

탄소섬유시트로 구속된 RC 기둥의 일축압축 거동

Uniaxial Compression Behavior of RC Columns Confined by Carbon Fiber Sheet Wraps

한 상 훈* 홍 기 남**
Han, Sang-Hoon Hong, Ki-Nam

Abstract

External confinement by CFS (Carbon Fiber Sheet) is a very effective retrofit method for the reinforced concrete columns subject to either static or seismic loads. For the reliable and cost-effective design of CFS, an accurate stress-strain model is required for CFS-confined concrete. In this paper, uniaxial compression test on short RC column with square section was performed. To evaluate the effect of confinement on the stress-strain relationship of CFS-confined concrete, CFS area ratio and tie area ratio are considered. Based on the experimental results, a stress-strain model is proposed for concrete confined by CFS wraps. In the development of the model, the method to compute the actual hoop strains in CFS jackets at the rupture was examined and resolved. Overall, the results of the model agree well with test data.

요 지

CFS로 둘러싸서 외부에서 구속하는 방법은 정적 혹은 지진하중을 받는 철근콘크리트 기둥을 보강하는데 매우 효과적이다. 이러한 CFS 보강법의 신뢰성 있고 경제적인 설계를 위해서는 정확한 CFS 구속콘크리트의 응력-변형률 모델이 필요하게 된다. 본 연구에서는 사각단면을 갖는 단주 RC 기둥에 대해서 일축압축 실험을 실시하였다. CFS 면적비와 띠철근 면적비가 CFS로 구속된 콘크리트의 응력-변형률관계에 대한 구속효과를 평가하기 위한 실험변수로서 고려되었다. 실험결과를 기초로 CFS로 구속된 콘크리트에 대한 새로운 응력-변형률 모델을 제안하였다. 제안 모델에서는 파괴 시 CFS에 발생하는 변형률을 계산하기 위한 방법이 검토되었으며 적절하게 고려되었다. 그 결과, 제안모델은 실험결과를 정확하게 예측하였다.

Keywords : Carbon fiber sheet, Confinement effect, Stress-strain model, RC column

핵심 용어 : 탄소섬유시트, 구속효과, 응력-변형률 모델, RC기둥

* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 정희원, 충북대학교 토목공학과 연구원, 공학박사

E-mail : shhan@chungbuk.ac.kr 010-4466-3478

•본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내
주시면 2005년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

철근콘크리트(reinforced concrete, 이하 RC) 구조물은 재료, 시공, 환경, 구조적인 요인 등에 의해 시공 직후 또는 사용 중 시간이 경과되면서 내력저하 등 여러 가지 구조적인 성능이 저하되는 경우가 빈번하다. 따라서 적절한 시기에 보수보강이 절대적으로 요구된다. 기존의 보강방법으로는 강관보강법, 단면증설법, 에폭시그라우팅 방법이 많이 이용되어 왔다. 그러나 이 공법들은 시공이 복잡하고 많은 노력이 요구되어 최근에는 합성섬유를 이용한 보강공법이 널리 이용되고 있다. 합성섬유는 단위 무게당 높은 강도, 시공의 용이성, 일체성 확보의 용이, 내부식성 등으로 인하여 강관보강법보다 선호하는 공법으로 인식되고 있으며 지난 10여년간 국내외에서는 이를 이용한 구조물의 보수보강을 철근콘크리트 연구의 중요한 분야로 인식하여 많은 연구가 수행되었다.

특히, 합성섬유로 횡보강된 콘크리트의 구속효과에 대한 연구로 Lam and Teng⁽¹⁾은 기존의 문헌자료로부터 76개의 원형실험체에 대한 실험데이터를 수집하여 횡방향변형률 및 구속효과를 정량적으로 평가하여 합성섬유로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델을 제안하였다. 또한, 그들은 제안모델을 사각기둥에도 적용할 수 있도록 최대압축강도 및 최대변형률을 산정하는 식에 단면형상을 고려할 수 있는 파라미터를 추가시켜 모델을 확장하였다⁽²⁾. 그리고, Hosotani 등⁽³⁾은 띠철근이 배근된 원형기둥과 사각기둥에 탄소섬유(Carbon fiber sheet, 이하 CFS)를 횡보강한 실험체를 대상으로 일축압축 실험을 실시하고 실험결과를 회귀분석하여 CFS로 횡보강된 기둥의 응력-변형률 모델을 제안하였다. 국내에서는 이정윤과 정훈식⁽⁴⁾이 원형기둥에 대한 기존 실험데이터를 수집하여 실험체의 크기효과를 고려할 수 있는 합성섬유로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델을 제안하였고, 천성철 등⁽⁵⁾은 실험결과로부터 얻어진 합성섬유의 횡변형률을 Mander 등⁽⁶⁾의 횡방향철근 모델에 적용하여 합성섬유로 보강된 콘크리트의 구속효과를 평가하였다.

