

# 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 합성섬유 보강재 적용에 따른 구조적 성능 평가

이호성<sup>1\*</sup> · 김창용<sup>2</sup> · 이승원<sup>3</sup> · 김승준<sup>4</sup> · 이경진<sup>5</sup>

<sup>1</sup>정회원, (주)지윤이앤씨 대표

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구소 선임연구위원

<sup>3</sup>정회원, 한양대학교 자원환경공학과 교수

<sup>4</sup>비회원, (주)지윤이앤씨 이사

<sup>5</sup>비회원, (주)지윤이앤씨 과장

## Structural performance evaluation of precast concrete segment using synthetic fibres

Hoseong Lee<sup>1\*</sup> · Changyong Kim<sup>2</sup> · Sean S. Lee<sup>3</sup> · Seungjun Kim<sup>4</sup> · Kyeongjin Lee<sup>5</sup>

<sup>1</sup>CEO, JIYUN EnC Co., Ltd.

<sup>2</sup>Senior Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Construction Technology

<sup>3</sup>Professor, Dept. of Earth Resources and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>4</sup>Director, JIYUN EnC Co., Ltd.

<sup>5</sup>General Manager, JIYUN EnC Co., Ltd.

\*Corresponding Author : Hoseong Lee, [geotechman@naver.com](mailto:geotechman@naver.com)

### Abstract

Steel bars have been widely used as the primary reinforcement for Precast Segmental Concrete Lining for TBM Tunnels. Previously, studies have been carried out to gauge the potential for steel fiber reinforcement to replace the use of steel bar reinforcements in the segmental lining to reduce the amount of the steel bar reinforcement. Steel fiber reinforcements have been investigated and widely applied to SFRC TBM linings to improve the constructability of SFRC TBM linings worldwide. However, the steel fiber reinforcement often caused punctures to the water membranes inside tunnel lining and had long-term durability deterioration issues caused by steel corrosion, as well as cosmetic problems. Therefore, this paper sought to gauge the potential of synthetic fiber reinforcements, which have proven to be very attractive substitutes for steel fiber reinforcements. This study analyzed the performance of both steel and synthetic fiber reinforcements in segmental linings and evaluated the applicability of the fiber reinforcements to the TBM Precast Concrete Segmental Linings of TBM tunnels. As a conclusion, this study demonstrates that the potential use of steel and synthetic fibers in various combination, can substitute the rebar reinforcement in the concrete mix for segmental concrete linings.

**Keywords:** Shield TBM tunnel, Precast concrete segment lining, Synthetic fibre, Steel fibre

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
20(2)469-483(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.2.469>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received February 12, 2018

Revised March 2, 2018

Accepted March 8, 2018



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 © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

셸드TBM 터널의 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 라이닝의 보강재로 철근이 주로 사용되어 왔으나, 철근 보강량을 줄이기 위하여 섬유보강재를 적용하는 연구가 진행되어 오고 있다. 세계적으로 터널 시공성을 향상시키기 위하여 강섬유보강재를 적용한 연구와 시공이 진행되어 왔으나, 터널 라이닝 방수막에 대한 편칭, 자체 부식에 의한 내구성 및 미관상의 문제로 인하여 이에 대한 적용이 국내에서는 미뤄지고 있는 실정이며, 이에 대한 대책으로 합성섬유가 강섬유의 대체제로 주목 받고 있다. 이 연구에서는 섬유(강섬유, 합성섬유) 보강재를 사용한 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 파괴시험을 통하여 성능을 분석하여 현장에서의 적용 가능성을 평가하였다. 그 결과 강섬유와 합성섬유의 조합이나 합성섬유의 혼입량에 따라 보조철근의 대체가 가능한 것으로 분석되었다.

**주요어:** 셸드TBM 터널, 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 라이닝, 합성섬유, 강섬유

## 1. 서론

세계의 주요 국가들은 도심지의 건설하는 터널의 공법으로 대부분 셸드 TBM을 적용하고 있으나, 국내에서는 아직까지도 적용이 미미한 실정이다. 가장 큰 요인은 경제성으로서 NATM 대비 상대적으로 큰 공사비 때문인 것으로 인식되고 있다. 셸드 TBM 공사비에서 가장 큰 비중을 차지하는 항목으로 세그먼트 라이닝을 들 수 있으며, 연장에 따라 직접공사비의 25~40%를 차지 하는 것으로 보고되고 있다(Chang et al., 2011).

이러한 이유로 세계적으로 세그먼트 라이닝의 경제성 향상을 위한 여러가지 기술이 개발되고 있으며, 암반중에 설치되는 세그먼트 라이닝의 경우는 축력이 지배적으로 작용하므로 이 같은 구조적 특징에 따라 강섬유 보강 콘크리트 세그먼트 라이닝(Steel Fiber Reinforced Concrete Segment Lining, SFRC)의 개발과 적용이 시도되어 왔다(Chiaia et al., 2009; Rivaz, 2008; Dobashi et al., 2006; Fuente et al., 2012). 또한 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 제작비용의 약 50%를 차지하는 철근 보강량을 줄이면서 섬유보강재를 적용하는 방안으로 하이브리드 세그먼트의 개발도 시도되었다(Tiberti et al., 2008).

국내에서도 TBM 국산화와 관련하여 SFRC 세그먼트 혹은 하이브리드 세그먼트의 개발이 수행되어 왔다(Chang et al., 2011; Moon et al., 2014). 하지만, 표면에 돌출된 강섬유의 부식으로 인한 심미적인 불안감과 뚜렷한 비교 우위성의 부족으로 현장에서의 적용이 미진한 실정이다.

