

시멘트 복합체에 근입된 숏크리트용 구조 섬유유의 잔골재 조립률에 따른 인발성능 비교

최창순¹ · 이상돈² · 송기일^{3*}

¹학생회원, 인하대학교 사회인프라공학과 석사과정

²정회원, 한국도로공사 도로교통연구원 연구위원

³정회원, 인하대학교 사회인프라공학과 정교수

Experimental study on pullout performance of structural fiber embedded in cement composites according to fineness modulus of fine aggregate

Chang-Soon Choi¹ · Sang-Don Lee² · Ki-Il Song^{3*}

¹Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Inha University

²Research Fellow, Korea Expressway Corporation Research Institute

³Professor, Dept. of Civil Engineering, Inha University

*Corresponding Author : Ki-Il Song, ksong@inha.ac.kr

Abstract

This research performed single fiber pull-out test to evaluate the effect between fineness modulus of cement composites and the fiber bond performance (bond strength and pull-out energy). A synthetic fiber (polypropylene) and a steel fiber (hooked ends type) were inserted in the middle of dog bone shape specimens which were designed with fine aggregates of F. M. 1.96, 2.69, 3.43. The experiment results showed bond strength and pullout energy of synthetic fiber are improved as fineness modulus of cement composites increases. It is considered that the frictional resistance between synthetic fiber and cement composite increases as fineness modulus of cement composite increases and consume more energy while pull out the fiber from cement composite. However bond performance of steel fiber which resist pull out by mechanical behavior is less effected on fineness modulus of cement composite. It is considered that the mechanical fixedness of hooked ends exerts a greater effect on the pullout resistance than the frictional resistance between the cement composite and the steel fiber so F. M. of fine aggregate has a relatively small effect on the pullout resistance with the steel fiber.

Keywords: Pullout performance, Cement based composites, Fineness modulus (F. M.), Structural fibers, Pull-out test

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association
24(4)317-326(2022)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.4.317>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received June 14, 2022

Revised June 29, 2022

Accepted June 29, 2022



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 © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

www.kci.go.kr

초 록

구조용 합성섬유는 작은 비중에 의한 반발률 감소, 지하수 및 해수에 의한 부식 발생의 우려가 없어 강섬유의 대체재로 구조용 합성섬유의 관심이 최근 높아지고 있다. 본 연구에서는 시멘트 복합체의 잔골재 조립률이 구조용 섬유의 인발강도 및 인발에너지에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험연구를 수행하였다. 조립률 1.96, 2.69, 3.43인 잔골재로 시멘트 몰탈을 제작하였으며 구조용 합성섬유 1종(polypropylene), 강섬유 1종(hooked ends type)을 대상으로 단일섬유 dog bone shape 공시체를 제작하여 pull-out 실험을 수행하였다. 실험결과 구조용 합성섬유 공시체에서 시멘트 몰탈의 조립률이 증가할수록 인발강도 및 인발에너지가 증가함을 알 수 있었다. 구조용 합성섬유의 경우 시멘트 몰탈과 섬유 사이의 마찰력이 인발메커니즘의 중요한자로 시멘트 몰탈의 잔골재 조립률이 높아질수록 골재 입자가 크고 거칠어지며 섬유와 시멘트 몰탈 사이의 마찰력이 증가하여 섬유의 인발을 억제하기 때문으로 판단된다. 반면, 강섬유 공시체의 경우 시멘트 몰탈 조립률 증가에 따른 인발강도 및 인발에너지의 뚜렷한 경향성은 나타나지 않았다. 이는 강섬유 hooked ends 부분의 기계적 정착이 시멘트 복합체와 강섬유 사이의 마찰력과 비교하여 인발저항력에 미치는 영향이 더 크므로 시멘트 복합체의 잔골재 조립률 변화가 인발저항력에 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

