

나선형 철근 및 섬유에 의하여 동시에 구속된 원형 콘크리트 실린더의 거동

이정윤^{1)*} · 오영준¹⁾ · 정훈식²⁾

¹⁾ 성균관대학교 건축공학과 ²⁾ (주)플러스구조

(2003년 9월 16일 원고접수, 2004년 2월 28일 심사완료)

Behavior of Circular Concrete Cylinders Confined with Both Steel Spirals and Fiber Composites

Jung-Yoon Lee^{1)*}, Young-Jun Oh¹⁾, and Hoon-Sik Jeong²⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

²⁾ Plus Structural Engineers & Associates, 602 Wonkyung Bldg. 113-2, Samsung-Dong, Kangnam-Ku. Seoul, Korea

(Received September 16, 2003, Accepted February 28, 2004)

ABSTRACT

When the columns of existing RC structures are repaired with FRP composites, the core concrete of the columns is confined by both materials of steel spirals (or steel hoops) and FRP composites because the FRP composites wrap the existing columns which have been already confined with steel spirals or hoops. As the stress-strain curves of steel and fiber are different to each other, the behavior of concrete columns confined with both steel spiral and FRP composites is also different to that of concrete columns confined with only steel spiral or FRP composites. Twenty four RC cylinders were tested in order to observe the behavior of RC cylinders confined with both materials. The observed results of the test showed that the behavior of the test cylinders confined with both materials was quite different to that of cylinders confined with only one material.

Keywords : rehabilitation, carbon fiber sheet, spiral, confining pressure, concrete cylinders, compressive strength

1. 서 론

섬유보강체(FRP)를 이용한 철근콘크리트 구조물의 보수·보강이 점차 증대되고 있다. 기존의 보수·보강에 사용되고 있는 강판보강법은 구조물과 일체성 확보가 어렵고 보강재의 무게가 무거워 취급이 어렵지만, FRP보강법은 보강재의 자중이 가볍고, 시공이 간편하며, 부식에 강하기 때문에 사용범위가 점차 확대되고 있다.

지난 10여년 동안 섬유보강 콘크리트의 구속효과를 평가하기 위한 다수의 실험이 수행되었다. Karbhari 등¹⁾과 Mirmiran 등^{2,3)}은 섬유보강 콘크리트의 압축강도를 횡구속압, 실린더의 직경, 섬유두께의 영향을 고려하여 평가하였다. Spoelstra 등⁴⁾은 에너지 소산에 근거한 Mander 등⁵⁾의 횡방향구속철근 모델을 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 거동 예측에 적용하였다. 이들 평가식에서는 횡방향 변형률의 증가에 따라 콘크리트의 횡구속압력도 증가하는 증분법이 적용되었고 이러한 증분법은 Saafi 등⁶⁾의 평가

식에도 사용되었다. 섬유를 이용한 철근콘크리트 부재의 보수·보강은 일반적으로 Fig. 1(a)와 같이 이미 존재하는 나선형철근 (또는 띠철근)에 FRP를 덧씌우는 방법이 사용된다. 이러한 부재는 철근과 섬유에 의하여 부재가 2중 복합 구속된다. 두 가지 구속재료의 재료성질(응력-변형률 곡선과 탄성계수 등)이 비슷한 경우에 이 부재의 구속효과는 두 재료의 구속압(f_c)을 중첩함으로써 평가할 수 있다. 그러나 철근의 응력-변형률 곡선은 섬유와는 다르게 탄성구역과 소성구역으로 구별되며 항복점 이후에 변형률은 급격히 증가한다. 그러므로 나선철근만에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 Fig. 1(b)와 같이 나선철근이 항복한 후에 구속효과는 점점 감소한다. 섬유의 응력-변형률 곡선은 Fig. 2와 같이 선형적으로 증가한 후에 갑자기 파단(破斷)되므로 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 구속효과는 Fig. 1(c)와 같이 섬유가 파단 또는 박리될 때까지 일정하게 증가하다 갑자기 저하된다.

철근과 섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 철근과 섬유의 구속압에 따라서 달라진다. 철근에 의한 구속압(f_{cs})이 섬유에 의한 구속압(f_{cf})보다 작을 경우에 부재는 구속철근이 항복한 후에 섬유의 파단

