



고강도 철근과 변형경화형 시멘트복합체를 사용한 보의 균열거동 및 휨 성능

장석준¹⁾ · 강수원¹⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과

Cracking Behavior and Flexural Performance of RC Beam with Strain Hardening Cement Composite and High-Strength Reinforcing Bar

Seok-Joon Jang,¹⁾ Su-Won Kang,¹⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

ABSTRACT This paper describes the effect of strain hardening cement composite (SHCC) material on structure performance of reinforced concrete (RC) beams with high-strength reinforcing bar. Also, this paper explores the structure application of SHCC in order to mitigation cracking damage and improve the ductility of flexural RC members. The prediction model for flexural strength of doubly reinforced SHCC beams are investigated in this study. To achieve the these objectives, a total of 6 rectangular beam specimens were tested under four point monotonic loading condition. The main parameters included the types of cement composite and reinforcing bar. Test results indicated that reinforced beam specimens with SHCC material were improved the structure performances and damage characteristics. Specifically, replacement of conventional high-strength concrete with SHCC materials has the potential of high-strength steel bar as flexural reinforcement on RC members. It is remarkable that suggested method of reinforced SHCC beams with high-strength reinforcing bar could be used usefully to the structure design.

Keywords : high-strength reinforcing bar, strain hardening cement composite, flexural performance, cracking behavior

1. 서 론

최근 초고층 빌딩 및 장경간 교량 등 대형 구조물이 증가하고 있다. 대형 구조물의 구조체는 필연적으로 높은 공칭강도를 요구하기 때문에, 과도한 철근 배근의 문제점이 발생한다. 고강도 철근의 사용은 철근량 감소를 통한 배근 간격 확보, 부재단면 축소에 따른 공사비 절감의 우위점이 있다. 하지만 고강도 철근의 경우 보통강도 철근과는 달리 뚜렷한 항복점을 나타내지 않으며, 높은 항복변형률을 가진다. Nawy¹⁾의 연구에 따르면, 철근콘크리트 보 부재에서 철근의 변형률은 콘크리트의 균열내비와 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 따라서 고강도 철근을 보 부재에 적용 시 압축연단 콘크리트의 극한변형률 초과에 의한 취성파괴가 발생되며, 과도한 균열의 문제점이 발생한다. 과도한 균열 폭은 균열을 통해 유입되는 외기의 영향으로 철근부식, 중성화 등의 구조적 문제점을 야기할 수 있다. 이러한 이유로 현 콘크리트구조기준(2012)²⁾에서는 휨 철근의 항복변형률

을 0.0035로 제한하고 있으며, 600 MPa를 넘지 못하도록 규정하고 있다. 콘크리트는 압축강도가 높고, 경계성 및 내구성 등이 매우 우수한 성능을 가지고 있지만, 인장강도 및 휨강도가 낮고, 균열분산에 취약한 특성을 가지고 있다. 이러한 콘크리트를 균열분산성능이 우수한 시멘트 복합체로 대체함으로써 기존의 철근콘크리트 보의 중앙부 응력집중 현상을 해결할 수 있으며, 균열확장 제어를 통해 휨 부재의 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

변형경화형 시멘트복합체(strain hardening cement-based composite, SHCC)는 복합체내에 합성섬유를 2% 내외 혼입하여 직접인장 또는 휨 거동 하에서 초기균열 발생 이후에도 강도의 저하 없이 변형률이 증가하는 변형경화 특성을 나타내며, HPRCC (high performance fiber reinforced cementitious composite) 또는 ECC (engineered cementitious composite)로 지칭되기도 한다. 이성철 등³⁾의 연구에서는 휨 철근이 배근된 HPRCC보 부재의 휨 거동에 관한 연구를 진행하였다. 실험결과에 따르면, 강도에 관계없이 0.003정도의 극한압축 변형률을 나타내는 일반 콘크리트에 비해 극한변형률이 증가하여 압축연단의 극한파괴가 제어되는 것으로 나타났다.

윤현도 등⁴⁾의 연구에서는 고강도 철근이 보강된 콘크리트 및 SHCC 인장 부재의 인장강성에 대한 실험을 진행하

*Corresponding author E-mail : wiseroad@snu.ac.kr

Received April 18, 2014, Revised July 22, 2014,

Accepted October 23, 2014

©2015 by Korea Concrete Institute

였다. 실험결과 콘크리트를 SHCC로 대체한 경우 고강도 및 보통강도 철근을 배근한 경우 모두 연성 및 균열완화 성능이 향상되는 것으로 보고되었다. 김윤용 등⁵⁾의 연구에서는 인장영역의 일부분을 고강도 철근 및 ECC로 보강한 철근 콘크리트 보에 대한 휨 성능 평가를 실시하였다. 실험결과 초기균열강도, 항복강도 및 최대 휨 강도가 증가 하였으며, 균열 이후의 휨 거동이 향상되는 것으로 보고되었다.