최근 해외에서 적용되는 사례가 증가하고 있는 합성섬유(Synthetic fibre) 보강재가 기존에 대비한 대안이 될 수 있을 것으로 예상되는데, 기존 강섬유의 재질에 비해 부식에 강하고 무게가 가벼워 시공성에 유리하고, 경제적이며, 화재 시 고열에 의한 폭발 방지 효과도 동시에 누릴 수 있는 장점이 있으므로, 지하터널 등의 구조물에 적용성이 우수한 것으로 생각된다. 하지만 기존의 철근이나 강섬유에 비하여 강도 등의 물성이 작아 실제 적용을 위해서는 구조적인 안정성과 해석적인 분석이 필요할 것으로 판단되므로, 본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 라이닝에 보강재의 각각의 조합에 의한 실험체를 제작하여 파괴실험을 통한 사전적 적용성을 평가하고자 한다.

이러한 섬유보강재는 단독으로 적용되기 보다는 철근과 강섬유 그리고 합성섬유가 혼합되어 적용되는 사례가 많은데, 이는 섬유 보강재의 구조적 성능이 단독으로 사용되기에는 강도가 부족하여 철근보강재와 더불어 보조적 보강재로서 그 효용가치가 높은 것으로 추정할 수 있겠다.

본 연구에서는 하저구간, 도심지 터널, 복층터널 등의 쉴드TBM에 의한 터널에 적용되는 프리캐스트 세그먼트 라이닝에 철근과 강섬유 그리고 합성섬유의 혼합비율에 따른 여러가지 경우의 프리캐스트 콘크리트 세그먼트를 제작하고 파괴시험에 의해 기초 성능 평가를 수행하였다.

## 2. 실험체 제작 및 실험방법

### 2.1 프리캐스트 콘크리트 세그먼트 실험체 제작

세그먼트 실험체는 Fig. 1과 같이 외경 3,600 mm, 내경 3,060 mm, 폭 1,000 mm, 두께 270 mm인 세그먼트 링의 A타입 세그먼트를 선정하여 제작하였으며, 하이브리드 세그먼트를 목표로 하여 실험체는 주보강재로 주철근을 적용하고, 보조보강재로 보조철근, 강섬유, 합성섬유의 조합에 따라 5가지 경우로 구분하여 제작하였다. 각각에 대해 하중재하 실험을 수행하여 세그먼트 라이닝의 각각의 보강재에 따른 보강 효과를 분석하였으며, 그 결과를 토대로 철근, 강섬유, 합성섬유 보강재의 적용성을 분석·평가하고자 하였다.

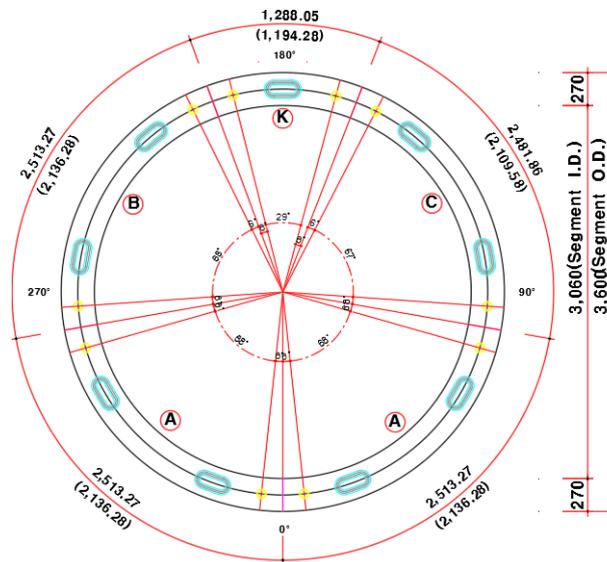


Fig. 1. Segment ring

하이브리드 세그먼트에서의 강섬유 보강재의 혼입량은 Moon et al. (2014)의 연구결과와 Lee et al. (2013)의 연구결과를 토대로  $20 \text{ kg/m}^3$ 를 기준으로 하였고, 강섬유를 대체하는 섬유보강재의 혼입량은 강섬유와 합성섬유

의 동일한 부피에 대한 무게로 산정하여 강섬유와 합성섬유의 혼입비율을 100:0, 50:50, 30:70, 0:100의 조합으로 각각 구분하여 사용하였다. 그에 따른 5가지 경우 각각의 보강재 단위무게비 조합은 Table 1에 제시하였으며, 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 제작현황은 Fig. 2와 같다.

**Table 1.** Reinforcement combination

| Case | Combination  | Steel bar               | Steel fibre          | Sythetic fibre          |
|------|--|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| # 1  | Main steel bar + additional steel bar                | 208.7 kg/m <sup>3</sup> | -                    | -                       |
| # 2  | Main steel bar + fibre (steel 100%)                  | 98.8 kg/m <sup>3</sup>  | 20 kg/m <sup>3</sup> | -                       |
| # 3  | Main steel bar + fibre (steel : synthetic = 50 : 50) | 98.8 kg/m <sup>3</sup>  | 10 kg/m <sup>3</sup> | 1.16 kg/m <sup>3</sup>  |
| # 4  | Main steel bar + fibre (steel : synthetic = 30 : 50) | 98.8 kg/m <sup>3</sup>  | 6 kg/m <sup>3</sup>  | 1.623 kg/m <sup>3</sup> |
| # 5  | Main steel bar + fibre (synthetic 100%)              | 98.8 kg/m <sup>3</sup>  | -                    | 2.32 kg/m <sup>3</sup>  |



(a) Steel bar in a segment mould



(b) Concrete pour



(c) Steam curing



(d) Concrete segment

**Fig. 2.** Fabrication of hybrid precast concrete segment

실험에서의 보강재 성능비교를 위하여 고강도 콘크리트는 적용하지 않았으며, 시멘트는 제1종 포틀랜드 제품을 사용하였고, 혼화제는 폴리카본산계 고성능 감수제를 사용하였다. 실험체 제작을 위한 콘크리트 배합 비율은 Table 2와 같다.

