J Rec Const Resources 8(4)545-552(2020)
https://doi.org/10.14190/JRCR.2020.8.4.545

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보 성능 평가

Evaluation of Support Performance of Fiber-Net Integrated Shotcrete in Tunnel Support System

김지영[1] · 최성철[2*]
Jiyoung Kim[1] · Seongcheol Choi[2*]

(Received November 9, 2020 / Revised December 9, 2020 / Accepted December 9, 2020)

This study evaluated the support performance of fiber-net integrated shotcrete in tunnel support system developed for the purpose of improving constructability and stability while fully performing its mechanical performance as a tunnel support materials by four-point bending test, two-dimensional numerical analysis, and cross-sectional analysis. As a result of evaluating the flexural performance through a four-point bending test, in the case of fiber-net reinforced shotcrete, the tensile performance of fiber-net resulted in a continuous increase in load after crack occurrence, unlike steel fiber reinforced shotcrete. Also, the results of the tunnel cross-sectional structure analysis for ground conditions and the cross-sectional analysis of fiber-net and steel fiber reinforced shotcrete showed that sufficient support performance can be exhibited even if the thickness of fiber-net reinforced shotcrete was reduced compared to the previous one. Additionally, through these results, the support pattern of fiber-net integrated shotcrete in tunnel support system, which can be applied efficiently to the construction sections requiring higher stability among the rock mass class Ⅲ, was proposed.

키워드 : 섬유 그물망, 휨 거동, 숏크리트, 지보 패턴, 지보 성능
Keywords : Fiber-net, Flexural behavior, Shotcrete, Support pattern, Support performance

1. 서 론

최근 10년간, 환경 친화적 도로 건설 및 도로 이용자의 안전을 고려한 개량 공사 등에 기인하여, 국내 터널 공사의 수요가 꾸준히 증가해왔으며, 이와 같은 증가 추세는 향후에도 지속될 것으로 예상된다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2019). 이와 더불어, 대단면 및 초장대 터널과 같이 시공 면적이 대단면화/대형화되는 추세를 보이게 되면서, 굴착 후 주변 지반을 안정화시키고 시공 후에도 터널의 안정성을 유지시킬 수 있는 고성능 터널 지보 재료 개발에 대한 관심이 높아지고 있다.

현재 터널 시공 시, 굴착 직후 주변 지반의 압력에 대해 충분한 지보 효과를 발휘함으로써 터널의 구조적 안정성을 확보하기 위해, 시공 구간의 암반 상태에 따라 숏크리트, 락볼트 및 강지보가 1차 지보재로 활용되고 있다. 이 중 숏크리트는 굴착 종료 직후 암반에 뿜어 붙이는 방식으로 타설되어, 굴착면의 침하에 즉시 대응하는 역할을 한다. 그러나 숏크리트 시공 시, 타설과 동시에 과도한 탈락 현상이 발생하므로, 설계 두께만큼 타설하기 위해 반복 시공이 필요하며, 이 과정에서 재료비 및 건설폐기물의 양이 증가하는 문제점이 있다. 또한, 시공 중/후 터널에 발생하는 균열에 저항하기 위한 목적으로 강섬유 혼입 숏크리트가 일반적으로 사용되고 있는데, 강섬유는 짧은 길이로 인하여 인장성능 발휘에 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 와이어 메쉬가 인장부재로 사용되기도 하지만, 와이어 메쉬의 높은 강성으로 인해 형상의 변형 및 밀실한 숏크리트 타설이 어려워 시공성 및 안정성이 저하된다는 한계점이 있다(Ma 2014). 이에 따라, 숏크리트의 리바운드율을 감소시키고 터널 지보재로서의 충분한 역학적 성능을 발휘하면서 시공성 및 안정성을 보다 향상시킬 수 있는 새로운 터널 지보시스템에

* Corresponding author E-mail: schoi@cau.ac.kr
[1]중앙대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea)
[2]중앙대학교 건설환경플랜트공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Seoul, 06974, Korea)

Copyright ⓒ 2020 by Korean Recycled Construction Resources Institute
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

대한 연구가 다양하게 진행되고 있다(Ma 2014; Bae et al. 2006; Öge et al. 2020; Kanazawa et al. 2007).

