

원형패널 시험을 활용한 두 종류 섬유 보강 슛크리트의 휨거동 평가

Flexural Behavior Evaluation of Two Types Fiber Reinforced Shotcrete using Round Panel Test

Chanki Jeon^{a,1}, Joongkyu Jeon^{b,*}

^a Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-772, Republic of Korea

^b Technology Research Lab, Kolon Global Co., 46 Jeondae-ro 16-gil, Pogok-eup, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi 449-815, Republic of Korea

ABSTRACT

This study evaluated the flexural performance of steel and PP fiber reinforced shotcrete using round panel test according to ASTM that can consider the actual stress of fiber reinforced shotcrete in tunnel and under ground structures. The results of round panel test are converted to the square panel test results according to the EFNARC. The energy absorptions of each fiber reinforced shotcrete were classified according to the EFNARC toughness classification. Test results show that the PP fiber reinforced shotcrete has better flexural performance compared with the steel fiber reinforced shotcrete.

KEYWORDS

Round panel test
ASTM C 1550
Steel fiber
PP fiber
Fiber reinforced shotcrete

본 연구에서는 터널 및 지하공간에서 사용되는 섬유보강 슛크리트의 실제 응력상태를 고려할 수 있는 ASTM 규정의 원형패널 시험을 활용하여 섬유 혼입량에 따른 강섬유 및 PP섬유 보강 슛크리트의 휨성능을 평가하였다. 원형패널 시험에 의한 결과를 EFNARC 규정의 사각패널 시험 결과로 환산하고 인성등급을 분류하여 각 섬유보강 슛크리트의 에너지 흡수능력을 비교하였다. EFNARC 규정으로 환산된 에너지 흡수량의 비교 결과, 강섬유 보강 슛크리트와 PP섬유 보강 슛크리트는 모두 섬유의 혼입량이 증가할수록 에너지 흡수량이 증가하였으며, PP섬유 보강 슛크리트의 에너지 흡수능력은 강섬유를 혼입한 슛크리트과 비교하여 섬유의 혼입량에 따라 더욱 우수한 것으로 확인되었다.

원형패널 시험
ASTM C 1550
강섬유
PP섬유
섬유보강 슛크리트

© 2015 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-31-329-0663. Fax. 82-31-329-0601.
Email. jkjeon31@kolon.com

1 Tel. 82-32-835-8776. Email. johnland@incheon.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Nov. 30, 2015
Revised Dec. 02, 2015
Accepted Dec. 14, 2015

1. 서론

터널 및 지하공간 등에 지보재로 적용되는 섬유보강 슛크리트는 시공상의 편리, 공기단축 및 보강특성 향상을 위하여 사용되고 있으며, 슛크리트에 섬유를 혼입하여 균열 발생 후 인성을 확보함에 따라 구조물의 인장강도와 휨강도를 높이고, 굴착 중 및 시공완료 후의 구조물의 안정성을 확보해주는 역할을 한다(Jeon et al., 2011; Jeon et al., 2012).

이러한 섬유보강 슛크리트가 적용되는 구조물들은 주로 휨인장 응력을 받게 되며, 구조물은 부재의 길이에 비해 두께가 얇기 때문에 일방향 인장 응력보다는 이방향 인장 응력을 받게 된다(Zi et al., 2013). 따라서, 구조물의 설계 시 일방향 인장 응력이 아닌 이방향 인장응력 상태가 고려된 휨인장 강도가 반영되어야 한다.

섬유보강 슛크리트의 인성특성을 나타내는 방법으로는 에너지 흡수능력을 절대값으로 나타내는 방법, 에너지 흡수능력과 관련하여 무차원 지수로 나타내는 방법 및 균열 발생 후 임의 처짐까지의 등가휨강도로 나타내는 방법 등이 있다. 유럽통합규정인 EFNARC(European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), 호주의 RTA(Roads and Traffic Authority), 일본의 JCI, 미국의 ASTM, ACI에서는 에너지 흡수능력으로써 슛크리트 성능을 평가하는 방법을 제시하고 있으며, 일본의 JSCE에서는 등가휨강도를 이용한 성능평가 방법을 제시하고 있다(Ahn et al., 2001).

