

FRP 그라우팅 보강지반의 전단특성에 관한 연구

Study on Shearing Properties and Behavior of the Grout-reinforced Underground with FRP Pipes

최 용 기 ^{*1}	Choi, Yong-Ki	박 종 호 ^{*2}	Park, Jong-Ho
권 오 엽 ^{*3}	Kwon, Oh-Yeob	이 상 덕 ^{*4}	Lee, Sang-Duk

Abstract

Nowadays, the grouted-reinforcing method, which is called FRP(Fiberglass-reinforced-plastic) pipe reinforcing method, has been introduced in the community of ground reinforcements. The resistance to corrosion and chemical attack, high strength to weight ratio, and ease of handling make these pipes a better alternative to steels in tunnel. However, to fully utilize FRP pipes as grouted reinforcing members at the face and the crown in tunnel, their mechanical properties and behaviors and the grout-reinforced underground have to be verified. Laboratory shear tests were conducted to evaluate the mechanical properties for FRP pipes, the grout-reinforced members and the grout-reinforced body of FRP pipes. According to the test results, it was observed that FRP pipes play a dominant role in shearing behavior of the grout-reinforced members and that their shearing resistance exerts after the shearing displacement increases to some extent.

요 지

최근에 FRP보강 그라우팅 공법이라 불리는 보강공법이 터널 및 절취사면의 지반보강 분야에 도입되어 적용이 확대되고 있다. FRP관은 부식 및 화학적 내성이 우수하고 무게에 비하여 강도가 우수하여 취급이 용이하여 기존의 터널 보강재인 강재의 좋은 대체품이 될 수 있다. 그러나 FRP관이 터널의 막장 및 천단부의 보강재로서 적용성을 입증하기 위해서는 보강재 및 보강지반에 대한 역학적 강도특성이 명확하게 평가되어야 한다. 따라서, 본 논문은 지반보강 메카니즘을 고려한 FRP관을 이용한 그라우트체 및 그라우팅 보강지반에 대한 전단특성을 평가하기 위하여 실내에서 그라우트체에 대한 양면 전단시험과 보강지반에 대한 직접전단시험을 실시하였다. 시험결과 FRP 그라우트 보강지반의 전단저항은 FRP관의 전단강도에 크게 의존하며 FRP 그라우트체의 자체 전단저항은 어느 정도 전단변위가 커진 후에 발휘되는 것으로 확인되었다.

Keywords : Fiber-reinforced members(FRP), Shearing strength of FRP pipe, Grout-reinforced composites

*1 정회원, 대원토질(주) 대표이사 (Member, President, Daewon Soil Co., Ltd., 04choi@korea.com)

*2 정회원, 대원토질(주) 전무이사 (Member, General Director, Daewon Soil Co., Ltd.)

*3 정회원, 건국대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kunkuk Univ.)

*4 정회원, 아주대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Ajou Univ.)

1. 서론

최근에 해외 및 국내에서 많은 토목기술자들은 신소재인 복합소재를 이용한 강화 플라스틱(FRP, Fiber Reinforced Plastics)이 가볍고 강도가 우수하며 내부식성 및 내화학성을 가지고 있기 때문에 건설분야에 적용하는 방안을 매우 적극적으로 연구검토하고 있으며 이미 여러 지역에서 구조물 및 지반보강 분야에 상당수 적용하고 있다. 복합소재는 흔히 섬유강화 플라스틱 즉, FRP로도 불린다. 섬유강화 복합소재는 크게 강화섬유와 수지로 구성된다. 섬유재료는 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유 등 원재료와 제조방법에 따라 매우 다양하며, 수지재료는 크게 열경화성 수지와 열가소성 수지로 나눌 수 있고 그 종류로는 폴리에스터, 비닐에스터, 에폭시, 페놀 등으로 구조물이 요구하는 기계적, 물리적 특성에 따라 선택하여 사용할 수 있다. 국내에서는 절취사면의 안정화대책으로서 불포화 폴리에스테르수지를 유리섬유(Glassfiber)와 혼합 성형한 GFRP(이후 "FRP"라 칭함)관을 이용한 그라우팅 공법이 개발되어 활발히 적용되고 있다. 그러나 지반보강 메커니즘을 고려한 FRP 보강재 및 FRP 그라우트 보강지반의 전단특성에 대한 연구자료가 부족한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 FRP 그라우체에 대한 양면 전단시험과 FRP 그라우트 보강지반에 대한 직접전단시험을 실시하여 FRP관을 이용한 그라우트 보강지반의 전단 거동 및 특성을 종합적으로 평가하였다.

2. 시험지반 및 FRP 그라우팅 재료

2.1 시험 지반의 기본 물성

시험 지반은 가압 그라우팅시 어느정도 다짐되어 점착력을 갖는 화강풍화토로 시험하는 것이 적당할 것으로 판단되어 일반적으로 접하기 쉬운 화강풍화토를 일정한 정도로 다짐하여 조성하였다. 시험지반의 기본 물성을 파악하기 위하여 본시험에 앞서 입도 분석, 다짐시험, 액·소성한계시험, 비중시험 및 직접전단시험 등을 실시하였다. 시험결과 시험에 사용된 지반은 세립분을 비교적 많이(약 36%) 포함하는 SC지반으로 최적함수비는 12.5%이고 최대건조단위 중량은 1.93g/cm^3 으로 측정되었다. 액성 및 소성 한계는 각각 43.2%, 20.7%이고 비중은 2.67g/cm^3 로 분석되었으며, 직접전단시험 결과 최대

강도에 의한 내부마찰각과 잔류강도에 의한 내부마찰각은 40° 와 35° , 점착력은 각각 0.35kgf/cm^2 과 0.16kgf/cm^2 로 측정되었다.

