

GFRP plate를 적용한 섬유보강세그먼트의 휨성능 평가

오리온¹ · 박성기² · 성상경³ · 이재영⁴ · 김황희^{5*}

¹비회원, (주)콘텍이엔지 대리

²비회원, (주)콘텍이엔지 대표이사

³비회원, (주)콘텍이엔지 차장

⁴비회원, (주)콘텍이엔지 과장

⁵정회원, (주)콘텍이엔지 연구소장

Flexural performance evaluation of fiber reinforced segments with GFRP plate

Ri-On Oh¹ · Sung-Ki Park² · Sang-Kyung Sung³ · Jae-Young Lee⁴ · Hwang-Hee Kim^{5*}

¹Assistant Manager, CONTECH ENG Co., Ltd.

²Chief Executive Officer, CONTECH ENG Co., Ltd.

³Deputy General Manager, CONTECH ENG Co., Ltd.

⁴Section Chief, CONTECH ENG Co., Ltd.

⁵Head of Research Center, CONTECH ENG Co., Ltd.

*Corresponding Author : Hwang-Hee Kim, hwang1032@contecheng.co.kr

Abstract

This study was performed to evaluate the performance of GFRP plate reinforced segments for TBM tunnel support. Recently, the SFRC segment has been applied to prevent local damage such as reduction of the amount of reinforcing bars of the segment, crack control and breakage. However, the steel fiber used in the SFRC segment has a problem of durability deterioration due to fiber corrosion. Compared with the RC segment, the maximum flexural load reduction of the SFRC segment hinders the broad application range of the TBM tunnel segment. Therefore, GFRP plate was considered as a stiffener for the maximum load increase of SFRC segment, and structural synthetic fiber without corrosive concern was used as a substitute for steel fiber. The flexural performance of the segment was evaluated by using the type of reinforcing fiber and GFRP plate thickness as the main parameters. As a result, the maximum load and the flexural toughness were increased by 21.78~23.03% and 0.5~7.96%, respectively, as compared with the segments reinforced with reinforcing fiber and GFRP plate of 3 mm thickness.

Keywords: TBM, Segment, Flexural performance, GFRP, Fiber reinforcement

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
20(5)839-854(2018)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.5.839>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received July 5, 2018

Revised July 26, 2018

Accepted July 31, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

초 록

본 연구는 GFRP plate 보강세그먼트를 TBM 터널 지보재로 적용하기 위한 성능평가를 실시하였다. 세그먼트의 철근량 감소와 균열제어 및 파손 등의 국부적인 손상 방지를 위하여 최근 SFRC 세그먼트 적용되고 있다. 그러나 SFRC 세그먼트에 사용되는 강섬유는 섬유 부식에 의한 내구성 저하 문제가 제기되고 있으며, RC 세그먼트와 비교하여 SFRC 세그먼트의 최대 휨하중 감소는 TBM 터널 세그먼트의 폭넓은 적용범위를 저해하고 있다. 따라서 SFRC 세그먼트의 최대하중 증가를 위한 보강재로 GFRP plate 고려하였으며, 강섬유의 대체재로 부식 우려가 없는 구조용 합성섬유를 사용하였다. 보강섬유의 종류 및 GFRP plate 두께를 주요 변수로 하여 세그먼트의 휨 성능평가를 실시한 결과, 보강섬유와 3 mm 두께의 GFRP plate로 보강한 세그먼트는 섬유로만 보강한 세그먼트와 비교하여 섬유 종류별로 최대하중이 21.78~23.03%, 휨인성은 0.5~7.96% 증가하여 우수한 휨성능 효과를 보여주었다.

주요어: TBM, 세그먼트, 휨성능, 유리섬유강화플라스틱, 섬유보강

1. 서론

국내 터널 굴착은 NATM 공법이 주로 적용되어 왔으나, 환경문제, 소음 및 진동으로 인한 민원 발생 등을 이유로 도심지에서 TBM 장비를 활용한 기계굴착 공법이 증가하고 있는 추세이며, 현재는 지하철, 도로 뿐만 아니라 전력구, 통신구 등 다양한 종류의 터널 시공에 널리 적용되고 있다(Woo and Yoo, 2015; Yoo and Jeon, 2012). TBM 터널에 사용되는 세그먼트 라이닝은 공장이나 현장에서 미리 제작된 프리캐스트 세그먼트를 조립하여 영구구조체로 사용되며, TBM 장비의 추진을 위한 반력지지 구조로 활용되고 있다(Lee et al., 2013; Moon et al., 2013).

도심지에 적용하는 쉴드 TBM 터널은 공공 도로하부에 계획하는 경우가 많으며, 그 선형은 도로 선형에 지배되고 있다. 국내의 경우 쉴드 TBM 터널식 공동구는 일반적으로 R300 m 시공이 많으나, 도심지에서는 사유지 침범을 최소화하고 기존 구간을 통과하기 위해서는 급곡구간 시공이 필요하며, 급곡구간 시공 시에는 쉴드 TBM 장비와 세그먼트 간의 접촉이 발생되지 않기 위하여 세그먼트 폭을 줄여야 하며 곡선시공을 위한 테이퍼 세그먼트가 필요하다(Lee et al., 2016).

TBM 터널 적용 초기에는 강재세그먼트가 사용되었으나, 최근에는 콘크리트의 성능 향상과 함께 부식염려가 없고 강재세그먼트에 비해 경제적인 RC (Reinforced Concrete, RC) 세그먼트가 일반적으로 사용되고 있다(Chang et al., 2011). 그러나 RC 세그먼트의 경우 TBM 추진력에 의해 모서리 부분이 쉽게 손상되고 급곡구간 시공 시 편심에 의해 파괴될 수 있으며, 세그먼트 폭 축소에 따른 철근 배근의 어려움으로 곡선구간에는 강재세그먼트가 주로 사용되고 있다. 이러한 강재세그먼트의 경우 자체 부식에 의한 내구성 저하와 그에 따른 내구연한이 감소되는 문제가 발생하기 때문에 강재세그먼트를 대체할 수 있는 세그먼트가 필요한 실정이다(Lee et al., 2018).