국내의 경우 섬유보강 슛크리트의 휨인성은 일방향 휨응력 상태가 발생하는 보 시험체에 의한 평가 결과만이 고려되고 있어 구조물에서 발생하는 균열강도 및 균열 발생 위험도를 충분히 반영하기 어려운 단점이 있다(Kim et al., 2011; Jeon et al., 2015).

해외에서는 휨인성 특성을 평가하는 방법이나 성능기준에 대한 연구가 활발히 진행되면서, 기존의 평가방법들의 단점을 보완한 원형패널을 이용한 시험방법이 제시되어 있으며, 이는 섬유보강 슛크리트 라이닝이 실제로 거동하는 형태와 유사하여 구조물의 이방향 응력상태를 반영할 수 있다(Lee et al., 2010).

따라서, 본 논문에서는 원형패널 시험을 활용하여 섬유보강 슛크리트의 휨인성을 평가하였으며, 강섬유와 PP섬유에 대해 혼입량에 따른 시험결과를 EFNARC에서 제시하는 시험 결과로 환산하고 각 시험체의 인성등급을 분류하여 평가 결과를 비교하고자 한다.

2. 시험

2.1 개요

본 논문에서 원형패널 시험에 따른 섬유보강 슛크리트의 거동을 분석하기 위하여 Table 1과 같은 배합을 사용하였으며, 본 배합에는 밀도 3.15 g/cm^3 의 보통포틀랜드시멘트(OPC)를 사용하였다. 또한, 섬유의 종류 및 혼입량의 변화에 따른 거동을 비교하기 위해 굵은 골재 최대치수는 13 mm, W/C는 43.5 %로 동일한 배합을 적용하였고, 섬유보강 슛크리트에 적용되는 섬유는 강섬유(SF)와 폴리프로필렌(PP)섬유를 사용하였으며 각 섬유의 물성을 Table 2에 나타내었다. 강섬유는 m^3 당 각각 20, 30, 40 kg(이하 SF20, SF30, SF40)을 혼입하였으며, PP섬유는 밀도가 7.85g/cm^3 인 강섬유와 동등한 수준의 혼입률인 m^3 당 각각 5, 7, 9 kg(이하 PP05, PP07, PP09)을 혼입하여 강섬유 보강 슛크리트(이하 SF-FRS)와 PP 섬유 보강 슛크리트(이하 PP-FRS) 시험체를 제작하였다.

Table 1. Mix design of shotcrete

Contents	G_{\max}	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m^3)					AD (%)
				W	OPC	S	G	Fiber	
SF-FRS	13	43.5	60	205	471.3	961.8	631.5	20, 30, 40	0~0.18
PP-FRS	13	43.5	60	205	471.3	961.8	631.5	5, 7, 9	0~0.20

Table 2. Material properties of fiber reinforcements

Fiber	Density (g/cm ³)	Length (mm)	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)
SF	7.85	30	0.5	810
PP	0.91	50	0.5	450

2.2 원형패널 시험

본 논문에서는 ASTM C 1550(2005)에 따라 원형패널 시험을 활용하여 섬유보강 슛크리트의 휨인성 평가하였다. 원형패널 시험은 3점지지 형식으로 균열이 인접한 지지점 사이에서 형성되어 일정한 방향과 패턴을 가지고 있으며, 이는 유럽통합규정 EFNARC(1996)의 사각형 패널시험에 대한 단점인 불규칙한 균열형태로 인한 시험결과의 높은 분산성이 보완된 형태의 시험방법이다. ASTM C 1550(2005)에서는 Fig. 1과 같이 120°각도의 3개 지지점 위에 놓여진 두께 75 mm, 지름 800 mm의 원형패널 시험체 중앙에 지름이 100 mm인 재하판을 이용하여 집중 하중을 재하하도록 제시되어 있으며, 최대 처짐은 40 mm까지 얻어야 한다. Fig. 2와 같이 원형패널 시험에서 얻은 하중-처짐 곡선으로부터 면적을 계산하여 에너지 흡수량을 구하고 식 (1)을 이용하여 원형패널의 크기와 두께에 대한 보정을 통해 섬유보강 슛크리트의 휨인성을 평가한다.

