

영구 터널지보재로서의 활용을 위한 GFRP 록볼트의 역학적 거동 분석

Analysis for Mechanical Behavior of GFRP Rock Bolt for Permanent Support of Tunnel

심 중 성¹⁾ 강 태 성²⁾ 이 용 택³⁾ 김 현 중^{4)*}
Sim, Jong Sung Kang, Tae Sung Lee, Yong Taek Kim, Hyun Joong

Abstract

Rock Bolt generally utilizes deformed reinforcing bar welded from structural steel of which strength is higher than required for making advantageous use of the support function of ground. In the condition with highly corrosive underground water, however, problem frequently occurs on tunnel and slope stabilization in terms of repair, rehabilitation and maintenance issues due to the destruction of Rock Bolt by corrosion of steel. A structural performance evaluation for GFRP Rock Bolt was conducted for the purpose of resolving the foregoing problem and at the same time developing a permanently-usable support material.

This study intended to evaluate the safety factor of GFRP Rock Bolt by implementing the slope stability interpretation via structural analysis on the basis of its structural characteristics derived from both tensile force function test and shear force function test. It is judged based on the results that GFRP Rock Bolt would secure sufficient ground stability as an alternative material for existing Steel Rock Bolt.

Keywords : rock bolt, GFRP, tensile force function test, shear function test, slope stability interpretation

1. 서론

록볼트는 지보 구조물이나 경암 지반을 대상으로 선단 정착 방식으로 사용해 왔으나 전면 접촉형 록볼트의 개발에 따른 연약지반에서의 뛰어난 지보 효과로 인해 현재, 광범위한 지반 조건에서 터널 지보재로 널리 활용되고 있다. 또한, 암반 또는 지반의 불안정한 거동을 억제하여 안전한 시공 및 유지관리를 용이하게 할 뿐만 아니라 경제 적이며 공동의 단면을 자유롭게 선택할 수 있는 장점들 때문에 록볼트 보강분야에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 추세이다(이토 준 등, 2003; 강인규 등 2005; 대한주철공사, 2005; 이혁진 등 2006; 이상은 등 2007).

더불어 NTM(Norwegian Method of Tunnelling)과 같은 Single Shell 공법이 적용된 터널이 주목을 받으면서 영구 지보재로 사용할 수 있는 고내구성을 요구하는 록볼트에 대한 연구의 필요성이 대두되고 있다(Barton, 1998;일본 지오프린트연구회, 2001).

Hoek(2002)은 대부분의 록볼트가 부식성 지하수 조건에서 영구 지보재로 활용되기 위해서는 볼트와 암반 사이의 공간을 시멘트 또는 레진 그라우트로 완전히 충전하는 조건을 만족해야 한다고 발표하였으며, 또한 실제로도 Atlas Copco(2005)의 연구에 의하면 볼트가 암반과 직접 접촉하게 되는 Swellex bolt가 부식성 환경에서 심하게 부식되어 요구되는 성능을 기대할 수 없었던 많은 경우를 조사한 바 있다. 최근 연구 또한 고내구성 록볼트의 작용효과를 장기적으로 기대하는 경우, 부식에 대한 저항성을 우선 고려하여 충분한 인발내력을 발현하고 높은 내구성을 확보할 수 있는 록볼트 충전재의 완전 충전을 도모하는 것이 중요한 요소임을 밝히고 있으나(배규진 등, 2006), 록볼트 충전재의 완전 충전은 경제성 및 시공성과 더불어 지반조건 등 수많은 환경적 변수에 따른 많은 제약이 있으며 역학적 거동 또한 명확하지 않아 록볼트 충전재의 완전 충전을 통한 장기적 작용효과를 기대하는 것은 어려운 상황이다.

1) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 교수
2) 정회원, 한국시설안전기술공단 특수교통합유지관리센터, 팀원
3) 정회원, (주)태조엔지니어링 사원
4) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정, 교신저자

* E-mail : oldcloud@hanyang.ac.kr 010-5094-8778
• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

록볼트의 근본적 파괴 원인은 록볼트에 발생하는 녹이나 부식등과 같은 염해 피해이다(김동규 등, 2006). 현재, 록볼트를 부식시키는 주된 인자인 염화물과 높은 황산염 이온 농도에 따른 높은 부식 환경에 대한 사례들이 세계적으로 다수 보고되고 있으며 국내의 경우 박영식 등(1988)의 연구에 의하면 인천국제공항 콘크리트 구조물의 염해 평가 결과, 지하 구조물 위치의 토양과 지하수에 포함된 황산염의 농도가 각각 810ppm과 2,700,000ppm을 상회하는 것으로 보고되었다. 이와 같이, 우리나라의 경우 삼면이 바다로 둘러싸인 특수한 지형적 조건으로 인해 염해에 취약한 환경 이라는 것은 자명한 사실이다.