주요어: 인발성능, 시멘트 복합체, 조립률, 구조용 섬유, Pull-out 실험

1. 서론

대부분의 국내 터널은 NATM (New Austrian Tunneling Method) 공법에 의해 굴착되며 터널의 안정성 확보 및 내공변위를 조기에 수렴시키기 위해 록볼트와 강지보재, 슛크리트와 같은 1차 지보재를 활용하고 있다. 이 중에서도 슛크리트(shotcrete)는 낙반방지, 내압작용, 응력집중 완화, 풍화방지 및 지반아치 형성 효과를 발휘하며 (Moon et al., 2019) 터널의 이완하중을 가장 많이 지지하는 주지보재이나 취성재료로 낮은 인장강도, 에너지흡수능력(energy absorption capacity)을 가지고 있어(Guerrero, 1999) 균열이 일어나기 시작하면 급격한 파괴가 일어나게 된다. 이러한 슛크리트의 취성파괴거동을 연성파괴거동으로 개선시키기 위해 일반적으로 강섬유를 혼입하여 사용하고 있으나 강섬유의 뭉침현상, 압송호스의 막힘현상 및 강섬유의 부식, 높은 반발률(rebound) 등으로 슛크리트의 품질 저하 문제가 발생하고 있다(Jeon and Jeon, 2011; Yoon et al., 2012). 그에 반해 구조용 합성섬유는 작은 비중에 의한 반발률 감소, 지하수 및 해수에 의한 부식 발생의 우려가 없어 강섬유의 대체재로 구조용 합성섬유의 관심이 높아지고 있다.

합성섬유 보강슛크리트의 성능은 섬유와 시멘트 복합체 사이 부착특성에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 (Won et al., 2007a) 구조용 합성섬유의 부착성능을 향상시킬 수 있는 다양한 연구가 진행되어 왔다. 친수화 및 플루오르화 표면처리를 통해 섬유의 부착성능을 향상시키는 연구(Yun et al., 2006; Won et al., 2007a)가 진행되었으며 구조용 합성섬유와 시멘트 복합체와의 부착성능을 최대한으로 향상시킬 수 있는 섬유의 최적형상 함수식을 도출하는 연구가 진행되었다(Won et al., 2002). 이 밖에도 시멘트 복합체 압축강도 변화에 따른 구조용 합성섬유의 부착성능을 평가하는 연구(Won et al., 2007b)가 진행되었지만 섬유와 시멘트 복합체간 마찰저항이 합성섬유

보강 스틱크리트의 중요인자임에도 불구하고 섬유 성능향상에 많은 연구 초점이 맞춰져 있으며 시멘트 복합체에 대한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 시멘트 복합체의 잔골재 조립률이 구조용 섬유의 인발강도 및 인발에너지에 미치는 영향을 평가하기 위해 잔골재 조립률에 따른 단일 구조용 합성섬유 및 강섬유의 인발강도 및 인발에너지를 비교 분석하였다. 이를 위해 조립률 1.96, 2.69, 3.43인 잔골재와 구조용 합성섬유 1종(polypropylene), 강섬유 1종(hooked ends type)에 대해 dog bone shape 공시체를 제작하여 pull-out 실험을 수행하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

2.1.1 잔골재 및 시멘트

본 연구에서는 비중 2.55, 조립률 3.37의 부순모래를 체가름하여 KS 입도표준 범위(KS F 2527, 2020)에 만족하는 조립률 1.96, 2.69, 3.43인 잔골재(Fig. 1)를 제작하여 단일섬유인발실험용 dog bone shape 공시체를 제작하였다. 잔골재의 비중 및 조립률 실험을 실시하여 실험결과를 Table 1에 정리하였으며 입도분포곡선은 Fig. 2에 나타냈다. 시멘트는 국내 S사의 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

