

FRP 사면보강그라우팅 공법의 현장 적용성 연구

A Study on the Application of Slope Reinforced by FRP Grouting

박용원¹⁾, Y.W. Park, 박종호²⁾, J.H. Park,
신락현³⁾, R.H. Shin, 정기훈⁴⁾, K.H. Jeong, 이생구⁵⁾, S.K. Lee,

- 1) 명지대 토목환경공학과 교수, Professor Dept. of Civil & Environmental Eng., Myongji university
- 2) 대원토질(주) 상무이사, Executive Director, DaeWon Soil Co. Ltd.
- 3) 한국도로공사 서해1사업소장 Chief of SeoHae 1 Construction office, KHC
- 4) 한국도로공사 서해1사업소 부장, Director of Construction Department, KHC
- 5) 극동건설(주) 현장소장, Chief Director, Kukdong Engineering & Construction Co. Ltd

SYNOPSIS : A field test performance of FRP-Grouting method at a collapsed slope were carried out to verify the improving effect. The results are summarized in this paper.

1. 서론

토목공사 현장에서 자연사면을 절취하여 대절토사면을 조성하는 경우에 지반의 지질학적특성 (토질의 종류 및 암반의 단층, 절리, 층리 등) 및 침투수 영향 등에 따라 사면의 붕괴를 초래할 수 있으므로 사면의 안정성을 확보하기 위해 적절한 보강공법을 적용하게 된다. 이러한 보강공법 중 현재 국내에서 널리 사용되고 있는 공법으로는 Soil Nailing 공법, Rock Bolt 공법, Ground Anchor 공법 등이 있다. 이와 같은 기존의 사면보강공법의 경우 공극 및 균열, 절리가 심한 지반은 보강 효과가 미미하고, 이미 이완된 지반조건에서는 적용에 많은 어려움이 따르며 특히 천공시 이완된 주변지반은 강도저하가 불가피하다. 또한 지하수위 아래 지반에서의 시공은 현실적으로 매우 어려운 실정이며 특히 이들 공법이 대절토 사면 및 영구 벽체로 사용되기 위해서는 내구성 이 뛰어난 보강재를 사용하거나 기타 공법과 병용해야 하는 등의 어려움과 재료의 부식, 배수처리와 같은 부분들이 해결되어야 한다.

본 연구에서는 이러한 제반 문제점들을 보완하고자 최근에 개발되어 사면보강공법으로 사용하고 있는, FRP 보강그라우팅공법에 대한 현장시험시공을 실시하고 사면보강공법으로서의 현장적용성을 분석하였다.

2. 현장 개요

2.1 지형 및 지질조건

본 현장은 서해안 고속도로 (당진-서천간) 건설공사중 O공구 STA.4K+360 지역의 대절토 사면으로서 사면구배가 1:1.5 인 7단 사면이 약70m 높이로 형성되어있다 (그림 1 참조)

본 지역의 지질은 지사상 중생대 쥐라기에 생성된 퇴적암인 혈암, 역암 등이 기반암으로 구성되어 있으며 사면의 하단부는 풍화된 점토 및 모래섞인 실트로 구성되어 있고 사면 상단부에는 역암 및 전석이 섞인 봉적층으로 두껍게 피복되어 나타났다. 특히 대상지역은 계곡부로서 오래전부터 지하수 집중지역에 해당되어 더욱 심하게 풍화된 상태로 자연함수비가 비교적 높게 유지되는 구간이다.



그림 1. 현장 상황

2.2 사면붕괴 원인 분석

본 현장은 사면 상부에서부터 절취작업을 시작하여 제7단까지 작업이 완료된 후 노반조성을 위한 절취 과정 중에 우기를 지나면서 제5단 사면 중간부터 제7단 사면 하단부에 이르는 구간이 붕괴되었다.

붕괴원인은 첫째, 과거 기반암 시절에 발생한 절리 사이에 오랜 기간동안 점토 충전물이 쌓인 상태에서 사면 절취로 인한 상부압력이 제거되면서 응력이완 작용으로 절리면을 따라 슬라이딩이 발생한 경우와 둘째, 점토 및 모래 섞인 실트로 구성된 풍화대층에 강우가 침투하여 간극수압이 상승하고 유효응력이 감소되면서 이미 발생된 인장균열 부분을 따라 진행성 파괴로 발전된 원인 등으로 간주할 수 있으며, 상기 두가지 원인이 복합적으로 작용하여 사면의 붕괴를 유발시킨 경우도 고려할 수 있다.