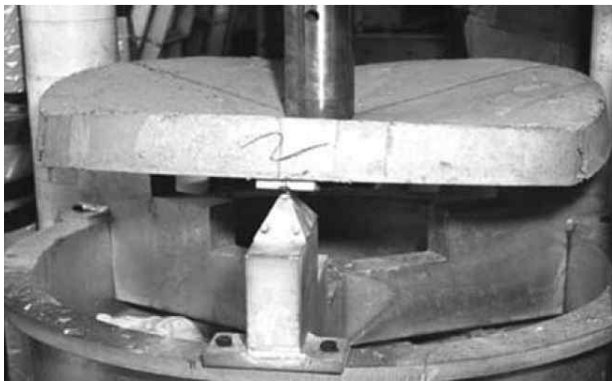


Fig. 1. Suggested support fixture (ASTM C 1550, 2005)

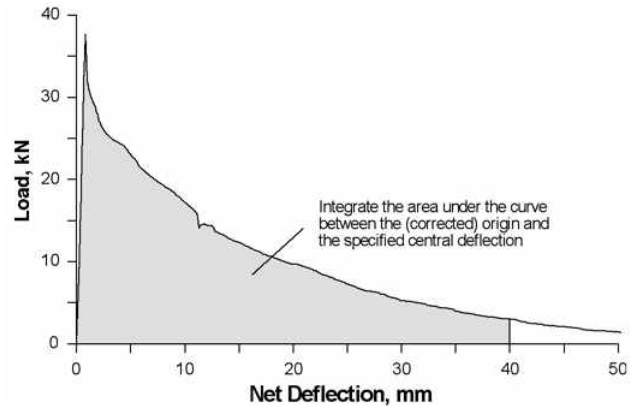


Fig. 2. Load-Net Deflection Curve (ASTM C 1550, 2005)

$$W = W' \left(\frac{t_0}{t} \right)^\beta \left(\frac{d_0}{d} \right), \quad \beta = 2.0 - (\delta - 0.5) / 80 \tag{1}$$

- 여기서, W : 보정된 에너지 흡수량(J)
- W' : 측정된 에너지 흡수량(J)
- t : 시험체 평균 두께(mm)
- t_0 : 시험체 공칭 두께(75 mm)
- d : 시험체 평균 직경(mm)
- d_0 : 시험체 공칭 직경(800 mm)
- δ : 에너지 흡수량이 측정되는 처짐(mm)

3. 시험 결과 및 분석

3.1 시험 결과

Fig. 3에 원형패널 시험에 의한 SF-FRS와 PP-FRS 시험체의 파괴형상을 나타내었다. Fig. 3과 같이 SF-FRS와 PP-FRS 시험체 모두 원형패널에 하중이 가해지는 중량을 중심으로 지점 사이에서 일정한 세 개의 균열에 의한 파괴양상을 확인할 수 있다.