**Table 2.** Concrete mix proportion

| Cement                | Fine aggregate        | Gravel                  | W/C    | S/A    | AD                     | WD                      |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------|--------|--------|------------------------|-------------------------|
| 435 kg/m <sup>3</sup> | 751 kg/m <sup>3</sup> | 1,039 kg/m <sup>3</sup> | 34.7 % | 42.4 % | 4.79 kg/m <sup>3</sup> | 2,340 kg/m <sup>3</sup> |

각 배합에 대하여 굳지 않는 콘크리트의 슬럼프와 공기량을 측정하였으며, 슬럼프는 50~70 mm로 나타났다. 실험체 각 배합에 대하여 150 mm × 300 mm의 표준 공시체를 제작하였는데, 실험체는 증기양생실에서 양생되었다. 실험체의 제작에 사용된 콘크리트의 압축강도는 각 배합에 대하여 3개씩의 공시체를 제작하고 실험하였으며, 그 결과는 Table 3과 같다.

**Table 3.** Compressive strength of test pieces

(Unit: MPa)

| Case | Compressive strength (1 day) | Compressive strength (7 days) | Compressive strength (28 days) |
|------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| # 1  | 1                            | 39.3                          | 47.8                           |
|      | 2                            | 38.8                          | 46.6                           |
|      | 3                            | -                             | 42.8                           |
|      | Average                      | 42.0                          | 45.7                           |
| # 2  | 1                            | 18.0                          | 30.9                           |
|      | 2                            | 17.0                          | 32.4                           |
|      | 3                            | -                             | 30.7                           |
|      | Average                      | 17.5                          | 31.4                           |
| # 3  | 1                            | 13.4                          | 34.2                           |
|      | 2                            | 13.6                          | 33.4                           |
|      | 3                            | -                             | 33.3                           |
|      | Average                      | 13.5                          | 33.6                           |
| # 4  | 1                            | 25.7                          | 42.6                           |
|      | 2                            | 25.9                          | 41.0                           |
|      | 3                            | -                             | 36.8                           |
|      | Average                      | 25.8                          | 40.1                           |
| # 5  | 1                            | 26.2                          | 38.2                           |
|      | 2                            | 26.5                          | 36.9                           |
|      | 3                            | -                             | 35.1                           |
|      | Average                      | 26.4                          | 36.7                           |

## 2.2 합성섬유 보강재

기존의 폴리프로필렌(Polypropylene) 재질의 합성섬유는 비구조재료로서 콘크리트 제작시 혼입되어 화재에 의한 폭발에 대한 대책방안으로 사용되었으나, 최근에는 인장강도 등의 물성을 향상시키고 표면의 엠보싱

(Embossing)을 통한 마찰력과 밀착력을 증대시킨 구조재료로서의 합성섬유가 개발되어 적용되고 있다.

본 연구에서 사용한 합성섬유 보강재는 폴리프로필렌 재질로서 Fig. 3에 보이는 바와 같이 표면에 엠보싱 처리를 하여 콘크리트 내부에서 마찰력을 증가시켰으며, 밀도와 인장강도 등의 물성과 특징은 Table 4에 나타내었다.



Fig. 3. Synthetic fibre

Table 4. Characteristic and properties of systhetic fibre

|                                |                        |
|--------------------------------|------------------------|
| Shape                          | Embossed type          |
| Base material                  | Polypropylene(PP)      |
| Density                        | 0.91 g/cm <sup>3</sup> |
| Tensile strength               | 500 MPa and above      |
| Young's modulus                | 7,000 ~ 10,500 MPa     |
| Melting point                  | 160 ~ 165°C            |
| Length                         | 48 mm                  |
| Diameter converted in circular | 0.7 mm                 |

### 2.3 실험방법

실험체의 휨 성능 평가를 위한 구조실험은 1,000 kN 용량의 가력기를 이용하여 파괴 시까지 변위제어(1.0 mm/min) 방법의 정적실험으로 수행되었으며, 순수 휨모멘트에 따른 실험체의 구조적 거동을 파악하기 위해 4점 휨 실험으로 수행되었다.

본 연구에서는 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 하중-변이 거동을 분석하였다. 이를 위하여 하중은 폭 100 mm의 하중 재하판을 사용하여 실험부재의 폭 방향으로 일정하게 분포시켰으며, 400 mm 간격의 두 지점에 재하하였으며, 수직변위는 실험체의 중앙부 앞, 뒤에 LVDT (L1, L2)를 설치하여 측정하였다.

실험체의 균열폭은 5 mm 용량의 전기식 균열폭 게이지(CR1~CR3)를 설치하여 측정하였으며, 최대 휨모멘트

구간인 실험체 중앙부 및 하중 재하위치 부근에 설치하였다.

콘크리트의 변형률은 콘크리트 변형률 게이지(C1~C3)를 설치하여 측정하였으며, 하중재하에 따른 균열 진전 및 중립축 변화 등을 파악하기 위해 실험체의 높이 방향으로 설치하였다. 구조실험 전경 및 각각의 측정위치는 Fig. 4와 같으며, 실험 전과 후의 전경과 실험 후 세그먼트의 균열현황은 Fig. 5와 같다.



