FRP 보강콘크리트 보의 휨거동에 관한 실험적 연구

Experimental Verification of Reinforced Concrete Beam with FRP Rebar

오 홍 섭* 안 광 열**

Oh, Hong Seob Ahn, Kwan-Yeol

Abstract

The use of fiber reinforced polymer (FRP) composites is significantly growing in construction and infrastructure applications where durability under harsh environmental conditions is of great concern. In order to examine the applicability of FRP rebar as a reinforcement in flexural member, flexural tests were conducted. 12 beams with different FRP materials such as CFRP, GFRP and Hybrid FRP and reinforcement ratio were tested and analyzed in terms of failure mode, moment-deflection, flexural capacity, ductility index and sectional strain distribution. The test results were also compared with the theoretical model represented in ACI 440.1R06. Test results indicate that the flexural capacity of the beams reinforced by FRP bars can be accurately predicted using the ultimate design theory. They also show that the current ACI model for computing the deflection overestimates the actual deflection of GFRP series and underestimates the deflection of CFRP series.

요 지

혹독한 자연환경하에서의 구조물의 내구성이 주요한 관심사도 대두되면서 건설분야에서 섬유강화폴리머의 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다. 본 연구에서는 FRP bar를 휨부재의 휨보강근으로서의 적용가능성을 평가하기 위하여 휨실험을 수행하였다. 탄소섬유, 유리섬유 및 탄소와 유리섬유를 혼합한 hybrid 섬유 보강근을 사용하여 보강량을 변화시킨 12개의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였으며, 그결과는 파괴형태, 모멘트-변위, 휨강도, 연성지수 및 단면에서의 변형율분포 등에 대하여 분석하였다. 실험결과는 ACI 기준에 제시된 모델과 비교하였으며, 전체적으로 보의 휨강도는 강도설계이론에 의한 결과와 거의 유사한 것으로 나타났다. 그러나 처짐의 경우에는 유리섬유의 경우는 이론이 과대평가 되었으며, 탄소섬유는 과소평가되는 것으로 나타났다.

Keywords : Ductility index, Failure modes, Fiber reinforced polymer, Flexural capacity, Moment-deflection

핵심 용어 : 연성지수, 파괴형태, FRP, 휨성능, 모멘트-변위

* 정회원, 국립진주산업대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 남해전문대학 교수

E-mail : opera69@chol.com 055-751-3299

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근 철근에 비해 높은 강도와 내부식성, 내알칼리성 등을 보유하고 있는 고내구성 재료인 섬유강화 복합신소재(FRP)는 지난 90년대부터의 구조물의 보강분야에 대한 연구와 활용을 통하여 콘크리트 구조물의 고내구성과 장수명화를 확보할 수 있는 재료로서 인식되고 있다. 최근에는 기존의 연구성과들을 바탕으로 FRP 보강재를 신설되는 콘크리트 구조물의 휨보강근으로 대체하는 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 국외의 경우에는 설계기준이 제시되어 신설구조물의 설계 및 시공에 적용되고 있는 상태이다.[(1)-(6)] 그러나 아직까지 국내에서는 FRP 보강재의 종류, 보강량 등에 따른 기초적인 물성에 대한 평가뿐만 아니라, 실제 콘크리트 구조물에 FRP 보강재를 활용하기 위해 필요한 충분한 구조적인 실험 및 이론데이터가 부족한 상태이다. 따라서 본 논문에서는 직경별 유리섬유, 탄소섬유 보강근 및 유리섬유와 탄소섬유를 혼입한 hybrid bar를 보강근으로 활용하여 휨거동을 실험적으로 분석하여 FRP 복합구조체의 기본적인 구조성능을 분석하고자 한다.

2. FRP 보강콘크리트보의 휨거동

FRP보강콘크리트보의 휨파괴거동은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 철근콘크리트보의 휨파괴 형태와 유사하게 1) 콘크리트 압괴에 의한 파괴, 2) FRP의 파단과 콘크리트의 압괴가 동시에 발생하는 균형파괴, 그리고 3) FRP의 파단에 의한 파괴로 분류할 수 있다.[(1)(2)] 철근콘크리트보의 경우, 철근의 항복이후의 소성거동이 구조물의 연성적인 파괴를 유도함으로서 구조물의 파괴징후를 사용자에게 전달할 수 있다는 점 때문에 저보강콘크리트 보로 설계하도록 하고 있다. 그러나 파단시까지 탄성적인 거동을 하는 FRP를 휨보강재로 사용하는 경우는 휨설계에 대한 이와 같은 고려가 재정립되어야 한다. 만약 FRP보강재가 인장응력에 의해 파단된다면, 구조물은 급격한 붕괴에 도달하게 될 것이며, 이때 구조물의 파괴에 대한 사전경고를 선행하지 않을 것이다. 따라서 FRP 보강콘크리트보의 경우는 기존의 연구들에 나타낸 것과 같이 일정정도의 소성거동을 보이는 콘크리트의 압괴에 의한 파괴가 발생하도록 구조물을 설계하는 것이 일반적이다.[(1),(6),(7)] 그러나 최근의 제품개발 노력 등에 의하여 유리+탄소 또는 아라미드+탄소와 같이 두가지 이상의 섬유를 혼입하여 재료의 연성능력을 확보한 Hybird rod 등의 경우에는 단일 FRP 보강 콘크리트 보와 철근콘크리트 보의 휨거동의 특징을 모두 갖고 있기 때문에 이와는 다른 개념으로 구조물을 설계하여야 한다.