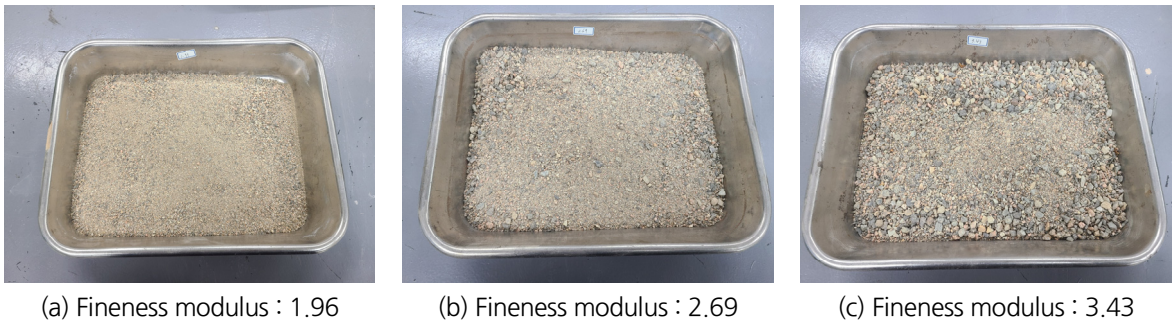


Fig. 1. Photographs of fine aggregate

Table 1. Physical property of fine aggregate

Fineness modulus	Specific gravity
1.96	2.54
2.69	2.55
3.43	2.55

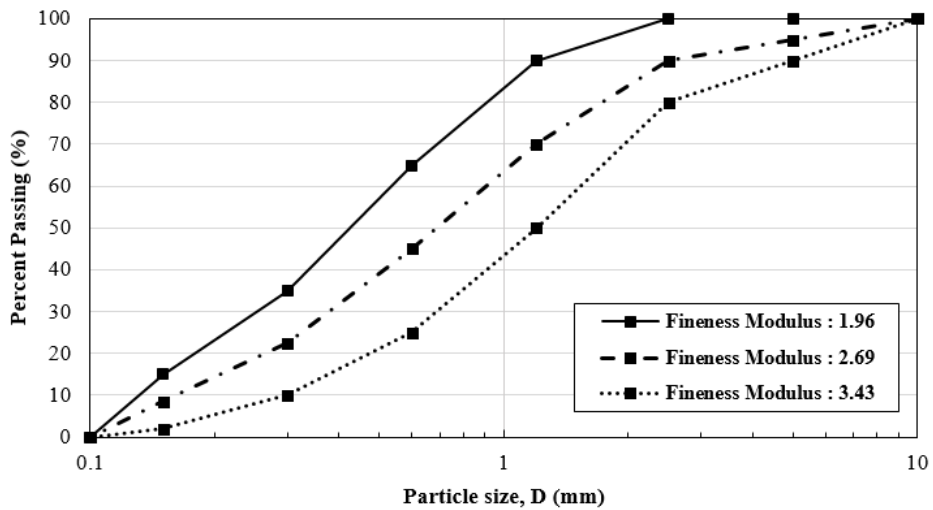




Fig. 2. Particle size distributions of fine aggregate

2.1.2 구조용 섬유 특성

본 실험에서는 일본 B사의 polypropylene 섬유와 국내 K사의 hooked ends type 강섬유를 적용하여 pull-out 실험을 실시하였다. 각각의 구조용 섬유의 기술특성은 제조사에서 제시한 자료를 이용하였으며 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Properties of polypropylene and steel fibers

Property	Polypropylene fiber	Steel fiber
Photograph		
Type	Embossed	Hooked
Specific gravity	0.89 - 0.91	7.85
Elastic modulus (GPa)	12	210
Fiber length (mm)	48	30
Fiber width (mm)	1.3	-
Fiber thickness (mm)	0.45	-
Fiber diameter (mm)	-	0.5
Tensile strength (MPa)	640	1,200

2.2 실험 배합 및 공시체 제작

시멘트-모탈 잔골재 조립률에 따른 숏크리트용 섬유 함유의 인발에너지 비교를 위해 KS L 5104 (2012)에 따라 시멘트-잔골재 비 1:2.7, 시멘트-물 비 1:0.6로 설정하여 시멘트-모탈을 배합하였다. Fig. 3과 같이 dog bone shape 공시체를 제작하였으며 두께 0.3 mm인 partitioning board의 중앙에 섬유를 부착한 뒤 공시체를 두 부분으로 분할하여 정착시켰다. 시멘트-모탈의 압축강도를 확인하기 위해 50 × 50 × 50 mm 크기의 각주형 공시체를 제작하였다. 제작한 공시체는 24시간동안 16°C, 상대습도 40%에서 초기 양생시켰으며 탈형 후 7일간 60°C의 항온항습기에 서 증기양생하였다.

