

인장부에 강섬유 보강 콘크리트가 부분적으로 대체된 보의 반복하중 거동

Behavior under repeated loads of beam partially superseded with steel fiber reinforced concrete in tension part

박 대 효* 박 재 민**
Park, Taehyo Park, Jaemin

ABSTRACT

In this study, dual composites concrete beam(DCC beam) partially superseded with steel fiber reinforced concrete in tensional part and normal strength concrete in compressive and remaining part is proposed. Based on flexural test under static loads, structural behaviors under repeated loads are investigated.

1. 서론

낮은 인장 강도, 인장 변형률, 취성 파괴와 같은 콘크리트의 결함을 개선하기 위한 방안으로 강, 유리, 석면, 합성(e.g. 폴리프로필렌, 카본) 그리고 천연(e.g. 셀룰로오스) 섬유 등이 오랫동안 적용되어오고 있다. 이처럼 보강 재료 섬유를 포함한 콘크리트는 섬유보강 콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)로 명명 된다¹⁾. 섬유를 콘크리트에 보강함으로써 얻을 수 있는 효과로는 여러 연구자들에 의해 오랫동안 연구되어왔다. 전단 파괴에 대한 효율적인 보강²⁾, 피로³⁾와 충격⁴⁾에 대한 저항 성능 향상, 균열 저항과 인성 향상⁵⁾에 대한 영향 등이 섬유 첨가를 통한 효과로 보고 되었다. 특히, 콘크리트 내에서 발생하는 균열을 연결하고, 미시 및 거시 균열로 하중을 전달하는 교량역할을 통한 콘크리트 균열 후 연성 능력 향상은 섬유 보강의 가장 중요한 특징이다.

이러한 FRC의 뛰어난 성능 발현으로 전통적인 일반 철근 콘크리트 보(Rinforced Concrete beam, RC beam)에 섬유를 적용하려는 여러 시도들이 많은 연구자들에 의해 시도되어왔다. Lim et al.⁶⁾은 강섬유 보강 콘크리트 보(Steel Fiber Reinforced Concrete beam, SFRC beam)에 대한 휨 실험 및 해석을 통한 휨 강성 및 극한 하중 증가 결과를 보였다. Furlan and de Hanai⁷⁾는 전단 하중을 받는 부재에 FRC를 적용함으로써 섬유 보강을 통한 균열의 진전 억제와 전단 강도 및 연성 향상에 대한 영향력을 보였다. 또한 Kormeling et al.³⁾은 여러 가지 형상의 강섬유를 보강한 보에 피로 실험을 실시함으로써 섬유 보강을 통해 피로 수명의 연장과 처짐 및 균열 폭의 감소에 효과가 있음을 입증하였다.

그러나 섬유의 가격이 고가라는 제약 때문에 이러한 섬유보강 콘크리트 보의 실질적인 적용은 거의 없는 실정이다. 그런데 Gunasekaran⁸⁾이 단면의 인장부에 FRC를 적용한 휨 부재를 제안한 이후 몇몇 연구자들에 의한 연구 결과들은 인장부에만 부분적으로 섬유 보강 콘크리트를 적용한 보의 전 단면에 섬유 보강 콘크리트를 적용한 보와 거의 유사하게 구조적으로 거동함을 보였다^{9, 10)}. 그런데, 이러한 연구 결과는 휨 거동에만 국한되어

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 부교수

** 정회원, 한양대학교 대학원

반복 및 피로 하중에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 단면의 압축부에는 보통 강도 콘크리트(Normal Strength Concrete, NSC)를 적용하고 인장부에 부분적으로 강섬유 보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete, SFRC)를 대체한 이중 합성 콘크리트 보(Dual Composite Concrete beam, DCC beam)를 제안하고 단조하중 재하 실험의 결과를 바탕으로 반복 하중을 받는 DCC 보의 구조 성능과 인장부의 강섬유 보강 대체 높이를 달리함으로써 인장부 강섬유 보강 콘크리트 대체 높이에 따른 효과를 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 실험시편