Concrete gage: C1, C2, C3      Crack gage: CR1, CR2, CR3      LVDT: L1, L2

Fig. 4. View of segment and gages before bending test

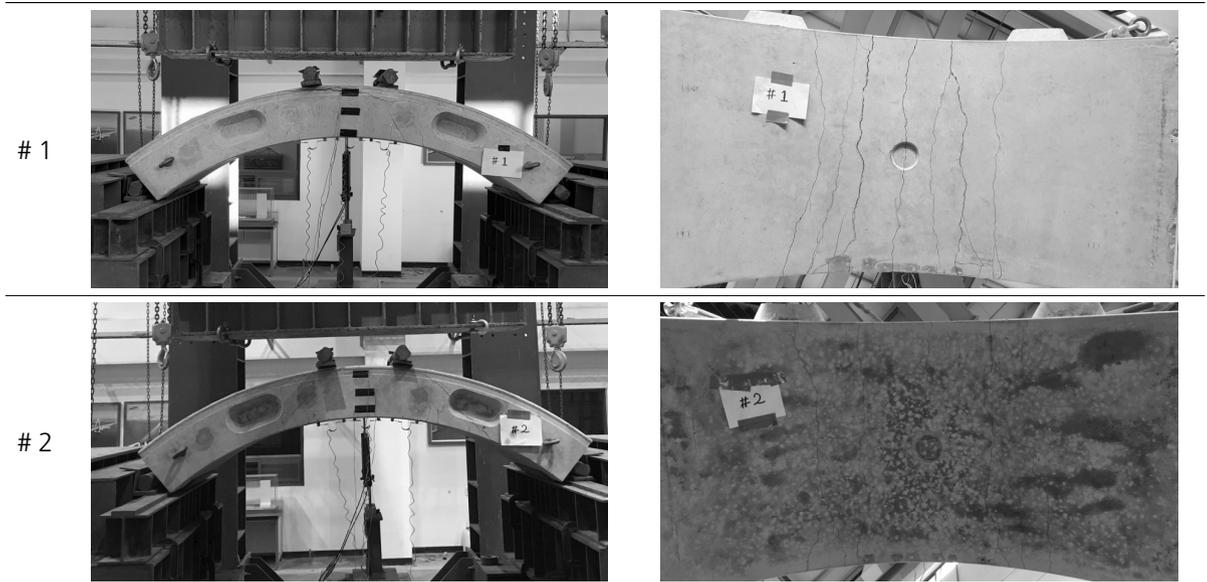


Fig. 5. Failures of tested segments

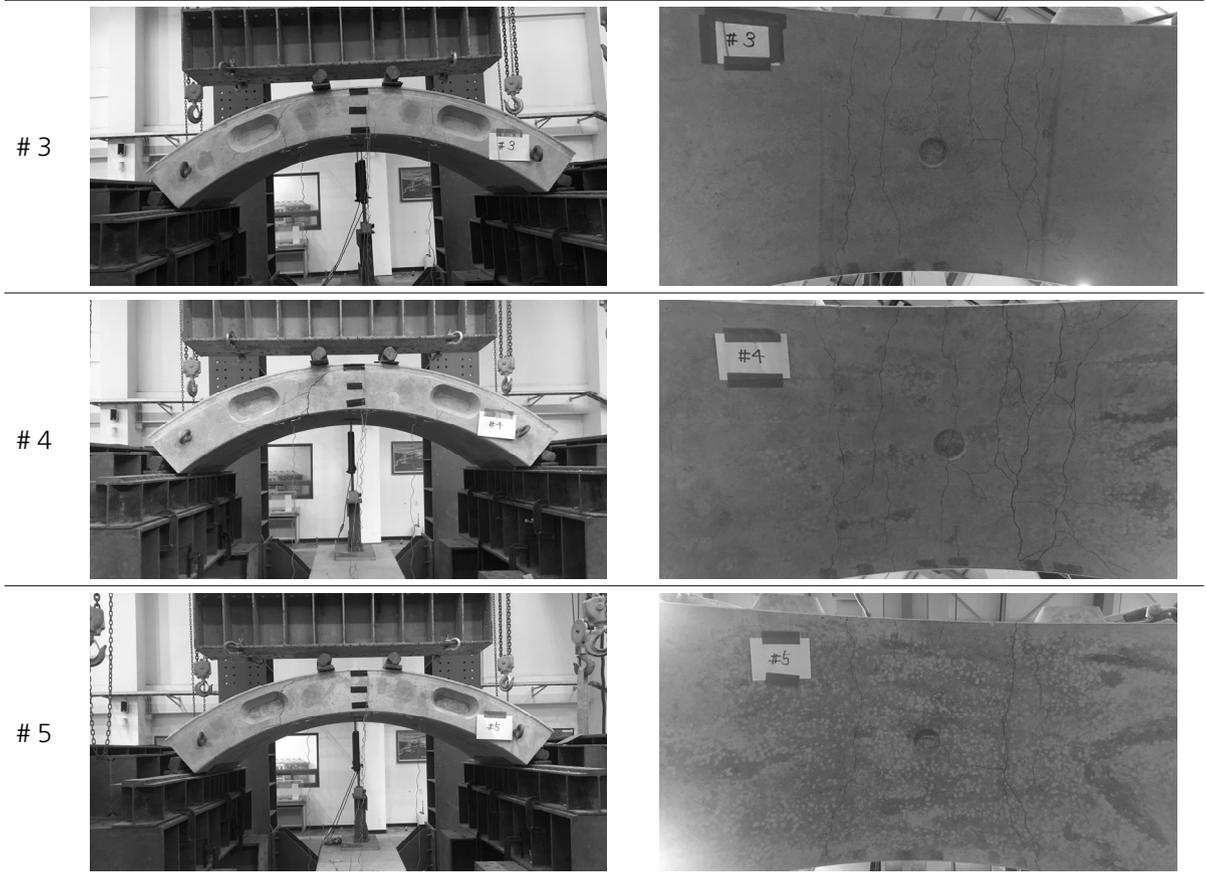


Fig. 5. Failures of tested segments (continue)

## 4. 실험 결과

프리캐스트 콘크리트 세그먼트 실험체의 휨실험 결과에 대해 기술하였으며, 검토 내용은 균열발생 하중과 파괴하중, 섬유보강재 보강에 의한 연성 효과, 각 보강재 조합들 간의 비교 결과 등이다.

### 4.1 보강재 조합에 따른 하중-변형과 균열발생 분석

#### 4.1.1 Case #1

철근( $208.7 \text{ kg/m}^3$ )으로만 보강된 세그먼트(Case #1)에 대한 휨실험 결과 하중-변형 관계 그래프는 Fig. 6과 같으며, 재하하중 약 400 kN 근방부터 연성거동을 보이며, 큰 변위가 발생하는데 이는 연성재료인 보강철근의 영향이 큰 것으로 판단된다. 균열발생은 재하하중 24.8 kN에서 0.01 mm, 74.3 kN에서 0.02 mm, 131.6 kN에서 0.1 mm가 발생하여 진행되었고, 세그먼트 파괴가 일어난 최대하중 477.9 kN 조건에서 최대 2.32 mm의 균열이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 7).