2.2 주입재의 물성 및 강도특성

주입재는 FRP보강 그라우팅에서 지반보강 및 차수재로서 FRP관 외에 중요한 설계인자로 작용하고 있으며, 시멘트는 대표적인 그라우팅 재료로서 토사 및 암반의 공극 또는 균열에 대한 주입에 많이 사용되고 있고 고강도 발현과 무수축재의 역할을 할 수 있는 혼화재를 첨가하여 FRP보강 그라우팅의 주입재로 사용한다. 본 시험에 사용된 초속경시멘트는 보통 포틀랜드시멘트에 존재하지 않는 수화활성도가 높고 안정한 수화물을 생성시키는 $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$ 을 다량 함유하고 있어 수화반응시 매우 빠른 속도로 침상 결정의 3차원적 망목구조를 형성하는 고허산염인 Calcium sulfoaluminate 수화물을 생성시켜 수시간 내에 높은 강도를 발현하게 된다.

그라우트체와 동일한 조건하에서 양생시킨 공시체에 대하여 일축압축강도시험을 실시한 결과 일축압축강도는 80kgf/cm^2 , 변형율은 대략적으로 8×10^{-4} 정도로 측정되었다.

2.3 FRP의 특성

FRP는 유리섬유를 주보강재로 하여 불포화 폴리에스테르 수지를 함침가공한 복합 구조체로서 강재보다 가볍고 알루미늄보다 강하여 지반보강재로서 steel보다 큰 장점을 가지고 있다. 우선 steel에 비하여 비중이 1/5이므로 가볍고 튼튼하여 제작, 운반 및 시공이 용이하다. 내산성, 내 알칼리성이며 부식에 대한 내성이 우수하여 지반 보강재로서 지하수에 대한 영향을 적게 받기 때문에 영구적인 사용이 가능하다. 충격이나 압력에 대하여 복원력이 우수하며, 외부의 물리적, 화학적 작용에 의한 변화가 거의 없다.

본 연구에서는 국내에서 개발한 UDMat + filament winding 방식으로 제조한 외경 47mm, 내경 37mm의 FRP관을 사용하였으며, FRP 보강재의 역학적 특성은 표 1과 같다.

표 1. FRP의 역학적 특성

구 분	단위	결과치	시험방법	비 고
유리섬유 함량	%	71.6	KSF 2244-95	한국화학 시험연구원 토목재료 센터
인장 강도	MPa	366	KSF 2241-99	
인장 탄성율	GPa	53.6	KSF 2241-99	
압축 강도	MPa	254	KSF 2243-99	
휨 강도	MPa	471	KSF 2242-99	
면내 전단강도	Mpa	183	KSF 2248-99	

3. FRP관의 전단특성

3.1 개요

지반의 붕괴는 지반의 상태와 불연속면의 형상 및 배치에 따라 여러 가지 형태로 발생된다. 이와 같은 지반의 파괴를 방지하여 안전성을 확보하는 방법으로 앵커, 네일링 그리고 FRP 보강 그라우팅 공법 등이 적용된다. 이 중에서 FRP 보강 그라우팅공법으로 보강한 지반의 파괴시 변위에 따른 저항력은 초기 변위 발생직전까지 주로 FRP관과 구근의 전단력이 대부분을 지지하게 된다. 따라서 본 연구에서는 FRP 그라우트체의 전단저항능력을 알아보기 위하여 FRP 그라우트체에 대한 전단강도를 측정하였다. 이를 위하여 양면 전단개념의 전단시험기를 이용하여 다음의 전단저항력을 측정하였다.

- ① 그라우트체(초속경시멘트)의 전단강도
- ② FRP(충전 안한 상태)관의 전단강도
- ③ FRP(그라우트재로 충전)관의 전단강도
- ④ FRP(충전)관+그라우트체의 전단강도

3.2 실험 장치

양면 전단 실험기는 압체가 절리를 따라 활동을 일으킬 때에 FRP보강 그라우트체의 전단저항능력을 측정하기 위하여 아주대학교 토목기술연구센터에서 개발한 장비를 본 연구에 이용하였다. 두께 100mm로 제작한 전단틀을 설치하고, 전단틀 사이에는 전단체를 위치시키며, 전단시 전단틀 내부 지점 팽창과 FRP관의 휨 파괴 방지를 위해 전단틀 양측 외부에 각각 두께 30mm의 철판을 부착하였다. 그리고 각 틀 사이에는 판베어링을

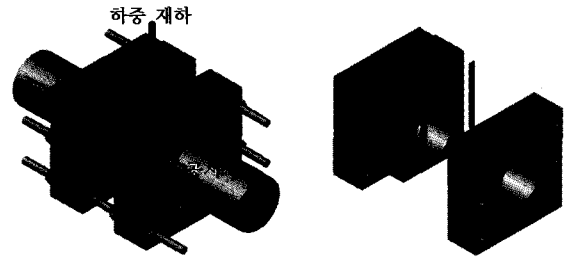


그림 1. 양면 전단 시험기의 구성

설치하여 전단방향의 마찰을 최대한 제거하였다. 본 양면 전단 시험기는 최대 직경 140mm까지의 공시체에 대한 전단저항력을 측정할 수 있으며, UTM(Universal Test Machine)으로 하중을 재하하면서 구근의 전단저항력을 측정하도록 고안하였다.

3.3 전단 실험

FRP관의 전단강도를 구하기 위해 FRP관 자체와 내부를 충전한 상태의 FRP관의 전단저항력은 물론 그라우팅한 복합체의 전단저항력과 또한 그라우트재의 전단강도를 측정하였다. 또한, 그라우트체(초속경시멘트)에 대한 실험에서 최대전단저항값($P_{cmt-max}$)을 측정하여 초속경시멘트의 전단응력값($\tau_{cmt-max}$)을 구하고 이를 토대로 각각의 실험에서 FRP관의 전단강도를 구하였다. 이 때의 전단은 양면에서 발생되었으므로 전단저항값은 최대 전단저항측정치의 절반을 취하였다.