따라서, 본 연구에서는 록볼트의 부식을 근본적으로 방지하고 높은 인장력을 갖는 GFRP(Glass-Fiber Reinforce Polymer; 이하 GFRP) 록볼트의 역학적 거동을 분석하여 터널의 사면안전을 위한 영구 지보재로서의 적합성을 평가하고자 한다.

2. 록볼트 시스템의 하중전달 메커니즘

록볼트 시스템의 거동과 보강효과를 이해하는데 가장 중요한 것은 하중전달 개념으로서 다음 3단계 메커니즘을 들 수 있다.

- ① 불안정한 암반에서 보강요소로의 하중전달
- ② 불안정한 암반내에 설치된 보강요소에서 안정된 내부 암반에 설치된 보강요소로의 하중전달
- ③ 보강요소에 내재된 하중의 안정된 암반으로의 전달

암반과 보강요소간의 하중전달 메커니즘에 근거하여 록볼트를 continuous mechanically coupled(CMC), continuous frictionally coupled(CFC), discrete mechanically and frictionally coupled(DMFC)의 세 가지 형태로 분류할 수 있다.

CMC 보강재는 보강재 설치공과 보강재 사이의 공간을 그라우트재로 충전함으로써 보강효과를 확보하는 것으로, 그라우트재의 주요 기능은 암반과 보강재간의 하중전달을 위한 연결고리를 제공하는 것이다. CFC 보강재의 거동은 CMC 보강재와 유사하나 보강재가 암반과 직접적으로 접촉하게 설치된다는 점에서 다르다. 하중전달은 보강재와 설치공간의 마찰에 의해 이루어지고 삽입과정에서 발생하는 반경방향 응력에 의해 구속된다. 이런 보강재는

직경이 작은 보강재가 직경이 큰 설치공에 들어가 확대되거나(Swellex), 직경이 큰 보강재가 직경이 작은 설치공에 들어가 수축되는 것(split set) 중의 하나이다. DMFC 보강재는 보강재의 정착부분을 통하여 역학적인 또는 마찰적인 하중전달을 수행하는 보강재로서, 정착부분은 보강재의 전하중을 견딜 수 있을 만큼 충분히 강해야 한다.

본 연구에서는 위와 같은 록볼트의 하중전달 메커니즘을 전체적으로 고려하기 위해 실험체를 지반 및 암반으로 모사하여 전단 실험과 인장 실험을 실시하였으며 그 결과를 토대로 GFRP로 적용된 록볼트의 사면안정해석을 통해 안전율을 평가하였다.

3. 실험 계획 및 방법

3.1 사용재료

이 실험에서는 대한터널협회의 터널표준시방서(1999) 및 터널설계기준(1999)에 의거한 KS E 3132에 재정의된 봉강 중 현재 가장 널리 사용하고 있는 SD35 봉강을 사용하였으며 기계적 성질은 다음과 같다[Table 1].

본 연구에 사용된 GFRP 록볼트는 80% 이상의 고순도 Glass Fiber와 각종 Resin 매트릭스로 구성되어 높은 인장강도를 갖는다. 또한 염해 피해 저항성이 매우 높은 재료로서 강봉에 비해 1/4정도의 무게로 물결모양의 단면형상으로 이루어져 있다. 표면은 콘크리트에 대한 강력한 부착성능(Bonding Properties)을 갖는 레진매트릭스로

Table 1 Mechanical property of steel rod using rock bolt

종류	재질 기호	기계적 성질		
		항복점 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율(%) (시험편 2호기준)
이형 봉강	SD 35	350 - 450	500 이상	18 이상
	SD 40	400 - 520	570 이상	16 이상



Fig. 1 Shape of GFRP rock bolt



Fig. 2 Shape of GFRP rock bolt the inside



Fig. 3 GFRP specimen

코팅(Coating) 되어 화학적, 물리적 손상을 방지할 수 있는 제품으로써 그 형상은 Fig. 1과 같다.

