



FRP로 보강된 콘크리트의 강도 및 변형을 예측

이대형^{1)*} · 김영섭²⁾ · 정영수²⁾

¹⁾경도대학 토목과 ²⁾중앙대학교 토목공학과

Empirical Prediction for the Compressive Strength and Strain of Concrete Confined with FRP Wrap

Dae-Hyoung Lee^{1)*}, Young-Sub Kim²⁾, and Young-Soo Chung²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Gyeong-Do Provincial College, Yecheon 757-807, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, Anseong 456-756, Korea

ABSTRACT Previous researches showed that confined concrete with Fiber-Reinforced Plastic (FRP) sheets significantly improves the strength and ductility of concrete compared with unconfined concrete. However, the retrofit design of concrete with FRP materials requires an accurate estimate of the performance enhancement due to the confinement mechanism. The object of this research is to predict the compressive strength and strain of concrete confined with FRP wraps. For the purpose of this research, 102 test specimens were fabricated and loaded statically under uniaxial compression. Axial load, axial and lateral strains were investigated to predict the ultimate stress and strain. Also, to achieve reliability of proposed strength and strain models for FRP-confined concrete, another series of uniaxial compression test results were used. This paper presents strength and strain models for FRP-confined concrete. The proposed models to estimate the ultimate stresses and failure strains produce satisfactory predictions as compared to current design equations. In conclusion, it is proposed that the modified stress-strain model of concrete cylinders could be effectively used for the repair and retrofit of concrete columns.

Keywords : aramid fiber, carbon fiber, glass fiber, confined concrete, modified stress-strain model

1. 서 론

콘크리트 구조물은 사용된 재료의 품질 저하, 환경적인 부식, 설계하중 이상의 과도한 하중 재하 등 많은 요인에 의해 심각한 열화를 입을 수 있다. 따라서, 최근에는 이러한 사회 기반 시설물에 대한 보수·보강이 시급히 요구되어 섬유를 이용한 보수·보강 공법이 시행되고 있다. 특히 FRP에 의한 보수·보강 공법에 대한 연구는 1980년대 이후 시작되어 교각 등의 보수·보강 재료로 이용되고 있다. 이러한 섬유 재료는 구조물의 역학적 특성 및 연성을 증가 시킬 뿐만 아니라 시공성도 뛰어나다. 또한, 높은 인장강도 및 탄성계수, 경량, 내부식성, 내화학적 등의 장점이 있으며 시공이 쉽고 취급이 간편한 이점이 있다^{1,2)}.

한편, 섬유로 보강된 구조물은 섬유의 구속 효과로 인하여 내진 성능 향상에도 기여하는 것으로 조사되었다³⁾. 이러한 FRP(fiber reinforced polymer) 재료는 아라미드(aramid), 탄소(carbon), 유리(glass) 섬유를 에폭시 레진을 이용하여 접착하며 이러한 보수·보강 공법은 미국,

일본 등의 강진 지역에 많이 이용되고 있다^{1,4)}. 그러나, 현행 설계규정과 철근을 이용한 콘크리트의 구속 모델에는 FRP 재료를 이용한 콘크리트 구속에 대한 관련 기준이 없는 실정이다. 또한, 이제까지의 연구는 횡구속 철근에 의한 콘크리트의 강도 및 변형을 증가에 관한 연구로 국한되어 온 것이 사실이다.

Kazunori 등은 FRP로 보강된 콘크리트의 해석 모델을 제안하였다. 이를 위해 축방향 변형률과 강도의 관계, 푸아송비를 이용하여 구속 효과를 구명하였다⁵⁾. Teng⁶⁾ 등도 기존 연구 결과를 비교 분석하여 FRP로 보강된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 해석적으로 제시하였다.

최근 염광수²⁾ 등은 탄소섬유시트로 보강된 콘크리트의 거동을 조사하였으며 일축압축시험을 통하여 콘크리트의 압축강도 추정식을 제안하였다. 이러한 관련 연구는 대부분 탄소섬유에 국한되어왔으며 아라미드 및 유리섬유에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 FRP로 보강된 콘크리트의 강도 및 변형률에 대한 경험적 산정식을 위하여 아라미드, 탄소 및 유리섬유로 보강된 102개의 원형 콘크리트 공시체를 제작하여 압축강도 실험을 실시하였으며 기존 연구의 실험 결과와 병행하여 콘크리트의 압축강도 및 변형률 증가를 예측하고자 하였다.

*Corresponding author E-mail : dhlee@gpc.ac.kr

Received April 28, 2006, Accepted November 27, 2006

©2007 by Korea Concrete Institute

2. 기존 횡구속 효과에 관한 연구

2.1 횡구속력

횡구속된 콘크리트는 축방향 압축력으로 인해 내부 균열이 발생하고 이 내부 균열로 인해 콘크리트는 횡방향으로 팽창한다. 낮은 응력 상태에서는 섬유 및 횡철근에 의한 구속력의 효과가 거의 나타나지 않으나 무보강 콘크리트가 최대 압축강도에 이르게 되면 섬유에 의해 효과적으로 횡구속력이 발휘되며, 이에 따라 횡변형이 구속되어 강도 증가 효과가 나타나게 된다. 이러한 상태는 콘크리트가 3축압축 상태로 가정할 수 있다⁶⁾.

1928년 Richart 등⁷⁾은 유압으로 횡구속된 원형 콘크리트의 압축강도 실험을 실시하였으며, 실험을 통해 축방향 압축강도와 횡구속력의 관계를 다음 식 (1)과 같이 처음으로 소개하였다. Fig. 1의 (a), (b)는 횡구속력의 증가에 따른 콘크리트의 축방향 압축응력과 변형률이 선형적으로 증가한다는 것을 나타낸 것이다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (1)$$

여기서, f'_{cc} = 횡구속된 콘크리트의 최대 압축강도, f_l = 횡구속 응력, f'_{co} = 무보강 콘크리트의 최대 압축강도, k_1 = 횡구속 유효 계수이다.

또한, 횡구속된 콘크리트의 축방향 압축변형률이 횡구속력과 관계가 있으며 이를 기초로 다음 식 (2)와 같이 제안하였다⁸⁾.

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{co} + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (2)$$

여기서, ε_{cc} = 횡구속된 콘크리트의 최대 변형률, ε_{co} = 무보강 콘크리트의 최대 변형률이다.

