



강섬유 및 폴리프로필렌 섬유로 보강된 고강도콘크리트 내민받침의 구조 거동 평가

양준모¹⁾ · 이주하²⁾ · 민경환¹⁾ · 윤영수^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축·사회환경공학과 ²⁾삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

Evaluating Structural Performance of High-Strength Concrete Corbels Containing Steel and Polypropylene Fibers

Jun-Mo Yang,¹⁾ Joo-Ha Lee,²⁾ Kyung-Hwan Min,¹⁾ and Young-Soo Yoon^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Institute of Tech., Samsung Engineering & Construction Co., Ltd., Seongnam 463-771, Korea

ABSTRACT In this study, high strength concrete corbels reinforced with steel fibers and polypropylene fibers, and subjected to the vertical and horizontal loads were constructed and tested. The results showed that performance in terms of load carrying capacities, stiffness, ductility, crack width, and number of cracks was improved, as the steel fibers and polypropylene fibers were added. The polypropylene fiber reinforced concrete corbels resulted in higher ductility in presence of horizontal loads, but showed larger crack width than the steel fiber reinforced concrete corbels. And, the heads of the headed bars provided excellent end anchorage of the main tension tie reinforcement. Experimental results presented in this paper are also compared with various prediction models proposed by codes and researchers. The refined strut-and-tie model showed more accurate and conservative predictions in presence of horizontal loads, and the truss model proposed by Fattuhi provides fairly good predictions for fiber reinforced concrete corbels.

Keywords : corbels, steel fibers, polypropylene fibers, high strength concrete, headed bars

1. 서 론

철근콘크리트구조물, 특히 프리캐스트 구조물에 보편적으로 사용되고 있는 내민받침은 보에 의해 전달되는 수직하중과 지지하고 있는 부재의 수축, 온도 변형, 크리프 변형에 의해 전달되는 수평하중에 저항하는 부재이다. 이러한 내민받침은 전단경간-깊이의 비가 1을 넘지 않는 캔틸레버로서 Bernoulli의 기본 가정인 평면 유지 법칙이 성립하지 않는 응력교란구역을 형성한다.

많은 연구자들¹⁻⁷⁾은 내민받침의 형상, 주인장 철근 및 스테럽의 유형, 스테럽의 유무, 섬유 혼입, 콘크리트 강도 등의 변수를 가지고 내민받침에 대한 성능을 평가하였다. 이들의 연구¹⁻⁷⁾에서는 스테럽 (균열 제어 철근) 비와 섬유 혼입비의 증가에 따라 강도와 연성이 증가한다고 보고되었고, Yong et al.⁵⁾과 Foset et al.⁶⁾은 고강도콘크리트 내민받침은 일반강도 콘크리트 내민받침과 유사하게 거동한다고 결론지었다. 또한 내민받침의 파괴 유형이 다양하기 때문에 그 전단강도를 평가하고 예측하는 것이 매우 복잡함에도 불구하고, 많은 설계기준⁸⁻¹⁰⁾과 연

구자들^{2-3,6,11-13)}은 휨 이론, 스테럽-타이 모델, 경험식 등을 기초로 하여 내민받침의 강도에 대한 다양한 예측식을 제시하였다. 그러나 콘크리트구조물의 부식에 대한 관심, 고강도콘크리트 사용 증가 등의 최근 추세를 감안할 때, 섬유보강 고강도콘크리트 내민받침을 적절하게 설계하고 시공하는 방안에 대한 광범위한 실험적, 해석적 연구가 필요하다.

이에 본 연구에서는 섬유 종류 (강섬유, 폴리프로필렌 섬유), 하중 유형 (수직하중, 수평하중)을 변수로 한 섬유보강 고강도콘크리트 내민받침을 제작하고 구조실험을 실시하였다. 또한, 그 실험 결과를 설계기준과 연구자들이 기존에 제시하였던 다양한 예측모델(ACI 318-05,⁸⁾ Mitchell et al.,⁷⁾ Solanki et al.,¹¹⁾ Hagberg,¹²⁾ Russo et al.,¹³⁾ Foster et al.,⁶⁾ Fattuhi²⁾)과 비교하였다.

2. 실험

2.1 시험체 상세

본 연구에서는 실물 크기의 양면 내민받침 6개 시험체를 제작하였다. Fig. 1에 시험체 형상 및 철근 배근 상세를 나타내었다. 이들 시험체는 C1 series, C2 series로 구분

*Corresponding author E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

Received July 29, 2008, Revised November 27, 2008 Accepted November 27, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

할 수 있다. C1 series 시험체는 폭 600 mm, 깊이 600 mm의 내면받침과 600 × 600 mm 정사각형 기둥으로 구성되었다. C1 series 시험체의 주인장 타이 철근은 9개의 15M 헤드드 바를 사용하였고, 그 헤드드 바의 헤드 폭은 50.8 mm, 헤드 두께는 12.7 mm로 하였다. ACI 318-05⁸⁾ 및 콘크리트 구조설계기준⁹⁾에서 ($A_s - A_n$)의 50% 이상의 폐쇄스터럽 (균열제어 철근)을 유효깊이의 2/3 이내에 주인장 타이 철근에 평행하도록 균등하게 배치해야 한다고 규정하였기 때문에 5개 10 M 폐쇄스터럽을 70 mm 간격으로 배근하였다. C2 series 시험체의 단면과 철근 배근은 C1 series 시험체와 동일하게 하였지만, 수직하중만 재하되는 C1 series 시험체와는 달리 C2 series 시험체는 수직하중과 그 수직하중의 20%에 해당하는 수평하중이 동시에 재하되도록 하였다.

