

터널 및 사면보강용 고강도 FRP관의 개발에 관한 연구

최용기¹⁾, 한현희¹⁾, 김성환²⁾, 유병욱²⁾, 황영철²⁾, 전경수³⁾

¹⁾대원토질(주), ²⁾한국도로공사 도로연구소, ³⁾한국도로공사

1. 서론

유리섬유보강플라스틱(Fiberglass Reinforced Plastic, FRP) 복합재료는 최근 일본, 유럽 및 북미를 중심으로 기초보강분야, 대규모 굴착 및 토공분야, 댐 및 터널보강분야, 암반에서의 앵커 등에 널리 이용되고 있으며 현재 토목구조용 재료로서의 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있는 실정이다.

FRP 복합재는 비등방성 물질이며 제조과정에서 섬유와 수지의 함량비, 섬유의 방향성과 품질이 복합재의 역학적인 특성을 좌우한다. Uni-direction Mat를 Pre-preg Wrapping과 Filament Winding방식의 두 공법을 일괄공정 처리하여 제조한 고강도 FRP관은 균일한 단면과 거친 표면으로 이루어진 신소재 유리섬유강화플라스틱 복합재료로서 인장, 전단강도가 강함은 물론 절단 및 가공이 쉽고 중량이 가벼워 취급이 용이하며 내화특성과 내부식성이 우수하여 토목구조용 재료로서 강재보다 뛰어난 장점을 갖고 있다. FRP관의 하중-변형 관계는 강재와 같은 항복특성을 보이지 않고 파괴점까지 모든 단계에서 뚜렷한 직선 형태를 보이고 있어 강재와 같은 거동 특성을 얻기 위해 FRP관 제작시 철심을 매입하는 제조과정을 추가로 개발하였다. 그러나 FRP관이 그라우팅 보강재로서 이용되기 위해서는 FRP관의 응력 특성, 인장력, 그라우트체와의 결합력, 알카리 환경에서의 장기적인 강도 및 내구성을 포함한 여러 가지 특성들이 결정되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 지반붕괴 메커니즘을 고려한 FRP관의 역학적 특성을 평가하기 위한 실내시험을 실시하고 기존의 터널, 사면 및 가시설용 그라우팅 보강재인 강재(steel)의 대체품으로서의 적용성을 고찰하고자 한다.

2. 고강도 FRP관의 개발

2.1 연구 동향

FRP 복합재료의 개발은 1940년부터 시작되어, 초기 무렵에는 국방산업과 항공우주산업 분야에 제한적으로 사용되었으나 FRP 재료가 지닌 구조부재로서의 잠재적 잇점을 인식하고 토목분야에서 구조적 재료특성과 관련된 연구가 선진 외국을 중심으로 점진적으로 진행되어 왔다. 이와 같은 결과로 최근 FRP 복합재료에 대한 토목분야의 관심이 고속도로, 터널, 교량, 빌딩, 교통 및 사회간접 기반시설 전반에 걸쳐 증가하고 있다. 일본에서는 민간 분야와 정부차원에서 FRP 복합재료를 건설공사시 합법적 기술재료로 채택함과 아울러, 이미 지반공학분야에 사면보강용 그라운드 앵커나 보강도 옹벽의 보강재료로서 FRP 그라운드 앵커 및 지오그리드를 각각 1994년과 1996년에 적용한 바 있다. 이외에도 유럽, 북미를 중심으로 주로 기초보강분야, 대규모 굴착 및 토공분야, 댐 및 터널보강분야, 암반에서의 앵커 등에 적용되고 있으며 특히, 이탈리아의 경우 일반 플라스틱관 주변에 FRP 보강재를 부착하여 터널 막장보강 공법에 적용, 보강효과를 극대화하는 공법 및 장치를 개발한 바 있다. 이와 같이 FRP 복합재료의 토목분야 적용이 활발한 이유는 강재(steel)와는 달리 내부식성이 좋을 뿐만 아니라