Mander 등⁹⁾은 횡방향으로 구속된 철근의 응력-변형률 관계식을 제안하였으며 원형 및 사각형 교각의 심부구속 철근에 따른 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계를 제안하였다. FRP로 구속된 콘크리트 강도 모델은 기본적으로

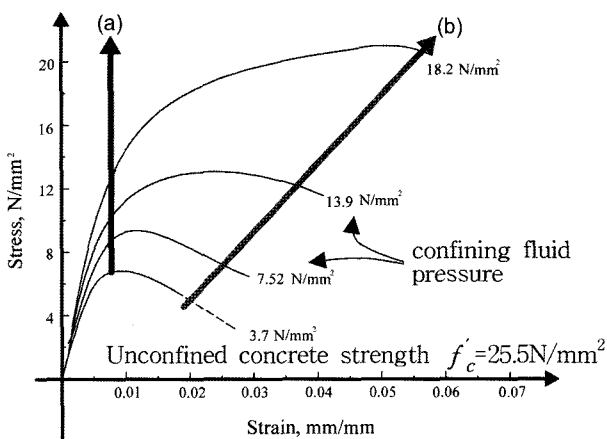


Fig. 1 Stress-strain curve of richart model

로 식 (1)을 바탕으로 횡구속 유효 계수, k_1 에 대한 값을 수정 제안하였다. FRP 구속 콘크리트의 횡방향 구속력, f_l 은 Fig. 2의 평형조건으로부터 계산된다. 구속된 콘크리트는 균등한 구속력을 받으며, FRP로 인해 발생한 최대 횡구속력은 FRP의 인장강도, 보강량 및 구속 콘크리트의 지름에 의해 결정된다. Fig. 2에서 $f_l \pi d^2 s' = f_{frp} (2\pi d t_{frp}) s$ 이므로

$$f_l = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp}f_{frp}}{2} \quad (3)$$

여기서, f_l = 횡구속력, f_{frp} = FRP 인장강도, t_{frp} = FRP 두께, d = 콘크리트 단면 지름, ρ_{frp} = FRP 구속비, s' = 실험체의 높이, s = FRP 보강 높이이며 일반적으로 $s' = s$ 이다. FRP 구속비는 다음 식 (4)와 같이 정의된다.

$$\rho_{frp} = \frac{\pi d t_{frp}}{\pi d^2 / 4} = \frac{4t_{frp}}{d} \quad (4)$$

2.2 구속 콘크리트의 최대 압축강도 추정식

FRP로 구속된 콘크리트의 강도 모델에 관한 연구 결과는 대부분 식 (1)의 형태를 기본으로 하고 있다. Richart 등⁷⁾에 의해 처음으로 제안된 이후 식 (1)을 철근으로 구속된 콘크리트에도 적용할 수 있다고 보고하였다. 식 (1)의 형태를 처음으로 FRP로 구속된 콘크리트에 적용한 것은 Fardis 등¹⁰⁾이다. 최근까지 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도는 식 (1)의 k_1 을 수정하여 제안되었다. Miyauchi 등¹¹⁾은 $k_1 = 2.98$ 로 상수로 정의하였으나 Karbhari 등¹²⁾은 k_1 이 횡구속력과 압축강도의 비에 영향을 받는다고 제안하였다. Mimiran 등¹³⁾은 형상비(L/d)의 영향을 고려하였다. 다음 Table 1은 대표적인 기존 연구 결과를 나타낸다.

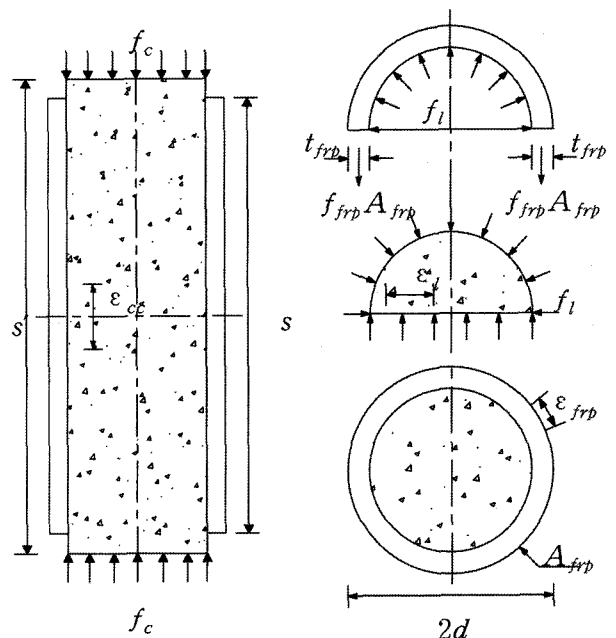


Fig. 2 Confining action of FRP composite

Table 1 Various strength models for FRP-confined concrete

Researcher	Karbhari and Gao(1997)	Samaan et al.(1998)	Miyauchi et al.(1999)	Saafi et al.(1999)	Toutanji(1999)
Source equation	$f'_{cc} = f'_{co} + k_1 f_l$				
k_1	$2.1(f_l/f'_{co})^{-0.13}$	$6.0f_l^{-0.3}$	2.98	$2.2(f_l/f'_{co})^{-0.16}$	$3.5(f_l/f'_{co})^{-0.15}$

2.3 구속 콘크리트의 극한변형률

Richart 등⁸⁾은 철근으로 구속된 콘크리트의 최대 압축 강도에서의 축방향 변형률의 관계를 처음으로 다음 식 (5)와 같이 제안하였다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left(1 + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (5)$$

여기서, ϵ_{co} 는 비구속 콘크리트의 최대 압축강도에서의 변형률이며 k_2 는 변형률 증가 계수이다. 또한, 황철근으로 구속된 콘크리트에서 $k_2 = 5k_1$ 의 관계를 제안하였다. 최근 많은 연구 결과에 따르면 황철근으로 구속된 콘크리트의 변형률과 FRP로 구속된 콘크리트의 변형률은 큰 차이가 있는 것으로 보고되고 있다^{14,16)}. FRP로 구속된 콘크리트의 실험은 FRP 튜브와 FRP wrap으로 보강된 콘크리트에 관한 실험이 수행되었다. 특히, Samaan 등¹⁵⁾의 식에서는 황구속된 콘크리트의 강도와 접선계수를 예측한 후, 최대 변형률을 다음 식 (6)과 같이 초기 활선탄성계수보다 상대적으로 작은 값인 두 번째 기울기(E_2)를 사용하였다. 이 식 (6)에 의하면 E_2 의 크기에 의해 예측된 강도의 작은 차이에 대해서도 최대 변형률은 크게 영향을 받는다.

$$\epsilon_{cc} = \frac{f_{cc} - f_o}{E_2} \quad (6)$$

여기서, $f_o = 0.872f'_{co} + 0.371f_l + 6.258$ 이며 E_2 는 Fig. 3에서와 같이 콘크리트의 압축강도 이후 구속에 의한 탄성계수를 나타낸다. Saafi 등¹⁶⁾은 섬유 구속 콘크리트의 실험 결과를 이용하여 다음 식 (7)을 제안하였다.

$$\frac{\epsilon_{cc}}{\epsilon_{co}} = 1 + (537\epsilon_l + 2.6) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \quad (7)$$

여기서, ϵ_l 은 FRP의 횡방향 변형률이다.

