

탄소섬유시트와 나선형철근으로 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형을 관계에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Stress-Strain Relationship of Concrete Confined with Spiral & Carbon Fiber Sheets

정 훈 식*
Jeong, Hoon Sik

오 영 준**
Oh, Young Jun

이 정 윤***
Lee, Jung Yoon

ABSTRACT

The stress-strain curve of concrete confined with both spiral and carbon fiber sheet(CFS) is different to that of concrete confined with only spiral or CFS. The objective of this study is to investigate the stress-strain relation of concrete confined by composite material.

In this study, 24 concrete cylinders were tested. The main variable of the cylinders was the content rate of spiral to CFS. The test results indicated that while the compressive strength of cylinder confined with both spiral and CFS increased proportionally to the aided amount of two materials, the maximum strain of cylinder depended on the larger strain of spiral or CFS.

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시간의 경과에 따른 구조물의 성능 저하, 건축물의 증축에 의한 하중의 증가, 우발하중에 의한 구조물의 기능상실 등의 문제가 발생하므로 구조물에 대한 보수보강이 필요하다. 최근 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet, 이하 CFS)를 이용한 철근콘크리트 구조물의 보수, 보강에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. CFS를 이용한 보수보강법은 교량, 항만, 터널, 건축물의 보수보강에 유효한 공법으로써, 보수, 보강재의 무게가 가볍고 시공이 간편하며 부식에 강하다는 장점 때문에 사용범위가 점차 확대되는 추세이다. CFS를 이용한 압축재의 보강방법은 부재축의 수직방향으로 CFS를 부착하여 횡구속력을 갖게 하는 방법을 사용한다. 콘크리트에 부착되는 CFS는 횡방향 구속근(띠철근, 나선철근)과 같이 콘크리트를 횡구속하여 3축 압축응력 상태의 콘크리트 압축강도와 변형률을 크게 증대시킨다^{1,2)}. 철근콘크리트 구조물에 대한 보수, 보강은 그림 1과 같이 횡방향 철근에 의하여 구속된 기둥의 바깥쪽을 섬유시트로 보강하는 복합적 보강방법이다.

* 정회원, 플러스 구조기술사 사무소

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

그러나 지금까지의 철근콘크리트 기둥의 횡방향 구속효과에 대한 평가는 어느 한 재료의 구속효과를 기준으로 다른 재료의 구속효과를 부가적으로 추가시키는 중첩평가법에 의존하였다. 이러한 평가법은 근년 FIB(유럽콘크리트학회)에서 출판된 기술지침서³⁾에 의하여 지적된 것과 같이 섬유와 철근의 역학적 특성 차이로 인하여 실제의 구속효과와 매우 상이한 결과를 나타낸다. 즉, 나선철근과 CFS로 보강된 기둥의 경우, 코어는 나선철근을 포함하고 있으므로 CFS와 나선철근의 두가지 재료에 의해 복합적으로 구속을 받는다. 하지만, 현행 구속콘크리트는 한가지 구속재료를 중심으로 나머지 재료의 구속효과를 중첩하여 평가하여야 하는데 이러한 방법은 복합재료의 구속효과를 제대로 반영하지 못한다. 따라서, 본 연구에서는 횡구속재의 양과 각 재료의 구속비율을 달리한 콘크리트의 실린더 실험을 통하여 복합재료로 구속된 콘크리트의 응력과 변형률 관계를 파악하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험체 계획

탄소섬유로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하기 위하여, 그림 2와 같은 지름 150mm, 높이 300mm인 원주형 실험체를 제작하였다. 슬럼프 값이 18cm이며 최대골재 크기가 25mm인 콘크리트를 타설한 후, 28일간 습윤 양생하였다. 재령 28일이 지난 후 콘크리트 실험체의 표면을 그라인더로 갈아낸 후, 프라이머를 도포하였다. 프라이머는 3일간 양생하였으며 그 후에 에폭시 수지와 함께 CFS를 실험체 표면에 함침, 도포하였다. 에폭시 수지는 10일간 양생하였다. 각 실험체의 콘크리트, 나선형 철근 및 탄소섬유의 특성은 표1 및 2와 같다. 여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 실린더 압축강도, f_{sy} 는 나선형 철근의 인장응력, s 는 나선철근간격, f_s 는 섬유 인장강도, E_s 는 섬유 탄성계수, t_s 는 섬유 두께를

