

다발형 폴리아미드섬유 보강 슛크리트 현장 적용성 평가

Experimental Construction of Polyamide Fiber Reinforced Shotcrete Technology

(Received July 18, 2012 / Revised August 10, 2012 / Accepted August 10, 2012)

윤지현^{1)*}, 전중규²⁾, 전찬기³⁾, 이수철⁴⁾

코오롱글로벌 R&BD 센터, 코오롱글로벌, R&BD 센터

인천대학교 도시건설공학과, 가천대학교 글로벌캠퍼스 토목환경공학과

Ji-Hyun Yoon¹⁾, Joong-Kyu Jeon²⁾, Chan-Ki Jeon³⁾, Soo-Choul Lee⁴⁾

KOLON GLOBAL CORP., R&BD Center, Yongin, 449-815, Korea

KOLON GLOBAL CORP., R&BD Center, Yongin, 449-815, Korea

University of Incheon, Urban and Environmental Engineering Department, Incheon, 406-772, Korea

Gachon University, Department of Civil & Environmental Engineering, Gacheon, 461-701, Korea

Abstract

Steel fiber reinforced shotcrete in tunneling construction has some problems in terms of constructability, durability and lots of rebound wastage. In order to resolve these problems, this paper proposes polyamide fiber reinforced shotcrete technology. And this paper presents the results of experimental construction of the polyamide fiber reinforced shotcrete technology. The results of the study are as follows.

1. The polyamide fiber reinforced shotcrete suggested in this paper shows outstanding mechanical performance that meets various Korean tunnel construction design criteria.

2. In addition, the results of experimental constructions show that the polyamide fiber reinforced shotcrete creates less rebound and wasted product than the steel fiber reinforced shotcrete.

Based on the above results, it is concluded that the polyamide fiber reinforced shotcrete technology can be used as economical and environmentally friendly construction of tunnel.

키워드 : 슛크리트, 폴리아미드섬유, 강섬유, 시험시공, 반발률

Keywords : Shotcrete, Polyamide Fiber, Steel Fiber, Experimental Construction, Rebound

1. 서 론

터널 시공에 있어서 NATM(New Austrian Tunneling Method)공법이 활발하게 적용되면서 시공상의 편리, 공기 단축, 보강성능 향상 등의 이유로 섬유보강 슛크리트가 광범위하게 사용되고 있다. 섬유보강 슛크리트의 주요 보강재로 주로 사용되고 있는 강섬유 보강 슛크리트는 Fig.1과

같이 배합 및 시공 시 뭉침현상, 슛크리트 머신 및 쇼트노즐과 호스의 막힘현상, 강섬유의 부식, 높은 반발률 등이 문제점으로 지적되고 있다. 특히 강섬유는 내수성 및 내산성이 좋지 않아 부식으로 인한 균열 및 박리현상의 발생, 반발제 폐기시 환경적인 문제, 높은 가격 등이 가장 큰 단점으로 지적되고 있다. 이에 본 연구에서는 기존 강섬유 보강 슛크리트의 성능 개선을 위하여 국내에서 개발, 생산된 경제성, 분산성, 부착성, 내수성 및 내산성이 우수한 폴리아미드섬유를 혼입한 슛크리트를 제안하고자 한다. 또한, 전중규 등(2010, 2011)의 연구에 의해 본 연구에서 제안한 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 실내 배합시험에 의한 역학적 특성이 무보강 슛크리트 및 강섬유, 구조용

* Corresponding author

E-mail: yjh0708@kolon.com

** E-mail: jkjeon31@kolon.com

*** E-mail: johnland@incheon.ac.kr

**** E-mail: lee0104@gachon.ac.kr

합성섬유(PP섬유) 보강 슛크리트와 비교하여 기검증되어 있으므로, 본 연구에서는 제안된 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 현장 적용성 평가를 위하여 국내 수도권 지하철 건설공사 현장을 대상으로 현장 시험시공을 수행하고 그 결과(역학적 성능 및 반발률 측정 시험 결과)를 제시하고자 한다.



