

FRP보강 그라우팅에 의한 단층대의 터널 안정성 분석 및 설계 사례 연구

A Case Study of Analysis and Design for the Tunnel Stabilization in Fault Zone by FRP Reinforced Grouting Method

*박종호¹⁾, Jong-Ho Park, 최용기²⁾, Yong-Ki Choi, 박영목³⁾, Yeoung-Mog Park,
권오엽⁴⁾, Oh-Youb Kwon, 이재봉⁵⁾, Jae-Bong Lee

1) 대원토질(주) 상무이사, Executive Director, DaeWon Soil Co., Ltd.

2) 대원토질(주) 사장, President, DaeWon Soil Co., Ltd.

3) 영남대 토목공학과 교수, Professor Dept. of Civil & Environmental Eng., Yeungnam University

4) 건국대 토목공학과 교수, Professor Dept. of Civil & Environmental Eng., Kunkuk University

5) (주)한보 현장소장, Chief Director, Hanbo Co., Ltd

SYNOPSIS : This is a case study of stability analysis and reinforcement design for the tunnel where the collapse of the entrance slops occurred along the fault zone developed in the bed rock. According to the site investigation, the main factor of sliding is the influence of fault gouge and heavy rainfall. Considering the in-situ condition, the versatile reinforcement methods is needed, and so the close investigation on the site area was accompanied with the stability analysis of tunnel and slops. The FRP(Fiberglass reinforced plastic) grouting method improved the defect of Steel Umbrella Arch Method, such as oxidation, low work efficiency, the material's heavy weight, is adapted as the reinforcement methods.

Key words : fault zone, reinforcement methods, FRP(Fiberglass reinforced plastic) grouting method

1. 서론

각종 터널 설계는 지반조사 결과를 기초로 주변여건 등을 고려하여 수행하는 것이 일반적이다. 그러나 터널 입·출구부는 대부분 상부의 토피가 비교적 얇고 지질상태 변화가 심한 지역이 많아 굴착과정에서 당초설계시 예측했던 지질조건보다 불리한 상황에 직면하는 경우가 발생하고 있다. 특히 과거 지각변동에 의한 습곡 및 단층파쇄대가 발달된 구간이나 지하수위가 높고 풍화대가 두꺼운 계곡부 등을 통과하는 터널은 굴착시 또는 시공후에도 상대적으로 안정성 확보에 어려움이 많다.

국도 5호선 확·포장공사중 ○○터널 입구부는 N64° E/80° SE의 주향/경사로 발달된 단층대가 갱구부 사면에 위치하여 사면 절취공사 후 집중호우로 인해 사면의 일부가 붕괴되면서 시공중인 터널에 변위가 발생되어 터널 및 사면의 안정성을 동시에 확보할 수 있는 다각적인 보강대책이 요구되었다.

본 연구는 대상지역의 붕괴원인 분석 및 보강공법 선정을 위한 정밀지반조사를 실시하고 수치해석에 의한 터널 및 사면의 안정성을 분석함으로써 현장조건에 가장 부합되는 최적의 대책공법으로 FRP(Fiberglass reinforced plastic)관을 이용한 그라우팅공법을 적용·설계한 사례이다.

2. 대상지역의 지반특성

본 지역은 소백산맥에서 분기된 소산맥이 주된 산계를 이루는 만장년기에 속하는 지형으로서 지사상 선캠브리아기의 화강섬록암질 편마암과 유라기의 편마상 화강암이 기반암으로 넓게 분포하고 있으며 압쇄암(mylonite)과 석회암이 소규모로 협재되어 있다.

지형 특성상 심한 지각변동에 의한 습곡 및 많은 단층이 발달되어 있으며 특히 붕괴가 발생한 구간은 오랜기간동안 수차례의 변형 및 변성작용으로 엮리와 절리가 발달된 단층파쇄대로 구성되어 있다. 지표 지질조사결과 터널 상행선과 사교하며 발달된 단층대는 N64E/80SE와 N30~34E/82~85NW의 주향/경사를 갖고 4~20m의 폭으로 발달된 전단대(shear zone)로서 모암의 조직과 구조는 유지하고 있으나 역학적으로는 강도를 상실하여 풍화토 및 풍화암으로 분류되었다. 또한 단층면에는 두께 3~4cm 정도의 스멕타이트(smectite)가 함유된 점토광물이 협재되어 나타났다.

