

GFRP Laminates에 의한 콘크리트의 구속

Confinement Effects of Concrete by GFRP Shells

조 순 호* 선 성 규** 정 창 원*** 조 규 성****
Cho, Soon Ho Sun, Seong Gyu Jung, Chang Won Cho, Gyu Sung

ABSTRACT

Three series of 36 short circular columns confined by wraps, full shells and partial shells were tested by varying the thickness of GFRP laminates. An assessment of the effectiveness of the existing models on confinement of concrete columns with FRP was made for present tests. Test results indicated significant increases in strength and deformability compared with those in unconfined concrete, particularly wrap and full shell confinement. Existing predictive equations for peak strength and strain of confined concrete showed a large scatter and varied considerably, resulting from the realistic fracture strains of FRP nor considered.

1. 서 론

지난 수 십년 동안 FRP(Fiber Reinforced Polymers)는 높은 강도-중량 비, 내부식성, 전자기기적 중립성 등과 같은 고유의 재료특성으로 말미암아 콘크리트 구조물의 보강/보수 재료로서 토목 및 건축분야에 널리 사용되어 왔다. 수많은 적용사례 중에서도, 특히 내진설계의 관점에서 보면, 강도 및 변형능력을 증가시키기 위하여 콘크리트 기둥을 구속하는 장치로서의 FRP 적용은 가장 성공적인 예 중의 하나이다. 하지만, 현재로서 상당한 연구가 수행되었음에도 불구하고 FRP로 구속된 콘크리트의 거동을 예측하기 위한 해석모델의 정립은 아직 충분하지 않은 상황

* 정희원, 광주대학교 건축학부 부교수

*** 근형기업(주)

** 다원구조(주) 사원 (본 연구는 2001년 산·학·연 컨소시엄 사업 및 STRESS 지원으로 수행된 내용의 일부임)

이다. 현존하는 대부분의 해석모델은 상당히 제안된 실험결과로부터 유도된 실험식이다. 따라서 본 연구는 현존하는 콘크리트 FRP 구속 해석모델의 효율성을 평가하고 새로운 개념의 이론적 모델을 개발하기 위하여 3 종류 및 총 36 개의 실험 및 해석 연구를 수행하였다. 한정된 크기의 원형 시험체(150mmx300mm) 및 유리섬유계통의 FRP(1- 및 2-방향 GFRP)가 고려되었다. 해석모델의 평가는 구속된 콘크리트의 최대 축방향 응력(f'_{cc}) 및 변형도(ϵ'_{cc})를 예측하는데 초점을 맞추었다. 이 두 요소는 설계관점에서 볼 때 가장 중요한 변수이며, 또한 전체 응력-변형도 응답을 결정하는데 핵심적인 역할을 하기 때문이다.

2. 해석모델

FRP에 의한 콘크리트의 구속은 수동형태이다. 즉, 외부 축력에 의하여 콘크리트가 수평으로 팽창하므로써 발생한다. 축력이 증가함에 따라 횡방향 팽창이 증가하고, 또한 구속매체는 이에 대응하는 균일한 반경방향 압력을 상쇄하기 위하여 인장후프응력을 발생시킨다. 콘크리트 표면 및 구속매체의 변형도 적합조건($\epsilon_l = \epsilon_f$) 및 힘의 평형 조건으로부터 횡구속력(f_l) 및 관계식은 아래와 같이 유도할 수 있다(그림 1).

$$f_l = E_l \cdot \epsilon_l = E_l \cdot \epsilon_f \quad (1)$$

$$E_l = \frac{2E_f t}{D} \quad (2)$$

$$f_l = E_l \cdot \epsilon_{fu} = \frac{2f_{fu} t}{D} \quad (3)$$

구조용 HSS(Hollow Steel Section)에 의한 구속기구도 이와 동일한 형태를 취하나 FRP구속과 기본적으로 다른 점은 초기 탄성거동 후 항복거동을 나타내며, 특히 GFRP와 비교하여 강성(E_f)이 큰 점이다. 따라서 강재에 의한 구속력은 항복응력에 일치하는 최대값에 도달한 후 일정한 크기를 나타낸다. 한편, FRP에 의하여 구속된 콘크리트는 비구속 응력크기(f'_{co})에서 심한 연화현상 및 변이특성을 나타내며, 그 후 최대응력에 도달할 때까지 접선강성(Tangential Stiffness)이 일정한 값으로 안정화되는 2선 응력-변형도 특성을 나타낸다. 따라서 최대 점(Peak Point)은 극한 점(Ultimate Point)과 대체로 일치하며 이 두 점이 모두 FRP 구속매체의 인장파단과 일치한다. 하지만, FRP의 인장파단 시 측정된 변형도(ϵ_{fu})는 대부분의 경우에 FRP의 인장 시험편으로부터 측정된 극한 변형도(ϵ_{fu}) 보다 훨씬 작은 것으로 나타나고 있으며, 이러한 현상은 해석모델의 정확도에 큰 영향을 미치는 주요 소로 판단된다.

