



GFRP로 구속된 원형단면 콘크리트 단주의 강도 및 변형 능력

조순호^{1)*}

¹⁾광주대학교 건축학부

Strength and Deformation Capacities of Short Concrete Columns with Circular Section Confined by GFRP

Soon-Ho Cho^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Gwangju University, Gwangju 503-703, Korea

ABSTRACT To investigate the enhancement in strength and deformation capacities of concrete confined by FRP composites, tests under axial loads were carried out on three groups of thirty six short columns in circular section with diverse GFRP confining reinforcement. The major test variables considered include fiber content or orientation, wrap or tube type by varying the end loading condition, and continuous or discontinuous confinement depending on the presence of vertical splices between its two halves. The circumferential FRP strains at failure for different types of confinements were also investigated with emphasis. Various analytical models capable of predicting the ultimate strength and strain of the confined concrete were examined by comparing to observed results. Tests results showed that FRP wraps or tubes provide the substantial increase in strength and deformation, while partial wraps comprising the vertical discontinuities fail in an explosive manner with less increase in strength, particularly in deformation. A bilinear stress-strain response was observed throughout all tests with some variations of strain hardening. The failure hoop strains measured on the FRP surface were less than those obtained from the tensile coupons in all tests with a high degree of variation. In overall, existing predictive equations overestimated ultimate strengths and strains observed in present tests, with a much larger scatter related to the latter. For more accuracy, two simple design-oriented equations correlated with present tests are proposed. The strength equation was derived using the Mohr-Coulomb failure criterion, whereas the strain equation was based on entirely fitting of test data including the unconfined concrete strength as one of governing factors.

Keywords columns, concrete, confinement, deformation, FRP

1. 서 론

지난 수 십년 동안 합성플라스틱 재료인 FRP(fiber reinforced polymers)는 높은 강도-중량 비, 내부식성 및 전자 기적 중립성 등과 같은 재료의 고유 특성으로 말미암아 콘크리트 구조물의 보수/보강재로서 토목 및 건축 분야에 널리 사용되어 왔다. 수많은 적용사례 중에서도, 특히 내진설계의 관점에서 보면, 강도 및 변형 능력을 증가시키기 위하여 콘크리트 기둥을 구속하는 장치로서의 FRP 적용은 가장 혁신적인 예 중의 하나이며, 최근에 와서야 적극적인 적용이 추진되고 있는 상황이다. 현재는 상당한 연구가 진척되었음에도 불구하고 FRP로 구속된 콘크리트의 향상된 거동을 합리적으로 예측하기 위한 해석 모델의 정립은 아직 미흡한 상태이다.

이는 현존하는 대부분의 강도 및 변형 예측모델이 i) 상당히 제한된 실험 결과 및 fitting 기법에 의하여 유도

된 실험식이거나, ii) 강제튜브 단면 등과 같이 강성이 크고 항복시점에서 구속력을 발동하는 기존의 구속 모델을 확장하여 개발되었기 때문에 점증적으로 구속력을 발동하는 FRP의 구속기구를 제대로 묘사할 수 없거나, iii) 원초적으로 매우 복잡한 거동을 수반하는 비균질성(inhomogeneity) 및 비등방성(anisotropy) 콘크리트 재료의 구성 모델을 수학적으로 표현하는 데에는 아직도 한계가 있기 때문이다.

이에 본 연구는 현재까지 제시된 다양한 FRP 구속 콘크리트 해석 모델의 효율성을 평가하고, 구속된 콘크리트의 전체 응력-변형률 관계 및 관련응답을 합리적으로 예측할 수 있는 새로운 개념의^{1,2)} 보다 향상된 해석모델을 개발하기 위하여 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 원형단면을 갖는 콘크리트 단주를 대상으로 3종류의 구속방법 및 수평, 수직방향의 유리섬유(glass fiber) 랑을 달리 적용하여 총 36개의 시험체를 제작하였다. 제한된 크기의 원형시험체(D×H = 150 mm×300 mm), 콘크리트 강도(f_{ck} = 21 MPa) 및 격자로 짠(woven roving) 1- 및 2-방향 단위 유리섬유를 사용하였다. 기존 해석모

*Corresponding author E-mail : gaza@gwangju.ac.kr

Received December 30, 2006, Accepted January 23, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

델의 평가는 구속된 콘크리트의 최대 축방향 응력(f'_{cc}) 및 변형률(ϵ'_{cc})를 예측하는데 초점을 맞추었다. 이 두 요소는 설계 관점에서 볼 때 가장 중요한 요소이며, 또한 전체 응력-변형률 응답을 결정하는데 핵심적인 역할을 하기 때문이다. 여기에서는 주로 실험 및 그 결과에 의하여 도출된 내용을 기술하고자 하며, 보다 종합적인 전체 응력-변형률 응답 예측 및 이의 이론적 배경은 후속 논문에 포함되어 있다³⁾.

2. 콘크리트의 구속 기구

1축 단조가력 하중 하에서 콘크리트 재료의 부피팽창 거동은 초기에는 탄성거동에 의하여 부피가 감소하다가, 최대 압축변형률의 70~80%에 해당하는 변형률에 이르러서는 콘크리트 매스를 일련의 가느다란 조각판으로 분리하려는 균열의 폭이 커짐에 따라 팽창하기 시작한다. 여기서 이러한 부피팽창거동과 관련하여 콘크리트 푸아송비를 탄성범위에 고유의 재료의 특성치로 볼 것인지 아니면 손상정도에 따라 변화하는 재료상수 값으로 볼 것인지에 대한 관점의 차이가 발생한다.

후프근, FRP wrapping 혹은 튜브(tube)등에 의한 콘크리트의 구속은 수동형태이다. 외부 축력에 의하여 콘크리트가 수평으로 팽창함으로써 발현된다. 축력이 증가함에 따라 팽창이 증가하고, 구속매체는 이에 대응하는 균일한 반경 방향의 압력을 상쇄하기 위하여 인장후프응력을 발생시킨다. 콘크리트 반경 방향 및 구속매체의 변형률 적합조건($\epsilon_{lat} = \epsilon_{fr}$) 및 힘의 평형조건으로부터 횡구속력(f_{lat}) 및 관계식은 아래와 같이 유도할 수 있다(Fig. 1).

$$f_{lat} = E_{lat} \cdot \epsilon_{lat} = E_{lat} \cdot \epsilon_{fr} \quad (1)$$

$$E_{lat} = \frac{2E_{fr}nt}{D} \quad (2)$$

$$f_{lat} = E_{lat} \cdot \epsilon_{fr} = \frac{2E_{fr}nt}{D} \epsilon_{fr} \quad (3)$$

여기서 f_{lat} 는 횡구속력, E_{lat} 는 횡방향 구속력, ϵ_{lat} 는 횡방향 변형률, ϵ_{fr} 은 측정된 변형률, E_{fr} 은 구속력, n 및 t 는 단위 섬유층의 층수 및 두께, D 는 지름, ϵ_{fr} 은 극한변형률, E_{fr} 은 극한구속력이다.