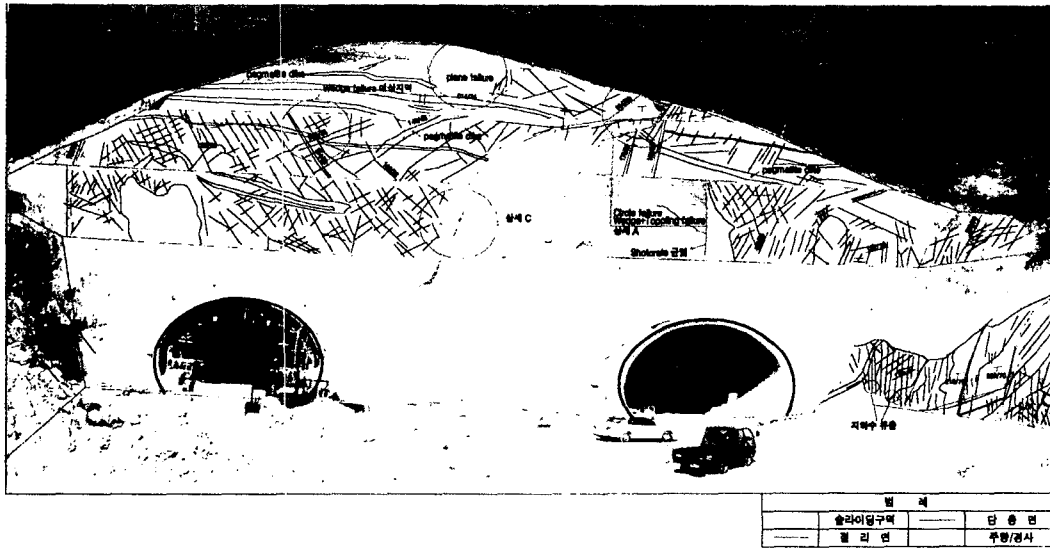


그림 1. ○○터널 시점(단층파쇄대) 붕락부

3. 경구부 사면 붕괴원인 분석

대상지역의 붕괴범위 및 원인을 분석하기 위하여 각종 조사 및 시험을 실시하였으며 조사내용 및 붕괴원인을 요약하면 다음과 같다.

표 1. 조사 및 시험내용

구분	항목	수량	단위	구분	항목	수량	단위	비고
현장조사 및 시험	지표지질조사	1	식	실내시험	흙의 물리성 시험	1	식	
	시추조사 (NX)	5	공		흙의 직접 전단 시험	2	식	토사 단층점토
	수압시험	3	회		점토광물분석 (XRD)	3	회	
	공내재하시험	4	회		SLAKING TEST	3	회	
	시추공영상촬영	4	회		암석역학 시험	1	식	
	현장밀도시험	2	회		자연절리면 전단 시험	2	회	

1) 갱구부 사면에는 간격 50cm 이내의 수많은 불연속면(단층, 절리 등)으로 구성되어 있고 절취사면과 사각으로 발달되어 있는 단층대는 완전히 파쇄되어 토사화된 화강섬록암질 편마암의 풍화토로 구성되어 있으며 대·소규모의 페그마타이트 암맥들이 불규칙하게 관입되어 있다.

2) 단층대(Shear Zone)내의 시료에 대해 Slaking Test 결과 내구성지수(Drrability Index)는 54.3~63.2%로서 Gamble이 제안한 내구성 기준상 내구성이 낮은 점토로 분류되었다.

3) 단층 점토에 대한 X-선 회절분석(XRD)결과 함수비 증가에 따라 체적의 수십배까지 팽창가능한 팽창성 광물의 일종인 스멕타이트(smectite)를 함유하고 있는 것으로 분석되었다.