3.2 인장시험 계획 및 변수

GFRP 볼트의 인장성능을 평가하기 위하여 터널설계 기준(1999)에서 제시하고 있는 SD35 재질의 록볼트 표준 공칭지름인 강재 D25mm와 비교하였다. GFRP 볼트의 변수는 GFRP의 인장력을 고려하여 D20mm와 D25mm 각각 5개의 시험체를 제작하였으며, 총 길이 1,000mm로 가운데 GFRP 200mm를 제외한 나머지 부분은 속이 빈 강봉에 삽입 후 레진 채움으로 마무리 하여 GFRP 볼트와 인장시험기 그림장치에서의 미끄러짐 현상 및 국부파괴 방지를 고려하여 제작하였다. 인장성능평가를 위해 제작된 GFRP 볼트 시험체의 단면 형상은 Fig. 2와 같으며, 제작된 GFRP 볼트 시험체는 Fig. 3과 같다.

터널표준시방서(1999)의 록볼트 현장 품질관리 기준에 의하면 인발시험은 충분한 정착효과가 얻어진 후에 실시하여야 하며 인발하중의 재하속도는 10kN/min 내외로 규정되어 있으나 본 실험에서는 GFRP 볼트의 인장성능을 평가하기 위해 '유리 섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방



Fig. 4 Tension test of GFRP rock bolt

법'인 'KS M 3381'에 의하여 $1 \pm 0.5 \text{mm/min}$ 의 속도로 하중재하를 실시하였다. GFRP 볼트가 노출된 200mm 구간에는 Fig. 4와 같이 총 3개의 변형게이지를 부착하였으며 그 위치는 중앙, 중앙으로부터 양쪽에 50mm 간격을 두고 부착하였다. 정확한 변위를 측정하기 위해 인장시험기 자체의 스트로크 측정을 무시하고 LVDT(The linear variable differential transformer, 정적변형 입력 전용 변위계)를 사용하여 변위를 측정하였다.

3.3 전단시험 계획 및 변수

철근의 경우 전단력을 고려할 수 없는 연성 재료로서 록볼트로 사용되는 이형 봉강은 SD35 재질의 $350 \sim 450 \text{N/mm}^2$ 의 항복점을 갖는다. 그러나 GFRP 록볼트의 경우 재료의 탄성으로 인해 휨강도 실험이 불가능하므로 사면안정해석을 위한 수치해석 변수를 도출하기 위해 GFRP 록볼트의 전단실험을 실시하였다. 또한, 실제 현장을 고려하여 지반 및 암반 형태로 모사하여 실시하기 위해 $165 \text{mm} \times 200 \text{mm} \times 380 \text{mm}$ 시험체 블록과 $330 \text{mm} \times 200 \text{mm} \times 380 \text{mm}$ 의 시험체 블록을 Fig. 5와 같이 제작하였다. 각 시험체마다 2개의 A블록과 1개의 B블록으로 구성하였으며, 블록의 중심부에 록볼트를 삽입할 수 있도록 제작하였다.

가설공사 표준시방서에 의거하여 블록 구멍의 크기를 D27mm, D32mm로 각각 설정하였다. 또한, 현장 상황을 고려하여 볼트의 작용효과 향상을 위해 타설방향은 굴착면에 수직인 조건을 만족시키기 위해 단부의 면과 90° 를 이루도록 설계하였다.

시험체 블록은 모형지반 및 암반의 파괴거동이 먼저 발생하지 않도록 D10mm 철근으로 보강된 35MPa 강도의 콘크리트로 설계하였고, 콘크리트 블록의 설계 배합비와

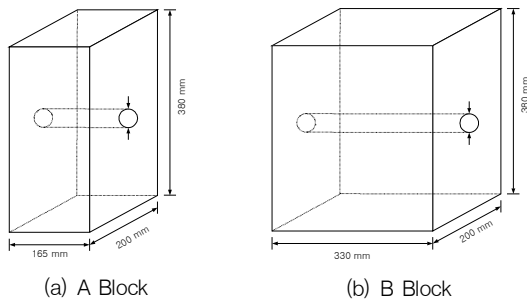


Fig. 5 Shear specimen

Table 2 Table of concrete mix proportion of shear specimen

W/C (%)	s/a	단위재료량(kg/m ³)				
		W	C	S	G	AD
38.5	38.9	145	442	734	1083	3.49

※ W : 물, C : 시멘트, S : 잔골재, G : 굵은골재, AD : 혼화제

Table 3 Result of concrete compression test of shear specimen

시험체	공시체 지름 (mm)	공시체 넓이 (mm ²)	파괴 하중 (kN)	압축 강도 (MPa)	평균 압축강도 (MPa)
1	100	7850	290	37.0	35.4
2			267	34.0	
3			261	33.3	
4			276	35.1	
5			253	32.2	
6			320	40.7	



