 있다. 슈미트햄머에 의한 일축강도는 평균 250kgf/cm²로 풍화암이하의 강도분포를 보인다.

표 2. 상행방향(상), 하행방향(하) 평사투영 결과



대부분의 불연속면은 단층과 관입 등의 지질구조작용으로 균열이 심하며 풍화가 내부 깊숙이 진행되어 공극율이 크게 나타난다. 일반적으로 암석내의 공극은 상호 연결되어 지하수의 유동에 큰 영향을 미치며 공극수압이 작용되어 강도가 저하되기도 하며 풍화가 진행됨에 따라 최대 20%까지 공극률이 증가하는 것으로 알려져 있다(그림 4).

조사지역은 적어도 2회 이상의 단층작용이 발생된 것으로 인지된다. 절취면 주변 엽리면의 방향이 교란되어 있는 것은 후기 변성작용 동안에 형성된 단층작용에 의한 것으로 판단되며 그 시기에 따라 강도와 운동량이 변한 것으로 추정된다(그림 5). 편마구조(Gneissosity)인 엽리는 전 구간에서 발달하는 가장 중요한 면구조로 굴진방향과 일치하는 불연속면 N16W 84NE와 사교하고 있다.

조사지역은 지형적으로 계곡부에 위치하여 집수면적이 크며, 배면에 위치하는 매립층은 투수성이 뛰어나 굴착면에 상당량의 지하수를 유출시키고 있다. 이미 설치된 수평배수공에서 배출되는 지하수량은 1개의 배수공에서 최대 20 l/min으로 하루평균 10~15ton이 배출되어 지하수가 본 사면에서 가장 큰 불안정요인으로 작용하고 있다(그림 6).

터널 직상부 배면에 분포하는 매립층은 강자갈 규모의 사력층으로 구성되어 있다. 사면파괴 후 매립층에서 폭 5~10cm의 인장균열 5매가 진행되어 침투수의 유입을 더욱 가속화 시키고 있다(그림 7).



그림 4. 절리 및 균열이 발달한 풍화암

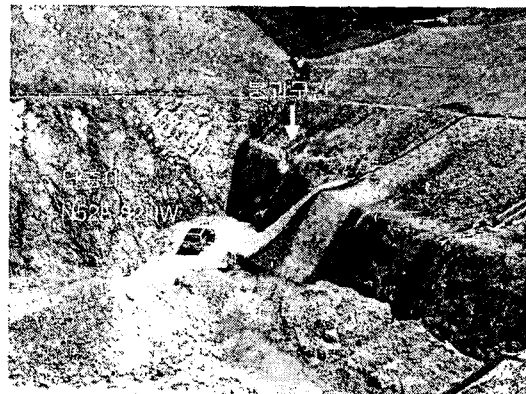


그림 5. 상행방향 단층대



그림 6. 수평배수공을 통한 지하수 유출



그림 7. 배면내 인장균열

3.2. 전기비저항탐사

지표지질조사 결과를 토대로 풍화대의 위치 및 심도를 분석하고, 단층대의 폭, 심도, 연장 등을 확인하기 위하여 전기비저항 탐사를 수행하였다.

탐사결과 전반적으로 풍화대의 심도가 10~15m의 두께로 분포하는 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 지표지질조사 결과와 일치하는데 기반암을 구성하는 화강편마암의 수평적, 수직적 인 차별풍화의 양상에 따른 절리와 균열에 기인한 것으로 판단된다.

측선 Sta.9+760~9+780 사이에 두께 4~5m의 고비저항대가 지표면 하 약 2~3m 지점에 분포하고 있다. 이는 풍화암과 매립층의 경계에 퇴적된 나뭇가지 등에 의한 유기물로 풍화대에 비해 상대적인 고비저항대를 보이는 것으로 추정된다.

지표지질조사 및 시추조사와 비교하였을 때 저비저항대는 매립층과 풍화대로 구분된다. 붕괴와 연관된 주불연속면 N16W 84NE 방향은 연장이 양호한 불연속면이 지중까지 연속되어 상대적으로 낮은 저비저항 분포대가 깊은 심도에서도 발달한 것으로 판단되며 이는 시추코아의 풍화대 심도와 전기비저항탐사와 일치하는 경향을 보이고 있다(그림 8).