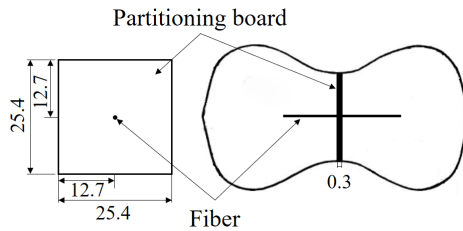


Fig. 3. Arrangement of the partitioning board and fiber (unit: mm)

3. 실험결과

3.1 압축강도

본 연구에서는 압축강도용 각주형 공시체를 3개씩 제작하여 압축강도 실험을 실시하였다. 하중제어방식의 UTM을 사용하여 0.6 MPa/sec의 하중 재하속도로 진행하였으며 압축강도시험결과는 Fig. 4와 같다. 조립률 1.96, 2.69,

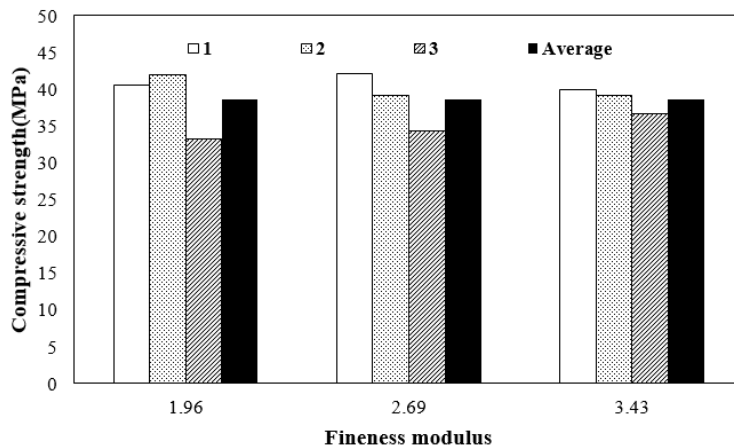
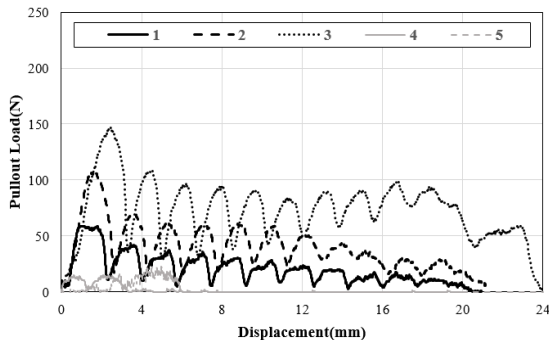


Fig. 4. Compressive strength of cement composites

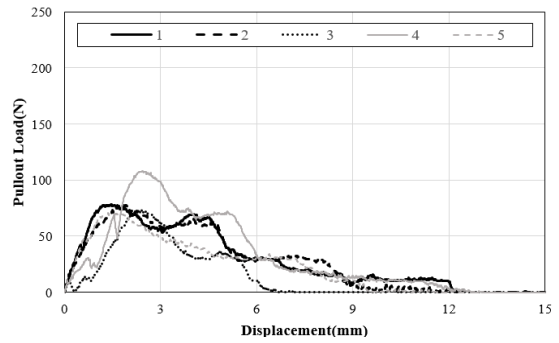
3.43인 잔골재를 사용한 시멘트 몰탈의 평균압축강도는 각각 38.63 MPa, 38.57 MPa, 38.57 MPa로 유사하게 나타났다.

3.2 섬유인발거동

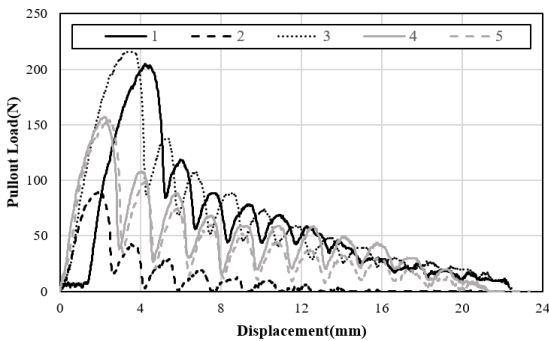
본 연구에서는 dog bone shape 공시체를 5개씩 제작하여 pull-out 실험을 실시하였다. 최대하중 100 kN, 최소변위제어속도 0.05 mm/min, 최대변위제어속도 333.33 mm/min의 변위제어방식 UTM을 사용하여 0.6 mm/min의