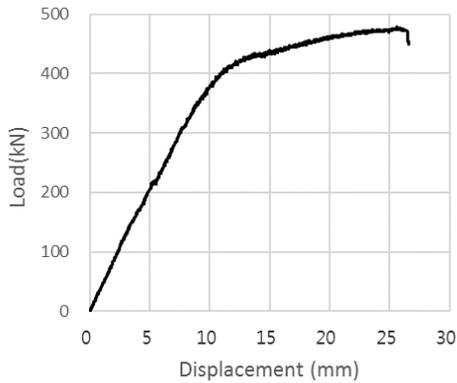


Fig. 6. Load-displacement curve of case #1

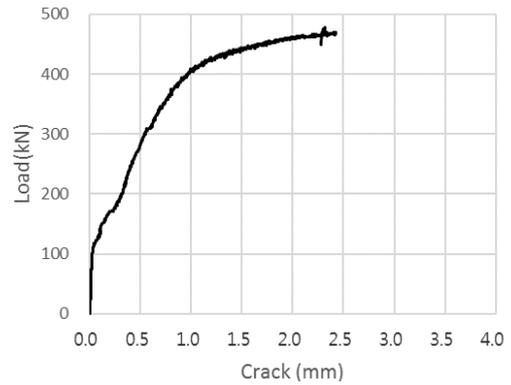


Fig. 7. Load-crack curve of case #1

#### 4.1.2 Case #2

주철근( $98.8 \text{ kg/m}^3$ )과 강섬유( $20 \text{ kg/m}^3$ )로 보강된 세그먼트(Case #2)에 대한 휨실험 결과 하중-변형 관계 그래프는 Fig. 8과 같으며, 최대 하중은  $346.0 \text{ kN}$  재하된 것으로 나타났으며, 파괴이후에 강섬유 보강효과로 인한 연성거동을 보이며 변위는 최대  $15.5 \text{ mm}$ 가 발생하는 것으로 나타났다. 균열발생은 재하하중  $26.2 \text{ kN}$ 에서  $0.01 \text{ mm}$ ,  $101.0 \text{ kN}$ 에서  $0.1 \text{ mm}$ 가 나타났고, 최대 균열은 재하하중  $334.7 \text{ kN}$ 에서  $0.68 \text{ mm}$ 가 발생하였다(Fig. 9).

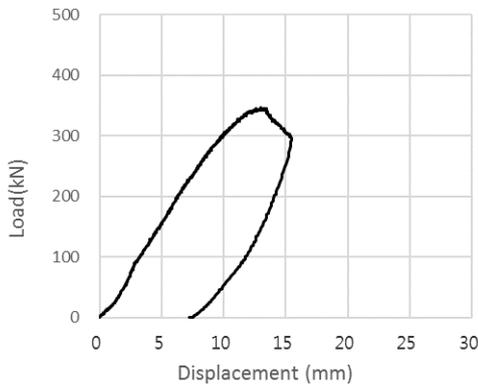


Fig. 8. Load-displacement curve of case #2

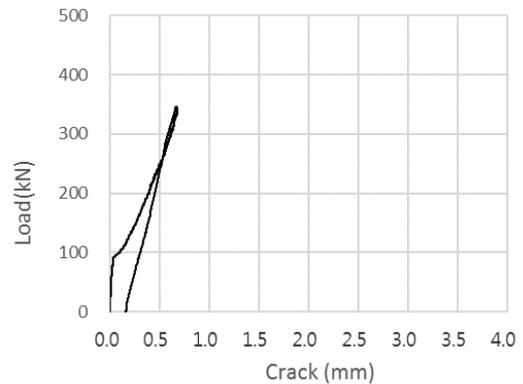


Fig. 9. Load-crack curve of case #2

#### 4.1.3 Case #3

주철근( $98.8 \text{ kg/m}^3$ )과 강섬유( $10 \text{ kg/m}^3$ ) 그리고 합성섬유( $1.16 \text{ kg/m}^3$ )로 보강된 세그먼트(Case #3)에 대한 휨실험 결과 하중-변형 관계 그래프는 Fig. 10과 같으며, 최대하중은  $413.2 \text{ kN}$  재하된 것으로 나타났으며, 변위는 최대  $13.5 \text{ mm}$  발생하는 것으로 나타났다. 균열발생은 재하하중  $41.1 \text{ kN}$ 에서  $0.01 \text{ mm}$ ,  $169.8 \text{ kN}$ 에서  $0.1 \text{ mm}$ 가 나타났고, 세그먼트 파괴하중인 최대  $413.2 \text{ kN}$  실험 후  $2.83 \text{ mm}$ 가 나타났으며, 이후 증가하여 최대 균열이  $3.59 \text{ mm}$  발생한 것으로 나타났다(Fig. 11).