3.3.1 그라우트체의 전단특성

순수한 주입재(초속경시멘트)만의 전단저항력을 구하기 위하여 FRP 보강 그라우팅 구근과 동일한 배합비로 전단틀 내부에 직경 140mm로 그라우트체 시편을 제작하여 양면 전단실험을 실시하였다. 이 경우 전단에 대해서 그라우트체가 저항하게 되며 전단체에 재하량이 증가함에 따라 전단저항력은 급격한 증가를 보이며, 최대전단저항력($P_{cmt-max}$)은 변위가 2.67mm(전단변형율 1.9%)일 때에 나타나고 그 이후에 저항력은 지속적인 감소를 나타낸다. 이 때의 양면의 최대전단측정치가 13.32tf이므로 단면의 최대전단저항력($P_{cmt-max}$)은 6.66tf이며, 그라우트체의 전단강도($\tau_{cmt-max}$)는 43.26 kgf/cm²이었다(그라우트체 단면적 $A_{abc} = 153.94\text{cm}^2$).

$$\tau_{cmt-max} = \frac{P_{cmt-max}}{A_{abc}} \quad (1)$$

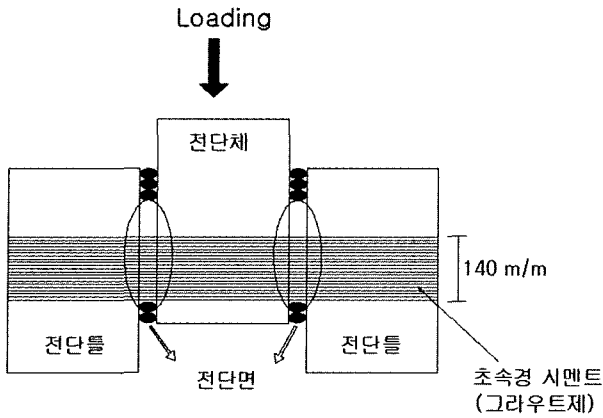


그림 2. 그라우트제 전단실험 모식도

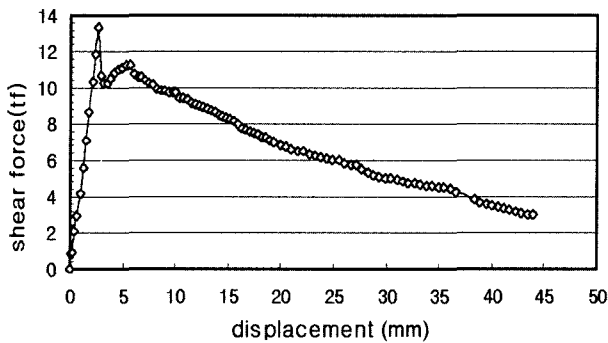


그림 3. 그라우트제의 전단력-변위(단면)

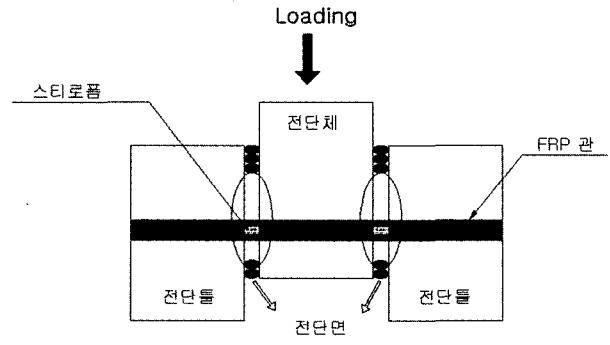


그림 4. 미충전 FRP관 전단실험 모식도

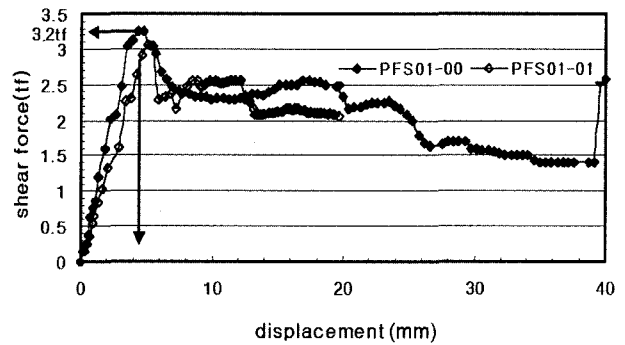


그림 5. 미충전 FRP관의 전단력-변위(단면)

3.3.2 미충전 FRP관의 전단특성

FRP관의 전단저항력을 측정하기 위하여 FRP관 내부의 전단면 위치에 전단강도를 무시할 수 있는 스티로폼을 설치하고 다른 부분은 초속경 시멘트로 충전하여 전단틀에 FRP관만 정중앙에 위치시키고 미충전 상태의 FRP관(PFS01-00 및 PFS01-01)의 양면 전단실험을 2회 실시하였다.

실험 결과 전단저항력은 최대치($P_{FRP-max}$)에 도달한 직후 급격히 감소하다가 변위가 계속됨에 따라 점진적으로 감소하는 경향을 나타내었다.