본 연구에서는 연속적이고 유연한 그물망 형태의 터널 지보용 섬유 및 섬유 그물망 지보재용 숏크리트를 활용한 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보 성능을 평가하였다. 4점 굽힘 시험을 통해 섬유 그물망 보강 숏크리트와 기존 강섬유 보강 숏크리트의 휨 성능이 비교되었으며, 구조해석 및 단면해석을 통해 개발된 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 향상된 성능이 검증되었다. 이후, 휨 성능, 구조 해석 및 단면 해석 결과와 이전 연구(Kim et al. 2020)를 통해 도출된 현장 적용성 평가 결과를 바탕으로 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보패턴이 제안되었다.

2. 4점 굽힘 시험을 통한 휨 성능 분석

2.1 사용 재료

Table 1 및 2는 각각 섬유 그물망 보강 숏크리트와 강섬유 보강 숏크리트의 배합비 및 터널 지보용 섬유 그물망의 제조 조건을 나타낸다. 숏크리트의 리바운드는 일반적으로 낮은 재료의 점성 및 부착강도로 인해 발생하는 것으로 알려져 있으며(Park et al. 2019), 본 연구에서는 숏크리트의 리바운드율을 저감시키기 위해 고로슬래그 미분말(Ground granulated blast-furnace slag, GGBFS), 무수석고(anhydrite) 및 폴리머를 활용하였다. 터널 지보용 섬유 그물망의 경우, 숏크리트와의 부착력 및 시공성이 확보됨과 동시에, 충분한 역학적 성능이 발휘되어야 한다. 이를 위해, 본 연구에서는 초고분자량 폴리에틸렌(Ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE) 원사를 에폭시 및 우레탄으로 2회 코팅한 섬유 그물망을 사용하였다.

Table 2. Manufacturing conditions of fiber-net for tunnel support

Fiber		UHMWPE
Coating material	1st	Urethane
	2nd	Epoxy
Coating temperature (℃)	1st	110-120
	2nd	40-50
Grid size(cm)		2.5×2.5

2.2 실험 방법

섬유 그물망 보강 숏크리트와 강섬유 보강 숏크리트의 휨 성능은 KS F 2408(콘크리트의 휨 강도 시험 방법) 및 KS F 2566(섬유 보강 콘크리트의 휨성능 시험방법)의 4점 굽힘 시험 방법에 의거하여 평가되었다. 각주형(100×100×400mm) 공시체는 제작 후 24시간 뒤에 탈형되어 20±2℃의 온도에서 28일간 수중양생 되었으며, Fig. 1과 같이 MTS 810 및 LVDT를 이용하여 시험체의 하중과 처짐이 측정되었다.

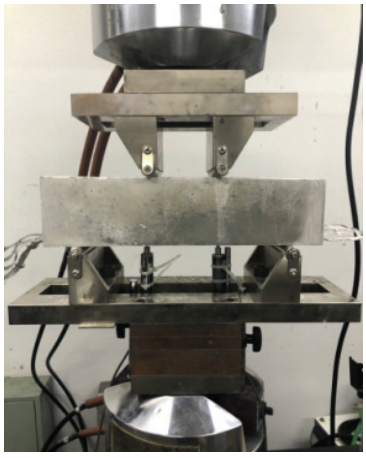


Fig. 1. Experimental set up of four-point bending test

2.3 휨 성능 분석 결과

Fig. 2는 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트의 하중-처짐 곡선을 나타낸다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 강섬유 및 섬유 그물망의 서로 다른 종류의 인장 부재 사용으로 인해 균열 발생 이후의 휨 거동이 다르게 나타났다. 섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우, 균열 발생 이후 하중이 감소하였다가 섬유 그물망이 인장력을 받기 시작하면서 다시 증가하였다. 강섬유 보강 숏크리트의 경우, 균열 발생 이후 하중의 감소량은 섬유 그물망 보강 숏크리트에 비해 작지만, 하중이 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 인장부재로 보강된 숏크리트의 성능은 하중을 받을 때 파괴에 저항하는 재료의 에너지 흡수 능력인 휨 인성으로 평가될 수 있으며, 에너지 흡수 능력을 나타내는 에너지 소산 면적은 하중

Table 1. Mixture proportions of fiber-net and steel fiber reinforced shotcrete

Specimen	W/B	Binder(kg/m^3)			Sand (kg/m^3)	Aggregate (kg/m^3)	Steel fiber (kg/m^3)	Admixture(wt. %)		
		Cement	GGBFS	Anhydrite				Polymer	Superplasticizer	Accelerating agent
Fiber-net	0.47	355.2	96	24	1,625	-	-	1	0.2	10
Steel fiber	0.44	480	-	-	962	659	40	-	0.2	10

-처짐 곡선의 면적으로 계산된다. 섬유 그물망 및 강섬유 보강 숏크리트의 2mm 처짐까지의 에너지 소산 면적이 각각 24.62kN・mm 및 20.07kN・mm인 것으로 보아, 인장 부재로서의 섬유 그물망의 역할이 강섬유에 비해 우수한 것으로 판단된다.