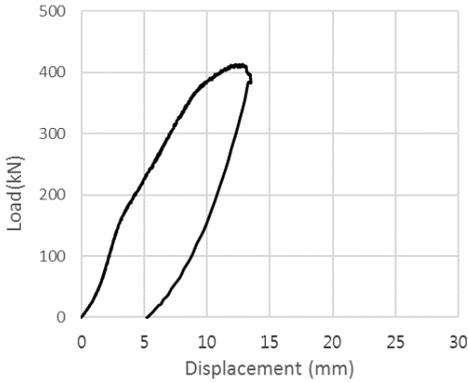


Fig. 10. Load-displacement curve of case #3

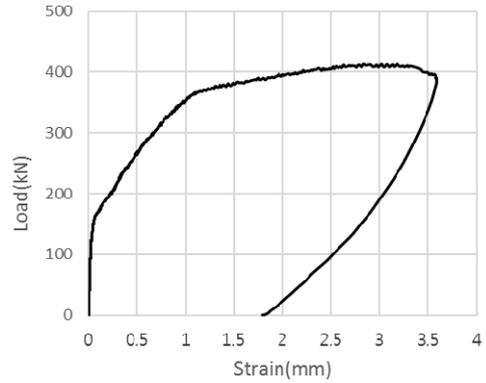


Fig. 11. Load-crack curve of case #3

#### 4.1.4 Case #4

주철근( $98.8 \text{ kg/m}^3$ )과 강섬유( $6 \text{ kg/m}^3$ ) 그리고 합성섬유( $1.623 \text{ kg/m}^3$ )로 보강된 세그먼트(Case #4)에 대한 휨 실험 결과 하중-변형 관계 그래프는 Fig. 12와 같으며, 세그먼트 파괴가 발생한 이후 연성거동 형태를 보이다가 변위는 최대 21 mm가 발생하는 것으로 나타났다. 균열발생은 재하하중 34.1 kN에서 0.01 mm, 137.4 kN에서 0.1 mm가 나타났고, 최대하중 433.4 kN 조건에서 균열발생이 0.72 mm 발생하는 것으로 나타났으며, 이후 395.2 kN 실험 후 최대 균열 0.79 mm가 발생하였다(Fig. 13).

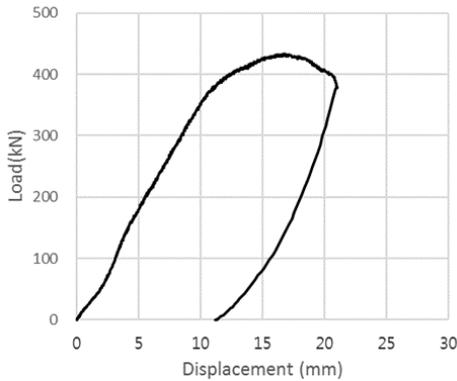


Fig. 12. Load-displacement curve of case #4

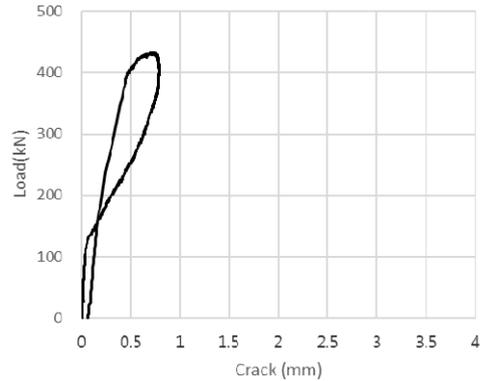


Fig. 13. Load-crack curve of case #4

#### 4.1.5 Case #5

주철근( $98.8 \text{ kg/m}^3$ )과 합성섬유( $2.32 \text{ kg/m}^3$ )만으로 보강된 세그먼트(Case #5)에 대한 휨 실험 결과 하중-변형 관계 그래프는 Fig. 14와 같으며, 세그먼트 파괴가 발생한 이후 연성거동 형태를 보이다가 변위는 최대 13.63 mm가 발생하는 것으로 나타났다. 균열발생은 재하하중 39.4 kN에서 0.01 mm, 183.3 kN에서 0.1 mm가 나타났고, 360.4 kN 실험 후 최대 균열 0.98 mm가 발생하였다(Fig. 15)

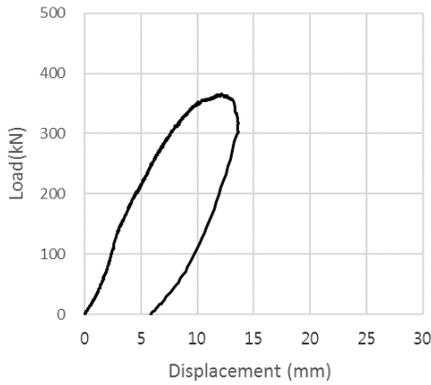


Fig. 14. Load-displacement curve of case #5

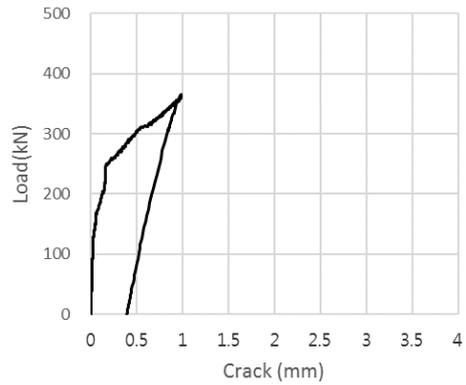


Fig. 15. Load-crack curve of case #5

#### 4.2 보강재 조합에 따른 결과 비교분석

본 연구에서는 보강재의 보강효과 평가를 위해 콘크리트 제작시 강도 증가를 위한 노력은 제외하였으며, 그로 인해 콘크리트 실험체 강도의 오차가 발생하였다. 파괴 실험시 작용한 최대 재하하중과 공시체의 압축강도를 비교한 결과 일정부분 연관성이 있음을 확인하였으며, 평균 압축강도와 파괴실험시 최대 재하하중과의 관계 그래프는 Fig. 16과 같다.