Table 1에 나타난 바와 같이 본 연구에서는 하중 유형, 섬유 종류를 주요 변수로 하여 실험하였다. C1, C2 시험체는 섬유를 혼입하지 않은 반면, C1-SF, C1-PF, C2-SF, C2-PF 시험체는 섬유를 혼입하였다. C1-SF, C2-SF 시험체는 길이 50 mm, 지름 1.0 mm, 평균 인장강도 1,050 MPa인 양단 갈고리형 강섬유 (Fig. 2)를 $v_f=0.75\%$ 의 비율로 혼입하였다. C1-PF, C2-PF 시험체의 경우는, 50 × 1.4 × 0.19 mm

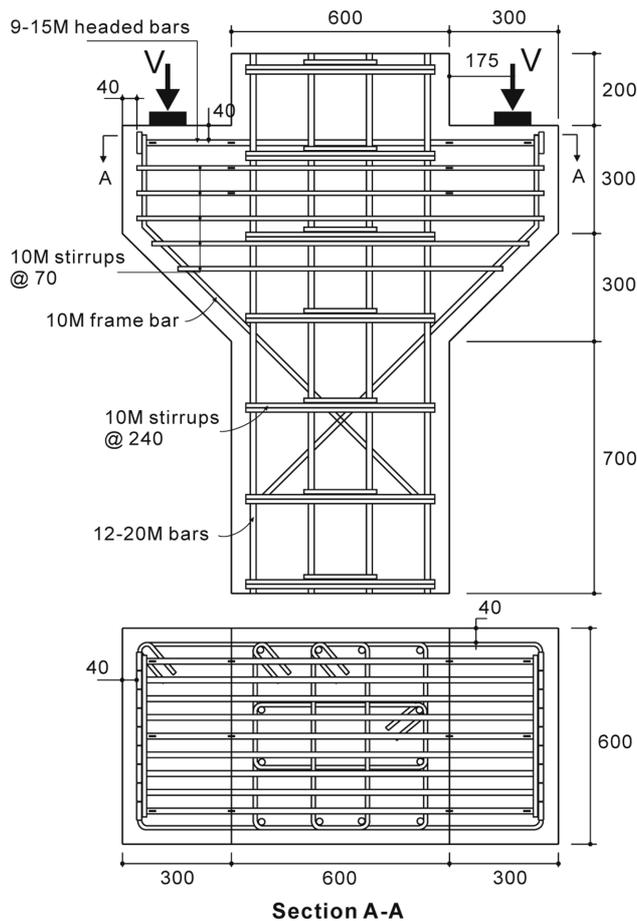
Table 1 Main variables of corbel specimens

Specimen	Loading type	Type of fibers	Fiber contents (%)
C1 series	Vertical	-	-
		Steel	0.75
		Polypropylene	1.00
C2 series	Vertical, Horizontal	-	-
		Steel	0.75
		Polypropylene	1.00

의 크기를 가지고, 형상비가 85이며, 인장강도는 500 MPa인 일자형 폴리프로필렌 섬유를 $v_f=1.00\%$ 의 비율로 혼입하였다.

2.2 재료 특성

모든 시험체의 콘크리트는 150 × 300 mm 공시체로 표준 압축강도, 쪼갬 인장강도 시험이 수행되었으며, 3등분점 재하 시험을 통해 휨강도를 구하였다. Table 2에 시험체에 사용된 콘크리트의 물성이 나타나있다. Table 2에서 보는 바와 같이, 강섬유보강 콘크리트의 압축강도는 섬유가 혼입되지 않은 콘크리트의 압축강도보다 약 20% 높게 나타났다. 이는 섬유 혼입 과정에 의해 배합 시간이 길어졌고, 이로 인해 공기량이 감소되었기 때문으로 판단된다. 섬유 보강 콘크리트의 인성을 결정하기 위해 Moregan et al.¹⁴⁾이 제안한 인성 성능 등급 (toughness performance level)을 사용하였고, 그 결과 C1-SF, C2-SF, C1-PF, C2-PF 시험체 콘크리트의 인성 성능 등급은 level 로 나타났다. 시험체 제작에 사용된 철근의 물성은 Table 3에 정리하였다.



[Note] All units in mm

Fig. 1 Geometry of test specimens and layout of reinforcement and strain gauges

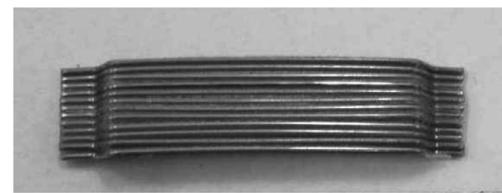


Fig. 2 Picture of hooked steel fibers

Table 2 Concrete properties

Specimen	f'_c (MPa) (st. dev.)	ϵ'_c (mm/mm) (st. dev.)	f_r (MPa) (st. dev.)	f_{sp} (MPa) (st. dev.)
C1, C2	58.1 (1.38)	0.0019 (0.0001)	7.38 (0.54)	4.58 (0.34)
C1-SF, C2-SF	70.2 (2.90)	0.0020 (0.0001)	8.24 (0.74)	7.31 (0.44)
C1-PF, C2-PF	63.0 (2.48)	0.0020 (0.0001)	8.58 (0.30)	4.84 (0.23)

Table 3 Steel properties

Specimen	Designation	Area (mm ²)	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_{sh} (%)	f_u (MPa)
C1, C2 series	10M	100	419	0.23	1.24	634
	15M	200	491	0.34	1.47	657
	20M	300	418	0.23	1.44	618