(a) Fiber balling problems



(b) Corrosion of steel fiber

(c) Rebound of steel fiber

Fig. 1 Problems of steel fiber reinforced shotcrete

2. 폴리아미드섬유 보강 슛크리트

본 연구에서 제안하는 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 섬유 보강재인 폴리아미드섬유는 직경 23 μ m의 미세섬유를 Fig. 2와 같이 다발형 단일개체로서 공기 압출성형을 통해 비표면적을 크게 하여 슛크리트 내에서 부착성을 향상시키고, Fig. 3과 같이 섬유의 표면을 계면 활성제로 개질하여 슛크리트 배합시 분산성을 향상시킨 새로운 섬유 보강재이다. Fig. 2 및 Fig. 3 과 같이 제조된 폴리아미드섬유는 구부러지기 쉬운 형상(Fig. 4 (a) 참고)과 표면에 코팅된 분산제에 의해 슛크리트 내에서 배합 성능이 우수하며, 분산성 및 부착성능(Fig. 4 (b) 참고)이 우수하여 슛크리트의 품질향상에 기여한다. 이러한 폴리아미드섬유가 혼합된 슛크리트는 강섬유 보강 슛크리트에 비해 반발률이 현저하게 낮고 부식 등의 내구성 문제가 발생하지 않아 친환경적인 슛크리트라 할 수 있다.

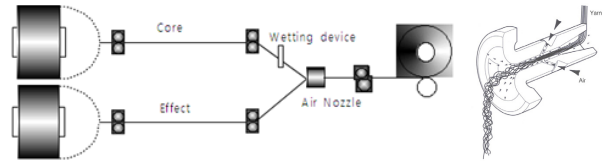


Fig. 2 Manufacturing of polyamide fiber

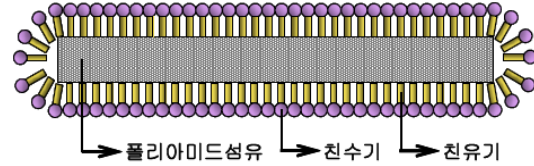
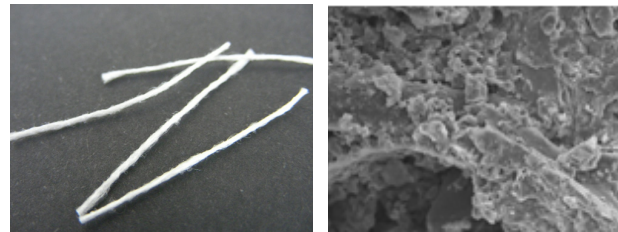


Fig. 3 Dispenser coating of polyamide fiber



(a) Single shape

(b) Bonding shape (photomicrograph)

Fig. 4 Polyamide fiber shapes

3. 시험시공 방법

3.1 배합 및 사용재료

본 연구에서 제안된 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 현장 적용성 평가를 위해 시험시공에 사용된 슛크리트의 배합설계 조건 및 시험시공 내용과 슛크리트 배합표는 Table 1, Table 2와 같으며, 슛크리트 배합시 사용된 섬유보강재의 특징은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 시험시공에 사용된 시멘트는 밀도 3.15g/cm³의 보통 포틀랜드시멘트(OPC)이며, 특히 굵은 골재와 잔골재는 각각 13mm 부순 자갈, 세척사와 부순 모래 8:2의 혼합 잔골재를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 후크형 강섬유의 혼입량은 도로설계기준 및 터널설계기준에 준하여 40kg/m³(약 0.5vol%)을 적용하였으며, 폴리아미드섬유의 혼입량은 전중규 등(2010, 2011)의 연구에서 제시된 결과를 바탕으로 7kg/m³(약 0.6vol%)을 적용하였다.

Table 1 Mix design and experimental construction plan

Specimen	Design strength at Korean design codes (MPa)		Design strength (MPa)		Slump (mm)	Air (%)	Test plans
	Compressive	Bending	Compressive	Bending			
SFRS*	21.0	4.5	24.48	4.5	100	2.0	· Rebound of shotcrete · Compressive strength · Bending strength · Equivalent bending strength · Toughness index
PFRS**	21.0	4.5	24.48	4.5	100	2.0	

* SFRS : Steel fiber reinforced shotcrete

** PFRS : Polyamide fiber reinforced shotcrete

Table 2 Mix design table of shotcrete

Specimen	Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					Ad* (C×%)	Aa* (C×%)
				W	C	S	G	F*		
SFRS	13	44.9	65.4	211	470	1054	566	40	0.5	0.5
PFRS								7		

* F : Fiber, Ad : Superplasticizer, Aa : AE admixture

Table 3 Characteristics of fiber reinforcements

Fiber reinforcement	Density (g/cm ³)	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect ratio (l/d)	Tensile strength (MPa)
Steel fiber	7.85	30.00	0.50	60.0	810
Polyamide fiber	1.14	30.04	0.49	61.3	666

3.2 역학적 성능 평가

본 연구의 시험시공에 사용된 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 압축강도, 휨강도 등의 역학적 성능을 강섬유 보강 슛크리트와 비교, 평가하고 확인하기 위하여 Fig. 5와 같이 $\phi 100 \times 200$ mm 원주형 시험체와 $150 \times 150 \times 550$ mm 각형 시험체를 제작하였다. 재령 28일이 경과된 각각의 시험체의 압축강도 측정을 위하여 KS F 2405, 휨강도 측정을 위하여 KS F 2408, 등가휨강도 및 등가휨강도비 측정을 위하여 KS F 2566에 준하여 수행하였다.



