

유·무기 섬유 혼입 터널 라이닝 콘크리트 부재의 성능 평가

Performance Evaluation of Organic and Inorganic Fiber Reinforced Concrete in Tunnel Lining Structure

이 종 은* 김 태 원* 김 수 만** 전 중 규***
Lee, Jong-Eun Kim, Tae-Won Kim, Su-Man Jeon, Joong-Kyu

Abstract

The tunnel structure is widely used for transportation in the mountain area. To reduce the duration of construction and thus the expense, a tunnel excavation is often performed simultaneously with a tunnel lining in in-situ. However, cracking of the tunnel lining may occur arising from the vibrating impact in the excavation process. The present study concerns the role of steel fiber and nylon fibers in tunnel lining concrete to reduce the vibrating impact. As a result it was found that both the nylon fiber and steel fiber improved the durability and physical properties of concrete.

요 지

산간 지형이 많은 국내 여건상 물류수송 및 교통 등을 위한 터널 구조물의 활용성은 매우 높다. 최근 현장에서는 공기단축 및 원가절감을 위하여 터널 굴착과 라이닝 콘크리트의 타설을 병행하는 공법이 진행되면서 굴착에 의한 진동 등의 영향으로 콘크리트 구조물 초기 재령에서 균열 및 내구성능 저하 문제가 발생하고 있다. 본 연구에서는 터널 라이닝용 콘크리트 배합에 있어서 보강재를 강섬유와 더불어 최근 국내에서 개발된 폴리아미드 섬유를 병행 사용한 콘크리트의 역학적 특성을 실험적으로 검토하였다. 또한 유·무기 섬유보강 터널 라이닝 콘크리트 부재의 하중-변위와 하중-변형률 관계를 모형 실험으로 평가하였다. 실험 결과, 보통 콘크리트에 강섬유와 폴리아미드 섬유 보강재를 하이브리드화하여 사용한 콘크리트 부재에서 구조 성능이 증진됨을 확인할 수 있었다.

Keywords : Dry shrinkage, Hybrid, Load-displacement, Polyamide fiber, Tunnel lining concrete

핵심 용어 : 건조수축, 하이브리드, 하중-변위, 폴리아미드 섬유, 터널 라이닝 콘크리트

* 정희원, 수원대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 수원대학교 토목공학과 교수

*** 정희원, 코오롱건설(주) 기술연구소 선임연구원

E-mail : jkjeon31@kolon.com 031-329-0663

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2009년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

산간지역이 많은 우리나라에서는 도로, 철도 등의 기반시설 공사시 터널공사가 많이 적용되고 있으며, 이때 시공시 라이닝에 사용되는 콘크리트는 경제성, 시공성, 안전성 등이 상대적으로 매우 우수한 건설구조물의 주재료로서 그 성능 및 품질개선과 관련하여 지속적인 연구개발을 통한 발전을 이루고 있다.

그러나 콘크리트는 외부의 하중 및 진동에 의한 균열 뿐만 아니라 자기수축, 건조수축 및 소성수축에 의한 균열과 수화열에 의한 온도균열이 발생하게 된다. 이와 같이 콘크리트에 발생하는 미세한 균열은 콘크리트의 수밀성을 감소시키고, 유해물질의 침투에 의한 내구성능 저하는 물론, 구조적 성능저하를 가속화시키고 있다.

또한, 터널시공에서 굴착작업과 라이닝 콘크리트 구조물을 병행 시공하는 공법에서는 발파시 발생하는 발파진동이 타설되는 라이닝 콘크리트에 균열을 발생시키거나 강도를 저하시킬 수 있으므로 이를 예방하기 위한 것이 상당히 중요하다.

본 연구에서는 수축 및 수화열에 의한 라이닝 콘크리트의 균열을 저감시키기 위한 최적의 방법을 모색하고자 한다.

이를 위해 보통 콘크리트(Plain Concrete, PL) 및 보통 콘크리트에 강섬유 30kg/m³를 혼입한 콘크리트(S30), 보통 콘크리트+강섬유 30kg/m³에 폴리아미드 섬유를 각각 0.4, 0.6 및 0.8kg/m³을 각각 혼입한 3종류(S30P4, S30P6, S30P8) 등 5종류의 콘크리트 시험체를 제작하여 각 시험체의 기계적 성질 및 라이닝 부재의 성능을 측정하여 그 결과를 분석하였다.