이 때의 양면의 최대전단측정치가 6.4tf이므로 단면의 최대전단저항력은 변위가 약 4~5mm일 때 3.2tf으로 환산되었다. 따라서 순수한 FRP관의 최대 전단저항력($P_{FRP-max}$) 즉, 전단강도($\tau_{FRP-max}$)는 484.85kgf/cm²으로 나타났다(FRP관의 단면적 $A_b = 6.60\text{cm}^2$).

$$\tau_{FRP-max} = \frac{P_{FRP-max}}{A_b} \quad (2)$$

3.3.3 그라우트제 충전 FRP관의 전단특성

전단틀 중앙에는 관의 내부를 주입재로 충전한 FRP관을 위치시키고 전단면에는 주입재로 충전된 FRP관을 위치시킨 후, 양면 전단실험을 실시하면 전단에 대해서 FRP관 + 내부충진재가 저항하게 된다. 실험결과 양면의 최대전단측정치가 7.0tf이므로 단면의 최대전단저항력($P_{FRP+주입재-max}$)은 전단변위가 4.8~5.6mm(전단변형율 3.4~4%)일 때 3.5tf으로 환산되며, 하중-변위 관계는 전단저항력이 최대치에 도달한 직후에 급격히 감소하고 전단변형이 계속 증가되면 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 그라우트재로 충전된 FRP관의 전단강도($\tau_{FRP+주입재-max}$)는 201.73kgf/cm²으로 나타났으며, 그라우트재의 전단응력값을 토대로 FRP관의 전단강도($\tau_{FRP-max}$)를 다음의 수식을 이용하여 계산하면 459.84kgf/cm²이다(내부 충전재의 단면적 $A_c = 10.75\text{cm}^2$).

$$\tau_{FRP-max} = \frac{P_{FRP+주입재-max} - A_c \times \tau_{cmt-max}}{A_b} \quad (3)$$

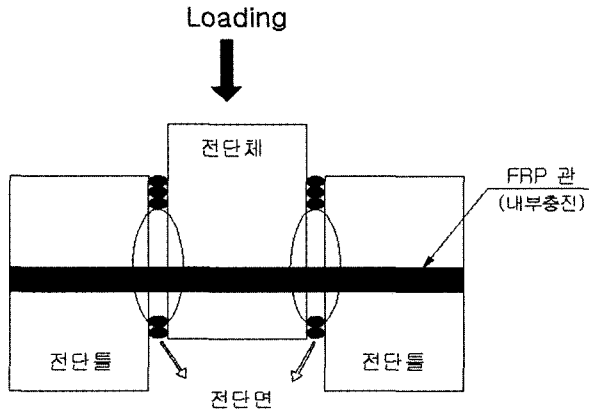


그림 6. 그라우트재 충전 FRP관의 전단시험 모식도

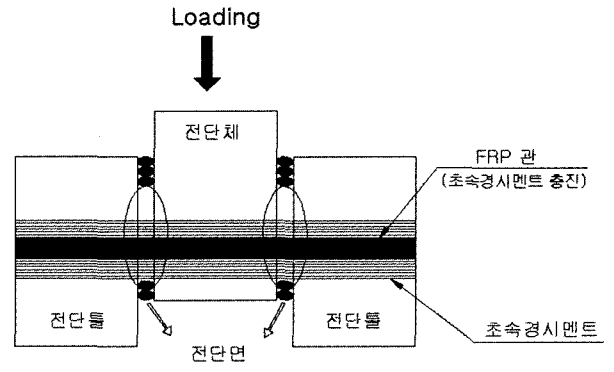


그림 8. FRP 그라우트 복합체의 전단시험 모식도

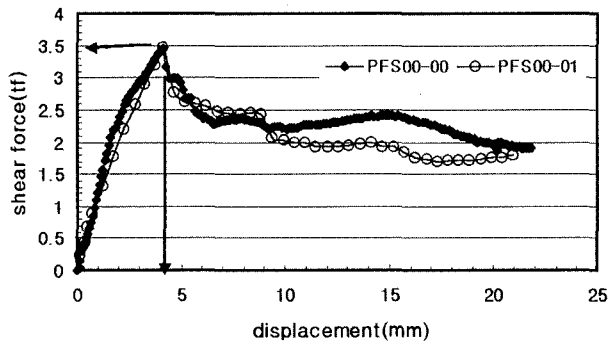


그림 7. 그라우트재 충전 FRP관의 전단력-변위(단면)

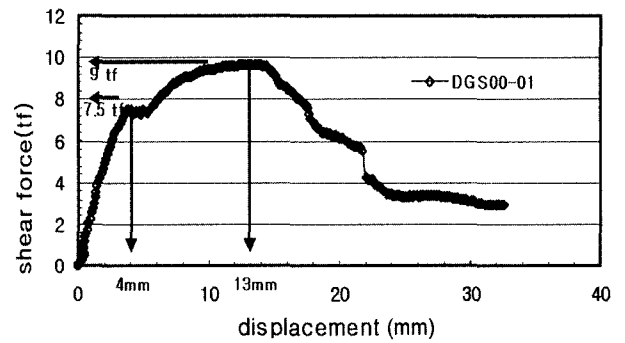


그림 9. FRP 그라우트 복합체의 전단력-변위(단면)

3.3.4 FRP 그라우트 복합체의 전단특성

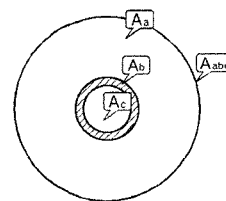
FRP 구근을 전단틀 내부의 정중앙에 위치시키고 FRP와 전단틀 내부에 초속경시멘트를 충전시킨 후 양면 전단시험을 실시하였다.