Fig. 5 Specimens for experimental tests

3.3 시험시공 및 반발률 측정

폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 적용성 평가를 위한 시험시공은 터널 막장의 발파 이후 측벽부 및 천단부의 Sealing, 1차 및 2차 슛크리트 부위에 총 39m³의 슛크리트 시공을 6회에 걸쳐 수행하였으며, 반발률 측정을 위한 시험시공은 측벽부 및 천단부의 Sealing 및 1차 슛크리트 부위에 총 2m³의 슛크리트 시공을 수행하였다. 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 반발률 측정을 위하여 Fig. 6과 같이 슛크리트 반발계 회수용 천막을 이용하여 시공 후 반발계를 회수하고 그 중량을 측정하여 반발률을 산정하였다.

4. 시험시공 결과

제안된 슛크리트의 현장 적용성 평가를 위하여 국내 수도권 지하철 건설공사 터널 현장을 대상으로 Fig. 7과 같이 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 시험시공을 수행하였으며, 압축강도, 휨강도 및 반발률 측정 결과를 Fig. 8-10,

Table 4 Results of experimental construction (average values)

Shotcrete type	Compressive strength (MPa)	Bending strength (MPa)	Equivalent bending strength (MPa)	Toughness index (%)	Rebound (%)
SFRS	46.66	5.45	4.04	74.2	-
PFRS	40.97	5.34	3.94	73.8	8.60

Table 5 Korean design codes for tunnel shotcrete

Items	Road design code (2005)	Railroad design code (2011)	High-speed railroad design code	Tunnel design code (2007)
Compressive strength (MPa)	10~ (1 day) 21~ (28 days)	10~ (1 day) 21~ (28 days)	10~ (1 day) 21~ (28 days)	10~ (1 day) 21~ (28 days)
Bending strength (MPa)	4.4~ (28 days)	4.5~ (28 days)	4.5~ (28 days)	4.5~ (28 days)
Equivalent bending strength (MPa)	-	3.0~ (28 days)	3.0~ (28 days)	3.0~ (28 days)



Fig. 6 Rebound test of shotcrete



Fig. 7 Whole views of experimental construction for polyamide fiber reinforced shotcrete

Table 4에 나타내었다. 터널내 시공되는 슛크리트에 있어서 국내 기관별로 설계기준이 Table 5와 같이 약간 상이하나, 종합적으로 국내 설계기준에서는 재령 28일의 압축강도가 21MPa 이상, 휨강도가 4.5MPa 이상, 휨인성을 나타내는 등가휨강도가 3.0MPa 이상을 만족해야 한다고 규정되어 있다.

Fig. 8~10, Table 4에서 확인할 수 있듯이, 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 역학적 특성은 평균 압축강도 40.97MPa, 평균 휨강도 5.34MPa, 평균 등가휨강도 3.94MPa, 평균 등가휨강도비 73.8%로 측정되어 강섬유 보강 슛크리트와 동등의 성능을 보이며, 국내의 터널관련 설계기준을 모두 만족하는 결과를 나타내었다.

Fig. 8 및 Table 4에 나타난 압축강도의 결과에서는 강섬유 보강 슛크리트가 폴리아미드섬유 보강 슛크리트보다 조금 더 우수한 결과를 보이나 전중규 등(2010, 2011)의 연구에서는 이와 반대의 결과를 나타내고 있다. 따라서 섬유보강재의 종류는 슛크리트의 압축강도 특성에 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

Fig. 9~10 및 Table 4에 나타난 휨강도 및 휨인성 측면에서의 성능은 전중규 등(2010, 2011)의 연구 결과와 유사하게 강섬유 보강 슛크리트가 폴리아미드섬유 보강 슛크리트보다 조금 더 우수한 결과를 나타내고 있다. 이는 Fig. 11에 나타낸 바와 같이, 강섬유 보강 슛크리트는 균열 이후 전체적인 파괴양상이 인장강도가 큰 강섬유에 의해 fiber bridging 이후 fiber pull-out 또는 fiber/shotcrete debonding에 의해 지배되지만, 폴리아미드섬유 보강 슛크리트는 균열 이후 파괴거동이 부착성능이 우수한 폴리아미드섬유(Fig. 4 (b) 참고)에 의해 fiber bridging 이후 fiber

failure에 의해 지배되기 때문이라고 판단된다.