2. 섬유보강 콘크리트 기본적인 성능

콘크리트의 균열 저항성인 인성(toughness)을 증대시키기 위하여 사용되는 섬유보강 콘크리트(FRC, Fiber Reinforced Concrete)는 단상인 섬유를 콘크리트에 분산시켜 혼입한 것이다. 이때 일반적으로 사용되는 시멘트계 복합재료용 섬유로는 강섬유, 탄소섬유 및 유리 섬유 등의 무기계 섬유와 아라미드 섬유, 폴로프로필렌 섬유, 폴리아미드 섬유 및 비닐론 섬유

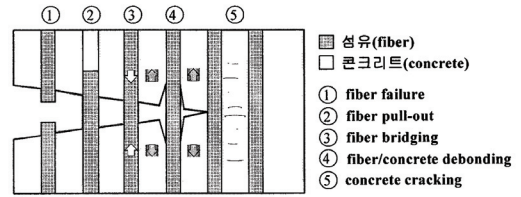


Fig. 1 콘크리트 균열시 섬유의 역학적 거동 메커니즘

유 등의 유기계 섬유로 크게 분류되며, 이는 다시 섬유의 크기에 따라 마이크로 섬유와 매크로 섬유로 구분되어진다.

일반적으로 보강 섬유는 콘크리트의 압축강도의 증진이라기보다는 콘크리트의 균열 저항성과 같은 인성을 증진시키는 역할을 하며, 콘크리트의 균열시 섬유의 역학적인 거동현상은 Fig. 1과 같이 개괄적으로 5가지로 나눌 수 있다.

Fig. 1에서와 같이 콘크리트 균열시 섬유는 파괴(failure), 뽑힘(pull-out), 걸침(bridging), 계면 들뜸(debonding) 등의 과정에서 콘크리트에 균열을 일으키는 파괴에너지를 흡수함으로써 파괴인성을 높여주는 역할을 하게 된다. 또한 Fig. 1의 ⑤와 같이 균열 선단에서 발생하는 콘크리트 미세균열을 분포시켜는 역할을 함으로써 균열 진행속도를 경감시키는 역할도 수행하게 된다.

한편, 매크로 섬유와 마이크로 섬유의 역학적인 역할은 Fig. 2와 같으며, 매크로 섬유는 주균열 등과 같은 큰 균열이 발생, 진행하는 것에 대한 지연 및 억제 역할을 하지만, 미세균열 또는 분포된 섬유 사이에서 발생, 진전하는 균열에 대하여는 그 기능을 발휘하지 못하게 된다. 반면에 마이크로 섬유는 미세균열에 대하여 위에 기술된 역학적인 억제기능을 발휘할 수 있으나, 주균열과 같은 큰 균열에 대하여는 그 성능을 충분히 기대할 수 없게 된다.



Fig. 2 매크로 및 마이크로 섬유의 역학적 역할

따라서 본 논문에서는 매크로 섬유와 마이크로 섬유를 동시에 혼입, 사용하는 하이브리드(hybrid) 방식의 섬유보강 콘크리트를 선정하였다.

잔골재는 바다모래를 세척하여 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 20mm인 부순돌을 사용하였으며, 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다.

3. 실험

3.1.3 섬유

3.1 사용 재료

강섬유 및 폴리아미드 섬유의 물리적 성질은 Table 3과 같다.

3.1.1 시멘트

보통 포틀랜드 시멘트(OPC로 약함)를 사용하였으며, 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

3.2 콘크리트 배합

콘크리트의 설계기준강도는 현재 터널 라이닝 콘크리트에 주로 적용되고 있는 24MPa이며, 배합표는 Table 4와 같다.

3.1.2 골재

Table 1 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질

Type	Items	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig. Loss (%)	Specific Gravity	Blaine (cm ² /g)
OPC		20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	2.1	1.2	3.15	3.120

Table 2 골재의 물리적 성질

Types	Items	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Percentage of Solids(%)	F.M.	Unit Weight (kg/m ³)
Fine Aggregate		2.60	1.01	56.8	3.0	1.475
Coarse Aggregate		2.62	1.78	65.4	6.9	1.741

Table 3 강섬유 및 폴리아미드 섬유의 물리적 성질

Types	Items	Diameter	Length	Specific Gravity	Tensile Strength	Elastic Modulus	Stiffness	Melting Point
Steel Fiber		0.5mm	30mm	7.85	950MPa	-	-	-
Polyamide Fiber		23 μ m	20mm	1.14	896MPa	5.17GPa	103MPa	225 $^{\circ}$ C