* Corresponding author

Tel : 031-290-7564 Fax : 031-290-7570

E-mail : jylee@skku.ac.kr

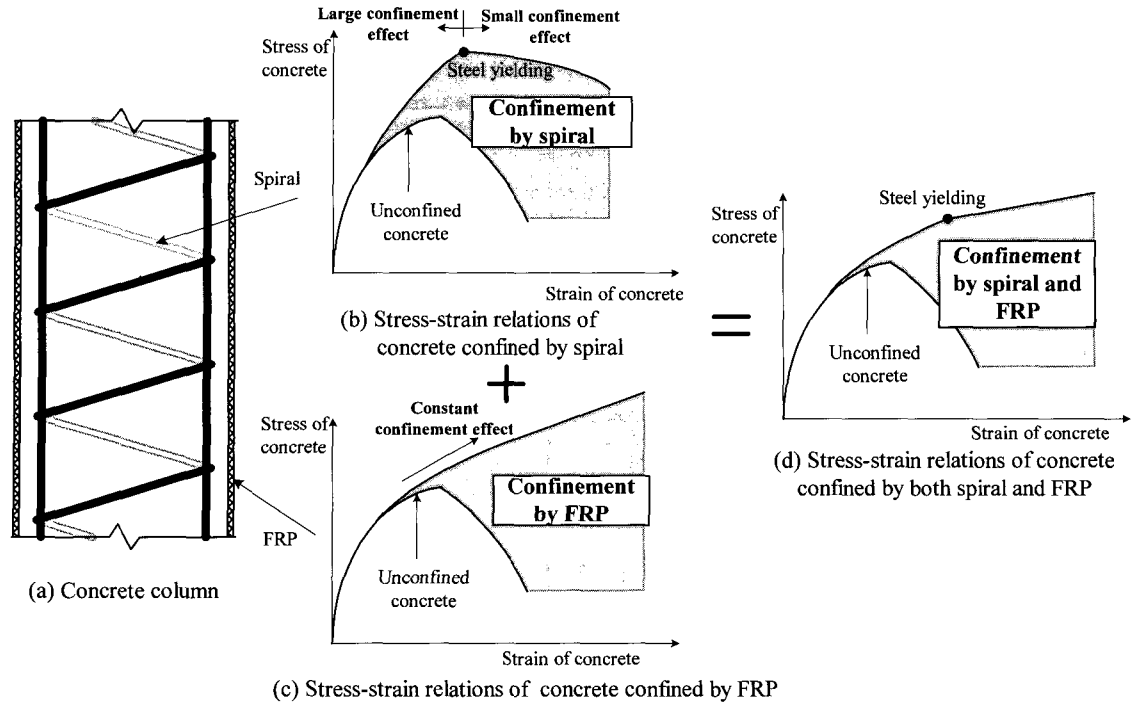


Fig. 1 Stress-strain relations of concrete confined by various materials

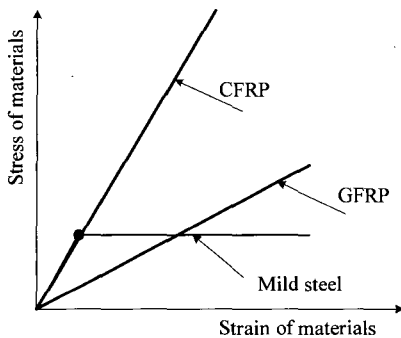


Fig. 2 Stress-strain relations of mild steel bar and fiber

에 의하여 파괴된다. 이와 같은 기둥의 응력-변형률 곡선은 Fig. 1(d)와 같이 철근의 항복 후에 구속효과가 감소되지만, 내력감소비율은 철근만으로 구속한 기둥보다도 작다. FRP를 이용한 실제 구조물의 보수·보강은 이미 존재하고 있는 철근에 FRP가 보강되는 2중 보강이 이루어지므로 보강된 부재의 거동은 한 재료만으로 보강된 부재의 거동과 다르다. FRP의 구속효과 평가에 대한 현행 연구의 대부분은 한 가지 재료만을 사용한 부재의 거동예측에 중점을 두고 있으며, 응력-변형률 관계가 상이한 복합재료로 구속된 부재의 거동 평가에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히, 복합재료로 구속된 부재의 거동은 각 재료의 특성을 고려하여 평가되어야 함에도 불구하고, 구속된 부재의 압축강도 및 최대 변형률은 일반적으로 각 재료의 항구속(f_c)을 중첩하여 평가되고 있다.

이 논문에서는 24개의 콘크리트 실린더 압축실험을 통하여 철근 및 FRP에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계, 강도 및 최대 변형률의 특성과 단일 재료에 의하여 구속된 콘크리트의 특성을 분석하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 시험체 계획

철근 및 FRP에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하기 위하여 지름 150mm이며 높이가 300mm인 원주형 시험체를 제작하였다. 시험체는 횡방향철근이 배근되지 않고 FRP만에 의하여 구속된 S0시리즈(S0F0-S0F5), FRP와 함께 횡방향철근 배근간격이 각각 6cm, 4cm, 2cm인, 두 재료에 의하여 동시에 구속된 S6시리즈(S6F0-S6F5), S4시리즈(S4F0-S4F5), S2시리즈(S2F0-S2F5)의 총 24개 시험체이다.

재령 28일인 콘크리트 시험체의 표면을 그라인더로 갈아낸 후에 프라이머를 도포하였다. 프라이머는 3일간 양생하였으며 그 후에 에폭시 수지와 함께 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet, 이하 CFS)를 시험체 표면에 함침 및 도포하였다. 에폭시 수지는 10일간 양생하였다.

각 시험체의 콘크리트 및 탄소섬유의 특성은 Table 1과 같다. Table 1에서 f_{ck} 는 원주공시체 콘크리트의 압축강도, ϵ_{co} 는 원주공시체 콘크리트의 압축강도에 상응하는

변형률, f_{sy} 는 횡방향철근의 항복강도, s 는 횡방향 철근의 간격, f_{fs} 는 탄소섬유의 파단강도, E_{fs} 는 탄소섬유의 탄성계수, t 는 탄소섬유의 두께이다. 모든 시험체의 탄소섬유 파단변형률(ϵ_{fo})은 0.018이며, 철근의 지름(ϕ)은 5.5 mm이다. 철근과 콘크리트의 재료 성질은 3개의 표준 시험체에서 얻은 평균값이며, 탄소섬유의 재료성질은 다수의 탄소섬유 인장 실험에 의하여 얻은 결과의 평균값이다.

Fig. 3은 횡방향 철근과 탄소섬유의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 각 시험체의 횡방향철근에 의한 구속압(f_{ls}) 및 CFS에 의한 횡방향 구속압(f_{lf})을 다음 식(1)과 (2)에 의하여 계산하면 Table 2와 같다.

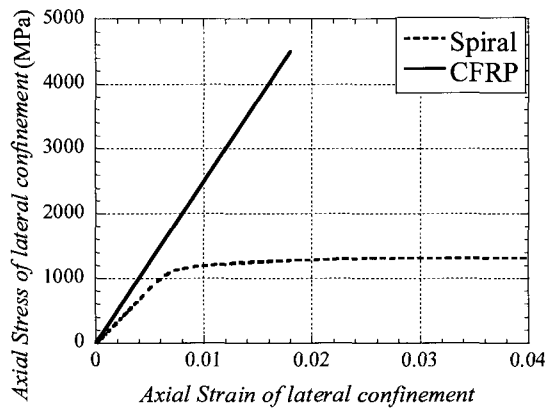


Fig. 3 Stress-strain curves of lateral confinement

Table 1 Material properties of cylinders

Specimen	f_{ck} (MPa)	ϵ_{co} (%)	f_{sy} (MPa)	s (cm)	f_{fy} (MPa)	E_{fs} (GPa)	t (mm)
S0F0*	36.2	0.24	1200	∞	-	-	0
S0F1*	36.2	0.24	1200	∞	4510	250	0.11
S0F2*	36.2	0.24	1200	∞	4510	250	0.22
S0F3*	36.2	0.24	1200	∞	4510	250	0.33
S0F4*	36.2	0.24	1200	∞	4510	250	0.44
S0F5*	36.2	0.24	1200	∞	4510	250	0.55
S6F0	36.2	0.24	1200	6	-	-	0
S6F1	36.2	0.24	1200	6	4510	250	0.11
S6F2	36.2	0.24	1200	6	4510	250	0.22
S6F3	36.2	0.24	1200	6	4510	250	0.33
S6F4	36.2	0.24	1200	6	4510	250	0.44
S6F5	36.2	0.24	1200	6	4510	250	0.55
S4F0	36.2	0.24	1200	4	-	-	0
S4F1	36.2	0.24	1200	4	4510	250	0.11
S4F2	36.2	0.24	1200	4	4510	250	0.22
S4F3	36.2	0.24	1200	4	4510	250	0.33
S4F4	36.2	0.24	1200	4	4510	250	0.44
S4F5	36.2	0.24	1200	4	4510	250	0.55
S2F0	36.2	0.24	1200	2	-	-	0
S2F1	36.2	0.24	1200	2	4510	250	0.11
S2F2	36.2	0.24	1200	2	4510	250	0.22
S2F3	36.2	0.24	1200	2	4510	250	0.33
S2F4	36.2	0.24	1200	2	4510	250	0.44
S2F5	36.2	0.24	1200	2	4510	250	0.55

* The material properties and test results of S0 series (S0F0-S0F5) are explained in details in Ref.7. In this paper, the material properties of S0 series are shown in order to compare the cylinders confined with only CFS to the cylinders confined with both CFS and steel spirals.

$$f_{ls} = \frac{2 A_{sp} f_{sy}}{d_s s} \quad (1), \quad f_{lf} = \frac{2 f_{fy} t}{D} \quad (2)$$

여기서, A_{sp} 는 횡방향철근의 단면적, d_s 는 횡방향철근의 단면 중심간 직경, D 는 시험체의 직경이다.