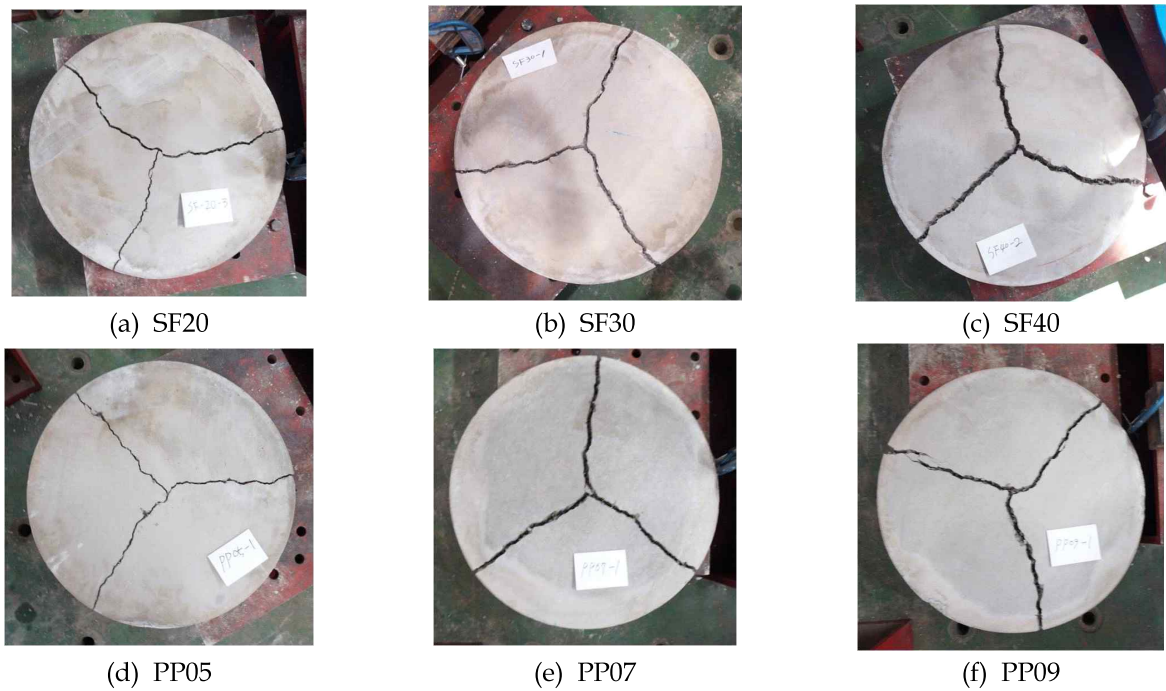


Fig. 3. The shape of failure

원형패널 시험에서 얻은 SF-FRS와 PP-FRS의 하중-처짐 곡선을 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. SF-FRS의 경우, Fig. 4와 같이 초기 균열이 생성된 이후 하중이 급격히 저하되는 거동을 나타내었다. 강섬유의 혼입량이 증가할수록, 시험체 처짐의 증가에 따라 하중이 보다 서서히 저하하는 연성적인 인장거동을 보였으나, 처짐이 40 mm에서는 동등한 수준의 인장 저항 능력을 나타내는 것으로 확인되었다.

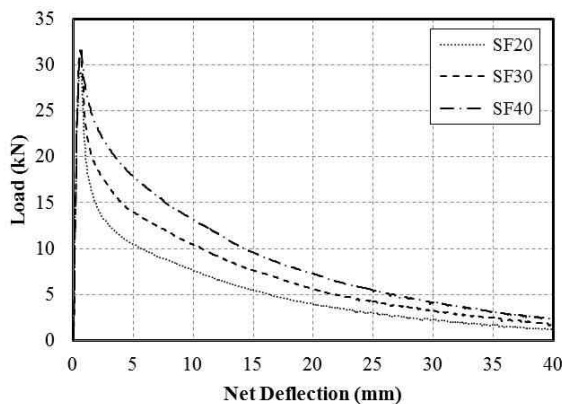


Fig. 4. Load-Net Deflection Curve(SF-FRS)

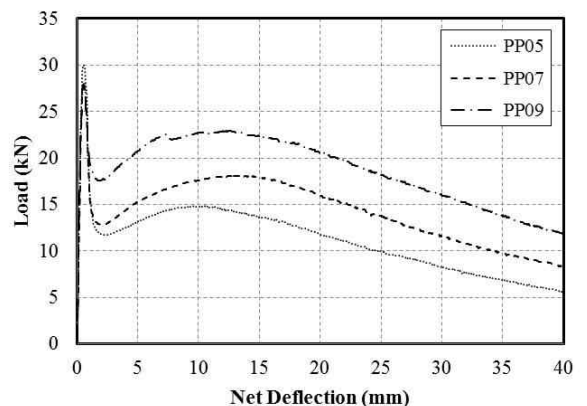


Fig. 5. Load-Net Deflection Curve(PP-FRS)

PP-FRS는 초기 균열이 생성된 이후 하중이 급격히 감소하였다가 인장저항 능력이 증가한 후 다시 서서히 감소하는 거동을 나타내었다. PP05-FRS는 최대하중 30.08 kN 이후 11.72 kN까지 하중이 약 61% 정도 감소하였다가 14.83 kN까지 하중을 회복하였으며, PP07-FRS는 최대하중 28.26 kN 이후 최대하중의 약 55%인 12.80 kN까지 하중이 감소된 후 균열이 진행됨에 따라 18.09 kN까지 회복하였다. 마지막으로 PP09-FRS는 최대하중 28.02 kN에서 약 37%인 17.58 kN까지 하중이 저하하였다가 22.91 kN까지 하중을 회복하였다.