결과적으로 터널 천단부 라이닝에 균열을 발생시킨 갱구부 사면의 붕괴원인은 갱구부 시공을 위한 사면절취과정에서 단층파쇄대가 지상에 노출되면서 절리면을 따라 침투한 우수에 의해 지반의 강도가 급격히 저하되고 단층면에 협재된 단층점토가 팽창하면서 윤향제 역할을 함으로써 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

4. 수치해석에 의한 안정성 검토

대상지반의 붕괴원인 및 구조물에 대한 손상정도를 정량적으로 파악하기 위하여 현장조건과 유사하게 갱구부 사면 및 터널을 모델링한 후 각각 수치해석을 실시하였다.

4.1 갱구부 사면 안정성 검토

사면의 안정성은 일반적으로 암반층과 토사층으로 구분하여 해석할 수 있으며 대상지역 중 풍화토와 풍화암 및 암반파쇄대 층으로 구성된 대표적 단면을 선정하고 상용 프로그램인 TALREN97을 이용하여 안정성을 검토하였다.

사면안정해석은 현장조사 및 실내시험결과에서 얻어진 지층조건 및 지반공학적 특성을 고려하여 대표 단면을 가정하고 현 시공사면의 파괴형상과 비교하여 붕괴이력이 유사한 파괴포락선을 얻을 때까지 반복 해석하여 최소안전율을 결정하였으며 그 결과는 모두 허용안전율보다 작은 것으로 해석되었다.

표 2. 사면안정 해석결과

구 분	사 면 고 (m)	최 소 안 전 율		비 고
		건 기 시	우 기 시	
상 행 선	36.6	1.230	0.930	허용안전율(Fs) 건기시 : 1.50 우기시 : 1.20
하 행 선	40.7	1.290	1.060	

4.2 터널 안정성 검토

터널 설계는 지반조사 결과를 기초로 하여 사용목적이나 필요한 규격, 구조형식 등을 충분히 파악하고, 계획하는 터널의 주변 지형 및 지반조건을 충분히 검토하여 터널이 안전하고 합리적으로 시공되도록 해야 하며, 완성후에도 유지관리가 용이하도록 해야 한다. 특히 NATM 터널설계에 있어서 지보재 및 라이닝의 해석상 큰 특징은 일반 구조물에 비하여 지형 및 지질 등 지반조건에 크게 영향을 받는다는 점이다. 따라서 터널 시공과정에서 발생할 수 있는 지반공학적 문제를 사전에 파악하기 위해서는 세밀한 지질조사에 따른 정확한 지반의 평가와 수치해석에 의한 지반거동 예측이 필요하다.

본 연구에서는 시추조사결과와 실험을 통하여 얻은 물성치를 적용하여 현재 터널 시공상황에 부합되도록 3가지의 Case로 모델링하여 수치해석을 실시하였다. 적용된 해석프로그램은 PENTAGON 2D로서 유한요소법(FEM)을 사용하였으며 지반요소의 소성을 고려하기 위하여 Mohr-Coulomb, Drucker-Prager Yield Criteria를 사용하였고 기타 요소의 소성을 고려하기 위해서 General Elastic-Perfectly Plastic

Theory를 사용하였으며 해석결과는 다음과 같다.