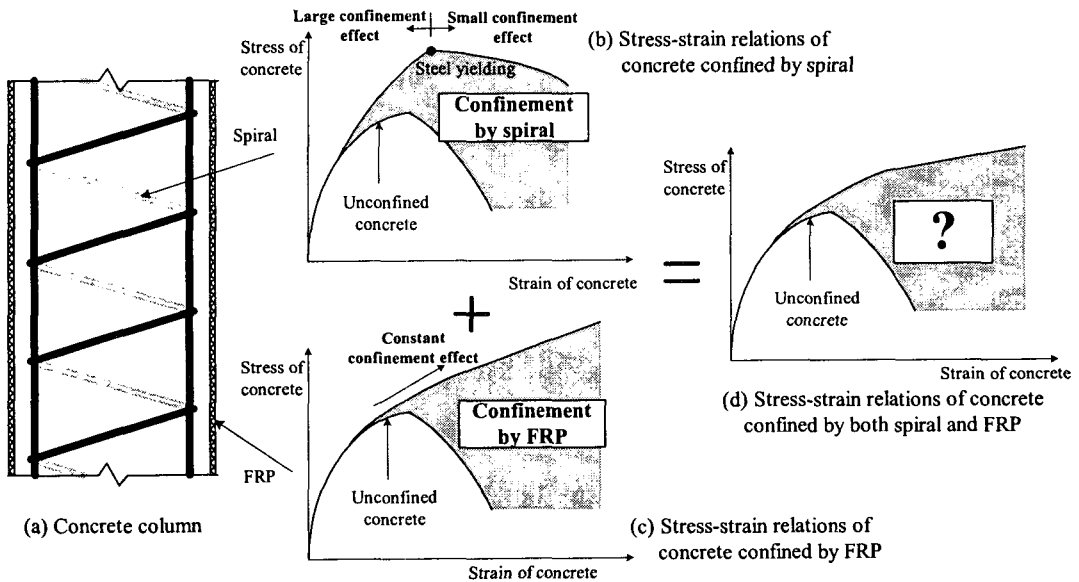


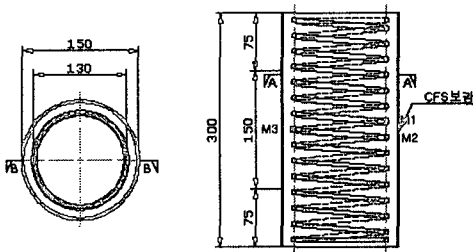
Fig.1 Stress-strain relations of concrete confined by various materials

나타낸다. 부착된 CFS는 에폭시 수지에 함침되어 일체로 작용하지만 실제 구속작용은 탄소섬유의 단면적에 의해 결정³⁾되므로, 본 실험에서는 에폭시 수지가 실험에 미치는 영향을 무시하였다.

표3은 CFS의 두께 및 나선형철근의 간격에 의하여 변화하는 실린더의 구속용력을 나타낸다.

2.2 실험체 설치 및 측정방법

실험은 (주)동양시멘트 연구소 소재 300tf용량의 만능시험기(Universal Testing Machine)를 사용하여 실린더에 중심축하중을 가력하였다. 실험체의 축방향 변형률은 그림3과 같이 실험체 상, 하 1/3위치에 앵커를 설치한 후, 120도 각도에 3개의 변위측정기(linear displacement transducer)를 설치하여 측정하였다. 또한, 실험체의 횡방향 변형률을 측정하기 위하여 실험체의 1/2높이에 120도 각도로 3개의 변위 측정기를 설치하였다. 내부 나선철근의 변형률을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 나선철근의 중앙부 M1, M2, M3 위치에 3개의 게이지를 120도 방향으로 설치하였다.