구조용 강재 튜브(hollow steel section)에 의한 구속기구도 이와 동일한 형태를 취하나 FRP에 의한 구속과 기본적으로 다른 점은 초기 탄성거동 이후 항복이 발생하고, 특히 FRP에 비하여 횡방향 구속강성(E_{lat})이 큰 점이다. 따라서 강재에 의한 횡구속력은 항복응력에 일치하는 최대 값에 도달한 후 일정한 크기를 유지하는데 반하여, FRP에 의하여 구속된 콘크리트는 구속되지 않은 콘크리트의 응력크기(f'_{co} 혹은 f_{ck})에서 심한 연화 현상 및 변이 특성을 나타내며, 그 이후 최대응력에 도달할 때까지 접선강성(tangential stiffness)이 일정한 값으로

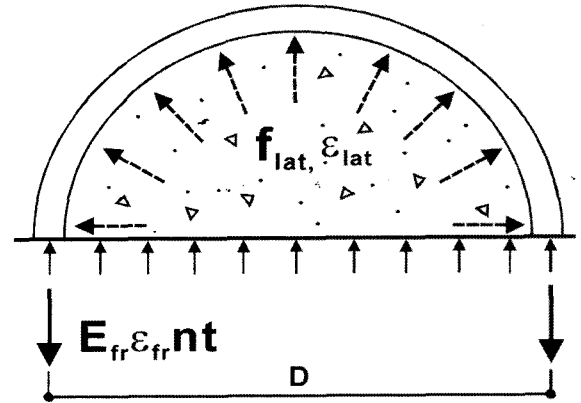


Fig. 1 Confinement mechanism in circular section

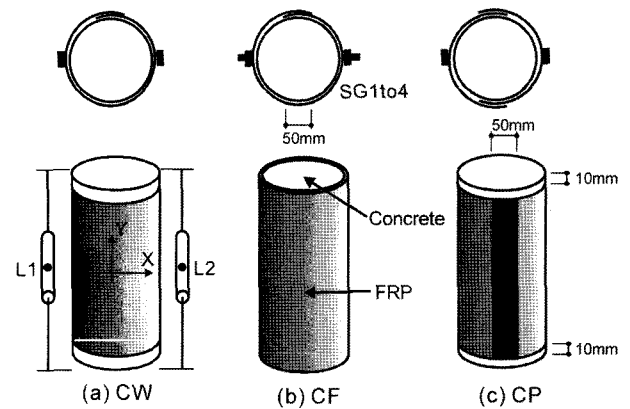


Fig. 2 Three groups of test specimens

안정화되는 2선 응력-변형률 관계를 나타낸다. 따라서 최대 점(peak point)은 극한 점(ultimate point)과 대체로 일치하며 이 두 점이 모두 FRP 구속매체의 인장파단과 일치한다. 하지만, 대부분의 실험에서 인장 파단 시 FRP wrap에서 측정된 변형률(ϵ_{fr})은 FRP 인장시험편으로부터 측정된 극한변형률(ϵ_{fru}) 보다 훨씬 작은 것으로 나타나는데, 이러한 현상은 해석 모델의 정확도에 큰 영향을 미치는 주요 요소로 판단된다.

2. 원형단주의 실험

2.1 시험체 상세

본 연구에서 고려한 시험체의 주요변수는 i) 섬유(fiber)량 및 방향, ii) 단부 하중조건에 따른 wrap 혹은 튜브형식의 구속 형태, iii) 연속 혹은 불연속 구속형태 등이다. 단면은 원형(150 mm × 300 mm)으로 하였으며, 섬유의 양 및 방향은 구입 가능한 메쉬 형태의 1-방향(x 혹은 y방향, 255 gf/m²) 및 2-방향(x 및 y방향, 580 gf/m²) 유리섬유를 다양하게 조합하여 그룹별로 6종류, 2개씩의 동일 시험체를 감안하여 총 3그룹, 36개의 시험체를 결정하였다(Table 1). 구속방법에 따라 연속적으로 부착하며 콘크리트 코어에만 축하중이 작용하는 wrapping형(CW), 연속적이며 FRP에도 축하중이 작용하는 이미 성

Table 1 Major test variables and results

Specimen No.	Dimension		Confinement Properties			Test Results					
	D(mm)	H(mm)	E_{lat} (GPa)	f_{lat} (MPa)	f_{lat}/f_{co}	f_{cc} (MPa)	f_{cc}/f_{co}	ϵ'_{cc} (%)	$\epsilon'_{cc}/\epsilon'_{co}$	ϵ_{fr} (%)	$\epsilon_{fr}/\epsilon_{fru}$
CW22-1	150	278	287	4.3	0.25	23.4	1.4	1.07	3.62	0.61	0.41
CW22-2	149	286	279	3.8	0.22	20.8	1.2	0.84	2.85	0.40	0.29
CW32-1	156	303	346	5.6	0.32	29.7	1.7	2.09	7.07	0.80	0.50
CW32-2	155	302	344	5.6	0.32	23.1	1.3	1.38	4.65	0.56	0.35
CW52-1	155	300	584	7.3	0.42	30.9	1.8	1.79	6.06	0.72	0.57
CW52-2	156	300	538	6.8	0.39	23.1	1.3	1.02	3.45	0.29	0.23
CW72-1	156	302	657	12.0	0.67	37.7	2.2	3.40	11.50	0.72	0.41
CW72-2	156	298	726	13.0	0.74	43.6	2.5	3.31	11.20	0.81	0.46
CW31-1	155	296	349	5.5	0.32	26.2	1.5	1.67	5.66	0.90	0.57
CW31-2	156	298	278	3.9	0.23	26.6	1.5	0.54	1.81	1.01	0.72
CW43-1	150	281	468	6.3	0.37	27.4	1.6	1.20	4.05	0.77	0.57
CW43-2	150	294	487	5.8	0.34	23.1	1.3	1.06	3.56	0.38	0.32
CF22-1	154	289	278	4.2	0.26	25.5	1.1	1.10	5.45	0.55	0.37
CF22-2	151	290	276	3.8	0.23	25.5	1.0	1.02	5.05	0.73	0.54
CF32-1	153	293	350	5.7	0.35	28.3	1.4	1.42	7.04	0.90	0.56
CF32-2	154	286	347	5.6	0.35	31.8	1.5	1.52	7.55	1.18	0.73
CF52-1	154	289	586	7.4	0.46	40.3	2.2	2.15	10.60	0.86	0.68
CF52-2	153	292	546	6.9	0.43	41.5	2.3	2.31	11.50	0.91	0.73
CF72-1	155	292	658	12.0	0.72	45.1	2.1	2.07	10.20	0.82	0.47
CF72-2	159	294	711	13.0	0.78	47.0	2.6	2.60	12.90	1.63	0.93
CF31-1	152	291	356	5.6	0.35	32.0	1.9	1.85	9.16	1.14	0.73
CF31-2	153	289	283	4.0	0.25	31.9	1.8	1.84	9.10	1.73	NA
CF43-1	153	290	458	6.2	0.38	34.6	1.3	1.28	6.34	0.81	0.60
CF43-2	153	286	474	5.6	0.35	33.7	1.5	1.51	7.46	0.91	0.77
CP22-1	155	304	277	4.2	0.25	25.3	1.5	1.40	4.29	1.07	0.71
CP22-2	153	303	273	3.7	0.23	26.7	1.6	1.23	3.76	1.40	1.02
CP32-1	155	305	347	5.6	0.34	26.7	1.6	1.26	3.84	0.68	0.42
CP32-2	156	306	343	5.5	0.34	27.5	1.7	1.73	5.30	0.90	0.56
CP52-1	156	305	580	7.3	0.44	29.6	1.8	1.62	4.94	NA	NA
CP52-2	155	306	540	6.8	0.41	39.3	2.4	NA	NA	NA	NA
CP31-1	156	301	347	5.5	0.33	31.7	1.9	2.34	7.16	1.76	1.12
CP31-2	156	307	278	3.9	0.24	22.3	1.4	1.15	3.50	0.68	0.49
CP43-1	157	304	448	6.1	0.37	33.2	2.0	2.11	6.44	0.96	0.71
CP43-2	156	305	468	5.6	0.34	39.4	2.4	1.58	4.82	1.17	0.98