합성섬유로 보강한 콘크리트의 구속효과에 대하여 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔지만, 기존 제안식의

대부분은 균일한 구속압이 작용하는 원형기둥에 대해서 실시 되어왔다. 또한, 현장에서 보강되는 기둥들에는 기본적으로 띠철근이 배근되어 있으나 기존의 연구 대부분은 무근 콘크리트를 대상으로 실시되어 띠철근이 합성섬유로 구속된 콘크리트의 거동에 주는 영향 등이 정확하게 평가되지 못했다. 이에 본 연구에서는 띠철근을 갖는 사각기둥을 CFS로 횡보강하고 이에 대한 일축압축 실험을 실시하여 사각기둥에 대한 CFS 보강효과를 규명한다. 또한, 실험결과를 기초로 CFS 구속콘크리트의 응력-변형률 모델을 제안하여 경제적이며 안전한 보강설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험체 제원

본 실험의 실험체는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 200 mm×200 mm의 사각단면이며 높이는 600 mm이다.

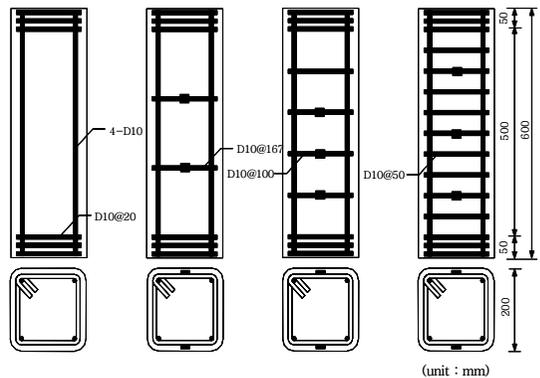


Fig. 1 실험체의 철근배근 및 게이지 부착위치

실험체명은 Table 1에 나타난 것과 같이 본 실험의 실험변수인 띠철근량과 CFS 보강량에 따라 명명하였다. 실험체의 구성은 CFS로 횡보강된 RC 기둥의 성능개선 효과를 분석하기 위해 Fig. 1에 나타난 것과 같은 실험체를 각각 4개씩 총 16개 제작하였다. 콘크리트의 압축강도 f_{ck} 는 기존의 구조물이 설계될 당시의 일반적인 설계강도 21MPa로 하였으며, 100×200mm 실린더 공시체의 압축강도 실험결과 그 평균이 19MPa로 나타났다.

Table 1 실험체 제원

실험체명	콘크리트 압축강도 (MPa)	띠철근 간격 (mm)	띠철근비 ρ_{tie} (%)	CFS 보강계수	CFS 보강비 ρ_{cfs} (%)	모서리 반경 (mm)
SOCF0	19	-	0.00	0	0.00	30
SOCF1				1	0.12	
SOCF2				2	0.24	
SOCF4				4	0.48	
S1CF0		167	0.50	0	0.00	
S1CF1				1	0.12	
S1CF2				2	0.24	
S1CF4				4	0.48	
S2CF0		100	0.84	0	0.00	
S2CF1				1	0.12	
S2CF2				2	0.24	
S2CF4				4	0.48	
S3CF0		50	1.67	0	0.00	
S3CF1				1	0.12	
S3CF2				2	0.24	
S3CF4				4	0.48	

실험체의 종방향띠철근과 띠철근으로는 SD40의 D10 을 사용하였으며, 횡보강을 위해 사용된 탄소섬유는 두께 0.12, 인장강도 3480 MPa, 그리고 탄성계수 2.3×10^5 MPa의 재료적 특성을 갖는다. 실험체 중앙 부에서의 띠철근 간격은 실험변수에 따라 변화시켰으며, 상·하단부 50 mm의 구간에는 20 mm간격으로 실험변수와 관계없이 조밀하게 배근하여 실험과정에서 발생할 수 있는 단부파괴를 방지하였다.

콘크리트 타설 28일이 경과한 후 CFS의 보강 실험체는 하중재하 시 모서리에서의 응력집중을 피하기 위하여 모서리반경 30 mm로 모따기를 실시하였다. 그리고 콘크리트 표면은 레이턴스를 완전히 제거하고 굵은 골재의 조직이 충분히 나타날 정도로 그라인더를 사용하여 갈아내었다. 표면처리 작업이 종료된 후에는 살수 후 철술을 이용하여 먼지를 완전히 제거하고 물로 세척하였다. 콘크리트 표면의 물기가 완전히 건조된 이후에는 CFS보강을 위하여 프라이머를 CFS접착 하루 전에 도포하여 콘크리트 조직내로 충분히 스며들 수 있도록 도포하였다. CFS보강 시에는 CFS량 변수에 따라 슈트를 부착하고, 띠철근의 배근과 같이 단부에서의 파괴를 방지하기 위하여 상·하면으로부터 50 mm 구간에 CFS를 2겹씩 추가적으로 보강한 후 7일간의 양생을

거쳐 실험을 실시하였다. 실험을 수행하기 직전에는 압축 하중 증가에 따른 CFS의 횡변형률을 측정하기 위해 변형률 게이지를 양쪽 면에 3개씩 총 6개를 CFS면에 횡방향으로 부착하였다.