Fig. 6 Shape of GFRP rock bolt for shear test

압축시험 결과는 Table 2와 Table 3에 나타난 바와 같다.

전단시험체 제작과정은 Fig. 6과 같으며 볼트와 블록을 연결시켜주는 역할을 하는 레진은 'CAC IN' 주입제와 'CAC SEAL' 경화제를 사용하여 경화제 무게비의 4:1로 제조하였다. 레진이 충분히 충전된 후 록볼트를 삽입하여 완전하게 굳은 뒤 각 블록의 연결부에 시멘트 모르타르를 삽입하여 시험체의 외력에 의한 변형을 방지하였다. 전단 실험은 현장에서의 Fig. 7과 같은 상황을 고려하여 Fig.

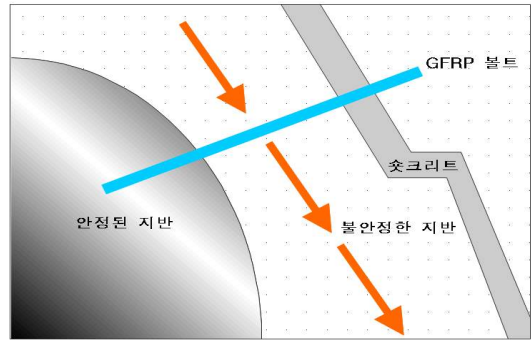


Fig. 7 Set-up circumstances for shear test of GFRP rock bolt

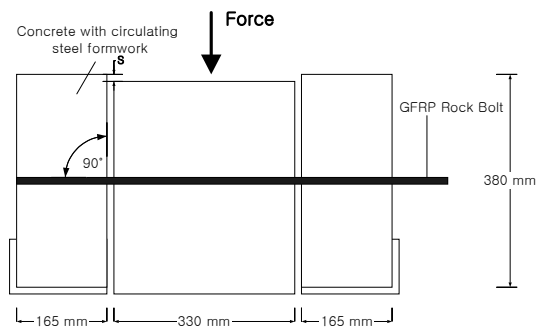


Fig. 8 Test method for shear test of GFRP rock bolt



Fig. 9 Shear test of GFRP rock bolt

8과 같이 가운데 B블록에 하중을 재하 하여 A블록과 B블록 사이에서 전단이 일어나도록 실시하였으며 실험 형상은 Fig. 9와 같다.

3.4 GFRP 록볼트의 사면안정 해석

사면안정 해석은 GFRP 록볼트를 사용하여 보강하였을 경우와 기존 강재 록볼트를 사용하였을 경우의 사면안정을 위한 보강을 실시하였을 경우의 안전율을 비교하고자 MIDAS/GTS 프로그램을 사용하여 수행하였다. Fig. 10과 같은 해석과정을 통해 인장 및 전단 실험결과로 결정된

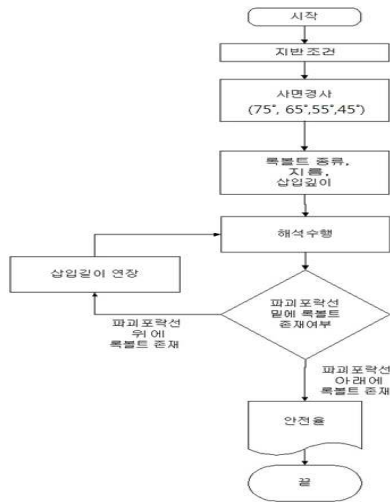


Fig. 10 Flow chart of slope stability interpretation using MIDAS/GTS

Table 4 Property material of rock bolt and steel

록볼트 종류	인장력(kN)	전단력(kN)	단면적(mm ²)	탄성계수(MPa)
Steel D25	254	-	506.7	200,000
GFRP D20	227	231	226	43,410
GFRP D25	358	260	346	

Table 5 Variable of soil conditions for slope stability interpretation

	토사지반
높이(m)	10
하중조건	자중
탄성계수(N)	40,000,000
포아송비	0.35
단위중량(N/m ³)	18,000
습윤단위중량(N/m ³)	18,500
점착력(N/m ²)	15,000
내부마찰각(°)	30

GFRP 보강재의 역학적 변수를 지반조건과 기하학적 조건을 달리 가정하여 안정해석을 수행하는 방식으로 실시하였다.