2.3 시험체 세팅

Fig. 3과 같이 모든 시험체는 11,400 kN 용량의 UTM (universal testing machine)을 이용하여 실험하였다. C1 series 시험체는 폭 101.6 mm, 두께 25.4 mm 길이 520 mm의 베어링 플레이트를 양쪽 기둥 표면에서 175 mm 거리에 위치시키고 (전단지간-깊이 비, $a/d=0.32$), 내민받침에 수직하중만을 재하하였다. C2 series 시험체는 수직하중과 그 수직하중의 20%에 해당하는 수평하중을 동시에 재하하였다. 이 수평하중은 지지하고 있는 부재의 수축, 온도변형, 크리프 변형에 기인한 하중으로, ACI 318-05⁸⁾ 및 콘크리트 구조설계기준 (2007)⁹⁾에서는 내민받침 위에 놓이는 부재가 내민받침 부재축과 평행하면서 인장력을 피하도록 특별한 장치가 마련되어 있지 않은 한 인장 수평하중 N_{uc} 를 수직하중 V_u 의 20% 이상으로 하여야 한다고 규정하고 있다. 수직하중과 수평하중을 동시에 재하하기 위해 2개의 101.6 × 25.4 × 520 mm 베어링 플레이트와 11.3°의 경사각을 가진 강재 스페이서를 용접한 베어링 시스템을 4개 제작하여 설치하였다. 전단지간은 C1 series 시험체와 같이 175 mm로 하였고, 이 베어링 시스템이 서로의 방향으로 미끄러지는 것을 방지하기 위해 I형 강판과 베어링 플레이트 사이에 강판을 설치하였다 (Fig. 3 (b)).

UTM 단조하중을 천천히 가함과 동시에 하중, 처짐, 변형률을 자동으로 측정하였고, 각 하중 단계에서의 균열양상 및 균열폭 역시 기록하였다. 균열폭은 주인장 타이 철근이 위치한 선과, 균열 제어 철근인 스티럽의 중간

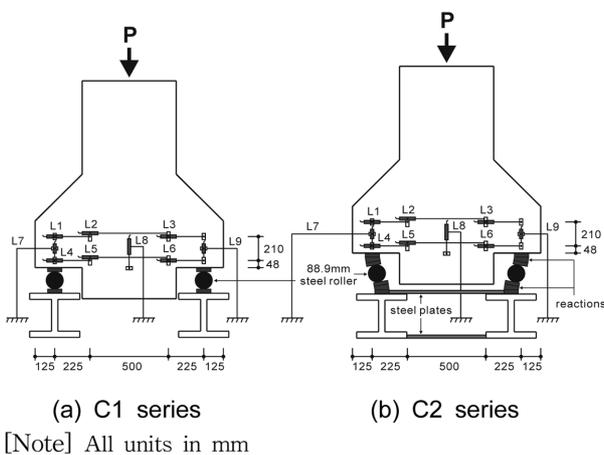


Fig. 3 Test setup and locations of LVDTs

높이의 수평선을 따라 측정하였다. 수직 처짐과 수평 변위를 측정하기 위해 Fig. 3에 나타난 바와 같이 LVDTs (linear voltage differential transformers)를 설치하였다. 또한, Fig. 1과 같이 주인장 타이 철근의 양 끝단과 기둥 표면 위치, 스티럽의 기둥 표면 위치에 스트레인게이지를 부착하여 철근의 변형을 측정하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 하중-처짐 관계

Fig. 4는 총 전단하중과 중앙 처짐과의 관계를 나타낸 것이고, Table 4는 첫 균열 시, 주인장 타이 철근의 최초 항복 시, 극한하중 시, 각각의 전단하중 및 중앙 처짐을 정리한 것이다. C1 series에서는 3,282 kN의 극한전단하중을 보인 C1-SF 시험체가 가장 큰 전단 저항 성능을 보여주었고, C1-PF, C1 시험체의 순으로 보다 낮은 극한전단하중을 보였다. 이는 강섬유와 폴리프로필렌 섬유 혼입으로 인해 C1-SF, C1-PF 시험체의 내하력이 C1 시험체 보다 각각 17%, 6% 증가했다는 것을 나타낸다. 또한, 강섬유와 폴리프로필렌 섬유의 혼입으로 인해 주인장 타이 철근이 최초로 항복했을 때의 전단하중 역시 각각 13%, 2% 증가되었다. 수직하중과 수평하중이 동시에 재하된 C2 series의 경우, 수평하중 때문에 극한 내하력이 C1 series의 경우보다 약 20% 감소하였다. 강섬유와 폴리프로필렌 섬유의 혼입으로 인해 C2 series 시험체의 극한 내하력은 각각 11%, 10% 증가하였고, 주인장 타이 철근의 최초 항복 시점 역시 7%, 3% 지연되었다. 비록 C1-SF, C1-PF, C2-SF, C2-PF 시험체의 콘크리트 압축강도가 C1, C2 시험체의 콘크리트 압축강도보다 더 크게 나타났지만, 내민받침의 강도는 콘크리트의 압괴보다는 주인장 철근의 과대한 항복의 지배를 받기 때문에, C1-SF, C1-PF, C2-SF, C2-PF 시험체의 내하력 증가는 주로 강섬유의 혼입에 기인한다고 볼 수 있다. 육안을 통한 관찰과 스트레인게이지 측정 결과를 통해 측정된 첫 균열 발생 시의 전단하중은 섬유를 혼입함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이는 비록 내민받침의 내하력에 대한 폴리프로필렌 섬유의 영향이 강섬유의 영향보다 작지만