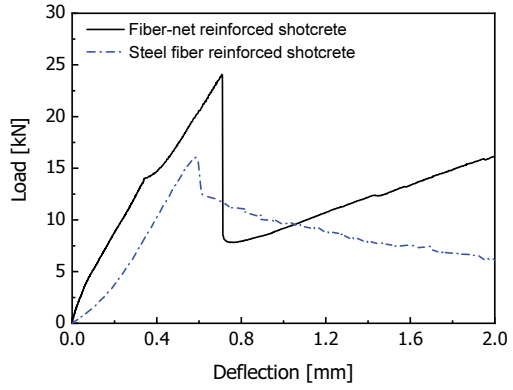


Fig. 2. Load-deflection curve for fiber-net and steel fiber reinforced shotcrete

Table 3은 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트의 휨 성능 시험 결과와 품질 기준을 나타낸다. 인장 부재로 보강된 숏크리트의 품질기준은 휨 강도 및 등가 휨 강도로 평가된다. 휨 강도 및 등가 휨 강도는 각각 휨 시험 시 최대 하중에서의 강도 및 지간의 1/150의 처짐에서의 평균 휨 강도를 의미한다. 이 때, 본 연구에서 사용된 휨 시편의 지간은 300mm이므로, 2mm 처짐까지의 인성이 등가 휨 강도로 계산되었다. 시험 결과, 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트는 모두 2018 고속도로 공사 전문시방서의 품질 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 더욱이, 강섬유 보강 숏크리트 대비 섬유 그물망 보강 숏크리트의 휨 강도 및 등가 휨 강도는 각각 약 50% 및 22.6% 향상되었다. 이와 같이 기존 지보재 대비 본 연구를 통해 개발된 섬유 그물망 보강 숏크리트의 향상된 역학적 성능에 기인하여, 숏크리트 타설 두께의 감소가 가능할 것으로 판단되며, 추후에 제시된 바와 같이 구조 및 단면 해석을 통해 타설 두께를 감소시킨 개발 지보시스템의 지보 성능이 검증될 예정이다.

Table 3. Test result and specification of flexural performance

Specimen	Test result		Specification	
	Flexural strength (MPa)	Equivalent flexural strength(MPa)	Flexural strength (MPa)	Equivalent flexural strength(MPa)
Fiber-net	7.23	3.69	4.5	3.0
Steel fiber	4.82	3.01		

3. 구조 및 단면 해석을 통한 지보 성능 분석

3.1 지반 조건에 대한 터널 단면 구조 해석

3.1.1 구조 해석 조건

본 연구를 통해 개발된 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지반 조건에 대한 지보 성능을 분석하기 위해, MIDAS/GTS NX를 사용하여 2차원 유한요소해석이 수행되었다. 해석 모델은 터널 해석에서 일반적으로 사용되는 Mohr-Coulomb 탄소성 해석모델을 사용하였으며, 터널 좌・우 측벽부 경계거리는 터널 굴착 폭의 4배, 하부 경계거리는 3배로 모사하였다.

지반 및 지보재의 물성치, 숏크리트 및 록볼트의 안정성 기준은 Tables 4-7에 나타내었으며, 측압계수의 영향을 고려하기 위해 K_0=0.5, 1.0, 1.5의 조건에서 각각 해석이 수행되었다.

Table 4. Properties of ground

Rock mass class	Unit weight (kN/m^3)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)
Ⅲ	20	30	32	200	0.3

Table 5. Properties of support materials

Type of support		Elastic modulus (MPa)	Compressive strength(MPa)	Poisson's ratio (ν)
Shotcrete	Soft	5000	10	0.3
	Hard	15000	21	0.3
Rockbolt (SD350, D25)		210000	350	0.3

Table 6. Allowable stress of shotcrete

Classification	Criteria	Design strength (MPa)	Allowable stress (MPa)
Fiber-net	$0.4f_{ck}$	29	11.6
Steel fiber	$0.4f_{ck}$	21	8.4