형된 튜브를 나타내는 Full Shell형(CF), 콘크리트 코어에만 축하중이 작용하고, 반원형 셸(shell)을 미리 제작하여 이를 이음, 접착하는 불연속 형태의 Partial Shell형(CP) 등을 포함한다(Fig. 2). 따라서 CW 및 CP 그룹은 시험체 양쪽 단부지역에 FRP를 배치하지 않았다. 완전 셸(shell)형의 제작은 시험체를 충분히 wrapping한 후 상, 하단부를 절단하는 방식을 취하였으며, 또한 부분 (Shell)형의 경우 이음부의 취약성이 예상되나, 현재의 FRP 제작공장의 기기 보유 현황 및 제작 여건, 현장 시공성 등을 고려하여 이음부의 파괴를 최대한 지연할 수 있는 범위에서 채택하였다. 모든 이음부의 겹침길이는 50 mm이다. 콘크리트를 타설하고 15일이 지난 후 수평 및 수직

방향에 요구되는 섬유량을 제공하기 위하여, 단위 유리 섬유를 에폭시에 함침하여 수동으로 적층(manual layup)하고, 대기 중에서 양생하였다. 시험체명에 포함된 2자리 숫자는 1-방향 섬유망(fiber mesh)을 1 ply로 정의할 때 x 및 y방향에 포함된 섬유 혹은 폴리(ply)수를 의미하며, 마지막 숫자는 동일 시험체의 일련번호를 의미한다.

2.2 재료 성능

섬유는 H산, woven roving 유리섬유로서 1방향에는 U-100 및 2방향에는 WR-100을 사용하였다. FRP 인장 성능을 획득하기 위하여 배합비에 따른 고전 Lamination 이

론을 적용하였으며, 또한 별도로 섬유량 및 방향에 따라 적어도 2개씩의 인장시험편을 제작하여 표준 실험 절차에 따라 재료 시험을 수행하였다(Table 2). 모든 시험체에 사용된 예상 콘크리트 압축강도(f_{ck})는 21 MPa이며, 그룹별로 적어도 3개의 공시체를 제작하여 표준시험 절차에 따라 압축 실험을 수행하였다. 시험체와 동일 조건으로 대기 중에서 양생을 하였으며, 공시체의 단부면은 그라인더로 갈아 수평을 유지하였다.

2.3 측정 및 실험 절차

시험체는 I사 G8505 만능시험기(100 tonf)의 베드에 로드셀(load cell)(100 tonf 혹은 200 tonf) 및 강재블록을 설치한 후 그 위에 배치하였다. 0.0017 mm/sec의 변위증가 속도에 따라 일방향으로 재하하였으며, 기기의 헤드 사이에 설치된 변위계(25~50 mm)에 의하여 전체 축방향 변형을 측정하였다(Fig. 2). 또한, 2곳의 FRP 표면에 수직 및 수평으로 부착한 전기저항식 변형게이지에 의하여 FRP의 수직 및 수평 변형률을 국부적으로 측정하였다. 매 하중 단계마다 측정된 하중, 변위 혹은 변형률은 TDS-602에 기록되었으며, 추가적으로 FRP의 파단 조짐 등 특기 사항은 별지에 표시하였고, 대략 30일에 걸쳐 모든 실험을 완료하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 파괴 형상

FRP로 구속된 시험체의 파괴 양상은 구속 방법에 상관없이 대체로 시험체 중앙에서 유리섬유의 파단에 의하여 시작되었다. 지압판과 시험체 사이의 마찰력에 의한 시험체 상, 하단의 부분적인 콘크리트 파쇄는 전체 거동에 영향을 미치지 않은 것으로 판단되었다. 파괴는 갑작스럽게 발생하였으나 감지할 수 있었다. 초기 재하로부터 파괴하중의 50% 정도에서 콘크리트 내부에 미세균열

및 골재의 이동을 나타내는 소리를 들을 수 있었으며, 파괴하중 부근에서는 유리섬유가 끊어지는 소리를 들을 수 있었다. 또한, 60~70% 파괴하중에서 시험체 중앙부에 FRP의 균열을 나타내는 흰선 혹은 흰블록(whitening)을 감지 할 수 있었다. 이러한 조짐은 수지가 소성변형을 시작했음을 의미하며, 섬유만이 하중을 지지하고 있음을 나타낸다. 흰선은 하중이 증가함에 따라 더욱 상, 하단으로 발전되어 갔다. FRP에 국부 좌굴 및 불결 모양의 찌그러짐이 관측되었으나, 대부분 시험체의 주요 파괴 형상은 FRP의 파단으로 종료되었다.

CW 및 CF 시험체는 파괴하중의 80% 정도에서 콘크리트 상, 하부가 파쇄하기 시작하여 최대하중 부근에서 수평 혹은 수직으로 FRP 파단 조짐이 발생한 후, 더욱 심화되었다. 최대하중 이후 하중이 감소함에 따라 FRP 파단균열은 더욱 심화되었으며, 변형이 증가함에 따라 급기야는 기 균열된 FRP가 완전 파단, 분리되었다. Fig. 3(a) 및 (b)에서 보는 바와 같이 CW 시험체는 수직균열이 지배적이었으나, 반면에 CF 시험체는 수평균열이 보다 지배적이었고, 보다 잘 분포된 균열을 포함하고 있다. 한편, CP 시험체는 예상한 바와 같이 이음부가 완전히 분

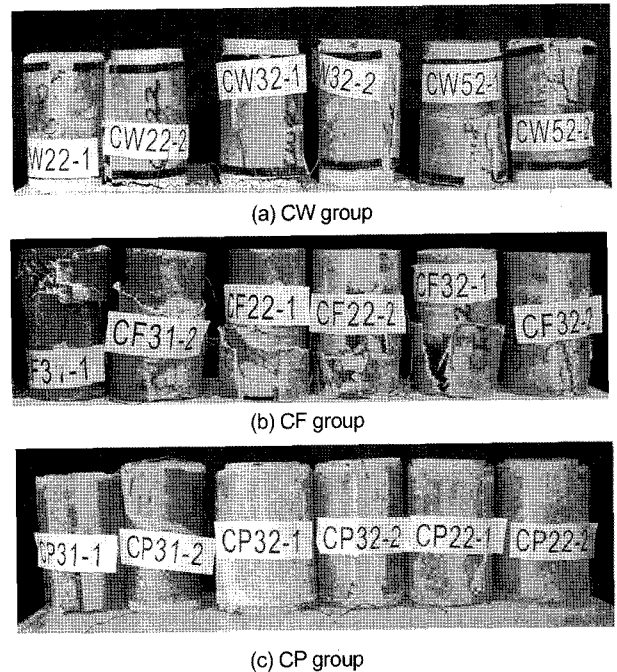


Fig. 3 Failure modes for different confining methods

Table 2 FRP properties

Specimens	t(mm)	E_{fr} (GPa)	f_{fr} (MPa)	ϵ_{fr} (%)
22-1	1.24	17.3	240	1.5
22-2	1.49	14.0	188	1.4
32-1	1.84	NA	183	NA
32-2	1.83	14.6	225	1.6
52-1	2.58	NA	200	0.9
52-2	2.39	17.5	220	1.3
72-1	3.32	NA	188	NA
72-2	3.67	15.4	301	2.2
31-1	1.67	16.2	217	1.6
31-2	1.68	12.9	178	1.4
43-1	2.58	13.6	171	1.4
43-2	2.58	14.1	164	1.2