FRP 구속에 의한 콘크리트의 강도 및 변형을 예측하기 위하여 현재까지 제시된 해석모델은 표 1과 같다. 초기 모델은 대부분 철근콘크리트의 구속모델로부터 확장되었으며, 대부분 실험결과를 회기분석하여 유도된 실험 혹은 부분 실험치 들이다. 이들 중 Saadatmanesh, Saaman, Toutanji, Saffi 및 Spoelstra 모델은 전체 응력-변형도 관계를 예측할 수 있는 관계식을 포함하고 있다.

Table 1 Summary of Analytical Models

Model	Theoretical f'_{cc}	Theoretical ϵ'_{cc}	"Premature" FRP rupture is considered ?
Fardis and Khalili (1981)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 4.1 \frac{f_l}{f'_{co}}$ $\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.7 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.86}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + 0.0005 \frac{E_l}{\epsilon'_{co} f'_{co}}$	NO
Saadatmanesh et al. (1994)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_l}{f'_{co}}} - 2$ $\frac{f_l}{f'_{co}} - 1.254$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + 5 \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$	NO
Saaman et al. (1998)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 6.0 \frac{f_l^{0.7}}{f'_{co}}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = \frac{f'_{cc} - f_0}{E_2 \epsilon'_{co}}$ $f_0 = 0.872 f'_{co} + 0.371 f_l + 6.258$ $E_2 = 245.61 f'_{co}^{0.2} + 0.6728 E_l$	NO
Toutangji (1999)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 3.5 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.85}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + (310.57 \epsilon_{fu} + 1.90) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$	NO
Saafi et al. (1999)	$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 2.2 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.84}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 1 + (537 \epsilon_{fu} + 2.6) \left(\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} - 1 \right)$	NO
Spoelstra and Monti (Approximate) (1999)	$\frac{f'_{cu}}{f'_{co}} = 0.2 + 3 \left(\frac{f_l}{f'_{co}} \right)^{0.5}$	$\frac{\epsilon'_{cc}}{\epsilon'_{co}} = 2 + 1.25 \frac{E_{co}}{f'_{co}} \epsilon_{fu} \sqrt{\frac{f_l}{f'_{co}}}$	NO

3. 실험

본 연구에서 고려한 시험체의 주요변수는 i) Glass Fiber 두께 및 방향, ii) FRP 형태(연속형 및 불연속형) 등이다. 기둥의 단면은 원형(150mmx300mm)으로 하였으며, Fiber의 두께 및 방향은 구입 가능한 1-방향(x 혹은 y방향) 및 2-방향(x 및 y방향) Glass Fiber를 다양하게 조합하여 전체 6종류를 결정하였다. 또한, FRP형태는 구속방법에 따라 연속적으로 부착하는 **Wrapping형(CW)**, 이미 성형된 Shell을 나타내는 **Full Shell형(CF)**, 반원형 이음, 접착하는 **Partial Shell형(CP)** 등을 포함한다(그림 2). 완전 Shell형의 제작은 시험체를 충분히 Wrapping한 후 상, 하단부를 절단하는 제작방법을 사용하였으며 또한, 부분 Shell형의 경우 이음부의 취약성이 예상되나 현재의 기기 보유현황 및 작업여건상 제작 및 시공이 용이하고 이음부의 파괴를 최대한 지연할 수 있는 범위에서 고려하였다. FRP 인장시험편은 Fiber 두께 및 방향 별로 x방향을 주방향으로 하여 2개씩 제작하였으며, 모든 시험체에 사용된 콘크리트 압축강도(f'_{co})는 21MPa 이다. 수평 및 수직방향으로 소요 Fiber 량을 확보하기 위하여 Epoxy를 함침하여 수동으로 적층(Manual Lay-up)하였다.