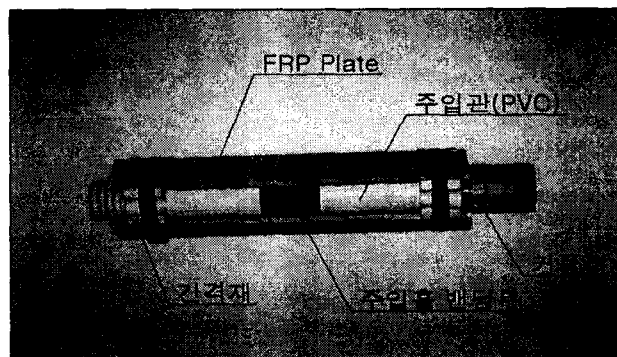
경량성, 인장강도면에서도 탁월한 장점을 가지고 있기 때문이다.

2.2 고강도 FRP관의 개발

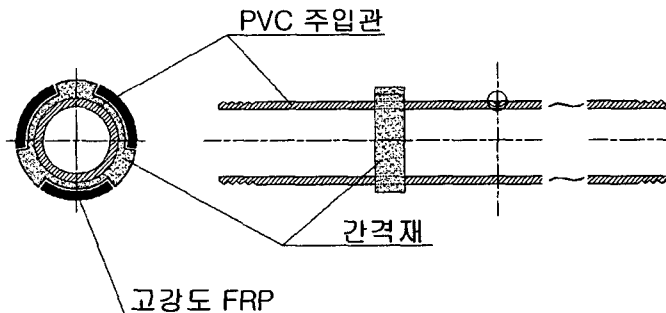
지반조건이 취약한 지역에서 터널굴착이 진행될 경우에 터널 안정성 확보를 위해 적용하는 대표적 보조공법으로는 강관다단 그라우팅공법을 들 수 있다. 그러나 강관다단 그라우팅 공법은 지하수위가 높은 지반조건에서는 주보강재인 강관 부식 등의 문제가 나타나고 터널굴착 작업시 내부로 돌출된 강관을 절단해야 하며 중량이 커서 취급이 용이하지 못한 단점이 있다. 이러한 강관 재료의 취약성을 해결하기 위한 방안으로 본 연구에서는 고강도 FRP관을 개발하게 되었으며 현재까지 개발된 FRP보강재 형상의 발달과정은 다음과 같다.

(1) 단면형상

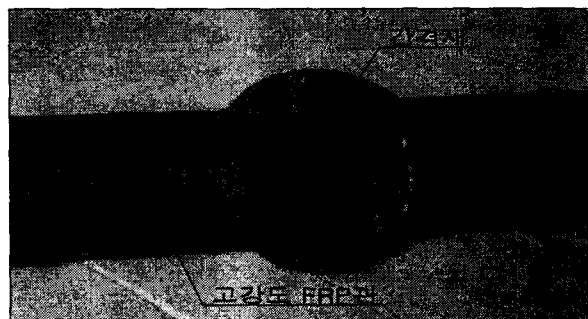
① 이탈리아 개발 제품(FRP Plate) : 1980년 중반



② 한국건설기술연구원 개발 제품(등각곡선형 FRP) : 1999.2

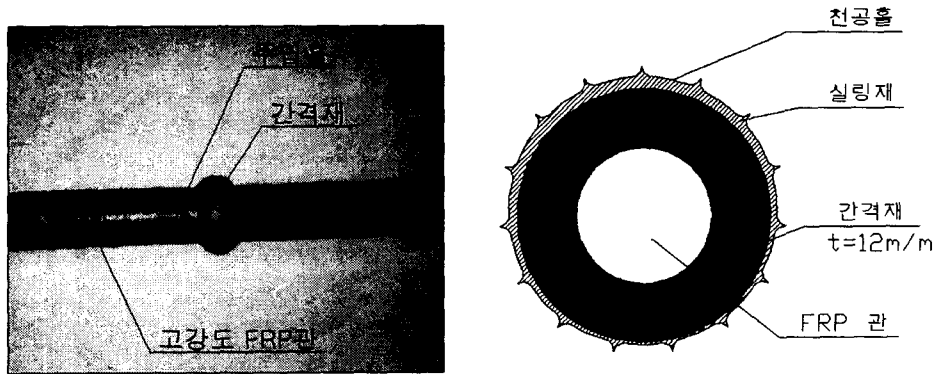


③ 본 연구시 개발 제품(고강도 FRP 파이프)