Table 4 콘크리트의 배합표

Types	Air (%)	Slump Flow (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)						Ad1* (C*%)	Ad2** (C*%)
					W	C	S	G	SF	PF		
PL	4.5±1.5	150±25	51.0	48.0	179	351	848	922	0	0	0.5	0.0015
S30									30	0	0.6	0.0012
S30P4									30	0.4	0.7	0.0007
S30P6									30	0.6	0.7	0.0007
S30P8									30	0.8	0.7	0.0007

* : 감수제, ** : AE제

3.3 시험 방법

1) 압축강도

콘크리트 압축강도는 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 의 원주형 공시체를 제조한 후 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ 의 수중에서 표준양생을 실시하여 재령 3일, 7일, 28일 압축강도를 KS F 2505에 준하여 측정하였다.

2) 인장강도

콘크리트 인장강도는 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 의 원주형 공시체를 제조하여 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ 의 수중에서 표준양생을 실시한 후 재령 28일에서 KS F 2423에 준하여 실시하였다.

3) 건조수축

콘크리트 건조수축 시험은 KS F 2424에 준하여 콤팩레터 방법으로 측정하였다. 건조수축에 의한 길이변화 측정용 공시체는 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 의 몰드를 이용하여 표선용 젓빛 유리를 공시체의 측면의 중심선 상의 양 끝으로부터 젓빛 유리 표선까지의 거리가 25mm 이상이 되도록 부착한다. 그리고 재령 7일까지 수중양생을 실시한 후, 기건상태(온도 $20 \pm 2^\circ \text{C}$, 습도 $65 \pm 10\%$)에 노출시켜 정해진 재령에서 길이변화를 측정하였다.

4) 터널 모형 라이닝 콘크리트 부재 성능 평가

터널 라이닝 콘크리트의 축소 모형 부재를 제작하기 위하여, 콘크리트 두께 60mm로 확보할 수 있는 강제 거푸집을 제작하였으며, 강제 거푸집의 외부 반경은 콘크리트 라이닝의 축소 모형을 고려하여 300mm로



Photo 1 라이닝 콘크리트 시험체의 강제 거푸집

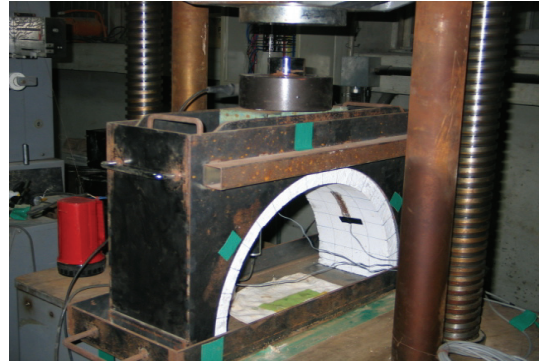


Photo 2 간접 재하시험용 외함 및 재하장치

하였다. Photo 1은 본 실험을 위하여 제작된 라이닝 거푸집의 형상이다.

본 연구에서는 현장조건에 적합한 재하시험을 시도하기 위하여 여러 가지 시험장치에 의한 예비시험을 수행하였다. 즉, 라이닝의 주변 토사 및 암반에 의한 균등 분포하중의 모사를 위하여 Photo 2와 같이 시험용 틀 내부에 균일한 직경의 쇠구슬을 충전한 후 하중 재하 방법을 채택하였다.

3.4 시험 변수와 시험체 표시법

1) 콘크리트 공시체

라이닝 콘크리트의 기계적 성질을 알아보기 위한 시험 변수에 따른 시험체 표시법은 Fig. 3과 같다.

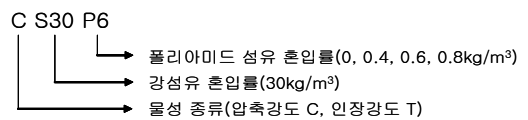


Fig. 3 콘크리트 공시체 변수에 따른 표시법

2) 라이닝 콘크리트 부재

라이닝 콘크리트 부재의 성능 평가를 위한 시험 변수에 따른 시험체 표시법은 Fig. 4와 같다.

