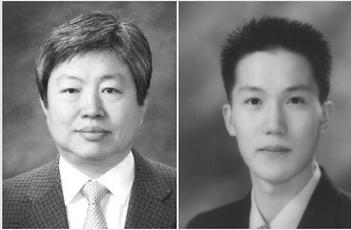


# 콘크리트 구조보강용 복합신소재 시스템의 특성

## Advanced Composite System for Strengthening of Reinforced Concrete Structures



심중성(Jongsung, Sim) 정회원 | 한양대학교 건설환경공학과 교수 | 공학박사 | jssim@hanyang.ac.kr  
 김용재(Yongjae, Kim) 정회원 | 한양대학교 건설환경공학과 박사과정 | csrl@hanyang.ac.kr

### 1. 서론

철근콘크리트구조물은 재료, 환경, 하중, 공용기간 등 다양한 조건에 따라 필연적으로 성능저하가 발생하게 되며, 성능이 저하된 구조물은 그 저하정도에 따라 적절한 보수보강이 필요하다. 과거에는 강선, 강판 등 주로 강재를 이용한 구조물의 보강공법이 적용되었으나, 강재 역시 재료의 열화와 주기적 유지보수 필요성으로 인해 그 사용이 점차 줄어들고 있다.

이러한 추세로 인하여, 복합신소재인 FRP(Fiber Reinforced Polymer/Plastic)는 인장력, 내구성 및 경제성이 기타 건설재료보다 우수하여 다양한 형태로 가공되어 사용되고 있으며, 전 세계적으로 그 적용범위가 크게 확대되고 있는 실정이다. 국내에서는 FRP의 우수성이 입증되었음에도 불구하고 건설분야의 보수보강에 적용된 기간이 비교적 짧고, 관련 건설기술자들의 인식의 전환이 이루어지지 않아 적절히 활용되지 못하고 있는 실정이다.

본 고에서는 건설분야 보수보강에서 주로 사용되는

FRP의 종류별 특성을 소개하고, 이를 사용하여 보강된 콘크리트 구조물의 특성을 언급함으로써, 철근콘크리트 보강용 복합신소재 시스템에 대한 전반적인 이해를 돕고자 하였다.

### 2. 구조보강용 복합신소재의 특성

#### 2.1 FRP의 분류

FRP는 에폭시 합성수지, 폴리에스테르 합성수지, 비닐에스테르 합성수지와 같은 Resin Matrix(수지모재)에 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등을 단면적의 약 60~65%로 배근하여 제작한다.

FRP는 섬유의 배근방법, 모재수지의 성형방법, 섬유의 종류 등에 따라 여러 가지로 분류 할 수 있으나, 물성에 가장 큰 영향을 미치는 요소는 사용된 섬유의 특성이므로 건설분야에서는 사용된 섬유의 종류에 따라 CFRP(탄소섬유보강폴리머), GFRP(유리섬유보강폴리머), AFRP(아라미드섬유보강폴리머) 등 3가지로 크게 분류하고 있다.

또한 콘크리트구조물의 보강방법 및 용도에 따라 모재수지의 형상을 조절하여 Sheet, Plate, Bar 형태로 구별하고 있으며, 기존 구조물의 내하력 증진용으로는 Sheet 또는 Plate, 신설 구조물의 인장재로는 Plate 또는 Bar 형태가 주로 사용되고 있다.

### 2.2 FRP의 물리적 특성

FRP를 이용한 철근콘크리트구조물의 보강은 주로 휨 및 전단에 의한 인장력이 발생하는 부재에서 이루어지고 있으며, 이와 관련된 FRP의 물리적 특성은 다음 표 1과 같다.

물리적 특성은 사용된 섬유량, 수지모재의 종류, 성형 방법에 따라 다소 차이가 있으나, 일반적으로 단위중량은 강재에 비해 약 25% 이하, 인장강도는 약 3배 이상의 높은 특성을 보이고 있다.

그러나 그림 1의 각 재료의 응력-변형률선도에서와 같이 FRP는 강재와 달리 응력에 따라 선형적인 변형선도를 갖는 취성적 성향을 띠고 있으며, 보강설계시 이러한 특성을 충분히 고려하여야 한다.