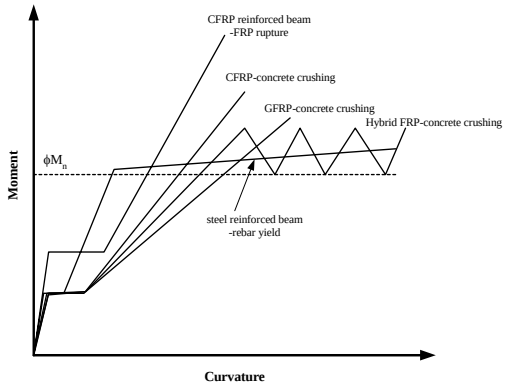


Fig. 1 철근 및 FRP 보강 콘크리트보의 이론적 모멘트-곡률관계

ACI 440위원회[(1)]에서 제시하고 있는 극한상태 보단면의 응력, 변형률분포는 Fig. 2과 같으며, 이때의 균형보강비는 Eq. 1과 같이 유도된다.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (1)$$

FRP보강 콘크리트보의 휨강도는 평형방정식으로부터 파괴형태에 따라 다음과 같이 해석될 수 있다.

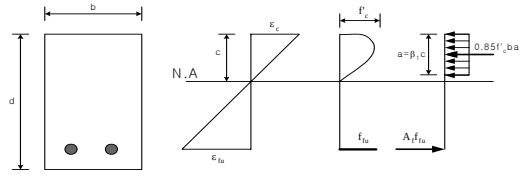


Fig. 2 극한상태에서의 FRP 보강콘크리트 보단면의 변형률, 응력분포

과보강($\rho_f > \rho_{fb}$)의 경우;

$$M_n = A_f f_f (d - \frac{a}{2}) \quad (2a)$$

여기서, $a = \frac{A_f f_s}{0.85 f'_c b}$,

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \right) \leqq f_{fu}$$

저보강($\rho_f < \rho_{fb}$)인 경우;

$$M_n = A_f f_{fu} (d - \frac{\beta_1 c}{2}) \quad (2b)$$

이때 저보강보는 극한상태에서의 콘크리트 압축변형률과 중립축의 깊이가 미지수의 형태로 주어지며, ACI 440[1]에서는 근사해석치로서 아래의 식을 제시하고 있다.

$$M_n = 0.8 A_f f_{fu} (d - \frac{\beta_1 c_b}{2}) \quad (2c)$$

여기서 $c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d$

4점 재하하중을 받는 단순지지보의 처짐은 식 3과 같이 계산될 수 있으며, 이때의 FRP로 휨보강된 보의 환산단면이차모멘트의 경우는 ACI 440에서 제안된 Eq. 4로 계산할 수 있다.

$$\Delta = \frac{Px}{48 E_c I_e} (3L^2 - 4x^2) \quad (3)$$

여기서, x는 지점으로부터 가력점까지의 거리, P는 재하하중, L은 지간, E_c는 콘크리트의 탄성계수

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \alpha \left(1 + \frac{E_f}{E_s} \right) I_g + \left[1.0 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leqq I_g \quad (4)$$

여기서, E_f는 FRP 보강근의 탄성계수, E_s는 철근의 탄성계수, α는 부착에 대한 상관계수이며, 현재까지 모든 FRP에 대하여 0.5를 적용, M_{cr}은 균열모멘트, M_a은 작용 모멘트, I_{cr}은 균열환산단면이차모멘트, I_g는 단면이차모멘트

FRP를 사용한 콘크리트 보의 단순화된 모멘트-곡률 관계는 CEB-FiP에서 제안하고 있는 가정을 변형하여 예측할 수 있다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이 콘크리트 보의 균열 모멘트는 콘크리트의 휨파괴계수에 지배되므로 전통적인 철근콘크리트 휨이론을 적용하여 균열 하중과 균열시의 처짐을 구할 수 있다.