3. 사면안정 대책 및 보강공법

3.1 사면안정 대책

일반적으로 사면붕괴의 발생원인은 내적인 요인과 외적인 요인 두가지로 크게 나눌 수 있다. 내적 요인으로는 토질, 지질구조, 지형 등의 취약성 같은 잠재적 요인을 열거 할 수 있고, 외적 요인으로는 절토와 같은 인위적 요인과 강우, 융설, 지하수, 침식, 지진 등과 같은 자연적 요인을 생각 할 수 있다. 이와 같이 내적으로 취약한 구조를 가지고 있는 사면에 인위적 절토 또는 강우 등에 의한 외적요인이 부가될 경우 사면붕괴는 쉽게 발생한다. 따라서 사면붕괴를 방지하고자 하는 경우 대상지역의 지질·지형학적 및 지반공학적 특성에 따라 가장 효과적인 공법을 선택하여야 한다.

사면 붕괴를 방지하기 위한 대책공법을 방지 기능별로 살펴보면 첫째, 현 상태는 안전하지만 강우, 융설 등과 같은 물의 영향에 의하여 사면의 안전율이 감소하는 것을 방지하는 보호공법과 둘째, 현재 불안정하다고 판단되는 사면에 보강재 등에 의한 저항력을 이용하여 안전율을 증가시켜주는 보강공법으로 구분할 수 있다.¹⁾

3.2 사면 보강공법

현장조사 결과 이미 붕괴되었거나 불안정함이 판명된 사면은 보강공법을 적용하여 사면안전율을 증가시켜야 한다. 사면보강공법은 사면의 활동을 일으키려는 상부토체를 제거하거나 구배를 조정하여 활동력을 감소 시켜주는 방법과 옹벽, 말뚝, 앵커, 네일 등의 보강재를 이용하여 사면의 활동에 대한 저항력을 증가시키므로써 사면의 장기적 안정을 유도하는 방법이 있으며 억지말뚝, Soil Nail, Rock Bolt, Ground Anchor, FRP 보강그라우팅 공법등이 후자에 해당된다. 그러나 지형 및 주변 여건상 구배조정이 불가능 하거나 지질조건상 수차례 절토하였음에도 불구하고 불안정한 사면 또는 이미 붕괴가 발생한 사

면등에는 보강재를 사면내에 삽입하여 재료의 전단, 휨, 인장, 압축 등의 역학적 특성을 이용하는 물리적 보강방법과 지반 안정약액을 사용하여 직접 지반의 강도를 증가시켜 주는 방법이 효과적이라 할 수 있다.

4. FRP 보강그라우팅공법

4.1 개요

우리나라의 토질 및 암반은 많은 공극 및 균열(절리)을 내포하고 있어 해빙기나 우기에 절리면을 따라 크고 작은 사면의 붕괴가 발생하고 있으며 이러한 현상을 방지하기 위하여 현재 Soil Nailing 공법이나 Rock Bolt 공법 또는 Ground Anchor 공법이 주로 적용되어 왔다. 그러나 상기 공법등은 균열 및 절리가 매우 심한 지반이나 이미 이완된 지반조건에서는 적용에 어려움이 있으며, 천공시 이완된 주변지반의 강도저하는 불가피하다. 특히 점착력이 거의 없는 느슨한 사질토 지반이나 굴착시 안정을 확보할 수 없는 지반등에는 시공이 곤란하고, 소성이 지배적인 점토질 지반과 매우 예민한 지반에서도 흙과 보강재 사이의 단위 주면 마찰력이 비교적 작기 때문에 적용상 많은 어려움이 있으며 지하수위 아래에서의 시공은 현실적으로 매우 어려운 실정이다. 상기와 같은 사면보강 공법의 문제점을 보완할 수 있는 대안공법으로 지반보강 및 차수를 동시에 확보할 수 있는 FRP관을 이용한 사면보강 공법을 적용할 수 있다. FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 보강그라우팅공법은 기존의 사면보강 공법인 Soil Nailing 공법 또는 Rock Bolt 공법과 유사하나 주 보강재를 철근대신 고강도 FRP관을 사용하여 인장강도를 증가시키고 주변지반에 주입된 그라우트재가 고결되어 지반의 전단강도를 증가시키므로써 현장에서 요구하는 품질을 확보할 수 있는 공법이다.