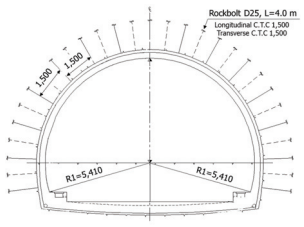
Table 7. Allowable axial force of rockbolt

Criteria	Cross-sectional area (mm^2)	Allowable stress (MPa)	Allowable axial force(kN)
$0.5A_sf_y$	409.9	350	86

3.1.2 지보패턴

Table 8은 본 해석에서 적용한 터널의 지보패턴을 나타낸다. 본 연구를 통해 개발된 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보 시스템은 암반등급 3등급 지반에 적용하는 것을 원칙으로 하지만, 실제 터널 시공 시, 암반 조사와 실제의 차이, 터널 배면 암반 붕괴, 소규모 지진에 의한 붕괴 및 시공 중 외부 환경 조건으로 인한 지반 연약화 등에 의해 시공 도중 예기치 못한 붕괴 사고 발생 가능성이 존재한다. 이로 인하여, 암반등급 4등급 지반에 필요한 지보 성능을 요구하는 시공 구간이 존재할 수 있다. 따라서 본 해석에서, 지보재는 숏크리트 및 록볼트를 사용하였으며, 2.3절에서 언급한 바와 같이 섬유 그물망 보강 숏크리트의 향상된 역학적 성능에 따라 숏크리트 타설 두께는 120mm의 강섬유 보강 숏크리트의 타설 두께에 비해 약 16.7% 감소된 100mm를 적용하였다.

Table 8. Tunnel support pattern

Characteristics		P-4
Graphical representation		
Excavation		Top heading
Round length(m)		1.5
Shotcrete thickness(mm)		120(Steel fiber), 100(Fiber-net)
Rockbolt	Legnth(m)	4.0
	Longitudinal spacing(m)	1.5
	Transverse spacing(m)	1.5

3.1.3 구조 해석 단계

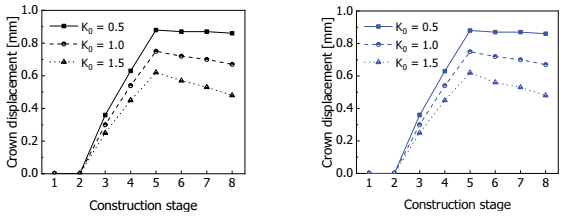
터널 해석 수행 시, 대표 단면에 대한 전 시공 과정을 포함한 해석이 수행되어야 한다. MIDAS/GTS NX에서는 누적 모델 개념을 사용하여, 각 시공 단계별로 해석이 수행된 후 이전 단계의 결과에 누적되어 최종적인 해석 결과가 도출된다. Table 9는 본 해석에서 적용한 시공 단계를 나타낸다. 지보재 설치 순서는 숏크리트의 경화 단계를 고려하여, (굴착 → 연성 숏크리트 → 강성 숏크리트) 혹은 (굴착 → 연성 숏크리트 + 록볼트 → 강성 숏크리트)의 단계로 모사하였다.

Table 9. Construction stage

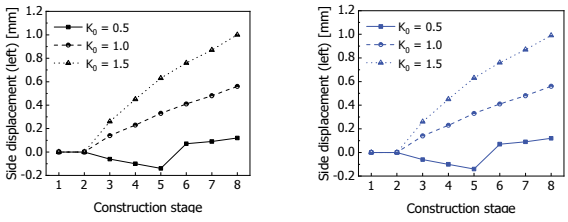
Step	Construction stage	Load distribution factor
1	Foundation	-
2	Initial(displacement=0)	-
3	Upper half excavation	0.4
4	Soft shotcrete	0.3
5	Hard shotcrete	0.3
6	Lower half excavation	0.4
7	Soft shotcrete + Rock bolt	0.3
8	Hard shotcrete	0.3

3.1.4 구조 해석 결과 및 분석

Fig. 3은 시공 단계 별 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트의 천단 및 측벽 변위를 나타낸다. 최대 천단 변위량은 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트의 경우 모두 K_0=0.5일 때 0.88mm로 나타났다. 또한, 최대 측벽 변위량은 K_0=1.5일 때, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우 1.00mm, 강섬유 보강 숏크리트의 경우 0.99mm로 나타났다. 이와 같이, 천단 및 측벽 변위량의 절대 값이 미소할 뿐만 아니라, 강섬유 보강 숏크리트 및 섬유 그물망 보강 숏크리트를 적용했을 때 모든 변위량이 거의 유사하게 나타난 것으로 보아, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 타설 두께를 감소시켜도 지보 성능이 충분히 발휘될 수 있을 것으로 판단된다.