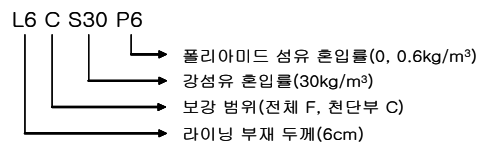


Fig. 4 라이닝 콘크리트 부재 변수에 따른 표시법

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 유·무기 섬유보강 콘크리트의 기초물성

4.1.1 압축강도

Fig. 5는 설계기준강도 24MPa인 보통 콘크리트 (PL), 보통 콘크리트에 강섬유 30kg/m³를 혼입한 콘크리트(S30), 보통 콘크리트에 강섬유 30kg/m³와 폴리아미드 섬유 각각 0.4, 0.6 및 0.8kg/m³을 혼입한 3종류(S30P4, S30P6, S30P8) 등 5종류 콘크리트의 재령별 압축강도를 나타낸 것이다.

재령 28일 압축강도는 S30P8 시편체가 가장 큰 값을 나타내었으며, PL과 비교하여 약 6% 정도 증진되었다. 또한 콘크리트의 압축강도는 보통 콘크리트에 강섬유만 혼입한 것보다 강섬유와 폴리아미드 섬유를 혼용하여 혼입한 것이 더 큰 값을 나타내었다.

4.1.2 인장강도

PL, S30, S30P4, S30P6 및 S30P8의 5종류 콘크리트의 재령 28일 인장강도 시험결과를 정리한 것이 Fig. 6이다. 이 그림에서 콘크리트의 인장강도는 PL < S30 < S30P4 < S30P6 < S30P8 순으로 크게 나타났으며, S30P8 콘크리트의 인장강도는 PL 콘크리트보다 약 26% 정도 큰 3.6MPa를 얻었다.

본 실험에 사용된 섬유는 양단 후크형 강섬유(마크

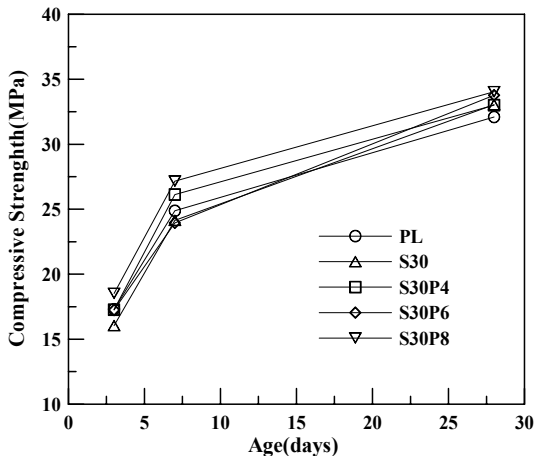


Fig. 5 콘크리트의 압축강도 비교

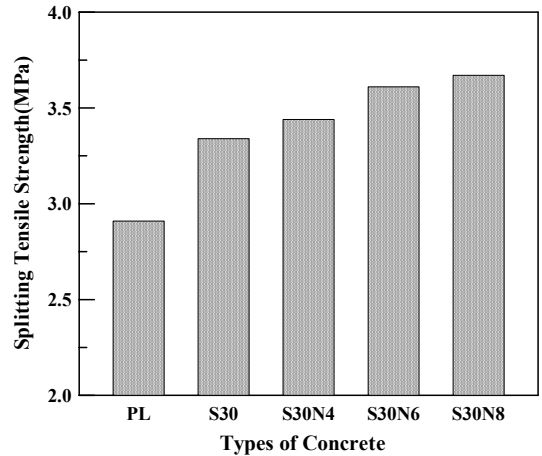


Fig. 6 콘크리트의 인장강도 비교

로 섬유)와 폴리아미드섬유(마이크로 섬유)이다. 시험결과를 보면, 양단 후크형 강섬유는 기하학적 형상이 콘크리트 매트릭스 내에서 뽑힘(pull-out)에 저항하는 정도가 높았다. 한편 폴리아미드 섬유는 콘크리트와 섬유 사이의 부착력이 증가했는데, 폴리아미드 섬유는 수소결합을 가지고 있으므로 폴리아미드 섬유가 콘크리트 내의 산소와 수소결합을 할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 보통 콘크리트에 섬유(강섬유+폴리아미드 섬유)를 보강한 것이 콘크리트의 역학적 성질을 개선하는 것으로 판단된다.

4.1.3 건조수축

Fig. 7은 PL, S30, S30P4, S30P6 및 S30P8 5종류 콘크리트의 재령별 건조수축 시험결과를 나타낸 것이다. 이 그림에서 배합종류에 상관없이 재령 28일 까지 건조에 의한 수축이 크게 발생되었으며, 또한 보통 콘크리트에 섬유의 혼입량이 증가할수록 건조수축량은 크게 감소하는 결과를 얻었다.