4.2 공법의 특성

기본원리는 Soil Nailing 공법과 L/W 그라우팅 공법을 조합시킨 공법이라 할 수 있으며, 고강도 FRP 파이프를 지질조건 및 현장상황에 따라 적절한 간격으로 배열, 설치한후 FRP 파이프내에 이동식 Packer를 다단식으로 설치하여 고강도 그라우트재를 단계별로 주입함으로써, 주입재에 의한 지반고결로 인하여 FRP 파이프와 주변지반을 일체화시켜 지반보강 및 차수효과를 동시에 발휘시키는 공법이다.

특히 FRP관에 부착된 간격재가 보강재를 천공홀 중앙에 위치시킴으로써 토사의 공극이나 암반의 균열 및 절리에 그라우트재를 효과적으로 주입시킴은 물론, 고강도 FRP관과 암반과의 융합역활로 장기적인 안정성을 유지할 수 있어 기존의 보강방법에서 발생하는 천공홀 채움 방식의 문제점을 근본적으로 해결 할 수 있다.

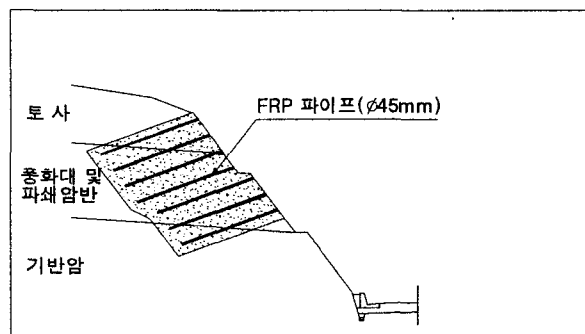


그림 2. FRP 파이프 보강 그라우팅 단면도

5. FRP 보강그라우팅공법의 시험시공

5.1 개요

붕괴사면에 대한 보강공법으로서 FRP 보강그라우팅공법의 타당성을 파악하기 위하여 붕괴사면과 토질조건이 동일한 인근지역에 대하여 4공의 시험시공을 실시하였다.

5.1.1 시공도

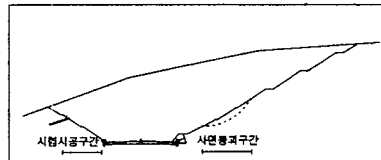


그림 3. 시험시공 및 사면붕괴 구간 단면도.

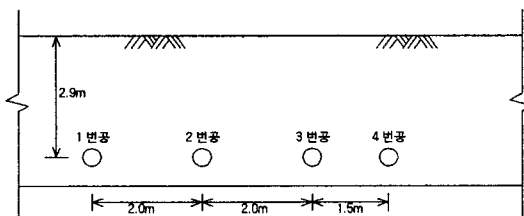


그림 4. 시험시공 배치도

- 시공수량 : 4공 (ϕ 45mm)
- 시공간격(C.T.C) : 2.0m~1.5m
- 보강길이(L) : 6.0m
- 천공각도 : 하향 20°

5.1.2 FRP 자재 특성

시험 항목	단 위	결 과 치	시험 방법	비 고
인장 강도	kg/cm ²	3,970±50	KSF 2241-94	시험제작
휨 강도	kg/cm ²	4,270±50	KSF 2242-94	
압축 강도	kg/cm ²	4,170±50	KSF 2243-94	
유리섬유 함유량	%	71.6	KSF 2244-95	

5.1.3 주입재의 배합기준

(1) SEAL 재 배합비

구 분	주입량(ℓ)	시멘트(kg)	혼화제(kg)	물(ℓ)	W/C(%)	비 고
배합비	1000 ℓ 기준	1,302	13.0	587	45	

(2) 시멘트 현탁액 배합비

구 분	주입량(ℓ)	시멘트(kg)	물(ℓ)	혼화제(kg)	비 고
배합비	1000 ℓ 기준 (1 BATCH)	500	841	5.0	

(3) L/W 그라우트재 배합비

구분	주입량(ℓ)	A 액		B 액		비교
		규산소다 (ℓ)	물 (ℓ)	시멘트 (kg)	물 (ℓ)	
배합비	1000 ℓ 기준	250	250	250	420	168