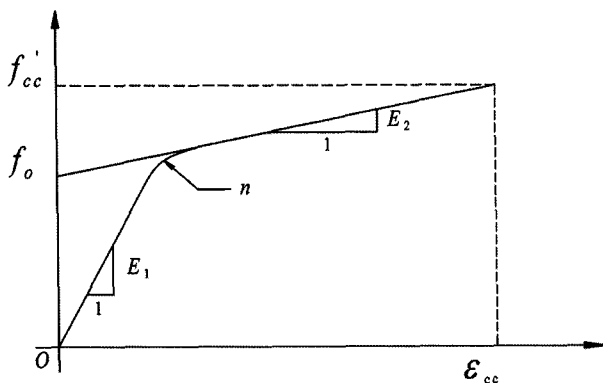


Fig. 3 Stress-strain model for FRP-confined concrete

3. 실험 결과 분석

3.1 실험 개요

본 실험은 아라미드, 탄소, 유리섬유에 의해 황구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 고찰하기 위해 102개의 콘크리트 공시체를 제작하였다. 주요 실험 변수로서 보강 및 무보강, 단면의 크기, 콘크리트의 강도, 보강 재료의 종류이다. 기준 시험체로서 무보강 시험체를 제작하였으며 단면의 크기는 100 × 200 mm, 150 × 300 mm로 하였다. 실험체의 상세는 연계 논문¹⁷⁾에 상세히 수록하였으며 단면의 크기, 강도 및 보강량에 따라 3종류의 그룹으로 구분하였다.

3.2 실험 결과

무보강 실험체의 실험 결과는 평균값을 이용하였으며 FRP로 보강된 각 실험체의 압축강도 실험 결과는 Table A.1~A.3과 같이 부록에 수록하였다. 또한, FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도 및 변형률 예측 모델을 구하기 위하여 기존 실험 결과를 이용하였다. 기존 실험 결과는 Table A.4에 수록하였다. Table A.1~A.4의 f_{frp} 와 E_{frp} 는 FRP의 인장강도 및 탄성계수이며 평면 인장시험 (flat coupon test)에 따른 결과이다. 이러한 연구 결과들을 Table 2와 같이 분류하였다. 본 연구에서 수행된 무보강 실험체의 압축강도 실험 결과는 다음 Table 3에 나타내었다.

Table 2 Classification of test results

Data	Group number	Dimension		Strength (MPa)	Table number
		d (mm)	h (mm)		
Set 1	Group(A)	100	200	20, 34, 43	Table A.1
	Group(B)	150	300	16, 28, 42	Table A.2
	Group(C)	100	200	33	Table A.3
Set 2	Other related test results				Table A.4

Table 3 Test results of unconfined concrete

Specimen	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	ϵ_{co} (10^{-3})	ϵ_l (10^{-3})	E_c (MPa)
20-10-U0	100	200	2.0	20.790	5.35	4.9	23,000
34-10-U0	100	200	2.0	34.087	3.35	0.56	29,200
43-10-U0	100	200	2.0	43.702	3.75	1.47	33,000
16-15-U0	100	200	2.0	15.500	3.48	0.97	12,000
28-15-U0	100	200	2.0	28.885	1.15	1.06	27,000
42-15-U0	100	200	2.0	42.395	1.25	1.01	34,000
33-10-U0	100	200	2.0	33.276	2.73	3.47	29,000

4. FRP로 구속된 콘크리트의 거동 예측

4.1 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도 추정식

Fig. 4는 Table 2에 구분된 data set 1과 2에 기존의 Richart 등⁸⁾, Mander 등⁹⁾, Saaman 등¹⁵⁾, Saafi 등¹⁶⁾의 예측 결과를 비교하였다. 이들 4개의 모델 중, Saafi 모델과 Saaman 등의 모델은 Richart와 Mander 모델의 예측 값 보다 유사한 FRP로 구속 콘크리트의 압축강도를 예측하였다. 또한, 횡구속력이 작은 경우 보다 횡구속력이 큰 경우 압축강도를 과대평가하는 경향이 있다. 본 연구의 실험 결과와 Saafi 등의 모델이 가장 근사한 결과를 보이고 있다.

Table 4는 실험 결과와 기존 모델에서 추정된 구속된 압축강도의 (f'_{cc})의 비를 평균하여 표준편차와 변동계수를 각 data set 1과 2로 구분하여 나타낸 것이다.

변동계수에서 볼 수 있듯이 Saafi 등¹⁶⁾과 Samaan 등¹⁵⁾의 모델이 상대적으로 근사한 값을 예측하고 있다. 그러나 Richart 등⁸⁾과 Mander 등⁹⁾의 모델에서는 전체적으로

높은 변동계수를 나타내는 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 Samaan 등과 Saafi 등의 모델은 FRP로 구속된 콘크리트의 실험을 통해 얻어진 강도 추정식이며, Richart는 유압을 이용하여 횡구속을 하였고 Mander는 횡철근으로 구속된 콘크리트 실험을 통해 제안된 모델이기 때문에 Richart 등과 Mander 등의 모델은 철근과 FRP의 재료적 차이를 고려하지 않은 모델이기 때문으로 사료된다.

본 연구에서 실험 결과를 바탕으로 새로운 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도를 예측하기 위하여 data set 1과 2를 각각 회귀분석을 실시하였다. FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도와 횡구속력의 관계를 선형으로 하였으며 Fig. 5는 이러한 회귀분석 결과를 나타낸다.