하지만, 고강도철근을 휨 철근으로 적용한 SHCC 보에 관한 연구는 전무한 실정이며, 압축철근이 배근된 경우 SHCC 보의 관한 연구도 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고강도 철근이 배근된 변형경화형 시멘트복합체 복근보의 휨 실험을 실시하고, 콘크리트를 SHCC로 대체함에 따라 나타나는 구조 거동 및 균열완화 성능 향상을 평가하고자 한다. 또한 실험결과를 근거로 하여 압축 및 인장 철근이 배근된 SHCC 보의 휨 강도 산정기법을 제안하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용재료

2.1.1 철근의 역학적 특성

본 연구에서는 미국 M사의 SD800급 고강도 철근을 사용하였으며, 국내 H사의 SD400급 보통강도 철근을 사용하였다. Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 인장시험을 위해 KS B

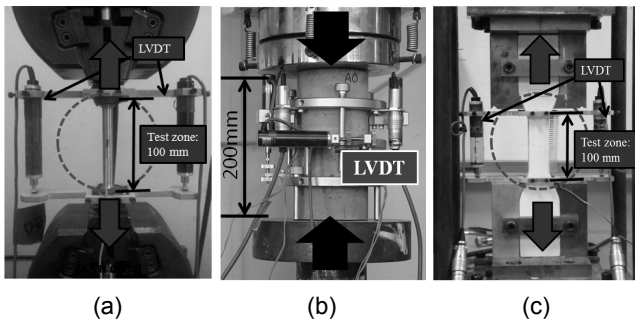


Fig. 1 Test set up for mechanical behavior

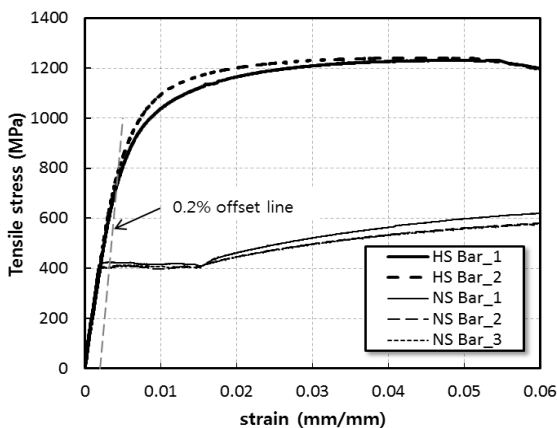


Fig. 2 Tensile behavior of steel bar

0801 기준⁶⁾에 준하여 시험구간 $\phi 13 \times 100$ mm를 가지는 시편을 제작하였으며, KS B 0802 기준⁷⁾에 준하여 200 kN용량의 만능재료시험기를 이용하여 변위제어방식으로 수행하였다. Fig. 2는 사용된 철근의 인장응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 고강도 철근의 경우 인장응력 600 MPa까지 선형거동을 나타냈으며, 이후 800 MPa까지 기울기가 서서히 감소하는 양상을 나타냈다. 또한 보통강도 철근과는 달리 뚜렷한 항복점을 보이지 않으며, 인장강도까지 비선형거동을 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 KS B 0802 기준⁷⁾에서 제시하고 있는 0.2% off set 방식을 이용하여 고강도 철근의 항복강도를 규정하였으며, 항복강도는 각각 719 MPa, 인장강도는 1,236 MPa를 나타내었다. 보통강도 철근의 경우 400 MPa를 전후로 하여 뚜렷한 항복점을 나타내었으며, 소성단계 이후 변형경화 특성을 나타내었다. 사용된 고강도 및 보통강도 철근의 역학적 특성을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.2.2 시멘트 복합체의 역학적 특성

본 연구에서는 70 MPa급 고강도 콘크리트와 SHCC 40 MPa급 SHCC를 계획하였으며, 사용된 시멘트 복합체의 배합을 Table 2에 나타내었다. SHCC의 시공성능 증진과 효과적인 섬유분산을 위해서 고성능감수제와 증점제를 첨가하였다. 또한 급격한 투입으로 인한 섬유뭉침 현상을 방지하고자 절반의 섬유를 투입 후 30초 동안 비빔을 실시하고, 나머지 섬유를 혼입하였다. 일반 콘크리트에 합성섬유를 혼입할 경우 균열 발생 시 파괴에너지 높아 합성섬유의 가교작용이 명확하게 발생하지 못한다. 따라서 본 연구에서는 굵은골재를 사용하지 않았으며, 잔골재는 국내에서 생산된 잔골재용 규사 7호(비중 2.61, 직경 105~120 μ m)를 사용하였다. 합성섬유는 다른 합성섬유에 비해 인장강도가 우수하고, 높은 탄성계수를 가지는 PE (polyethylene) 섬유를 사용하였으며, 일본 D사의 DYN-A 제품을 사용하였다. 사용된 PE 섬유의 역학적 특성을 Table 3에 정리하여 나타내었다.

시멘트 복합체의 역학적 특성을 평가하기 위해 압축 및 직접인장시험을 실시하였다. 압축강도 시험은 KS F 2403

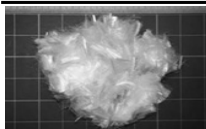
Table 1 Properties of reinforcing steel bar

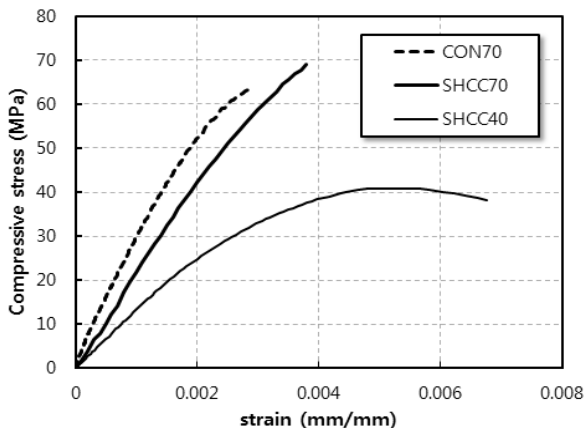
Specimen	Sample	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
High strength bar	1	743.82	1231.78	235.45
	2	693.74	1240.21	214.53
	avg.	718.78	1236.00	224.99
	(S.D)	(± 25.04)	(± 4.22)	(± 10.46)
Normal strength bar	1	415.26	673.76	247.06
	2	394.97	627.37	206.21
	3	402.00	626.18	235.71
	avg.	404.08	642.44	229.66
(S.D)	(± 8.41)	(± 22.15)	(± 17.21)	