2.2 실험방법

CFS로 보강한 실험체의 압축실험을 위해 Fig. 2와

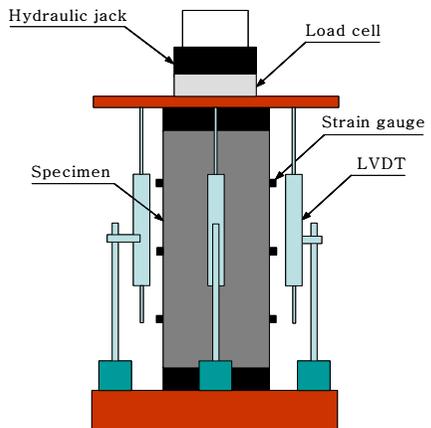


Fig. 2 실험장비 구성도

같이 시험장비를 구성하였으며, 하중은 가력프레임에서 200tonf 용량의 유압장치를 이용하여 파괴 시까지 재하 하였다.

하중은 변위조절방법으로 분당 약 1.0mm의 속도로 재하 하였다. 또한 실험체의 변위는 각 면에 1개씩 총 4개의 LVDT를 설치하여 각 하중단계에서의 변위를 측정하였다. 데이터 수집은 데이터로거를 사용하고 컴퓨터 자동데이터수집 프로그램을 이용하여 작용하중, 처짐, 띠철근과 CFS의 변형률을 획득하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파괴양상

무근 실험체 SOCF0는 단부에서 시작된 균열이 하중의 증가와 함께 중앙부로 진전하고 최대하중에 도달하면서 파열음을 동반한 급작스런 파괴를 일으켰다. 띠철근이 보강된 S1CF0, S2CF0, 그리고 S3CF0 실험체의 경우에는 띠철근량이 증가할수록 최대하중 이후의 하중감소 속도가 감소하였으며 주철근의 좌굴이 제어되면서 구속콘크리트의 손상정도가 감소하였다.

CFS로 보강된 실험체는 주철근의 변형률이 항복변형률에 도달한 후 CFS의 변형률이 크게 증가하기 시작하였으며 최대강도에 도달하기 직전부터 보강구간의 일부분에서 약간의 파음을 동반하면서 그 구간의 변형률값이 다른 위치에서의 변형률에 비해 약 1.5배 이상 크게 증가하였다. 최대하중에 도달한 이후에는 엄청난 파열음과 함께 급작스럽게 그 부분의 슈트가 찢어지면서 실험이 종료되었다. Fig. 3에는 $\rho_{cfs}=0.12\%$ 와 $\rho_{cfs}=0.48\%$ 로 CFS 보강량 증가에 따른 파괴형상을 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 CFS의 보강량이 증가할수록 구속콘크리트의 손상이 크게 발생하였다. 이는 CFS보강량이 증가할수록 축방향 변위가 증가하게 됨으로써 그 만큼 구속콘크리트의 손상이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 또한 파괴 시에도 CFS의 보강량이 증가할수록 흡수된 에너지가 증가하면서 파괴가 더욱 취성적이며 실험장치 주변으로 콘크리트 조각들이 날아갈 정도로 큰 파괴력을 보였다. CFS보강량이 동일



(a) $\rho_{cfs}=0.12\%$



(b) $\rho_{cfs}=0.48\%$

Fig. 3 보강량 증가에 따른 파괴양상

한 실험체에서는 띠철근량이 감소할수록 주철근의 좌굴이 심각하게 발생하고 이로 인해 CFS가 조기에 찢어지는 현상이 발생하였다. CFS로 보강된 실험체의 파괴형상을 분석한 결과 CFS가 찢어지는 부분에서 주철근의 좌굴이 크게 발생한 것이 확인되었으며 주철근의 좌굴정도가 CFS보강효과에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이는 주철근이 없는 무근콘크리트 기둥을 대상으로 제안된 식으로 보강성능을 평가하는 경우 띠철근비에 따라서 과대평가하는 결과를 초래할 수도 있을 것으로 판단된다.

3.2 강도특성

실험결과 Table 2에 나타난 것과 같이 띠철근 및 CFS의 보강량이 증가할수록 최대응력 및 최대변형률이 크게 증가하였다. CFS로 보강되지 않은 실험체에서는 띠철근비가 증가함에 따라 19.5~37.6%의 하중증가를 나타내었다. 그리고 띠철근이 없고 CFS로만 보강된 실험체에서는 CFS 보강량이 증가할수록 41.9~132.4

Table 2 실험결과

실험체명	극한상태					
	최대응력 f_{cc} (MPa)	축방향 변형률 $\overline{\epsilon}_{cc}$	띠철근 변형률 $\overline{\epsilon}_{st}$	CFS 변형률 $\overline{\epsilon}_{cfs}$	체적변형률 $\overline{\epsilon}_{cc} + 2\overline{\epsilon}_{cfs}$	팽창률 $-(\overline{\epsilon}_{cfs}/\overline{\epsilon}_{cc})$
SOCF0	16.15	0.002	-	-	-	-
SOCF1	22.65	0.008	-	-0.006	-0.004	0.75
SOCF2	27.49	0.014	-	-0.005	0.004	0.36
SOCF4	37.54	0.022	-	-0.007	0.008	0.32
S1CF0	19.30	0.004	-0.0016	-	-	-
S1CF1	23.34	0.008	-0.0023	-0.005	-0.002	0.63
S1CF2	28.68	0.016	-0.0033	-0.008	0	0.50
S1CF4	36.78	0.027	-0.0035	-0.008	0.011	0.30
S2CF0	19.67	0.005	-0.0040	-	-	-
S2CF1	24.04	0.011	-0.0028	-0.005	0.001	0.45
S2CF2	29.23	0.021	-0.0050	-0.008	0.005	0.38
S2CF4	42.18	0.036	-0.0066	-0.010	0.016	0.28
S3CF0	22.23	0.005	-0.0047	-	-	-
S3CF1	28.83	0.020	-0.0049	-0.008	0.004	0.40
S3CF2	31.56	0.022	-0.0048	-0.008	0.006	0.36
S3CF4	42.56	0.038	-0.0072	-0.009	0.020	0.24