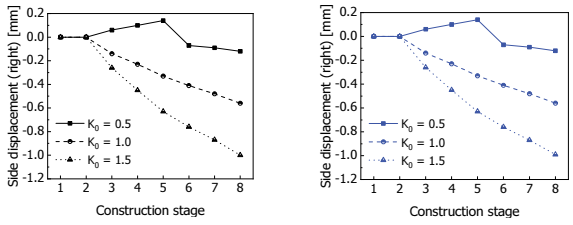


(a) Crown displacement



(b) Side displacement (left)

Fig. 3. Displacement. left: fiber-net reinforced shotcrete, right: steel fiber reinforced shotcrete



(c) Side displacement (right)

Fig. 3. Displacement. left: fiber-net reinforced shotcrete, right: steel fiber reinforced shotcrete(continued)

Fig. 4는 시공 단계 별 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트의 휨 압축응력을 나타낸다. 해석 결과, 숏크리트 최대 휨 압축응력은 K_0=1.5일 때, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우 2.15MPa, 강섬유 보강 숏크리트의 경우 2.14MPa로 나타났다. 강섬유 보강 숏크리트 및 섬유 그물망 보강 숏크리트를 지보재로 활용하였을 때, 시공 단계 별 모든 휨 압축응력이 거의 유사할 뿐만 아니라, 최대 휨 압축응력이 허용 값 (섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우 11.6MPa, 강섬유 보강 숏크리트의 경우 8.4MPa) 이내로 나타났다. 이와 같은 결과로 보아, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 타설 두께를 감소시켜도 터널의 안정성이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

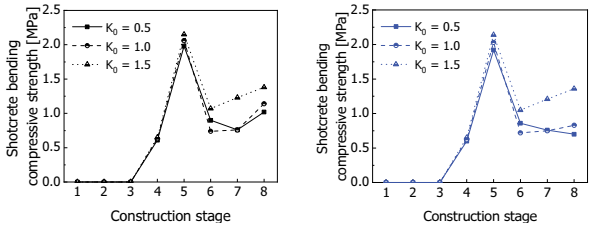


Fig. 4. Shotcrete bending compressive stress. left: fiber-net reinforced shotcrete, right: steel fiber reinforced shotcrete

3.2 섬유 그물망 및 강섬유 보강 숏크리트의 단면 해석

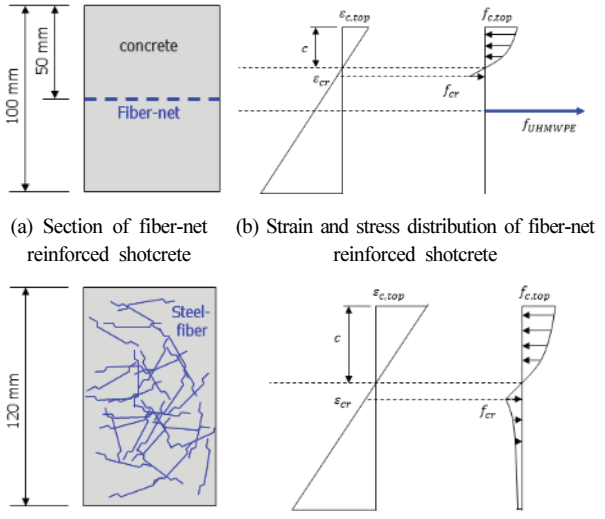
3.2.1 단면 해석 조건

본 연구를 통해 개발된 섬유 그물망 및 기존의 강섬유는 숏크리트 압축 및 인장 거동에서 숏크리트의 취성 파괴를 완화시키기 위한 목적으로 활용된다. 이와 같은 목적에 따라, 섬유 보강 숏크리트의 가장 중요한 특성 중 하나는 숏크리트의 균열 후의 인장 거동이다.

본 절에서, 개발된 인장 부재의 향상된 성능을 바탕으로 타설 두께에 따른 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트의 균열 후의 거동이 단면 해석을 통해 예측되었다. Table 10 및 Fig. 5는 각각 본 해석에서 적용한 섬유 그물망 보강 숏크리트 및 강섬유 보강 숏크리트의 단면 조건 및 단면 형상, 변형률, 응력 분포를 나타낸다. 타설 두께에 따른 균열 후의 거동을 비교하기 위하여, 숏크리트 타설 두께는 위의 구조 해석 시와 동일하게 섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우 100mm, 강섬유 보강 숏크리트의 경우 120mm를 적용하였다.