이상의 결과를 종합하였을 때, PP-FRS는 PP섬유의 혼입량이 증가할수록 초기균열 이후 하중이 저하되는 폭은 감소하였으며, 이후 2차 최대하중까지 인장저항 능력이 회복되는 폭은 증가하는 것으로 확인되었다.

3.2 시험 결과 분석

SF-FRS와 PP-FRS의 원형패널 시험에 의한 결과를 Table 3과 Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6과 같이 최대하중은 SF-FRS가 평균 30.97 kN, PP-FRS가 28.57 kN로 동등한 수준을 나타내었으며, 섬유보강 슛크리트의 최대하중은 섬유 종류나 혼입량에 따른 영향이 없는 것으로 확인되었다.

Table 3. Test results

Contents	SF20	SF30	SF40	PP05	PP07	PP09
$P_{max}(kN)$	29.31	31.61	32.00	30.08	28.26	28.02
$W(J)$	5 mm	73.79	87.52	109.02	68.28	93.12
	10 mm	118.40	145.35	185.01	136.93	199.77
	20 mm	173.64	220.09	282.49	268.72	414.25
	40 mm	220.27	286.12	369.19	433.21	727.54

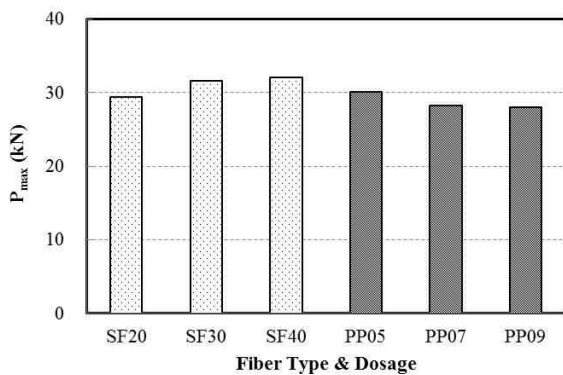


Fig. 6. Maximum Load

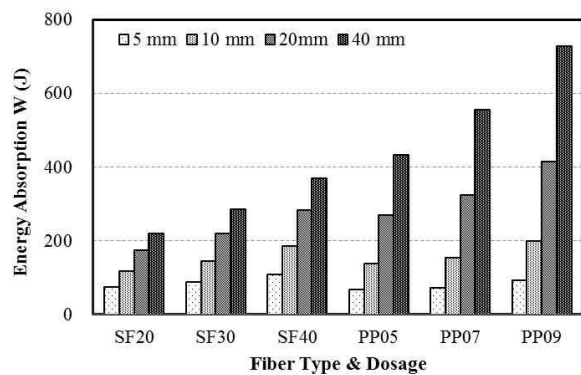


Fig. 7. Energy Absorption

Fig. 4와 Fig. 5의 하중-처짐 곡선 아래의 면적으로부터 계산된 처짐 5 mm, 10 mm, 20 mm 그리고 40 mm에서의 에너지 흡수량을 Fig. 7에 나타내었으며, 모든 시험체는 섬유의 혼입량이 증가할수록 에너지 흡수량이 증가하였다.

처짐이 5 mm와 10 mm에서의 에너지 흡수량은 전반적으로 SF-FRS와 PP-FRS가 동등한 수준으로 측정되었으나, 처짐이 20 mm, 40 mm 경우에는 PP-FRS의 에너지 흡수량이 더욱 큰 값을 나타내었으며, 40mm 일때의 PP09-FRS의 에너지 흡수량은 727.54J로 SF40-FRS의 에너지 흡수량 369.19 J과 비교하여 약 2배 정도 높은 것으로 확인되었다. 또한, SF-FRS

의 경우 처짐의 증가에 따른 에너지 흡수량이 거의 일정한 폭으로 증가한 반면에, PP-FRS는 처짐이 진행될수록 증가되는 에너지 흡수량의 폭이 더욱 큰 것으로 나타내었다. 이는 PP-FRS의 경우 SF-FRS에 비해 섬유 혼입량이 증가할수록 최대하중 이후 저하되는 하중의 폭이 작아지고 이후, 2차 최대하중까지 하중이 회복되는 폭이 크기 때문에 더 많이 에너지를 흡수할 수 있기 때문이라고 판단된다.