(a) SECTION A-A (b) SECTION B-B

그림 2 CFS, 철근게이지 부착위치 상세도

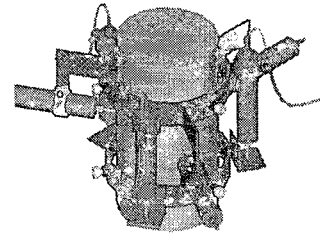


그림 3 횡방향 및 축방향 변위측정기

표 1 실험체 일람표

실험체명	f_{ct} (MPa)	f_{sy} (MPa)	s (cm)	f_j (MPa)	E_j (GPa)	t_j (mm)	실험체명	f_{ct} (MPa)	f_{sy} (MPa)	s (cm)	f_j (MPa)	E_j (GPa)	t_j (mm)
S0-F0	36.2	1200	-	-	-	0	S4-F0	36.2	1200	4	-	-	0
S0-F1	36.2	1200	-	4510	250	0.11	S4-F1	36.2	1200	4	4510	250	0.11
S0-F2	36.2	1200	-	4510	250	0.22	S4-F2	36.2	1200	4	4510	250	0.22
S0-F3	36.2	1200	-	4510	250	0.33	S4-F3	36.2	1200	4	4510	250	0.33
S0-F4	36.2	1200	-	4510	250	0.44	S4-F4	36.2	1200	4	4510	250	0.44
S0-F5	36.2	1200	-	4510	250	0.55	S4-F5	36.2	1200	4	4510	250	0.55
S2-F0	36.2	1200	2	-	-	0	S6-F0	36.2	1200	6	-	-	0
S2-F1	36.2	1200	2	4510	250	0.11	S6-F1	36.2	1200	6	4510	250	0.11
S2-F2	36.2	1200	2	4510	250	0.22	S6-F2	36.2	1200	6	4510	250	0.22
S2-F3	36.2	1200	2	4510	250	0.33	S6-F3	36.2	1200	6	4510	250	0.33
S2-F4	36.2	1200	2	4510	250	0.44	S6-F4	36.2	1200	6	4510	250	0.44
S2-F5	36.2	1200	2	4510	250	0.55	S6-F5	36.2	1200	6	4510	250	0.55

표 2 CFS의 역학적 성질

Product	Type	Weight (g/m ²)	Specific Gravity (g/cm ³)	Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Fracture Strain (%)
FTS-C1-20	High Strength	200	1.80	0.11	4510	250,000	1.8

3. 실험결과 및 고찰

실린더 압축실험에 의하여 구한 실험체의 최대응력과 최대변형률은 표 4와 같다. 복합재료의 내력은 구속재료(나선형 철근, CFS)의 횡구속응력의 차이, CFS의 연차적 파단에 의하여 서서히 감소하는 경향이 있다. 따라서, 실험에서는 최대응력을 초과한 이후 실린더 응력이 95%에 도달했을 때의 변형률을 최대변형률로 설정하였다.

그림 4 ~ 7에 각 실험체의 응력-변형률 관계 곡선을 나타내었다. 그림 4는 나선철근을 사용하지 않고, CFS만으로 구속된 실험체의 응력-축방향 변형률 관계를 나타낸다. CFS로만 구속된 실험체에서는 Mirmiran²⁾ 등이 정의한 1차 곡선과 2차 곡선이 뚜렷하게 나타나고 있다. 1차 곡선에서는 CFS 보강매수에 영향을 받지 않고 거의 유사한 경향을 보이는 반면 2차 곡선에서는 CFS 보강매수가 늘어남에 따라 구속효과와 최대응력, 최대변형률이 비례적으로 증가한다.

그림 5는 나선철근의 간격이 60mm이며 CFS에 의하여 동시에 보강된 실험체의 응력-축방향 변형률을 나타낸다. 나선철근을 60mm 간격으로 보강한 경우 구속효과는 CFS 1매 보강효과와 약 절반이지만(표3 참조) 그림 4와 비교하였을 때 구속 콘크리트의 최대변형률이 크게 증가한 것을 알 수 있다. 나선철근의 간격이 60mm로 나선철근의 보강량이 소량인 실험체는 CFS의 보강매수에 따라 구속효과와 최대응력, 최대변형률이 비례적으로 증가하였다. $\epsilon_{cu}(\epsilon_{cu}/0.0022)$

그림 6은 나선철근의 간격이 40mm이며 CFS에 의하여 동시에 보강된 실험체의 응력-축방향 변형률 곡선을 나타낸다. 나선철근 없이 CFS로 보강된 실험체에서는 파단과 동시에 하중이 급감하는 경향을 보였지만 CFS로 보강된 S4-F1과 S4-F2는, CFS의 최초파단이 일어난 직후에 하중이 급감하지 않고 일정응력을 유지하였다. 그림에서 CFS의 보강매수가 증가함에 따라 콘크리트의 압축강도가 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, S4-F0, S4-F1, S4-F2의 최대 변형률은 거의 일정하였다. 이는, 실린더가 나선철근과 CFS로 동시에 구속된 경우, 실린더의 최대 변형률은 두 가지 재료에 의한 구속변형률 중 큰 값에 의하여 지배받고 있음을 나타낸다. 나선철근 간격이 40mm인 S4-F0의 최대