Table 10. Section details used in analysis

Classification	f_c' (MPa)	f_{cr} (MPa)	b (mm)	h (mm)	S (mm^3)	M_{cr} (kN · m)
Fiber-net	40	2.09	100	100	166666.7	0.35
Steel fiber	40	2.09	100	120	240000	0.50



(a) Section of fiber-net reinforced shotcrete

(b) Strain and stress distribution of fiber-net reinforced shotcrete

(c) Section of steel fiber reinforced shotcrete

(d) Strain and stress distribution of steel fiber reinforced shotcrete

Fig. 5. Cross section, strain, and stress distribution

3.2.2 단면 해석 알고리즘

Fig. 6 및 7은 각각 본 해석에서 적용한 단면 해석 알고리즘 및 인장 부재의 응력 산출 과정을 나타낸다. 숏크리트 내부 보강재의 인장 발현은 pull-out에 의한 시멘트 매트릭스와 보강재 사이의 부착 응력-슬립 관계에 의해 지배된다. 본 연구를 통해 개발된 섬유 그물망의 응력을 산출하기 위하여, Fig. 7(a)와 같이 double sided 타입의 pull-out 시험이 수행되었으며, 시험 결과를 바탕으로 부착 응력-슬립 관계가 도출되었다. 이후, Lee et al.(2013)에

의해 제안된 fiber-reinforced concrete(FRC) tension model을 통해 균열 폭에 따른 보강재의 응력이 산출되었으며, 이를 활용하여 섬유 그물망 보강 숏크리트의 휨 거동이 예측되었다.

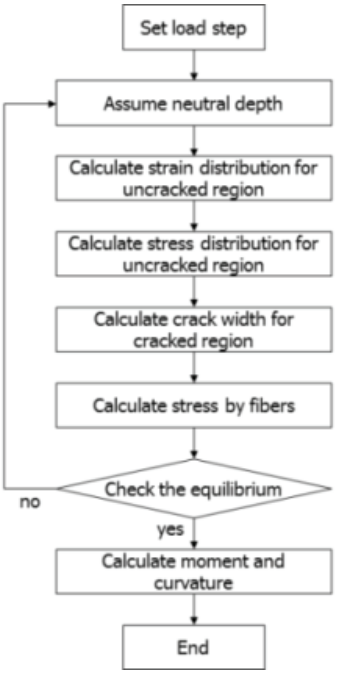
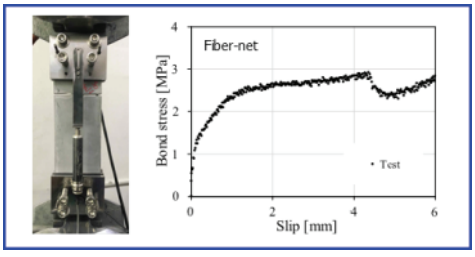
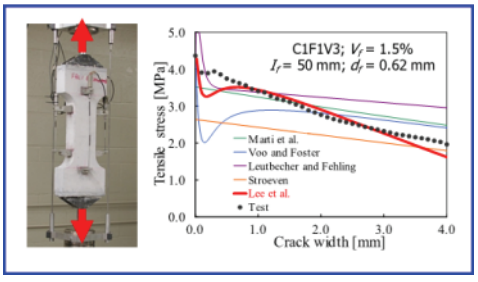


Fig. 6. Algorithm for the section analysis



(a) Bond stress-slip relation of fiber-net reinforced shotcrete



(b) Tensile stress-crack width relation of fiber-net reinforced shotcrete

Fig. 7. Procedure for predicting tensile behavior of the member

3.2.3 단면 해석 결과 및 분석

Fig. 8은 단면 해석을 통해 도출된 섬유 그물망 및 강섬유 보강 숏크리트의 모멘트–곡률 곡선을 나타낸다. Fig. 8에서 알 수 있듯이, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우, 균열 발생 이후 모멘트가 감소하였다가 섬유 그물망이 인장력을 발휘하면서 빠른 속도로 다시 증가하였다. 반면, 강섬유 보강 숏크리트의 경우, 균열 발생 이후에도 지속적으로 모멘트가 점점 감소하는 경향을 보였다. 또한, 단면 해석을 통해 예측된 섬유 그물망 및 강섬유 보강 숏크리트의 모멘트–곡률 곡선은 Fig. 2의 하중–처짐 곡선과 유사한 경향을 보였다. 이와 같은 결과로 보아, 본 연구를 통해 개발된 섬유 그물망의 향상된 성능으로 인하여 강섬유 보강 숏크리트에 비해 타설 두께를 감소시켜도 터널 지보재로서의 향상된 성능 발휘가 가능한 것으로 판단된다.