## 3. 구조보강용 복합신소재 시스템의 특성

### 3.1 보의 휨보강

FRP를 이용한 철근콘크리트 보의 휨보강기술은

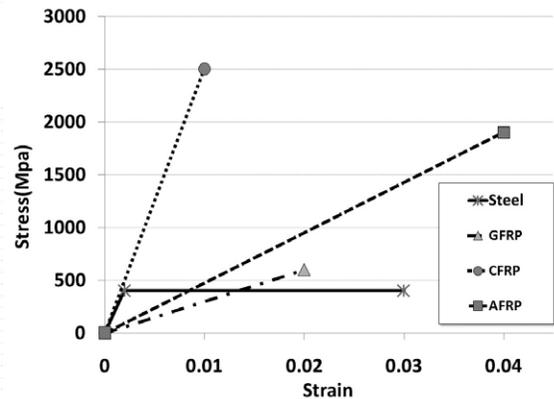


그림 1 FRP 종류에 따른 응력-변형률 곡선

FRP의 부착방법과 긴장여부에 따라 다음 그림 2와 같이 세가지로 분류된다.

- ① FRP Plate 또는 Sheet를 보의 하면에 단순부착하는 방법
  - ② FRP Plate를 보의 하면에 부착하고 Strip을 이용하여 단부정착도를 증가시키는 방법
  - ③ 프리스트레스된 FRP Plate를 단부에 부착하는 방법
- 이러한 보강방법은 보의 내하력 증진을 위해 주로 사용되는 방법으로 구조물의 상태, 시공여건 등 다양한 조건에 따라 그 방법이 결정되며, 이에 대한 설계는 Kong and Evans(1987)가 제시하여 채택된 방법이 주로 사용되고 있다(그림 3).

FRP는 취성적 재료이며, 콘크리트 하면에 부착되므로 보강된 보의 깊이를 초과한 변형과 응력이 고려되어

표 1 GFRP, CFRP, AFRP의 역학적 특성 비교

Unidirectional advanced composite materials	Fiber content (% by weight)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Longitudinal tensile modulus (Gpa)	Tensile strength (Mpa)	Rupture strain (%)
Steel	0	7,850	20	440~620	0.3
GFRP (Glass fiber/Polyester)	50~80	1,600~2,000	20~55	400~1800	1.0~1.5
CFRP (Carbon/Epoxy)	65~75	1,600~1,900	120~250	1,200~2,250	2.3~3.0
AFRP (Aramid/Epoxy)	60~70	1,050~1,250	40~125	1,000~1,800	2.0~3.0

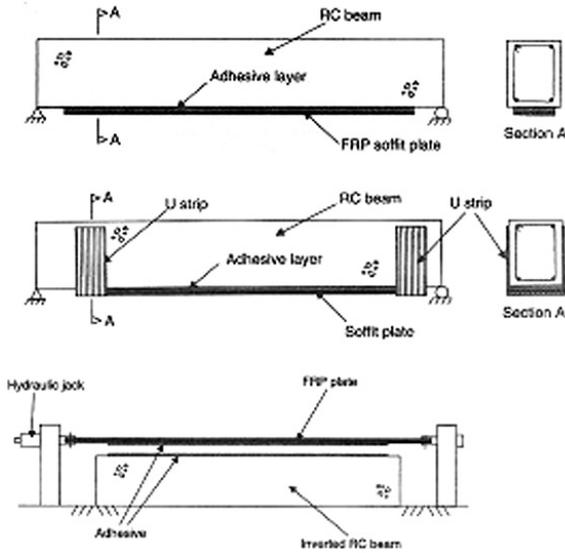


그림 2 FRP를 이용한 보의 휨보강

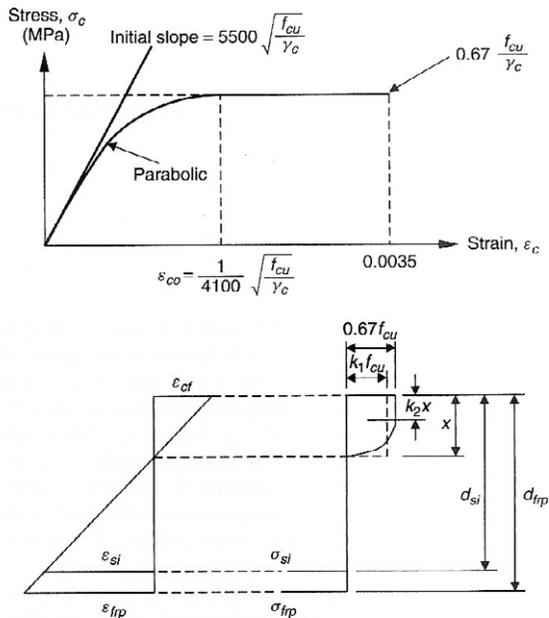


그림 3 FRP로 보강된 보의 거동

야 하므로 그림 3과 같은 거동이론과 다음과 같은 콘크리트 압축응력 산정식이 사용되고 있다.