5.2 시공순서 및 방법

5.2.1 단계별 시공방법

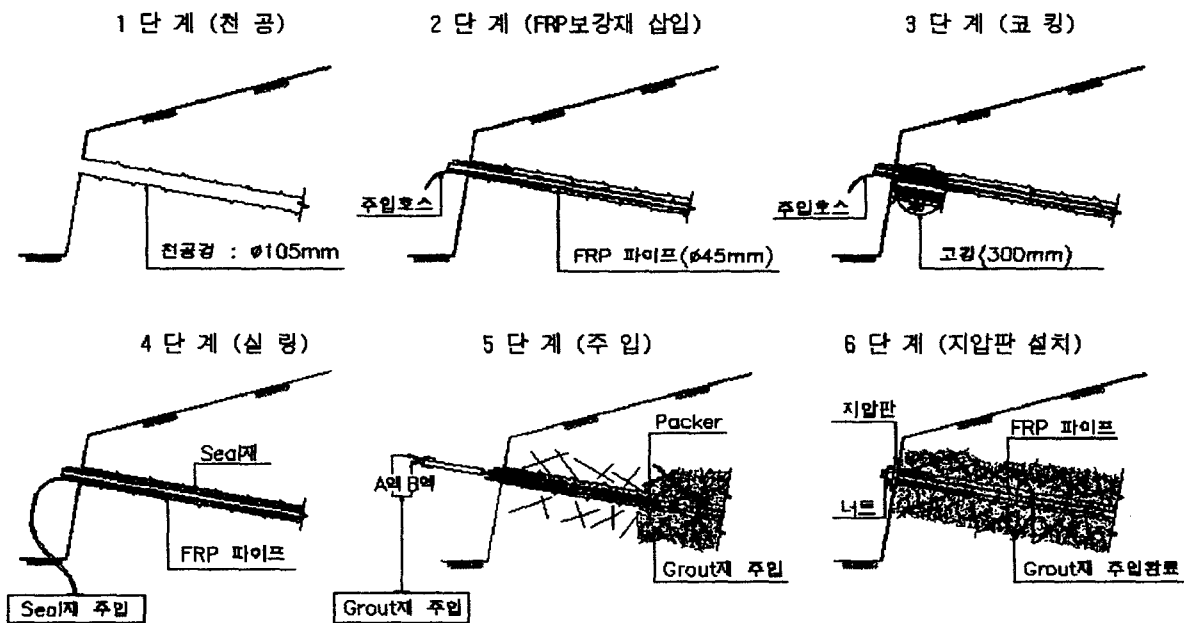


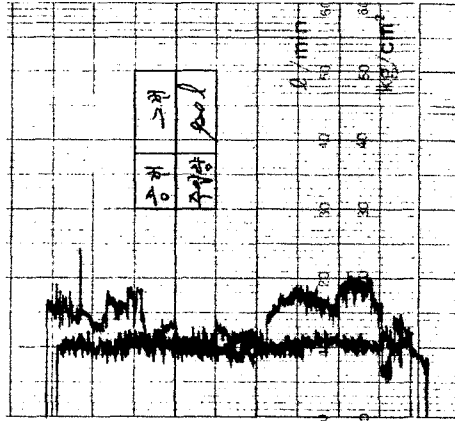
그림 5. 단계별 시공방법

5.3 보강효과 확인

FRP 파이프 보강 그라우팅 공법은 고강도 FRP 파이프 삽입에 의한 강도 증가와 주입재에 의한 차수 및 지반보강의 이중효과를 기대하는 공법으로서 FRP 파이프의 강도 및 인발시험은 실내·외 시험이 가능하나 그라우트의 주입효과를 정량적으로 측정하기는 어려운 실정이다. 따라서 그라우트재의 주입효과는 T-P-Q 그래프에 의한 주입량 측정 및 전기비저항 탐사, 굴착에 의한 지시약 반응시험 등에 의하여 확인하였다.

5.3.1 T-P-Q 그래프

지반조건에 부합되는 주입압력(P)과 주입시간(T)을 조절하고 그라우트재의 주입량(Q)을 결정하기 위하여 주입 플랜트에 부착된 시공관리 시스템을 이용하였다.