TBM 터널 공사비 약 40%가 세그먼트의 공사비이며, RC 세그먼트의 재료비 중 철근자재비와 철근 가공 및 조립에 차지하는 비율이 30~40% 수준으로 세그먼트 제작에 큰 비중을 차지하고 있어, RC 세그먼트의 철근 보강을

최소화하기 위한 기술적인 노력들이 선진국을 중심으로 이루어지고 있다(Chang et al., 2011; Moon et al., 2012).

최근 강섬유보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)의 성능이 크게 개선되면서 미국, 유럽, 일본 등에서 세그먼트의 보강철근량을 줄이기 위하여 강섬유를 활용한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 철근보강을 완전히 생략하는 SFRC세그먼트에 대한 사례는 극히 일부만 보고되고 있으며, 주철근과 강섬유를 병용하여 사용하는 방식이 일반적으로 사용되고 있다(Chang et al., 2011). 따라서 급곡구간에는 SFRC세그먼트 적용이 적합할 것으로 판단되나, SFRC세그먼트에 사용하는 강섬유는 섬유자체 부식에 의한 내구성 저하의 문제가 제기되고 있으며, 또한 RC세그먼트와 비교하여 SFRC세그먼트의 최대 휨하중 감소는 TBM 터널 지보재로써 우려의 대상이며, SFRC세그먼트 사용을 제한하고 있다(Abbas, 2014).

이에, 본 연구는 SFRC세그먼트의 최대 휨하중 증가를 위하여 조립이 간편한 Plate형의 유리섬유강화플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP)을 보강재로 적용하였으며, 강섬유의 대체재로는 최근에 사용되고 있는 구조용 합성섬유를 사용하여 시편을 제작 한 후 하중 재하 실험을 통하여 섬유보강재 종류 및 GFRP plate의 두께 변수에 따른 휨성능 효과를 분석하였다.

2. 사용재료

2.1 결합재

본 연구에서 사용한 시멘트는 밀도 3.15 g/cm^3 의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 세그먼트의 내구성 및 수밀성을 확보하기 위하여 고로슬래그 미분말을 사용하였으며, 그 특성은 Table 1, 2와 같다.

Table 1. Physical properties of blast furnace slag

Specific surface area (cm^2/g)	Density (g/cm^3)	Flow value ratio (%)	Loss ignition (%)	Activity factor (%)	
				7 days	28 days
4,480	2.91	100	0.39	74	94

Table 2. Chemical composition of blast furnace slag

Chemical composition (% weight)							
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO	S
33.1	0.29	13.9	42.4	6.1	0.4	0.96	0.66

2.2 골재

본 연구에서 사용한 굵은골재는 최대치수 25 mm의 부순 골재를 사용하였으며, 잔골재는 강사를 사용하였다. 그 특성은 Table 3과 같다.

Table 3. Properties of aggregate

Type of aggregate	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M
Coarse aggregate	2.62	1.3	6.08
Fine aggregate	2.61	0.7	2.94

2.3 섬유

본 연구에서 사용한 보강섬유는 섬유보강콘크리트에 가장 널리 적용되고 있는 강섬유(Kang et al., 2017; Ku et al., 2014)와 부식 우려가 없는 구조용 합성섬유를 사용하였다(Fig. 1). 섬유보강재는 형상비(L/D) 60, 길이 30 mm, 직경 0.5 mm인 hook type의 강섬유와 형상비(L/D) 30, 길이 30 mm, 직경 1 mm인 crimped type의 폴리아올레핀계 구조용 합성섬유를 사용하였으며, 특성은 Table 4와 같다.

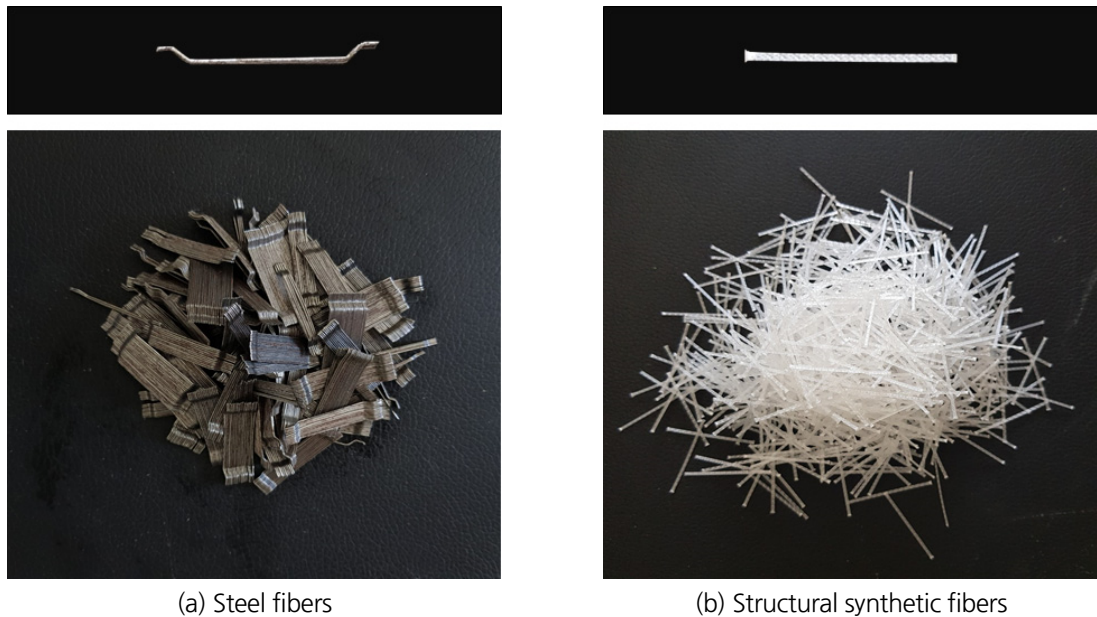


Fig. 1. Shape of reinforcing fiber

Table 4. Physical properties of fiber

Type of fiber		Elastic modulus (GPa)	Density (g/mm ³)	Length (mm)	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Aspect ratio (L/D)
Steel	Hook type	200	7.8	30	0.5	1,100	60
Structural synthetic	Crimped type	10	0.91	30	1	550	30