3. 구조실험

3.1 실험체 제작 및 실험방법

본 연구에서는 CFRP, GFRP 그리고 CFRP+GFRP 섬유로 제작된 FRP bar를 휨보강재로 사용하여 FRP보강콘크리트보의 휨거동 성능을 평가하였다. 시험변수는 섬유 종류와 보강재량으로 제한하여 총 12개의 시험체를 제작하였다. 보 제작에 사용된 콘크리트는 28일 압축강도 30MPa의 레미콘 제품을 사용하였으며, 항복강도 400MPa의 D10 철근을 스터럽으로 사용하였다. 적용된 FRP 보강근은 D사의 제품을 사용하였으며, 제조사에서 제시한 극한강도 및 극한변형률은 Table 1에 정리하였다.

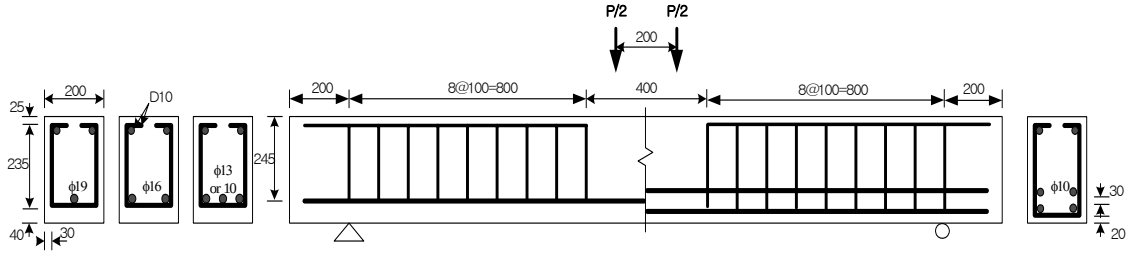


Fig. 3 시험체의 단면 및 배근상세

Table 1. FRP 보강근의 재료성능

	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Yield strain (%)	Ultimate strain (%)
GFRP 보강근	-	1107	-	3.12
CFRP 보강근	-	1857	-	1.79
GF+CF 보강근	670	670	1.344	3.507

Table 2 Test variables

Specimen	Fiber	Detail of reinforcement	Effective depth (mm)	Reinforcement ratio	Balanced reinforcement ratio
C2-10	Carbon	φ10㎜*3	245	0.0031	0.00179
C3-10		φ10㎜*3	245	0.0046	
C4-10		φ10㎜*3	245	0.0062	
G2-10	Glass	φ10㎜*2	245	0.0031	0.001689
G3-10		φ10㎜*2	245	0.0046	
G4-10		φ10㎜*2	245	0.0062	
G3-13		φ13㎜*3	243.5	0.0078	
G2-16		φ16㎜*2	242	0.0079	
G1-19		φ19㎜*1	240.5	0.0056	
H2-10	Carbon +Glass	φ10㎜*4	245	0.0031	0.006936
H3-10		φ10㎜*4	245	0.0046	
H4-10		φ10㎜*4	245	0.0062	

Table 2와 Fig. 2에는 시험변수와 시험체의 단면도를 제시하였다. C4-10, G4-10 그리고 H4-10 실험체의 경우는 콘크리트 타설 등을 위하여 이열로 배근하였으며, 다른 모든 시험체는 일렬로 배근하였다.

휨시험체는 200×300mm 단면의 직사각형 단면에 길이 2400mm로 제작하였으며, 순지간은 2000mm이다. 콘크리트 덮개는 일렬배근의 경우 4cm로 고정하였으며, 이열배근의 경우에는 일렬배근 시험체와 유사할 수 있도록 2cm로 제작하였다. 하중가력은 UTM을 사용하여 분당 1mm의 변위제어로서 4점 휨 재하를 실시하였으며, 휨 실험시 사용된 전단스팬비(a/d)는 3.4 이다.

보강재의 변형율을 측정하기 위하여 보강재 중앙에 철근게이지를 설치하였으며, 단면 깊이에 대한 콘크리트 변형률 분석을 위하여 보의 상면에서부터 4cm 간격으로 총 4개의 콘크리트 게이지를 부착하였다. 변위계(LVDT)를 보 중앙부와 지점으로부터 1/6과 1/3 지점에 설치하여 실험체의 변위형상을 측정하였다. Table 2에서 완전탄성재료인 탄소섬유 및 유리섬유 보강근으로 제작된 시험체(C 계열과 G 계열)의 경우에는 콘크리트 압괴파괴를 유도할 수 있도록 균형보강비보다 큰 과보강보로 설계하였으며, 탄소섬유와 유리섬유를 혼합한 보다 연성적인 보강근을 사용한 H계열 시험체는 보강근의 연성파괴를 유도할 수 있도록 저보강으로 설계하였다.