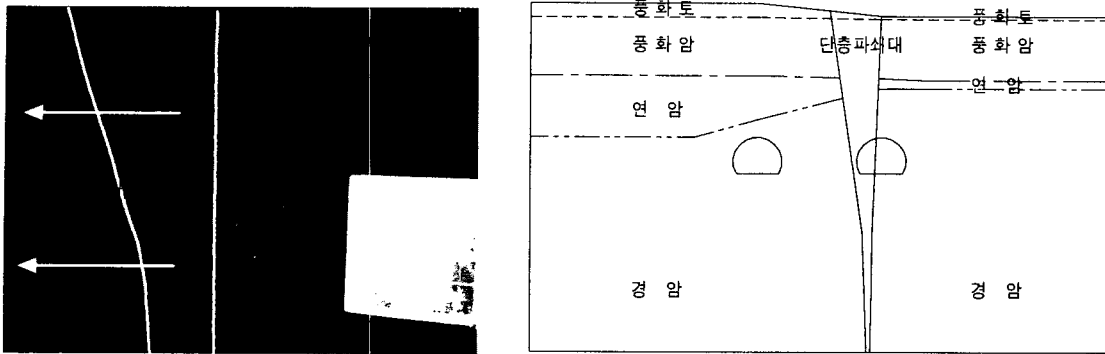


그림 2. STA. 0+000 지점의 해석단면

표 3. 터널 수치해석 결과

구 분	Case I	Case II	Case III	비 고
개 요	기존의 설계패턴 적용	막장의 자립시간 고려	단층파쇄대 붕괴후	S/C $\sigma_{ca} = 84\text{kg/cm}^2$ Lining $\sigma_{ca} = 96\text{kg/cm}^2$ R/B $T_a = 8.87 \text{ ton}$
하중분담율	40-30-30	30-30-40	40-60	
변 위	54.890	19.825	9.097	
썩크리트(라이닝) 압 축 응 력	85.820	65.460	(121.39)	
락볼트축력	44.080	25.660	-	

상기 결과 중 Case I 은 변경된 지반조건 및 물성치를 고려하여 터널의 안정성을 검토한 경우로서 최대변위 54.89m/m, 락볼트 축력 44.08ton으로 나타났으며 Case II는 시공중 굴착후 2시간 동안 막장이 자립할 수 있었던 지반조건을 고려하여 해석한 결과로서 락볼트에 축력이 25.66ton이 작용하는 것으로 나타났다. 또한 Case III은 단층파쇄대가 붕괴로 인한 터널라이닝에 미치는 응력을 검토한 것으로 응력이 121.39kg/cm²까지 증가한 것으로 나타났다.

이와 같이 각 경우에 대한 수치해석 결과를 종합하면 라이닝 콘크리트에 종방향 균열 및 횡방향 균열이 발생한 현장 상황과 가장 부합되는 경우는 Case III이다.

5. 보강공법 검토 및 설계

터널은 다른 구조물에서와 같이 변위와 균열 등의 문제점이 발견되었을 경우 즉시 이에 대한 적절한 보수 보강조치를 해야 한다. 그러나 터널의 보강은 다른 구조물과는 달리 보수 보강을 함에 있어 많은 제약을 받기 때문에 보강공법을 선택할 때는 터널의 주변지질조건, 구조조건, 작업조건 등을 고려하여 효과적인 방법을 선정해야 한다.

따라서 대상지역에 대한 정밀지반조사를 실시하고 지하수위 변화와 보강공법에 사용되는 보강재의 특성 등을 검토하여 FRP보강 그라우팅공법으로 선정하였다.

5.1 FRP보강 그라우팅공법

터널 굴착시 지질조건이 불량하거나 이미 붕괴되어 이완된 지반의 안정성 확보를 위하여 원지반의 절리와 공극에 그라우트재를 주입함으로써 주입재에 의한 고결로 인하여 FRP보강재와 주변지반을 일체화시켜 주변지반의 전단강도를 높일 수 있으며 영구 보강재인 고강도 FRP관을 삽입한 보강공법의 현장

적용성을 평가하였다.

5.1.1 FRP 재료의 역학적 특성

일방향성 유리섬유를 래핑(Wrapping)과 와인딩(Filament winding)하는 복합공정을 단일공정으로 제작된 FRP자재의 재료적 특성은 다음과 같다.

표 4. FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 재료시험

시험 항목	단 위	결 과 치	시험 방법	비 고
인 장 강 도	MPa	397	KSM 3305-96	한국 화학시험 연구원 토건재료센터
압 축 강 도	MPa	419	KSM 2243-94	
휨 강 도	MPa	427	KSM 2242-94	
인 장 탄 성 율	GPa	43.80	KSM 3305-96	
유리섬유함량	%	71.6	KSM 2244-95	

5.1.2 FRP관의 역학적 특성

① 휨강도

터널 및 사면이 붕괴 직전에 보강재는 전단저항을 받게 되며 이러한 기능적인 성능을 확인하기 위하여 실내에서 휨강도 시험(KSF 2407)을 실시하고, 기존의 보강재로 주로 사용되어온 강관 및 이형철근과 비교하였다.