따라서 본 실험에 사용된 강섬유 및 폴리아미드 섬유보강 콘크리트의 경우, 섬유 보강제(강섬유+폴리아미드 섬유)가 콘크리트 매트릭스의 변형억제 효과가 있기 때문에 터널 라이닝 콘크리트에 강섬유 및 폴리아미드섬유를 적정량 혼입하는 것은 건조수축 저감을 위하여 대단히 효과적인 것으로 나타났다.

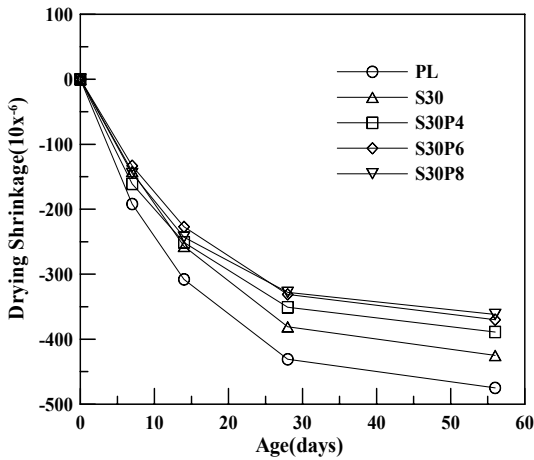


Fig. 7 콘크리트의 건조수축 비교

4.2 터널 모형 라이닝 콘크리트 부재 성능 평가

4.2.1 천단부(Crown부)보강 라이닝 콘크리트 부재
터널 라이닝 콘크리트의 천단부에서 발생하는 균열을 저감시키고, 구조적 성능을 향상시킬 목적으로 라이닝 콘크리트 천단부 20° 범위에 강섬유, 강섬유+폴리아미드 섬유를 혼입한 콘크리트 모형 부재를 제작하여 성능평가를 실시하였다.

Fig. 8은 3종류 콘크리트(L6CS0P0, L6CS30P0, L6CS30P6)의 간접하중에 의한 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 섬유로 보강된 라이닝 콘크리트의 경우, 재하 초기변화는 유사하였으나 하중이 증가할수록 발생하는 변위는 섬유를 보강하지 않은 콘크리트보다 상대적으로 감소하는 결과를 얻었다.

그러나 강섬유, 강섬유+폴리아미드 섬유를 혼입한 콘크리트 부재의 경우, 라이닝 콘크리트 부재의 하중-변위 곡선은 거의 유사한 경향을 나타내었다.

한편, 천단부 보강 라이닝 콘크리트 부재의 천단부 20° 범위에 강섬유, 강섬유+폴리아미드 섬유를 혼입한 것으로, 천단부 및 측벽부 안쪽에서 측정된 하중-변형률 곡선을 나타낸 것이 Fig. 9 및 Fig. 10이다.

Fig. 9에서는 라이닝 콘크리트 부재에서 인장응력이 발생하는 부분으로 하중이 가해졌을 때, 섬유를 보강한 콘크리트의 변형률은 섬유를 보강하지 않은 콘크리트

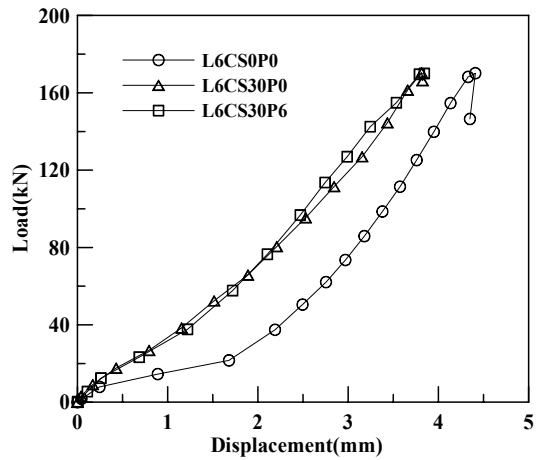


Fig. 8 천단부 보강 라이닝 콘크리트의 하중-변위 곡선

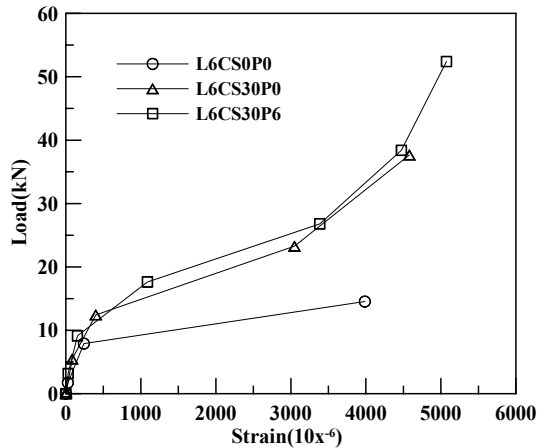


Fig. 9 천단부 보강 라이닝 콘크리트의 하중-변형률 곡선 [천단부]