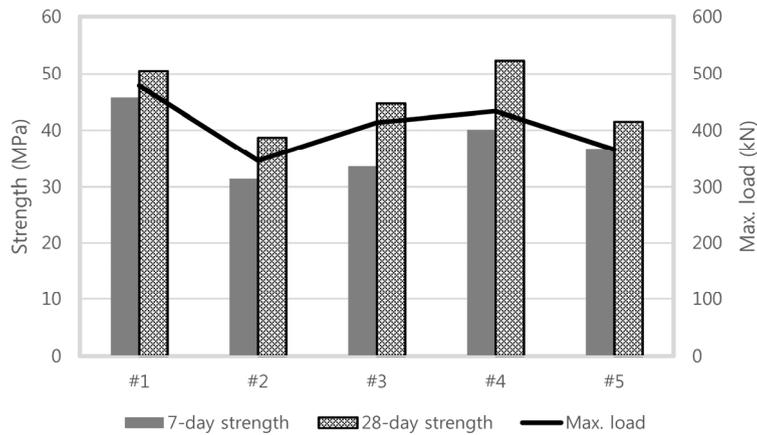


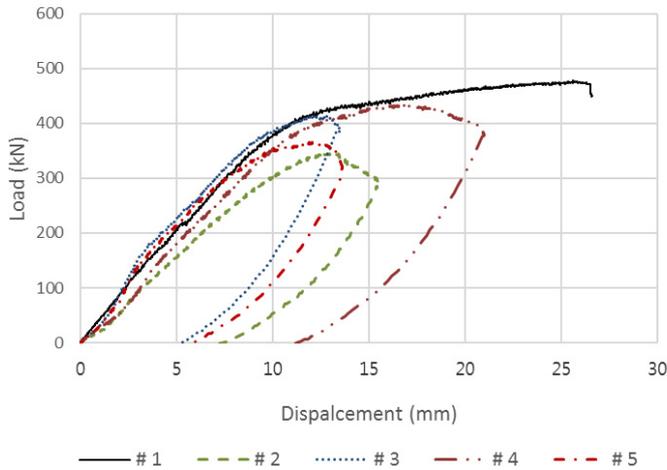
Fig. 16. Strength-max load curve of cases

여기서 철근만으로 보강했을 경우에 비해 섬유 보강했을 경우의 압축강도 대비한 파괴 최대 하중을 상대적 관점에서 비교해 보면 Table 5에 나타난 바와 같이 그 차이가 크지 않아 섬유보강재의 보강효과도 상대적으로 비슷한 것으로 추정할 수 있다.

**Table 5.** Relative of between average compressive strength of test piece and maximum load

| Case | 7-day strength (MPa) | 28-day strength (Mpa) | Max. load (kN) | Max. load / 7-day strength | Max. load / 28-day strength |
|------|----------------------|-----------------------|----------------|----------------------------|-----------------------------|
| # 1  | 45.7                 | 50.5                  | 477.9          | 10.5                       | 9.5                         |
| # 2  | 31.4                 | 38.7                  | 346.0          | 11.0                       | 8.9                         |
| # 3  | 33.6                 | 44.7                  | 413.3          | 12.3                       | 9.2                         |
| # 4  | 40.1                 | 52.3                  | 433.4          | 10.8                       | 8.3                         |
| # 5  | 36.7                 | 41.5                  | 365.7          | 10.0                       | 8.8                         |

보강재 조합에 따른 각각의 특성을 비교하기 위하여 모든 조합에 따른 하중-변형 관계 그래프를 Fig. 17에 나타내었다.



**Fig. 17.** Comparison of load-displacement curve among the cases

철근만으로 보강한 세그먼트 실험체가 다른 조합보다도 파괴하중이 크게 나타났으나, 주철근과 섬유보강을 조합한 경우도 공시체 강도를 고려하였을 때 보강효과가 버금가는 수준으로 나타남을 알 수 있다. 특히 주철근과 섬유보강(강섬유:합성섬유 = 30:70)인 Case #4의 경우 섬유보강 조합이 보조철근을 충분히 대체 가능한 것으로 분석되었다.

Fig. 18에 나타난 전체 조합의 하중-균열 관계 그래프를 보면 철근만으로 보강한 세그먼트 실험체에 비교하여 Case #3의 경우가 매우 의미있는 결과를 보이고 있다. 더불어 Case별로 균열발생 하중 그래프를 Fig. 19에 나타내었다. 균열이 발생하는 하중-균열 관계 경향과 균열 하중의 상대적 비교분석 결과, 섬유보강이 적용된 경우, 특히 강섬유와 합성섬유가 혼합된 Case #3과 #4의 경우 매우 우수한 균열억제 효과가 있는 것으로 나타났다.

앞서 언급한 하중-변형 관계와 하중-균열 관계 그리고 균열발생 하중 추세를 종합하여 볼 때 보조철근을 배제

하고 섬유보강재에 의한 콘크리트 세그먼트가 충분히 구조적 안정성을 확보 할 수 있을것으로 판단된다. 특히 섬유보강재의 조합 즉, 강섬유와 합성섬유 보강을 “50:50”이나 “30:70”으로 조합한 경우가 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 균열억제 및 보강 성능을 확보하는 데 안정적인 배합으로 판단된다.