Table 2에서 S6시리즈의 f_{ls} 는 S6F1-S6F5의 f_{lf} 보다 작지만, S4시리즈의 f_{ls} 는 CFS를 1매 보강한 S4F1의 f_{lf} 와 유사하며, S2시리즈의 f_{ls} 는 CFS를 2매 보강한 S2F2의 f_{lf} 와 유사하다.

2.2 측정장치

실험에서는 6개의 LVDT와 변형률게이지를 이용하여 시험체의 축방향변형률과 횡방향 변형률 및 나선형철근 변형률을 측정하였다. 시험체의 축방향 변형률은 Fig. 4와 같이 시험체 상하1/3위치에 앵커를 설치한 후, 120°에 3개의 LVDT를 설치하여 측정하였다. 시험체의 횡방향 변형률은 시험체의 1/2높이에 3개의 변위 측정기를 120°간격으로 설치하여 측정하였다.

횡방향구속철근의 변형률을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 횡방향구속철근의 중앙부 M1, M2, M3 위치에 3개의 스트레인게이지를 120°간격으로 설치하였다.

Table 2 Lateral pressure of cylinders

Specimen	f_{ls} (MPa)	f_{lf} (MPa)	Specimen	f_{ls} (MPa)	f_{lf} (MPa)
S0F0	0.00	0.00	S4F0	6.25	0.00
S0F1	0.00	6.61	S4F1	6.25	6.61
S0F2	0.00	13.2	S4F2	6.25	13.2
S0F3	0.00	19.8	S4F3	6.25	19.8
S0F4	0.00	26.5	S4F4	6.25	26.5
S0F5	0.00	33.1	S4F5	6.25	33.1
S6F0	3.47	0.00	S2F0	14.81	0.00
S6F1	3.47	6.61	S2F1	14.81	6.61
S6F2	3.47	13.2	S2F2	14.81	13.2
S6F3	3.47	19.8	S2F3	14.81	19.8
S6F4	3.47	26.5	S2F4	14.81	26.5
S6F5	3.47	33.1	S2F5	14.81	33.1

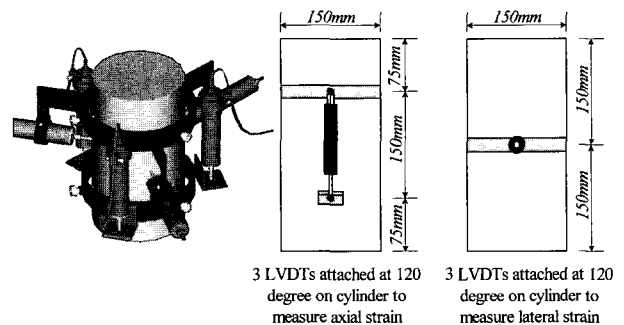


Fig. 4 Locations of LVDTs⁷⁾

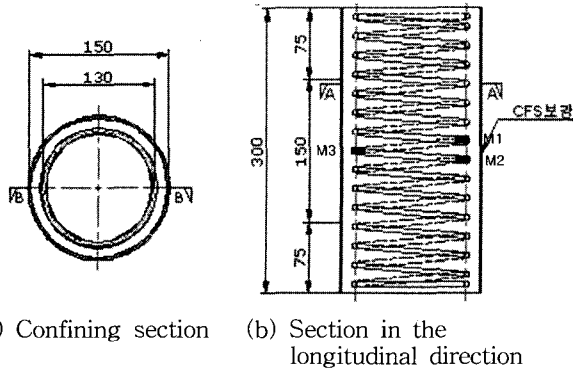
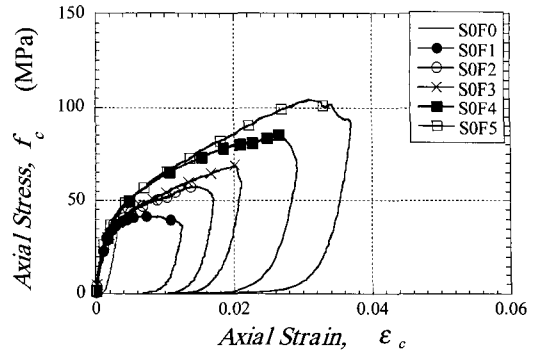


Fig. 5 Locations of strain gauges

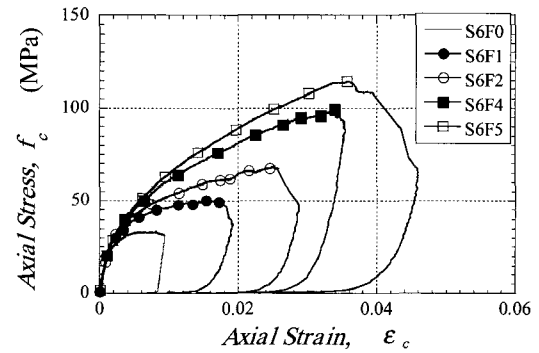
3. 실험결과

Fig. 6은 실험에서 측정된 S0시리즈, S6시리즈, S4시리즈, S2시리즈의 축응력-축방향변형률 관계를 나타낸다. 횡방향 철근과 탄소섬유에 의하여 횡구속된 시험체는 무구속 콘크리트의 압축강도($f_{ck} = 36.2\text{MPa}$)에 도달할 때까지 안정된 거동을 나타내며 시험체의 외관도 큰 변화를 나타내지 않았다. 그러나 f_{ck} 에 도달한 후에 시험체의 축응력-축방향 변형률 관계는 구속된 횡방향 철근과 탄소섬유의 양에 따라 Fig. 6과 같이 다양한 곡선을 나타내며 변화하였다. 탄소섬유만에 의하여 구속된 S0시리즈의 압축강도 및 최대 변형률은 CFS의 보강 두께가 증가함에 따라 증가하였다. S0시리즈의 시험체는 응력이 f_{ck} 에 도달한 이후에 축방향변형률(ϵ_c)이 급격히 증가하며 최종적으로 시험체 상부로부터 1/3되는 위치의 CFS가 파단한 후에 내력이 급감하였다. CFS를 5매 보강한 S0F5는 104.3MPa 에 도달할 때까지 축응력-축방향 변형률 관계는 안정된 곡선을 나타내었다. 탄소섬유와 횡방향철근에 의하여 동시에 구속된 S6시리즈, S4시리즈, S2시리즈 시험체의 축응력-축변형률 관계는 횡방향철근에 의한 구속압(f_b) 및 CFS에 의한 횡방향 구속압(f_y)에 따라 달라졌다. f_b 에 비하여 f_y 가 현저히 큰 S6시리즈 시험체의 응력-변형률 관계는 CFS만으로 구속된 S0시리즈의 시험체 거동과 유사하였다. 그러나 f_b 와 f_y 가 거의 유사한 S4F1, S2F1 및 S2F2에서는 횡방향 철근이 항복한 후에 시험체의 응력증가가 현저히 감소하였고, 이와 같은 응력-변형률 관계는 Fig. 1(d)의 복합재료의 응력-변형률 관계와 유사하였다. S6시리즈의 시험체 S6F3은 측정장치의 오류에 의하여 축방향응력 및 변형률을 측정하지 못했다.