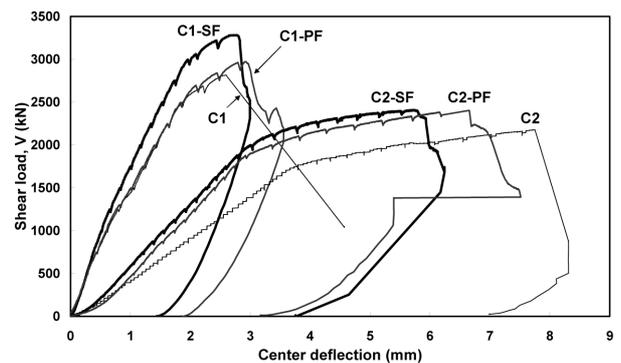


Fig. 4 Shear load versus center deflection responses

Table 4 Summary of test results

	Specimen	V_{cr} (kN)	V_y (kN)	V_u (kN)	Δ_{cr} (mm)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Stiffness (kN/mm)	Ductility (Δ_u/Δ_y)
C1 series	C1	625	2,646	2,817	0.35	2.11	2.60	1,148	1.23
	C1-SF	839 (1.34)*	2,996 (1.13)	3,282 (1.17)	0.43	1.96	2.72	1,410 (1.23)	1.39 (1.13)
	C1-PF	645 (1.03)	2,688 (1.02)	2,973 (1.06)	0.37	2.08	2.92	1,195 (1.04)	1.40 (1.14)
C2 series	C2	210	1,872	2177	0.56	4.49	7.75	423	1.73
	C2-SF	308 (1.47)	2,011 (1.07)	2,408 (1.11)	0.64	3.06	5.74	704 (1.66)	1.88 (1.09)
	C2-PF	250 (1.19)	1,923 (1.03)	2,404 (1.10)	0.72	3.08	6.65	709 (1.68)	2.16 (1.25)

*Rate of increase comparing to the result of the plain concrete corbel specimen (C1, C2) in each series

, 강섬유와 폴리프로필렌 섬유가 내민받침의 2차 보강재의 역할을 함을 나타낸다.

Table 4는 모든 내민받침 시험체의 강성을 보여준다. 하중-처짐 관계 곡선에서 최초 균열점과 주인장 철근의 최초 항복점을 이은 직선의 기울기가 균열 후 강성 (post cracking stiffness)을 나타낸다. Fig. 4와 Table 4에 나타난 바와 같이, 강섬유 및 폴리프로필렌 섬유의 혼입을 통해 C1-SF, C1-PF 시험체는 C1 시험체보다 23%, 4%, C2-SF, C2-PF 시험체는 C2 시험체보다 66%, 68% 증가된 강성을 보여주었다. 또한, C2 series는 C1 series의 약 50%의 강성을 보여주었지만, C2 series의 섬유 혼입을 통한 강성의 증가율은 C1 series 보다 훨씬 더 크게 나타났다.

Table 4는 또한 모든 내민받침 시험체의 연성을 포함하고 있다. 일반적으로 시험체의 연성은 주인장 철근의 최초 항복 시 처짐에 대한 최대 하중에서의 처짐 비로 정량화할 수 있다. 폴리프로필렌 섬유로 보강된 C1-PF, C2-PF 시험체는 강섬유로 보강된 C1-SF, C2-SF 시험체와 유사하거나 다소 증진된 연성을 보여주었다. 또한, C2 series (특히, C2-PF 시험체)는 수평하중의 존재 때문에 매우 큰 철근의 변형과 매우 큰 균열폭을 보였음에도, C1 series보다 훨씬 더 큰 연성을 보였다. 이는 구속효과에 의한 수평 인장력을 받는 실제 구조 환경 하에서 내민받침에 대한 섬유의 혼입은 연성 측면에서 더욱 효과적일 수 있음을 나타낸다.

3.2 철근의 변형률 분포

Fig. 1과 같이 주인장 타이 철근의 양 끝단과 기둥 표면 위치, 스티럽의 기둥 표면 위치에 스트레인게이지를 부착하여 철근의 변형을 측정하였고, Fig. 5는 C1, C2 series 시험체의 전단하중과 각 위치에서의 변형률 분포 관계를 나타내고 있다. 첫 균열이 발생하기 전에 각 위치에서의 변형률은 거의 유사한 양상을 보이다가 첫 균열이 발생하고 나서 기울기가 급격하게 감소하였다. 모든 시험체의 주인장 타이 철근은 극한하중 근처에서 모두 항복하였고, 그 후에 균열 제어 철근인 스티럽도 항복하기 시작하였다. 그러나, C2 series의 경우, 모든 스티럽이 항복하고 매우 큰 변형률을 보인 반면, C1 series의 경우는 극한하중에서 스티럽이 막 항복 변형률에 도달한

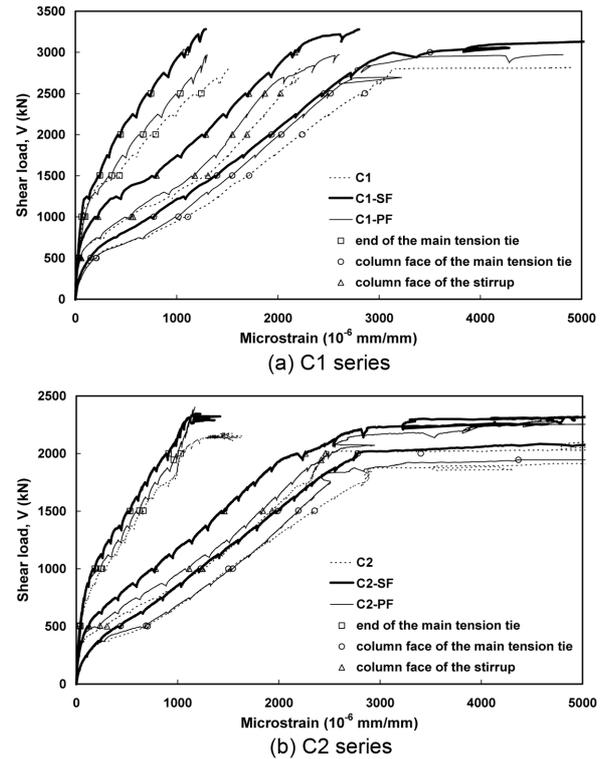


Fig. 5 Strains in the main tension tie and the secondary crack control reinforcement

것으로 나타났다. Fig. 5를 통해, 강섬유와 폴리프로필렌 섬유를 혼입함에 따라 주인장 철근이 최초 항복했을 때와 첫 균열이 발생했을 때의 전단하중이 증가함을 볼 수 있다.