Table 2 Mixture proportions of cement-based material

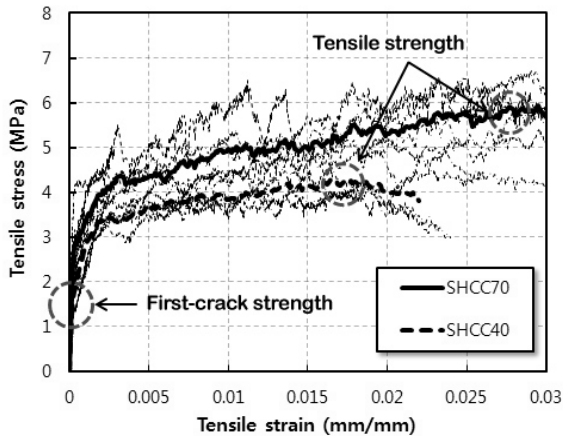
	f_{ck} (MPa)	W/B (%)	Fiber volume fraction (%)	Unit weight (kg/m ³)				Super- plasticizer	Methyl cellulose
				Water	Cement	Sand	Aggregate		
Concrete 70	70	30	-	150	550	738	933	3.3	-
SHCC 70	70	30	1.5	384	1218	513	-	13.0	0.52
SHCC 40	40	45	1.5	484	1075	430	-	9.6	0.50

Table 3 Properties of polyethylene (PE) fiber

	Specific gravity (kg/m ³)	Length (mm)	Diameter (μ m)	Aspect ratio (L/d)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
		0.97	15	12	1,250	2,500



(a) Compressive behavior



(b) Direct tensile behavior

Fig. 3 Mechanical properties of cement composite

규준⁸⁾에 준하여 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체를 각 3개씩 제작하였으며, Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 KS F 2405⁹⁾ 규준에 준하여 2000 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하여 초당 0.3 MPa의 하중제어방식으로 가력 하였다. 직접인장 시험은 시멘트복합체에 대한 규준이 국내에 정립되지 않아, 일본토목학회 JSCE-E-531¹⁰⁾에 따라 수행하였다. 시험구간 100 mm, 단면 30×30 mm의 덤벨형(dumbbell-shape) 시험체를 제작하여 시험을 실시하였으며, 시험체 설치상황을 Fig.

Table 4 Direct tensile performance of SHCC

Specimen	Sample	First-crack strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Strain at peak (%)
SHCC 40	1	1.57	5.22	1.96
	2	1.07	4.14	1.86
	3	1.17	4.54	2.18
	4	1.17	4.53	1.64
	5	1.14	4.01	1.67
	avg. (S.D)	1.22 (± 0.18)	4.49 (± 0.42)	1.86 (± 0.20)
SHCC 70	1	1.13	6.72	2.91
	2	1.63	5.63	3.20
	3	1.51	6.35	4.88
	4	2.13	6.09	3.96
	5	2.42	6.56	2.32
	avg. (S.D)	1.77 (± 0.46)	6.27 (± 0.38)	3.46 (± 0.89)

1(c)에 나타내었다. Fig. 3(a)는 재령 28일 시멘트복합체의 압축응력-변형 관계를 나타낸 것으로, SHCC가 고강도콘크리트에 비해 탄성계수가 작고, 압축강도 시 변형률이 증가하는 양상을 나타내었다. SHCC의 경우 강도가 감소함에 따라 압축강도 시 변형률이 증가하며, 압축응력 하에서 인성이 증가하는 특성을 나타내었다. Fig. 3(b)는 실험일 기준(재령28일) SHCC의 인장응력-변형 관계를 나타낸 것으로 SHCC70이 SHCC40에 비하여 45% 높은 초기 균열강도를 나타내었으며, 인장강도 또한 40% 높게 나타났다. 인장강도 시 변형률은 SHCC40이 1.86%, SHCC70이 3.46%로 우수한 변형경화 특성을 나타내었다. 본 연구에서 사용된 SHCC의 직접인장 하에서 특성을 Table 4에 정리하여 나타내었다.

Table 5 Summaries of beam specimens

Specimen	f_{ck}^* (MPa)	Composite type	f_y^{**} (MPa)
HS-CON70	70	Concrete	800
NS-CON70	70		400
HS-SHCC40	40	Strain-hardening cement-based composite	800
NS-SHCC40			400
HS-SHCC70	70		800
NS-SHCC70			400

*Specific compressive strength of cement composite,
**Yield strength of flexural steel bar

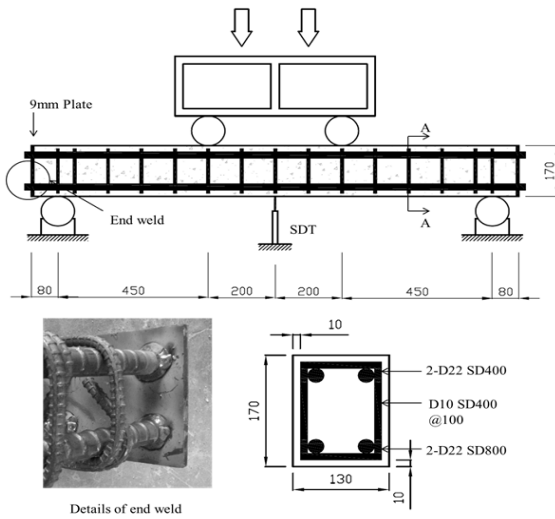


Fig. 4 Configuration and reinforcement detail of specimens (unit : mm)

2.2 주요 변수 및 실험체 상세

본 연구에서는 고강도 철근이 배근된 변형경화형 시멘트 복합체 보의 구조성능 및 균열완화성능을 평가하기 위해서 Table 5와 같이 휨 철근의 항복강도, 시멘트 복합체의 종류 및 강도를 변수하여 실험체를 계획하였다. 실험체 상세는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 단면 130×170 mm, 순경간 1,300 mm의 단순보 실험체를 계획하였다. 압축 철근은 SD400급 D22 이형철근을 배근하였고, 휨 철근의 경우 SD400급, SD800급 D22 이형철근을 각각 배근하였다. 고강도 철근의 수입 과정에서 철근의 길이를 충분하게 확보할 수 없었기 때문에, 정착 확보를 위해 보 양단철판과 철근을 용접하였다. 예상치 못한 전단파괴를 방지하기 위하여 SD 400급 D10 이형 철근을 100 mm 간격으로 전단보강 하였으며, 단부는 50 mm 간격으로 보강하였다.