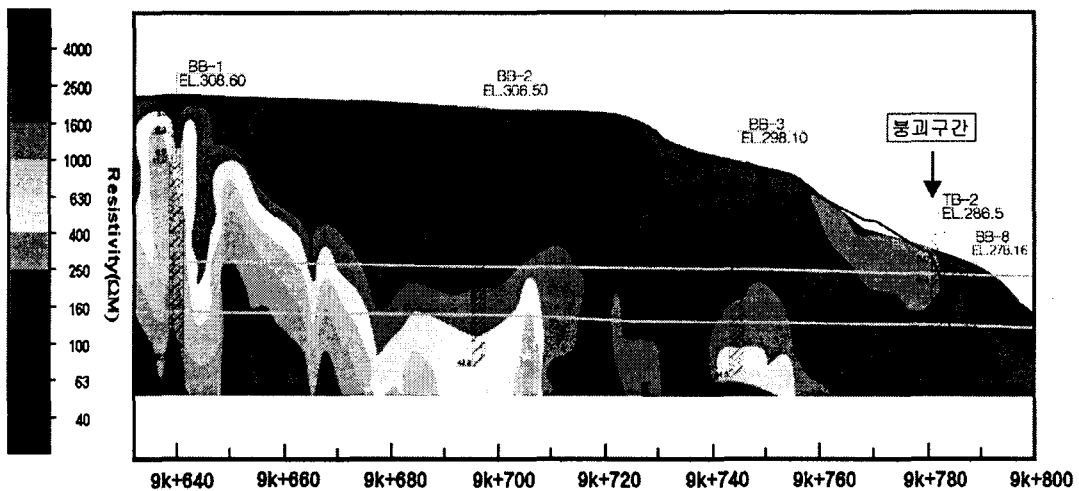


그림 8. 전기비저항탐사 결과

3.3. 확인시추조사

지층의 분포상태 및 기반암에 발달한 불연속면의 수직적인 분포특성을 확인하기 위하여 NX 규격으로 시추조사를 실시하였다(표 3). 기반암의 상부는 지층의 기복이 상당히 심하여 풍화가 진행된 양상이 매우 불규칙하며 대부분 절리 및 균열이 발달하고 있다. 파쇄대는 주로 풍화암층에서 나타나며 점토가 일부 구간에서 협재되기도 한다.

시추코아를 확인한 결과, 풍화가 상당히 진행되어 코아회수율이 저조하다. 대부분 약한 엽리면을 따라 쪼개짐이 발달하고 암질상태가 극히 불량하여 공학적으로 불안정한 상태에 있다. 특히 엽리면과 교차하는 절리군은 더욱 파쇄되어 있다.

절리의 빈도는 일반적으로 심도에 따라 감소하는 것으로 알려져 있다. 그러나 연구지역에서는 그러한 일반적인 경향성을 보이지 않는다. TB-2번 시추코아는 심하게 변질되어 시간이 경

과할수록 열화되어 강도가 떨어지는 특성을 보이고 있는데 이러한 현상은 하부로 가면서 심화되고 있다. 이러한 결과는 N52E 82NW 방향의 단층에 의한 영향으로 판단된다.

표 3. 확인시추조사 결과

(GL. 0.0m 기준)

공번	지층명	심도 (m)	층후 (m)	TCR	RQD	지하수위 (GL -m)
TB-2 (상행방향)	매립층 풍화암	0.0 ~ 5.0	5.0	18 ~ 48	0 ~ 8	6.4
		5.0 ~ 17.0	12.0			
TB-3 (하행방향)	매립층 풍화토 풍화암	0.0 ~ 0.7	0.7	5 ~ 18	0	2.0
		0.7 ~ 4.0	3.3			
		4.0 ~ 10.0	6.0			

3.4. 붕괴원인 분석

붕괴는 2004년 7월 장마철에 발생하였다. 파괴활동은 1:0.2로 절취된 터널 직상부의 풍화암 부분과 매립층구간에서 발생하였다. 파괴원인은 수직연장이 길고 간격이 좁은 불연속면을 따라 풍화가 내부 깊숙이 진행되어 있는 상태에서 1:0.2의 급경사로 절취되어, 절취비탈면에 수직방향으로 발달하는 절리군이 파괴가 발생할 수 있는 조건을 제공한 것으로 판단된다.

이후 집중호우 시에 지표수 및 지하수의 침투가 가속화되어 풍화암내의 점토충진물 및 절리면을 중심으로 전단저항강도가 저하되어, 약한 부분부터 점이적으로 파괴되면서 상부까지 활동한 것으로 판단된다. 특히 암질불량에 따른 강우시 지표수 침투 및 지하수압의 상승이 파괴활동을 가속화 시킨 것으로 사료된다.

활동이 일어난 후에도 구간 주변에 인장균열이 진행되어 추가로 파괴활동의 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다.