전단저항력은 전단 변위가 4mm(전단 변형율 2.8%)에서 7.5tonf의 전단저항력을 나타낼 때까지는 직선에 가까운 증가를 보이며 전단저항력이 주춤하였다가 다시 증가한다. 이 때의 양면의 최대전단측정치가 18.0tf 이므로 단면의 최대전단저항력($P_{cmt+FRP+주입액-max}$)은 변위가 약13mm(전단 변형율 9%)일때에 9.0tf으로 환산되며, 최대전단저항력 이후에는 점진적으로 저항력이 감소하는 경향을 나타내었다. FRP 그라우트 복합체의 전단강도($\tau_{cmt+FRP+주입액-max}$)는 58.46kgf/cm^2 으로 나타났으며, 그라우트재의 전단응력값을 토대로 FRP관의 전단강도($\tau_{FRP-max}$)를 다음의 수식을 이용하여 계산하면 402.81kgf/cm^2 이다.

$$\tau_{FRP-max} = \frac{P_{cmt+FRP+주입액-max} - (A_{abc} + A_c) \times \tau_{cmt}}{A_b} \quad (4)$$

3.4 FRP관과 그라우트 복합체의 전단강도 분석

전단력-변위 그래프 및 단면에 의한 분석 결과를 정리하면 표 2와 같다. 그라우트재 충전 FRP관에 대한 시험편의 전단강도 값은 계산값에 비하여 4.5%, FRP 그라우트 복합체의 전단강도 값은 계산값에 비하여 6.0% 작게 측정되었다. 이것은 최대전단강도 값을 갖는 변위값이 서로 다르기 때문으로 판단되며, 복합체의 전단강도는 각 부분의 전단강도의 합계에서 큰 차이가 나지 않는다는 것을 알 수 있다.



단 면	비 고
$A_{abc} = 153.94\text{cm}^2$	전체단면 = $A_a + A_b + A_c$
$A_a = 136.59\text{cm}^2$	그라우트재
$A_b = 6.60\text{cm}^2$	FRP관
$A_c = 10.75\text{cm}^2$	내부 충전

그림 10. FRP관과 그라우트 복합체의 단면 구분

표 2. FRP관과 그라우트 복합체의 전단강도 분석

시 편	단면적	실험 값	계산 값
그라우트체	A_{abc}	6,660kgf	$Scem = Pcent / A_{abc}$ $= 43.26kgf/cm^2$
FRP관	A_b	3,200kgf	
FRP관 + 내부충진	$A_b + A_c$	3,500kgf	$PFRP + A_c \times Scemt$ $= 3,665kgf$
그라우트 복합체	$A_a + A_b + A_c$	9,000kgf	$PFRP + (A_a + A_c) \times Scemt = 9,574kgf$

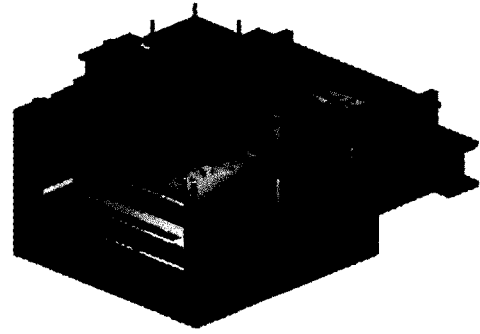


그림 11. 대형 직접전단 시험기

4. FRP보강 그라우팅 지반의 전단특성

4.1 개요

일반적으로 흙지반을 FRP관을 이용한 그라우팅 공법으로 보강하면 지반의 전단강도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 지반보강효과는 그라우팅에 의한 지반내 공극충진효과와 압력그라우팅에 의한 지반다짐효과 및 FRP 그라우트체의 전단저항능력에 의해서 발생된다. 이중에서 FRP 그라우트체의 전단저항능력은 설계에 직접적으로 반영할 수 있는 값이다. 따라서 본 연구에서는 1m³의 화강풍화토지반을 일정한 다짐상태로 조성하고 실제 현장과 동일한 방법으로 천공하고 압력 그라우팅한 후에 그라우트재가 양생되기를 기다렸다가 직접전단방식으로 전단시험을 실시하여 지반보강효과를 확인하였다. 이 때에 단위 면적당 FRP 보강그라우팅 효과를 알아보기 위하여 1m³(1m×1m×1m)의 토체를 1, 2, 3개의 FRP로 각각에 대해서 수직압력을 3가지로 변화시키면서 전단시험을 실시하여 파괴포락선을 그려서 강도정수를 구하였고 무보강상태에서도 전단시험을 실시하여 FRP보강 그라우팅에 의한 지반보강효과를 정량적으로 확인하였다.

4.2 실험 장치

시험 토체는 아주대학교에서 개발한 대형직접전단시험기의 전단박스에 일정한 에너지로 다짐하여 조성하였으며, 이렇게 조성된 토체에 천공하고 실제 시공과 동일한 압력, 재료 및 배합비를 적용하여 그라우트 보강하였다. 아주대학교 지반공학연구실에서 개발하여 사용중인 대형 직접전단시험기의 외관은 그림 11과 같으며 최대 가능 수직응력 및 전단응력은 각각 50t/m², 100t/m²이다. 수직력은 에어백이나 실린더를 이용하여 재하할 수 있

도록 되어있다. 공기압을 이용한 수직력의 재하는 전단시에 지반의 자유스런 변형에 의해서 상판이 기우는 문제가 있다. 반면에 상부의 실린더 시스템을 이용하면 상판이 기우는 것을 방지 할 수 있다. 시험기는 1.0m³ 용량의 전단상자에 시료를 조성하여 KS F2343의 직접전단 시험과 같은 방법으로 직접전단시험을 수행할 수 있도록 고안되었으며 통상적으로 사용하는 소형 직접전단시험에서와 비슷하거나 조금 더 큰 응력수준에서 시험할 수 있다. 또한 큰 하중(수직력 50ton, 전단력 100ton)에서 변형되지 않도록 특수한 형태로 설계 제작하였다.