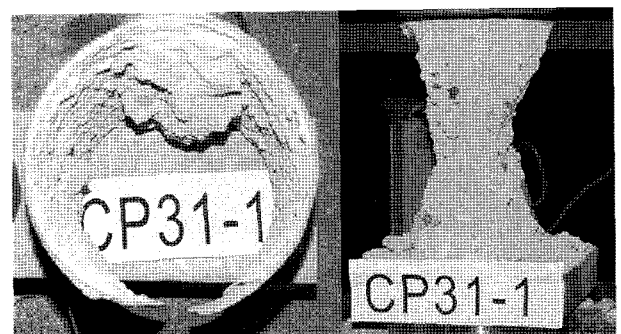
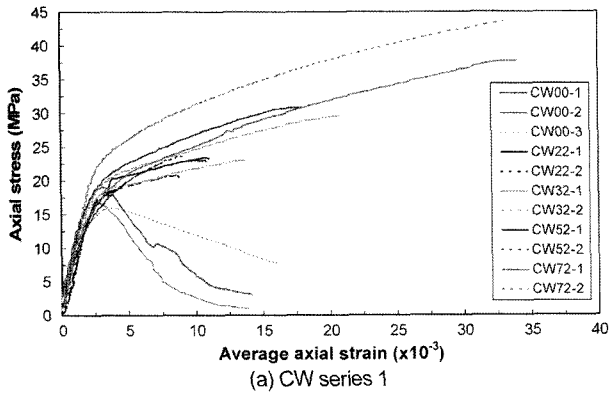
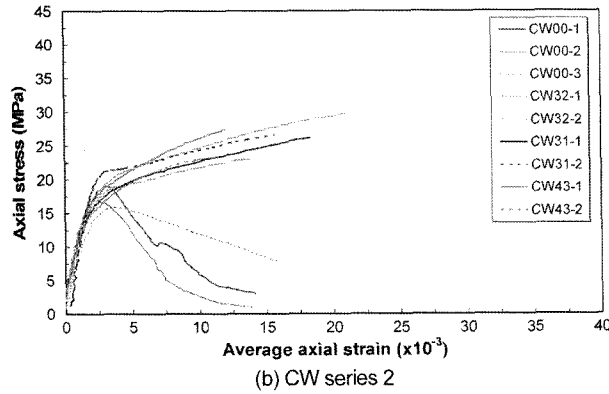


Fig. 4 Explosive failure for CP31-1



(a) CW series 1



(b) CW series 2

Fig. 5 Axial stress-axial strain behavior for CW group

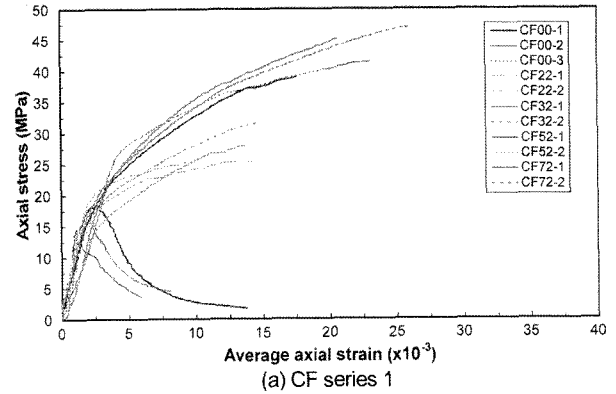
리되어 파괴 상황에 도달하였는데, 접착제의 접착능력이 한계에 이를 때까지 하중이 서서히 증가하다가 갑작스럽게 이음부의 전 접착면이 순식간에 완전 분리되어 폭발하는 형태의 파괴를 나타내었다(Fig. 3(c) 및 Fig. 4). 파괴 시, 굉음을 동반하였으며 이때 이미 내부 콘크리트는 충분히 파쇄되었고 이음부가 완전히 분리되자마자, 내부 콘크리트 파편이 공중 분해 되었다. 이와 같은 이유에서 CP72 시험체는 더 이상 실험을 수행하지 못하였다.

3.2 전체 거동

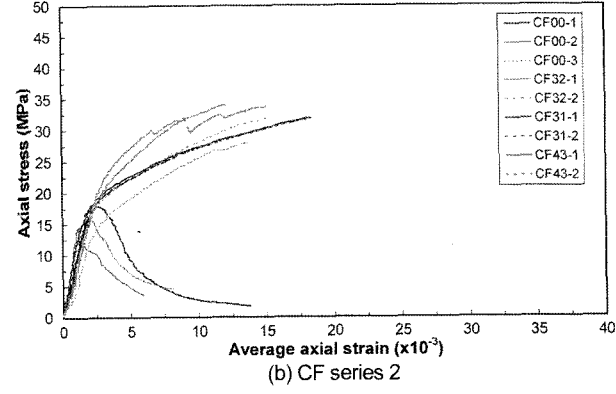
섬유 량 및 방향에 따른 구속 효과를 알아보기 위하여 축방향 응력과 변위계로 부터 측정된 수직 방향 평균변형률 관계를 각 그룹별로 Figs. 5~7에 나타내었다. Table 1은 구속된 콘크리트의 강도 및 변형능력을 수치로 표시하고 있다. 여기서 압축응력 및 변형률은 +값으로 한다.

Fig. 5 및 Table 1에서 보는 바와 같이 구속되지 않은 시험체 CW00($f'_{co}=17.1$ MPa 및 $\epsilon'_{co}=0.003$)를 기준으로 할 때 FRP로 wrapping한 CW 시험체의 강도(f'_{cc})는 섬유 량에 따라 1.3~2.4배까지 증가하였으며, 축방향 최대 변형률(ϵ'_{cu})은 1.8~12.5배까지 증가하였다. Fig. 5(a)는 수평방향 섬유 량을 증가 시켰을 때 강도 및 변형 능력의 향상을 보여주고 있으며, Fig. 5(b)는 수직 혹은 수평 및 수직 방향 섬유 량을 동시에 증가시켰을 때 예상되는 강도 및 변형능력 향상 효과를 표시하고 있다.

Fig. 6 및 Table 1은 구속되지 않은 시험체인 CF00($f'_{co}=16.1$ MPa 및 $\epsilon'_{co}=0.002$)에 대하여 Full Shell FRP

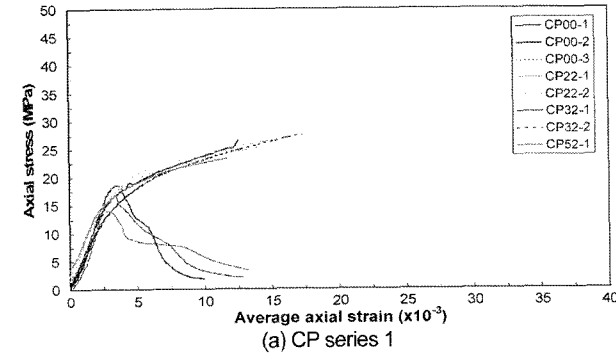


(a) CF series 1

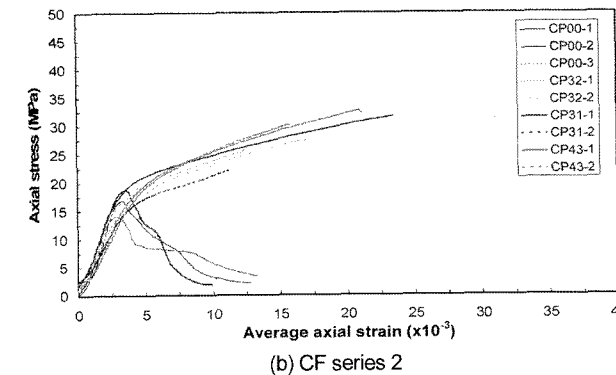


(b) CF series 2

Fig. 6 Axial stress-axial strain behavior for CF group



(a) CP series 1



(b) CP series 2

Fig. 7 Axial stress-axial strain behavior for CP group

에 의해 구속된 CF 시험체의 강도 및 변형능력의 향상효과를 보여주고 있다. CF 시험체는 섬유 량에 따라 1.6~2.9배까지 강도가 증가 하였으며, 최대 변형률은 5.1~12.9배까지 증가하였다. 마찬가지로 Fig. 6(a)는 수평방향 섬유 량을 증가 시켰을 때 강도 및 변형 능력의 향상효과를 보여주고 있으며, Fig. 6(b)는 수직 혹은 수평 및 수직 방향

fiber량을 증가시켰을 때 예상되는 효과를 표시하고 있다.