2.4 GFRP plate

본 연구에서 사용한 GFRP는 유리섬유로 강화된 플라스틱계 복합재료로, 경량·내식성·성형성 등이 뛰어난 고성능·고기능성 재료이다(Sim et al., 2010; Park and Choi, 2013). 일반적으로 rebar 형태로 많이 사용되나(Seo et al., 2016) 조립비 절감과 세그먼트 폭 축소에 대응하기 위하여 유리섬유와 폴리머 수지를 사용한 plate 형식을 사용하였으며, 그 특성은 Table 5와 같다. 콘크리트와 GFRP plate간의 부착성능을 향상시키기 위하여 GFRP plate 표면에 규사를 분사시켜 사용하였다(Fig. 2).

Table 5. Characteristics of GFRP plate

Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Compressive strength (MPa)	Content of glass fiber (%)
1.975	364	594	320	73.3

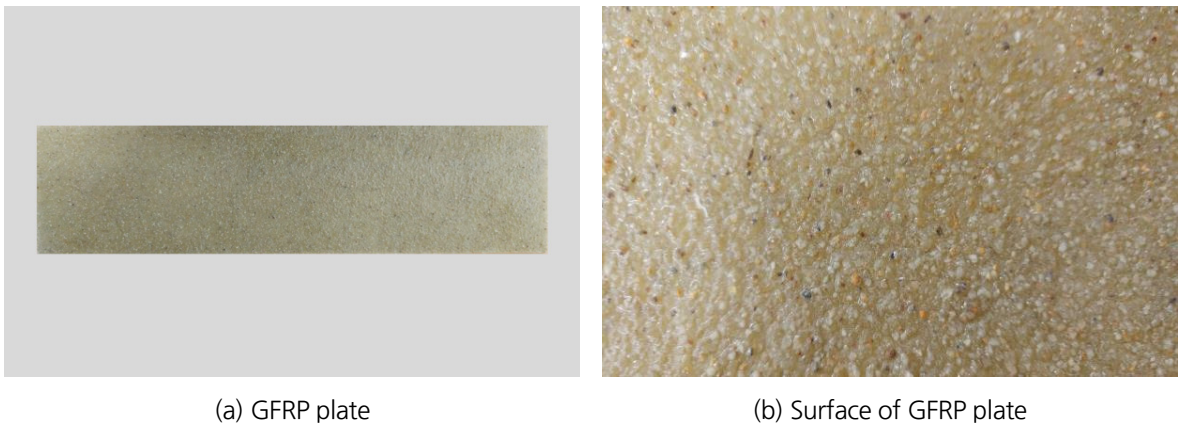


Fig. 2. Shape of GFRP plate

3. 배합설계 및 실험변수

본 연구의 세그먼트 배합설계는 국내 세그먼트 설계기준 강도인 42 MPa을 만족하는 기존 연구의 배합설계를 참고하여 실시하였다(Lee et al., 2018). 강섬유 혼입량은 해외 TBM 터널현장에서 시공된 사례가 있는 철근보강 없이 강섬유로만 보강된 세그먼트에 사용된 혼입량 40 kg/m³으로 결정하였으며, 구조용 합성섬유는 NATM 터널 지보재로 사용되는 강섬유 보강 슛크리트의 상대적인 성능과 비교하여 사용되는 혼입률 1%를 적용하여 9 kg/m³ 사용하였다. 본 연구에서 적용된 배합비는 Table 6과 같다.

Table 6. Mix design

Type of mix	F _{ck} (MPa)	W/B	Unit weight (kg/m ³)						
			Water	Cement	Blast furnace slag	Aggregate		Fiber	
						Coarse	Fine	Steel	Structural synthetic
SFRC segment	42	35.3	176.5	350	150	466	1,184	40	-
SSFRC segment	42	35.3	176.5	350	150	466	1,184	-	9

각 배합별 $\phi 100$ mm \times 200 mm의 표준공시체를 3개씩 제작하여 압축강도를 측정하였으며, 그 결과는 Table 7에 나타내었다. 강섬유 보강 세그먼트와 합성섬유 보강 세그먼트 배합 모두 설계기준강도인 42 MPa를 만족하였다.

GFRP plate 두께 및 보강섬유의 종류에 따라 설정한 실험변수는 Table 8과 같다.

Table 7. Compressive strength test result

Type of mix	No. 1	No. 2	No. 3	Average of compressive strength (MPa)
Steel fiber reinforcement	43.98	43.63	42.08	43.23
Structural synthetic fiber reinforcement	44.44	43.83	45.80	44.69

Table 8. Variables of performance test

Factor	Reinforcement	Amount of GFRP plate
SF	Steel fiber	-
SF+GFRP1	Steel fiber + GFRP plate 1 mm	109,040 mm ³
SF+GFRP3	Steel fiber + GFRP plate 3 mm	327,120 mm ³
SSF	Structural synthetic fiber	-
SSF+GFRP1	Structural synthetic fiber + GFRP plate 1 mm	109,040 mm ³
SSF+GFRP3	Structural synthetic fiber + GFRP plate 3 mm	327,120 mm ³

강섬유 보강 세그먼트 배합의 경우 강섬유만으로 보강한 SF 배합, 강섬유와 1 mm 두께의 GFRP plate를 혼용한 SF+GFRP1 배합, 강섬유와 3 mm 두께의 GFRP plate를 혼용한 SF+GFRP3 배합으로 설정하였다.