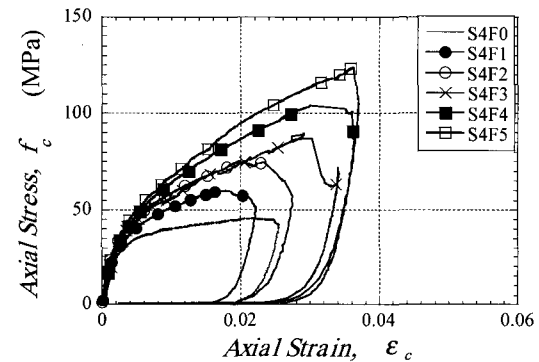
Table 3은 실험에 의하여 측정된 시험체의 압축강도와 최대변형률이다. 시험체의 압축강도는 횡방향구속철근 및 CFS의 보강 매수가 증가할수록 증가하지만, 시험체의 최대 변형률은 철근에 의한 구속압(f_b) 및 CFS에 의한 구



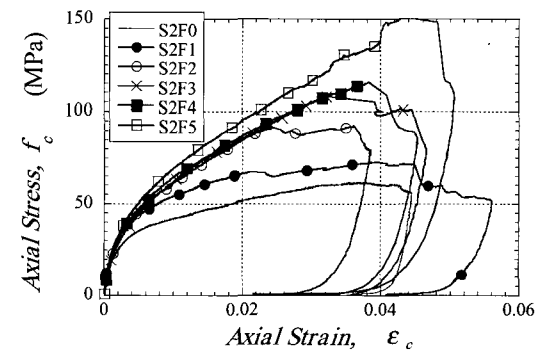
(a) S0 series



(b) S6 series



(c) S4 series



(d) S2 series

Fig. 6 Axial stress-axial strain curves of the tested concrete cylinders

축압(f_c)의 상호관계에 따라 달라진다. Table 3에서 f_{cu} 는 구속된 콘크리트의 압축강도, ϵ_{cu} 는 구속된 콘크리트의 압축강도에 상응하는 변형률, ϵ_{co} 는 무구속 콘크리트 실린더 S0F0의 변형률이다.

Fig. 7은 시험체의 축방향응력(f_c)과 횡방향변형률(ϵ_l) 관계를 나타낸다. 그림에서 횡방향 변형률은 기본 시험체(S0F0)의 강도 $f_{ck}=36.2\text{MPa}$ 에 도달한 후 급격하게 증가한다. $f_{ck}=36.2\text{MPa}$ 이후의 각 시험체의 기울기는 축응력-축방향 변형률 기울기의 경향과 유사하게 횡방향철근 및 CFS의 보강에 비례하여 증가하였다. 그러나 최대 횡방향변형률은 f_b 에 비하여 f_{lf} 가 현저히 큰 S0시리즈와 S6시리즈에서는 보강량과 무관하게 거의 일정한 변형률($\epsilon_l \approx 0.011$)을 나타냈지만, f_b 와 f_{lf} 가 크거나 거의 유사한 S6F0, S4F0, S2F0, S2F1 및 S2F2에서는 ϵ_l 이 0.011보다 크게 증가하였다.

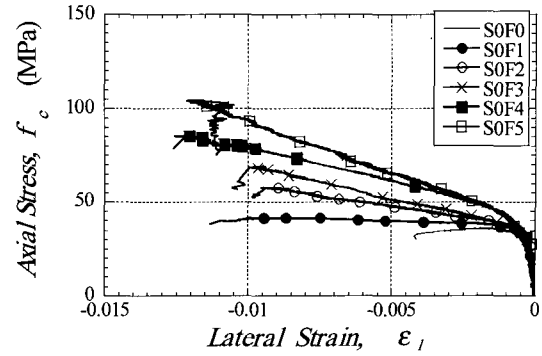
4. 횡방향철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 거동 분석

4.1 구속 콘크리트의 축응력-축방향 변형률 관계

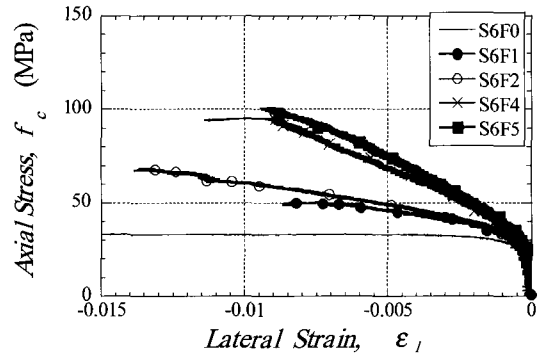
횡방향구속철근과 탄소섬유로 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 어느 한 재료만으로 구속된 콘크

Table 3 Compressive strength and maximum strain of the tested concrete cylinders

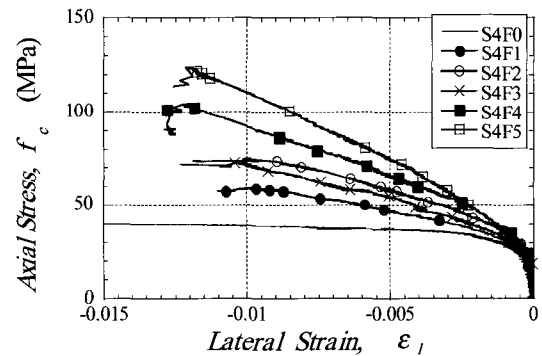
Specimens	f_{cu} (MPa)	ϵ_{cu}	f_{cu}/f_{ck}	$\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$
S0F0	36.2	0.0024	1.00	1.00
S0F1	41.7	0.010	1.15	4.17
S0F2	57.8	0.015	1.60	6.25
S0F3	69.1	0.020	1.91	8.33
S0F4	85.4	0.027	2.36	11.25
S0F5	104.3	0.031	2.88	12.92
S6F0	33.57	0.008	0.93	3.33
S6F1	50.37	0.017	1.39	7.08
S6F2	68.52	0.025	1.89	10.42
S6F4	99.49	0.034	2.75	14.17
S6F5	114.64	0.036	3.17	15.00
S4F0	45.77	0.022	1.26	9.17
S4F1	60.00	0.019	1.66	7.92
S4F2	74.77	0.023	2.07	9.58
S4F3	88.80	0.029	2.45	12.08
S4F4	104.15	0.030	2.88	12.50
S4F5	123.64	0.036	3.42	15.00
S2F0	61.50	0.038	1.70	15.83
S2F1	72.87	0.039	2.01	16.25
S2F2	92.68	0.036	2.56	15.00
S2F3	108.01	0.039	2.98	16.25
S2F4	115.72	0.038	3.20	15.83
S2F5	150.80	0.043	4.17	17.92



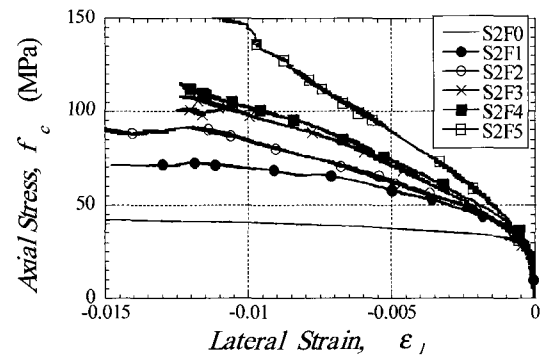
(a) S0 series



(b) S6 series



(c) S4 series



(d) S2 series

Fig. 7 Axial stress-lateral strain curves of the tested concrete cylinders

리트의 구속거동과 상이한 특성을 나타낸다. 이는 철근과 탄소섬유의 응력-변형률 관계가 Fig. 2와 같이 서로 다르기 때문이다.