시험결과 속채움을 실시한 FRP관은 강봉(φ60.5mm)보다 약 2.0배 이상 큰 휨강도 값이 측정되었다.

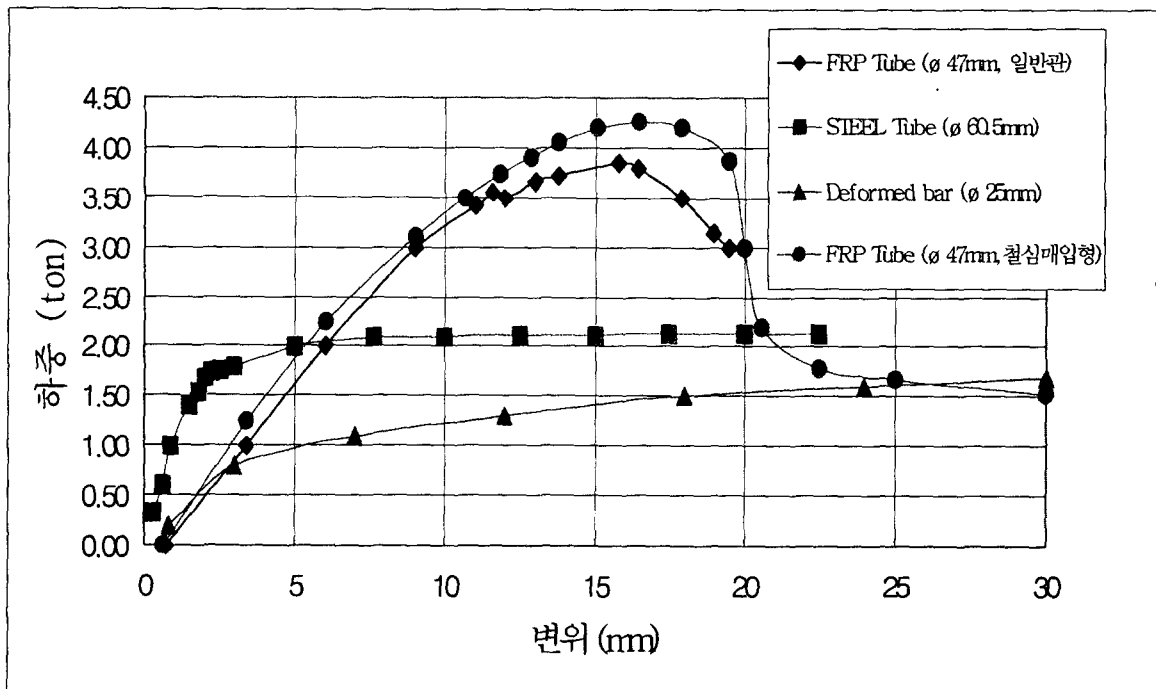


그림 3. 휨강도 시험결과(하중-변위 관계)

② 인장강도

지반거동시 압괴나 토체의 수직하향 및 수평이동으로 FRP관이 받게 되는 인장력을 검증하기 위하여 인장강도 시험(KSD 123-34)을 실시하였다. 시험결과 일반 FRP관은 17.0 ton, 철심을 보강한 FRP관은 27.0 ton으로 철근의 25 ton과 유사한 값이 측정되었다.