모든 시험체의 주인장 타이 철근은 헤드 바가 사용되었다. 이 헤드 바 양 끝단에서 측정된 변형률을 살펴보면, 초기에 변형이 거의 나타나지 않다가 헤드 부근에 균열이 발생하면서 변형률이 증가하기 시작하였고, 항복 변형률의 약 50% 정도의 최대 변형률을 나타내었다. 이처럼 주인장 타이 철근으로 사용된 헤드 바는 뛰어난 정착을 보여주었고, 헤드 근처에서의 뚜렷한 인장 변형률을 나타냈다. 따라서, 헤드 바를 주인장 타이 철근으로 사용하는 것이 ACI 318-05⁸⁾ 및 콘크리트 구조설계기준 (2007)⁹⁾에서 규정하고 있는 횡방향 철근에 용접하여 정착하는 방법 또는 수평 루프를 통하여 정착하는 방법보다 설치가 쉽고, 철근 밀집을 해소할 수 있다는

면에서 더 효율적일 것이라 판단된다.

3.3 균열 양상

Fig. 6은 모든 시험체의 극한상태에서의 균열 양상을 나타내고 있다. 모든 시험체의 첫 균열은 내민받침과 기둥의 경계에서 발생하였고, 스티럽의 중간 위치까지 진전하였다. 두 번째 균열은 배어링 플레이트 안쪽 모서리 부근에서 발생하였고, 기둥과 내민받침의 경사면의 경계까지 진전하여 파괴 시까지 가장 주요한 균열을 형성하였다. 첫 균열 하중은 강섬유 혼입에 의해 C1 series는 34%, C2 series는 47% 증가하였고, 폴리프로필렌 섬유 혼입에 의해 C1 series는 6%, C2 series는 12% 증가하여 첫 균열이던 효과는 강섬유 혼입이 더 효과적인 것으로 나타났다. 또한, 강섬유 혼입비가 0.5%, 0.75%로 증가할 때, 각각 6%, 12%의 첫 균열 하중 증가를 보였다.

모든 시험체는 초기에 휨 균열 양상을 보이다가 경사 전단 균열의 양상을 보이며 중국 파괴되는 보-전단 파괴 모드 (beam-shear failure mode)를 나타내었고, 이는 균열 제어 스티럽을 가진 내민받침은 보-전단 파괴모드를 나타내는 경향이 있다는 이전 연구자들^{5, 13)}의 연구 결과와 부합한다. 그러나, C2 series의 경우는 수평하중의 영향 때문에 C1 series의 경우와는 다소 다른 파괴 형상을 보였다. 모든 C1 series 시험체의 주인장 타이 철근은 파괴 시에 충분히 항복하였지만, 파괴 시 내민받침 스티럽의 용력은 막 항복용력에 도달하였다. 따라서, 휨 균열이 충분히 생성되었지만, 균열폭이 크게 나타나지 않았다. 반면 C2 series 시험체의 경우는 주인장 타이 철근과 스티럽이 모두 충분히 항복한 후에 내민받침의 경사부와 기둥의 경계에서 콘크리트의 압괴가 발생하여, 파괴될 때까지 매우 큰 휨 균열폭을 나타내었다.

Figs. 7과 8은 모든 시험체의 균열 수와 최대 균열폭을 각각 도시하고 있다. C1 series의 경우, 강섬유와 폴리프로필렌 섬유의 혼입으로 인해 설계하중의 60%로 가정한 사용하중에서의 균열폭과 균열 수가 감소되었다. 주인장 타이 철근이 배근된 위치에서의 최대 균열폭은 C1, C1-SF, C1-PF 시험체가 각각 0.34, 0.20, 0.16 mm를 나타내었