4. 사면안정대책

대책공법 수립시 고려해야할 사항으로 먼저 사면의 안정성 확보가 급선무이나 이외에도 현장여건에 따른 시공성 및 적용이 용이한 대책공법 선정이 이루어져야 한다. 따라서 본 검토에서는 시공성 및 안정성 측면에 중점을 두고 효율적인 대책공법을 수립하였다.

사면안정대책은 이미 붕괴가 발생하여 지반이 교란되어 있는 점과 기시공된 Rock Bolt, 강관다단그라우팅과의 간섭 등으로 대책공법의 설정이 용이하지 않는 실정이다.

대책공법은 이완영역의 활동역지와 터널굴착시의 진동에도 적극적 대처가 가능한 FRP 보강그라우팅과 Rock Anchor 공법을 선정하였다. 경사완화공법이나 가시설, 압성토 공법 등은 현장여건을 고려하여 검토에서 배제하였다.

4.1. 보강대책 검토

FRP 보강그라우팅공법은 매립층에서 암반까지 적용이 가능하다. 특히, 균열 및 절리 등이 발달한 지반에 적용이 뛰어나며, Nailing 효과와 주입재에 의해 원지반의 간극을 충전시켜 간극을 채움과 동시에 토립자를 상호 접촉시켜 전단강도 증가를 동시에 확보할 수 있어 본 현장에 적합하리라 판단된다(그림 9).

본 현장은 지반자체의 공극이 크고 상당부분 이완되어 토립자의 간극을 충전하지 않고는 안정성을 확보할 수 없다. 이러한 점을 감안하여 FRP 보강그라우팅시 실제 주입량은 설계주입량에 따른 정량주입보다는 압력이 상승할 때까지 주입하는 정압주입으로 주입관리를 수립하였다.

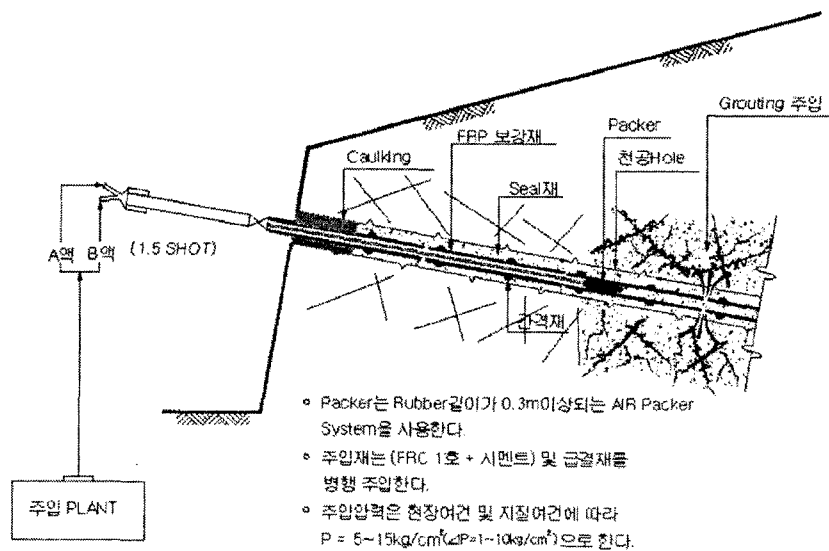


그림 9. FRP파이프와 다단그라우팅 장치를 이용한 사면보강공법

그러나 붕괴구간이나 인장균열이 발생하여 이미 이완된 영역에서는 그라우팅에 의해 일체화된 지반을 강력한 인장력으로 압축시킴으로서 붕괴억지 효과에 대한 정량적 판단이 확실한 Rock Anchor 공법의 적용이 전체적인 사면의 안정성을 확보할 수 있을 것이라 사료된다.

앵커체는 불균질한 지반특성을 고려하여 정착지반에 극단적인 집중하중을 주지 않는 하중 분산형 타입의 앵커체를 선정하였으며 인장력의 저하를 방지하기 위해 정착장 그라우팅시 앵커패커를 제작하여 충분한 인장력을 발휘할 수 있도록 정착부에 가압그라우팅을 실시하였다. 붕괴부는 Rock Anchor 인장시에 비대칭하중을 받지 않도록 붕괴부 뒷채움을 실시하여 앵커력을 확보하였고 수압판은 현장타설로 전면판을 설치하였다.

또한 검토구간은 지하수유출이 심각하여 사면안정에 심각한 위해요인으로 작용하고 있다. 이에 수평배수공을 설치하여 지하수의 유도배수와 지반내 간극수압을 감소시켰다.

4.2. 보강대책 결과

검토는 한계평형상태에서 지반과피면을 고려하여 검토하는 Talren 97을 사용하였다.