4.3 전단 실험

4.3.1 무보강 지반의 전단 거동

무보강 상태로 실시한 전단시험에서는 수직응력을 1.0, 2.0, 3.0kgf/cm²로 변화시키면서 시험하였으며 각각에 대한 전단응력-전단변위 관계는 그림 12와 같다. 여기에서 수직응력이 클수록 전단저항력이 커지며, 대체로 초기에 전단저항력이 급격히 증가하였으나 점차 증가율이 작아져서 완만하게 증가하는 양상을 나타내고 있다. 무보강지반의 경우 각 전단응력-전단변위 그래프에서

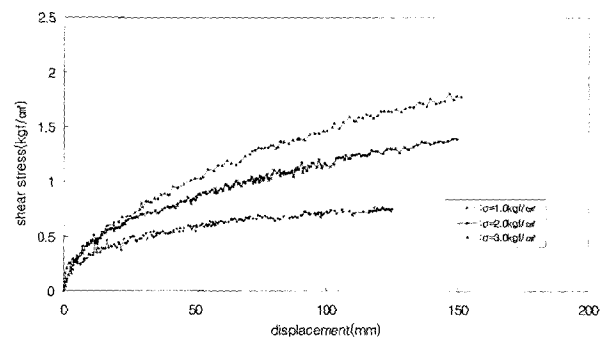


그림 12. 무보강지반의 전단응력-전단변위

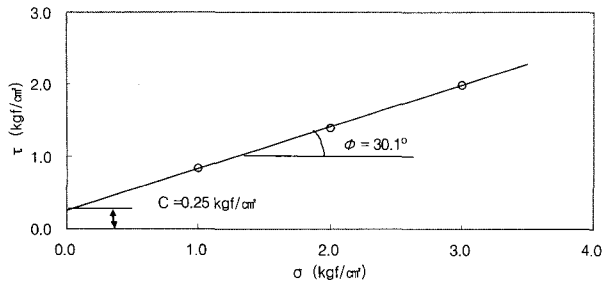


그림 13. 무보강지반의 파괴포락선

전단강도의 선정은 전단변위에 따른 전단응력의 증가율이 급격히 줄어드는 위치의 전단응력으로 정하였다. 이 때의 수직응력과 전단강도와의 관계로부터 파괴포락선을 그려서 구한 강도정수는 점착력 0.25kgf/cm^2 , 내부마찰각이 30.1° 이다. 이는 KS규정에 의한 값 즉, 점착력 0.35kgf/cm^2 , 내부마찰각 40° 보다 다소 작은 전단강도가 측정되었으며, 이는 시료의 크기와 재하속도 등의 원인에 기인하는 것으로 추정된다.

4.3.2 FRP보강 그라우팅 지반의 전단 거동

1m^2 의 토체에 FRP관 1개, 2개, 3개를 설치하고 그라우팅으로 보강한 상태에서 수직응력을 $1.0, 2.0, 3.0\text{kgf/cm}^2$ 로 하여 분당 1mm 의 속도로 전단시험을 실시한 결과, 전단응력-전단변위 관계는 그림 14~그림 16와 같다. 여기에서 수직응력이 클수록 전단저항이 커졌으며 전단저항력이 초기에 급격히 증가하다가 점차 증가율이 작아지는 것은 무보강에서와 비슷하나 무보강에서 보다 응력의 수렴 경향을 찾기가 더 어려웠다. 이것은 FRP의 보강효과가 지속되었기 때문으로 추정되었다.

무보강지반의 경우는 최대곡률점을 지나서 전단응력의 증가율이 완만히 감소하나 FRP 보강지반의 경우, 최대곡률점으로 판단되는 지점을 지나서 일정구간 선형에 가까운 증가를 보이다가 전단이 더욱 진행되면 오히려 응력증가율이 증가하였다. 즉, 변위 초기에는 무보강 지반에서 처럼 지반자체가 전단에 대하여 저항하고, 최대곡률점을 지난 후부터 비로서 FRP 주변지반의 수동 저항이 나타나고 전단변위가 크게 진행되면 FRP 그라우트체의 전단저항력이 발휘되는 것으로 추정되었다. 따라서 FRP 보강지반의 강도정수는 변위 초기의 최대 곡률점과 전단응력의 증가율이 감소하다가 증가되는 위치에서의 전단응력으로부터 구하였다.