본 연구를 위해 실시한 실험 결과 data set 1의 결과 $k_1 = 1.93$ 을 얻었으며 data set 2의 결과 $k_1 = 2.03$ 을 얻었다. Fig. 5(b)는 전체 실험 결과를 이용하여 회귀분석을 통하여 다음 식 (8)과 같은 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도 추정식을 제안하였다. 이 경우 상관계수 (R^2)는 0.807이다.

$$f'_{cc} = f'_{co} \left(1 + 2.0 \frac{f_l}{f'_{co}} \right) \quad (8)$$

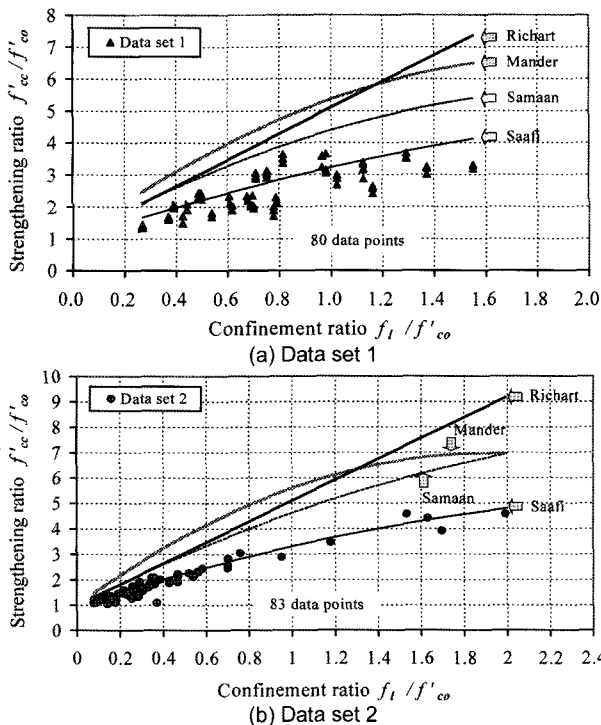


Fig. 4 Comparison of strength models of FRP-confined concrete with test results

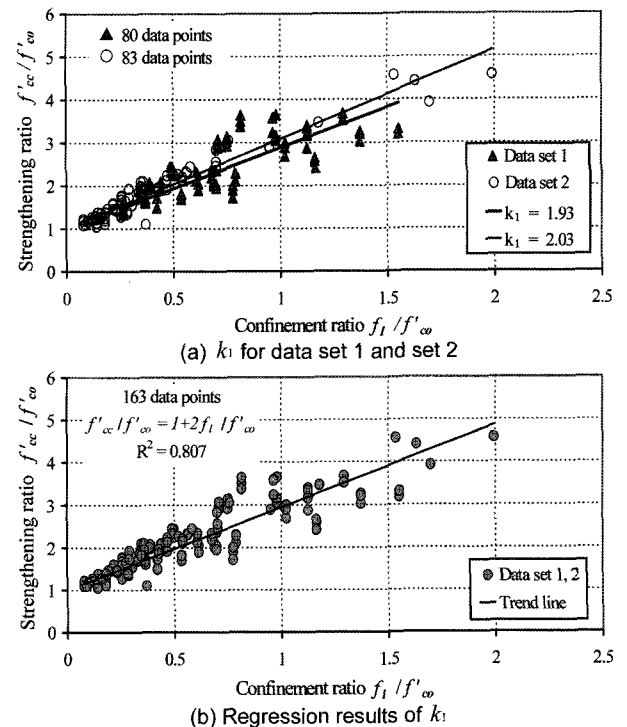


Fig. 5 Proposed strength model

Table 4 Statistical performance of strength models as assessed by data set 1 and 2

Model	Test-to-predicted ratio					
	Data set 1			Data set 2		
	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation(%)	Mean	Standard deviation	Coefficient of variation(%)
Richart et al. (1928)	0.62	0.11	18.42	0.73	0.09	12.35
Mander et al. (1988)	0.56	0.10	17.14	0.60	0.07	11.58
Samaan et al. (1998)	0.68	0.10	14.24	0.71	0.07	9.81
Saafi et al. (1999)	0.91	0.15	16.14	0.91	0.10	10.97

Table 5 Statistical characteristics of test data

Data	No. of data	Test-to-predicted f'_{cc} ratio			
		Mean	Standard deviation	Equation	Coef. of variation(%)
Set 1	80	1.01	0.17	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1.93 \frac{f_l}{f'_{co}}$	16.49
Set 2	83	1.00	0.10	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.08 \frac{f_l}{f'_{co}}$	10.05
Set all	163	1.01	0.14	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.0 \frac{f_l}{f'_{co}}$	13.77

제안된 식 (8)은 횡구속력에 의해 콘크리트 압축강도와 단면지름, 섬유 탄성계수, 섬유의 두께와 같은 재료의 특성이 고려된 식이며, Fig. 6에서 알 수 있듯이 실험에서 도출된 횡구속 유효계수, k_1 은 실험 결과와 상당히 일치하는 것으로 판단된다. Fig. 7은 본 연구에서 제안된 강도 모델과 기존 연구 결과와 비교하였다. 기존의 연구 결과들이 섬유에 의한 보강 효과를 과대평가하는 것을 알 수 있다.

식 (8)은 횡구속비의 함수로서 횡구속 철근이 있는 철근콘크리트에 적용할 경우 철근에 의한 횡구속력과 섬유에 의한 횡구속력을 고려하여 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 이 경우 철근의 횡구속력은 구속 유효 계수, 심부구속철근비 및 횡구속철근의 인장강도에 따라 결정된다.