<그림 5> 2번 시험공 T-P-Q 그래프

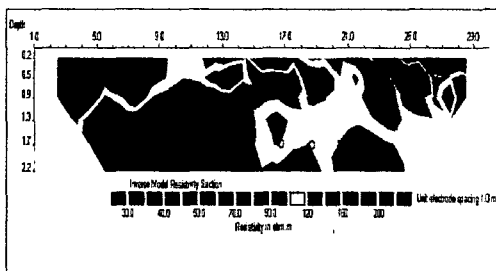
공 번	주입재	설계 주입량(m ³)	시험시공 주입량(m ³)	비 고
1~4	LW	0.85	1.09	주입압력(Pmax) = Pi + ΔP (ΔP=3~10kg/cm ²)
	시멘트	1.98	2.54	
	계	2.83	3.63	

위의 설계 주입량은 지반조건(ML-SM)을 감안하여 L/W와 시멘트량의 비율을 3:7로 하고, 확산반경 800mm, 주입을 23.5%로 설정하여 계산한 값이며 시험시공시 실제주입량은 약 28% 초과 주입되었다.

5.3.2 전기비저항 탐사

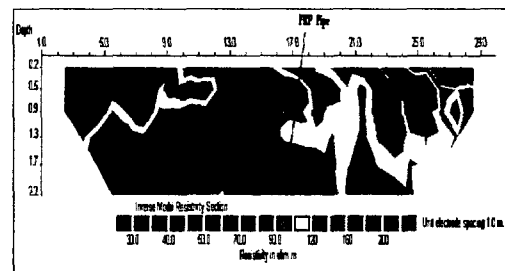
2차원 전기비저항 탐사법은 최근에 개발되어 이용이 급격히 확대되고 있는 탐사기법으로 수직탐사와 수평탐사를 조합하여 지하의 지질구조를 영상화하는 고밀도 해석이 가능한 물리 탐사법이다.²⁾

본 조사에 사용한 전기비저항 탐사법을 축선단면에 대한 비저항의 수직 및 수평적 분포 상태를 파악할 수 있는 2차원 단극 배열법(2D pole-pole Array)이다.



[등비저항곡선 단면도 :

그라우팅 전]



[등비저항곡선 단면도 :

그라우팅 후]

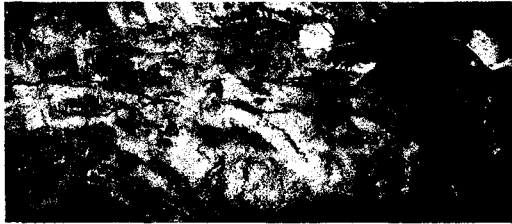
그림 6. 등비저항곡선 단면도

위 그림에서 보는 바와 같이 그라우팅 전 천공홀 주변의 전기비저항 값은 50~150Ω·m범위이고, 그라우팅 후의 비저항값이 30~100Ω·m범위로 낮아진 것은 보강전보다 비저항 값이 더 작은 주입재(시멘트밀크)가 지반에 침투하였기 때문으로 해석된다.

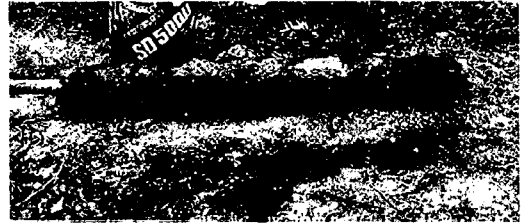
또한 축선상 10.0~16.0m 사이의 지표면 부근에 저 비저항대가 확대분포된 것은 시험시공과정에서 확인된 바와 같이 시멘트 밀크가 연약대를 따라 지표로 할열 침투하면서 분출됨으로서 주변지반의 비저항 값이 낮아진 결과로 판단된다.³⁾

5.3.3 굴착에 의한 주입범위 확인

시험시공 7일 경과 후 대상지반을 굴착하여 보강범위를 육안관찰하고 지시약(페놀프탈레인) 반응시험을 실시하였다.



지시약 반응시험



구근 형성

그림 7. 주입범위 확인

굴착결과 천공홀로부터 최대 2.9m까지 그라우트재가 주입되었으며 평균 주입범위는 천공홀에서 1.5~1.8m까지 확산된 것으로 확인되었다. 또한 FRP 파이프와 그라우트재로 형성된 복합구근의 직경을 측정 한 결과 151.2~156.0mm로 천공홀 직경(105mm)보다 약 50%정도 확공된 것이며, 이는 압력분사 그라우팅에 의해 주변지반이 압축된 것으로 FRP 파이프의 주변마찰력을 크게 증가시킨 것으로 판단된다.