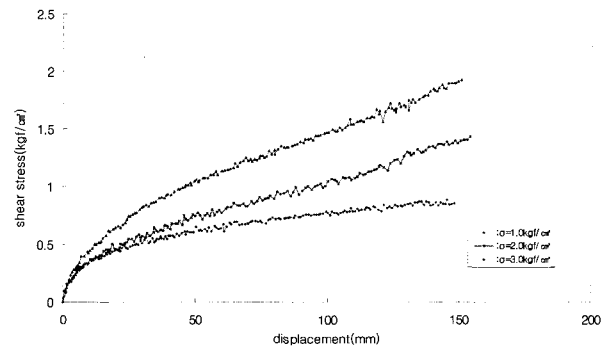


그림 14. FRP 1개 보강지반의 전단응력-전단변위

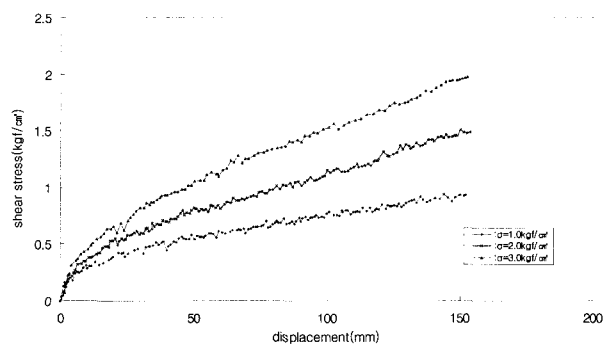


그림 15. FRP 2개 보강지반의 전단응력-전단변위

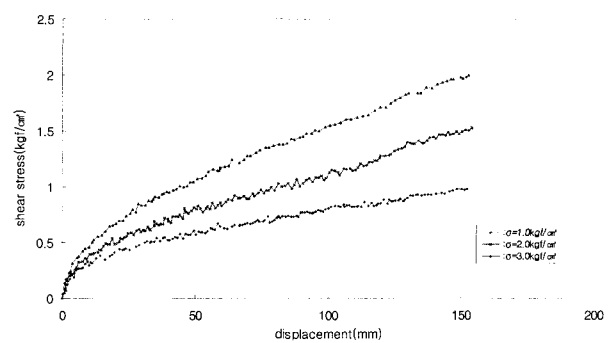


그림 16. FRP 3개 보강지반의 전단응력-전단변위

4.3.2.1 최대 곡률점에 의한 전단 강도

최대 곡률점에 의한 전단강도정수를 결정하기 위하여 전단응력-전단변위 곡선으로부터 최대 곡률점에서의 전단응력을 선택하였다.

그림 13과 그림 17의 파괴포락선으로부터 FRP보강에 따른 지반의 전단강도 변화를 한눈에 볼 수 있다. 여기에서 FRP의 지반보강에 따른 전단강도 증가는 내부마찰각 보다는 점착력의 증가에 기인하는 것으로 나타났다. 표 3은 전단응력 곡선의 최대 곡률점을 기준으로 구한 전단강도 및 강도정수이다.

표 3. 최대 곡률점에 의한 FRP보강 지반의 강도정수

구분	수직응력 (kgf/cm ²)	전단응력 (kgf/cm ²)	점착력 (kgf/cm ²)	내부마찰각 (φ)
FRP 1개	1.0	1.01	0.38	29.9
	2.0	1.41		
	3.0	2.16		
FRP 2개	1.0	1.04	0.43	29.9
	2.0	1.51		
	3.0	2.19		
FRP 3개	1.0	1.07	0.46	29.7
	2.0	1.53		
	3.0	2.21		

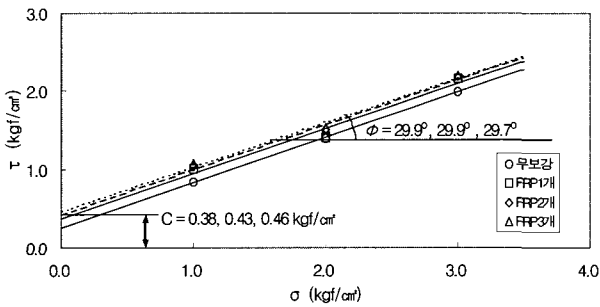


그림 17. FRP보강에 따른 파괴포락선(최대 곡률점)

표 4. 변곡점에 의한 FRP보강 지반의 강도정수

구분	수직응력 (kgf/cm ²)	전단응력 (kgf/cm ²)	점착력 (kgf/cm ²)	내부마찰각 (φ)
FRP 1개	1.0	1.39	0.57	38.5
	2.0	2.11		
	3.0	2.98		
FRP 2개	1.0	1.45	0.62	38.8
	2.0	2.19		
	3.0	3.06		
FRP 3개	1.0	1.51	0.65	39.7
	2.0	2.24		
	3.0	3.17		

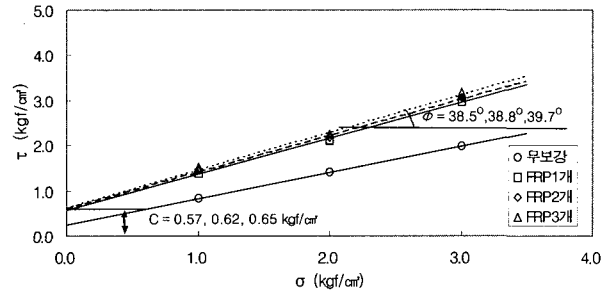


그림 18. FRP보강에 따른 파괴포락선 변화(변곡점)

4.3.2.2 변곡점에 의한 전단 강도

전단변위-전단응력 곡선에서 변곡점을 선택하기 위하여 일정 수직응력의 응력곡선을 겹쳐보면 무보강지반의 응력곡선과 비교할 때 대략적인 변곡점을 선택할 수 있다. 전단응력 곡선의 변곡점을 기준으로 얻은 전단강도 및 강도정수는 표 4와 같다.

4.3.2.3 FRP 그라우팅 갯수의 영향

FRP의 보강에 따른 전단강도의 증가는 뚜렷하지만 보강된 FRP의 갯수가 증가함에 따른 전단강도의 증가는 갯수에 비례하지는 않았다. 이것은 FRP를 2개, 3개 보강할 때에 전단방향에 대해 직각인 방향으로 일렬로 배치하여 FRP 배치 선상에서 균열이 발생되었기 때문으로 추정되며, 전단시험 후 해체과정에서 발생된 균열을 확인할 수 있었다. 앞서의 결과분석과 같이 최대곡률점과 변곡점에서의 전단강도로 나누어 FRP 그라우팅 갯수가 증가함에 따른 강도정수의 변화를 분석했다. 이 때 FRP 보강 갯수에 따른 전단강도의 증가효과는 보강 단면적이 적은데 비해 FRP보강 수량이 많았기 때문에 보강 갯수에 의한 강도증가 효과가 작게 나타난 것으로 판단된다.