2.3 실험방법

단순보 실험체의 구조성능 평가를 위해서 Fig. 5에 나타난 바와 같이 500 kN용량 액추에이터(actuator)를 이용하여 변

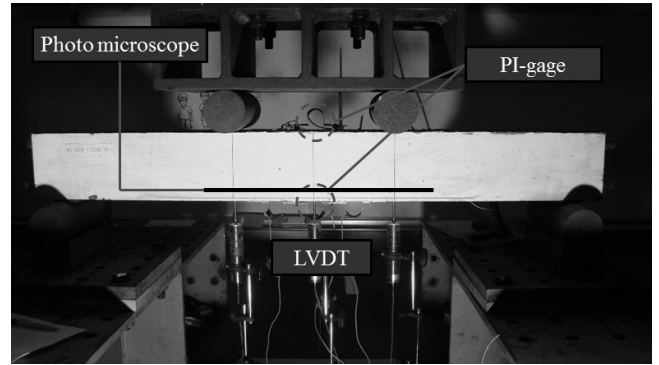


Fig. 5 Test set-up for beam specimens

위 제어 방식으로 4점 가력하였다. 보의 수직 처짐을 측정하기 위해서 중앙부에 LVDT (linear variable different transformer)를 설치하였으며, 상하부에 파이형 변위계(PI-gauge)를 설치하여 압축 및 인장 변형률을 측정하였다. 각 하중별 균열의 개수 및 폭을 측정을 위해 마이크로스코프(microscope)를 활용하여 인장측 800 mm 구간 발생된 균열을 측정하였다. 각 균열의 폭은 60배율로 측정하였으며, 배율에 따라 계산하였다.

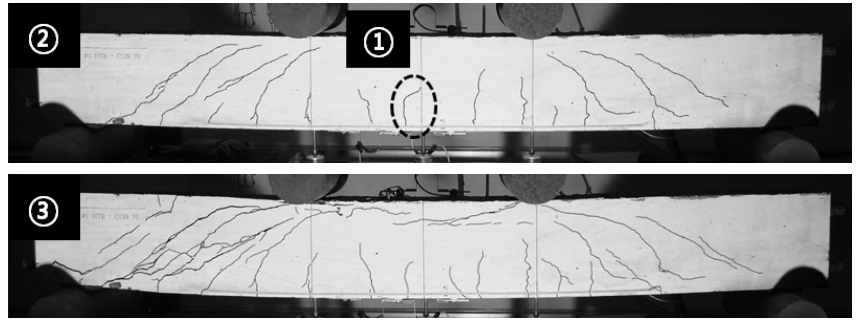
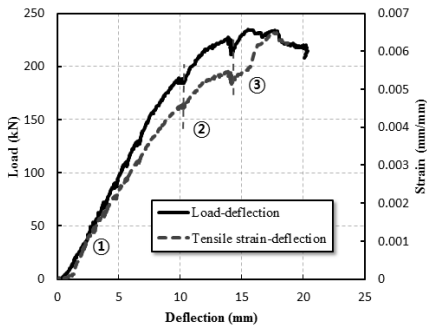
3. 결과 및 분석

3.1 파괴양상

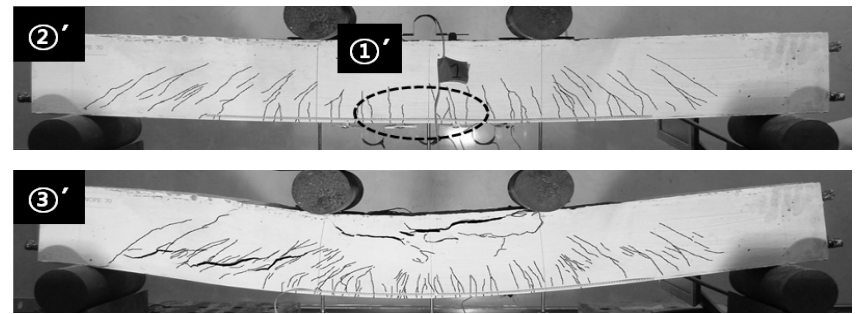
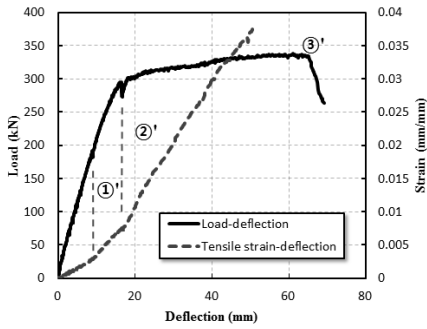
초기균열시점은 모든 실험체에서 하중 20 kN을 전후로 발생하였다. SHCC 대체에 따른 초기균열의 시점의 변화는 미소한 것으로 나타났으나, 하중이 증가함에 따라 SHCC 보의 경우 섬유 가교작용에 의해 다수의 미세균열이 발생하며 균열의 진전의 완화가 나타났다. 고강도 철근을 배근한 실험체의 경우 휨 보강근에 의해 휨 내력이 높아지면서 최종파괴 시 전단균열이 발생하였으며, 특히 HS-CON70 실험체의 경우 전단에 지배적인 파괴가 발생하였다. 보통강도 철근을 배근한 경우에는 휨 균열 및 압축연단 콘크리트 압괴에 의해 최종 파괴되었다. Fig. 6은 하중-처짐 증가에 따른 대표적인 실험체의 파괴양상을 나타낸 것으로, 인장변형률은 보의 중앙하부의 피어게이지를 통해 측정된 변형률로 나타내었다. HS-CON70의 경우 휨 철근의 항복이전 전단균열이 급격한 진전되었으며, 인장측 중앙부에 변형이 집중됨을 알 수 있다. 반면, HS-SHCC70 실험체의 경우 SHCC 대체에 따라 상부의 압축파괴가 일반 고강도 콘크리트 보에 비해 상당부분 제어되면서 비교적 안정적인 파괴양상을 나타내었다.