한편, 2자리 숫자는 1-방향 Fiber Mesh를 1 Ply로 정의할 때 x 및 y방향에 포함된 Fiber 량 혹은 Ply수를 의미하며, 마지막 숫자는 동일 시험체 번호를 의미한다. 시험체는 Instron G8505 UTM(100 tonf)의 Bed에 Load Cell(100tonf 혹은 200tonf) 및 Steel Block을 설치한 후 그 위에 배치하였다. 0.0017mm/sec의 변위증가 속도에 따라 일방향으로 재하하였으며 Potentiometer(25~50mm)에 의하여 전체 축방향 변위를 측정하였다. 또한, FRP에 수직 및 수평으로 부착된 전기저항식 변형게이지에 의하여 FRP의 수직 및 수평 변형도를 국부적으로 측정하였다. 매 하중 단계마다 측정된 하중, 변위 및 변형도는 TDS-602에 기록되었으며, 추가적으로 FRP의 파단조짐 등 특기사항은 별지에 표시되고 기록되었다.

4. 실험결과 분석 및 예측

FRP로 구속된 시험체의 파괴양상은 Wrapping 형태에 상관없이 시험체 중앙에서 Fiberglass의 파단에 의하여 시작되었다. 지압판과 시험체 사이의 마찰력에 의하여 발생한 시험체 상, 하부의 콘크리트 및 FRP파괴는 전체거동에 영향을 미치지 않은 것으로 판단되었다. 파괴는 갑작스럽게 발생하였으나 감지할 수 있었으며, 예상할 수 있었다. 초기 재하로부터 50%정도의 파괴하중 구간에서 콘크리트 내부에 미세균열 및 골재의 이동을 나타내는 소리를 들을 수 있었으며, 파괴하중 부근에서는 Fiberglass가 끊어지는 소리를 들을 수 있었다. 또한, 60~70% 파괴하중에서 시험체 중앙부에 FRP의 균열을 나타내는 흰선 혹은 흰블록(Whitening)을 감지할 수 있었다. 이러한 조짐은 수지가 소성변형을 시작했음을 의미하며, 하얀색의 Fiberglass 만이 하중을 지지하고 있음을 의미한다. 이러한 흰선은 하중이 증가함에 따라 상, 하단으로 발전되어 갔다. FRP에 국부좌굴 및 물결모양의 찌그러짐이 관측되었으나, 대부분 시험체의 주요파괴 형태는 FRP의 파단으로 종료되었다. CW Series에 관한 주요 실험결과는 표 2와 같다.

Table 2. Test results for CW Series

Specimen No.	FRP Properties				Confinement Properties			Test Results					
	t (mm)	E_f (GPa)	f_{fu} (MPa)	ϵ_{fu} (%)	E_l (GPa)	f_l (MPa)	f_l / f'_{co}	f'_{cc} (MPa)	f'_{cc} / f'_{co}	$\epsilon'_{cc}(\%)$	$\epsilon'_{cc} / \epsilon'_{co}$	$\epsilon_{fr}(\%)$	$\epsilon_{fr} / \epsilon_{fu}$
CW22-1	1.24	17.3	240	1.5	287	4.3	0.25	23.4	1.4	1.07	3.62	0.61	0.41
CW22-2	1.49	14.0	188	1.4	279	3.8	0.22	20.8	1.2	0.84	2.85	0.40	0.29
CW32-1	1.84	NA	183	NA	346	5.6	0.32	29.7	1.7	2.09	7.07	0.80	0.50
CW32-2	1.83	14.6	225	1.6	344	5.6	0.32	23.1	1.3	1.38	4.65	0.56	0.35
CW52-1	2.58	NA	200	0.9	584	7.3	0.42	30.9	1.8	1.79	6.06	0.72	0.57
CW52-2	2.39	17.5	220	1.3	538	6.8	0.39	23.1	1.3	1.02	3.45	0.29	0.23
CW72-1	3.32	NA	188	NA	657	12	0.67	37.7	2.2	3.40	11.50	0.72	0.41
CW72-2	3.67	15.4	301	2.2	726	13	0.74	43.6	2.5	3.31	11.20	0.81	0.46
CW31-1	1.67	16.2	217	1.6	349	5.5	0.32	26.2	1.5	1.67	5.66	0.90	0.57
CW31-2	1.68	12.9	178	1.4	278	3.9	0.23	26.6	1.5	0.54	1.81	1.01	0.72
CW43-1	2.58	13.6	171	1.4	468	6.3	0.37	27.4	1.6	1.20	4.05	0.77	0.57
CW43-2	2.58	14.1	164	1.2	487	5.8	0.34	23.1	1.3	1.06	3.56	0.38	0.32

한편, 각 Series에 대한 표의 1의 해석모델에 의한 강도 및 변형도 예측결과는 그림 3 및 4와 같다. 일반적으로 여러 모델에 의한 예측결과는 상당한 범위에서 넓은 분포를 나타내고 있으나, 그 중에서 강도예측은 Saafi 및 Spoelstra 모델이, 변형예측은 Fardis(Richart) 및 Toutanji 모델이 각각 가장 우수한 것으로 나타났다. 하지만, 전술한 바와 같이 보다 정확한 예측을 위해서는 실제의 FRP 파단 변형도를 고려하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

1. 콘크리트의 구속효과는 FRP의 두께에 크게 지배되었으나, 대체로 Wrapping형 및 Full-Shell형 FRP에 구속된 콘크리트의 성능은 보강되지 않은 콘크리트에 비하여 매우 우수한 강도 및 변형 향상 효과를 나타내었다.