해석시 지층조건은 물리탐사와 시추조사결과를 토대로 현장에서 확인된 지질특성을 고려하여 적용하였으며 지하수위는 지표면으로 결정하였다.

기시공된 강관다단그라우팅과의 간섭을 고려하여 설치각도는 하향 5°로 조정하였다. 적용된 보강재의 제원은 (표 4)와 같으며, 검토결과 건기시 $F_s=2.28$, 우기시 $F_s=1.20$ 으로 기준안전을 1.5, 1.2에 부합하는 것으로 나타났다(그림 10).

표 4. 보강재 제원

보강공법	설치간격(m) (수직×수평)	설치길이 (m)	설치각도 (°)	비 고
FRP 보강그라우팅	1.5 × 1.5	10.0	하향 5	전면부
		14.0	하향 20	배면부
Rock Anchor	3.0 × 3.0	정착장 5.0m 자유장 8.0m	하향 5	67.3ton (Strand Φ12.7mm× 6ea)
Anchor 수압판	수평간격 3.0			2.0×2.0×0.4
수평배수공	수평간격 = 5m, 10m	16, 20, 24	상향 5	

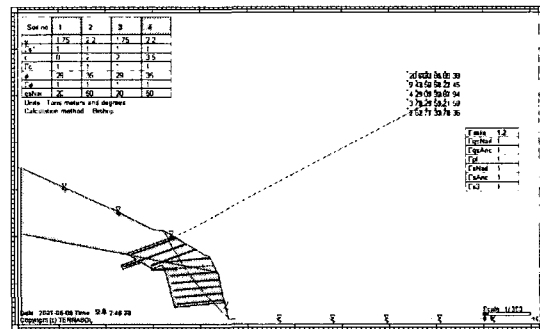
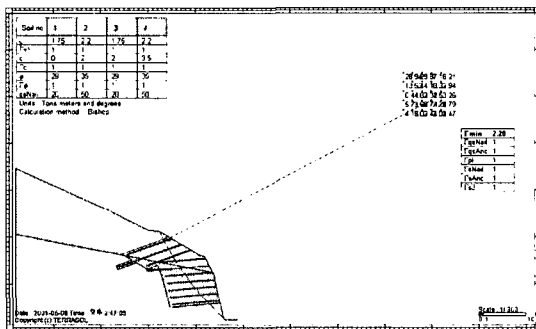


그림 10. 한계평형해석 결과

안정성해석을 토대로 현장에 적용된 FRP 보강그라우팅 + Rock Anchor 공법의 보강단면도와 전개도는 (그림 11, 12)와 같다.