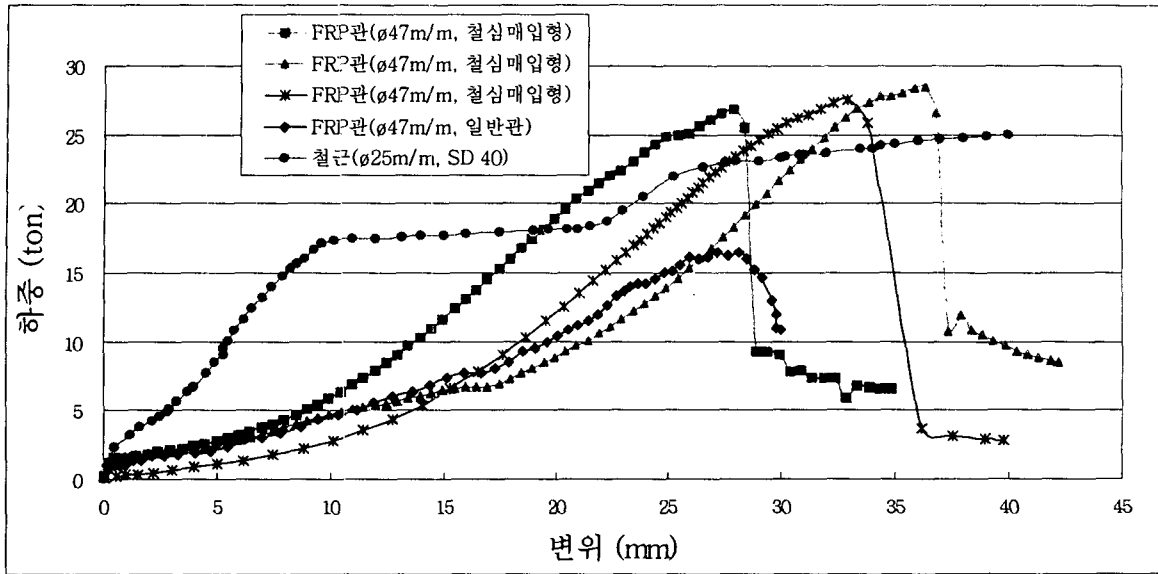


그림 4. 인장강도 시험결과(하중-변위 관계)

5.1.3 FRP 터널보강 그라우팅공법

FRP관을 이용한 터널보강 그라우팅공법은 대상지역의 지질특성을 고려할 때 기존의 터널굴착 보조공법인 강판다단 그라우팅공법, Pipe roof 공법, Fore poling 공법 및 Rock Bolt 공법 등을 적용시 주보강재가 강재(steel)이기 때문에 발생할 수 있는 지하수 침투에 의한 보강재의 부식, 무거운 중량에 의한 작업성 저하, 터널 내부로 돌출된 강판 절단의 어려움, 보강재 삽입시 발생하는 주입구 밴딩부의 파손 등의 문제점을 해결할 수 있는 대체공법으로서의 적용성이 뛰어난 것으로 판단된다.

5.1.4 FRP 사면보강 그라우팅공법

대상지역과 같이 단층파쇄대 및 이미 이완된 지반은 Soil Nailing 공법, Rock Bolt 공법 및 Rock Anchor 공법 등의 기존 사면보강공법을 적용할 경우 천공홀 채움방식에 의한 시공성의 저하로 장기적인 안정성을 확보할 수 없으므로 시멘트 밀크를 압력주입하여 토사층의 공극 및 암반 절리면 사이를 충전함으로써 침투수의 유입이 차단되어 추가적인 붕괴원인을 제거하고 주변지반 보강효과와 FRP보강재에 의한 빔효과를 동시에 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5.2 터널 및 사면보강 설계

터널굴착 완료 후 터널 입구부 사면에 발달된 단층대를 따라서 사면이 붕괴되면서 터널 Crown부 라이닝 콘크리트에 균열이 발생된 상태로서, 수치해석에 의한 안정성을 역해석한 결과 불안정한 것으로 검토되어 터널 갱구부와 절취사면에 보강공법을 적용해야 한다.