구조용 합성섬유 보강 세그먼트 배합의 경우 구조용 합성섬유만으로 보강한 SSF 배합, 구조용 합성섬유와 1 mm 두께의 GFRP plate를 혼용한 SSF+GFRP1 배합, 구조용 합성섬유와 3 mm 두께의 GFRP plate를 혼용한 SSF+GFRP3 배합으로 설정하여 실험을 진행하였다.

GFRP plate의 두께는 기존 전력구터널에 사용되었던 세그먼트(세그먼트 외경 3.5 m, 세그먼트 두께 200 mm)의 주철근량 대비 25%인 GFRP plate 1 mm (109,040 mm³)와 주철근량 대비 72%인 GFRP plate 3 mm (327,120 mm³)로 하였다.

4. 시험 시편제작

국내의 경우 최대 곡선반경 50 m의 전력구 터널이 시공된 사례가 있으며, 이때 사용한 급곡선부 세그먼트의 폭이 600 mm이다(Yun et al., 2011). 그러나 도심지에서 일반적인 왕복 2차선 차도로 구성되는 사거리 교차로를 통과하기 위한 최대 곡선반경은 30 m이며, 폭 600 mm 이하인 세그먼트가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 GFRP plate를 사용한 세그먼트의 휨성능 실험을 위한 세그먼트 시편 폭은 300 mm로 하였으며, 세그먼트 시편 두께는 기존 전력구터널에 보편적으로 사용되는 200 mm로 하여 제작하였다. 실물 크기의 세그먼트 길이는 2,200 mm이나 실내실험이 가능하도록 실물 세그먼트의 약 1/4 크기로 축소하여 550 mm로 제작하였으며, 동일 변수에 대하여 3개의 시편을 제작하였다.

섬유 및 GFRP plate 보강 세그먼트에 사용하는 GFRP plate 크기는 세그먼트와 GFRP plate간의 피복두께가 40 mm가 되도록 120 mm × 470 mm 제작하였으며, GFRP plate 크기와 세그먼트 시편에 GFRP plate를 적용한 모습은 Fig. 3과 같다.

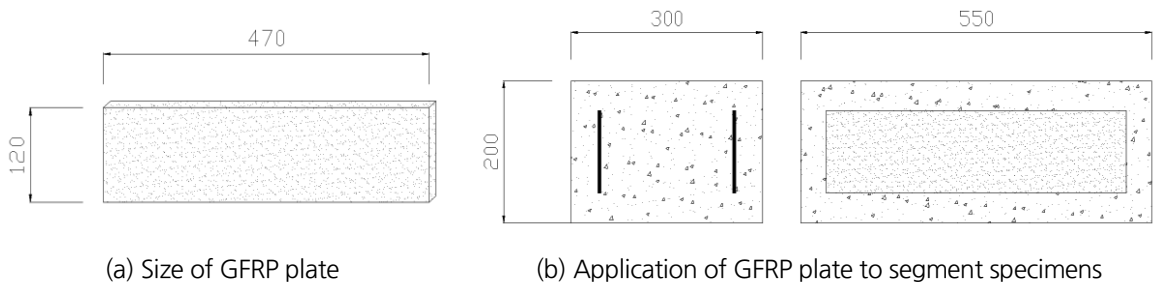


Fig. 3. Size of GFRP plate and segment for performance test

Fig. 4는 세그먼트 시편 제작 모습으로 콘크리트 계량 후 중력식 믹서를 사용하여 혼합하였으며(a), 세그먼트와 GFRP plate의 피복두께를 확보하기 위하여 스페이스 바를 조립하여(b), 세그먼트 시편 몰드에 설치하였다(c). 그리고 콘크리트 타설 후 진동 다짐을 하였으며(d), 증기양생을 실시한 후(e), 타설 1일 후 세그먼트 시편을 탈형하였다(f).



(a) Weighing and mixing



(b) Assembly of GFRP plate



(c) Mold assembly



(d) Concrete pouring



(e) Steam curing



(f) Removal of form

Fig. 4. Specimen production

5. 실험방법

휨성능 평가는 최대 용량 1,000 kN의 만능재료시험기(UTM)을 이용하였으며, UTM은 컴퓨터로 하중 및 변위량이 표시되며, 기능제어가 가능하다. 휨성능 실험모습은 Fig. 5와 같이 하부의 지지롤러 위에 세그먼트 시편을 위치하게 한 후 UTM을 0.3 mm/min의 속도로 3점 재하하였다. 2개의 변위센서(LVDT)를 상부 재하롤러가 위치하고 있는 시편 양쪽에 설치하여 수직변위를 측정하였다.

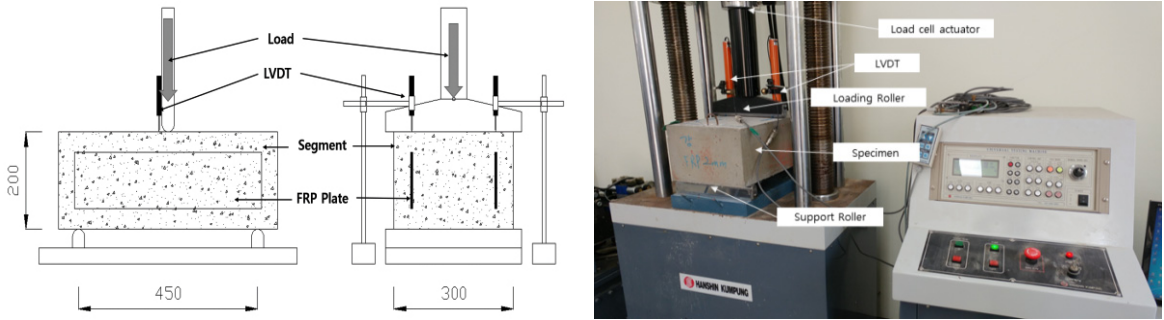


Fig. 5. Flexural performance test

섬유 종류 및 GFRP plate 두께에 따른 최대휨강도, 휨인성 및 등가휨강도는 ASTM C 1609 및 KS F 2566에 준하여 계산하였으며, 하중-변위 곡선의 최대 하중(P_p)과 첫 피크 하중(P_1)이 상이한 경우에는 각 하중에 대한 휨강도 f_1 과 f_p 를 구하고 P_{600} 과 P_{150} 을 읽고 그에 해당하는 휨강도 f_{600} , f_{150} 을 산정하였다.

