

강섬유 보강재와 합성섬유 보강재를 사용한 세그먼트 라이닝의 구조적 성능 비교

서상연, 하희상, 이상필 (GS건설기술연구소 첨단건설연구팀)
황한식 (육군사관학교 토목환경공학과)

1. 서론

세그먼트 라이닝의 보강재로 주로 철근이 사용되어 왔으나 섬유보강재를 이용하여 철근을 대체하거나 철근 보강량을 줄이는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 섬유 보강재는 콘크리트 내부에서 균일하게 분포하여 구조적 성능을 보강하며 철근 조립에 걸리는 시간을 줄여 시공성을 높일 수 있는 장점이 있다. 터널 라이닝이 구조체로 거동하는 세그먼트 라이닝의 설계에 있어 콘크리트의 역학적 특성은 매우 중요하다. 현재 섬유보강 콘크리트를 이용한 세그먼트 라이닝 설계 시 디자인 코드에서 제시하는 물성실험을 통해 설계 변수를 결정하게 되어 있으나 구조체 안에서 전영역에 걸쳐 분포하는 섬유보강재의 특성을 파악하는 것은 쉽지 않다. 최근 철강재의 가격 상승과 강섬유의 내구성 문제로 인하여 합성섬유 (Macro-synthetic fiber)가 강섬유의 대체재로 주목을 받고 있다. 이 논문에서는 섬유(강섬유, 합성섬유) 보강재를 사용한 콘크리트의 물성실험을 통하여 역학적 특징을 살펴보고 실제 사례와 비교하여 강섬유 보강재와 합성섬유 보강재의 보강 성능을 비교하였다.

2. 실험 개요

2.1. 콘크리트 배합

공시체 제작을 위한 콘크리트 배합 비율은 표 1과 같으며, 이는 미국 시애틀 브라이트워트 하수터널 (Brightwater Tunnel) 프로젝트의 시험 배합과 동일하다. 브라이트워트 하수터널은 미국 워싱턴주의 King county와 Snohomish county를 연결하는 유틸리티 터널로써 길이 20.8 km, 직경 5.25 m의 기계화시공 터널이며 철근보강재를 사용하지 않고 강섬유 보강재만을 사용한 프리캐스트 세그먼트 라이닝을 적용하였다. 콘크리트 배합은 텀블러 믹서를 사용하여 한 배치당 0.1 m³씩 배합되었으며 공시체는 The University of Texas at Austin의 J. J. Pickle Research Center에서 제작되었고 28일 양생 후 압축강도와 휨강도 시험을 실시하였다.

표 1. 콘크리트 배합 비율

시멘트 (kg/m ³)	341
잔골재 (kg/m ³)	872
굵은골재 (kg/m ³)	1080
감수제 (ml/시멘트100kg)	350
w/c	0.35

2.2. 시험 공시체 제작

시험 공시체는 섬유보강재가 없는 무근 콘크리트와, 강섬유 보강 콘크리트, 합성섬유 보강 콘크리트(합성섬유 A, 합성섬유 B)로 크게 구분하였고 합성섬유 보강 콘크리트 공시체는 섬유 혼입량을 달리한 두 종류를 준비하였다. 강섬유 보강재는 브라이트워터 터널에서 사용된 것과 동일한 것으로 물성은 표 2에 나타내었다. 공시체에 사용된 두 종류의 합성섬유 모두 폴리프로필렌계로 기본 물성은 비슷하나 합성섬유 B의 경우 합성섬유 A보다 단면이 두껍고 표면에 엠보싱 처리를 하여 콘크리트 안에서의 표면 마찰력을 증가시킨 것이 특징이다.

강섬유 혼입량은 브라이트워터 터널에서 사용된 양과 동일(41.5 kg/m³)하며 합성섬유 혼입량은 5.9 kg/m³과 11.8 kg/m³을 채택하였다 (표 3). 시험 공시체는 각 시험군마다 압축강도 시험 공시체 세 개, 휨강도 시험 공시체 세 개씩 제작하였다. 압축강도 시험 준비 및 수행은 ASTM C39를 따랐으나 섬유 보강재의 길이에 의한 영향을 최소화하기 위해 공시체를 100mm x 200mm 대신 150mm x 300mm로 제작하였다. 휨강도 시험은 ASTM C1609를 따랐으며 150mm x 150mm x 500mm 크기의 공시체를 사용하였다.