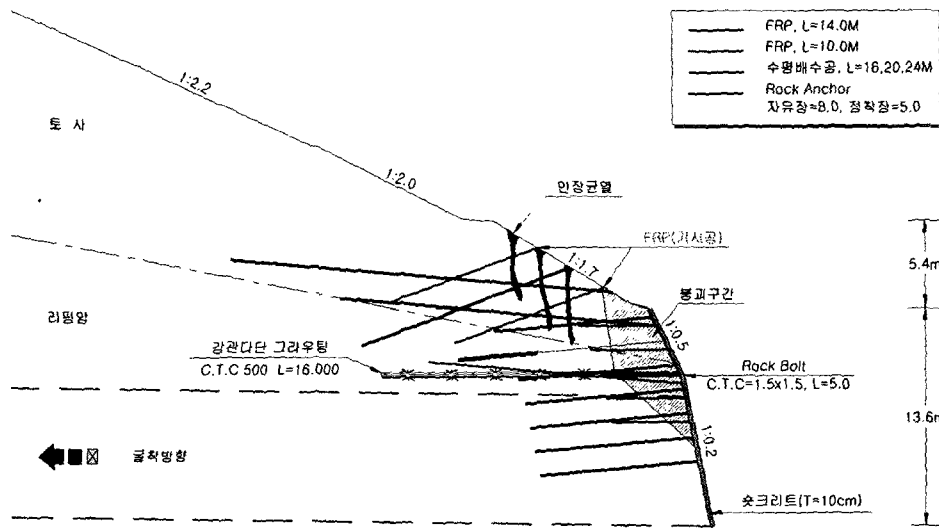


그림 11. FRP + Rock Anchor 보강단면도

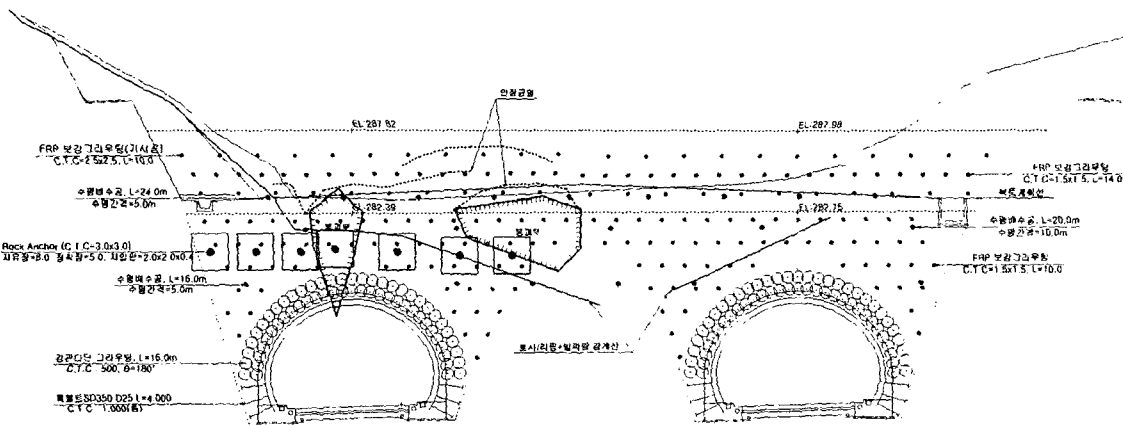


그림 12. 갱구사면 보강전개도

5. 고찰 및 결론

시공중인 터널 갱구사면에서 사면의 붕괴는 조사 및 대책공법 선정에 제약이 많다. 본 사례 연구는 붕괴된 터널 갱구부 사면을 대상으로 현장조사를 근거로 하여 안정성 해석과 영구적인 대책공법 제시를 목적으로 하여 시도되었다.

시공중인 터널 갱구사면의 검토사례는 많지 않은 실정이나 터널사면의 특이성과 시공의 특수성을 감안하여 대책방안을 수립하였다.

1) 붕괴원인은 수직연장이 길고 간격이 좁은 불연속면을 따라 풍화가 내부 깊숙이 진행되어 있는 상태에서 1:0.2의 급경사로 절취되어, 파괴활동 조건을 제공하였다. 이후 집중호우시에 지

표수 및 지하수의 침투가 가속화되어 풍화암내의 점토충진물 및 절리면을 중심으로 전단저항 강도가 저하되어, 약한 부분부터 점이적으로 파괴되면서 상부까지 활동한 것으로 판단된다. 특히 암질불량에 따른 강우시 지표수 침투 및 지하수압의 상승이 파괴활동을 가속화 시킨 것으로 사료된다.

2) 사면안정대책은 이미 붕괴가 발생하여 지반이 교란되어 있는 점과 기시공된 Rock Bolt, 강관다단그라우팅과의 간섭 등으로 대책공법의 설정이 용이하지 않는 실정이다.

대책공법은 보강재에 의한 억지효과 뿐만 아니라 보강재가 설치된 주변지반의 공극 및 불연속면에 주입재를 충전시켜 간극을 채움과 동시에 토립자를 상호 접촉시켜 전단강도 증가를 동시에 확보할 수 있는 FRP 보강그라우팅공법을 적용하였다. 이미 이완된 영역에서는 그라우팅에 의해 일체화된 지반을 강력한 인장력으로 압축시킴으로서 붕괴억지 효과에 대한 정량적 판단이 확실한 Rock Anchor 공법을 병행시공하여 전체적인 사면의 안정성을 확보하였다.

3) 보강공법시 천공각은 기시공된 Rock Bolt와 강관다단과의 간섭을 고려하여 하향 5°로 설정하였다. 주입량은 기존의 문헌에 의한 설계주입량보다는 현장지반을 반영하여 주입율을 결정하여 효율적인 사면보강을 실시하였다. 그러나 터널직상부의 높이가 5.0m 내외로 터널굴착 중 발생할 수 있는 진동이나 절취로 인한 개별암석블록들의 역학적인 거동 및 지하수유출에 의한 안전성 검토는 앞으로 풀어야 할 과제라 생각한다.

참고문헌

1. 이수근, 1994. 암석과 불연속면의 분류 및 공학적 특성, 토목시공 고등기술강좌 (series III), 대한토목학회, PP.253~338.
2. 한국지반공학회, 1997. 지반공학 시리즈 5 사면안정.
3. 서울대학교 공학연구소, 한국도로공사 도로연구소, 2001. FRP 보강그라우팅 공법의 설계 기법 연구.
4. 건설교통부 대전지방국토관리청, 2004. 학산-영동간 도로확장 및 포장공사 토질조사 보고서.
5. Priest, S.D., 1993, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, First Edition, Chapman & Hall.