Table 4와 같이 인장실험 및 전단실험 결과를 변수로 사용하였으며 지반조건은 토사지반으로 가정하였으며 지반조건에 따른 변수는 Table 5와 같다. 다양한 단면에서 강제와 GFRP 록볼트의 안전율을 비교하기 위해 단면의 경사를 10° 간격으로 45°, 55°, 65°, 75°로 가정하였으며 1m의 배치간격으로 10개의 록볼트를 각 사면에서 수직이 되도록 설정하여 모델링 하였다[Table 6]. GFRP 록볼트의 깊이는 수치해석시 파괴포락선에 GFRP 록볼트의 위치가 충분히 포함되는 10m 깊이로 해석을 수행하였다[Fig. 11].

Table 6 Variable of ground slope for slope stability interpretation

록볼트의 종류	지반조건	사면경사	배치간격	삽입깊이	수량
Steel D25	토사지반	45°	1m	10m	10
GFRP D20		55°			
GFRP D25		65°			
		75°			

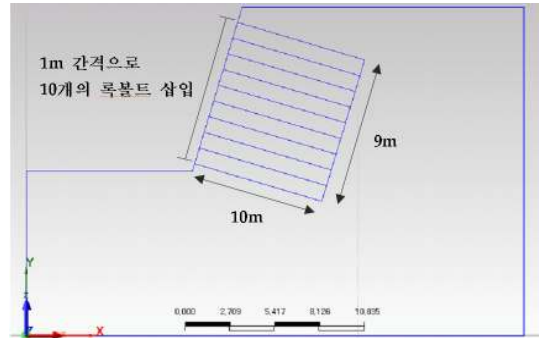


Fig. 11 Modeling of slope stability interpretation

4. 실험 결과 및 분석

4.1 인장실험 결과 및 분석

시험체의 파괴 유형은 Fig. 12와 같이 모두 인장파괴로 나타났으며 GFRP 볼트와 강봉 사이에서의 미끄러짐은 발생하지 않았다. 실험 결과는 5개의 시험체중 비교적 평균값에 가까운 3개의 시험결과를 비교하였다[Table 7]. GFRP 볼트의 평균최대인장강도는 D20mm, D25mm 모두 평균 약 1000 MPa 이상으로써 강재에 비해 약 200%의 성능을 나타내었다. 평균내하력의 경우 강재에 비해 D20mm은 약 89%, D25mm는 약 141%의 성능을 보였다.

Fig. 13과 14와 같이 하중-변위 그래프를 살펴볼 때 GFRP D20mm의 경우가 강재에 비해 인장강도는 우수하나 내하력이 다소 적은 것으로 나타났으며, D25mm의 경우 강재에 비해 인장강도 및 내하력이 우수한 것으로 나타났다. D25mm의 하중-변위 곡선에서 약간의 연성구간을 나타내는 부분은 높은 인장력에 의해 GFRP 섬유가 한번에 파단되지 않고 가닥이 점차 끊어지면서 생긴 물리적 거동으로 판단된다.

4.2 전단실험 결과 및 분석

GFRP 록볼트의 전단파괴양상은 Fig. 15와 같이 모두

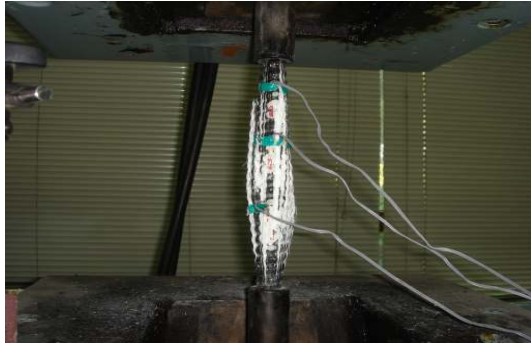


Fig. 12 Tension test result of GFRP rock bolt

Table 7 Tension test result of steel and GFRP rock bolt

		Unit	T1	T2	T3	Average
Steel SD35 D25	Breaking Load	kN	254			
	Tensile Strength	N/mm ²	500			
GFRP D20	Breaking Load	kN	228	230	224	227
	Tensile Strength	N/mm ²	1,007	1,019	992	1,006
GFRP D25	Breaking Load	kN	360	351	363	358
	Tensile Strength	N/mm ²	1,041	1,016	1,050	1,036