휨인성은 처짐이 지간 l 의 $l/150$ 이 되기까지의 하중-변위 곡선 아래의 면적(A_b)이며, 등가 휨강도는 다음 식 (1)에 따라 산정하였다.

$$f'_r = \frac{A_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \quad (1)$$

여기서, δ_{tb} 는 지간의 $l/150$ 의 처짐(mm), A_b 는 Fig. 6에 나타난 $l/150$ 까지의 면적, l 은 지간(mm), b 는 파괴 면적의 평균 폭(mm), h 는 파괴 면적의 평균 높이(mm)이다.

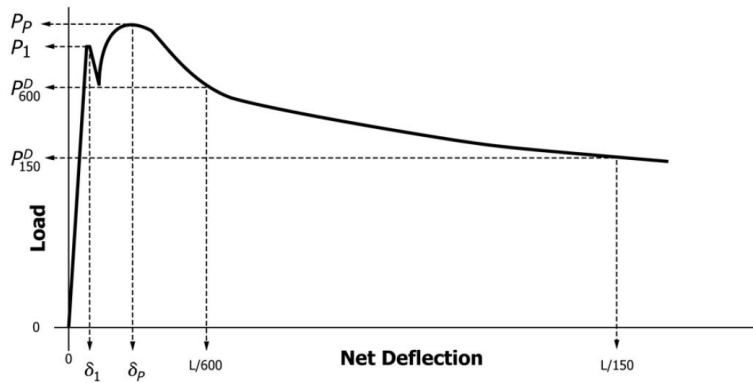


Fig. 6. Load-displacement curve when peak load is greater than first-peak load

6. 실험결과

6.1 하중변위

Table 9 및 Fig. 7은 휨 성능실험을 통한 동일 변수에 대하여 제작한 3개의 시편의 첫 번째, 두 번째 피크값에 따른 휨강도와 평균값을 나타내었으며, 하중-변위 곡선은 Fig. 8 및 9와 같다.

Table 9. Flexural strength test result

Division		Flexural strength of first peak load (MPa)	Flexural strength of peak load (MPa)	Average of flexural strength (first peak load) (MPa)	Average of flexural strength (peak load) (MPa)
Steel fiber reinforcement	SF	4.010	-	4.080	-
		5.140	-		
		3.090	-		
	SF+GFRP1	4.683	5.046	3.953	4.125
		2.752	2.824		
		4.424	4.505		
	SF+GFRP3	2.989	4.222	3.754	4.969
		2.351	3.597		
		5.922	7.088		
Structural synthetic fiber reinforcement	SSF	1.966	-	3.642	-
		4.975	-		
		3.985	-		
	SSF+GFRP1	4.752	5.351	3.544	3.876
		1.758	1.992		
		4.122	4.285		
	SSF+GFRP3	3.541	4.251	3.515	4.480
		5.243	6.323		
		1.761	2.866		

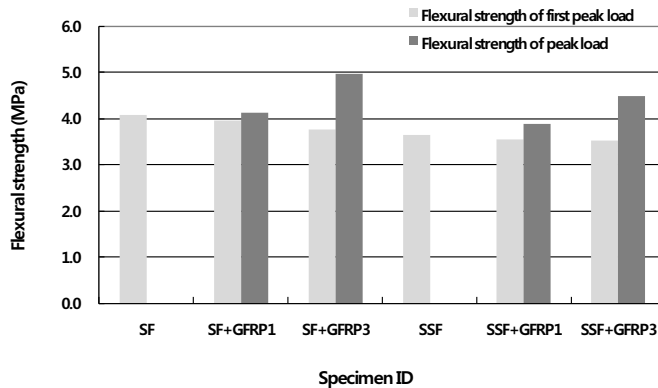


Fig. 7. Flexural strength test result

Fig. 8은 강섬유 및 GFRP plate 사용에 따른 하중-변위 곡선으로 강섬유만 사용한 세그먼트(SF 배합)는 강섬유의 인발 및 파괴로 기울기가 변화하면서 세그먼트가 완전히 파괴될 때까지 하중 값이 감소하였다.

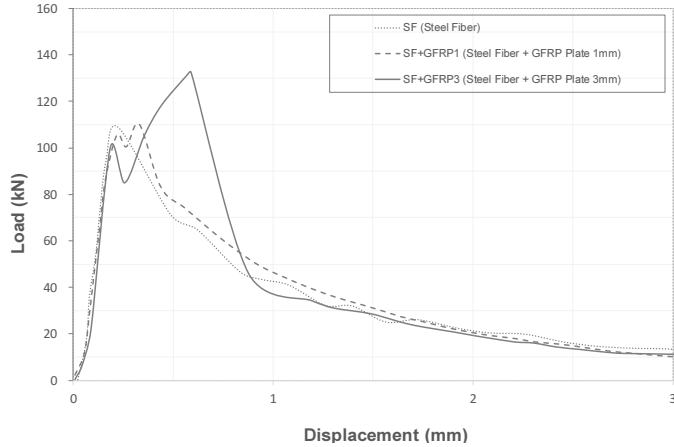


Fig. 8. Load-displacement curve of hybrid segment (steel fiber)

SF+GFRP1, SF+GFRP3 배합의 경우, 첫 번째 피크값에서 콘크리트가 파괴된 것으로 보이며, 그 후 GFRP plate가 하중을 지지하다 두 번째 피크값에서 GFRP plate가 항복된 것으로 판단된다.