표 3 구속재료량에 따른 횡구속압

CFS 보강매수(매)	1	2	3	4	5	Spiral 간격(mm)	20	40	60
횡구속응력 (MPa)	6.62	13.23	19.88	26.46	33.04	횡구속응력 (MPa)	14.81	6.25	3.46

표 4 실험체 최대응력과 최대변형률

(단위:MPa)

실험체	$f_{cc}(f_{cc}/f_{ck})$	$\epsilon_{cu}(\epsilon_{cu}/0.0022)$	실험체	$f_{cc}(f_{cc}/f_{ck})$	$\epsilon_{cu}(\epsilon_{cu}/0.0022)$
S0-F0	36.2 (1.00)	0.0022 (1.00)	S4-F0	45.1 (1.25)	0.025 (11.36)
S0-F1	39.6 (1.09)	0.011 (5.00)	S4-F1	58.0 (1.60)	0.021 (9.55)
S0-F2	55.2 (1.52)	0.015 (6.82)	S4-F2	71.9 (1.99)	0.023 (10.45)
S0-F3	66.0 (1.82)	0.020 (9.10)	S4-F3	88.8 (2.45)	0.028 (12.73)
S0-F4	81.9 (2.26)	0.027 (12.27)	S4-F4	96.1 (2.65)	0.036 (16.36)
S0-F5	97.5 (2.69)	0.037 (16.82)	S4-F5	114.1 (3.15)	0.036 (16.36)
S6-F0	31.8 (0.88)	0.012 (5.45)	S2-F0	61.1 (1.69)	0.044 (20.00)
S6-F1	48.6 (1.34)	0.017 (7.73)	S2-F1	69.6 (1.92)	0.045 (20.45)
S6-F2	64.6 (1.78)	0.026 (11.82)	S2-F2	88.8 (2.45)	0.036 (16.36)
S6-F3	77.4 (2.14)	-	S2-F3	101.0 (2.79)	0.045 (20.45)
S6-F4	94.3 (2.60)	0.035 (15.91)	S2-F4	109.7 (3.03)	0.038 (17.27)
S6-F5	107.1 (2.96)	0.040 (18.19)	S2-F5	139.5 (3.85)	0.048 (21.82)

변형률은 0.025로 나선철근이 없는 S0-F1, S0-F2의 최대변형률(각각, 0.11,0.015)보다 크다. 따라서, 두 가지 재료에 의하여 동시에 실린더가 구속된 경우, 실린더의 최대 변형률은 두 재료의 큰 변형률을 따르는 것을 알 수있다.

그림 7은 나선철근의 간격이 20mm이며 CFS에 의하여 동시에 보강된 실험체의 응력-축방향 변형률 곡선을 나타낸다. 나선철근의 간격이 40mm인 실험체와 같이 나선철근의 간격이 20mm이며 CFS에 의하여 동시에 보강된 실험체의 압축강도는 CFS의 보강배수가 증가함에 따라 비례적으로 증가하였지만 S2-F0-5의 최대 변형률은 거의 일정하였다. 이는, 나선철근 간격이 20mm인 S2-F0의 최대 변형률이 0.044로 나선철근이 없는 S0-F1-5의 최대 변형률(0.037)보다 크기 때문이다. 즉, 두 가지 재료에 의하여 동시에 실린더가 구속된 경우, 실린더의 최대 변형률은 두 재료의 큰 변형률을 따른다.

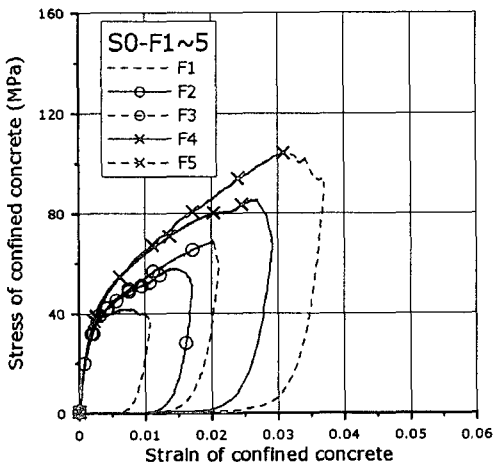


그림 4 실험체 응력-변형률 곡선
(나선철근 없음, CFS 1~5매 보강)