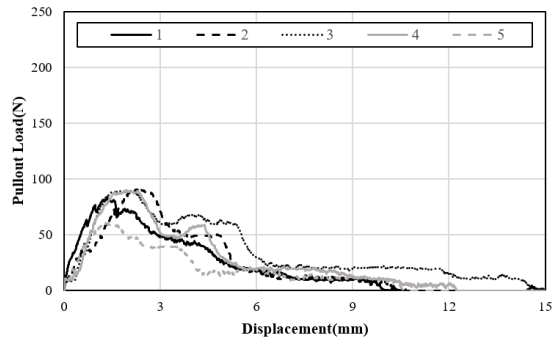
(a) Polypropylene-F. M. : 1.96



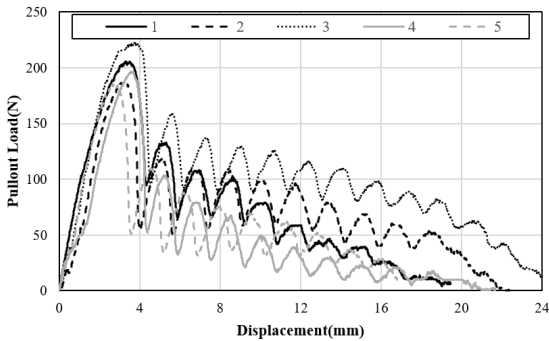
(b) Steel-F. M. : 1.96



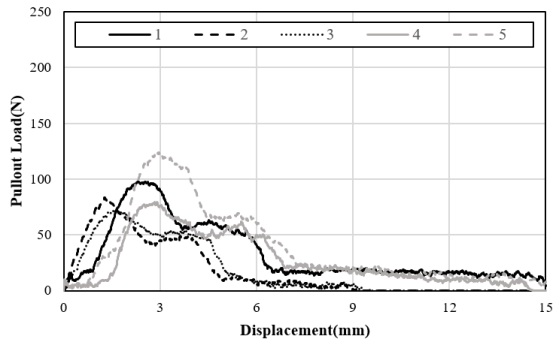
(c) Polypropylene-F. M. : 2.69



(d) Steel-F. M. : 2.69



(e) Polypropylene-F. M. : 3.43



(f) Steel-F. M. : 3.43

Fig. 5. Pullout load-displacement curve

속도로 실험을 진행하였으며 구조용 합성섬유 공시체 24 mm, 강섬유 공시체 15 mm 인발되는 동안 실험을 실시하였다. 시멘트 몰탈 조립률에 따른 구조용 합성섬유 및 강섬유의 인발하중-변위 곡선은 Fig. 5와 같다.

인발강도는 다음과 같은 식 (1)로 계산하였으며 인발에너지는 구조용 합성섬유 24 mm, 강섬유 15 mm 인발되는 동안의 하중면적을 계산하였다.

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{2(b+h)l} \tag{1}$$

여기서, τ_{\max} : 인발강도(MPa), P_{\max} : 최대인발하중(N), b : 섬유의 폭(mm), h : 섬유의 두께(mm), l : 섬유의 정착 길이(mm)이다. 강섬유의 인발강도 τ_{\max} 의 경우 $P_{\max}/\pi Dl$ 로 계산하였으며 여기서의 D 는 강섬유의 직경(mm)이다.