횡방향구속철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선의 특성을 파악하기 위하여 횡방향철근에 의한 구속압(f_{ls})과 CFS에 의한 구속압(f_{lf})의 합이 서로 다른 6개의 시험체를 비교하였다. Fig. 8(a)는 f_{ls} 와 f_{lf} 의 합이 유사한 S2F1 ($f_{ls} + f_{lf} = 21.42$ MPa)과 S0F3 ($f_{ls} + f_{lf} = 19.8$ MPa)을 비교하였다. S2F1과 S0F3의 구속압의 합은 유사하지만, S2F1 시험체는 f_{ls}

가 f_{lf} 보다 크며($f_{ls} + f_{lf} = 14.81 + 6.61$), S0F3 시험체는 f_{ls} 이 f_{lf} 보다 작다($f_{ls} + f_{lf} = 0.0 + 19.8$). Fig. 8(a)에서 탄소섬유만으로 구속된 S0F3에 비하여 철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 S2F1의 최대변형률이 매우 크다. S0F3은 탄소섬유의 응력-변형률 특성에 의하여 최대점에 도달하기까지 압축응력이 일정하게 증가하지만, S2F1에서는 탄소섬유의 파단이 예측되는 변형률 $\epsilon_c = 0.02$ 이후에는 압축응력의 큰 증가 없이 변형률만이 증가하였다.

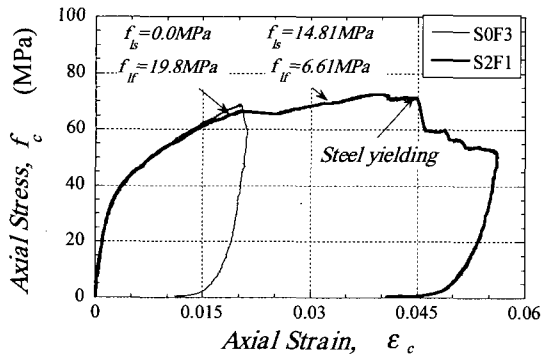
Fig. 8(b)는 f_{ls} 과 f_{lf} 의 합이 유사한 S2F2 ($f_{ls} + f_{lf} = 28.01$ MPa)와 S0F4 ($f_{ls} + f_{lf} = 26.5$ MPa)의 거동을 비교하였다. S2F2 시험체는 f_{ls} 와 f_{lf} 이 각각 14.81 MPa와 13.2 MPa로 거의 일정하지만, S0F4 시험체는 탄소섬유만에 의하여 횡구속되었다. Fig. 8(c)는 f_{ls} 과 f_{lf} 의 합이 각각 34.61 MPa와 33.1 MPa인 시험체 S2F3와 S0F5의 거동을 비교하였다. S2F3 시험체는 f_{ls} 와 f_{lf} 이 각각 14.81 MPa와 19.8 MPa로 f_{lf} 가 f_{ls} 보다 크지만, S0F5 시험체는 5매의 탄소섬유만에 의하여 횡구속되었다. Fig. 8(b)와 8(c)에서 두 재료에 의하여 구속된 시험체 S2F2와 S2F3 시험체의 응력-변형률 관계는 어느 한 재료가 항복점에 도달한 후에 압축응력의 증가가 현저하게 감소하였다. 그러나 섬유만에 의하여 구속된 시험체 S0F4와 S0F5는 섬유의 파단과 거의 동시에 내력이 급격하게 감소하였다.

Fig. 8에서 동일한 횡구속압을 받는 시험체의 구속효과는 Fig. 1에서 지적한 것과 같이 각 재료의 구속압의 비에 따라서 달라진다. 따라서 어느 한 재료를 기준으로 다른 재료의 구속효과를 중첩하여 평가하는 현재의 평가법은 실제의 구속효과와 상당한 차이를 나타낼 것으로 판단된다.

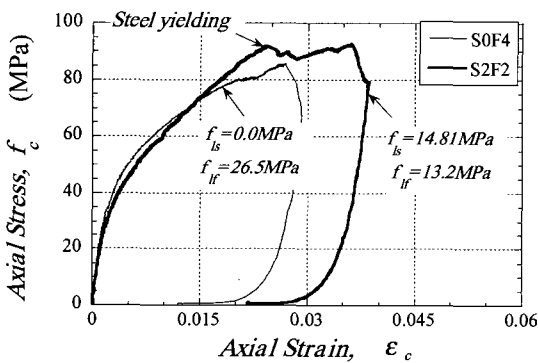
4.2 구속 콘크리트의 압축강도

횡방향 철근 또는 탄소섬유의 구속효과 평가에 대한 현행 연구의 대부분은 한 가지 재료만을 사용한 부재의 거동예측에 중점을 두고 있으며, 복합재료로 구속된 부재의 압축강도는 각 재료의 횡구속을 중첩하여 예측하고 있다. 이 논문에서는 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 압축강도를 측정하여 현행 중첩법을 검증하였다.

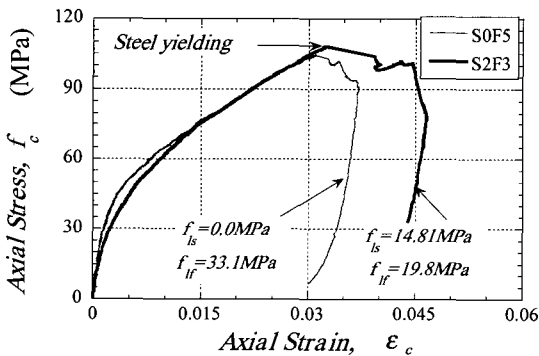
Fig. 9는 시험체 S0F0, S4F0, S0F4 및 S4F4의 응력-변형률 관계를 비교하고 있다. Fig. 9의 S0F0와 S4F0의 비교에서 4cm 간격으로 보강된 횡방향철근에 의하여 구속된 시험체 S4F0의 강도증가(Δf_c)는 9.57 MPa이다. 횡방향 구속철근이 없이 탄소섬유만에 의하여 구속된 S0F0와 S0F4의 비교에서 4매의 탄소섬유에 의하여 구속된 시험체 S0F4의 강도증가(Δf_c)는 49.2 MPa이다. 4cm 간격으



(a) S0F3 and S2F1



(b) S0F4 and S2F2



(c) S0F5 and S2F3

Fig. 8 Comparison of the axial stress-axial strain curves of cylinders

로 보강된 횡방향구속철근과 4매의 탄소섬유에 의하여 보강된 S4F4의 강도증가($\Delta f_s + \Delta f_f$)는 67.95MPa이며, 이 값은 S4F0과 S0F4 시험체의 강도증가인 9.57MPa과 49.2MPa를 합한 값과 유사하다. 그러므로 두 가지 재료에 의하여 동시에 구속된 S4F4의 강도증가는 한 가지 재료에 의하여 구속된 콘크리트의 강도증가를 중첩한 값과 유사하였다.