(2) 간격재

12mm이상의 두께로 설치되어 주입구 댐부를 보호하고 보강재를 천공홀에 중앙에 위치하기가 용이함



3. FRP관의 특성

3.1 제조 방법

본 연구에서 개발한 FRP관은 소재의 인장을 향상시키는 일방향성 유리섬유를 열경화성 수지에 함침시켜 파이프 형상의 형틀에 소정의 균일한 두께에 이를 때까지 래핑(Wrapping)한 후, 이 래핑된 일방향성 유리섬유의 상부에 소재의 내압을 향상시킨 유리섬유를 필라멘트 와인딩(Filament winding)하는 두 개의 복합공법을 일괄공정으로 거친 재료를 형틀과 함께 가열하여 열경화성수지를 경화시킨 후 경화된 성형품을 탈형하고 탈형된 성형품을 필요한 크기로 절단하는 공정으로 제조된다.

3.2 재료의 역학적 특성

본 연구에서 개발한 FRP재료의 역학적 특성을 확인하기 위해 한국화학시험연구원 토질재료센터에 재료시험을 의뢰하였으며 시험항목별 시험방법 및 결과는 <표 3.1> 과 같다.

표 3.1 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic) 재료시험

시험 항목	단 위	결 과 치	시 험 방 법	비 고
인 장 강 도	MPa	397	KSM 3305-96	한국화학시험연구원 토질재료센터
압 축 강 도	MPa	419	KSF 2243-94	
휨 강 도	MPa	427	KSF 2242-94	
인장탄성율	GPa	43.80	KSM 3305-96	
유리섬유함유량	%	71.6	KSF 2244-95	

3.3 실내 시험

기존의 터널 및 사면 보강공법의 주보강재인 강재(Steel)의 대체품으로서의 적용성을 평가하기 위해 지반붕괴 메카니즘을 고려하여 실내에서 FRP관의 휨강도시험, 인장시험을 실시하고 보강재로서의 적용성을 검토하였다.

(1) FRP관의 시험

시험에 사용되는 FRP관의 재료로는 Glass fiber로서, 본시험을 위하여 제작된 시편은 <그림 3.1>과 같이 2가지 종류로 구분 적용되었다. <그림 3.1>의 (a)는 FRP관에 그라우트재만 주입된 상태이고, (b)는 FRP관의 제조과정에 철심을 삽입하여 연성거동을 높인 것이다.



(a) FRP관에 그라우트재만 충전한 시편

(b) 철심이 매입된 FRP관의 시편

그림 3.1 FRP관의 시편 종류

(2) 휨강도 시험

① 시험 방법

지반이 붕괴 직전에 안정한 상태를 유지할 때 보강재는 전단저항을 받게되며 이러한 기능적인 성능을 확인하기 위하여 실내에서 휨강도시험(KS F 2407)을 실시하였다. 휨강도 시험은 FRP관과 이형강봉(steel bar)의 거동을 비교시험하여 지반붕괴시 발휘되는 저항력을 상대 비교하였다. 본 시험에서 이형철근은 현재 Soil Nailing 공법이나 Rock Bolt 공법에서 사용되고 있는 직경25mm 이형철근을 사용하였고, FRP관은 두께5mm 외경이 47mm인 시편을 사용하고, 취성을 보강하기 위하여 FRP관 둘레에 철심을 삽입한 시편도 포함하였다.