2. 보강되지 않은 콘크리트와 비교하여 원형 시험체의 강도증가는 CW형에서 1.3~2.4배, CF형에서는 1.6~2.9배, CP형에서는 1.6~2.1배를 나타내었으며, 변형도 향상은 CW형에서 1.8~12.5배, CF형에서는 5.1~12.9배, CP형에서는 3.5~7.2배를 나타내었다. 하지만, CP의 경우, 전체적으로 이음부의 취성 파괴로 인하여 CW 및 CF Series 보다는 강도 및 변형능력이 훨씬 저하된 양상을 나타내었다.

3. 일반적으로 여러 모델에 의한 예측결과는 상당한 범위에서 넓은 분포를 나타내고 있으나, 그 중에서 강도예측은 Saafi 및 Spoelstra 모델이, 변형예측은 Fardis(Richart) 및 Toutanji 모델이 각각 가장 우수한 것으로 나타났다. 하지만, 보다 정확한 예측을 위해서는 실제의 FRP 파단 변형도를 정확하게 고려하여야 할 것으로 판단된다.

4. Path-Independency의 3축 콘크리트 강도성능을 제대로 묘사하기 위하여서는 일정한 구속력보다는 변화하는 구속력이 고려되어야 하며, 이는 보다 이론적 접근방법에 근거한 전체 응력-변형도 응답 모델을 개발하는데 필수적이다. 또한, Path-dependency 경향을 나타내는 3축 콘크리트의 변형특성을 정확히 고려하기 위하여서는 구속매체의 강성이 매우 중요함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. "Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for Strengthening concretes structures," ACI Committee 440-F Draft Document, 2000, 443 p.
2. Samaan, M., Mirmiran, A. and Shahawy, M., "Model of Concrete Confined by Fiber Composites," ASCE Journal of Structural Engineering, V. 124, No. 9, Sept., 1998, pp. 1025-1095.
3. Spoelstra M. R., and Monti G., "DRP-Confined Concrete Model," Journal of Composites for Construction, ASCE, V. 3 No. 3, Aug. 1999, pp.143-150

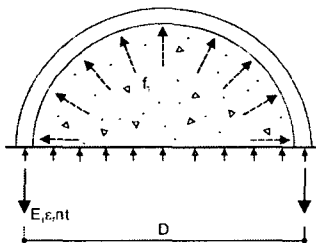


Fig. 1 Confinement Mechanism

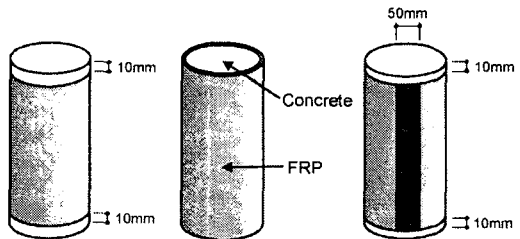


Fig. 2 Specimen Types

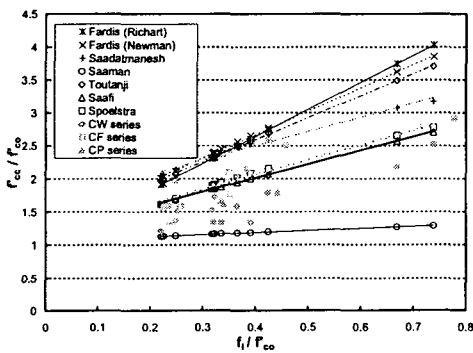


Fig. 1 Predicted vs. Tested in Strength

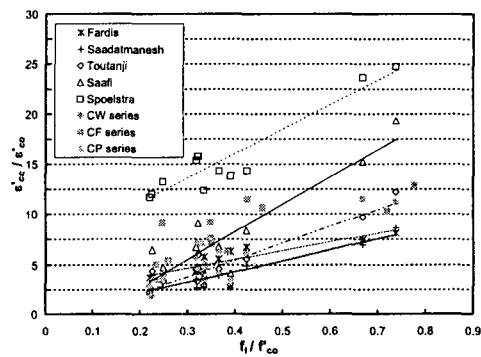


Fig. 2 Predicted vs. Tested in Deformation