보다 상당히 작게 나타났다. 그러나 강섬유만으로 보강한 경우와 강섬유와 폴리아미드 섬유를 보강한 경우는 큰 차이가 없었다.

Fig. 10은 라이닝 콘크리트 부재에서 압축응력이 발생하는 측벽 부분의 변형률을 나타낸 것으로, 측정부 위에는 보통 콘크리트가 적용되었으며, 동일한 하중이 가해졌을 때 콘크리트 부재의 변형률은 L6CS30P6 < L6CS30P0 < L6CS0P0 순으로 크게 나타났다.

따라서 천단부만 섬유로 보강한 라이닝 부재의 시험 결과는 기존 연구결과와 같이 섬유보강 콘크리트의 특징인 파괴에너지의 흡수를 도모하며, 콘크리트의 연성과

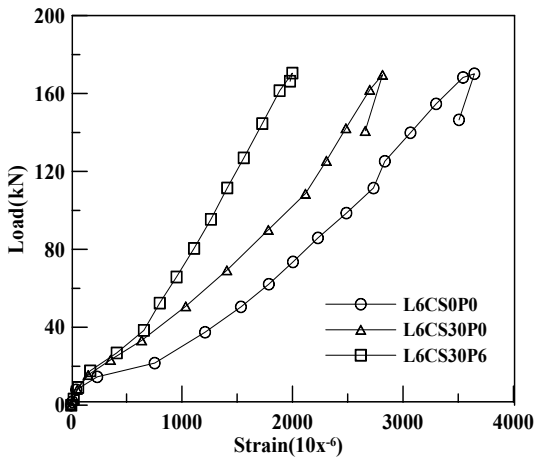


Fig. 10 천단부 보강 라이닝 콘크리트의 하중-변형률 곡선 [측벽부]

강도를 증가시키는 내용과 유사한 결과를 나타내었다.

그러나 폴리아미드 섬유를 추가적으로 보강한 라이닝 콘크리트 부재에서, 변위 및 천단부 변형률에는 큰 영향을 미치지 않았으나, 측벽부의 변형을 저항성은 크게 개선된 것을 볼 때, 폴리아미드 섬유는 수직 방향보다 수평 방향에서 인성 효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 폴리아미드 섬유가 부재의 구조적인 성능 외에 소성수축 및 건조수축에 의한 균열발생을 상당히 줄여준다는 결과를 얻었다.

4.2.2 전단면(Full) 보강 라이닝 콘크리트 부재

터널 라이닝 콘크리트의 경우, 라이닝 콘크리트 두께부족, 배면 공동현상 및 지반변동에 따른 국부적인 하중 등 여러 가지 요인으로 성능이 저하되고 있어, 이와 같은 현상을 저감시키기 위하여 라이닝 콘크리트 전단면에 섬유보강재를 혼입하여 성능평가를 실시하였다.

Fig. 11은 보통 콘크리트(L6FS0P0), 보통 콘크리트에 강섬유(L6FS30P0) 및 강섬유와 폴리아미드섬유(L6FS30P6)를 라이닝 콘크리트 전단면에 보강한 3종류 콘크리트의 간접하중에 의한 하중-변위 곡선을 나타낸 것이다. 동일한 하중상태에서 전단면 보강 라이닝 콘크리트 부재의 변위는 L6FS30P6 < L6FS30P0 < L6FS0P0 순으로 크게 나타났다.