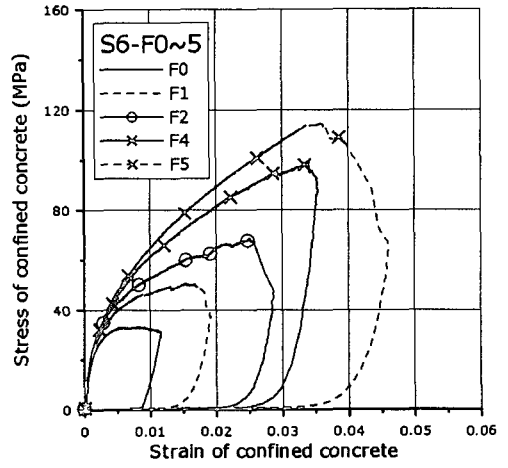


그림 5 실험체 응력-변형률 곡선
(나선철근간격 60mm, CFS 0,1,2,4,5매 보강)

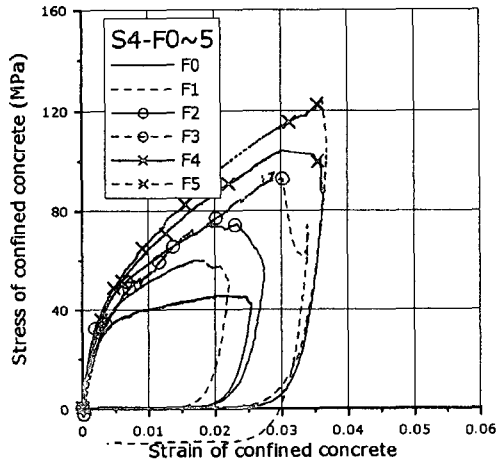


그림 6 실험체 응력-변형률 곡선
(나선철근간격 40mm, CFS 0~5매 보강)

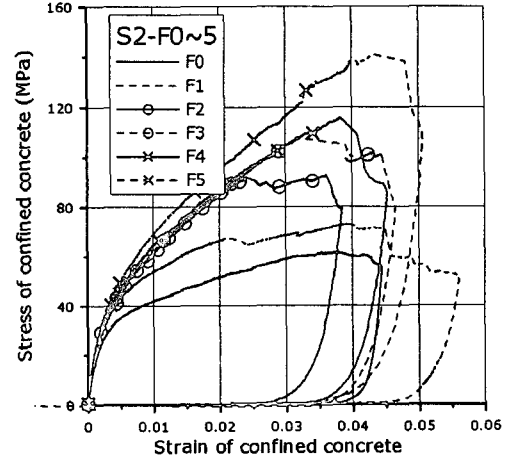


그림 7 실험체 응력-변형률 곡선
(나선철근간격 20mm, CFS 0~5매 보강)

4. 결론

나선철근과 CFS로 동시에 구속된 철근콘크리트 실험체의 실험결과를 분석한 결론은 다음과 같다.

(1) 나선철근과 CFS로 동시에 구속된 콘크리트의 구속효과는 사용된 재료의 응력-변형률 관계의 특성에 의하여 단일재료로 구속된 콘크리트와 다른 구속효과 특징을 나타내었다.

(2) 나선철근과 CFS로 구속된 실험체는 CFS의 파단 이후 급격한 응력의 감소를 보이지 않고 일정 응력을 유지한 다음 부분적으로 CFS가 파단되는 형상을 보였다.

(3) 나선철근과 CFS로 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 1차 구간과 2차 구간으로 나눌수 있으며, 1차 구간은 횡구속재의 양에 관계없이 일정한 반면, 2차 구간은 횡구속재의 양에 큰 영향을 받았다.

(4) 나선철근과 CFS로 동시에 구속된 콘크리트의 압축강도는 각 구속재료에 의한 구속효과를 합한 값과 같다. 그러나, 최대 변형률은 두 가지 재료에 의한 구속 변형률 중 큰 값에 의하여 지배받는다.

감사의 글

본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.
(과제번호 : KRF-2002-003-D00400)

참고문헌

1. J. B. Mander, M. J. N. Priestley, and R. Park, "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, August 1988.
2. Michel Samman, Amir Mirmiran, and Mohesen Shahawy, "Model of Concrete Confined by Fiber Composites," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 124, No. 9, September 1998.
3. FIB Task Group 9.3 "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures," CEB-FIB, July 2001.