5.3.4 FRP 파이프 인발시험

(1) 실내시험

FRP 파이프와 그라우트 복합체의 인발저항력을 평가하기 위하여 실험실에서 공시체(직경 250mm, 높이 300mm)를 제작한후 만능시험기(UH-100A)를 이용하여 시험을 실시하였다.

시험결과 Test-1의 경우 최대인장하중은 18.9ton, 변위는 2.52mm였으며 파괴후 잔류하중이 13~15ton 정도를 유지하여 변위가 7.6mm 정도 발생하는 지점에서 시험을 중지하였다. Test-2의 경우 변위 3.13mm에서 최대저항력이 16.0ton으로 나타났으나 하중을 계속 증가시킨 결과 변위 12.0mm 지점에서 초기파괴하중보다 약 20%정도 증가한 19.39ton이 측정되었으며 이후 잔류하중은 15ton 정도로 유지되었다.

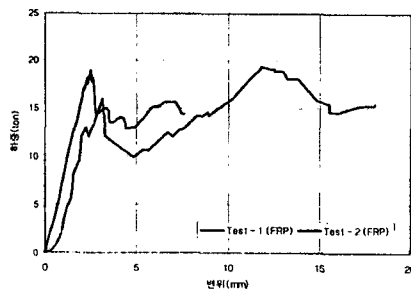


그림 8. FRP 파이프를 이용한 인발시험(φ 50mm)

(2) 현장 인발시험

현장 인발시험은 내경이 50mm인 증공형 실린더가 달린 유압재(용량 50ton)을 이용하였으며 재하하중 측정은 유압펌프에 장착된 유압계를 사용하였고 재하하중에 대한 변위량은 상부 지압판상에 설치한 다이얼 게이지를 통하여 측정하였으며 인발시험은 설계하중(P=10ton)보다 큰 17.5~19ton까지 확인한 후 시험을 종료하였다.

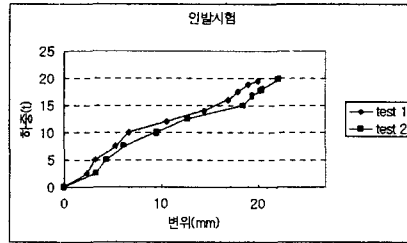


그림 9. 인발하중-변위곡선

5. 결론

본 연구에서는 FRP 파이프 사면보강 그라우팅 공법의 현장 적용성을 파악하기 위하여 현장시험시공을 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대상지역에서 4공의 시험시공을 실시하고 그 효과를 확인하기 위하여 T-P-Q 곡선에 의한 주입량 측정, 전기비저항 탐사, 굴착에 의한 육안관찰 및 FRP 파이프 인발시험을 실시하였다.
- (2) T-P-Q 곡선에 의하여 시험주입량을 측정한 결과 3.63m^3 으로 설계주입량보다 약 28% 정도 증가한 것으로 나타났다.
- (3) 시험시공 전·후의 전기비저항을 측정한 결과 그라우팅 보강전 비저항은 $50\sim 150\Omega \cdot \text{m}$ 이었으나 그라우팅 보강후의 비저항은 $30\sim 100\Omega \cdot \text{m}$ 로 낮아져 보강효과가 확인되었다.
- (4) 대상지반을 굴착하여 그라우팅재의 영향범위를 확인한 결과 주입장이 최대 2.9m, 평균 주입폭이 1.5~1.8m까지 확산된 것으로 확인되었다.
- (5) FRP 파이프를 이용하여 실내인발시험을 실시한 결과 인발하중이 18.9~19.39ton으로 나타났으며, 지반보강을 완료한 후 현장에서 측정한 인발시험하중은 설계하중(10ton)보다 큰 17ton 이상으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(1999), “터널 보강재로서 FRP 적용성 검토”
2. 한국지반공학회(1997), “지반공학 시리즈 5 - 사면안정”, 구미서관, pp.245~252
3. 박종호 외(2000), “지표물리탐사 기법을 이용한 FRP보강 그라우팅 공법의 보강효과 확인에 관한 사례연구”, 지반공학회,
4. 대원토질 주식회사(2000), “서해안고속도로 제 7공구 FRP사면보강 그라우팅 시험시공 결과 보고서”
5. 대원토질 주식회사(2000), “FRP 보강 그라우팅공법의 개발(사면 및 터널 보강공법)”