4.2 FRP로 구속된 콘크리트의 최대 변형률 추정식

FRP로 횡구속된 콘크리트의 압축강도는 극한변형률에서 극한응력을 보인다. 따라서, 극한변형률에 대한 정확

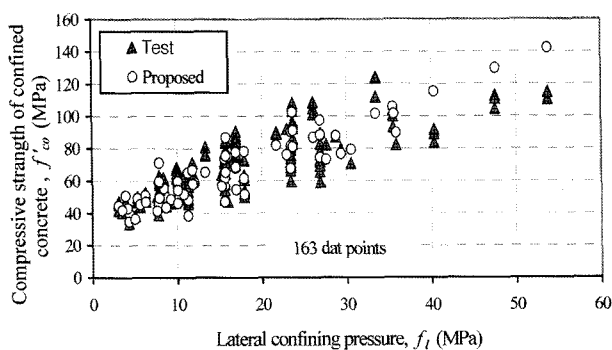


Fig. 6 Comparison of suggested model with test results

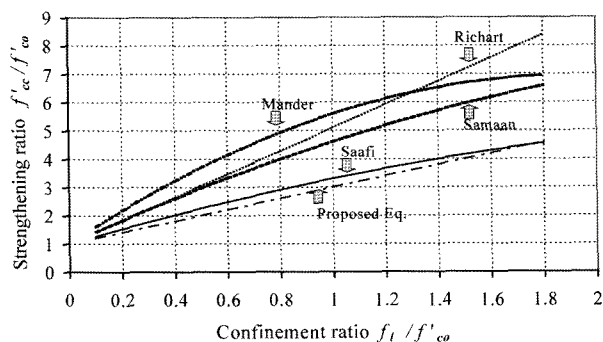


Fig. 7 Comparison of various strength models

한 예측은 극한강도의 예측 못지않게 중요한 사항이다. 본 연구에서는 최대 변형률을 예측하고자 기존의 연구자들이 제안한 식을 기초로 하여 최대 변형률을 예측하고자 한다. 최대 변형률 예측을 위해 사용된 실험 결과는 102개의 실험체에 대한 압축강도 실험을 통한 결과를 이용하였다. 섬유의 변형률 측정을 위하여 익스텐서미터와 컴프레서미터를 조합한 피아송비 측정 장비를 이용하였다. 따라서, 실험 오차 및 실험 장비의 정밀도 등으로 인하여 변형률 실험 결과는 오차 발생 및 분산된 결과를 보였다. 본 추정식을 위해 사용된 결과는 동일한 조건의 실험체에 비해 20% 이상의 차이를 보이는 결과는 제외하였다.

Fig. 8은 본 연구의 실험 결과와 Mander, Samaan, Saafi의 기존 제안식을 비교하였다. 기존의 Richart, Mander, Samaan, Saafi의 제안식은 보강된 콘크리트의 최대 변형률을 정확하게 예측하지 못하고 실제 값과 큰 차이를 나타냈다. 특히, 나선 철근으로 구속된 콘크리트 기둥의 실험 결과에 근거하여 제안된 Mander의 식을 계산한 결과 실제 최대 변형률과 많은 차이가 있다. 나선철근의 경우, 항복변형률에 도달한 후에도 일정한 응력을 유지하지만, 섬유는 인장강도에 도달과 동시에 파단되어 최대 변형률이 결정되기 때문이다. FRP 실험에 근거하여 제안된 Samaan의 모델 또한 정확한 최대 변형률을 예측하지 못하였다. 이는 Samaan의 식에서 식 (6)과 같이 최대 변형률이 초기 할선 탄성계수보다 상대적으로 작은 E_2 값에 의해 결정되고, 예측된 강도의 작은 차이에 대해서도 최대 변형률이 크게 영향을 받기 때문이다. Saafi 등의 식에 의하여 계산된 최대 변형률은 Mander 등과 Samaan 등의 예측 값보

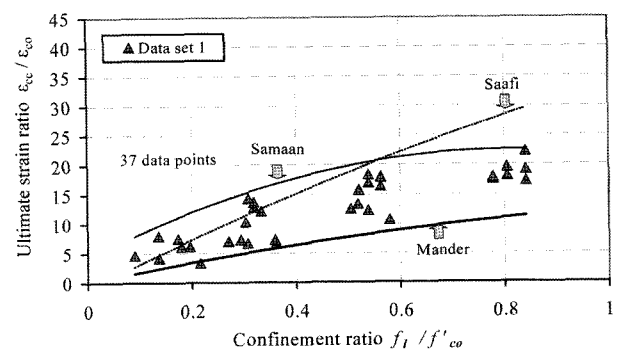


Fig. 8 Comparison of strain models for FRP-confined concrete with test results

다 정확한 최대 변형률을 예측하였지만, 횡구속압이 큰 경우 실험값을 과대평가하고 있다.

본 연구의 실험 결과에 근거하여 아라미드 섬유, 탄소 섬유, 유리섬유에 의해 구속된 콘크리트의 최대 변형률 추정식을 조사하였다. 이를 위해 실험 결과를 기초로 회귀분석을 실시하였으며 Fig. 9 및 식 (9)와 같은 결과를 얻었다. 이 경우 상관계수 (R^2)는 0.7203이다. Fig. 10에서 제안된 식 (9)와 실험 결과를 비교하였다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 12.2 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

Fig. 11에서 제안된 최대 변형률 추정식 식 (9)와 기존

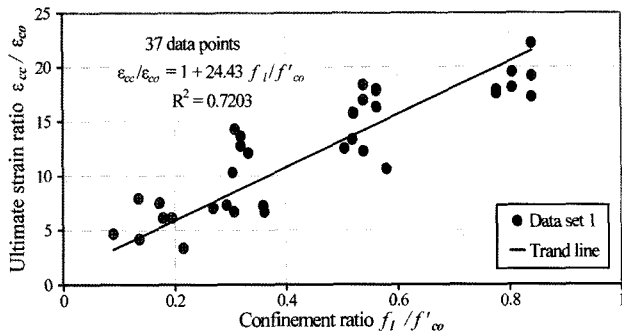


Fig. 9 Proposed strain model

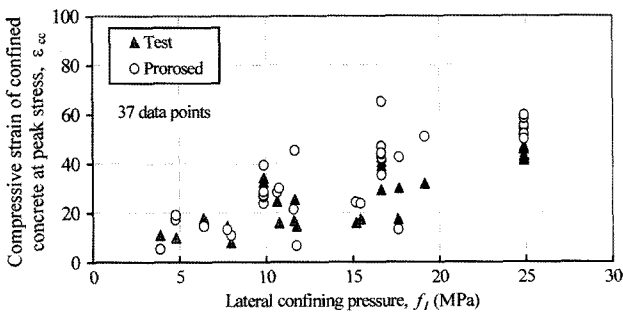


Fig. 10 Comparison of proposed strain model with test results

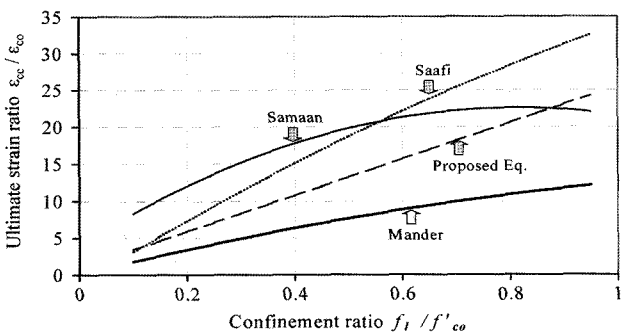


Fig. 11 Comparison of various strain models

Table 7 Statistical characteristics of test data

Data	Data points	Test-to-predicted ϵ'_{cc} ratio			
		Mean	Standard deviation	Equation	Coefficient of variation (%)
Set 1	37	9.95	3.35	$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co} \left[1 + 12.2 \left(\frac{f'_l}{f'_{co}} - 1 \right) \right]$	0.34