3.2 균열진전양상

전술한 바와 같이 콘크리트를 SHCC로 대체함에 따라 인장측에 발생하는 균열의 분산성이 증가하는 특성을 나타내었다. Fig. 7(a)는 중앙부 800 mm 구간의 균열개수를 각 하

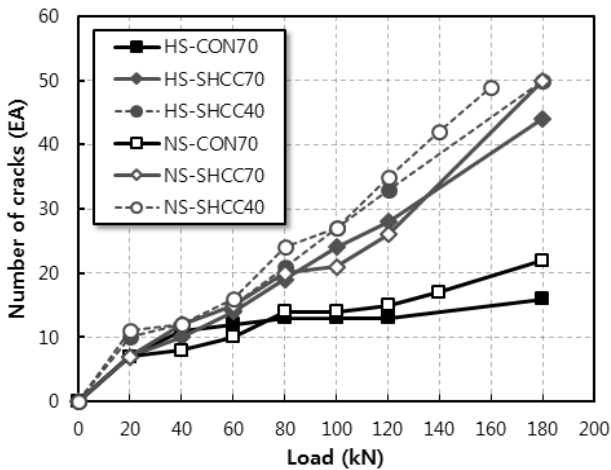


(a) HS-CON70

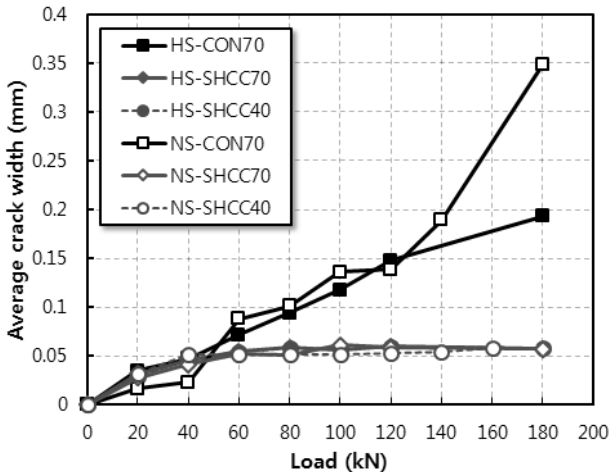


(b) HS-SHCC70

Fig. 6 Typical crack patterns of beam specimens



(a) Variation of number of cracks as load



(b) Variation of average crack width as load

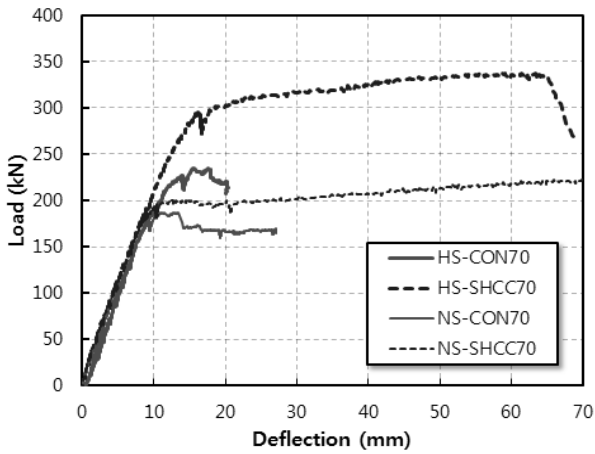
Fig. 7 Effects of SHCC material on crack behavior

중에 따라 나타낸 것이다. SHCC 보의 경우 하중이 증가함에 따라 다수의 미세 균열이 발생하며 균열의 개수가 최종 파괴 시까지 꾸준히 증가하였다. 반면, 고강도 콘크리트 보의 경우 하중 80 kN 이후 균열의 개수가 미소하게 증가하는 특성을 나타내었다. 120 kN의 하중이 작용할 때 고강도 및 보통강도 철근을 배근한 실험체의 균열 개수를 비교한 결과 HS-CON70은 14개, NS-CON70의 실험체의 경우 15개를 나타내어 철근 항복강도의 영향은 미소한 것으로 나타났다. 또한, 압축강도 70 및 40 MPa급의 SHCC가 사용된 보에서도 휨 철근의 항복강도가 균열의 수에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