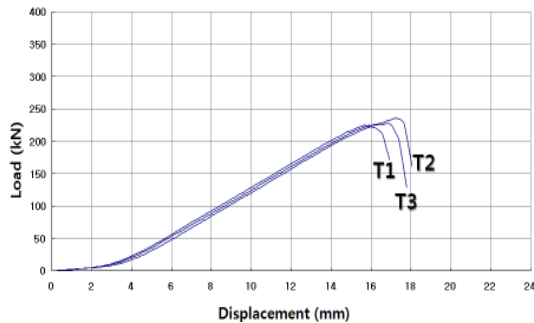


Fig. 13 Load-displacement curve (D20 GFRP rock bolt tension test)

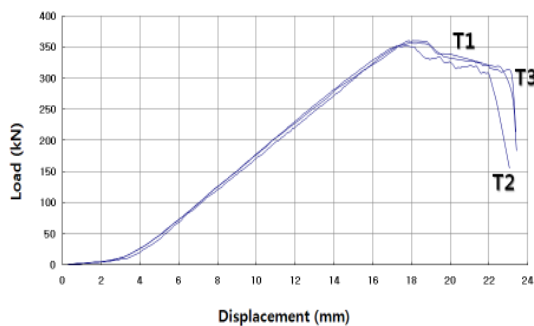


Fig. 14 Load-displacement curve (D25 GFRP rock bolt tension test)

Table 8 Shear test result of steel and GFRP rock bolt

	GFRP 록볼트 D20mm			GFRP 록볼트 D25mm		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3
천공지름 (mm)	27			32		
최대하중 (kN)	191	285	217	252	266	263
파괴모드	전단파괴					



Fig. 15 Shear test result of GFRP rock bolt

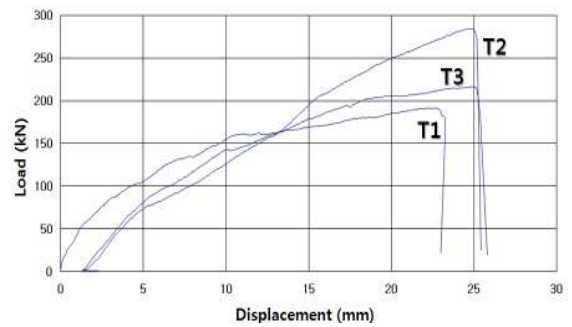


Fig. 16 Load-displacement curve (D20 GFRP rock bolt shear test)

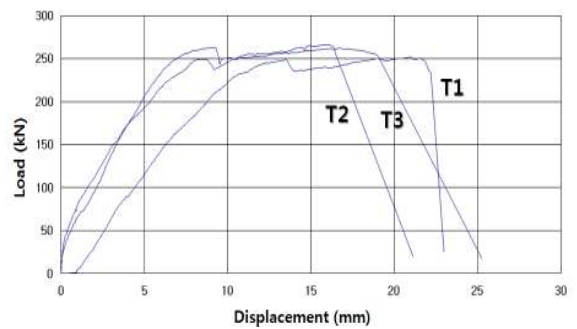


Fig. 17 Load-displacement curve (D25 GFRP rock bolt shear test)

전단 파괴 유형으로 파괴가 발생하였다. 전단실험 결과는 Table 8과 같으며 Fig. 16과 17과 같은 하중-변위 곡선을 확인하였다. GFRP 록볼트 D25mm의 경우 최대전단