Fig. 7 및 Table 1은 구속되지 않은 시험체인 CP00 ($f'_{co}=17.5\text{ MPa}$ 및 $\epsilon'_{co}=0.003$)에 대하여 Partial Shell FRP에 의해 구속된 CP 시험체의 강도 및 변형 능력 향상효과를 보여주고 있다. CP 시험체의 강도 증가는 섬유 량에 따라 1.6~2.1배까지 나타났으며, 최대 변형률은 3.5~7.2배까지 증가하였다. 마찬가지로 Fig. 7(a)는 수평 방향 섬유 량을 증가시켰을 때 강도 및 변형 능력의 향상을 나타내며, Fig. 7(b)는 수직 혹은 수평 및 수직 방향 섬유 량을 증가시켰을 때 예상되는 효과를 보여주고 있다.

대체로 2선 선형 관계를 보여주고 있으며, 예상한 바와 같이 콘크리트 구속 효과는 수평방향 fiber 량에 보다 지배적임을 알 수 있다. CW형과 비교하여 CF형은 보다 향상된 구속 효과를 획득하였다. CP31-1 및 CP41-1 시험체는 각각 CF31-1 및 CF41-1에 비교할 만큼 향상된 변형능력을 보여주고 있으나, 전체적으로 이음부의 취성 파괴로 인하여 CW 및 CF형 보다는 강도, 특히 변형 능력이 저하되는 구조 성능을 나타내고 있다.

3.3 수평 구속 거동

하중이 증가함에 따라 콘크리트 내부에는 미세균열이 발생하고 이로 인해 콘크리트는 부피가 팽창하기 시작하는데 이 시점에서부터 FRP는 콘크리트의 부피 팽창을 저지하기 위하여 구속기구를 발동한다. 이러한 FRP의 구속기구의 거동을 알아보기 위하여, Fig. 8은 시험체의 FRP 표면에 부착한 변형계이지로부터 획득한 수평 방향 변형률을 표시한다. 측정된 최대 수평변형률은 섬유량에 상관없이 CW 및 CF 시험체에서 대략 0.4~1.7% 정도를 나타내고 있는 반면에, CP 시험체는 초기에는 변형이 거의 없다가 어떤 하중에 도달하여서는 큰 변형률을 나타내기 시작하고 있다. 이는 제작 과정 상 성형된 반원형 셸(shell)과 콘크리트사이에 갭(gap)이 존재하고 있다가 이를 완전히 허용한 후부터 구속기구가 발동하였기 때문이며, 2곳에 수직 이음부가 있어서 상대적으로 수평 강성이 저하되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 FRP로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계는 i) 횡방향 팽창이 거의 없는 비구속 콘크리트와 동일한 거동을 나타내는 지역, ii) 내부 균열 발생으로 콘크리트 강성이 저하되는 현상을 막기 위하여 수평 구속을 발동하는 지역 및 iii) FRP에 의한 충분히 횡구속이 발휘되는 지역 등 3단계로 요약할 수 있다. Fig. 8(b)에서 보는 바와 같이 CF72-1, 2 시험체는 이와 같은 3단계를 잘 묘사하고 있다. 한편, CP 시험체는 CW 및 CF 시험체 보다 후반부 수평 강성이 떨어져 비효율적임을 알 수 있다.

3.4 FRP 파단변형률 및 단부 하중 조건

일반적으로 FRP로 구속된 콘크리트의 파괴는 FRP가 파단하기 시작함으로써 발생한다. 구속 콘크리트의 파괴

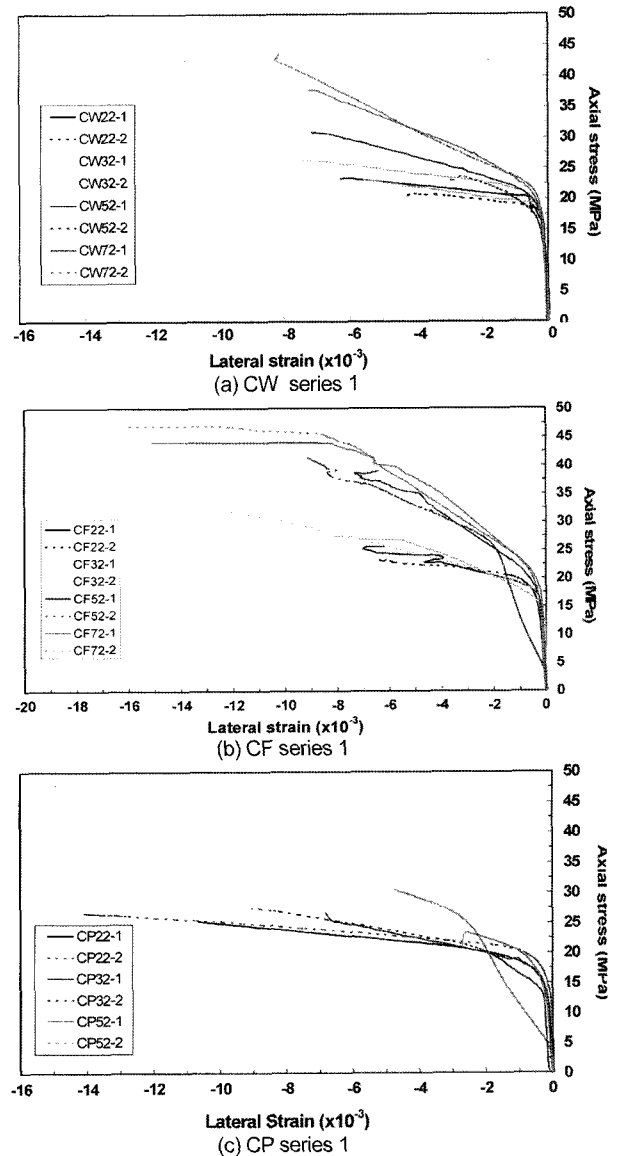


Fig. 8 Axial stress-lateral strain behavior for three groups

시 FRP 변형률은 인장시험편으로부터 획득한 파단변형률 보다 훨씬 작은 것으로 보고 되고 있다⁴⁾. 이러한 현상은 튜브 형(CF)보다는 wrapping형(CW)에서 보다 심각하게 나타나는데, 이는 wrapping형은 튜브 형과는 달리 직접적으로 축하중을 받지 않으며, 대다수 수동으로 제작되기 때문에 균일성이 떨어져 국부 파괴 및 응력 집중 가능성이 높기 때문인 것으로 알려져 있다. 본 연구의 튜브 형 시험체는 wrapping형과 마찬가지로 수동으로 제작되었으므로, 후자는 해당되지 않는다. 단지 wrapping형과 다른 점은 직접적으로 축응력을 지지하므로 보다 큰 FRP의 변형이 예상되며, 이러한 경향은 Table 1의 실험 결과에서도 확인할 수 있다.