5.2.1 보강공법 적용

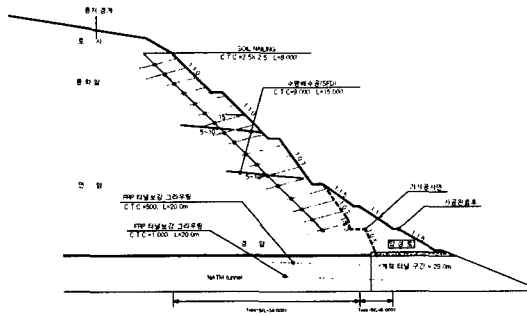
현 터널지역의 지질특성을 고려한 보강방안으로서 사면부의 단층파쇄대에 의한 붕괴구간은 1 : 1.5 구배로 법면을 정리하고, 현 절취사면부 형상을 유지하면서 안정성을 확보함과 동시에 터널 갱구를 단층대로부터 이격시키기 위한 방안으로 개착식 터널을 기존 터널로부터 상, 하행선 각각 26m, 29m씩 연장 설치한다. 또한, 상행선 단층파쇄대의 이완된 부분은 그라우트재를 주입하여 soil-cement화 함으로써 주변지반의 강도를 높이고 보강재에 의한 전단강도를 높여 차수 및 지반보강을 동시에 확보할 수 있는 FRP보강 그라우팅공법을 적용하고, 지표지질 조사결과 평면파괴가 예상되는 하행선측의 사면에는 Soil Nailing 공법을 Random하게 적용하여 장기적인 사면안정을 확보할 수 있도록 하였다.

대상지역의 ○○터널 시점부 붕락구간에 대한 보강방안을 요약하면 다음과 같다.

표 6. ○○터널 시점(단층파쇄대) 붕락부 보강방안

보강방안	사면 보강	터널 보강
보강안 요약	① 사면구배 완화 : 1:0.89 → 1:1.5 ② 붕락구간 고결처리 ③ 개착식 터널 연장 설치 (상행선 : 26m, 하행선 : 29m) ④ 단층파쇄구간 FRP보강 그라우팅 시공 ⑤ 파쇄대 외 불안정구간 Soil Nailing 시공	① 터널 갱구부 FRP보강 그라우팅 2열 시공 ② 상·하행선 각각 26, 29m 개착터널 시공 ③ 상·하행선 터널 중간부 옹벽 설치 ④ 상·하행선 터널 중간부 Rock Anchor 시공

하행선



상행선

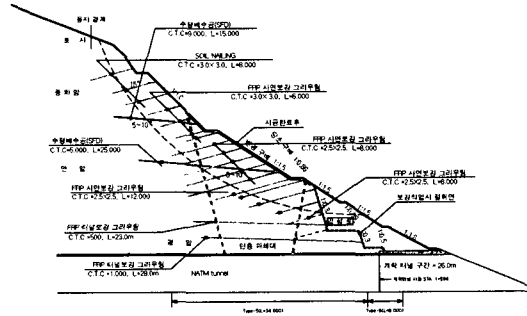
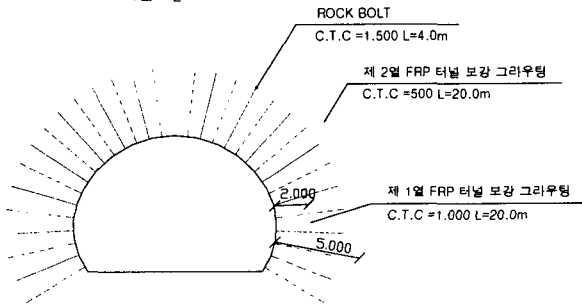


그림 5. ○○터널 시점(단층파쇄대) 붕락부 보강방안(단면도)

하행선

터널 단



상행선

터널 단

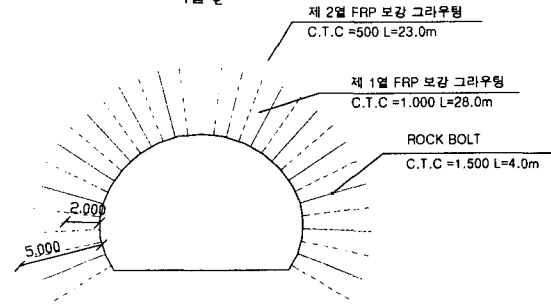


그림 6. ○○터널 시점(단층파쇄대) 붕락부 보강방안(터널보강도)

5.2.2 보강후 안정성 검토

FRP보강 그라우팅법을 적용한 사면 및 터널의 안정성을 수치해석으로 분석하였으며 분석 결과는 다음과 같다.