시멘트 몰탈 조립률에 따른 구조용 합성섬유 및 강섬유의 인발강도 및 인발에너지 결과값은 Table 3과 같으며 평균값을 Fig. 6과 같이 그래프로 나타내었다. 구조용 합성섬유에서는 인발강도와 인발에너지 모두 시멘트 몰탈의 잔골재 조립률이 증가할수록 크게 나타나는 경향을 보였다. 강섬유의 경우 인발강도의 증가율이 구조용 합성섬유에 비해 상대적으로 작게 나타났으며 인발에너지에서는 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다. 이는 구조용 합성섬유의 경우 시멘트 몰탈과 섬유 사이의 마찰력이 인발메커니즘의 중요인자로 시멘트 몰탈의 잔골재 조립률이 높아질수록 골재 입자가 크고 거칠어지며 섬유와 시멘트 몰탈 사이의 마찰력이 증가하여 섬유의 인발을 억제하기 때문이다. 반면 hooked ends type 강섬유는 시멘트 복합체와 섬유사이의 마찰력이 존재하지만 hooked 부분이

Table 3. Pullout characteristics of polypropylene and steel fiber

Mechanical properties	Fiber type	Fineness modulus	1	2	3	4	5	Average
Pullout strength (MPa)	Polypropylene	1.96	2.10	3.82	5.22	0.54	0.79	2.49
		2.69	7.29	3.21	7.69	5.59	5.51	5.86
		3.43	7.32	6.64	9.94	7.01	6.63	7.11
	Steel	1.96	3.32	3.32	3.14	4.58	2.99	3.47
		2.69	3.52	3.87	3.81	3.82	2.57	3.52
		3.43	4.16	3.55	3.04	3.38	5.26	3.88
Pullout energy (N · mm)	Polypropylene	1.96	422.5	841.1	1,736.7	33.8	44.7	615.8
		2.69	1,319.1	271.1	1,489.7	1,063.8	864.7	1,001.7
		3.43	1,449.9	1,598.0	2,385.1	1,014.7	1,083.5	1,506.2
	Steel	1.96	428.2	405.2	222.0	472.4	340.8	373.7
		2.69	326.3	350.1	514.9	382.2	252.8	365.2
		3.43	494.6	261.2	271.7	405.4	572.5	401.1

퍼지며 인발에 저항하는 기계적 거동이 인발저항력에 미치는 영향이 더 크므로 시멘트 복합체의 잔골재 조립률 변화가 강섬유의 인발저항력에 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