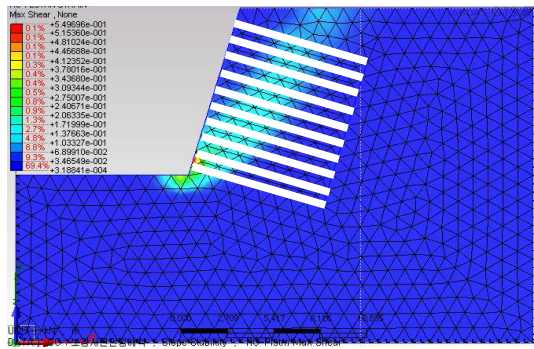


Fig. 18 Slope stability interpretation result of shear stress

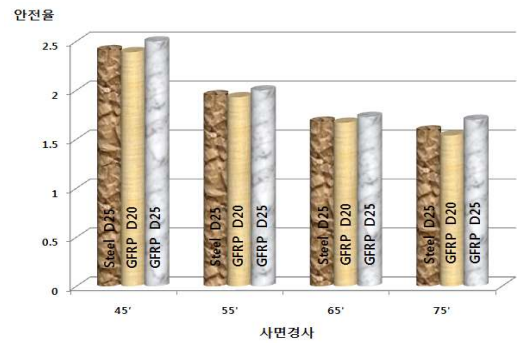


Fig. 19 Factor of safety in rock bolt of ground slope

Table 9 Result of slope stability interpretation

사면경사(°)	록볼트종류	삽입길이(m)	수량	배치간격(m)	안전율
45	강재 D25	10	10	1	2.41
	GFRP D20				2.39
	GFRP D25				2.50
55	강재 D25	10	10	1	1.95
	GFRP D20				1.93
	GFRP D25				2.00
65	강재 D25	10	10	1	1.68
	GFRP D20				1.67
	GFRP D25				1.73
75	강재 D25	10	10	1	1.59
	GFRP D20				1.54
	GFRP D25				1.70

하중이 약 250kN 이상이였으며 하중이 가해짐에 따라 록볼트와 레진이 인발되어 록볼트-그라우트 접촉면의 파괴거동을 보인 후 최대하중에서 파괴가 발생하였고, GFRP 볼트 D20mm 경우 최대전단하중이 약 200kN으로 록볼트가 직접적으로 파괴되는 양상을 보였다.

4.3 사면안정 해석 결과 및 분석

본 연구에서는 수평면에 대해 임의 각도를 유지한 채 노출된 자유사면이 중력에 의해 흙이 이동함에 따라 발생하는 흙의 전단강도와 예상 파괴면을 따라 발생하는 전단응력을 수치해석을 통해 모사하였다.

Table 8의 전단 강도 실험결과 및 Table 9의 사면안정 해석 결과를 통해 다음과 같은 식에 의해 안전율을 산정하였다.

$$\text{안전율} = \frac{\text{흙의 평균전단강도}}{\text{파괴포락선을 따라 생기는 평균전단응력}}$$

사면안정해석 결과 경사 높이에 따라 안전율은 감소하며 GFRP D25mm의 경우 가장 높은 안전율을 보였다. GFRP 록볼트 D20mm의 경우 강재에 비해 다소 낮은 안전율을 보였으나 전체적으로 GFRP 록볼트와 강재 록볼트의 안전율은 유사한 것으로 나타났다[Fig. 19].

5. 결론

본 연구는 터널의 영구지보재로서 GFRP 록볼트의 활용가능성에 대해 평가하고자 GFRP 록볼트의 인장 및 전단실험실시하여 기준에 대표적으로 사용되고 있는 D25mm 강재와 역학적 특성을 비교하였으며, 사면안정 해석을 통해 사용가능성을 검증 하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) GFRP 록볼트의 인장성능 실험결과 록볼트와 콘크리트 시험체의 미끌림에 의한 파괴는 일어나지 않았으며 평균최대하중은 D20mm의 경우 227kN, D25mm의 경우 358kN이며, 평균인장응력은 모두 약 1,000MPa 으로 D25mm GFRP 록볼트를 사용할 경우 강재보다 약 141%의 높은 인장응력의 성능 향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 실제 현장을 고려하여 지반 및 암반 형태로 모사한 GFRP 록볼트의 전단성능 실험결과, 시험체 모두 전단파괴가 일어났으며 D20mm의 경우 평균 231kN의 전단강도를 보였으며 D25mm의 경우 평균 260kN의 전단강도를 보였다.
- (3) 강재 및 GFRP 록볼트의 종류에 따른 사면안정 해석 결과, 경사에 따라 안전율의 크기는 GFRP D25mm, 강재 D25mm, GFRP D20mm의 순으로 나타났으나 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

따라서, 기존의 강재와 GFRP 록볼트의 재료적 안전율을 유사한 것으로 판단된다.