또한, Table 4에 나타난 바와 같이, 시험시공시 측정된 슛크리트의 반발률은 폴리아미드섬유 보강 슛크리트가 8.60%로 측정되었으며, 이는 현장 관리기준치인 측벽부 10%, 천단부 15%의 반발률에 훨씬 못 미치는 결과이다.

시험시공시 측정된 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 반발률 8.60%는 대상 현장에서 슛크리트의 품질관리를 위해 동일조건 하에 본 연구의 시험시공과는 별도로 자체적으로 수행된 반발률 측정결과(측벽부 및 천단부 평균 반발률 약 12% 이상의 수치를 대상현장에서 보유함.)보다 낮은 결과를 보인다. 이는 슛크리트 매트릭스를 형성하고 있는 폴리아미드섬유가 강성이 큰 강섬유와는 달리 유연한 구조를 가지고 있기 때문이며(Fig. 4 (a) 참고), 이에 의해 슛크리트 시공시 암반 및 강재 지보재에 발생하는 반발정도가 강섬유 보강 슛크리트보다 비교적 적기 때문이라고 사료된다. 따라서 본 연구에서 제안된 슛크리트가 실제 터널시공 현장에 적용된다면 투입물량 측면 및 반발제 폐기 측면에서 보다 경제적인 시공, 친환경적인 시공이 가능할 것이라고 판단된다. 슛크리트의 반발률은 섬유보강재의 종류뿐만 아니라, 급결제의 종류 및 양, 골재의 입도, 1회 타설 두께, 분사압력, 장비, 노즐맨의 숙련도 등 많은 변수가 상존하지만, 본 연구에서는 슛크리트 보강섬유의 종류 외에 모든 변수는 동일하게 유지하고 수행된 것이므로, 반발률 측면에서의 상기와 같은 분석은 타당할 것으로 사료된다.