%의 응력증가를 보여 띠철근에 의한 구속보다 CFS에 의한 구속효과가 월등하게 크게 나타났다. 한편, 띠철근과 CFS로 동시에 보강된 실험체에서는 띠철근비가 증가할수록 최대응력이 증가하였으나 띠철근에 의한 영향은 미비하며 주로 CFS보강량에 따라 최대응력이 결정되는 경향을 나타내었다. 예를 들면 CFS의 보강비가 0.12%이고 띠철근비가 0.5%, 0.84%, 2.67%로 증가할 때 최대응력 증가율은 21.2~29.7%로 나타나 최대응력에 미치는 띠철근비의 영향이 매우 미소한 것을 알 수 있었다.

Fig. 4~7에는 일축압축 실험으로부터 얻어진 실험체들의 축변형률과 횡변형률과의 관계를 나타내었다. Fig. 4~7에 나타낸 응력은 파괴 시까지 콘크리트 전단면이 동일한 응력상태에 있다고 가정하여 기둥의 전단면적으로 하중을 나누어서 계산한 평균응력이고 변형률은 4개의 LVDT로부터 얻어진 축방향 변위의 평균치를 실험체의 높이로 나누어서 산정한 평균변형률이다. 또한, 횡변형률은 CFS에 부착한 6개의 스트레인 게이지로부터 획득한 데이터의 평균치를 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 CFS에 의해서 구속된 기둥의 파괴는 국부적으로 발생한다. 이로 인해 최대하중 시 4개의 LVDT로 측정된 변위와 평균변위의 표준편차는 16개

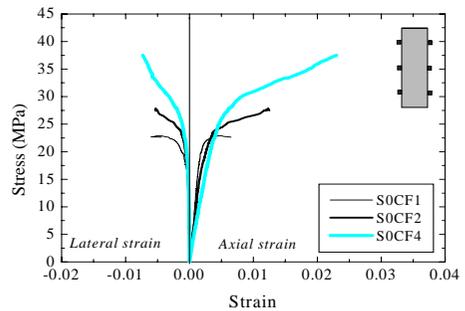


Fig. 4 축변형률과 횡변형률과의 관계 (S0 series)

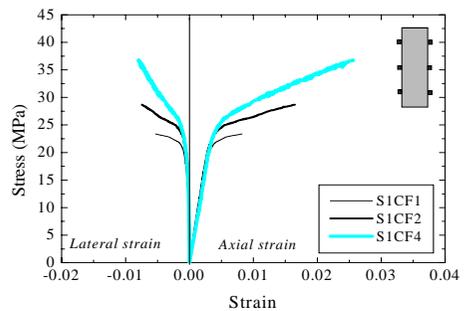


Fig. 5 축변형률과 횡변형률과의 관계 (S1 series)

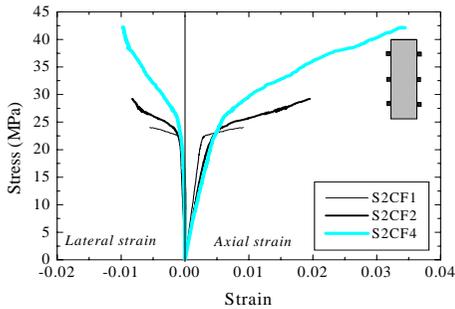


Fig. 6 축변형률과 횡변형률과의 관계 (S2 series)

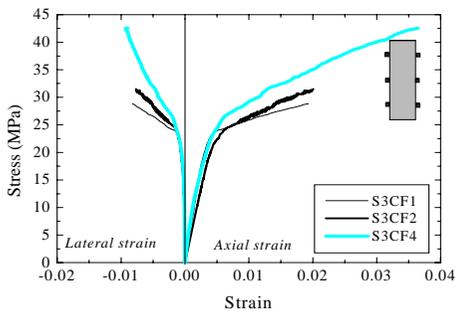


Fig. 7 축변형률과 횡변형률과의 관계 (S2 series)

의 실험체에서 평균적으로 0.19, 6개의 스트레인 게이지를 통해서 얻어진 CFS 변형률과 평균변형률의 표준 편차는 13개의 실험체에서 평균적으로 0.36으로 나타나 측정위치에 따른 차이가 매우 크게 나타났다. Fig. 4~7의 응력-축변형률 곡선은 변형률 0.0035 부근에서 곡률이 크게 변화하기 시작하였고 그 이후에는 완만한 응력증가와 함께 변형률이 크게 증가하는 거동을 보이고 있다. 한편 횡방향 변형률은 탄성영역내에서는 거의 발생하지 않고 있다가 축방향 변형률이 0.0035 부근에 도달했을 때부터 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, 이 시점부터 CFS의 횡구속력이 적극적으로 발현되기 시작하는 것을 알 수 있다. 또한, CFS 보강비와 띠철근비가 증가할수록 파괴 시 횡변형률은 크게 증가하지 않는 반면 축변형률은 현저하게 증가하는 것을 볼 수 있었다.