변곡점을 기준으로 판단한 FRP 그라우팅에 의한 전

단강도 증가는 보강지반의 초기 변형시의 전단저항에 해당하며, 지반 자체의 전단강도가 주요한 전단저항으로 작용하는 것으로 판단된다. FRP그라우팅 보강지반의 내부마찰각은 거의 변화가 없었으나, 점착력은 52%의 증가를 나타내었다. FRP그라우팅 보강지반에서 전단초기에는 지반이 전단에 대해 저항하고 그 후에는 FRP 그라우트체에 의한 수동저항이 가세되며 전단변형이 어느 정도 경과하였을 때 비로소 FRP 그라우트체 자체의 전단저항이 증가되는 것으로 판단되었다. 이와 같이 FRP 그라우트체의 전단저항이 발휘되기 시작하는 전단변형량은 지반의 종류에 따라 달라질 것이다. 표 5와 표 6의 결과에 의하면 일정변형이 발생한 변곡점을

표 5. FRP 그라우팅 갯수에 따른 점착력 변화

구분	점착력 (kgf/cm ²)		증가율 (%)		상대증가율 (%)	
	기준	변곡점	기준	변곡점	기준	변곡점
보강갯수	0.25		-		-	
1	0.38	0.57	52.0	128.0	52.0	128.0
2	0.43	0.62	72.0	148.0	20.0	20.0
3	0.46	0.65	84.0	160.0	12.0	12.0

표 6. FRP 그라우팅 개수에 따른 내부마찰각 변화

구분 기준 보강갯수	내부마찰각 (deg)		증가율 (%)	
	최대곡률점	변곡점	최대곡률점	변곡점
0	30.1		-	
1	29.9	38.5	-0.7	27.9
2	29.9	38.8	-0.7	28.9
3	29.7	39.7	-1.3	31.9

기준으로 판단한 FRP보강 그라우팅 지반의 강도정수는 내부마찰각은 27.9%, 점착력은 128%의 증가를 나타내었다.

5. 결론

FRP관과 FRP 보강 그라우트체에 대한 양면 전단시험결과와 FRP보강 그라우팅 지반에 대한 직접전단시험연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) FRP 그라우트체의 전단저항은 FRP관의 전단강도에 크게 의존하며 FRP관은 내부가 충전된 상태에서 전단저항이 크게 측정되었다.
- (2) FRP관은 직경 47mm인 경우에 약 3.2 tonf 정도의 전단저항을 할 수 있으며, 비교적 적은 전단변위에서 최대치에 도달되었고 그 이후에는 변위가 진행될수록 전단저항이 비교적 완만하게 감소하였다.
- (3) 주입재로 충전된 FRP관은 약 3.5tonf 정도의 전단저항을 보였으며, 내부에 충전된 주입재의 전단저항능력은 10% 미만으로 미약한 편이었다.
- (4) 직경 140mm의 천공공간을 채운 충전재는 취성거동을 보이며 순수 그라우트체의 전단저항력은 약 6.66 tonf 정도이었으며 그 자체의 전단강도는 43.3 kg/cm^2 정도가 되었다.
- (5) 직경 47mm의 FRP관을 사용하고 천공직경이 압력주입에 의한 영향으로 140mm로 확공 되었을 경우에 FRP 그라우팅 복합체는 약 9tonf 의 전단저항을 나타냈으며 이는 위의 (3)과 (4)의 합한 크기 정도이므로 각 부재의 전단저항을 각각 적용하여 예측할 수 있음이 확인되었다.

- (6) 그라우팅 복합체의 전단저항은 (FRP관 + FRP내부 충전재 + 그라우트체)의 종합적인 저항으로 구성되며 설계에서는 각각의 전단저항력을 구한 후 합산하여 적용할 수 있다.
- (7) FRP보강 그라우팅 지반에 대한 전단강도증가는 내부마찰각에 의한 것이 아니라 점착력의 증가에 기인하는 것으로 나타났다.
- (8) 지반의 전단이 어느 정도 진행된 상태에서는 FRP보강 그라우팅 효과에 의하여 점착력 뿐만 아니라 내부마찰각도 약간 증가하는 것으로 나타났으며 1m^3 에 1개의 FRP관으로 보강한 지반의 점착력은 128% 증가하였고 내부마찰각은 20%정도 증가하였다.
- (9) FRP보강 그라우팅 보강지반의 전단저항은 전단초기에는 지반자체의 저항이 주가되며, 그 후에 FRP 그라우트체에 의한 지반의 수동저항이 추가되고 전단변위가 어느 정도 커지면 비로소 FRP 그라우트체의 자체전단저항이 발휘되는 것으로 측정되었다.

참 고 문 헌

1. 서울대학교 공학연구소, 한국도로공사 도로연구소(2002), FRP보강 그라우팅 공법의 설계기법 연구, pp.32-58.
2. 아주대학교 토목기술연구소(2001), FRP그라우팅의 보강효과에 관한 연구 보고서, pp.29-46, 76-93.
3. 한국지반공학회(2000), FRP 보강 그라우팅 공법의 개발 연구 보고서, pp.9-20.
4. Kwon, Oh-Yeop., Choi, Yong-Ki., Oh, Myung-Yeol., Kim, Sung-Hwan and Kim, Nag-Young(2002), "Development and Evaluation of the Applicability for High Strength FRP pipes as the Grouted-Reinforcing Members in Tunnel", AITES - ITA DOWNUNDER 2002.
5. Kim, Sung-Hwan., Hwang, Yong-Chel., Kim, Nag-Young and Choi, Yong-Ki(2001), "Reinforcing Method of Rock Slope using FRP pipe", International Conference on LANDSLIDE, pp.534-534.
6. Ortigao J.A.R.(1996), "FRP applications in Geotechnical Engineering", Material for the New Millenium, Proc. 4th Materials Engineering Conference, ASCE, pp.535-544.
7. Kleyner, I.M., Krizek, R.J. and Pepper, S.F.(1993), "Influence of Grout Pressure on Capacity of Bore-Injected Piles and Anchors", Proceeding of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria, pp.159-165.
8. Srivastava, R.K.and Rao, K.S.(1990), "Shear behavior of cement grout filled artificially created planar joints", Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Leon, Norway, pp.309-316.

(접수일자 2002. 5. 13, 심사완료일 2002. 9. 13)