모든 시험체에서 파괴 시 획득한 FRP 변형률은 인장 시험편의 극한변형률보다 작은 값을 나타냈다. CW형은 파단변형률의 45%, CF형은 67% , CP형은 75% 정도에서 각각 파괴가 발생하였다. 축하중을 직접받는 CF형이 CW형보다 더 큰 변형률을 나타내고 있으며, CP형은 구속 매체의 강성이 작기 때문에 동일한 응력을 지지하기

위하여서는 보다 큰 변형률이 요구되기 때문이다. 한편, 기 수행된 강재튜브로 구축된 콘크리트의 실험 결과는 wrapping형과 튜브 형의 강도는 비슷하거나 혹은 전자가 약간 큰 반면에, 축방향 강성은 후자가 훨씬 더 큰 것으로 보고하고 있다⁵⁾. 이러한 사실은 Figs. 5 및 6에서도 확인할 수 있다.

4. 최대 강도 및 변형률 산정

4.1 기존 모델식 평가

FRP로 구축된 콘크리트의 최대 강도 및 변형률을 예측하기 위하여 현재까지 제시된 해석 모델은 Table 3과 같다.

초기 모델은 철근콘크리트의 구속 모델로부터⁶⁾ 확장되었으며, 대부분 실험 결과를 회기 분석하여 유도된 완전 혹은 부분 실험식 들이다. 이들 중 Fardis⁷⁾ 및 Saadatmanesh⁸⁾ 모델은 전자에 해당되고, 나머지는 후자에 해당한다⁹⁻¹²⁾. 대다수의 제시된 모델은 전체 응력-변형률 응답을 예측할 수 있는 관련식을 포함하고 있기는 하나, 이들의 접근방법은 실험 결과를 fitting하여 관련강성, 최대강도 및 변형률과 같은 주요변수를 미리 결정한 후 이를 다시 Popovics식, 2차 포물선식 혹은 다변수를 포함하는 관계식과 연관지어 전체 응답을 예측하고 있으므로, 엄밀한 의미에서는 콘크리트 부피 팽창에 의한 물리적 거동을 포함하는 실제적인 이론식이라 보기 힘들다. 다만, Spoelstra¹²⁾ 만이 Patazopoulou의 기본 응력-변형률 곡선 및 Mander

가 제시한 파괴포락선을 채택하여, 매 단계마다 주어진 축방향 변형률에 대하여 평형 및 적합조건을 만족하고, 반복계산에 의하여 전체 응답을 결정하는 실질적인 해석 모델을 제시하고 있다. 여기서는 이러한 보다 종합적인 이론 모델의 결과로부터 제시된 단순식에 의한 예측 결과를 포함하고 있다.

기존식을 사용하여 본 연구의 시험체에 대한 최대강도를 예측하고 측정된 값과 비교한 결과는 Fig. 9(a)와 같다. Fardis, Saadatmanesh, Saaman⁹⁾ 및 Toutanji¹⁰⁾식은 실험강도를 과대평가하고 있는 반면에, Saafi¹¹⁾ 및 Spoelstra식은 다소 과소평가하는 경향을 나타내고 있다. 마찬가지로, 구축된 콘크리트의 최대변형률에 대하여서도 측정치와 예측치의 비교는 Fig. 9(b)와 같다. 실험으로부터 획득한 f'_{cc} 가 사용되었으며, Saaman식의 경우 CW 혹은 부분적 CP 시험체에 대하여 $f_0 \leq f'_{cc}$ 인 경우가 나타나므로 비교 대상에서 제외하였다. Saadatmanesh, Saaman 식은 실험 결과를 다소 과소평가하고 있으며, Saafi 및 Spoelstra식은 상당히 과대평가하고 있으며, Fardis 및 Toutanji 식은 어느 정도 허용 범위 내에서 실험 결과를 예측하고 있음을 알 수 있다. 하지만, 대체로 강도에 대한 비교 결과 보다는 상당히 산란된 경향을 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이 실험 시 측정오류를 포함하여 구속 콘크리트의 최대 변형률에 영향을 미치는 인자(비구속 콘크리트의 최대 변형률 및 강성, 골재 형태 및 사용량 등)가 더 많고, 현재로서는 이를 신뢰성 있게 고려하기가 매우 어렵기 때문이다.

Table 3 Existing predictive equations for ultimate strength and strain

Models	Theoretical f'_{cc}	Theoretical ϵ'_{cc}
Fardis and Khalili (1981)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4.1 \frac{f_{lat}}{f'_{co}}$ or $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.7 \left(\frac{f_{lat}}{f'_{co}} \right)^{0.86}$ for high f_{lat}	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + 0.0005 \frac{E_{lat}}{\epsilon'_{co} f'_{co}}$
Saadatmanesh et al. (1994)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_{lat}}{f'_{co}}} - 2 \frac{f_{lat}}{f'_{co}} - 1.254$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$
Saaman et al. (1998)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 6.0 \frac{f_{lat}^{0.7}}{f'_{co}}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = \frac{f'_{cc} - f_0}{E_2 \epsilon'_{co}}$ for $f_0 = 0.872 f'_{co} + 0.371 f_{lat} + 6.258$, and $E_2 = 245.61 f'^{0.2}_{co} + 0.6728 E_{lat}$
Toutanji (1999)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \left(\frac{f_{lat}}{f'_{co}} \right)^{0.85}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + (310.57 \epsilon_{fru} + 1.90) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$ for $0.002 \leq \epsilon_{lat} \leq \epsilon_{fru}$
Saafi et al. (1999)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.2 \left(\frac{f_{lat}}{f'_{co}} \right)^{0.84}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + (537 \epsilon_{fru} + 2.6) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$
Spoelstra and Monti (Approximate Version, 2000)	$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 0.2 + 3 \left(\frac{f_{lat}}{f'_{co}} \right)^{0.5}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 2 + 1.25 \frac{E_{co}}{f'_{co}} \epsilon_{fru} \sqrt{\frac{f_{lat}}{f'_{co}}}$ $E_{co} = 5,700 \sqrt{f'_{co}}$

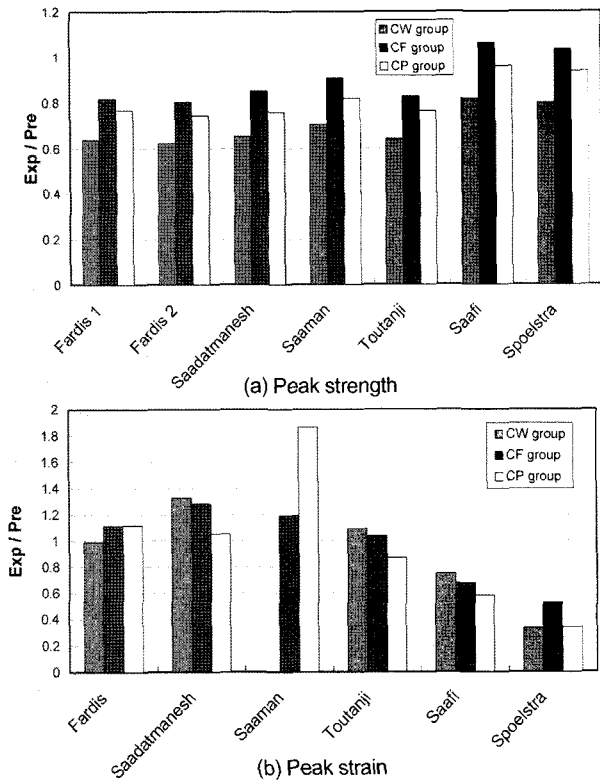


Fig. 9 Predicted results by existing models

4.2 새로운 모델식 제안

입자(granular)로 구성된 재료 거동의 특성 및 수평 구속력의 크기에 따라 압축거동이 향상되는 압력 민감형 (pressure-sensitive)의 콘크리트 재료 특성을 고려하여, 본 연구에서는 3축 하중을 지지하는 토질의 거동에 근거하여 유도된 모어-쿨롱(Mohr-Coulomb) 파괴기준을 채택하여 FRP로 구속된 콘크리트의 최대 강도식을 제안하였다. 이는 실험 결과에 근거하여 도출한 단순식이며, 보다 완전한 전체 응력-변형률 응답을 예측할 수 있는 해석 모델은 후속 논문에서 기술한다.