Fig. 10은 횡방향철근에 의한 구속압(f_{ls}) 및 CFS에 의한 횡방향 구속압(f_{lf})의 합의 증가에 따른 압축강도의 증가이다. Fig. 10에서 두 가지 재료에 의하여 구속된 시험체의 압축강도는 횡구속압의 합이 증가함에 따라서 거의 선형적으로 증가하고 있다. 따라서 두 가지 재료에 의하여 구속된 시험체의 압축강도는 현재 일반적으로 사용하고 있는 방법과 같이 각각의 재료에 의하여 증가된 압축강도를 중첩하여 사용할 수 있다.

4.3 구속 콘크리트의 최대 축방향 변형률

횡방향 철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 압축강도는 두 재료의 구속강도를 중첩한 값과 유사하였지만, 최대변형률은 압축강도와 다른 양상을 나타냈다. Fig. 11은 횡구속되지 않은 시험체 S0F0, 2cm 간격으로 횡방향 철근이 배근된 S2F0, 4매의 탄소섬유에 의하여 보강된 S0F4, 2cm 간격의 횡방향 철근과 4매의 탄소섬유에 의하여 동시에 보강된 S2F4의 축응력-축방향 변형률 관계이다. 그림에서 S2F4의 최대변형률은 S2F0의 구속변형률($\Delta \epsilon_s$)과 S0F4의 구속변형률($\Delta \epsilon_f$)를 더한 값과 큰 차이를 나타내며, S2F4의 구속변형률은 S2F0의 구속변형률($\Delta \epsilon_s$)과 S0F4의 구속변형률($\Delta \epsilon_f$)중에서 큰 값인 $\Delta \epsilon_s$ 와 유사하다.

Fig. 12는 횡방향철근에 의한 구속압(f_{ls}) 및 CFS에 의한 횡방향 구속압(f_{lf})의 합의 증가에 따른 최대변형률의 변화를 나타낸다. Fig. 12에서 두 가지 재료에 의하여 구속된 시험체의 압축강도와는 다르게 S4시리즈 및 S2시리즈의 최대변형률은 횡구속압의 합이 증가함에 따라서 선형적으로 증가하지 않고 있다. S2시리즈의 경우 시험체의 최대 변형률은 S2F0의 최대변형률과 유사하다. S4시리즈의 시험체 S4F1 및 S4F2의 최대 변형률은 S4F0의 최대 변형률과 유사하다. 이와 같은 실험결과는 횡방향 철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 최대변형률은 각각의 재료에 의하여 구속된 시험체의 최대변형률 중 큰 값에 의하여 지배받고 있음을 나타낸다.

S2시리즈의 S2F0의 최대변형률과 탄소섬유만에 의하여 보강된 S0시리즈의 최대변형률을 비교하면, S2F0의 최대 변형률이 S0시리즈의 최대변형률보다 크다. 그러므로 두

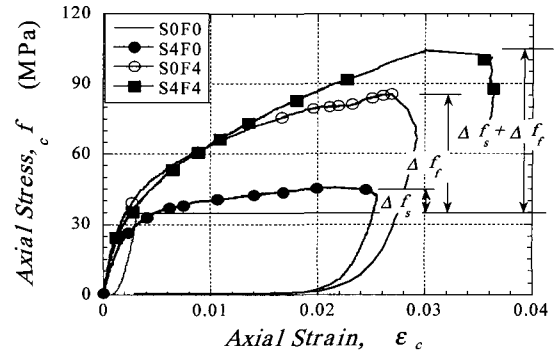


Fig. 9 Superposition of compressive strengths of cylinders, S0F0, S4F4, S0F4, and S4F4

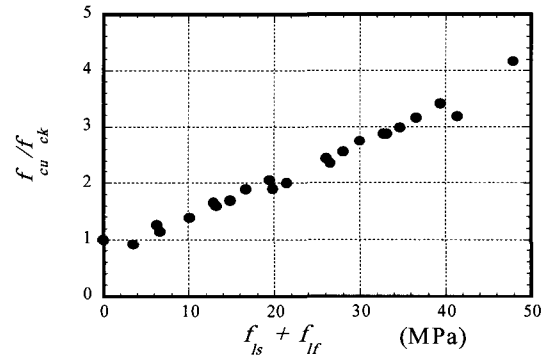


Fig. 10 Compressive strength versus confining pressure of cylinders

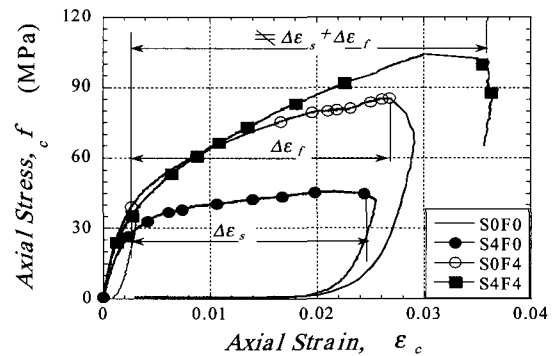


Fig. 11 Superposition of maximum axial strains of cylinders, S0F0, S4F0, S0F4, and S2F4

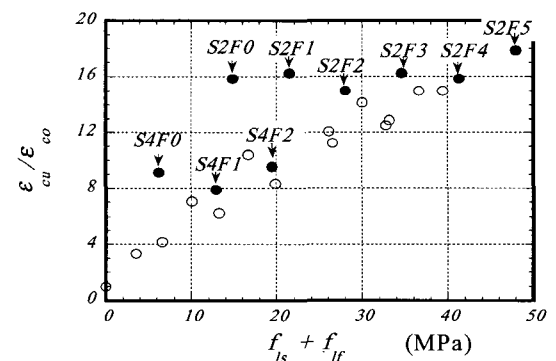


Fig. 12 Maximum strain versus confining pressure of cylinders

가지 재료에 의하여 동시에 보강된 S2시리즈 시험체의 최대변형률은 한 재료에 의하여 구속된 콘크리트의 최대변형률 중 큰 값인 S2F0의 변형률과 유사하다. S4시리즈에서도 S4F0의 최대변형률은 S0F1-S0F3의 최대변형률보다 크지만 S0F4 및 S0F5의 최대변형률보다 작기 때문에 두 가지 재료에 의하여 동시에 보강된 S4F1-S4F3의 최대변형률은 S4F0와 유사하다.

5. 구속된 콘크리트의 거동 예측

5.1 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계

철근과 섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 횡방향철근에 의한 구속압(f_{ls})과 CFS에 의한 횡방향 구속압(f_{lf})의 관계에 의하여 달라진다. f_{lf} 이 f_{ls} 보다 많은 S0시리즈와 S6시리즈 시험체는 f_{ck} 에 도달한 후에 일정한 기울기로 응력이 증가하지만, 섬유가 파단한 후에 응력은 즉시 감소한다. f_{lf} 가 f_{ls} 보다 작거나 유사하게 배근된 시험체 S4F1, S2F1-S2F3의 경우는 Fig. 8과 같이 횡방향철근이 항복한 후에 곡선의 기울기가 감소한다.