② 시험 결과

표 3.2의 시험결과 및 그림3.2의 하중-변위 곡선에 의하면, 사면보강재로 사용되는 이형철근의 경우 저항력은 0.8ton 정도까지는 선형적으로 증가하다가 이후에는 변형속도가 빨라지는 형태로 나타났으며 최대 1.5ton의 휨강도를 나타냈다. FRP관의 경우에는 3.5ton까지는 지속적으로 휨강도가 지속적으로 선형증가하는 양상을 나타내어 높은 강도를 보이고 약 3.8ton에서 최대값을 나타내어 철근보다 2.5배 크게 나타났다. 또한 철심매입형 FRP관의 경우에는 약 4.0ton 까지는 지속적으로 휨강도가 선형증가하는 양상을 나타내고, 약 4.3 ton에서 최대 값을 보이다가 극한 강도 이후에 Softening거동을 보여 잔류강도가 철근의 최대강도와 비슷한 1.5ton의 값을 나타내었으며 최대휨강도는 철근에 비하여 약 2.9배 크게 나타났다. 터널보강재로 사용되는 강관(Steel pipe)의 경우 저항력은 1.7ton 정도까지는 선형적으로 증가하다가 이후에는 변형속도가 빨라지는 형태로 나타났으며 최대값은 약 2.1ton의 휨강도를 나타냈다.

표 3.2 FRP관과 강관 및 철근의 휨강도 시험결과

구 분	규 격	휨강도 (ton)	비 고
강 관	φ 60.5mm t=4mm	2.10	KSF 2407
FRP관	일반관 φ 47mm	3.80	
	철심매입관 t= 5mm	4.30	
철 근	φ 25mm	1.50	

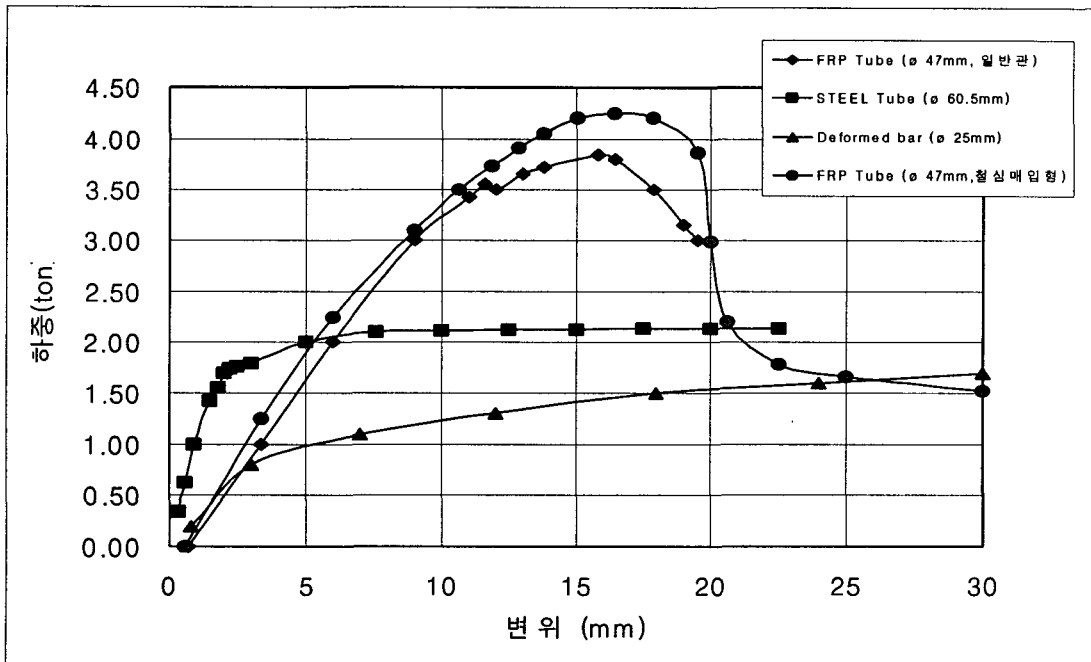


그림 3.2 휨강도 시험결과(하중-변위 관계)

(3) 인장강도 시험

① 시험 방법

지반 붕괴시에 암괴의 수직하향 및 수평이동으로 보강재가 받게되는 인장력을 확인하기 위하여 KSD 123-34에 따라 강봉과 FRP관을 시험하였다. FRP관은 속채움을 한 상태에서 시험이 실시되었다. 본 인장시험에서 사용된 시편은 휨강도 시험에서 사용된 시편과 동일하며 30cm 간격을 두고 양쪽에서 인장하였다.