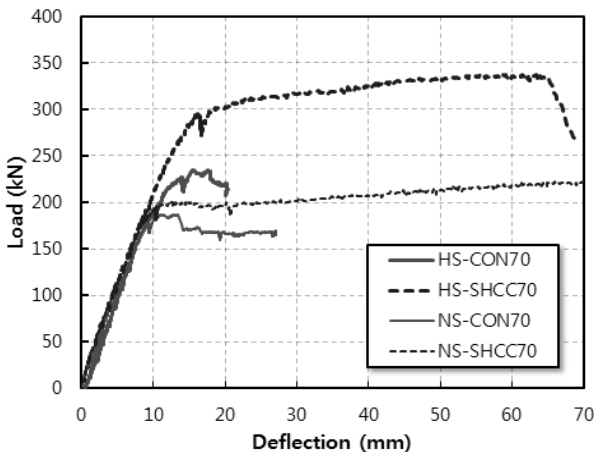
평균 균열의 폭은 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 SHCC를 사용한 경우 40 kN 이후 0.05 mm의 균열 폭을 유지한 반면, 콘크리트 보의 경우 응력이 소수의 균열에 집중되며 균열의 폭이 계속적으로 증가하였다. 특히, NS-CON70 실험체의 경우 160 kN 이후 철근의 항복시점이 발생하였고, 철근의 변형과 균열의 폭이 크게 증가하는 특성을 나타내었다. 반면 보통강도 철근의 배근된 SHCC 보의 경우 철근의 항복 이후에도 균열 폭이 증가하지 않는 양상을 나타내었다. HS-CON70 실험체는 고강도 철근이 휨 균열에 저항하면서 동일한 시점에 NS-CON70에 비해 균열의 폭이 크게 증가하지 않은 것으로 판단된다.

3.3 휨 성능 평가

본 연구에서는 Pack and Paulay의 정의¹¹⁾에 따라 보의 항복내력과 최대내력을 정의하였다. Fig. 8(a)는 보 부재의 휨 거동에 시멘트 복합체 종류가 미치는 영향을 나타낸 것



(a) Effects of cement-based composite types



(b) Effects of compressive strength of SHCC

Fig. 8 Flexural properties of beam specimens

로, 초기강성의 차이는 나타나지 않았다. 보통강도 철근을 적용한 경우에는 SHCC의 대체가 항복내력 증가에 미치는 영향은 미소하게 나타났으나, 고강도 철근을 배근한 경우에는 최대내력에서 큰 증가를 나타내었다. 전술한 바와 같이 HS-CON70 실험체는 최대내력 전·후 콘크리트 보의 전단파괴 및 극한압축파괴가 발생하며, 고강도철근이 항복을 위한 충분한 변형을 하지 못한 것으로 판단된다. HS-SHCC70 실험체는 전단 및 보 상단의 압축파괴가 제어되면서 고강도 철근이 충분한 변형을 발휘한 것으로 판단되며, 이에 따라 휨 내력이 크게 증가하였다. Fig. 8(b)는 SHCC 압축강도에 따른 휨 거동 특성을 나타낸 것으로 시멘트 복합체의 탄성계수의 영향으로 압축강도에 증가함에 따라 SHCC 보의 강성도 증가하는 것으로 나타났다. 예상된 바와 같이 SHCC 압축강도가 증가할 수록 SHCC 보의 최대내력이 증가하는 양상을 나타내었으며, 특히 고강도철근을 배근한 경우 최대내력의 차이가 큰 것으로 나타났다. 이는 중립축을 중심 상부에 형성되는 시멘트복합체의 압축응력과 고강도 철근의 인장응력이 HS-SHCC70 실험체의 경우 고강도철근의 항복까지 충분히 형성되었기 때문으로 판단된다. 반면, HS-SHCC40 실험체의 경우 압축응력의 크기가 작아 고강도 철근의 항복이전에 보 상단의 압축파괴가 선행되었기 때문으로 판단된다.

Table 6 Summarie of test result of beam specimens

Specimen	P_y^* (kN)	Δ_y^{**} (mm)	P_u^{***} (kN)	Δ_u^{****} (mm)	$\frac{\Delta_u}{\Delta_y}$
HS-CON70	227.4	13.9	234.5	15.5	1.12
NS-CON70	177.6	9.4	187.4	11.1	1.18
HS-SHCC40	241.3	16.0	272.7	24.2	1.51
NS-SHCC40	180.7	11.9	196.6	77.6	6.52
HS-SHCC70	295.0	16.5	337.4	61.2	3.71
NS-SHCC70	193.7	10.3	223.0	69.9	6.82

*Yield load **Deflection at yield load ***Ultimate load
****Deflection at Ultimate load

3.4 연성비 평가

실험결과 및 연성비를 요약하여 Table 6에 나타내었다. 연성비는 항복시 처짐에 대한 최대내력 발현시의 처짐비로 산정하였다.¹²⁾ SHCC 보 실험체의 경우 항복이후 섬유유기 가교작용에 의한 응력분산이 발생하면서 미소하게 내력이 증가하여, 최대내력 발현 시 처짐이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 휨 철근의 강도와 관계없이 SHCC를 적용한 경우 높은 연성비를 나타내었다. 고강도 철근으로 보강한 경우 보통강도 철근을 보강한 경우에 비해 연성비가 감소하는 경향을 나타내었다. HS-CON70 실험체가 가장 낮은 연성비를 나타내었으며, 이는 휨 배근된 고강도 철근으로 인해 휨 내력이 증진되어 전단파괴가 발생했기 때문으로 판단된다. 또한 HS-SHCC40 실험체의 경우 휨 철근의 항복이전에 상부의 압축파괴가 발생하면서 연성비가 다소 낮게 평가된 것으로 판단된다. SHCC의 압축강도가 증가함에 따라 연성비가 증가하는 양상을 나타내었고, HS-SHCC70 실험체의 경우 압축파괴가 제어됨에 따라 높은 연성비를 나타내었다.