$$\sigma_c = 5500 \left( \sqrt{\frac{f_{cu}}{\gamma_c}} \varepsilon_c - \frac{4100}{2} \varepsilon_c^2 \right)$$

상기와 같이 설계 및 보강된 보의 시험결과, 일반 철

근콘크리트보와 달리 7가지 형태(FRP파단, 콘크리트압축파괴, 전단파괴, 콘크리트 피복탈락, Plate 단부파괴, 중앙부 휨균열 계면탈락, 중앙부 휨전단균열 계면탈락)의 파괴양상을 보이고 있다. 이는 휨과 전단보강의 정도, FRP의 재료특성, 계면의 부착특성 등 다양한 변수에 의해 발생되며, 파괴양상이 전반적으로 취성파괴형태로 나타내므로 보강설계시 주의하여야 한다[J. G. Teng et al.(2002)].

### 3.2 보의 전단보강

FRP를 이용한 보의 전단보강은 일반적인 철근콘크리트보의 전단설계와 유사한 개념으로 이루어진다. 다만 FRP를 이용하여 보강시 철근과 달리 외부에 부착하여야 하므로 부착형태, 부착면의 결정, 섬유 방향, 부착각도 등이 고려되어야 하며, 이에 대한 모델의 정확한 해석이 필요하다.

표 2 사용기호

	Symbol		
	Bonding configurations	Side bonding (S)	U jacketing (U)
Fiber distributions	Strip(S)		Plate(P)
Fiber orientations	First fiber orientation ( $\beta$ )	Second fiber orientation ( $\phi$ )	

현재 FRP를 이용한 전단보강방법은 그림 4와 같이 6가지의 방법이 사용되고 있으며, 보강수준에 따라 그 방법이 결정된다[J. G. Teng et al.(2002)]. 현재까지의 연구결과에 의하면 Plate 및 Sheet를 이용한 Wrapping 형태의 보강이 가장 효과적인 것으로 나타났으나, 보강방법은 대상 구조물의 접근성, 시공성, 경제적 측면 등을 고려하여 결정할 수 있다.

전단보강을 위한 설계 및 해석 모델은 기존은 전단설계식을 응용한 다음과 같은 식이 주로 사용되며,  $V_c$ 와  $V_s$ 는 기존의 설계기준에 따라 계산이 가능한 콘크리트

트와 철근의 전단력이다.

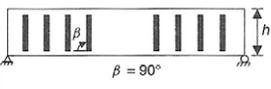
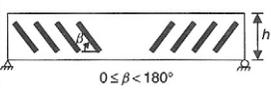
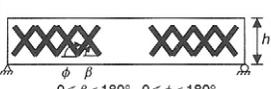
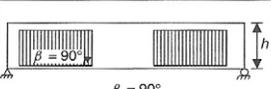
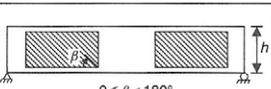
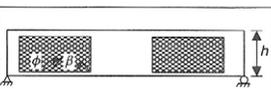
Fibre orientations and distributions	Bonding scheme and notation		
			
$\beta = 90^\circ$	SS90	US90	WS90
			
$0 \leq \beta < 180^\circ$	SS $\beta$	US $\beta$	WS $\beta$
			
$0 \leq \beta < 180^\circ, 0 \leq \phi < 180^\circ$	SS $\beta/\phi$	US $\beta/\phi$	WS $\beta/\phi$
			
$\beta = 90^\circ$	SP90	UP90	WP90
			
$0 \leq \beta < 180^\circ$	SP $\beta$	UP $\beta$	WP $\beta$
			
$0 \leq \beta < 180^\circ, 0 \leq \phi < 180^\circ$	SP $\beta/\phi$	UP $\beta/\phi$	WP $\beta/\phi$

그림 4 FRP를 이용한 보의 전단보강방법

$$V_n = V_c + V_s + V_{frp}$$

$V_{frp}$ 는 부착 FRP의 전단기여분으로 이를 산정하기 위해 ① Triantafillou(1998), ② Chen and Teng(2001) 등이 다음과 같은 다양한 형태의 설계식을 제안하였으며, Chen and Teng의 식이 비교적 정확하여 설계에 적합한 식으로 인정받고 있다.