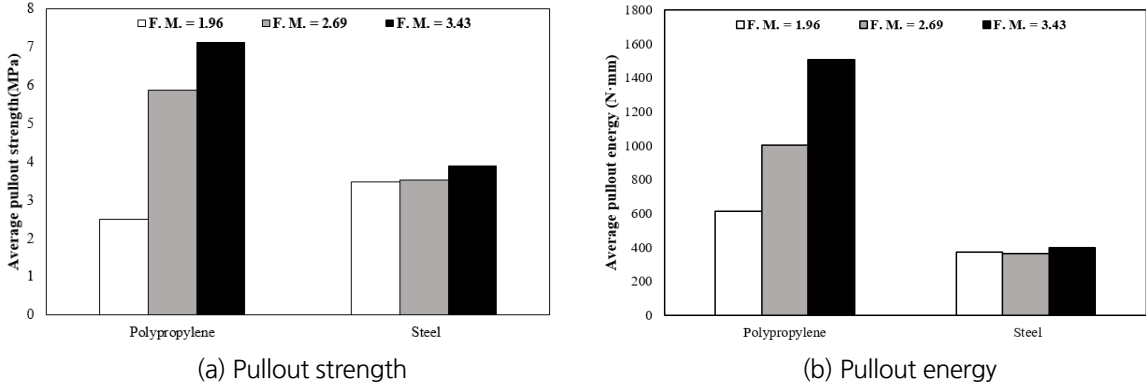


Fig. 6. Results of pull-out test

4. 결론

본 연구에서는 시멘트 몰탈의 조립률에 따른 숏크리트용 구조섬유 인발강도 및 인발에너지 비교를 위해 시멘트 몰탈 조립률을 변수로하여 polypropylene 섬유, hooked ends type 강섬유에 대해 pull-out 실험을 실시하였으며 인발강도 및 인발에너지를 평가하였다. 실험을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시멘트 복합체의 압축강도는 잔골재 조립률 1.96, 2.69, 3.43에서 전부 유사하게 나타나 조립률에 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.
2. 시멘트 복합체의 잔골재 조립률 변화에 따른 polypropylene 섬유의 인발성능은 시멘트 복합체의 잔골재 조립률이 커질수록 증가하는 상관관계를 보였으나 hooked ends type 강섬유의 인발성능은 시멘트 복합체의 잔골재 조립률과 뚜렷한 경향성이 나타나지 않았다.
3. Polypropylene 섬유의 인발강도 및 인발에너지는 시멘트 몰탈의 잔골재 조립률이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 이는 구조용 합성섬유의 인발 메커니즘 특성상 섬유와 시멘트 복합체 사이의 마찰이 섬유의 인발을 억제하는 중요 인자로 시멘트 몰탈의 잔골재 조립률이 증가할수록 시멘트 몰탈의 거칠기가 증가하여 시멘트 복합체와 polypropylene 섬유 사이의 마찰에너지를 증가시키기 때문이다.
4. Hooked ends type 강섬유의 경우 시멘트 몰탈의 잔골재 조립률에 따른 인발강도 및 인발에너지는 잔골재 조립률 1.96, 2.69, 3.43에서 전부 유사하게 나타났으며 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았다. Hooked ends type 강섬유의 경우 시멘트 복합체와 섬유사이의 마찰거동보다 hooked 부분이 퍼지며 인발에 저항하는 기계적 거동이 인발저항력에 미치는 영향이 더 크므로 시멘트 복합체의 잔골재 조립률 변화가 강섬유의 인발저항력에 상

대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 시멘트 복합체의 잔골재 조립률 변화가 강섬유에 미치는 영향을 보다 면밀하게 확인하기 위해 straight형 강섬유를 적용한 추가 인발시험이 필요할 것으로 판단된다.

5. 현장에서 적용되는 구조용 섬유보강 슛크리트는 배합비 및 섬유의 혼입량, 기온, 습도 등에 따라 혼입되어있는 구조용 섬유의 인발저항력이 다르게 발휘되므로 실험실 조건의 본 시험결과와 현장에서의 시험결과는 상이할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원 “터널 주요 지보재의 성능 실험 및 지보특성 비교 수치해석” 과제에 의해 수행 되었으며 이에 감사드립니다.

저자 기여도

최창순은 실험수행 및 데이터 수집, 원고작성을 하였으며, 이상돈은 데이터 검토 및 분석을 하였고, 송기일은 원고 검토를 하였다.

References

1. Guerrero, Z. (1999), Bond stress-slip mechanisms in high-performance fiber-reinforced cement composites, Ph.D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, USA.
2. Jeon, C.K., Jeon, J.K. (2011), “Properties of advanced synthetic fiber reinforced concrete for improvement of tunnel shotcrete performance”, Journal of the Society of Disaster Information, Vol. 7, No. 1, pp. 43-50.
3. KS F 2527 (2020), Aggregates for concrete, National Institute of Technology and Standards, Korea.
4. KS L 5104 (2012), Testing method for tensile strength of hydraulic cement mortars, National Institute of Technology and Standards, Korea.
5. Moon, K.S., Kim, S.J., Kim, Y.D., Min, B.H., Kim, S.H. (2019), “A study on evaluation of flexural toughness of synthetic fiber reinforced shotcrete”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 21, No. 3, pp. 433-452.
6. Won, J.P., Lim, D.H., Park, C.G., Han, I.Y., Kim, B.L. (2002), “Optimum geometry factor of structural synthetic fibers”, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 14, No. 4, pp. 474-482.
7. Won, J.P., Park, C.G., Kim, Y.J., Lee, S.W. (2007a), “Pullout behavior of polyolefin synthetic fibers with hydrophilic surface treatment in cement matrix”, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 27, No. 3A, pp. 453-460.
8. Won, J.P., Park, C.G., Kim, Y.J., Park, K.H. (2007b), “Bond properties of synthetic and steel single fiber in high strength cement based composites”, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, Vol. 27, No. 4A, pp. 609-616.

9. Yoon, J.H., Jeon, J.K., Jeon, C.K., Lee, S.C. (2012), “Experimental construction of polyamide fiber reinforced shotcrete technology”, *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 7, No. 2, pp. 78-83.
10. Yun, H.D., Jeon, E., Lee, Y.S. (2006), “Effect of fluorination on pullout behavior of polypropylene fibers from cementitious matrix”, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 22, No. 11, pp. 123-130.