3.5 휨 강도 산정기법

본 연구에서는 압축연단의 시멘트 복합체가 극한 상태에 이르렀을 경우를 가정하여 콘크리트 및 SHCC 복근보의 공칭모멘트 산정기법을 제안하였다. 극한 변형의 경우 상부 PI 게이지를 통하여 측정된 값을 근거로 하여 콘크리트의 경우 0.003, SHCC40의 경우 0.006, SHCC70의 경우 0.005를 각 적용하였다. 압축연단의 압축파괴 시점에서 시멘트 복합체가 부담하는 압축력의 크기 $C_c(N)$ 는 등가응력블록에 따라 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 시멘트 복합체가 지지하는 인장력의 크기 $T_c(N)$ 는 일본토목학회의 제안¹³⁾에 따라 식(2)와 같이 변형률에 관계없이 일축인장 하에서 초기 균열강도를 1.3으로 나눈 값으로 산정하였다. 철근과의 상호작용에서 철근이 부담하는 인장력의 크기가 SHCC에 비하여 상대적으로 매우 크기 때문에 인장강도가 아닌 초기 균열을 사용하였다.

$$C_c = 0.85f_{ck}c\beta_1b \quad (1)$$

$$T_c = (f_{cr}/1.3)(d-c)b \quad (2)$$

여기서, f_{ck} 는 설계기준압축강도(MPa), c 는 압축연단으로부터 중립축의 깊이(mm), β_1 의 경우 압축강도 28 MPa 이상에 한하여 식(3)에 따라 계산한 값, b 는 보의 폭(mm), f_{cr} 은 일축인장에서 초기균열강도(MPa), d 는 보의 깊이(mm)를 나타낸다.

$$\beta_1 = 0.85 - 0.007(f_{ck} - 28) \geq 0.65 \quad (3)$$

압축철근이 부담하는 압축력의 크기 C_s (N)는 철근이 항복하였을 경우와 항복하지 않은 경우를 구분하여 식(4)와 같이 산정하였다. 휨 철근이 부담하는 인장력의 크기 T_s (N)는 보통강도 철근의 경우 철근의 항복을 가정하여 산정하였으며, 고강도 철근의 경우 Mast et al의¹⁴⁾ 제안에 따라 식(5)와 같이 산정하였다.

$$C_s = \begin{cases} A_s' f_s' & (\text{압축철근항복}) \\ A_s' E_s' \left(\frac{c-d'}{c}\right) \varepsilon_{cu} & (\text{압축철근미항복}) \end{cases} \quad (4)$$

$$T_s = \begin{cases} \text{for } 0 \leq \varepsilon_s \leq 0.00241 \\ A_s \left[200,000 \left(\frac{d_t}{c} - 1\right) \varepsilon_{cu} \right] \\ \text{for } 0.00241 \leq \varepsilon_s \leq 0.060 \\ A_s \left[1172 - \frac{2.379}{\varepsilon_{cu} \left(\frac{d_t}{c} - 1\right) + 0.00104} \right] \end{cases} \quad (5)$$

여기서, A_s 는 철근의 단면적(mm²), f_s 는 철근의 항복강도(MPa), E_s 는 철근의 탄성계수(MPa), d' 은 압축연단으로부터 압축철근의 깊이(mm), d_t 는 압축연단으로부터 휨 철근의 깊이(mm), ε_{cu} 는 시멘트복합체의 극한변형률, ε_s 는 휨 철근의 변형률을 나타낸다. 상기의 식을 토대로 하여 중립축의 깊이 c 에 대한 2차 방정식을 유도 할 수 있다. 이로부터 중립축의 값을 산정할 수 있으며, 공칭 휨 강도 M_n 은 식(6)과 같이 계산되어 진다.

$$M_n = C_c \frac{c\beta_1}{2} + T_c \left(\frac{d+c}{2}\right) + C_s d' + T_s d_t \quad (6)$$

Fig. 9는 실험에서 측정된 값과 제안식을 토대로 계산된 값을 비교한 것으로, 이론적으로 예측된 값은 각 실험체의 최대 휨 강도를 잘 예측하는 것으로 나타났다. HS-CON70의 경우 최종 파괴 시 전단 파괴에 따른 취성적 파괴가 발생하면서 휨 이론적으로 예측된 식에 비하여 낮은 강도를 나타낸 것으로 판단된다. 보통강도 철근을 배근한 실험체의 경우 제안식이 최대 휨 강도를 과소평가하는 것으로 나타