$$① V_{frp} = \frac{0.9}{\gamma_{frp}} \rho_{frp} E_{frp} \epsilon_{frp} e b_w d (1 + \cot \beta) \sin$$

$$② V_{frp} = 2 f_{frp} e t_{frp} w_{frp} \frac{h_{frp} e (\sin \beta + \cos \beta)}{s_{frp}}$$

상기와 같은 전단설계 및 보강이 이루어진 보는 극한 하중 도달시 사인장 전단균열과 함께 발생하는 FRP 파단에 의한 전단파괴와 콘크리트가 먼저 파괴되는 'FRP 파단이 없는 전단파괴' 그리고 FRP 부착의 미흡

으로 발생하는 'FRP 박리에 의한 전단파괴' 등 세 가지의 파괴양상으로 구분되고 있다.

### 3.3 슬래브의 휨보강

FRP를 이용한 슬래브의 휨보강 공법은 주로 슬래브의 인장부에 FRP Strip 또는 Sheet를 부착하는 방법으로 진행된다. 과거 슬래브 전면을 FRP Sheet로 감싸는 방법이 제안되었으나, 이는 부착의 품질성 확인이 어렵고 슬래브내 수분 이동이 차단되어 부착성능의 저하를 유발할 수 있어 최근에는 적용되지 않고 있다.

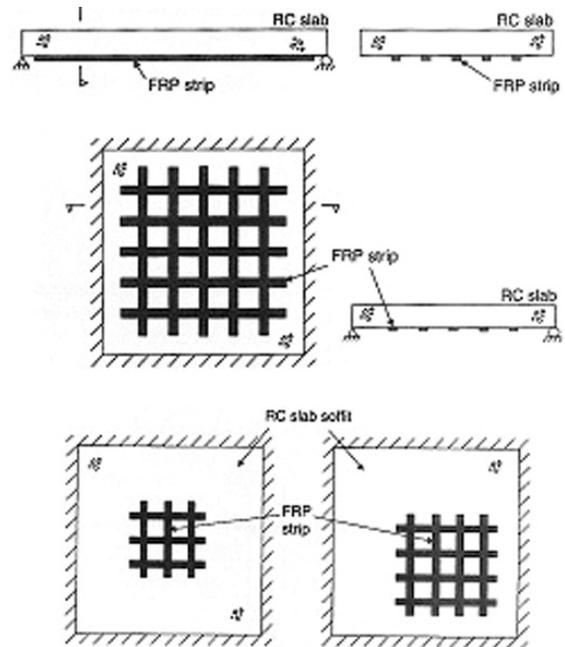


그림 5 섬유방향과 보강위치에 따른 보강방법

FRP Stripe로 보강하는 방법은 그림 5와 같이 섬유 방향에 따라 일방향과 이방향으로 구별되며, 슬래브의 보강위치에 따라 중앙부 보강과 최대모멘트부 보강으로 분류된다. 또한 캔틸레버 슬래브의 경우 그림 6과 같이 벽체 지지형과 Wall-top형, 연속캔틸레버형으로 보강이 가능하며, 캔틸레버 슬래브의 경우 고정단에 적절한 앵커를 배치하여 FRP가 슬래브 모멘트를 적절히 부담하여야 한다.

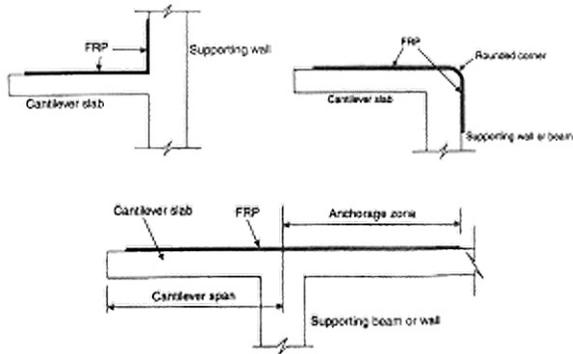


그림 6 벽체지지형, wall-top형, 연속캔틸레버형 FRP 보강방법

일방향 보강 슬래브의 휨보강 설계는 상기 언급한 보의 휨보강방법에 의해 수행될 수 있으며, 이방향 보강 슬래브는 모멘트 계수법에 의해 슬래브 양방향의 최대 휨모멘트 계산후 소요보강량을 산출하여 보의 휨보강에서 제안된 식을 통해 설계가 가능하다.