SF 배합과 SF+GFRP1 배합은 최대 하중 108.8 kN, 110.0 kN으로 유사하였으나 SF+GFRP3 배합의 경우, 최대 하중 132.5 kN으로 SF 배합보다 21.78% 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 합성섬유 및 GFRP plate 사용에 따른 하중-변위 곡선으로 SSF 배합은 최대 하중 97.1 kN으로 세그먼트가 완전히 파괴되어 하중 값이 감소하는 그래프를 나타내었다.

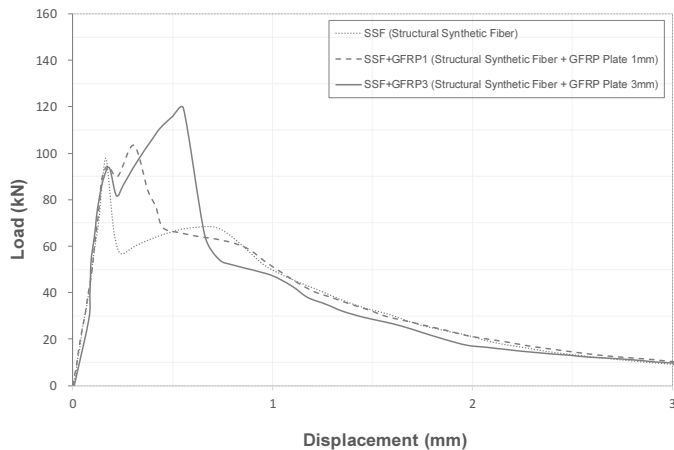


Fig. 9. Load-displacement curve of hybrid segment (structural synthetic fibers)

SSF+GFRP1, SSF+GFRP3 배합의 경우, 첫 번째 피크값에서 콘크리트가 파괴된 것으로 보이며, GFRP plate가 하중을 지지하다 두 번째 피크값에서 GFRP plate가 항복되면서 취성적 파괴를 보여주었다.

SSF 배합과 SSF+GFRP1 배합은 최대 하중 97.1 kN, 103.3 kN으로 유사하였으나 SSF+GFRP3 배합의 경우, 최대 하중 119.5 kN으로 SSF 배합보다 23.03% 증가하였다.

섬유와 GFRP plate 1 mm를 사용한 SF, SF+GFRP1, SSF, SSF+GFRP1 배합은 GFRP 보강효과가 크지 않았으나 GFRP plate 3 mm를 사용한 SF+GFRP3, SSF+GFRP3 배합은 강도증진 효과가 크게 나타났다.

6.2 휨인성 및 등가휨강도

Table 10은 ASTM C 1609에 따라서 섬유종류 및 보강재에 따른 하중-변위곡선(Fig. 8, 9)에서 시간의 1/150에 해당하는 변위인 3 mm까지의 하중-변위곡선 면적으로 계산한 휨인성과 시간의 1/150에 해당하는 변위까지의 하중-변위곡선 면적에서의 평균 휨강도 값인 등가휨강도를 계산하였다. 휨인성 결과 값에 따른 그래프는 Fig. 10과 같으며, 등가휨강도 결과 값에 따른 그래프는 Fig. 11과 같다.

Table 10. Flexural toughness and equivalent flexural strength values of hybrid segments

Division		Flexural toughness (kN · mm)	Equivalent flexural strength (MPa)	Average of flexural toughness (kN · mm)	Average of equivalent flexural strength (MPa)
Steel fiber reinforcement	SF	128.381	1.605	130.934	1.637
		145.426	1.818		
		118.995	1.487		
	SF+GFRP1	154.645	1.933	131.455	1.643
		105.270	1.316		
		134.450	1.681		
	SF+GFRP3	138.385	1.730	140.541	1.757
		124.782	1.560		
		158.456	1.981		
Structural synthetic fiber reinforcement	SSF	102.430	1.280	121.952	1.524
		149.213	1.865		
		114.213	1.428		
	SSF+GFRP1	145.450	1.818	130.739	1.634
		113.456	1.418		
		133.311	1.666		
	SSF+GFRP3	128.652	1.608	131.665	1.646
		155.045	1.938		
		111.298	1.391		

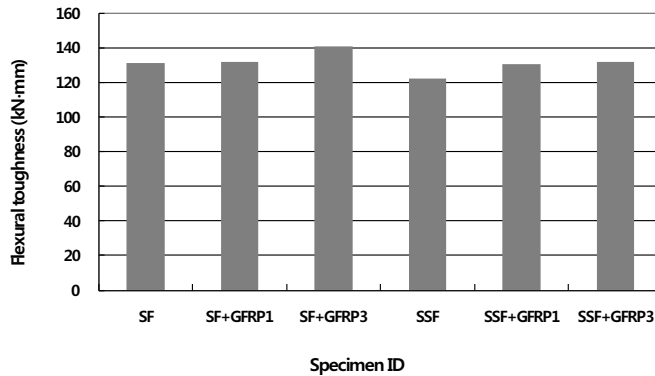


Fig. 10. Flexural toughness values

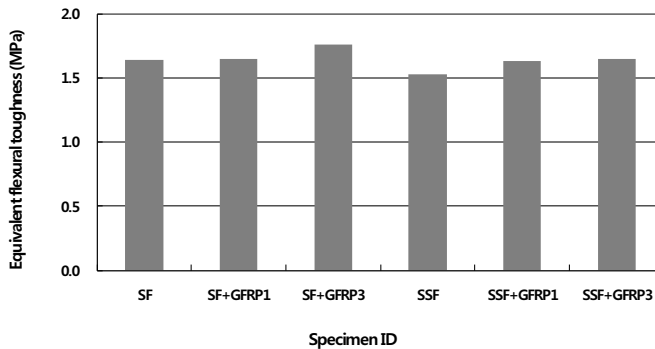


Fig. 11. Equivalent flexural strength values

강섬유 보강 세그먼트와 합성섬유 보강 세그먼트의 휨인성 및 등가휨강도를 비교 분석한 결과, SF 배합의 평균 휨인성은 130.934 kN·mm, 평균 등가휨강도는 1.637 MPa이며, SSF 배합의 평균 휨인성은 121.952 kN·mm, 평균 등가휨강도는 1.524 MPa로 SF 배합의 휨인성 및 등가휨강도가 SSF 배합보다 7.37% 높은 것으로 나타났다.