표 2. 공시체에 사용된 섬유보강재의 종류와 특징

구분	강섬유	합성섬유A	합성섬유B
단면 형태 및 특징	hooked ends	표면 매끈	표면 엠보싱
재료	강철	폴리프로필렌	폴리프로필렌
길이 및 크기	L=60mm, d=0.75mm	L=50mm, 단면 0.2mm x 1.4mm	L=50mm, 단면 0.5mm x 1.4mm
인장강도	1,035 MPa	550 ~ 580 MPa	550 MPa
탄성계수	200 GPa	6 GPa	6 GPa

표 3. 압축강도 및 휨강도 시험에 사용된 공시체의 섬유 혼입량

구분	섬유 혼입량 (kg/m ³)		
	강섬유	합성섬유A	합성섬유B
PC	0	0	0
RC-SF	41.5	0	0
RC-MF-A-1	0	5.9	0
RC-MF-A-2	0	11.8	0
RC-MF-B-1	0	0	5.9
RC-MF-B-2	0	0	11.8

3. 압축강도 시험 및 휨강도 시험

3.1. 시험 결과

압축강도 시험 및 휨강도 시험의 결과를 표 4에 나타내었다. 모든 공시체의 28일 최대 압축강도는 55.7 MPa 이상이었고 이는 브라이트워터 터널의 28일 압축강도 기준인 51 MPa를 만족시키는 수치이다. 압축강도 결과를 비교해 보면 섬유보강재가 들어가더라도 압축강도가 크게 증가하지는 않았다. 그러나 섬유 혼입량이 증가하면 (RC-MF-A-1 → RC-MF-A-2, RC-MF-B-1 → RC-MF-B-2) 압축강도도 약간 상승하는 경향을 나타냈다.

휨강도 시험 결과 최대 휨강도(f_{t1})는 무보강 공시체보다 섬유보강 공시체에서 대체로 크게 나타났으나 RC-MF-A-2의 경우 섬유 혼입량이 증가하면서 최대 휨강도는 오히려 낮게 나타났다. 이는 과도한 섬유 혼입량이 콘크리트 매트릭스와 섬유간의 마찰 저항을 감소시키고 콘크리트 내부의 결합력을 감소시켜 최대 휨강도가 낮아진 것으로 보인다. 무보강 공시체(PC)의 경우 최대 휨강도에 도달하자마자 취성파괴를 일으켜 잔류 휨강도 (f_{150}^D , 시편 중앙의 3 mm처짐 발생 시의 휨강도)가 측정되지 못했다. 잔류 휨강도는 섬유 혼입량에 비례하여 증가하는 경향을 보였으며 RC-MF-A보다 RC-MF-B의 잔류 휨강도 증가폭이 큰 것을 알 수 있다. 섬유 혼입량이 5.9 kg/m³였을 때는 잔류 휨강도의 크기가 비슷하나 섬유 혼입량이 11.8 kg/m³로 증가한 경우 잔류 휨강도 B를 사용한 샘플의 휨강도는 두 배 이상 증가하였다. 이는 합성섬유B를 타 섬유 혼입량 증가에 따른 균열 후 휨저항성 증가가 우수한 것으로 나타났다.

표4. 시험 결과

구분	평균 압축강도	평균 휨강도	
	f_{cp} (MPa)	f_{t1} (MPa)	f_{150}^D (MPa)
PC	56.1	5.1	-
RC-SF	57.1	5.7	5.2
RC-MF-A-1	55.7	6.2	2.9
RC-MF-A-2	58.9	4.9	3.8
RC-MF-B-1	52.3	5.6	2.4
RC-MF-B-2	61.9	5.6	5.3