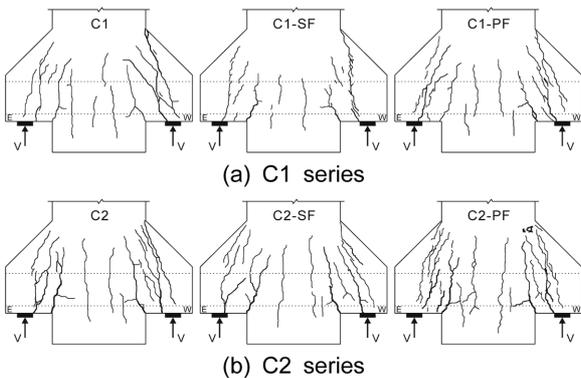


Fig. 6 Crack patterns at peak load

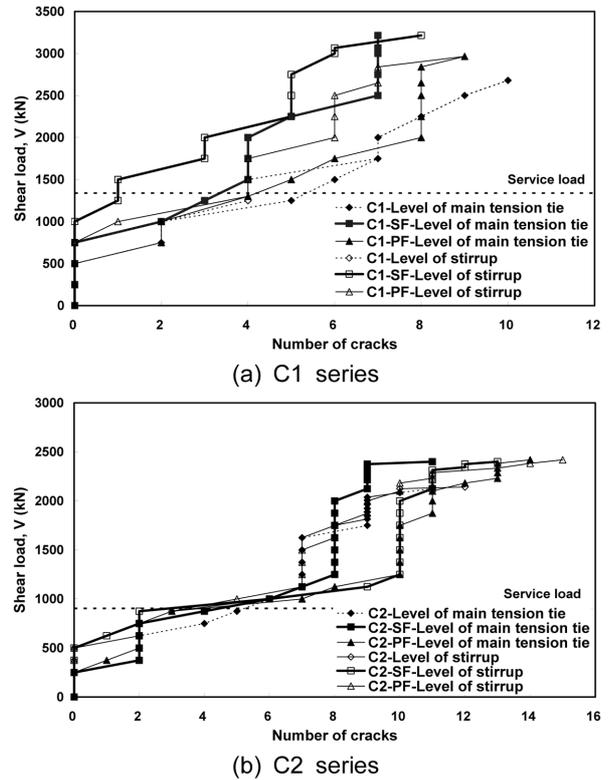


Fig. 7 Shear load versus number of cracks

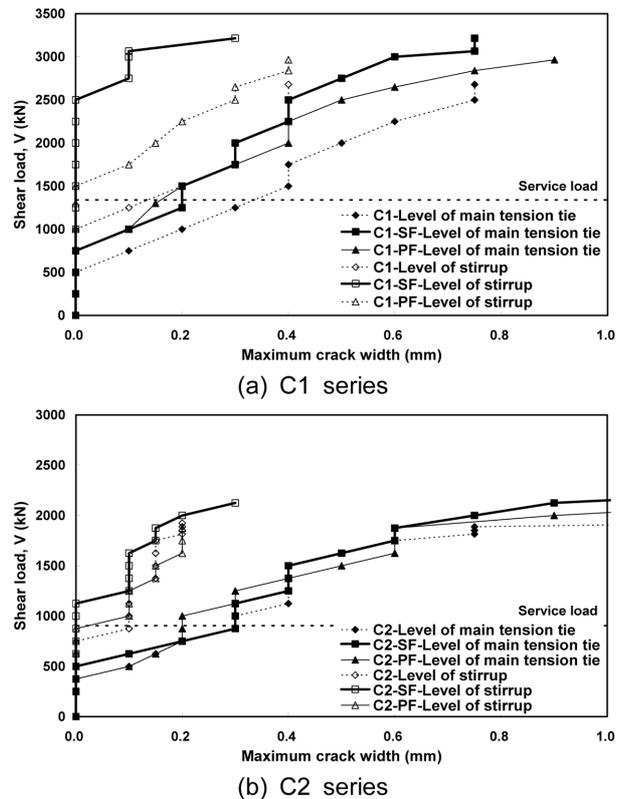


Fig. 8 Shear load versus maximum crack width

고, 균열 수는 각각 5, 3, 4개를 나타내었다. C2 series의 경우 역시 강섬유와 폴리프로필렌 섬유가 사용하중 하에서의 균열폭과 균열 수를 감소시켜주었다. 이를 통해 심

각한 부식 환경 하에서 스테인레스 강섬유와 폴리프로필렌 섬유가 내민받침의 내구성을 향상시키고 철근 부식을 감소시켜줄 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 예측모델과의 비교

본 연구에서 수행된 실험 결과를 ACI 318-05⁸⁾ 규준식 및 여러 연구자들^{2-3,6,11-13)}이 제안한 제안식과 비교해보았고, 그 비교 결과는 Table 5에 나타내었다. 평균과 변동계수 (COV, coefficients of variation)는 각각의 예측모델이 고려하고 있는 변수를 바탕으로 계산되었다. 예를 들어, Fattuhi²⁾의 예측모델은 섬유의 영향은 고려하고 있지만 수평하중의 영향은 고려하고 있지 않기 때문에, 평균과 변동계수는 섬유가 혼입되었고 수직하중만 재하된 시험체 (C1, C1-SF, C1-PF 시험체)를 가지고 계산되었다. 스트럿-타이 모델⁷⁾, ACI 318-05⁸⁾ 규준식, Solanki et al.¹¹⁾의 예측모델, Russo et al.¹³⁾의 예측모델은 수평하중의 영향을 고려하고 있지만, 섬유의 영향은 고려하고 있지 않다. Hagberg¹²⁾의 예측모델과 Foster et al.⁶⁾의 예측모델은 수평하중의 영향을 고려하지 않고 있고, 섬유 혼입의 영향 역시 반영되어 있지 않다.

단순 스트럿-타이 모델 (simplified strut-and-tie model)은 ACI 318-05⁸⁾, CSA A23.3-04¹⁰⁾, 콘크리트 구조설계기준 (2007)⁹⁾의 부록에 채택되어 있다. 이 모델에서는 내민받침 내의 하중 흐름은 압축력을 받는 콘크리트 스트럿 (strut), 인장력을 받는 인장 타이 (tie), 스트럿과 타이 를 연결하는 절점 (node)으로 구성되는 단순 트러스로 이상화시킬 수 있다고 가정한다. 또한, 이 단순 스트럿-타이 모델은 균등 배근된 최소 균열 제어 철근을 필요로 하는데, 실제 설계에서는 이 추가적인 균열 제어 철근의 기여도를 무시하고 있고, 단순히 사용하중 하에서 균열을 제어한다고 가정하고 있다. 따라서, 이 모델은 Table 5의 결과와 같이 매우 보수적인 예측을 하게 된다.

Mitchell et al.⁷⁾은 깊은 보에 대한 실험 분석 결과 균

열 제어 철근이 내하력에 기여하는 부분이 상당히 크다고 언급하고 정밀 스트럿-타이 모델 (refined strut-and-tie model)을 제안하였다. 이 모델은 Fig. 9와 같이 주인장 타이 철근과 균열 제어 철근이 모두 항복한 후에 내민받침이 중국 파괴된다고 가정한다. Fig. 9에서 타이 (BB')는 균등 배근된 균열 제어 철근을 의미하고, 그 균열 제어 철근의 중심에 위치된다고 가정한다. 이 예측모델을 다른 예측모델과 비교하여 보면, Table 5에 나타난 바와 같이, 단순 스트럿-타이 모델보다 더 정확한 예측을 하고 있고, 수평하중을 받는 C2 시험체에 대해서는 ACI⁸⁾, Solanki et al.¹¹⁾, Russo et al.¹³⁾ 예측모델보다 더 정확하고 보수적인 예측을 하고 있는 것으로 나타났다. 그러나, 이 정밀 스트럿-타이 모델은 섬유 혼입의 영향을 고려하고 있지 않기 때문에 섬유가 혼입된 내민받침의 강도를 정확히 예측할 수 있는 새로운 스트럿-타이 모델의 개발이 필요하다고 판단된다.