SF+GFRP1의 휨인성 및 등가휨강도가 SSF+GFRP1보다 0.5% 높았으며, SF+GFRP3의 휨인성 및 등가휨강도가 SSF+GFRP3보다 6.7% 높게 나타났다.

강섬유 보강 세그먼트가 합성섬유 보강 세그먼트보다 휨성능이 약 0.5~7.4% 높게 나타났다. 따라서 합성섬유로 보강할 경우 강섬유 대비 동등이상의 휨성능을 발휘하기 위해서는 추가 혼입량이 필요할 것으로 판단된다.

강섬유 보강 세그먼트의 GFRP plate 사용 및 두께에 따른 휨인성 및 등가휨강도를 분석한 결과, SF+GFRP1 배합이 SF 배합보다 휨인성 및 등가휨강도가 6.46% 높은 것으로 나타났으며, SF+GFRP3 배합은 SF 배합보다 휨인성 및 등가휨강도가 7.34% 높은 것으로 나타났다.

합성섬유 보강 세그먼트의 GFRP plate 사용 및 두께에 따른 휨인성 및 등가휨강도를 분석한 결과, SSF+GFRP1 배합이 SSF 배합보다 휨인성 및 등가휨강도가 6.72% 높은 것으로 나타났으며, SSF+GFRP3가 SSF 배합보다 휨

인성 및 등가휨강도가 7.96% 높게 나타났다.

휨 성능시험 시 첫 번째 피크값과 두 번째 최대 피크값이 나타날 때 세그먼트에 발생한 균열모습은 Fig. 12와 같다. 휨 성능시험 후 파괴시편을 확인한 결과, 콘크리트와 GFRP plate의 재료분리는 일어나지 않은 것으로 나타나 섬유보강콘크리트에 휨강성 증진을 위한 보강재로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

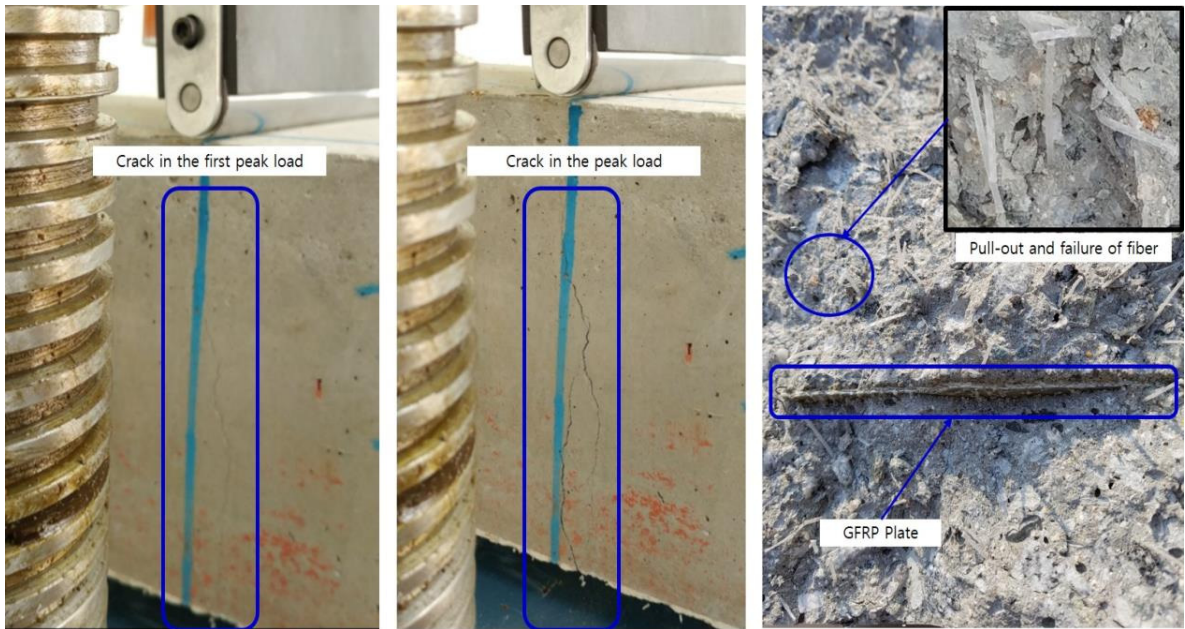


Fig. 12. Crack and fracture shape of hybrid segment

7. 결론

본 연구에서는 SFRC 세그먼트의 최대하중 증가를 위한 보강재로 GFRP plate 고려하여 보강섬유의 종류 및 GFRP plate 두께를 주요 변수로 한 세그먼트의 휨 성능을 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 섬유로만 보강된 SF, SSF 배합의 경우에는 균열이 발생하는 순간 최대 하중에 도달하는 것으로 나타났으며, 섬유와 GFRP plate를 모두 사용한 SF+GFRP1, SF+GFRP3, SSF+GFRP1, SSF+GFRP3 배합은 첫 번째 피크값에서 콘크리트가 파괴되면서 균열 발생하였고 GFRP plate가 하중을 지지하다 두 번째 피크값에서 GFRP plate가 항복된 것으로 판단된다.
2. 강섬유 보강 세그먼트의 경우, SF 배합과 SF+GFRP1 배합은 최대 하중 108.8 kN, 110.0 kN으로 유사하였으나, SF+GFRP3 배합의 경우, 최대 하중 132.5 kN으로 SF 배합보다 21.78% 증가하는 것으로 나타났다. 합성 섬유 보강 세그먼트의 경우, SSF 배합과 SSF+GFRP1 배합은 최대 하중 97.1 kN, 103.3 kN으로 유사하였