3.3 팽창특성

구속 콘크리트의 거동을 정량적으로 평가하기 위해서 체적변형률과 팽창률을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 여기서 -부호는 체적증가를 의미하며 +부호는 체적감소를 의미한다. Table 2로부터 SOCF1과 S1CF1 실험체는 파괴 시 체적이 증가하였으나 그 외의 실험체들은 체적이 감소한 것을 알 수 있다. 특히, CFS 보강률이 1겹으로 동일하더라도 띠철근비가 증가할수록 파괴 시 체적이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 또한 SOCF1과 S1CF1 실험체는 파괴 시 팽창률이 0.5 이상으로 다른 실험체들에 비해 크게 나타났다. 즉, 띠철근과 CFS에 의한 유효구속압이 작은 경우 콘크리트의 최대변형 이후 미소균열이 점점 성장하면서 급격하게 횡변형률이 증가하여 파괴되는 반면, 일정 이상의 유효구속압이 작용하게 되면 횡변형은 적절하게 억제되고 축변형률만이 증가하여 파괴 시까지 체적이 점점 감소한다는 것을 알 수 있다.

Table 2에 나타낸 것과 같이 파괴 시 CFS의 변형률은 CFS 항복변형률 $\overline{\epsilon_{cf}}$ 의 평균 0.5 정도인 것으로 나타났다. 즉, 파괴 시 CFS에 의해서 구속콘크리트에 가해지는 구속압을 항복변형률을 이용하여 산정하는 경우 약 2배 정도 크게 산정하는 결과를 초래한다는 것을 의미한다.

4. 응력-변형률 예측모델 제안

4.1 횡구속효과의 정량화

CFS에 의해서 구속된 단면이 원형일 경우에는 횡구속압이 전단면에 고르게 작용하는 반면 본 연구에서 사용된 실험체와 같이 사각단면인 경우 Fig. 8과 같이 횡구속압이 단면 내에 균일하게 분포하지 않는다.

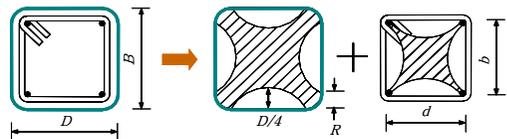


Fig. 8 CFS와 띠철근이 보강된 사각형의 유효구속면적

또한, 본 연구의 실험결과 및 Lam and Teng⁽¹⁾이 언급한 바와 같이 구속 콘크리트에 가해지는 횡구속압은 CFS의 항복강도로부터 계산되는 값보다 작다. 따라서, 본 연구에서는 구속 콘크리트에 작용하는 구속압을 CFS의 항복강도 f_{cfy} 대신 f_{cfs} 를 이용하여 정의하였으며, 구속압 크기에 따른 최대압축강도, 최대압축변형률 등을 정량적으로 평가하였다.

띠철근과 CFS로 구속된 구속콘크리트에 가해지는 유효구속압(f_l)은 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

$$f_l = f_{cfs} \rho_{cfs} k_s + f_{tie} \rho_{tie} k_e \left(\frac{A_c}{A_g} \right) \quad (1)$$

여기서, ρ_{cfs} 는 CFS의 면적비, $f_{cfs}(E_{cf} \rho_{cfs})$ 는 CFS의 작용응력, ρ_{tie} 는 띠철근의 면적비, $f_{tie}(E_s \rho_{tie})$ 는 띠철근의 작용응력, A_c 는 심부콘크리트 면적, A_g 는 기둥의 총단면적이다. 그리고 k_s ⁽⁷⁾와 k_e ⁽⁶⁾는 각각 CFS와 띠철근으로 구속된 단면의 유효구속계수이며, 식(2)와 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$k_s = \frac{1 - \left(\frac{(B-2R)^2 + (D-2R)^2}{3DB} \right) - \rho_{cc}}{1 - \rho_{cc}} \quad (2)$$

$$k_e = \frac{\left(1 - \sum \frac{(w'_j)^2}{6bd} \right) \left(1 - \frac{s'}{2b} \right) \left(1 - \frac{s'}{2d} \right)}{(1 - \rho_{cc})} \quad (3)$$

여기서, B와 D는 CFS로 보강된 사각단면의 폭과 높이이고, R은 모따기 반경, ρ_{cc} 는 축방향 철근의 면적비이다. 또한 b와 d는 띠철근이 구속한 단면의 폭과 높이이고, w'_j 는 근접한 축방향 철근 간의 순간격, s' 는 띠철근 간의 축방향 순간격이다.