본 연구에서는 일정한 휨 인장 철근비 $\rho = 0.45 \rho_b (D_{29} \times 3, A_s = 19.27 \text{ cm}^2)$ 에 대해서 인장부에 강섬유 보강 적용 높이를 달리한(130, 170mm) 폭 30cm × 높이 50cm 크기인 총 6개의 실험 보가 제작되었다. 모든 보에는 전단 파괴를 억제하기 위한 전단철근이 보강되었으며, 시편 내 전단 철근 정착을 위한 압축철근(D16 × 2, $A_s' = 3.972 \text{ cm}^2$)이 형상유지 철근으로 장착되었다. 실험 시편에 대한 사항은 그림 1에 나타난 바와 같다. 실험 보의 명칭은 강섬유 보강 콘크리트 부분 적용높이에 따라 분류되었으며 표 1에 나타난 바와 같다.

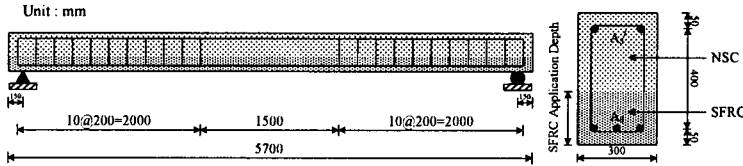


그림 1. 실험 보 제원 및 단면 형상

표 1. 실험 보 분류

실험 보 명칭	강섬유 보강 콘크리트 대체높이(mm)
RC	-
DDC_130	130
DDC_170	170

2.1. 실험재료 및 경화된 콘크리트 역학적 특성값

본 연구에서 사용된 SFRC는 표 2와 같은 배합 설계를 통해 제작되었으며 NSC는 레미콘 제품이 사용되었다. 철근은 항복강도 343MPa인 이형철근이며 강섬유는 항복강도 687MPa인 번들 타입이 사용되었다. 그리고 폴리카보네이트 고성능 감수제가 사용되었다. 경화된 콘크리트의 역학적 특성값은 각각 KS 규정에 따라 공시체 실험을 통해 측정되었으며 탄성 계수는 ACI code에 따라 계산되었다. 이러한 값들은 표 3에 나타난 바와 같다.

표 2. HPSFRC 배합 설계


굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물/시멘트 비 (%)	섬유 부피 (%)	단위 중량(kg/m ³)						고성능 감수제 (C × 2%)	강섬유 형상 
					물	시멘트	고로 슬래그	실리카 흙	잔 골재	굵은 골재		
13	21	3.7	26	1.5	170	480	131	33	678	805	9.81	

표 3. 경화된 콘크리트 특성값

분류	압축강도(MPa)	할렬인장강도(MPa)	파괴계수(MPa)	탄성계수(GPa)
NSC	29.1	2.6	4.7	25.5
HPSFRC	84	11.2	14.3	37.3

2.3 실험방법

실험 보는 단순 지지되었고 3mm/s의 변위제어로 4점 재하되었다. 처짐과 균열을 하중 증분마다 확인하였다. 휨 실험을 통해 측정된 자료를 바탕으로 4단계의 하중으로 각 단계마다 5회 반복 재하한 후 시편의 항복까지 재하하여 반복하중 실험을 실시하였다. 반복 하중 재하 시에는 크리프의 가능성을 없애기 위해 단시간에 실험이 실시되

었다. 반복 하중 재하에 적용된 방법은 그림 2에 나타나고 실험 브 및 실험 장치가 준비된 모습이 그림 3에 나타난다.