- 나 SSF+GFRP3 배합의 경우, 최대 하중 119.5 kN으로 SSF 배합보다 23.03% 증가하였다.
3. GFRP plate 1 mm를 사용한 SF+GFRP1, SSF+GFRP1 배합은 GFRP 보강효과가 크게 발생하지 않았으나 GFRP plate 3 mm를 사용한 SF+GFRP3, SSF+GFRP3 배합은 강도증진 효과가 크게 나타났다.
 4. 강섬유 보강 세그먼트가 합성섬유 보강 세그먼트보다 휨성능이 약 0.5~7.4% 높게 나타났다. 따라서 합성섬유로 보강할 경우 강섬유 대비 동등이상의 휨성능을 발휘하기 위해서는 추가 혼입량이 필요할 것으로 판단된다.
 5. 각 섬유별로 GFRP plate 사용 및 두께에 따른 휨인성 및 등가휨강도를 분석한 결과, 합성섬유 보강 세그먼트의 휨인성 및 등가휨강도 최대 증가율은 SSF+GFRP3 배합이 SSF 배합 대비 7.96%로 나타났으며, 강섬유 보강 세그먼트의 휨인성 및 등가휨강도 최대 증가율은 SF+GFRP3 배합이 SF 배합 대비 7.34%로 나타났다.
 6. 본 연구는 기존 세그먼트에 사용하지 않는 GFRP plate를 적용한 세그먼트의 휨성능을 검토하였으며, GFRP plate를 사용함으로써 휨인성 및 등가휨강도 등이 증가하여 지보성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다. 또한 콘크리트와 GFRP plate 간의 재료분리는 일어나지 않아 섬유보강콘크리트에 휨강성 증진을 위한 보강재로 사용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 본 연구는 GFRP plate를 적용한 세그먼트 개발을 위한 기초연구로서, 추후 실용화하기 위해서는 실대형 크기의 GFRP plate 세그먼트를 제작하여 효과를 검증할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2018년 건설기술연구사업의 ‘도심지 소단면(Φ 3.5 m급) 터널식 공동구 설계 및 시공 핵심기술 개발(18SCIP-B105148-04)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Abbas, S. (2014), “Structural and durability performance of precast segmental tunnel linings”, Electronic Thesis and Dissertation Repository, pp. 1865.
2. Chang, S.H., Lee, G.P., Choi, S.W., Bae, G.J. (2011), “State of the art of segment lining in shield tunnel and statistical analysis of its key design parameters”, Tunnel and Underground Space, Vol. 21, No. 6, pp. 427-438.
3. Kang, Y.T., Kim, G.Y., Lee, B.K., Lee, S.K., Kim, G.T, Nam, J.S. (2017), “Flexural behavior of fiber-reinforced concrete by fiber types”, Proceedings of the 2017 Fall Symposium of the Korea Institute of Building Construction, Busan, Vol. 17, No. 2, pp. 15-16.
4. Ku, D.O., Kim, S.D., Kim, H.S., Choi, K.K. (2014), “Flexural performance characteristics of amorphous steel fiber-reinforced concrete”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 26, No. 4, pp. 483-489.
5. Lee, G.P., Bae, G.J., Moon, D.Y., Kang, T.S., Chang, S.H. (2013), “Evaluation of steel fiber reinforcement effect in segment lining by full scale bending test”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 3, pp. 215-223.

6. Lee, J.H., Kim, H.H., Park, S.K., Oh, R.O., Kim, H.D., Park, C.G. (2018), “Mechanical properties and durability of latex-modified fiber-reinforced concrete: a tunnel liner application”, *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2018, pp. 14.
7. Lee, J.Y., Kim, H.H., Oh, R.O., Sung, S.K., Park, S.K. (2016), “A study on TBM segments design for sharp-curved construction of small-diameter utility tunnel in urban”, *Proceedings of the KSCE 2016 Convention Program*, Jeju, pp. 196-197.
8. Moon, D.Y., Chang, S.H., Bae, G.J., Lee, G.P. (2012), “Evaluation of tensile properties of SFRC for TBM tunnel segment”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 3, pp. 247-260.
9. Moon, D.Y., Kang, T.S., Chang, S.H., Lee, G.P., Bae, G.J. (2013), “Flexural performance evaluation of SFRC with design strength of 60 MPa”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 175-186.
10. Park, Y.H., Choi, Y. (2013), “Flexural behaviors of GFRP rebars reinforced concrete beam under accelerated aging environments”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, No. 2, pp. 137-144.
11. Seo, D.W., Park, K.T., You, Y.J., Park, J.S. (2016), “Study on applicability of steel-hybrid GFRP rebar to concrete structures”, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 7, No. 4, pp. 11-17.
12. Sim, J.S., Kwon, H.W., Lee, H.H., Kang, T.S. (2010), “An experimental study for bending characteristic of concrete beam reinforced with FRP rebar under fatigue”, *Journal of Engineering and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 31-38.
13. Woo, S.J., Yoo, C.S. (2015), “A study on the member forces of segmental linings considering key segments”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 363-382.
14. Yoo, C.S., Jeon, H.M. (2012), “A comparative study on methods for shield tunnel segment lining sectional forces”, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 3, pp. 159-181.
15. Yun, D.S., Kim, J.H., Choi, S.C., Lee, M.J. (2011), “A case for domestic development of shield machine and construction”, *Proceedings of The 12th KTA International Symposium on Mechanized Tunnelling Technology*, Seoul, pp. 169-180.