3축 압축력 혹은 2축 방향에서 구속력을 지지하는 콘크리트의 최대 압축응력은 Fig. 10에 의하여 아래와 같다.

$$\sin \phi = \frac{(f'_{cc} - f_2)}{2} / \left(c \cot \phi + \frac{(f'_{cc} - f_2)}{2} \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} f'_{cc} &= 2c \tan(45 + 0.5\phi) + f_2 \tan^2(45 + 0.5\phi) \\ &= f'_{co} + k_c f_{lat} \tan^2(45 + 0.5\phi) \end{aligned} \quad (5)$$

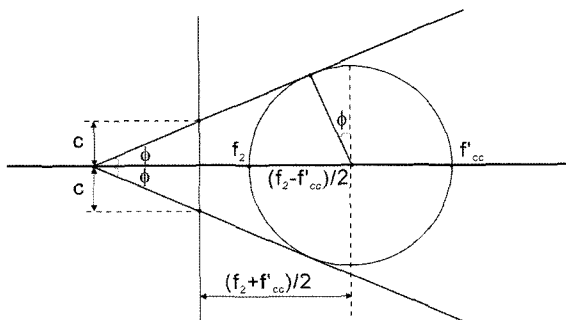


Fig. 10 Mohr-Coulomb failure criterion

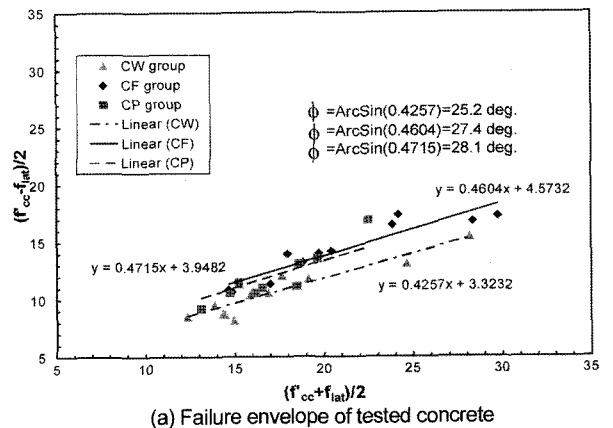
여기서 $f_1 = f'_{cc} > f_2 = f_3 = f_{lat}$ 이며, c = 콘크리트의 점착계수(cohesion) 이고, ϕ = 내부마찰각이며 대략 36~45도의 값을 갖는다. 또한, k_c = 유효구속계수이며 원형기둥의 경우 0.95이다.

콘크리트의 내부마찰각을 산정하기 위하여 실험결과로부터 획득한 구속응력을 이용하여 2축 압축응력의 합 및 차(deviatoric stress)로 표시한 파괴점은 Fig. 11(a)와 같다. 본 연구에 사용한 콘크리트의 경우 매우 낮은 내부 마찰각(27~31도)을 나타내고 있는데, 이는 현장제작 여건상 진동다짐이 충분하지 못하였고, 우천시 콘크리트를 타설 하였기 때문에 예상보다 물-시멘트비가 높았던 것으로 판단된다. 이러한 이유에서 각 그룹에 대한 비구속 콘크리트의 강도(16.1~17.5 MPa)도 예상보다 낮을 수밖에 없었다. 따라서 최종적으로 모어-쿨롱 파괴기준을 사용하여 본 연구의 실험 결과로부터 유도한 최대강도 예측식은 아래와 같다.

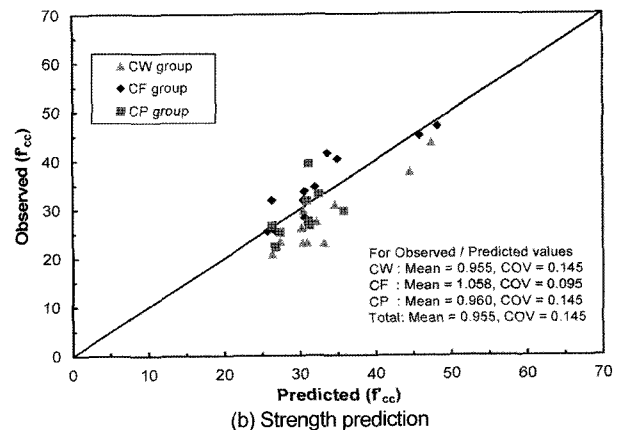
$$f'_{cc} = f'_{co} + (2.4 \sim 2.6) f_{lat} \quad (6)$$

식 (6)에 의하여 예측된 결과는 Fig. 11(b)와 같으며, 또한 실험으로부터 획득한 최대강도 및 구속응력을 단순히 fitting하여 얻어낸 Fig. 12(a)의 단순식과 유사함을 확인할 수 있는데, 식 (6)은 보다 이론적으로 유도되었음에 주의할 필요가 있다.

3축 응력하의 콘크리트 변형능력은 하중경로에 크게 의존하므로(path-dependent), 구속매체의 강성에 큰 영향



(a) Failure envelope of tested concrete



(b) Strength prediction

Fig. 11 Test results and Mohr-Coulomb failure criterion

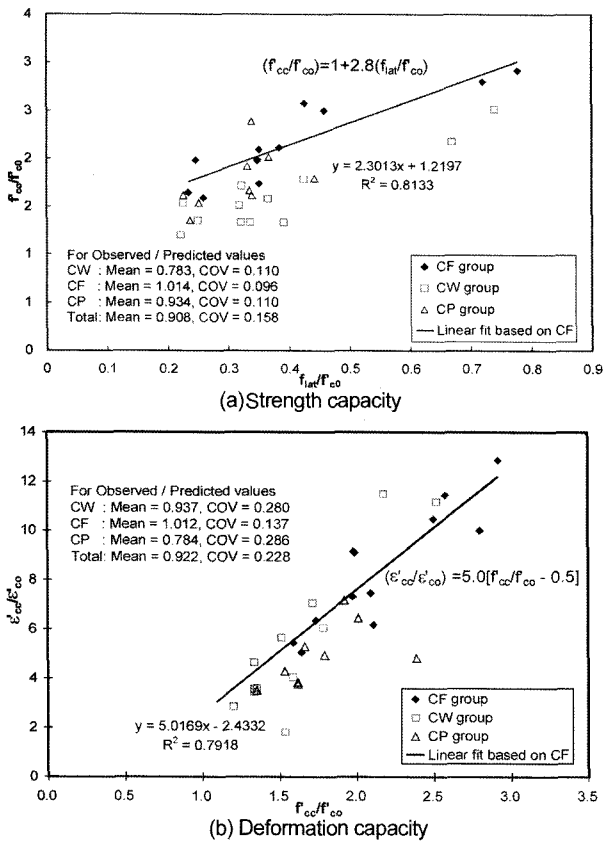


Fig. 12 Proposed predictive equations derived from fitting of test data

을 받는다. 더욱이 골재의 형태 및 크기, 배합형태, 물-시멘트 비 및 수분함량 등도 영향을 미치는 주요 요소로 인식되고 있으나, 설계 목적의 단순식에 이러한 효과를 포함하기는 매우 힘들다. 한편, 실험 시 관측된 최대 변형률도 매우 산란된 분포를 보이고 있으므로 이런 상황에서 결정적인 변수를 도출하기는 매우 어려운 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구는 Fig. 12(b)와 같이 콘크리트 강도를 주요변수로 하여 최대변형률을 예측할 수 있는 단순식을 아래와 같이 제안하였다.

$$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 5.0 \left[\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 0.5 \right] \quad (7)$$

5. 결 론

상기와 같이 FRP 합성재료에 의하여 콘크리트를 구속할 시 예상되는 콘크리트의 강도 및 변형 능력의 향상 효과를 조사하기 위하여 수행한 일련의 실험 및 이론적 연구로부터 아래와 같은 결론을 획득하였다.