Table 6 Statistical characteristics of test data set 1

Model	Test-to-predicted ϵ'_{cc} ratio		
	Mean	Standard deviation	Coef. of variation (%)
Richart et al. (1928)	5.31	2.92	0.55
Mander et al. (1988)			
Samaan et al. (1998)	4.45	8.41	1.89
Saafi et al. (1999)	0.38	0.92	2.42

연구 결과를 비교하였다. 식 (9)는 Saafi 및 Samaan의 모델에 비해 작은 변형률을 보이고 있으며 Mander 모델에 비해서는 큰 최대 변형률을 보이는 것으로 조사되었다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 FRP로 횡구속된 콘크리트의 거동에 관한 연구로서 102개의 실험체를 제작하여 아라미드 섬유, 탄소 섬유, 유리섬유로 횡구속하여 실험을 수행하였다. 본 연구의 실험 결과와 기존의 실험 결과에 근거하여 FRP 구속 콘크리트의 최대 구속 응력과 최대 변형률을 예측하였다. 실험 및 분석을 통해 도출된 결론은 아래와 같다.

- 1) 구속 콘크리트의 압축강도와 섬유의 파단 강도 및 시험체의 크기 등의 다양한 실험 변수를 이용하여 제안된 최대 변형률 추정식은 평균 9.95와 변동계수 0.34%를 나타냈으며, 기존의 제안식보다 정확하게 구속 콘크리트의 최대 변형률을 예측하였다.
- 2) 콘크리트의 압축강도 및 횡구속 응력으로 표현된 제안식은 실험 결과와 비교하여 평균 1.01과 변동계수 13.77%로 예측하였다.
- 3) 기존 압축강도 모델은 대부분 실험 결과보다 큰 압축강도를 예측하였으며 횡철근으로 구속된 콘크리트의 변형률 모델을 근거로한 Mander 등의 변형률 모델은 실험 결과에 비해 낮은 변형률을 예측하였다.
- 4) 정적 실험을 통해 섬유 구속량, 단면의 크기, 콘크리트 압축강도에 따른 콘크리트의 강도 증가를 예측하기 위해 Richart 등의 모델을 기초로 하였다. 구속된 콘크리트의 압축강도와 횡구속력의 관계는 선형으로 가정하여 응력과 변형률의 예측 모델을 식 (8) 및 (9)와 같이 제안하였다.

감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2004년도 건설핵심기술연구개발

사업 (과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사 드립니다

참고문헌

1. Toutanji, H., "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets", *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.3, 1999, pp.397~404.
2. 염광수, 이영호, 박영준, 이학은, "탄소섬유시트(CFS)로 보강된 콘크리트의 거동", 대한토목학회 논문집, 24권, 2A호, 2004, pp.259~265.
3. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1996, pp.585~653.
4. Mufti, A. A., Erki, M. A., and Jaeger, L. C., *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures in Japan*, Canadian Society of Civil Engineering, Montreal, Canada, 1992, pp.158~164.
5. Fujikake, K., Mindess, S., and Xu, H., "Analytical Model for Concrete Confined with Fiber Reinforced Polymer Composite", *ASCE Journal of Composites for Construction*, Vol.8, No.4, 2004, pp.978~995.
6. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., *FRP-Strengthened RC Structures*, John Wiley & Sons Ltd., New York, 2002, pp.158~190.
7. Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., "A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses", *Bulletin 185*, University of Illinois Engineering Experimental Station, Champion, Ill, 1928, 104pp.
8. Richart, F. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., *A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses*, University of Illinois, Engineering Experimental Station, Illinois, USA, 1929.
9. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. "Theoretical Stress-Strain Moedel for Confined Concrete", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804~1826.
10. Fardis, M. N. and Khalili, H. "Concrete Encased in Fiberglass-Reinforced Plastic", *ACI Journal*, Vol.78, 1981, pp.440~445.
11. Miyauchi, K., Inoue, S., Kuroda, T., and Kobayashi, A., "Strengthening Effects of Concrete Columns with Carbon Fiber Sheet", *Transactions of The Japan Concrete Institute*, Vol.21, 1999, pp.143~150.
12. Karbhari, V. M. and Gao, Y., "Composite Jacketed Concrete under Uniaxial Compression-Verification of Simple Design Equations", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.9, No.4, 1997, pp.185~193.
13. Mirmiran, A. Shahawy, M., Samaan, M., and EI Echary, H., "Effect of Column Parameters on FRP-Confined Concrete", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol.2, No.4, 1998, pp.175~185.
14. Mirmiran, A., Shahawy, M., and Samaan, M., "Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, 1997, pp.583~590.
15. Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete Confined by Fiber Composite", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.9, 1998, pp.1205~1031.
16. Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z., "Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes", *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.4, 1999, pp.500~509.
17. 이대형, 김영섭, 정영수, "FRP로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 거동 특성", 콘크리트학회 논문집, 19권 2호, 2007, pp.135~144.

요 약 기존의 많은 연구에서 비구속 콘크리트에 비해 FRP로 구속된 콘크리트는 강도 및 연성의 탁월한 증진 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나, FRP로 구속된 콘크리트에 대한 보강 설계 시 구속 효과에 의한 정확한 평가가 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 FRP로 구속된 콘크리트의 강도 및 변형률을 예측하고자 하였다. 이를 위해서 102개의 실험체를 제작하여 일축압축실험을 수행하였으며 축하중, 축방향 변형률 및 횡방향 변형률을 측정하였다. 또한, 보다 정확한 극한응력과 변형률 예측식을 개발하기 위하여 기존 연구 결과를 이용하였다. 본 연구에서는 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도 실험을 통해 강도 및 변형률 예측 모델을 제안하였다. 제안된 식은 기존의 설계식에 비해 극한응력과 파괴 변형률을 보다 정확하게 예측하였다. 결과적으로, 본 연구에서 제안된 식은 구속된 콘크리트의 보수·보강을 위한 응력-변형률 모델에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 아라미드섬유, 탄소섬유, 유리섬유, 구속 콘크리트, 수정 응력-변형률 모델

Table A.1 FRP-confined concrete test results : Batch(A)