ASTM에는 원형패널 시험 결과에 따른 등급에 관한 규정이 없기 때문에, SF-FRS와 PP-FRS의 원형패널 시험에 의한 결과를 EFNARC에서 규정하는 에너지 흡수량으로 환산하여 인성등급을 구분하였다.

EFNARC(1996)에서는 4변이 지지된 600 × 600 mm 사각형 패널에 두께가 100 mm인 재하판을 사각패널 중앙에 두고 중앙점의 처짐이 25 mm까지 일정한 속도로 하중을 재하하여 얻은 하중-처짐 곡선 아래의 면적으로부터 에너지 흡수량을 구한다.

EFNARC(1996)에서는 사각패널 시험에 의한 처짐 25 mm에서의 에너지 흡수량에 대해 Table 4와 같이 3등급으로 구분하고 있으며, Bernard(1999)은 실험을 통해 원형패널 시험에 의한 처짐 40 mm에서의 에너지 흡수량과 EFNARC의 사각패널 시험의 결과에 대한 상관관계를 식 (2)와 같이 제안하였다.

Table 4. Energy absorption requirements(EFNARC, 1996)

Toughness classification	Energy absorption in joule for deflection up to 25 mm
a	500
b	700
c	1,000

$$E_{EFNARC} = 2.481 \times E \tag{2}$$

여기서, E_{EFNARC} : EFNARC 규정 시험에 의한 처짐 25 mm에서의 에너지 흡수량(J)

E : ASTM 규정 시험에 의한 처짐 40 mm에서의 에너지 흡수량(J)

식 (2)로부터 환산된 에너지 흡수량과 EFNARC(1996)규정에 의해 분류된 등급을 Table 5와 Fig. 8에 나타내었다. SF-FRS의 경우 SF20-FRS의 환산된 에너지 흡수량은 547 J로 500 J 이상, 700 J 이하인 등급 a로 분류되었으며, SF30-FRS와 SF40-FRS의 환산된 에너지 흡수량은 각각 710 J과 916 J로 에너지 흡수량 700 J 이상, 1000 J 이하인 b등급으로 구분되었다. PP-FRS의 경우, EFNARC 규정으로 환산된 PP05-FRS, PP07-FRS 및 PP09-FRS의 에너지 흡수량은 각각 1,075 J, 1,377 J 그리고 1,805 J로 모두 1,000 J 이상인 c등급으로 분류되었다.

Table 5. Toughness classification(EFNARC)

Contents	SF20	SF30	SF40	PP05	PP07	PP09
$E_{EFNARC}(J)$	547	710	916	1,075	1,377	1,805
Toughness classification	a	b	b	c	c	c

SF-FRS와 PP-FRS를 비교하였을 때, PP09-FRS의 에너지 흡수량은 1,805 J로 SF40-FRS의 에너지 흡수량 916 J과 비교하여 약 2배 정도 높은 것으로 측정되었다.

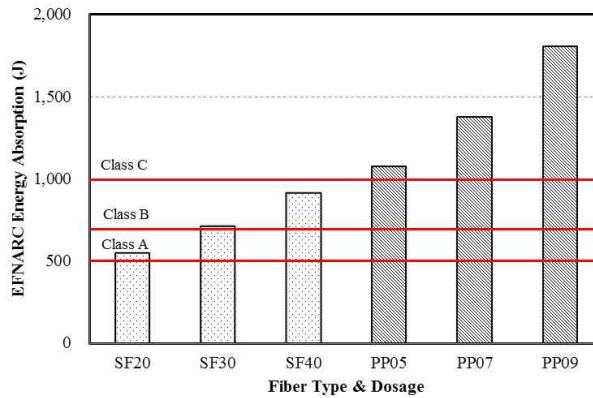


Fig. 8. Energy Absorption (EFNARC)

4. 결론

본 연구에서는 섬유보강 슛크리트가 적용되는 구조물의 실제 응력상태를 반영할 수 있는 시험 방법인 ASTM 규정의 원형패널 시험을 통해 혼입량에 따른 SF-FRS와 PP-FRS의 휨성능을 평가하고 결과를 분석하였다. 본 연구분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 원형패널 시험 결과, 최대하중은 SF-FRS와 PP-FRS 모두 동등한 수준을 나타내었으며, 이는 동일한 배합을 사용하였을 때, 섬유의 종류나 혼입량은 섬유보강 슛크리트의 최대하중에 영향을 미치지 않은 것으로 확인되었다.