② 시험 결과

그림 3.3은 3가지 시편에 대한 인장하중-변위의 관계를 보여준다. 시험결과 <표 3.3>은 실내시험 시 FRP관 시편의 크기 때문에 시험기기 그림에서 미끄러져 극한강도 값을 얻지 못한 값이며 그림에서 미끄러지기 전까지 구한 값으로는 강봉은 변위량이 35mm에서 25ton의 인장력을 보였고, 일반 FRP관은 27mm에서 17ton의 인장하중을 보였다. 따라서 FRP관을 이용한 보강공법 설계시의 인장하중은 설계하중이 통상 10ton 내외로 적용되므로 사면 또는 터널보강용으로 사용되어도 무방하다. 또한 강봉과 같이 높은 연성거동을 보이므로 급작스러운 붕괴로 인하여 많은 인명피해가 우려되는 곳이나, 영구보강재로 사용되는 토목구조물에도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

표 3.3 FRP관과 철근의 인장강도 시험 결과

구 분		규 격	인장강도 (ton)	비 고
FRP관	일반관	φ 47mm t= 5mm	17	KSD 123-34
	철심매입관		27	
철 근		φ 25mm	25	

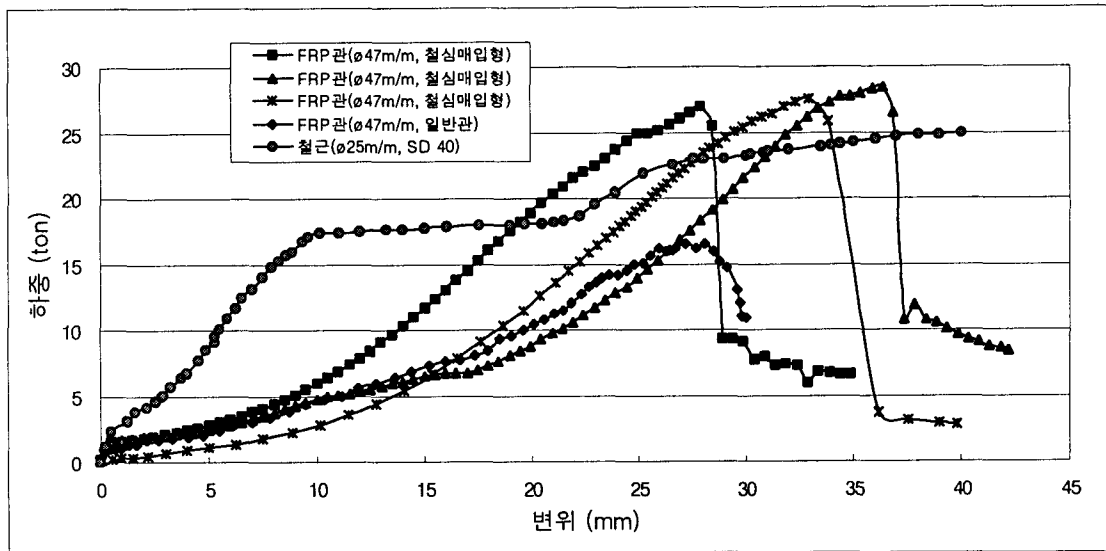


그림 3.3 인장강도 시험 결과

4. 결 론

(1) 고강도 FRP 관의 개발

신소재인 토목구조용(터널, 사면 및 가시설용) 재료로서 적용가능한 고강도 FRP관을 개발하였다.

(2) 휨강도 개선

휨강도 시험을 실시한 결과 속채움을 한 FRP관은 강봉(φ25mm)보다 약 2.5배 이상 더 크게 나타났고 강관(φ60.5mm)보다는 약 2.0배 이상 더 크게 나타났다.

(3) 인장강도 개선

지반붕괴시 FRP관이 받게되는 인장력을 검정하기 위해 실내 실물인장강도시험을 실시한 결과 일반 FRP관은 18.0ton 이상, 철심을 보강한 FRP관은 28.0ton 이상으로 이는 강봉의 인장력과 유사한 크기의 값을 나타내었다.