Fig. 4~7을 통해서 CFS로 보강된 RC기둥의 응력-변형률 곡선은 탄성구간과 구속콘크리트의 손상으로 인해 응력-변형률 곡선의 기울기가 감소하는 연화구간으로 구분할 수 있다는 것을 알 수 있다. 탄성구간으로부터 연화구간을 구분하는 점(f_{cl}, ϵ_{cl})의 변형률을 실험결과를 토대로 0.0035로 정의하였다. 또한, 이 때의 횡변형률은 띠철근으로 구속된 콘크리트에 대하여 Cusson and Paultre 등⁽⁸⁾이 제안한 최대포아송비 0.5를 이용하여 식(4)로 정의되며, 이 때 콘크리트에 작용하는 구속압은 횡변형률 $\overline{\epsilon_{cfs}}$ 를 이용하여 식(1)로 계산할 수 있다.

$$\overline{\epsilon_{cfs}} = 0.5 \overline{\epsilon_{cl}} \quad (4)$$

식(4)를 이용하여 산정한 f_l 과 f_{cl} 과의 사이에는 회귀분석을 통해 식(5)의 관계가 성립함을 확인할 수 있었다.

$$\frac{f_{cl}}{f_{c0}} = 1 + 0.46 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.2} \quad (5)$$

여기서, 무보강 실험체 압축강도 f_{c0} 는 표준공시체 압축강도 f_{ck} 의 85%를 사용하였다. 또한, 파괴 시의 CFS로 구속된 콘크리트의 압축강도 f_{cc} 와 변형률 $\overline{\epsilon_{cc}}$ 은 다음절에서 설명할 파괴시의 CFS의 작용응력 f_{cfs} 를 이용하여 산정한 f_l 과의 사이에 식(6)과 식(7)의 관계가 있음을 회귀분석을 통해서 확인하였다. Fig. 9 과 10에는 각각 f_{cc} 와 $\overline{\epsilon_{cc}}$ 에 대한 회귀분석 결과를 나타내었다.

$$\rho_{cc} = 0.0035 + 0.058 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right) \quad (6)$$

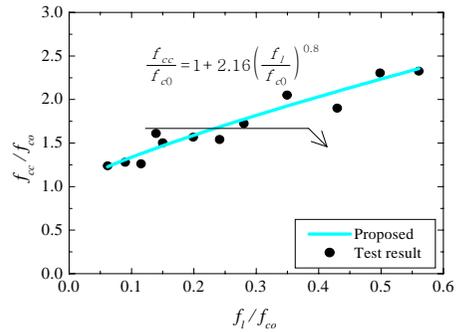


Fig. 9 f_l/f_{c0} 와 f_{cc}/f_{c0} 의 관계

$$\frac{f_{cc}}{f_{c0}} = 1 + 2.16 \left(\frac{f_l}{f_{c0}} \right)^{0.8} \quad (7)$$

4.2 파괴 시의 CFS의 응력산정

적정량의 CFS를 이용하여 구속함으로써 콘크리트의 횡팽창을 효과적으로 제어할 수 있다. 그 결과 구속콘크리트의 포아송비는 축변형률이 증가함에 따라 일정한 값으로 수렴하게 된다. 이 수렴 포아송 비는 극한포아송비 ν_u 로 정의되며, 천성철 등⁽⁵⁾은 실험결과를 토대로 f_l/f_{c0} 를 이용하여 극한포아송비를 결정하는 식(8)을 제안하였다.

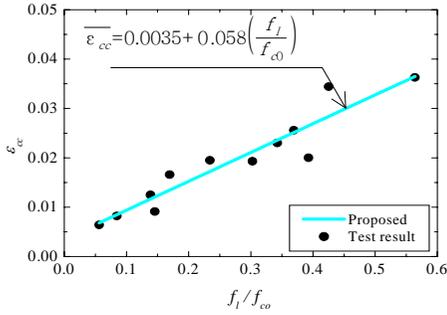


Fig. 10 f_1/f_{c0} 와 $\overline{\varepsilon_{cc}}$ 의 관계

$$v_u = -0.2305 \ln(f/f_{c0}) + 0.087 \quad (8)$$

본 연구에서는 최대압축강도가 발생할 때의 축변형률과 횡변형률의 관계를 식 (8)을 이용하고 간략화하여 최대압축강도에서의 CFS에 작용하는 응력 f_{cfs} 를 산정하였다. 파괴 시 띠철근에는 항복변형률 이상의 변형률이 발생하므로 띠철근의 항복강도에 해당하는 구속압이 구속콘크리트에 작용하는 것으로 가정하였다. 따라서, 최대압축강도에서의 횡변형률은 식 (9)로 계산된다.

$$\varepsilon_{cfs} = v_u \varepsilon_{cc} \quad (9)$$

그리고 다음과 같은 절차에 의한 시행착오법(Trial and error)을 통해 f_{cfs} 를 결정하였다.

- i) CFS 작용응력 f_{cfs} 의 초기치를 CFS의 항복강도 f_{cfy} 로 가정하고 식 (1)을 이용하여 횡구속비 f_1/f_{c0} 를 산정한다.
- ii) 식 (6), 식 (8), 식 (9)로부터 횡변형률 $\overline{\varepsilon_{cfs}}$ 를 산정한다.
- iii) 횡변형률 $\overline{\varepsilon_{cfs}}$ 를 이용하여 CFS 응력-변형률 관계로부터 f_{cfs} 를 재평가한다.
- iv) $f_{cfs} \leq f_{cfy}$ 인 경우, iii)에서 얻은 f_{cfs} 로부터 f_1 를 산정한다.
- v) f_{cfs} 가 수렴할 때까지 ii)~iv)단계를 반복한다.