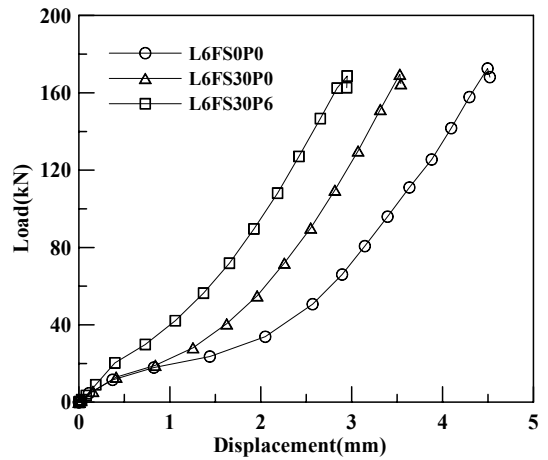


Fig. 11 전단면 보강 라이닝 콘크리트의 하중-변위 곡선

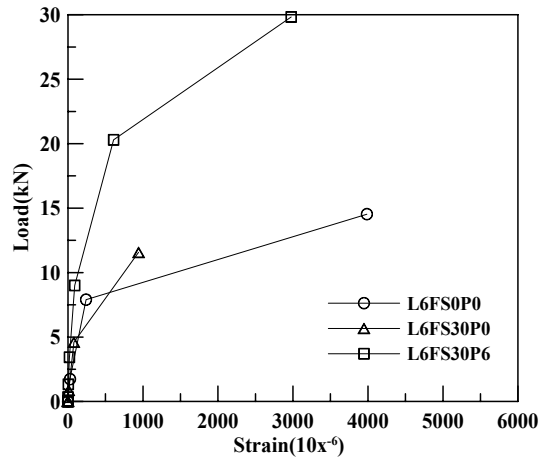


Fig. 12 전단면 보강 라이닝 콘크리트의 하중-변형률 곡선 [천단부]

한편, Fig. 12는 전단면 보강 라이닝 콘크리트 부재의 천단부 안쪽에서 인장응력을 측정된 결과로써, 재하 초기의 변화는 유사하였으나 강섬유 및 폴리아미드 섬유를 병행 사용한 라이닝 콘크리트 부재가 하중이 증가하면서 변형률이 상당히 작아졌고, 특히 L6FS30P6, L6FS30P0 부재는 균열 저항성 및 구조성능향상에 상당히 효과적인 결과를 얻었다.

Fig. 13은 전단면 보강 라이닝 콘크리트 부재의 측벽부 안쪽에서 하중-변형률 관계를 측정된 결과로써, 섬유를 보강한 콘크리트의 변형률은 섬유를 보강하지

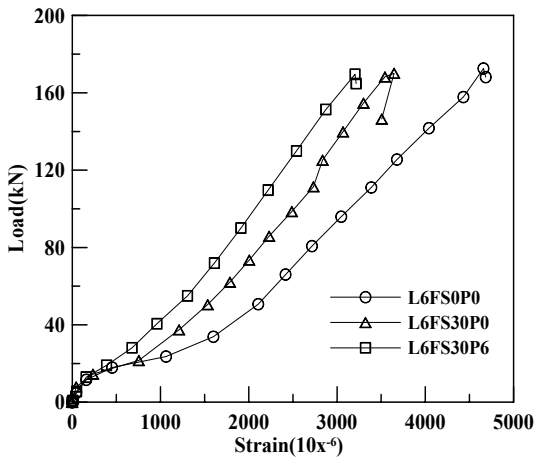


Fig. 13 전단면 보강 라이닝 콘크리트의 하중-변형률 곡선 [측벽부]

않은 콘크리트보다 작게 나타났다. 또한, 강섬유만으로 보강한 것보다 강섬유+폴리아미드 섬유를 혼입한 콘크리트 부재의 경우, 라이닝 콘크리트 부재의 하중-변형률 곡선이 작게 나타났다.

따라서 터널 라이닝 콘크리트는 일차적으로 시공방법상 콘크리트 두께부족, 배면공동 등의 결함이 발생할 가능성이 높고, 이러한 구조적 취약부에 2차적으로 숏크리트가 접촉하게 되면 라이닝 콘크리트는 비교적 작은 하중이나 변형에도 쉽게 균열이 발생하게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위해서는 본 연구에서 제시된 강섬유 또는 강섬유 및 폴리아미드 섬유보강 콘크리트를 활용하여 라이닝 콘크리트의 물리적·역학적 성능 및 내구성능을 향상시키고, 구조물의 안전성 및 신뢰성을 확보해야 할 것이다.

아울러 터널 라이닝 콘크리트 전단면 섬유보강 콘크리트 적용은 경제성 측면에서 상당히 불리함으로 추후 일반적으로 시공되는 라이닝 콘크리트의 설계 두께를 감소시켜 경제성과 더불어 라이닝 콘크리트의 역학적 성질에 대하여 검토할 예정이다.