(2) SF-FRS의 경우, 최대하중 이후 처짐이 진행될수록 하중이 급격히 저하되는 거동을 보였으며, 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 하중의 저하가 보다 서서히 진행되었으나, 처짐이 40 mm에의 인장저항 능력은 모두 동등한 수준을 나타내었다. 최대하중 이후 SF-FRS의 인장저항 능력은 섬유의 혼입량이 증가하여도 큰 변화가 없는 것으로 확인되었다.

(3) PP-FRS의 경우, 모든 시험체에서 최대하중 이후 하중이 급격히 저하 된 후 처짐이 증가함에 따라 인장저항 능력이 회복되었다가 다시 하중이 감소하는 거동을 나타내었으며, 섬유의 혼입량이 증가할수록 최대하중 이후 저하되는 하중의 폭은 감소하고, 이후 2차 최대하중까지 하중이 회복되는 폭은 증가하였다. 최대하중 이후 PP-FRS의 인장저항 능력은 섬유의 혼입량이 증가할수록 우수한 특성을 나타내었다.

(4) 원형패널 시험에 대한 결과를 EFNARC에서 규정하는 사각패널 시험 결과로 환산하여, 등급을 분류하였을 경우 SF20-FRS는 a등급, SF30-FRS와 SF40-FRS는 b등급으로 분류되었으며, PP05-FRS, PP07-FRS 그리고 PP09-FRS는 모두 c등급으로 분류되었다.

(5) EFNARC의 사각패널 시험 결과로 환산된 에너지 흡수량을 비교하였을 때, PP09-FRS의 에너지 흡수량은 SF40-FRS의 에너지 흡수량에 비해 약 2배 정도 높은 것으로 측정되었다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2015년도 자체연구비의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

Ahn, T.S., Lee, S.D., Han, S.H., Kim, J.C., Ryu, J.H., Lee, H.K. (2001). Enhancement and Quality Control of Steel Fiber Reinforced Shotcrete (II), Korea Expressway Corporation, Korea

- ASTM. (2005). ASTM C 1550-05 : Standard test method for flexural toughness of fiber reinforced concrete(using centrally loaded round panel), ASTM international, West Conshohocken, PA, USA.
- Bernard E.S. (1999). Correlations in the performance of fiber reinforced shotcrete beams and panels, University of Western Sydney, no. CE9. Australia.
- EFNARC. (1996). European specification for sprayed concrete.
- Jeon, C.K., Jeon, J.K. (2011). "Properties of advanced synthetic fiber reinforced concrete for improvement of tunnel shotcrete performance." Journal of the Korea Society of Disaster information, Vol. 7 No. 1, pp.43-50
- Jeon, J.K., Kim, G.Y., Jeon, C.K., Lee, S.C. (2012). "Evaluation on the mechanical performance of concrete using entanglement polyamide fiber." Journal of the Korea Society of Disaster information, Vol. 8 No. 3, pp.223-233
- Jeon, J.K., Kim, S.G., Jeon, C.K., Kim, K.H. (2015). "Flexural performance evaluation of steel fiber reinforced shotcrete using round panel test." Proceedings of the Korea Concrete Institute, Gyeongju, Korea, Vol. 27 No. 2, pp.549-550
- Kim, J.H., Zi, G.S. (2011). "An experimental study on the flexural behavior of the round concrete panels according to the evaluation method of biaxial flexural tensile strengths." Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.23, No. 4, pp.479-486.
- Lee, S.Y., Park, Y.J., Kim, S.M., You, K.H., Jang, S.I., Suh, Y.H. (2010). "A study on the performance evaluation of polypropylene fiber reinforced concrete." Journal of Korea Society for Rock Mechanics, Vol.20, No. 5, pp.378-389.
- Zi, G.S., Kim, J.H. (2013). "An experimental study on strength properties, size effect, and fatigue behaviour of concrete under biaxial flexural stress state" Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 33, No. 3, pp.901~907.