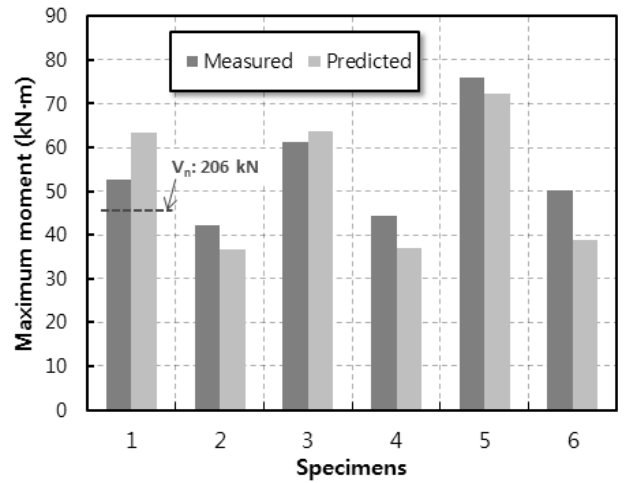


Fig. 9 Comparison of measured with predicted maximum moment

났으며, 이는 제안된 식이 철근의 항복이후 변형경화 특성을 과소평가하기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고강도 철근이 배근된 변형경화형 시멘트 복합체 보의 구조성능 및 균열완화 성능을 평가하기 위하여 총 6개의 단순 보 실험체에 대한 휨 실험을 실시하였다. 또한 휨 내력 예측을 위하여 이론적 방법을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) SHCC의 역학적 특성 평가결과 고강도 콘크리트에 비해 탄성계수가 감소하고, 최대강도시 변형률이 증가하는 양상을 나타내었다. 특히 일축인장에서 초기 균열이후에 섬유가교 작용에 의한 변형경화 특성을 나타내며, 높은 인장강도 및 변형을 나타내었다.
- 2) 휨 파괴시 균열양상을 분석한 결과 SHCC 보의 경우 고강도 철근콘크리트 보에 비하여 다수의 미세균열이 발생하였으며, 균열의 평균 폭이 감소되는 양상을 나타내었다. 또한, 최종파괴 시 보 상부의 압축파괴가 제어되는 특성을 나타내었다.
- 3) 휨 거동을 양상을 분석한 결과 보통강도 철근을 적용한 경우에는 SHCC의 대체가 휨 내력증진에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났으나, 고강도 철근을 배근한 경우 최대 휨 내력이 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이는 SHCC 우수한 인장한 강도 및 압축 변형률 증가로 인해 고강도 철근이 높은 변형률까지 저항할 수 있기 때문으로 판단된다.
- 4) 연성비의 경우 SHCC를 대체함에 따라 높게 나타났으며, 응력분산에 의하여 보의 항복이후에도 미소하게 강도가 증진되며 최대내력 발현시 처짐이 증가하는 양상을 나타내었다. 고강도 철근을 배근한 경우 고강도 콘크리트 보가 가장 낮은 연성비를 나타내었으며, SHCC의 압축강도가 증가함에 따라 높은 연성비를 나

타내었다.

- 5) 본 연구에서는 보의 평형조건을 이용하여 휨 강도 산정식을 제안하였으며, 이는 제한된 실험체의 휨 강도를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. SHCC와 철근의 상호작용을 반영한 인장강도 모델이 요구되며, 이를 통해 보다 명확한 휨 내력 예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 교육부 한국연구재단의 중견연구자지원 사업(2011-0015271)에 의해 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Nawy, E. G., "Crack Control in Reinforced Concrete Structures", *ACI Journal*, Vol. 65, No. 10, 1968, pp. 825-836.
2. Korean Concrete Institute, "Design Code for Concrete Structural", 2012 (in Korean).
3. Shin, K. J., Kim, J. H., Cho, J. Y., and Lee, S. C., "Flexural Behavior of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) Beam with a Reinforcing Bar", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 169-176 (in Korean).
4. Yun, H. D., Lee, Y. O., Ryu S. H., and Seo, S., Y., "Effects of High-Performance Steel on the Tention Stiffening and Cracking Behavior of Reinforced Concrete (RC) Tension Ties", *Journal of Iron and Steel research international*, Vol. 18, No. 7, 2011, pp. 812-815.
5. Cho, H. W., Bang, J. W., Han, B. C., and Kim, Y. Y., "Flexural Experiments on Reinforced Concrete Beams Strengthened with ECC and High Strength Rebar", *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 4, 2011, pp. 503-509 (in Korean).
6. Korean Agency for Technology and Standards, *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials KS B 0801: 2007*, Korean Standards Association, 2007, pp. 1-14 (in Korean)
7. Korean Agency for Technology and Standards, *Method of Tensile Test for Metallic Materials KS B 0802: 2003*, Korean Standards Association, 2003, pp. 1-7 (in Korean).
8. Korean Agency for Technology and Standards, *Standard Test Method of Making and Curing Concrete Specimens KS F 2403: 2010*, Korean Standards Association, 2010, pp. 1-9 (in Korean).
9. Korean Agency for Technology and Standards, *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete KS F 2405: 2010*, Korean Standards Association, 2010, pp. 1-6 (in Korean).
10. JSCE-E-531, "Test method for tensile properties of continuous fiber reinforcing materials", *JSCE*, 1999.
11. Pack, R. and Paulay, T., "Reinforced Concrete Structures", Canada: John wiley & Sons, 1975.
12. Pack, R. and Ruitong, D., "Ductility of Doubly Reinforced Concrete Beam Section", *ACI Structural Journal*, Vol. 85, No. 2, 1988, pp. 217-225.
13. JSCE, "Evaluation and application of fiber reinforced mortar with multiple fine cracks", Tokyo: JSCE, concrete engineering series 64.
14. Mast, R. F., Dawood, M., Rizkalla, S. H., and Zia, P., "Flexural Strength Design of Concrete Beams Reinforced with High-Strength Steel Bars", *ACI Structure Journal*, Vol. 105, No. 5, 2008, pp. 570-577.

요 약 본 연구는 변형경화형 시멘트 복합체(strain hardening cement composite, SHCC)가 고강도 철근이 배근된 보의 휨 거동에 미치는 영향을 알아보기 위하여 실시되었다. 또한, 본 연구에서는 SHCC가 철근콘크리트 휨 부재의 균열완화성능 및 연성에 미치는 영향을 분석하였으며, 실험결과를 토대로 하여 이론적인 휨 강도 예측 방법을 제안하였다. 실험을 위하여 시멘트 복합체의 종류 및 강도, 철근의 항복강도를 변수로하여 총 6개의 실험체를 제작하였다. 가력을 위해 단순 보 실험체를 500 kN용량의 유압 액추에이터를 사용하여 변위제어 방식으로 4점 가력 하였다. 실험결과 SHCC를 사용한 경우 일반 고강도 철근콘크리트 보에 비하여 균열완화성능 및 연성이 증가하는 양상을 나타내었다. 특히 고강도 철근을 배근한 경우 휨 내력에 큰 차이를 나타내었으며, 이는 SHCC 대체가 800 MPa급 이상의 고강도 철근을 휨 철근으로 적용할 수 있는 가능성을 보여주는 것으로 판단된다. 예측된 휨 거동 산정 기법을 제한된 실험의 휨 내력을 잘 예측하는 것으로 나타났으며, 향후 SHCC의 인장강도 모델분석을 통해 보다 명확한 제안을 할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고강도철근, 변형경화형 시멘트복합체, 휨 성능, 균열양상