No	Specimen	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	Fiber type	t (mm)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^3)
1	20-10-A21	100	200	2.0	20.8	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	72.8	49.3
2	20-10-A22	100	200	2.0	20.8	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	75.7	23.7
3	20-10-A23	100	200	2.0	20.8	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	70.2	23.9
4	34-10-A21	100	200	2.0	34.1	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	83.1	49.5
5	34-10-A22	100	200	2.0	34.1	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	80.4	45.2
6	34-10-A23	100	200	2.0	34.1	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	76.6	39.0
7	43-10-A21	100	200	2.0	43.7	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	86.2	30.1
8	43-10-A22	100	200	2.0	43.7	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	88.0	31.5
9	43-10-A23	100	200	2.0	43.7	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	90.6	34.8
10	20-10-C21	100	200	2.0	20.8	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	49.8	3.0
11	20-10-C22	100	200	2.0	20.8	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	66.5	13.2
12	20-10-C23	100	200	2.0	20.8	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	59.8	13.1
13	34-10-C21	100	200	2.0	34.1	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	71.8	13.9
14	34-10-C22	100	200	2.0	34.1	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	70.2	15.3
15	34-10-C23	100	200	2.0	34.1	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	68.6	10.1
16	43-10-C21	100	200	2.0	43.7	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	79.7	5.20
17	43-10-C22	100	200	2.0	43.7	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	74.2	0.40
18	43-10-C23	100	200	2.0	43.7	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	79.2	6.90
19	20-10-G21	100	200	2.0	20.8	E glass strands	2.40	560	25,200	73.5	48.5
20	20-10-G22	100	200	2.0	20.8	E glass strands	2.40	560	25,200	76.5	49.1
21	20-10-G23	100	200	2.0	20.8	E glass strands	2.40	560	25,200	73.2	46.7
22	34-10-G21	100	200	2.0	34.1	E glass strands	2.40	560	25,200	78.3	37.3
23	34-10-G22	100	200	2.0	34.1	E glass strands	2.40	560	25,200	72.0	29.8
24	34-10-G23	100	200	2.0	34.1	E glass strands	2.40	560	25,200	77.8	38.4
25	43-10-G21	100	200	2.0	43.7	E glass strands	2.40	560	25,200	82.9	22.1
26	43-10-G22	100	200	2.0	43.7	E glass strands	2.40	560	25,200	89.7	27.3
27	43-10-G23	100	200	2.0	43.7	E glass strands	2.40	560	25,200	83.1	24.0

Table A.2 FRP-confined concrete test results : Batch(B)

No	Specimen	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	Fiber type	t (mm)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^3)
28	16-15-A21	150	300	3.0	15.5	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	47.2	25.6
29	16-15-A22	150	300	3.0	15.5	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	46.0	25.0
30	16-15-A23	150	300	3.0	15.5	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	48.9	31.4
31	28-15-A21	150	300	3.0	28.9	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	53.7	27.8
32	28-15-A22	150	300	3.0	28.9	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	49.1	21.5
33	28-15-A23	150	300	3.0	28.9	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	49.3	21.7
34	42-15-A21	150	300	3.0	42.4	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	59.2	15.5
35	42-15-A22	150	300	3.0	42.4	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	56.8	10.6
36	42-15-A23	150	300	3.0	42.4	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	61.3	18.7
37	16-15-C21	150	300	3.0	15.5	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	48.6	20.3
38	16-15-C22	150	300	3.0	15.5	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	58.1	30.0
39	16-15-C23	150	300	3.0	15.5	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	50.2	19.7
40	28-15-C21	150	300	3.0	28.9	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	54.9	17.1
41	28-15-C22	150	300	3.0	28.9	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	54.6	17.5
42	28-15-C23	150	300	3.0	28.9	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	60.1	22.0
43	42-15-C21	150	300	3.0	42.4	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	72.1	16.6
44	42-15-C22	150	300	3.0	42.4	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	68.2	13.1
45	42-15-C23	150	300	3.0	42.4	Carbon Sheets	0.33	3,550	253,000	71.0	13.0
46	16-15-G21	150	300	3.0	15.5	E glass strands	2.40	560	25,200	54.1	30.6
47	16-15-G22	150	300	3.0	15.5	E glass strands	2.40	560	25,200	53.1	29.8
48	16-15-G23	150	300	3.0	15.5	E glass strands	2.40	560	25,200	50.3	25.8

Table A.2 FRP-confined concrete test results : Batch(B) (continued)

No	Specimen	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	Fiber type	t (mm)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^3)
49	28-15-G21	150	300	3.0	28.9	E glass strands	2.40	560	25,200	60.7	32.5
50	28-15-G22	150	300	3.0	28.9	E glass strands	2.40	560	25,200	52.4	20.5
51	28-15-G23	150	300	3.0	28.9	E glass strands	2.40	560	25,200	50.3	17.2
52	42-15-G21	150	300	3.0	42.4	E glass strands	2.40	560	25,200	63.0	14.4
53	42-15-G22	150	300	3.0	42.4	E glass strands	2.40	560	25,200	63.4	14.0
54	42-15-G23	150	300	3.0	42.4	E glass strands	2.40	560	25,200	72.8	24.2

Table A.3 FRP-confined concrete test results : Batch(C)

No	Specimen	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	Fiber type	t (mm)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)	ϵ_{cc} (10^3)
55	33-10-A21	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	84.8	18.0
56	33-10-A22	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	84.5	22.4
57	33-10-A23	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.39	2,173	210,000	80.5	17.9
58	33-10-A31	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.60	2,173	210,000	105.0	20.7
59	33-10-A32	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.60	2,173	210,000	101.2	21.3
60	33-10-A33	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.60	2,173	210,000	108.7	26.0
61	33-10-A41	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.77	2,173	210,000	124.4	23.6
62	33-10-A42	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.77	2,173	210,000	123.7	23.7
63	33-10-A43	100	200	2.0	33.3	Aramid sheets	0.77	2,173	210,000	112.0	13.6
64	33-10-C21	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.33	3,550	253,000	76.0	9.4
65	33-10-C22	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.33	3,550	253,000	81.1	11.6
66	33-10-C23	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.33	3,550	253,000	81.1	11.7
67	33-10-C31	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.50	3,550	253,000	103.8	10.8
68	33-10-C32	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.50	3,550	253,000	93.2	11.7
69	33-10-C33	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.50	3,550	253,000	100.2	10.8
70	33-10-C41	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.67	3,550	253,000	112.9	14.5
71	33-10-C42	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.67	3,550	253,000	104.7	13.7
72	33-10-C43	100	200	2.0	33.3	Carbon sheets	0.67	3,550	253,000	111.1	16.2
73	33-10-G21	100	200	2.0	33.3	E glass strands	2.40	560	25,200	65.7	8.9
74	33-10-G22	100	200	2.0	33.3	E glass strands	2.40	560	25,200	59.4	4.8
75	33-10-G23	100	200	2.0	33.3	E glass strands	2.40	560	25,200	69.4	11.5
76	33-10-G31	100	200	2.0	33.3	E glass strands	3.60	560	25,200	89.3	18.0
77	33-10-G32	100	200	2.0	33.3	E glass strands	3.60	560	25,200	83.6	16.6
78	33-10-G34	100	200	2.0	33.3	E glass strands	3.60	560	25,200	91.8	18.4
79	33-10-G41	100	200	2.0	33.3	E glass strands	4.80	560	25,200	110.6	19.8
80	33-10-G42	100	200	2.0	33.3	E glass strands	4.80	560	25,200	110.7	21.7
81	33-10-G43	100	200	2.0	33.3	E glass strands	4.80	560	25,200	114.9	23.8