(4) 취성파괴의 개선

FRP관의 취성파괴를 개선하기 위하여 본 연구에서는 FRP관을 Uni-Direction Mat를 Pre-Preg

Wrapping과 Filament Winding의 두 공정을 일괄공정 처리하여 제작하였으며, 강재와 같은 거동을 얻기 위하여 FRP관 둘레에 철심을 매입하여 합성재료의 성질을 향상시킴으로서 극한강도에 도달한 이후에도 바로 절단이 되지 않고 잔류강도가 강봉의 최대 강도와 유사한 1.5 ton의 휨강도를 유지하여 강재와 동일한 연성거동을 보였다.

(5) 터널보강용 FRP관의 개발

기존의 터널굴착 보조공법인 강관다단 그라우팅공법, Pipe roof공법, Fore poling공법 및 Rock Bolt공법 등의 주보강재가 강재(steel)이기 때문에 발생할 수 있는 지하수 침투에 의한 보강재의 부식, 무거운 중량에 의한 작업성 저하, 터널 내부로 돌출된 강관 절단의 어려움, 보강재 삽입시 발생하는 주입구 밴딩부의 파손 등의 문제점을 해결할 수 있는 터널보강용 고강도 FRP관을 개발하였다.

(6) 사면보강용 FRP관의 개발

Soil Nailing공법, Rock bolt공법 및 Rock Anchor공법 등의 기존 사면보강공법의 천공홀 채움방식을 탈피한 그라우트재의 압력주입으로 토사층의 공극이나 암반 절리면 사이를 충전함으로써 지하수의 유입을 차단하여 붕괴원인을 제거하고 주변지반보강 효과 및 고강도 보강재(pipe)에 의한 빔효과를 얻을 수 있는 사면보강용 고강도 FRP관을 개발하였다.

(7) 시공 중 작업성 개선

보강재의 중량이 가벼워 위험한 비탈면 공사에서도 안전한 공사를 수행할 수 있으며, 터널굴착 작업시 돌출된 보강재의 절단시간을 단축함으로써 시공의 효율성을 높이고 터널의 주공정에 차질이 없도록 작업과정을 단순화 시켰다.

(8) 총체적인 보강효과 향상

고강도 FRP관에 의한 빔효과와 압력주입공법에 의한 절리면의 충전으로 지반활동에 대한 하중을 분담하고 지하수의 유입을 차단하여 추가적인 붕괴원인을 제거할 수 있으며, FRP관과 일체가 되도록 특수 제작된 간격재가 주입구 밴딩부를 보호하고 FRP관을 천공홀 중앙에 위치시킴으로써 주입에 의한 보강효과가 향상되었다.

참 고 문 헌

1. 한국지반공학회, 2000, FRP 보강 그라우팅 공법의 개발 연구 보고서.
2. 한국도로공사, 2000, FRP관을 이용한 사면보강공법 개발.
3. 이상덕 외 2인, 2000, FRP를 이용한 사면보강, 한국지반공학회 2000 사면안정 학술발표회 논문집, pp.153~180.
4. 박용원 외 4인, 2000, FRP 사면 보강 그라우팅공법의 현장 적용성 연구, 한국지반공학회 '00가을학술발표회 논문집, pp 143~150.
5. 황영철 외 4인, 2000, 토사사면에서의 FRP보강 그라우팅공법 적용성 평가, 대한토목학회 논문집, pp 571~574.
6. 박종호 외 4인, 2000, 지표물리탐사기법을 이용한 FRP보강 그라우팅 공법의 보강효과 확인에 관한 사례연구, 한국지반공학회 2000 봄학술발표회 논문집, pp.199~206.

7. 한국건설기술연구원, 1999, 터널보강재로서 FRP 적용성 연구.
8. 한국지반공학회, 1997, 지반공학시리즈 5 사면안정.
9. 대원토질(주), 1994, 강관보강형 다단 그라우팅공법의 개발.
10. 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.
11. Ortigao J.A.R., 1996, FRP applications in Geotechnical Engineering, *Materials for the New Millenium*, Proc. 4th Materials Engineering Conference, ASCE, pp. 535~544.
12. Rostasy FS & Scheibe M, 1995, Aspects of laboratory testing to determine mechanical properties of FRP, 2nd International RILEM Symp. on Non-metallic FRP Reinforcement for Concrete Structures, pp. 116~123.