보강된 슬래브의 파괴모드를 살펴보면 캔틸레버 슬래브와 일방향 보강 슬래브의 경우 고정단에서 형성된 주 휨균열로 인한 박리파괴와 FRP Strip의 인장파괴 혹은 콘크리트의 파괴로 인한 휨파괴 등 두가지 형태의 파괴가 확인되었다. 이방향 보강 슬래브의 경우 펀칭전단을 고려하지 않을 경우 파괴는 항복선의 형성으로 인해 발생하였으며, 일방향 보강 슬래브 및 캔틸레버슬래브에서 발생되었던 박리파괴는 발생하지 않았다.

이방향 보강 슬래브의 경우 현재 연구자료가 부족하여 명확한 해석 및 보강설계법이 정립되지 않은 상태이다.

### 3.4 기둥의 보강

과거 손상이 발생한 철근콘크리트 기둥의 일반적인 보강은 기둥의 표면에 철재자켓 또는 콘크리트케이지를 추가하는 방법이 적용되었다. 그러나 이러한 방법은 기둥의 자중증가, 철재자켓의 유지보수에 관한 문제로 그 사용이 점차 감소되고 있으며, 현재는 보강성능이 우수하면서 경량화가 가능한 FRP의 사용이 증가되고 있는

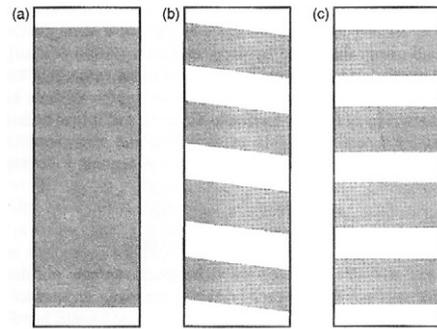


그림 7 기둥의 FRP 보강(Wrapping)

실정이다.

이러한 FRP를 이용한 기둥의 보강은 그림 7과 같이 Wrapping, Filament Winding, Jacketing 등 세가지의 형태로 이루어지고 있다.

표 3 사용계수

Column shape	Confinement effectiveness coefficient $k_1$	Gap factor $k_g$	Shape factor $k_s$	Lateral confining pressure $f_l$
Circular	2	$\frac{(1 - s_{FRP}/(2d))^2}{1 - \rho_{sc}}$	1	$\frac{2f_{FRP}t_{FRP}}{d}$
Rectangular	2	-	$\frac{b A_c}{h A_c}$	$\frac{2f_{FRP}t_{FRP}}{\sqrt{h^2 + b^2}}$
Elliptical	2	-	$\left(\frac{b}{a}\right)^2$	$f_l = \frac{t_{FRP}[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]f_{FRP}}{2ab}$

Wrapping은 1980년대 일본에서 처음 적용된 공법으로 한겹 또는 여러겹의 FRP Sheet로 기둥을 감싸거나 분절된 고리형태로 보강하는 방법이며, 콘크리트압축강도를 향상시킬 수 있는 방법으로 알려져 있다. Filament Winding공법은 Wrapping공법과 유사하나 Winding machine을 이용하여 Sheet 대신 연속섬유를 기둥에 감는 방식이며, Jacketing공법은 미리 제작된 FRP Plate(반원 또는 연속된 롤 형태)를 기둥에 감는 방법으로 콘크리트 타설전 거푸집으로의 활용도 가능하다.

축하중을 받는 FRP로 구속된 콘크리트 기둥의 설계는 표 3을 적용한 다음 식의 적용이 가능하다[BS 8110 1997].

$$N_u = \left( \frac{0.67}{\gamma_c} f_{cu} + k_1 k_g k_s \frac{f_l}{\gamma_{frp}} \right) A_c + \frac{f_y}{\gamma_s} A_{sc}$$

그러나 편심하중하의 FRP로 구속된 철근콘크리트 기둥의 강도 및 모멘트는 다음 식에 의해 산출할 수 있다.

$$N_u = \int_{\lambda=d/2-x}^{d/2} \sigma_c b_c d\lambda + \sum_{i=1}^n (\sigma_{si} - \sigma_c) A_{si}$$

$$M = \int_{\lambda=d/2-x}^{d/2} \sigma_c b_c d\lambda + \sum_{i=1}^n (\sigma_{si} - \sigma_c) A_{si} \left( \frac{d}{2} - d_{si} \right)$$