Fig. 13은 f_{lf} 와 f_{ls} 이 각각 14.81 MPa와 13.2 MPa로 유사한 S2F2의 축방향응력-변형률관계를 기존 평가식의 계산결과와 비교한다. Mander 등⁵⁾은 나선형 철근의 응력-변형률 곡선의 특성을 고려하여 다음 식을 제안하였다.

$$f_c = \frac{f_{cu} \cdot x \cdot r}{r - 1 + x^r} \quad (3)$$

여기서, $x = \epsilon_c / \epsilon_{cu}$ 이며 $r = E_c / (E_c - E_{2m})$ 이다. E_{2m} 은 구속콘크리트의 압축강도(f_{cu})를 최대변형률(ϵ_{cu})로 나눈 값이다. 나선형철근에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선에서 f_{ck} 이후의 접선계수 E_2 는 f_{ck} 이전

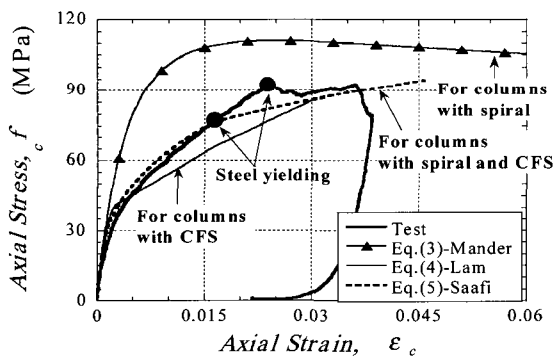


Fig. 13 Comparison between observed and predicted stress-strain curves

의 할선 탄성계수 E_c 와 유사하다. 그러나 CFS에 의하여 구속된 콘크리트의 f_{ck} 이후의 E_2 는 f_{ck} 이전의 E_c 보다 매우 작다. 나선형철근에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 예측하기 위하여 제안된 Mander 등의 식을 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트에 적용할 경우 Fig. 13과 같이 f_{ck} 이후의 실험값과 계산값에 큰 차이가 발생한다. 이러한 경향은 f_{lf} 이 커질수록 증가한다.

Lam 등⁸⁾은 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 예측하기 위하여 다음 식을 제안하였다.

$$\epsilon_t \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \text{ 일 때, } f_c = f_{cu} + E_{2l} \cdot \epsilon_c \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_t = 2f_{cu} / (E_c - E_{2l})$ 이며 $E_{2l} = 2f_{lf} / (\epsilon_{cu})$ 이다. 복합재료를 사용할 경우에 횡구속압(f_t)은 f_{ls} 와 f_{lf} 의 합이다. 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 예측하기 위하여 제안된 Lam 등의 식을 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트에 적용할 경우, Fig. 13과 같이 f_{ck} 도달 후의 실험값과 계산값에 큰 차이가 발생한다. 이는 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 f_{ck} 이후의 E_c 는 식 (4)의 E_{2l} 보다 크기 때문이다. 또한 실험에 의한 S2F2의 응력의 기울기는 Fig. 13과 같이 철근이 항복한 후에 감소하지만, 식 (4)는 횡방향철근의 항복점을 예측하지 못하여 콘크리트의 응력은 섬유가 파단할 때까지 일정하게 증가하였다.

Saafi 등⁶⁾은 횡방향변형률(ϵ_t)에 의하여 축방향응력과 축방향변형률을 예측하였다.

$$f_c = f_{ck} \left(1 + 2.2 \left(\frac{f_t(\epsilon_t)}{f_{ck}} \right)^{0.84} \right) \quad (5-1)$$

$$\epsilon_c = \epsilon_{cu} \left[1 + (537\epsilon_t + 2.6) \left(\frac{f_c}{f_{ck}} - 1 \right) \right] \quad (5-2)$$

식 (5-1)과 (5-2)는 식 (3)과 (4)에 비하여 계산과정이 복잡하지만 Fig. 2에 표시된 구속재료의 응력-변형률 관계의 특성을 반영할 수 있다. 식 (5)에서는 ϵ_t 를 점차 증가시키면서 각 단계의 ϵ_t 에 상응하여 변화하는 횡구속압(f_t)을 계산한다. 따라서 식 (5)는 횡방향철근의 항복점을 예측하여 Fig. 13과 같이 횡방향철근이 항복한 후에 감소하는 복합재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 실험결과에 유사하게 예측하였다.

Fig. 6에서 식 (5)는 횡방향 철근이 항복한 후에 f_{ls} 는 일정한 상태에서 f_{lf} 만이 증가하였다. 그러므로 복합재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 예측하기 위해서는 횡구속재료의 응력-변형률 특성을 반영할 수 있는 평가식이 필요하다.

5.2 구속 콘크리트의 압축강도

복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 강도는 Fig. 9와 같이 각 재료에 의하여 증가된 강도를 합한 값과 유사하였다. 구속된 콘크리트의 압축강도 평가식은 여러 연구자에 의하여 제안되었다. Mander 등⁵⁾은 나선형 철근으로 구속된 콘크리트 실린더의 최대 압축응력을 다음 식에 의하여 계산하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} \left(-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f_{ck}} - 2 \frac{f_l}{f_{ck}}} \right) \quad (6)$$

Lam 등⁸⁾은 섬유보강 콘크리트의 실험결과에 근거하여 다음 식을 제안하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} \left(1 + 2 \frac{f_l}{f_{ck}} \right) \quad (7)$$

Saafi 등⁶⁾은 보통강도 및 고강도 콘크리트 압축강도 실험을 통하여 f_{cu} 평가식을 제안하였다.

$$f_{cu} = f_{ck} \left(1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f_{ck}} \right)^{0.84} \right) \quad (8)$$

식 (6)-(8)을 이용하여 복합재료로 구속된 콘크리트의 압축강도를 예측할 경우에 횡구속압(f_l)은 f_{ls} 와 f_{lf} 의 합이 된다.

Fig. 14는 실험에서 구한 압축강도와 기존의 평가식에 의한 계산결과를 비교한다. 그림의 종축은 실험에 의한 압축강도(f_{cu-exp})를 계산에 의한 예측강도(f_{cu-cal})로 나눈 값이다. Fig. 14에서 각 재료의 구속압의 합을 대입하여 계산한 기존의 평가식은 복합재료의 압축강도를 유사하게 예측하였다. 식 (6)-(8)에 의하여 계산된 f_{cu-cal} 와 f_{cu-exp} 의 평균값은 각각 0.80, 0.99, 0.90이며, 변동계수는 각각 17.0%, 9.3%, 12.2%이었다.

5.3 구속 콘크리트의 최대변형률

압축강도와는 다르게 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 최대변형률은 Fig. 11과 같이 각각의 재료에 의하여 증가된 변형률의 합과 큰 차이가 있으며, 두 재료에 의한 콘크리트의 변형률 중에서 큰 변형률과 유사하였다 (Fig. 6).

Mander 등⁵⁾, Lam 등⁸⁾ 및 Saafi 등⁶⁾은 구속된 콘크리트의 최대 변형률(ϵ_{cu})을 다음 식과 같이 각각 제안하였다.