- (4) GFRP 록볼트의 경우 재료의 특성상 경량성에 따른 시공성 향상과 염해 피해에 따른 부식을 근본적으로 방지할 수 있으므로 품질관리향상에 큰 장점이 있으나 강재의 대체 재료로서 더욱 적극적으로 활용되기 위해서는 강재 록볼트의 재료적 성질로서 요구되는 연신율에 따른 거동을 분석과 함께 GFRP 재료 혼입률 및 생산방식에 따른 구조적 특성 Data 확보 및 사면안정에 최적화된 GFRP 록볼트의 배치와 길이에 대한 명확한 수치해석, 경제성 등의 관련 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 강인규, 류정수, 권영호, 박신영, “지반보강을 위한 FRP 보강재의 개발에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, pp.41-48, 2005.
2. 김동규, 장수호, 신휴성, 김연성, “화학적 침식에 의한 록볼트의 인발력 특성-단기거동”, 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, 2006, pp.353-360.
3. 대한주택공사, “서울난곡 절취사면 및 지하저수조 굴착면 Soil Nailing 공사 계획관리 종합보고서”, 2005. pp.273-278.
4. 박영식, 서진국, 이재훈, 신영식, “실리카-흙을 사용한 고강도 콘크리트의 황산염 침해에 따른 강도특성”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1988, pp.249-252.
5. 배규진, 장수호, 김동규, 박해균, “시멘트 모르타르계 록볼트 충전재의 염화물 확산계수 측정을 통한 록볼트 부식 예측”, 한국터널공학회논문집, 제8권, 3호, 2006, pp.259-271.
6. 이상은, 장윤호, 문창열, 정교철, 박영선, “선단확장식 소일네일링 공법의 적용성에 관한 실험적 연구”, 대학지질공학회 제17권 제4호, 2007, pp.525-534.
7. 이토 준, 박해균, 김동완, 김재권, “록볼트의 타설 직후의 강도발현 과정 및 효과에 관한 연구”, 터널기술 제5권 제2호, 2003, pp.189-197.
8. 이혁진, 고형선, 한용희, 김홍택, “중공식 FRP소일네일링 시스템의 적용성 평가”, 대한토목학회 제26권 제6호, 2006, pp.385-393.
9. 터널설계기준, 건설교통부, 1999, pp.33-37.
10. 터널표준시방서, 건설교통부, 1999, pp.48-52.
11. MIDAS/GTS, 마이다스아이티, 2001.
12. ジェオフロンテ研究会 シングルシェル分科會(2001), シングルシェルトンネルのケーススタディ報告書, 日本ジェオフロンテ研究会.
13. Atlas Corpco., “Rockbolt Corrosion in Mining and Tunnelling”, Rock & Soil Reinforcement 3rd., 2005, pp.35-37.
14. Barton, N., “Norwegian Method of Tunnelling - The Theory and Practice of NMT”, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd., Bau Consultant, Nick Barton and Associates 1998.
15. Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden, W. F., “Support of Underground Excavations in Hard Rock”, A.A.Balkema, 1955, pp.152-155.

(접수일자 : 2010년 3월 31일)
 (1차 수정일자 : 2010년 6월 30일)
 (2차 수정일자 : 2010년 7월 30일)
 (심사완료일자 : 2010년 8월 20일)

요 지

록볼트는 주변 지반의 지보 기능을 유리하게 활용하기 위한 부재로서 일반적으로 소오의 강도 이상을 가진 강재로 된 이형 봉강을 활용하고 있다. 그러나, 부식성 요소가 많은 지하수 조건에서는 강재의 부식으로 인한 록볼트의 파괴로 터널 및 사면안정의 보수, 보강 및 유지관리 문제가 많이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하고 영구적으로 사용가능한 터널 지보재로 활용하기 위한 실질적인 거동을 모사하여 GFRP 록볼트의 거동에 대한 실험적 평가를 실시하였다.

이 연구는 GFRP 록볼트의 인장성능 평가시험 및 전단성능 평가시험을 통해 도출된 GFRP 록볼트의 구조적 특성을 바탕으로 구조해석을 통한 사면안정해석을 실시하여 안전율을 평가하였다. 실험 결과 기존에 사용하던 강재 록볼트의 대체 재료로서 충분히 터널 지반의 안정성을 확보 할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심 용어 : 록볼트, GFRP, 인장성능시험, 전단성능시험, 사면안정해석