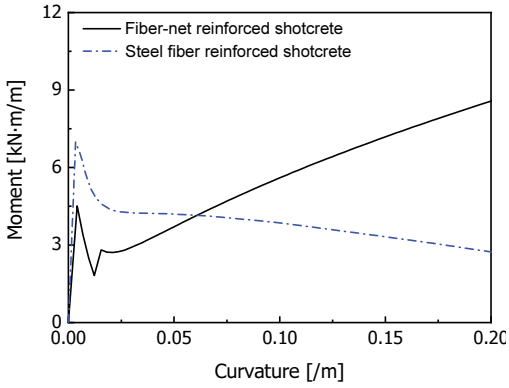


Fig. 8. Moment-curvature curve for fiber-net and steel fiber reinforced shotcrete

4. 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보패턴 제안

본 연구에서는 위의 4점 굽힘 시험, 구조 해석 및 단면 해석을 통한 지보 성능 결과와 이전 연구(Kim et al. 2020)를 통해 도출된 현장 적용성 평가 결과를 종합하여, Table 11과 같이 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보패턴을 제안하였다. 비록 터널 시공 수행 전 암반 조사 결과를 바탕으로 시공 구간별 지보패턴이 결정되지만, 이전의 3.1.2절에서 언급했듯이, 실제 시공 시 예기치 못한 붕괴 사고가 발생할 수 있다. 이와 같은 붕괴 사고의 경우, 시공 수행 전 예측이 불가능하므로, 실제 시공 수행 시 암반 조사 결과보다 더 낮은 등급의 암반에 필요한 지보성능을 요구하는 구간이 존재할 수 있다. 만일, 암반등급 3등급 지반에

적용하는 지보패턴으로 암반등급 4등급 지반까지 충분히 지보할 수 있는 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템이 적용된다면, 시공 도중 발생할 수 있는 각종 예기치 못한 사고들을 사전에 방지함으로써 시공 중 안전성이 확보되고 추가적인 시공 비용 발생 가능성이 감소될 수 있다는 장점을 갖는다. 이에 따라, 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템이 암반등급 3등급 지반 중 보다 높은 안정성을 요구하는 구간에서 높은 효율성을 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 11. Support pattern of shotcrete for fiber-net integrated tunnel support system

Rock mass class	Ⅲ - Fair rock RMR: 41-60
Excavation	Top heading and bench
Shotcrete	50mm of primary shotcrete, 50mm of secondary shotcrete
Fiber-net	Simultaneous construction with rockbolts after casting of primary shotcrete
Rockbolt	Systematic bolts 4m long, spaced 1.5-2.0m