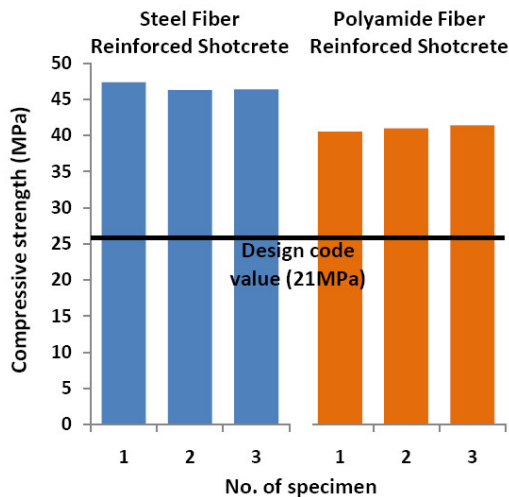


Fig. 8 Compressive strength of fiber reinforced shotcrete

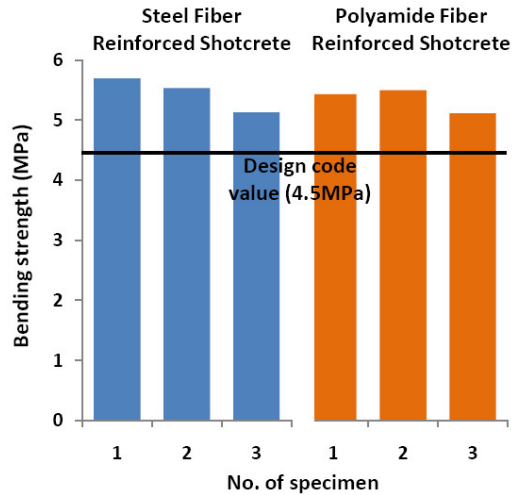


Fig. 9 Bending strength of fiber reinforced shotcrete

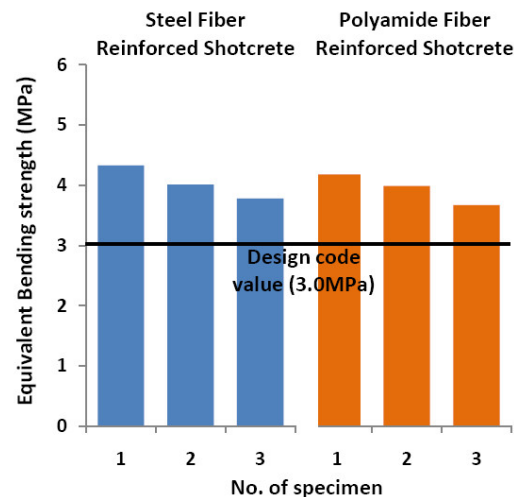
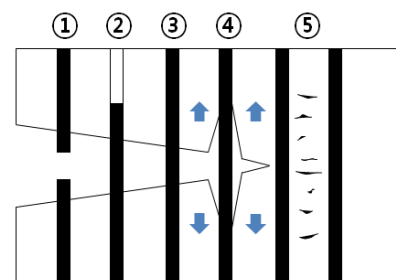


Fig. 10 Equivalent bending strength of fiber reinforced shotcrete



■ 섬유 (fiber)
□ 슛크리트 (shotcrete)

- ① fiber failure
- ② fiber pull-out
- ③ fiber bridging
- ④ fiber/shotcrete debonding
- ⑤ shotcrete cracking

Fig. 11 Failure mode of fiber reinforced shotcrete

5. 결론

본 연구에서는 강섬유 보강 슛크리트의 문제점 및 단점을 보완한 폴리아미드섬유 보강 슛크리트를 제안하고, 제안된 슛크리트의 역학적 특성 평가 결과와 시험시공 결과를 제시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 역학적 성능은 국내의 터널관련 설계기준을 만족하며, 기존 강섬유 보강 슛크리트와 동등 수준의 역학적 성능을 나타내었다.

2) 폴리아미드섬유 보강 슛크리트는 강섬유 보강 슛크리트에 비해 시공시 반발률이 저감되어 시공성 뿐만 아니라 경제성, 품질, 친환경성 측면에서 우수한 슛크리트라 할 수 있다.

참고문헌

- 1) 강섬유 보강 슛크리트 시공 및 품질관리 지침, 한국도로공사, 2009
- 2) 도로설계기준, 한국도로교통협회, 2005
- 3) 전중규, 김기형, 남정수, 김필성, “강섬유 대체용 다발형 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 시공성능 평가.” 한국건설순환자원학회 학술발표대회 논문집, 2011, pp. 41-44
- 4) 전중규, 전찬기, 김규용, 임창혁, 김필성, “브레이드형 폴리아미드섬유를 혼입한 터널용 슛크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구.” 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 2010, pp. 1728-1731
- 5) 전중규, 정재민, 윤지현, 전찬기, “철도 터널 구조물 시공을 위한 다발형 폴리아미드섬유 보강 슛크리트.”

한국철도학회 학술발표대회 논문집, 2011, pp. 1214-1219

- 6) 철도설계기준, 국토해양부, 2011
- 7) 최승환, 김재욱, 김남욱, 배주성, “강섬유와 폴리프로필렌섬유를 이용한 섬유보강콘크리트의 하이브리드 조합에 관한 실험적 연구.” 대한토목학회 학술발표대회 논문집(1), 2000, pp. 435-438
- 8) 콘크리트 표준시방서, 한국콘크리트학회, 2007
- 9) 터널설계기준, 건설교통부, 2007

다발형 폴리아미드섬유 보강 슛크리트 현장 적용성 평가

터널현장의 슛크리트 시공에 사용되는 강섬유 보강 슛크리트는 강섬유의 강성이 크고 중량이 무거워 슛크리트 시공상 어려움이 있으며, 강섬유의 부식과 높은 반발률 등이 개선사항으로 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 강섬유 보강 슛크리트의 단점을 개선하기 위하여 폴리아미드섬유를 혼입한 슛크리트를 제안하고, 현장 적용성 평가를 위하여 시험시공 결과를 제시하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폴리아미드섬유 보강 슛크리트의 역학적 성능은 국내의 터널관련 설계기준을 만족하며, 기존 강섬유 보강 슛크리트와 동등 수준의 역학적 성능을 나타내었다.

2) 폴리아미드섬유 보강 슛크리트는 강섬유 보강 슛크리트에 비해 시공시 반발률이 저감되어 시공성 뿐만 아니라 경제성, 품질, 친환경성 측면에서 우수한 슛크리트라 할 수 있다.