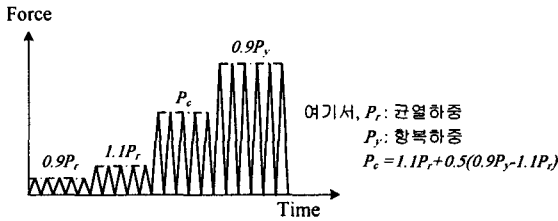


그림 2. 반복 하중 재하 방법 개략도

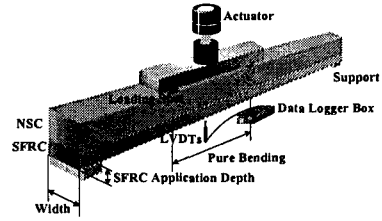
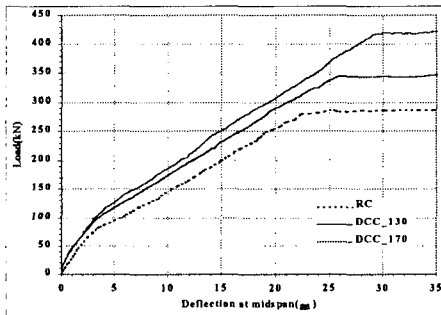


그림 3. 실험 장치의 준비

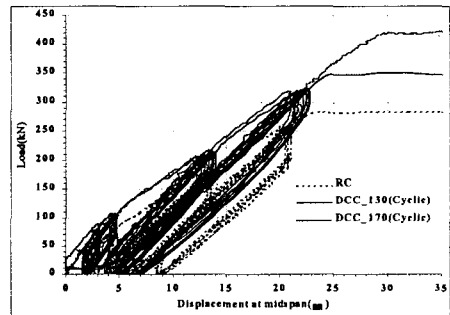
3. 실험결과

반복 하중 실험 시 하중 단계 측정을 위한 실험 보의 단조 하중-처짐 곡선과 이를 바탕으로 각 단계마다 반복 재하 한 실험 보의 하중-처짐 곡선이 그림 4에 나타난다. 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 인장부에 부분적으로 SFRC를 적용한 DCC 보는 통상적인 철근 콘크리트 보에 비해 균열 및 극한 하중의 증가와 처짐에서의 감소를 보였다. 하중 및 강성에서의 DCC 보와 RC 보의 성능 비교는 표 4에 나타난다. 또한 동일한 하중에서 DCC 보의 처짐량이 감소하였다. 특히 인장부의 SFRC의 대체 높이가 높아질수록 DCC 보는 뛰어난 구조적 성능을 보였다.

그림 5는 각 실험 보의 균열 양상을 나타낸다. 균열의 진행 양상과 함께 하중-하중 단계-반복 횟수 순으로 시편에 표시되었다. DCC 보는 RC 보에 비해 미세한 균열이 광범위하게 퍼져있음을 확인할 수 있는데, 이는 FRC의 균열이 주로 ITZ(Interfacial Transition Zone)에서의 공극에서 발생하여 진행하다가 섬유와 마주쳤을 때 보다 많은 미시 균열을 진행시키려는 경향을 보여주는 전형적인 모습이다. 이러한 미시 균열이 발달함으로써 주 균열의 급격한 성장이 억제되어 보다 연성적인 거동을 발휘하게 된다. 이를 통해 인장부에 부분적인 SFRC 대체를 통한 강섬유 첨가 효과는 반복 하중 재하 시에도 유효함을 확인할 수 있다. ;



(a) 단조하중



(b) 반복하중

그림 4. 단조 하중 및 반복 하중 재하 시 하중-처짐 곡선

표 4. 하중 저항 및 강성 비교

시편명칭	하중(kN)				강성(kN/mm)			
	초기균열	초기균열 증가율(%)	극한	극한 하중 증가율(%)	초기	초기 강성 증가율	균열 후	균열 후 증가율(%)
RC	81	-	287	-	24	-	9	-
DDC_130	101	25	343	20	29	21	11	18
DDC_170	106	31	418	46	30	27	12	30