4.3 응력-변형률 곡선

본 연구에서는 식 (5)~식 (7)을 이용하여 Fig. 11과 같이 CFS로 횡구속된 콘크리트 기둥의 응력-변형률 곡선을 제안하였다.

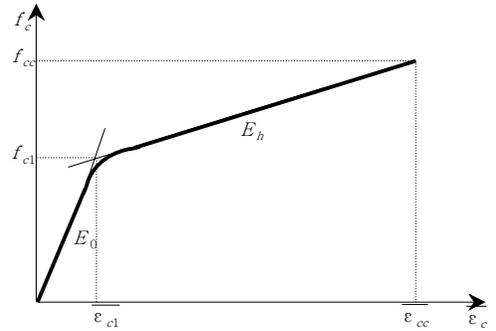


Fig. 11 제안 응력-변형률 곡선

$$\frac{f_c}{f_{c1}} = \beta \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} + \frac{\left[(1-\beta) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right]}{\left[1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \right)^{R/1} \right]^{1/R}} \quad (10)$$

여기서,

$$\beta = \frac{E_0}{E_h}, \quad E_h = \frac{f_{cc} - f_{c1}}{\varepsilon_{cc} - \varepsilon_{c1}} \quad (11)$$

f_c 는 CFS 구속콘크리트의 응력이며 $\overline{\varepsilon_c}$ 는 CFS 구속콘크리트의 변형률이다.

이 모델은 기본적으로 철근의 응력-변형률 곡선을 예측하기 위해 Pinto와 Giuffre⁽⁹⁾가 제안한 모델로 콘크리트에 적용 가능하도록 수정한 것이다. 식 (10)은 기울기 E_0 를 갖는 직선과 기울기 E_h 를 갖는 직선을 곡선으로 연결한다. 변수 β 는 응력경화비(Stress hardening ratio)를 나타내며, R 은 두 직선이 만나는 점 부근의 곡선을 제어하는 변수로서 본 연구에서는 그 값을 5로 정의하였다.

4.4 예측모델 검토

제안모델의 정확도를 검토하기 위해서 실험결과와 제안모델에 의해 예측된 응력-변형률 곡선을 Fig. 12~17에 나타내었다. 또한, Fig. 12~17에는 Hosotani 등에 의한 모델과 Teng and Lam에 의해서 제안된 모델의 결과도 함께 나타내었다. 이 모델들에는 띠철근에 의한 영향이 고려되어 있지 않으나 식 (1)을 이용하여 띠철근에 의한 구속압을 추가하는 방법으로 띠철근의 영향을 추가적으로 고려하였다.

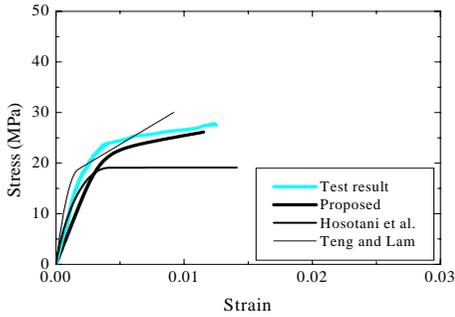


Fig. 12 응력-변형률 곡선 비교 (S0CF2)

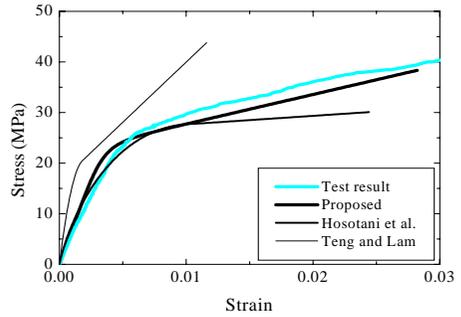


Fig. 15 응력-변형률 곡선 비교 (S2CF4)

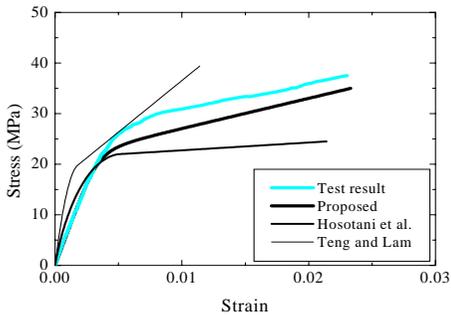


Fig. 13 응력-변형률 곡선 비교 (S0CF4)

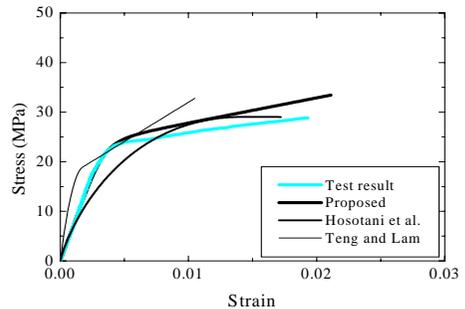


Fig. 16 응력-변형률 곡선 비교 (S3CF1)