① 사면 안정성 분석 결과

상·하행선 터널 갱구부 사면에 대한 수치해석 결과 모두 안정한 것으로 나타났다.

표 5. FRP보강 그라우팅공법 적용시 사면안정 해석결과

구 분	최 소 안 전 율		비 고
	건 기 시	우 기 시	
상 행 선	1.650	1.340	허용안전율(Fs) 건기시 : 1.50 우기시 : 1.20
하 행 선	1.530	1.240	

② 터널 안정성 분석 결과

터널 구조물에 대한 터널의 안정성 검토를 실시한 결과 최대변위가 4.2mm를 나타냈고 터널 라이닝 압축응력은 67.65kg/cm²로 허용압축응력(96kg/cm²)보다 작게 나타나 사면보강과 동시에 터널보강을 실시하였을 경우 터널의 구조적 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

6. 결 론

본 논문은 단층대에 시공된 터널 입구부 사면이 붕괴되면서 터널 라이닝에 균열이 발생한 단면에 대하여 수치해석을 통하여 안정성을 평가하고, FRP보강 그라우팅공법을 적용 설계한 사례이다.

1) 대상지역은 선캄브리아기의 화강섬록암질 편마암이 기반암으로 분포하고 수차례의 지각변동에 의한 지질구조(습곡, 단층 등)가 발달하며 N64° E/80SE의 주향/경사를 갖는 단층대가 터널 갱구부에 위치하고 있다.

2) 갱구부 시공을 위한 사면절취과정에서 단층대가 지상에 노출되고, 강우시 침투한 우수에 의한 지반강도의 급격한 저하와 단층면에 협재된 단층점토가 팽창하면서 윤향제 역할을 함으로써 사면의 붕괴와 터널 천단부 라이닝에 균열이 발생된 것으로 분석되었다.

3) 수치해석을 통한 안정성 해석결과 붕괴사면 및 터널 상부를 동시에 보강해야 우기시 또는 장기적인 안정성을 확보할 수 있는 것으로 분석됨에 따라, 이미 이완된 단층대 및 주변지반의 보강효과와 Arching 효과 및 차수효과를 동시에 얻을 수 있는 대책공법으로 최근에 개발된 FRP보강 그라우팅공법을 적용하였다.

4) FRP보강 그라우팅공법은 기존의 강관다단 그라우팅공법이나 Soil Nailing 공법에 적용되는 강관 및 이형철근의 단점을 개선 및 보완하기 위하여 개발한 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)관을 이용한 지반보강 공법으로서 대상지역의 터널 및 사면에 대해 본 공법을 적용하여 안정성 검토를 실시한 결과 모두 안전율이 허용치 이내인 것으로 분석되었다.

5) 시공후 FRP보강 그라우팅공법의 현장 적용성 검증을 위한 시공효과 확인 및 계측을 통한 장기적인 안정성 확보를 위한 유지관리가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

- 1) 한국지반공학회(2000), FRP 보강 그라우팅 공법의 개발 연구 보고서.
- 2) 한국도로공사(2000), FRP관을 이용한 사면보강공법 개발.
- 3) 권오엽, 이상덕, 최용기(2000), "FRP를 이용한 사면보강", 한국지반공학회 2000 사면안정 학술발표회 논문집, pp. 153~180.
- 3) 박용원, 박종호, 신락현, 이생구, 정기훈(2000), "FRP 사면보강 그라우팅 공법의 현장 적용성 연구", 한국지반공학회 '00가을학술발표회 논문집, pp. 143~150.
- 4) 부산지방국토관리청(1995), 평은~영주간 도로4차선 확·포장공사 터널해석 보고서.
- 5) ㈜ 한보(1999), 평은~영주간 도로4차선 확·포장공사 사면 안정성 해석보고서.
- 6) 건설교통부(2000), 도로설계편람(I)
- 7) B. Benmokrane et al(2000), "Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications", Construction and Building Materials 14, pp. 157~170.