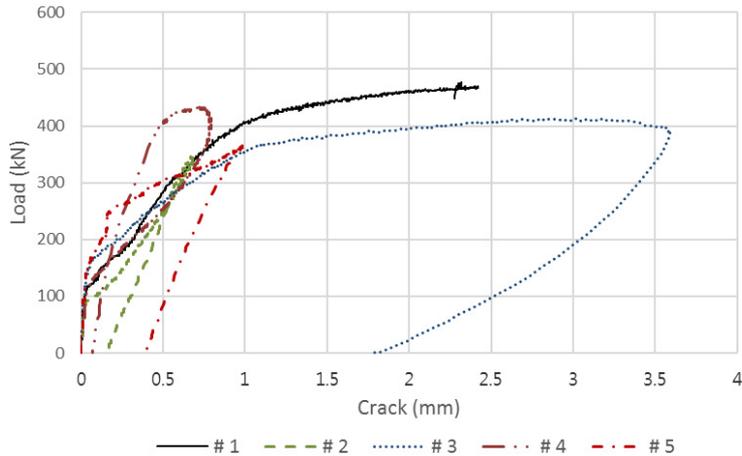


Fig. 18. Comparison of load-crack curve among the cases

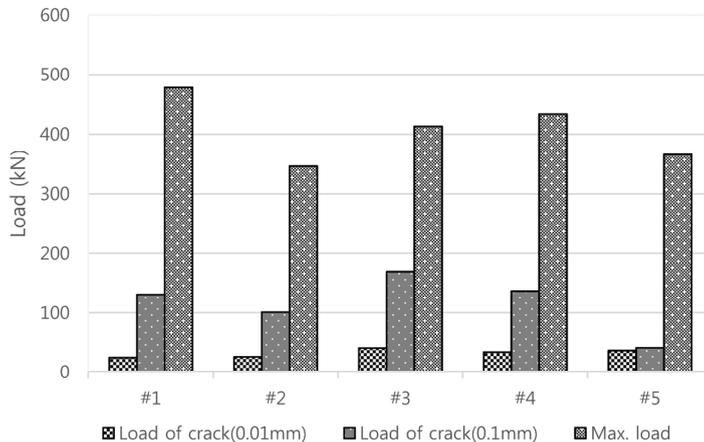


Fig. 19. Comparison of cracking load among the cases

## 5. 결론

본 연구에서는 실드 TBM 터널에서의 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 보강재로 주철근과 보조철근, 주철근과 섬유보강재(강섬유), 주철근과 섬유보강재(강섬유:합성섬유 = 50:50), 주철근과 섬유보강재(강섬유:합성섬유 = 30:70), 주철근과 섬유보강재(합성섬유)로 조합된 경우의 실험체를 제작하고, 하중재하에 의한 파괴실험을 통하

여 섬유보강재(강섬유 및 합성섬유)의 보강효과를 분석하였다. 이로부터 도출된 주요한 결과에 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 실험체의 압축강도에 대비한 파괴 최대 하중을 상대적 관점에서 비교한 결과 그 상대적 차이가 미미하여 섬유 보강재의 보강효과가 보조철근과 비슷한 것으로 분석되었다. 특히 보조보강재로 강섬유와 합성섬유를 30:70으로 혼합한 Case #4의 최대하중이 철근만으로 보강한 Case #1의 90.7% 수준으로 충분히 보조철근을 대체 가능한 것으로 판단된다.
2. 강섬유나 합성섬유 보강시 콘크리트의 균열제어 및 취성파괴 특성이 개선되는 효과가 있는 것으로 알려져 있는데, 콘크리트의 연성효과를 증가시켜 세그먼트의 운반이나 적재 혹은 조립 시공시 모서리의 부분 파손 등에 대한 예방효과가 클 것으로 판단된다. 본 연구의 실험에서는 균열발생 하중을 각 조합들과 비교해 본 결과 강섬유와 합성섬유를 혼합한 Case #3과 #4의 경우가 균열억제 효과가 큰 것으로 나타났다.
3. 본 연구에서는 하이브리드 세그먼트의 합성섬유의 혼입량을 기존의 연구나 국내사례 결과인 강섬유 혼입량  $20 \text{ kg/m}^3$ 을 참고하여 부피비로 환산하여  $2.32 \text{ kg/m}^3$ 을 적용하였으나, 해외사례의 경우는 2.155배에 해당하는  $5 \text{ kg/m}^3$ 을 적용하였음에 비취볼 때, 본 실험체의 합성섬유 혼입량은 부족한 것으로 판단할 수 있다. 그러므로 향후 섬유보강재의 혼입량에 따른 배합 Case에 의한 실험 및 분석을 한다면 합성섬유가 적용된 최적의 하이브리드 콘크리트 세그먼트의 개발이 가능할 것으로 판단된다.
4. 이 실험을 진행하면서 프리캐스트 콘크리트 세그먼트의 제작에 따른 품질관리가 원할치 못해 각각 실험체의 압축강도가 균일하지 못하였고, 강섬유와 합성섬유의 상대적 부피비에 의한 배합만을 적용하였다. 특히 합성섬유의 혼입량을 좀더 세분화 시키고, 해외 사례를 참조하여 많은 경우의 수를 만들어 실험을 한다면, 현장에 적용 가능한 의미있는 결과를 도출 할 수 있을 것으로 판단된다.
5. 향후 과제로는 이러한 강섬유 및 합성섬유 보강재를 적용한 세그먼트 라이닝의 설계 적용을 위한 구조적 해석과 설계기준 마련에 대한 연구가 필요할 것으로 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

## References

1. Chang, S.H., Lee, G.P., Choi, S.W., Bae, G.J. (2011), “State of the art of segment lining in shield tunnel and statistical analysis of its key design parameters”, Tunnel and Underground Space, Vol. 21, No. 6, pp. 427-438.

2. Chiaia, B., Fantilli, A.P., Vallini, P. (2009), "Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings", *Engineering Structures*, Vol. 31, No. 7, pp. 1600-1606.
3. Dobashi, H., Konishi, Y., Nakayama, M., Matsubara, K. (2006), "Development of steel fiber reinforced high fluidity concrete segment and application to construction", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 21, No. 3-4, pp. 422.
4. Fuente, A., Pujadas, P., Balanco, A., Aguado, A. (2012), "Experiences in Barcelona with the use of fibers in segmental linings", *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 27, No. 1, pp. 60-71.
5. Lee, G.P., Bae, G.J., Moon, D.Y., Kang, T.S., Chang, S.H. (2013), "Evaluation of steel fiber reinforcement effect in Segment lining by full scale bending test", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 215-223.
6. Moon, D.Y., Roh, H.S., Chang, S.H., Lee, G.P., Bae, G.J. (2014), "Performance evaluation of SFRC for tunnel segments based on large beam test", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 3, pp. 287-298.
7. Rivaz, B. (2008), "Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining", *Proceedings of the World Tunnel Congress 2008 Underground Facilities for Better Environment and Safety-India, Agra*, pp. 2007-2017.
8. Tiberti, G., Plizzari, G.A., Walraven, J.C., Blom, C.B.M. (2008), *Concrete tunnel segments with combined traditional and fiber reinforcement*, *Taylor Made Concrete Structures*, Taylor & Francis Group, pp. 199-205.