5. 결 론

본 연구에서는 연속적이고 유연한 그물망 형태의 터널 지보용 섬유 및 섬유 그물망 지보재용 숏크리트를 활용한 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보 성능을 평가하였다. 이를 위하여, 4점 굽힘 시험, 지반 조건에 대한 터널 단면 구조 해석, 섬유 그물망 및 강섬유 보강 숏크리트의 단면 해석이 수행되었으며, 이를 통해 도출된 결과를 바탕으로 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보패턴이 제안되었다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기존 강섬유 보강 숏크리트 및 본 연구를 통해 개발된 섬유 그물망 보강 숏크리트의 휨 성능 시험 결과, 숏크리트의 균열 발생 이후 하중이 감소하는 경향을 보인 강섬유 보강 숏크리트와는 달리, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우, 균열 발생 이후에도 섬유 그물망이 인장력이 받아 하중이 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 휨 성능이 2018 고속도로공사 전문시방서의 품질 기준을 만족하였을 뿐만 아니라, 강섬유 보강 숏크리트 대비 휨 강도의 경우 약 50%, 등가 휨 강도의 경우 약 22.6% 향상되었다.
2. 섬유 그물망 보강 숏크리트의 향상된 역학적 성능을 바탕으로 숏크리트 타설 두께 감소에 따른 지보 성능을 분석하기 위하여, 2차원 유한요소해석 및 단면 해석이 수행되었다. 지반 조건에 대한 터널 단면 구조 해석 결과, 기존 강섬유 보강 숏크리트 대비 섬유 그물망 보강 숏크리트의 타설 두께를 감소시켜도 변위 및 숏크리트 휨 압축응력의 측면에서 모든 결과 값이 거의 유사할 뿐만 아니라, 허용 값 이내로 나타났다. 이와 같은 결과로 보아, 섬유 그물망 보강 숏크리트를 사용했을 때 요구 지보 성능이 충분히 발휘되면서 터널의 안정성이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.
3. 섬유 그물망 및 강섬유 보강 숏크리트의 단면해석을 통해 도출된 모멘트-곡률 곡선이 4점 굽힘 시험을 통해 도출된 하중-처짐 곡선과 유사하게 나타났다. 이는 본 연구를 통해 개발된 섬유 그물망의 향상된 성능으로 인하여, 강섬유 보강 숏크리트에 비해 타설 두께를 감소시켜도 터널 지보재로서의 성능 발휘가 가능한 것으로 판단된다.
4. 4점 굽힘 시험, 구조 해석 및 단면 해석을 통해 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보 성능을 평가한 결과, 본 연구를 통해 개발된 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템은 암반등급 3등급 지반 중 보다 높은 안정성을 요구하는 시공 구간에 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원 (스마트 건설기술 개발사업 : 과제번호 20SMIP-A158708-01)과 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 환경정책기반공공기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2016000700002).

References

Bae, G.J., Chang, S.H., Park, H.G., Won, J.P. (2006). Experimental study on the improvement of shotcrete performance by addition of calcium aluminate based accelerator and metakaolin, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, **8(3)**, 237-247 [in Korean].

Öge, İ.F. (2020). Field evaluation of flexible support system with radial gap(FSRG) under a squeezing rock condition in a coal mine development, Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, **6(3)**, 1-20.

Kanazawa, H., Nishi, T., Kiuchi, T., Nishizaki, S., Furuto, Y. (2007). The development of early-high-strength shotcrete and the evaluation of improved tunnel support system, Underground Space, the 4th Dimension of Metropolises, 1361-1367.

Kim, J., Choi, S. (2020). Evaluation of field applicability of shotcrete for fiber-net integrated tunnel support system through mock-up test, Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute, **8(1)**, 72-78 [in Korean].

Lee, S.C., Cho, J.Y., Vecchio, F.J. (2013). Simplified diverse embedment model for steel fiber-reinforced concrete elements in tension, Materials Journal, **110(4)**, 403-412.

Ma, S.J. (2014). Synthetic polymer fiber mesh tunnel support system integrated with tunnel support system, Journal of Korean Geosynthetics Society, **13(4)**, 9-12 [in Korean].

Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2019). Yearbook of Road Bridge and Tunnel Statistics, https://bti.kict.re.kr/bti/

Park, B., Jang, K.Y., Choi, Y.C. (2019). Evaluation of mechanical and durability performance of mortar shotcrete, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, **23(5)**, 68-74 [in Korean].

숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보 성능 평가

본 연구에서는 터널 지보재로서의 역학적 성능을 충분히 발휘하면서 시공성 및 안정성을 보다 향상시키기 위한 목적으로 개발된 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보 성능을 4점 굽힘 시험, 2차원 유한요소해석 및 단면 해석을 통해 평가하였다. 4점 굽힘 시험을 통한 휨 성능 평가 결과, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 경우, 강섬유 보강 숏크리트와는 달리 섬유 그물망의 인장 성능이 발휘되면서 균열 이후에도 하중이 지속적으로 증가하는 결과가 나타났다. 또한, 지반 조건에 대한 터널 단면 구조 해석, 섬유 그물망 및 강섬유 보강 숏크리트의 단면 해석 결과, 섬유 그물망 보강 숏크리트의 타설 두께를 기존에 비해 감소시켜도 충분한 지보 성능이 발휘될 수 있는 것으로 나타났다. 추가적으로, 이와 같은 결과를 종합하여, 암반등급 3등급 지반 중 보다 높은 안정성을 요구하는 시공 구간에 효율적으로 적용될 수 있는 숏크리트용 섬유 그물망 일체형 터널 지보시스템의 지보패턴이 제안되었다.