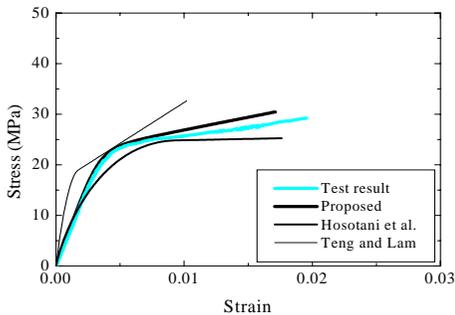


Fig. 14 응력-변형률 곡선 비교 (S2CF2)

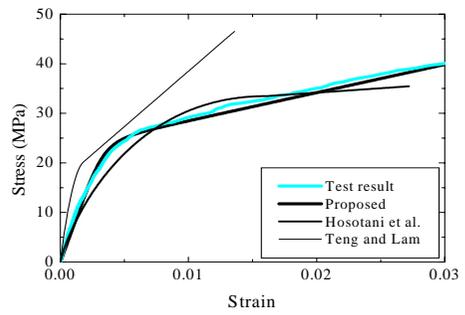


Fig. 17 응력-변형률 곡선 비교 (S3CF4)

Fig. 12~17을 통해서 제안모델은 CFS로 황구속된 RC기둥의 응력-변형률 거동을 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안된 모델은 콘크리트 강도가 19MPa인 콘크리트만을 대상으로 전개된 것으로 앞으로 추가적인 실험을 통해서 콘크리트 강도 변화에 따른 영향을 정확하게 평가할 수 있도록 수정되어야 할 것으로 생각된다.

한편, Hosotani 등에 의해서 제안된 모델은 파괴 시 압축강도 및 변형률 예측에 있어 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 Teng and Lam의 모델은 기본적으로 균일한 구속압을 받는 원형단면을 갖는 기둥에 대해서 제안된 식으로 사각형 단면에 적용하기 위해서 단면형상을 고려하는 새로운 변수를 추가시켜 새롭게 제안된 모델이다.

그러나 이 모델은 파괴 시의 압축강도는 과대평가하고 있으며 변형률 평가에 있어서는 매우 과소평가하는 결과를 나타내고 있다. 이를 사각형 단면에 적용하기에는 부적합한 것으로 판단된다.

5. 결 론

- 1) CFS로 횡보강된 RC 기둥의 압축성능 개선에 대한 실험적 연구를 통해 내력증진효과를 확인할 수 있었으며, 특히, 띠철근 없이 CFS 보강비가 0.0048인 경우 무보강 실험체에 비해 최대 132.4%의 하중증가율을 보였다.
- 2) 실험결과 파괴 시의 CFS의 변형률은 CFS 항복변형률의 약 50%로 나타나 파괴 시 CFS에 의해서 구속콘크리트에 가해지는 구속압을 CFS 항복강도를 이용하여 산정하는 경우 매우 과대평가하는 결과를 초래할 것으로 판단된다.
- 3) 파괴 시의 CFS에 의한 구속압을 산정하는 방법을 제안하였으며 이를 통해 CFS로 횡보강된 RC 기둥의 응력-변형률 관계에 대한 예측모델을 제안하였다. 제안모델은 실험결과를 비교적 정확하게 평가하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구에서 제안된 모델은 콘크리트 강도가 19MPa인 콘크리트만을 대상으로 전개된 것으로 앞으로 추가적인 실험을 통해서 콘크리트 강도 변화에 따른 영향을 정확하게 평가할 수 있도록 수정되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Lam, L., and Teng, J. G., "Design-oriented Stress-strain Model for FRP-confined Concrete", Construction and Building Materials, Vol. 17, 2003, pp. 471~489.

2. Teng J. G. and Lam. L., " Behaviour and Modeling of FRP-confined Concrete", International Symposium on Latest Achievement of Technology and Research on Retrofitting Concrete Structures, JCI, 2003, pp. 17-26.
3. Hosotani, M., Kawashima, K., and Hoshikuma J., " a Stres-strain Model for Concrete cylinders confined by Carbon Fiber Sheets," Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, Vol. 39, No. 592, 1998, pp. 36-52.
4. 이정윤, 정훈식, "섬유에 의해서 구속된 원형 콘크리트 기둥의 최대변형률 예측", 한국콘크리트학회논문집, Vol. 15, No. 5, 2003. 10, pp. 726-736.
5. 천성철, 김지영, 박형철, 박철립, "탄소섬유로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 제15권 1호, 1999. 1, pp. 27-36.
6. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stres-strain Model for Confined Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, 1998, pp. 1804-1826.
7. Harries, K. A., Kestner, J., Pessiki, S., and Ricles, J., "Axial Behavior of Reinforced Concrete Columns Retrofit with FRPC Jackets.", Proceedings, 2nd International Conference on Composites in Infrastructure, University of Arizona, 1997, pp. 411-425.
8. Cusson D. and Paultre P., "Stress-strain Model for Confined High-strength Concrete." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 3, 1995, pp. 468-477.
9. Menegotto, M. and Pinto, P. E., "Method of Analysis for Cyclically Loaded R.C. Plane Frames Including Changes in Geometry and Non-Elastic Behavior of Elements under Combined Normal Force and Bending", Proceeding of IABSE symposium on Resistance and Ultimate Deformability of Structures Acted on by Well Defined Repeated Loads, 1973, pp. 15-22.

(접수일자 : 2005년 3월 23일)