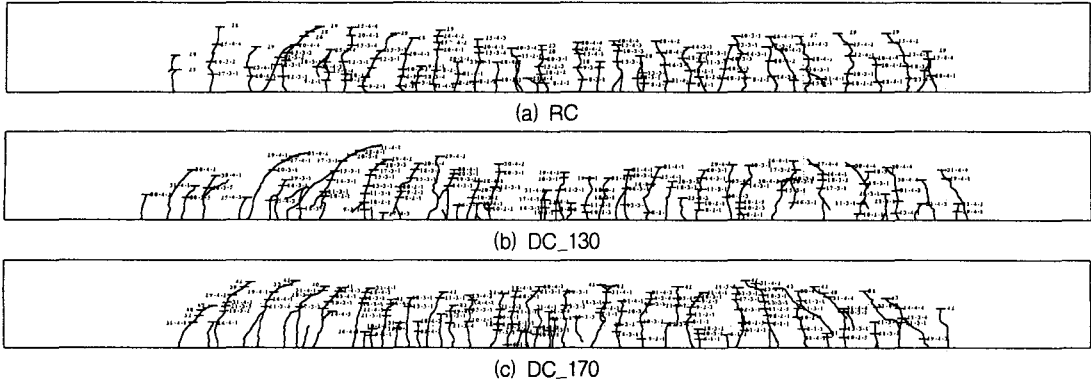


그림 5. 반복하중 재하 시 실험보의 균열 패턴

4. 결론

본 논문에서는 인장부에 부분적으로 강섬유 보강 콘크리트로 대체된 이종 합성 콘크리트 보의 단조 및 반복 하중 재하 시 거동에 대한 실험 연구가 실시되었다. 이를 통해 이종 합성 콘크리트 보는 일반 철근 콘크리트 보에 비해 우수한 구조적 거동을 보였으며 특히 반복 하중에서도 우수한 성능을 발휘함을 확인할 수 있었다. 그리고 인장부에 강섬유 보강 콘크리트의 대체 높이가 높을수록 보다 우수한 구조적 성능을 보였다.

감사의 글

본 연구는 “건설교통부의 건설교통기술혁신산업(02 산학연A03-01)”의 일환으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. ACI Committee 544 (1997) "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete-ACI 544.1R-96," ACI Manual of Concrete Practice, Vol. 5.
2. Swamy, R.N. and Bahia, H.M. (1985) "Effectiveness of Steel Fibers as Shear Reinforcements," Concrete International: Design & Construction, Vol. 7, No. 3, pp. 35-40.
3. Kormeling, H.A., Reinhardt, H.W. and Shah, S.P. (1980) "Static and Fatigue Properties of Concrete Beams Reinforced with Continuous Bars and with Fibers," Journal of the American Concrete Institute, Vol. 77, No. 1, pp. 36-42.
4. Alhozamy, A.M., Soroushian, P. and Mirza, F. (1996) "Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials," Cement & Concrete Composites, Vol. 18, No. 2, pp. 85-92.
5. Gopalratnam, V.S. (1995) "On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concrete," Cement & Concrete Composites, Vol. 17, No. 3, pp. 239-254.
6. Lim, T.Y., Paramasivam, P. and Lee, S.L. (1987) "Bending Behavior of Steel-Fiber Concrete Beams," ACI Structural Journal, Vol. 84, No. 5, pp. 524-536.
7. Furlan, S. and de Hanai, J.B. "Shear Behaviour of Fiber Reinforced Concrete Beams," Cement & Concrete Composites, Vol. 19, No. 4, pp. 359-366.
8. Gunasekaran, M. (1975) "Strength and Behaviour of Lightweight Concrete Beams made with Sintered Fly-Ash Aggregates and Fiber-Reinforced Partially," The Indian Concrete Journal, Vol. 49, No. 11, pp. 323-334.
9. Swamy, R.N. and Al-Ta'an, S.A. (1981) "Deformation and Ultimate Strength in Flexure of Reinforced Concrete Beams Made with Steel Fiber Concrete," Journal of the American Concrete Institute, Vol. 78, No. 5, pp. 395-405.
10. Padmarajaiah, S.K. and Ramaswamy, A. (2002) "Comparative Study on Flexural Response of Full and Partial Depth Fiber-Reinforced High-Strength Concrete," Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 14, No. 2 pp. 130-136.