ACI 318-05⁸⁾와 콘크리트 구조설계기준 (2007)⁹⁾에서 규정하고 있는 예측과정은 전단파찰에 의한 파괴와 철근의 항복에 의한 파괴를 모두 고려하여 내민받침의 전단력을

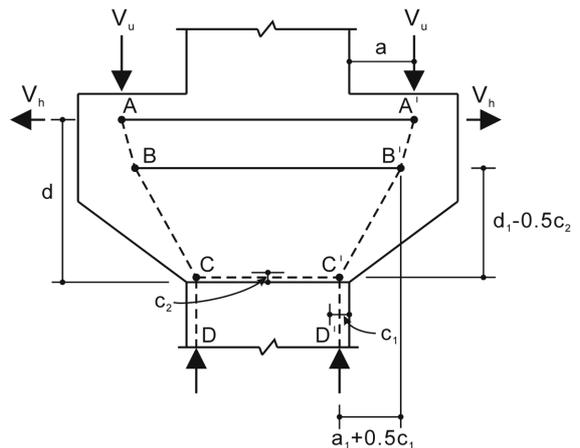


Fig. 9 Refined strut-and-tie model

Table 5 Test-to-predicted ratios for all corbel specimens

Specimen	V_{test} (kN)	Simplified STM ^{a)}	Refined STM ^{a)}	ACI ^{a)}		Solanki ^{a)}	Hagberg ^{b)}	Foster ^{b)}	Russo ^{a)}	Fattuhi ^{c)}	
				Shear friction	Flexure					Flexural model	Truss model
C1	2,817	1.26	1.03	1.54	1.04	0.96	1.00	1.36	1.03	1.04	1.03
C1-SF	3,282	1.43	1.16	1.80	1.20	0.92	1.13	1.58	1.14	0.97	1.01
C1-PF	2,973	1.31	1.07	1.63	1.09	0.93	1.04	1.43	1.06	0.93	0.97
C2	2,177	1.41	1.12	1.19	0.85	0.78	2.43	1.05	0.86	0.80	0.80
C2-SF	2,408	1.53	1.22	1.32	0.93	0.71	2.64	1.16	0.90	0.71	0.74
C2-PF	2,404	1.54	1.23	1.32	0.93	0.79	2.66	1.16	0.92	0.75	0.78
Mean		1.33	1.08	1.37	0.94	0.87	1.00	1.36	0.94	0.98	1.00
COV		0.054	0.041	0.128	0.102	0.102	0.000	0.000	0.093	0.046	0.027

^{a)}The means and coefficients of variation were calculated based on just plain concrete corbel specimens (C1, C2)

^{b)}The means and coefficients of variation were calculated based on just plain concrete corbel specimens subjected to only vertical loads (C1)

^{c)}The means and coefficients of variation were calculated based on the corbel specimens subjected to only vertical loads (C1, C1-SF, C1-PF)

계산하도록 하고 있다. 실제 실험 결과와는 달리, Table 5에 나타난 계산 결과, 모든 시험체는 전단 마찰 모드에서 파괴되는 것으로 예측되었다. 또한, 철근 항복에 의한 ACI⁸⁾ 기준식은 실험 결과와 대체적으로 잘 부합하는 것으로 나타났지만, 수직하중과 수평하중을 동시에 받는 C2 시험체의 강도를 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. Solanki et al.¹¹⁾의 예측모델도 수평하중을 받는 내민받침을 비롯하여 전체적으로 비보수적인 예측을 하였다. Hagberg¹²⁾이 제안한 예측모델은 수직하중만을 받는 시험체에 대해서는 매우 정확한 예측 결과를 나타내었지만, 수평하중을 고려할 수 있도록 예측식의 개선이 필요하다. 스트럿-타이 메커니즘의 평형 조건을 기본으로 하고 연화 근사 구성 법칙 (softening approximate constitutive law)을 고려한 Russo et al.¹³⁾의 예측모델은 다소 큰 변동계수를 보였고, C2 series에 대해 과대평가된 강도를 나타내었다. 이는 간편한 예측모델을 만들기 위해 예측식의 몇 개 항이 실제 재료값이 아닌 설계기준에서 제안하는 식을 이용하여 계산되기 때문이다. 섬유 혼입 효과를 고려한 Fattuhi²⁾의 두 가지 예측 모델 (휨 모델, 트러스 모델)은 매우 정확한 예측 결과를 보여주었고, 실험값/예측값 비의 평균과 변동계수가 각각 1.00, 0.027로 나타난 트러스 모델이 실험값/예측값 비의 평균과 변동계수가 각각 0.98, 0.046으로 나타난 휨 모델 보다 더 정확하고 보수적인 것으로 나타났다. 그러나, 이 Fattuhi²⁾의 두 예측모델은 섬유 종류를 고려하지 않고 있고, 콘크리트의 잔류인장강도를 반영하지 않고 있어 부정확한 예측 가능성이 있다.