5. 결 론

1) 보통 콘크리트에 강섬유(매크로 섬유) 및 폴리아미드 섬유(마이크로 섬유)를 혼입한 콘크리트는 역학

적 성질(압축/인장) 중에서 인장강도 증진이 상당히 컸으며, 따라서 콘크리트의 인성이 증가된 것으로 판단된다.

- 2) 동일 배합조건에서 강섬유 및 폴리아미드 섬유를 혼입한 콘크리트의 건조수축은 보통 콘크리트의 경우에 비하여 현저히 저감되는 경향을 나타내어 강섬유 및 폴리아미드 섬유의 혼입이 건조수축에 상당히 효과적임을 알 수 있었다.
- 3) 섬유보강 콘크리트가 인성 및 건조수축 저항성에서 유리하며, 특히 강섬유와 폴리아미드 섬유를 보강 콘크리트가 가장 좋은 성능을 나타내었다.
- 4) 터널 라이닝 콘크리트 천단부 20° 범위에 섬유보강된 콘크리트의 간접하중에 의한 거동을 보면 섬유보강 부재가 기본적으로 효과적이지만, 하중-변위 거동과 천단부의 하중-변형률 관계에 강섬유보강과 폴리아미드 섬유보강의 효과가 유사하였다. 단지, 측벽부의 하중-변형률 거동에서는 폴리아미드 섬유보강이 가장 효과적임을 알 수 있었다.
- 5) 터널 라이닝 콘크리트 전단면에 섬유 보강한 콘크리트의 간접하중에 의한 거동을 보면 하중-변위 곡선과 하중-변형률 곡선 모두에서 L6FS30P6<L6FS30P0 <L6FS0P0 순으로 크게 나타났다.
- 6) 이상의 연구 내용을 종합해보면, 터널 라이닝 콘크리트에서 발생하는 균열 및 처짐 저항성과 구조적 성능을 향상시키기 위해서는 유·무기 혼입 섬유보강 콘크리트가 효과적이며, 특히 폴리아미드 섬유가 구조물의 안전성 및 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 즉, 폴리아미드 섬유가 강섬유보다 효과적이지만, 폴리아미드 섬유는 천단부 보강보다 전단면 보강에서 더 효과적이고 천단부보다 측벽부에서 더 효과적인 거동을 나타내었다.

참고문헌

1. 전중규, 전찬기, 김낙영, 김수만, 이종은, “모형 실험에 의한 터널 콘크리트 라이닝의 천단부 균열 제어에 관한 연구”, 터널기술 제3권, 제3호, 2006, pp. 227-235.
2. 김규용, 김영덕, 조봉석, 윤현도, 김무한, “국내에서의 섬유보강 시멘트 복합재료의 적용 현황 및 수요 전망”.

-
- 콘크리트학회지, 제18권 제1호, 2006, pp. 44-51.
3. 김병기, 김광련, 권용주, 한천구, "콘크리트 초기균열 제어를 위한 합성섬유의 특성 및 현장 적용 사례", 한국콘크리트학회지, 제18권 제1호, 2006, pp. 36-43.
 4. 김광련, 안태호, 김용태, 김병기, "섬유보강 콘크리트에서 나일론섬유의 응용가능성", 콘크리트학회지, 제16권 제6호, 2004, pp. 65-73.
 5. 전중규, 유진오, 유세열, "섬유보강 콘크리트의 분산성 및 균열저항성 평가", 한국콘크리트학회 가을학술발표회논문집, 2007, pp. 746-749.
 6. B. Mu, C. Meyer, S. Shimanovich, "Improving the Interface Bond between Fiber Mesh and Cementitious Matrix", Cement and Concrete Research, Vol. 32, 2002, pp. 783-787.
 7. E. Mchenry, Z.H. Stachurski, "Composite Materials Based on Wood and Nylon Fiber", Composites, Vol. 34, 2003, pp. 171-181.
 8. P.S. Song, S. Hwang, B.C. Sheu, "Strength Properties of Nylon and Polypropylene Fiber reinforced Concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 35, 2005, pp. 1546-1550.
 9. K. Wang, S.P. Shah, P. Phuaksuk, "Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials-Influence of Fly Ash and Fibers", ACI Material Journal, Vol. 98, 2001, pp. 458-464.
 10. A. M. Alhozaimy, P. Soroushian, F. Mirza, "Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and Effects of Pozzolanic Materials", Cement and Concrete Research, Vol. 18, 1996, pp. 85-92.
- (접수일자 : 2009년 1월 20일)
(심사완료일자 : 2009년 3월 5일)