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left(1 + 5 \left(\frac{f_{cu}}{f_{ck}} - 1 \right) \right) \quad (9)$$

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left(2 + 15 \left(\frac{f_l}{f_{ck}} \right) \right) \quad (10)$$

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left(1 + (537 \epsilon_{fo} + 2.6) \left(\frac{f_{cu}}{f_{ck}} - 1 \right) \right) \quad (11)$$

Fig. 15는 실험에서 구한 최대변형률과 기존의 평가식에 의한 계산결과를 비교한다. 그림의 종축은 실험에 의한 최대변형률(ϵ_{cu-exp})을 계산값(ϵ_{cu-cal})으로 나눈 값이다. Fig. 15에서 각 재료의 구속압의 합을 대입하여 계산한 기존의 평가식과 실험결과와는 큰 차이가 있다. 식 (9)-(11)에 의하여 계산된 ϵ_{cu-exp} 와 ϵ_{cu-cal} 의 평균값은 각각 1.23, 1.11, 0.84이며, 변동계수는 각각 28.5%, 29.7%, 49.2%이었다.

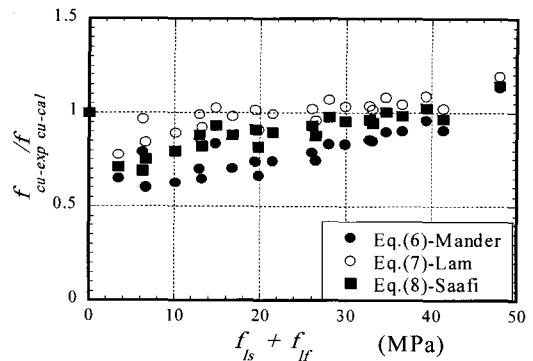


Fig. 14 Comparison between observed and predicted axial strength

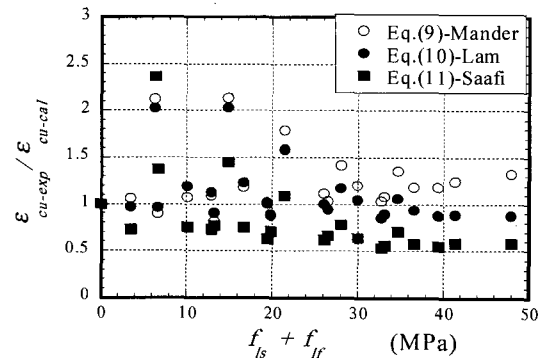


Fig. 15 Comparison between observed and predicted axial strain

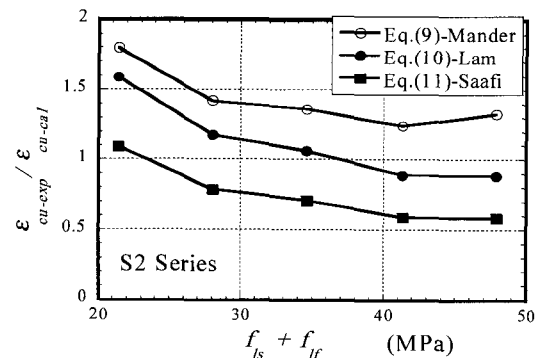


Fig. 16 Comparison between observed and predicted axial strain for S2 series

이와 같이 실험값과 계산값에 큰 차이가 발생하는 이유는 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 최대변형률은 압축강도와는 다르게 각각의 재료에 의하여 증가된 값의 합보다는 두 값 중에서 큰 값에 의하여 영향을 받기 때문이다. 이러한 현상은 S2시리즈의 최대변형률과 구속압의 관계를 비교한 Fig. 16에서 보다 명확히 파악할 수 있다. Fig. 16은 S2시리즈의 최대변형률을 식 (9)-(11)의 계산값과 비교한다. S2F1의 $f_{cs} + f_{cf}$ 은 21.42 MPa이며 S2F5의 $f_{cs} + f_{cf}$ 은 47.91 MPa이다. Fig. 16에서 각 재료의 구속압을 합하여 최대변형률을 계산할 경우에 계산된 최대변형률이 증가하므로 구속압이 증가함에 따라 $\epsilon_{cu-exp} / \epsilon_{cu-cal}$ 는 감소한다.

6. 결 론

이 논문에서는 나선형철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트 실린더 실험결과에 근거하여 복합재료로 구속된 콘크리트의 거동을 분석하였다. 실험 및 분석을 통하여 얻은 결론은 아래와 같다.

- 1) 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 최대변형률은 각각의 재료에 의하여 구속된 콘크리트의 변형률 중에서 큰 변형률과 유사하였다. 각각의 재료의 구속압을 합하여 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 변형률을 예측할 경우에 실제값을 과대 평가할 수 있다.
- 2) 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계는 구속된 재료의 구속압, 강도 및 응력-변형률 관계에 따라서 달라진다. 철근의 구속압이 섬유보다 크거나 유사할 때는 철근이 항복한 후에 콘크리트의 응력증가는 감소하였다. 그러므로 보다 정확하게 복합재료의 응력-변형률 관계를 예측하기 위해서는 각 구속재료의 응력-변형률 관계를 반영할 수 있는 평가식이 필요하다.
- 3) 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 압축강도는 각각의 재료에 의하여 증가된 압축강도를 합한 값과 유사하다.
- 4) 횡방향 철근에 의하여 구속된 기존의 철근콘크리트 부재를 섬유로 보강할 경우에 그 부재는 두 가지 재료에 의하여 복합구속을 받게 된다. 이러한 부재의 거동을

정확하게 평가하기 위해서는 구속재료의 각각의 특성을 반영한 평가식의 제안이 필요하다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Karbhari, V. M. and Gao, Y., "Composite jacketed concrete under uniaxial compression-verification of simple equations," *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.9, No.4, 1997, pp.185~193.
2. Samman, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete by Fiber Composites," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, Sep. 1998, pp.1025~1031.
3. Mirmiran, A. and Shahawy, M. "Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, May 1997, pp.583~590.
4. Spoelstra, M. R. and Monti, G., "FRP-Confined Concrete Model," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.3, No.3, Aug. 1999, pp.143~150.
5. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No.8, Aug. 1988, pp.1804~1826.
6. Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z., "Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes," *ACI Material Journal*, ACI, Vol.96, No.4, July-Aug. 1999, pp.500~509.
7. 이정운, 정훈식, "섬유에 의하여 구속된 원형 콘크리트 기둥의 최대변형률 예측", 콘크리트학회논문집, 15권 5호, 2003. 10, pp.726~736.
8. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., "FRP-Strengthened RC Structures," John Wiley & Sons, Ltd, 2002, 245pp.

요 약

횡방향철근에 의하여 구속된 기존의 철근콘크리트 부재를 섬유에 의하여 보수·보강할 경우에 그 부재는 철근과 섬유에 의하여 동시에 구속된다. 이렇게 두 가지 재료에 의하여 복합구속된 콘크리트의 거동은 구속재료의 응력-변형률 곡선 및 구속압에 따라서 달라진다. 이 논문에서는 나선형철근과 섬유에 의하여 동시에 구속된 24개의 실린더 실험을 통하여 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 거동을 분석하였다. 실험에 의하면 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 거동은 한 가지 재료만에 의하여 구속된 콘크리트의 거동과 큰 차이를 나타냈다.

핵심용어 : 보강, 섬유보강, 나선형 철근, 횡구속압, 콘크리트 실린더, 압축강도