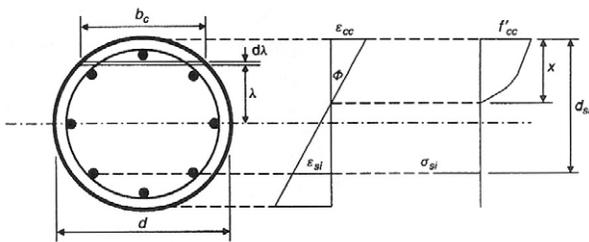


그림 8 편심하중하 FRP로 구속된 RC기둥의 응력 및 변형률

지금까지의 실험 결과에 의하면 FRP로 구속된 철근콘크리트 원형기둥의 응력-변형률 곡선은 그림 8과 같이 비구속 콘크리트 강도의 응력수준 부근의 전이구간에서 연화가 발생하는 전형적인 2중선형 형태를 나타낸다. 따라서 적절히 보강된 기둥은 콘크리트의 극한응력 도달시 FRP의 극한 변형률도 동시에 도달하여 파괴가 발생함을 짐작할 수 있다.

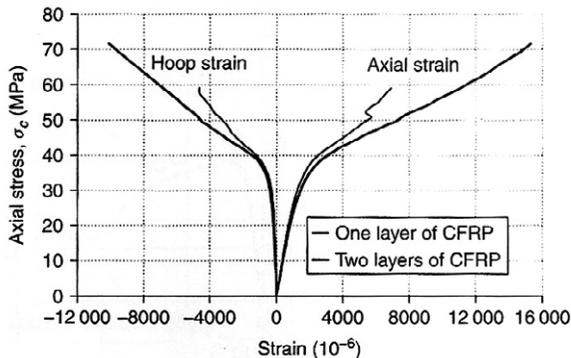


그림 9 FRP로 구속된 원형기둥의 응력-변형률 곡선

## 4. 결론

FRP는 현존하는 다양한 보수보강재료중 인장력, 내구성 및 경제성 등이 기타 건설재료보다 우수한 복합신소재로 현재 다양한 형태로 제작되어 사용되고 있다.

최근에는 부착의 효과를 높이기 위하여, 가넷코팅하거나, 블레이드드의 형태 또는 이형철근의 형태로 제작된 FRP를 철근대체재로 사용하거나, I형으로 제작하여 그 자체를 거더의 용도로 활용하는 등 전 세계적으로 그 활용도를 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, ACI 440 등 관련 규정도 제정되어 현장적용 사례가 늘고 있다.

과거 국내에도 FRP를 이용한 비교적 간단한 보수보강은 이루어졌으나, 이보다 더욱 발전된 수준의 철근대체재로서의 FRP rebar, FRP 거더 등 구조부재로서의 활용은 미흡한 실정이다. 이는 국내 연구활동의 부진이 아닌 현장실무자들의 복합신소재에 대한 인식부족과 관련 기준의 미비에 의한 것으로 판단되며, 이에 대한 대책마련이 시급하다.

## 참고문헌

1. Chen and Teng(2001). 'Shear capacity of FRP strengthened RC beams: FRP debonding' to be published.
2. Chen and Teng(2001) 'Anchorage strength models for FRP and steel plates attached to concrete,' Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No.7.
3. Teng et al (2001). 'Behavior of GFRP-strengthened RC cantilever slabs' Construction and building materials, Vol. 15, No. 7, pp. 339-349.
4. Smith and Teng(2001). 'Interfacial stresses in plated RC beams' . Engineering Structures, Vol. 23, pp. 857-871.

5. Xiao, Y. and Wu, H. (2000). 'Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composites jackets,' Journal of materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 139-146.
6. Zhang and Mai(2000) 'A study on polymer composites strengthening systems for concrete columns,' Applied Composites Materials, Vol.7, pp.125-138
7. arbhari and Seible(2000) 'Fiber reinforce composites-advanced materials for the renewal of civil infrastructure' Applied Composite Materials, Vol,7, pp.95-124 .
8. Triantafillou and Plevris(1992). 'Strengthening of RC beams with epoxy-bonded fiber-composite materials,' Materials and Structures, Vol. 25, pp. 201-211.
9. ong and Evans(1987). 'Reinforced and Prestressed Concrete-Third Edition,' Chapman & Hall, London, UK,