Table A.4 FRP-confined concrete test results date set 2

No	Source of data	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	Fiber type	t (mm)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)
1	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.31	755	73,300	45.5
2	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.31	755	73,300	41.9
3	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.31	755	73,300	47.2
4	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.61	1047	70,600	56.5
5	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.61	1047	70,600	60.6
6	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.61	1047	70,600	61.9
7	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.92	1105	77,500	80.9
8	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.92	1105	77,500	76.4
9	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.92	1105	77,500	75.8
10	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	1.22	1352	95,700	89.5
11	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	1.22	1352	95,700	89.9

Table A.4 FRP-confined concrete test results date set 2 (continued)

No	Source of data	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	Fiber type	t (mm)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)
12	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	1.22	1352	95,700	89.0
13	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.61	660	39,900	47.1
14	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.61	660	39,900	47.7
15	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.61	660	39,900	50.0
16	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.92	822	54,000	68.3
17	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.92	822	54,000	67.3
18	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	0.92	822	54,000	64.7
19	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	1.22	388	27,700	52.7
20	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	1.22	388	27,700	49.3
21	Howie and Karbhari 1994	152	305	2.0	38.6	Carbon sheets	1.22	388	27,700	52.6
22	Karbhari and Gao 1997	152	305	2.0	18.0	Carbon sheets	1.55	1353	96,032	82.2
23	Karbhari and Gao 1997	152	305	2.0	18.0	Carbon sheets	2.06	1127	150,150	70.6
24	Karbhari and Gao 1997	152	305	2.0	18.0	Glass sheets	5.31	513	38,856	82.3
25	Karbhari and Gao 1997	152	305	2.0	18.0	Glass sheets	2.26	987	62,504	79.5
26	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Carbon sheets	0.17	2716	224,600	46.6
27	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Carbon sheets	0.50	2873	224,600	87.2
28	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Carbon sheets	0.67	2658	224,600	104.6
29	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Carbon sheets	0.14	1579	628,600	41.7
30	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Carbon sheets	0.28	1824	629,600	56.0
31	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Carbon sheets	0.42	1285	576,600	63.3
32	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Aramid sheets	0.15	2589	67,100	39.0
33	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Aramid sheets	0.29	2707	87,300	68.5
34	Watanable et al. 1997	100	200	2.0	30.2	Aramid sheets	0.43	2667	87,300	92.1
35	Harries et al. 1998	152	610	4.0	26.2	E glass sheets	1.00	330	19,100	33.5
36	Harries et al. 1998	152	610	4.0	26.2	E glass sheets	2.00	330	19,100	44.5
37	Harries et al. 1998	152	610	4.0	26.2	E glass sheets	1.00	383	21,600	38.4
38	Harries et al. 1998	152	610	4.0	26.2	E glass sheets	2.00	383	21,600	52.5
39	Harries et al. 1998	152	610	4.0	26.2	Carbon sheets	1.00	580	38,100	50.6
40	Harries et al. 1998	152	610	4.0	26.2	Carbon sheets	2.00	580	38,100	64.0
41	Matthys et al. 1999	150	300	2.0	34.9	Carbon sheets	0.12	2600	200,000	44.3
42	Matthys et al. 1999	150	300	2.0	34.9	Carbon sheets	0.24	1100	420,000	41.3
43	Matthys et al. 1999	150	300	2.0	34.9	Carbon sheets	0.12	2600	200,000	42.2
44	Matthys et al. 1999	150	300	2.0	34.9	Carbon sheets	0.24	1100	420,000	40.7
45	Kshirsagar et al. 2000	102	204	2.0	38.0	E glass sheets	1.42	363	19,900	57.0
46	Kshirsagar et al. 2000	102	204	2.0	39.4	E glass sheets	1.42	363	19,900	63.1
47	Kshirsagar et al. 2000	102	204	2.0	39.5	carbon sheets	1.42	363	19,900	50.4
48	Rochette et al. 2000	150	300	2.0	43.0	Aramid sheets	1.27	230	13,600	47.3
49	Rochette et al. 2001	150	300	2.0	43.0	Aramid sheets	2.56	230	13,600	58.9
50	Rochette et al. 2002	150	300	2.0	43.0	Aramid sheets	3.86	230	13,600	71.0
51	Rochette et al. 2003	150	300	2.0	43.0	Aramid sheets	5.21	230	13,600	47.4
52	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	47.9
53	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	49.7
54	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	49.4
53	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	49.7
54	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	49.4
55	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	64.6
56	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	75.2
57	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	71.8
58	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	82.9
59	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	86.2
60	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	33.7	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	95.4
61	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	54.7

Table A.4 FRP-confined concrete test results data set 2 (continued)

No	Source of data	d (mm)	L (mm)	L/d	f'_{co} (MPa)	Fiber type	t (mm)	f_{frp} (MPa)	E_{frp} (MPa)	f'_{cc} (MPa)
62	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	52.1
63	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	48.7
64	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	84.0
65	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	79.2
66	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	85.0
67	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	96.5
68	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	92.6
69	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	43.8	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	94.0
70	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	57.9
71	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	62.9
72	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	0.38	1577	105,000	58.1
73	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	74.6
74	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	77.6
75	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	0.76	1577	105,000	77.0
76	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	106.5
77	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	108.0
78	Xiao and Wu 2000	152	305	2.0	55.2	Carbon sheets	1.14	1577	105,000	103.3
79	Zhang et al. 2000	150	300	2.0	34.3	E glass sheets	2.63	345	18,100	62.1
80	Zhang et al. 2000	150	300	2.0	34.3	E glass sheets	2.44	365	19,000	62.5
81	Zhang et al. 2000	150	300	2.0	34.3	Carbon sheets	1.00	423	37,000	44.2
82	Zhang et al. 2000	150	300	2.0	34.3	Carbon sheets	2.83	167	13,000	47.5
83	Zhang et al. 2000	150	300	2.0	34.3	Carbon sheets	1.00	753	91,000	59.4