- 1) 콘크리트의 구속효과는 FRP의 두께 혹은 수평 방향 섬유 량에 크게 지배되었으며, 대체로 wrapping 형 및 Full Shell형에 의하여 구속된 콘크리트는 매우 우수한 강도 및 변형률 향상 효과를 나타냈다.
- 2) 보강되지 않은 콘크리트와 비교하여 구속된 콘크리트

트의 강도증가는 CW형에서 1.3~2.4배, CF형에서는 1.6~2.9배, CP형에서는 1.6~2.1배를 각각 나타냈으며, 최대 변형률의 증가는 CW형에서 1.8~12.5배, CF형에서는 5.1~12.9배, CP형에서는 3.5~7.2배를 각각 나타냈다. 하지만, CP형의 경우 전체적으로 이음부의 취성 파괴로 인하여 CW 및 CF형 보다 강도, 특히 변형능력이 저하되는 양상을 나타냈다.

- 3) 모든 시험체의 응력-변형률 곡선은 대체로 2선 선형 관계를 나타냈으며, 후반부의 변형경화 정도는 FRP 두께 및 영계수를 포함하는 구속매체의 강성에 의존하였다. 이음부를 포함하는 CP 시험체가 가장 낮은 변형 경화를 나타냈다.
- 4) 모든 시험체에서 파괴 시 FRP의 변형률은 인장시 험편으로부터 획득한 극한변형률보다 작은 값을 나타냈다. CW형은 과단변형률의 45%, CF형은 67% 정도, CP형은 75% 정도에서 각각 파괴가 발생하였다. 축하중을 직접 지지하는 CF형이 CW형보다 더 큰 변형률을 나타냈으며, CP형은 이음부를 포함하는 구속매체의 강성저하로 보다 큰 변형률이 발생하였다.
- 5) 여러 기존 모델을 사용하여 본 연구의 시험체에 대한 최대강도 및 변형률을 예측한 결과 일반적으로 강도 및 변형률을 과대평가하고 있었으며, 특히 변형률은 매우 산란된 예측 결과를 나타냈다. 강도는 Saafi 및 Spoelstra 식이, 변형률은 Fardis 및 Toutanji 식이 허용된 범위 내에서 실험 결과에 가장 근접하는 것으로 나타났다.
- 6) 보다 향상된 예측을 위하여, 본 연구의 실험 결과에 근거한 최대강도 및 변형률을 예측할 수 있는 설계 목적의 단순식을 제안하였다. 전자는 모어-쿨롱 파괴 기준에 따라 유도하였고, 후자는 비구속 콘크리트 강도를 주요 요소로 포함하여 실험결과를 fitting 하였다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(R05-2003-11885-0)이며, 시험체 제작에 협조해주신 (주)근형기업 관계자 분들께도 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Pantazopoulou, S. J., "Role of Expansion on Mechanical Behavior of Concrete", ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol.121, No.12, 1995, pp.1795~1805.
2. Di Prisco, M. and Mazars, J., "Discussion of Role of Expansion on Mechanical Behavior of Concrete by S. J. Pantazopoulou", ASCE, *Journal of Structural Engineering*, Vol.123, No.4, 1997, pp.535~537.

3. 조순호, “FRP로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 응답 예측”, 콘크리트학회 논문집, 2007(제출예정).
4. Matthys, S., Toutnaji, H., Audenaert, K., and Taerwe, L., “Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined with Fiber-Reinforced Polymer Composites”, *ACI Structural Journal*, Vol.102, No.2, 2005, pp.258~267.
5. McAteer, P., Bonacci, J. F., and Lachemi, M., “Composite Response of High-Strength Concrete Confined by Circular Steel Tube”, *ACI Structural Journal*, Vol.101, No.4, 2004, pp.466~474.
6. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete”, *ASCE, Journal of the Structural Division*, Vol.114, No.8, 1988, pp. 1804~1826.
7. Fardis, M. N. and Khalili, H., “FRP-Encased Concrete as a Structural Material”, *CCA, Magazine of Concrete Research*, Vol.34, No.121, 1982, pp.191~201.
8. Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., and Li, M. W., “Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composites Straps”, *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.4, 1994, pp.258~267.
9. Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., “Model of Concrete Confined by Fiber Composites”, *ASCE, Journal of Structural Engineering*, Vol.124, No.9, 1998, pp.1025~1031.
10. Toutanji, H. A., “Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets”, *ACI Materials Journal*, Vol.96, No.3, 1999, pp.397~404.
11. 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.500~594.
12. Spoelstra M. R. and Monti G., “FRP-Confined Concrete Model”, *ASCE, Journal of Composites for Construction*, Vol.3, No.3, 1999, pp.143~150.

요 약 본 연구에서는 FRP(fiber reinforced polymer) 합성재료에 의하여 콘크리트를 구속할 시 예상되는 콘크리트의 강도 및 변형 능력의 향상 효과를 알아보기 위하여 섬유 량 혹은 방향, 단부하중조건에 따른 wrap 혹은 튜브형의 구속 형태, 반원형 셸 및 수직 이음부의 유무에 따른 연속 및 불연속 구속 형태 등을 주요 변수로 한 총 36개의 원형단주 시험체에 대하여 단조가력 실험을 수행하였다. 여러 구속 방법에 따른 FRP의 파단변형률에 대하여서도 주의를 가지고 조사하였다. 구속된 콘크리트의 최대 강도 및 변형률을 산정하기 위하여 기존에 제시된 다양한 배경의 예측 식들에 대하여 검토하였으며, 이들에 의한 예측치와 실험치를 비교, 분석하였다. 구속되지 않은 콘크리트와 비교하여, CW 및 CF형은 매우 큰 강도 및 변형능력의 증가를 나타냈으며, 수직 이음부를 갖는 CP형은 폭발적으로 파괴하였으며, 보다 작은 강도 및 변형능력의 증가가 관측되었다. 대체로, 모든 시험체는 2선 선형관계의 응력-변형률 거동을 나타냈으며, 후반부의 변형경화 정도는 구속매체의 강성에 따라 결정되었다. 모든 시험체에서 관측된 FRP의 파단변형률은 인장시험편으로부터 획득한 극한변형률보다 정도에 따라서는 매우 작았다. 대체로, 기존 예측식들은 본 실험의 최대 강도 및 변형률을 과대평가 하였으며, 변형률 예측은 매우 산란된 분포를 나타냈다. 또한, 본 연구의 실험 결과에 근거하여 구속 콘크리트의 최대 강도 및 변형률을 보다 정확하게 예측할 수 있는 설계 목적의 단순식을 제안하였다. 강도식은 모어-쿨롱 파괴 기준을 사용하여 유도하였으며, 변형률식은 비구속 콘크리트를 주요 영향 요소로 포함하여 실험 결과를 fitting하였다.

핵심용어 : 기둥, 콘크리트, 구속, 변형, 섬유보강중합체