3.2. 시험 결과 분석

그림 1은 휨강도 시험의 강도-처짐 곡선 및 브라이트워터 터널의 세그먼트 라이닝 휨강도 기준을 나타내고 있다. 브라이트워터 터널에서 사용된 강섬유 보강 라이닝의 휨강도 시방에 따르면 시편에서 첫 균열이 생길 때의 최대 휨강도가 4.4 MPa 이상이고 휨강도 시편의 중앙부 처짐이 0.75 mm 이상일 때 휨강도 곡선의 모든 포인트가 3.3 MPa 이상이어야 한다. 그러므로 그림 1에 나타난 바와 같이 강섬유 보강 샘플 RC-SF의 경우 위에서 언급된 조건을 모두 만족하나 합성섬유 혼입량이 5.9 kg/m³인 RC-MF-A-1과 RC-MF-B-1은 브라이트워터 터널에서 요구하는 휨강도 성능을 만족시키지 못하는 것으로 나타났다. 합성섬유 혼입량을 두배로 늘린 경우 브라이트워터 터널의 기준을 만족시킬 수 있으나 과도한 섬유 혼입량으로 인한 작업성 저하 및 최대 휨강도 감소

등의 부작용에 주의하여야 한다. 또한 합성섬유 혼입량을 늘려 구조적 성능을 만족시킨다 하더라도 최대 휨 강도에 도달하여 첫 휨균열이 발생한 후의 거동 양상이 강섬유 보강 콘크리트와는 확연히 다르므로 주의하여야 한다.

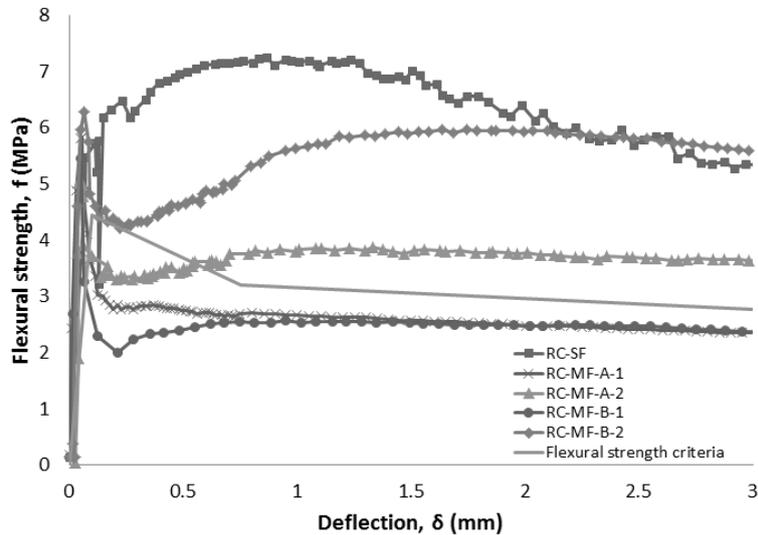


그림 1. 휨강도 시험 결과

4. 결론

본 연구는 강섬유와 합성섬유를 사용한 섬유보강 콘크리트의 구조적 성능을 비교하고 실제 강섬유보강 세그먼트 라이닝의 구조적 기준을 바탕으로 무근 섬유보강 콘크리트의 압축 및 휨강도의 특성을 살펴보았다. 강섬유보강 콘크리트의 경우 41.5 kg/m^3 의 혼입량으로 브라이트워터 터널의 압축 및 휨강도 기준을 만족시켰으나 합성섬유보강 콘크리트는 혼입량 9.5 kg/m^3 일 때 휨강도 기준을 만족시키지 못했다. 혼입량을 두배로 늘린 합성섬유보강 콘크리트의 경우 휨강도 기준을 만족시킬 수 있었으나 과도한 섬유 혼입량으로 인하여 시공성이 급격히 저하될 우려가 있다. 그러므로 합성섬유 보강재를 세그먼트 라이닝의 구조 보강재로 사용하기 위해서는 충분한 구조적 강도를 발휘하면서도 시공성을 저하시키지 않는 혼입량을 찾아야 한다. 또한 압축 및 휨강도 뿐만 아니라 휨인성과 균열저항성 등 섬유보강재가 철근보강재에 비해 지니는 장점을 극대화할 수 있는 연구가 필요하다.

참고 문헌

1. ASTM C39-05 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimen
2. ASTM C1609-07 Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete (using beam with third point loading)