4. 결 론

강섬유와 폴리프로필렌 섬유로 보강된 고강도콘크리트 내민받침에 수직하중 및 수직·수평하중을 재하한 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 강섬유 및 폴리프로필렌 섬유의 혼입에 따라 고강도콘크리트 내민받침의 내하력, 강성, 연성이 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 폴리프로필렌 섬유로 보강된 고강도콘크리트 내민받침은 강섬유로 보강된 내민받침보다 다소 낮은 내하력을 보였지만, 수평하중 하에서 더 큰 연성을 보였다.
- 3) 수직하중의 20%에 해당하는 수평하중을 추가로 재하한 결과 극한강도는 약 20% 감소되었지만, 연성은 약 40% 증가하였다.
- 4) 모든 고강도콘크리트 내민받침은 보-전단 파괴 모드를 보였고, 수평하중을 받는 내민받침의 경우는 주인장 타이 철근과 균열 제어 철근이 모두 과대하게 항복한 후에 콘크리트의 압축파괴가 발생하여 매우 큰 휨 균열폭을 보여주었다.
- 5) 강섬유와 폴리프로필렌 섬유의 혼입은 고강도콘크리트

리트 내민받침의 균열폭과 균열 수를 감소시켰다, 심각한 부식 환경 하에서 스테인레스 강섬유 혹은 폴리프로필렌 섬유로 보강된 고강도콘크리트 내민받침은 보다 향상된 내구성, 강화된 부식 저항성을 가질 것으로 판단된다.

- 6) 균열 제어 철근이 내하력에 기여하는 부분을 고려한 Mitchell et al.의 정밀 스트럿-타이 모델은 가장 정확하고 보수적인 예측 결과를 보여주었고, 섬유 혼입의 영향을 고려할 수 있는 새로운 스트럿-타이 모델의 개발이 필요하다.
- 7) 섬유 혼입을 고려한 Fattuhi의 트러스 모델은 매우 정확한 예측 결과를 보여주었고, 실험값/예측값 비의 평균과 변동계수가 각각 1.00, 0.027로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업 (Center for Concrete Corea, 05-CCT-D11)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Fattuhi, N. I., "Strength of SFRC Corbels Subjected to Vertical Load," *ACI Structural Journal*, Vol. 116, No. 3, 1990, pp.701~718.
2. Fattuhi, N. I., "Strength of FRC Corbels in Flexure," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 2, 1994, pp. 360~377.
3. Fattuhi, N. I., "Reinforced Corbels Made with Plain and Fibrous Concretes," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 5, 1994, pp. 530~536.
4. Mitchell, D., Cook, W. D., Alameer, M., and Fu, Z., "Strategic Use of Fibers for Improved Structural Performance," *In Proceedings of the Third International Conference on Construction Materials - performance, innovations and structural implications, CONMAT'05* (CD-Rom), Vancouver, Canada, 2005.
5. Yong, Y. K. and Balaguru, P., "Behavior of Reinforced High-Strength-Concrete Corbels," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 4, 1994, pp. 1182-1201.
6. Foster, S. J., Powell, R. E., and Selim, H. S., "Performance of High-Strength Concrete Corbels," *ACI Structural Journal*, Vol. 93, No. 5, 1996, pp. 555~563.
7. Mitchell, D., Cook, W. D., Uribe, C. M., and Alcocer S. M., "Experimental Verification of Strut-and-Tie Models," *Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models*, ACI SP-208, 2002, pp. 41~62.
8. American Concrete Institute (ACI), "Building code requirements for structural concrete and commentary," *ACI 318-05 and ACI318R-05*, Farmington Hill, Mich., 2005, 430 pp.
9. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준 해설," 한국콘크리트학회, 2007, 523 pp.
10. Canadian Standards Association (CSA), "Design of concrete

- structures,” *CSA A23.3-04*, Mississauga, Ont., Canada, 2004, 249 pp.
11. Solanki, H. and Sabnis, G. M., “Reinforced Concrete Corbels-Simplified,” *ACI Structural Journal*, Vol. 84, No. 5, 1987, pp. 428-432.
 12. Hagberg, T., “Design of Concrete Brackets on the Application of the Truss Analogy,” *ACI Journal Proceedings*, Vol. 80, No. 1, 1983, pp. 3-12.
 13. Russo, G., Venir, R., Pauletta, M., and Somma, G., “Reinforced Concrete Corbels-Shear Strength Model and Design Formula,” *ACI Structural Journal*, Vol. 103, No. 1, 2006, pp. 3-10.
 14. Morgan, D. R., Mindess, S., and Chen, L., “Testing and Specifying Toughness for Fiber Reinforced Concrete and Shotcrete,” *Proc., 2nd Univ.-Industry Workshop on Fiber-Reinforced Concrete and Other Advanced Composites -Fiber-Reinforced Concrete-Modern Developments*, N. Banthia and S. Mindess, ed., Toronto, pp. 29-50.

요 약 본 연구에서는 강섬유 혹은 폴리프로필렌 섬유로 하이브리드 보강되고, 수직하중과 수평하중을 받는 고강도 콘크리트 내민받침을 제작하고 실험하였다. 실험 결과, 강섬유, 폴리프로필렌 섬유를 혼입함에 따라 내하력, 강성, 연성, 균열폭, 균열 수 측면에서 고강도콘크리트 내민받침의 성능은 향상되었다. 폴리프로필렌 섬유로 보강된 고강도콘크리트 내민받침은 강섬유로 보강된 내민받침보다 다소 낮은 내하력을 보였지만, 수평하중 하에서 더 큰 연성을 보였다. 또한, 주인장 타이 철근으로 사용된 헤드 바의 헤드는 뛰어난 정착을 보여주었다. 실험 결과를 설계기준의 규준식 및 여러 연구자들이 제안한 예측모델과 비교한 결과, 정밀 스트럿-타이 모델이 수평하중 하에서 가장 정확하고 보수적인 예측 결과를 보여주었고, Fattuhi가 제안한 트러스 모델은 섬유 보강 고강도콘크리트 내민받침의 강도를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 내민받침, 강섬유, 폴리프로필렌 섬유, 고강도콘크리트, 헤드 바