Table 3 Test results

Specimen	Ultimate Moment Mn(kNmm)			Deflection at peak point(mm)			Ductility Index	Failure Pattern
	Experiment	Theory	E/T	Experiment	Theory	E/T		
C2-10	46,822.5	47,495.2	0.986	23.1	19.768	1.1686	1.645	F-C1
C3-10	67,824.0	55,695.2	1.218	27.2	20.044	1.357	1.2132	F-C
C4-10	94,153.5	62,032.6	1.518	33.5	21.739	1.541	1.194	F-C
G2-10	19,575.0	28,881.0	0.678	16.5	24.126	0.6839	2.2727	F-P2
G3-10	28,575.0	34,495.8	0.828	18.2	24.138	0.754	1.4011	F-C
G4-10	46,381.5	39,005.5	1.189	23.3	30.075	0.7747	1.7167	F-C
G3-13	51,075.0	42,645.4	1.198	32	27.05	1.183	1.2	F-C
G2-16	55,800.0	42,400.2	1.316	27.5	29.674	0.9267	1.2873	F-C
G1-19	34,204.5	36,271.4	0.943	19	25.323	0.7503	1.5263	F-B3
H2-10	21,504.5	19,948.4	1.579	21.4	23.131	0.9252	1.7757	F-B
H3-10	31,346.5	29,922.7	0.914	44.4	13.881	3.1987	1.0586	F-B
H4-10	40,713.0	39,896.9	0.870	35.2	13.624	2.5837	1.2784	F-B

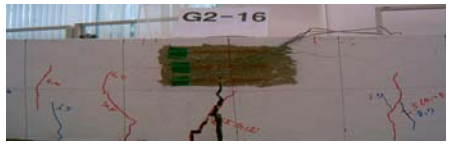
1; concrete crushing failure mode, 2; FRP pull-out, and 3; concrete crushing and FRP rupture occur simultaneously

(a) C2-10

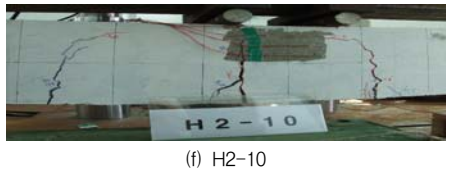
(b) C4-10

(c) G2-10

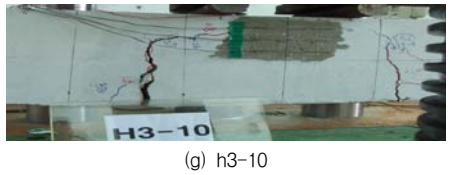
(d) G4-10



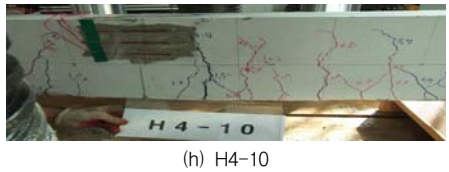
(e) G2-16



(f) H2-10



(g) h3-10



(h) H4-10

Fig. 4 시험체 파괴형상

4. 실험 결과 분석

4.1 균열 및 파괴양상

시험체는 보강근의 종류에 관계없이 Fig. 4와 같이 휨지배에 의하여 파괴되었으며, 동일한 보강비을 갖는 경우 인장강도가 높은 탄소섬유 보강근으로 보강된 시험체의 경우의 파괴 강도가 가장 높은 것으로 나타났다. 보강비가 증가할수록 강도가 선형적으로 증가하는 형태를 보였으며, 강성 또한 증가하는 것으로 나타났다. 보강비와 섬유 종류에 따른 파괴형태의 변화는 Fig. 5에 나타내었다. 과보강보인 CFRP 보강보의 경우는 모두 압괴파괴 되었으나, 유사한 조건인 GFRP 보강보의 경우는 과보강보임에도 G2-10 시험체의 경우는 FRP 보강근 외부 섬유와 콘크리트가 같이 FRP pull-out되는 형태로 파괴되었으며, G1-19 균형파괴 형태로 파괴되었다. 이에 비하여 저보강보인 Hybrid FRP로 보강된 보의 경우는 모두 균형파괴로 파괴되어 보강재의 종류가 보강비에 따른 파괴형태에 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

Table 3에는 각 시험체별 최대하중과 최대하중시의 변위에 대하여 정리하였다. ACI440.1R05에 의한 최대 하중시 이론적인 변위는 Eq. 3과 4를 적용하여 산정하였다. 전체적으로 유리섬유의 경우는 이론식이 과대평가되고, 탄소섬유와 Hybrid섬유는 과소평가되었으며, 이는 탄성계수와 유효단면이차모멘트의 상관관계의 영향인 것으로 판단된다.

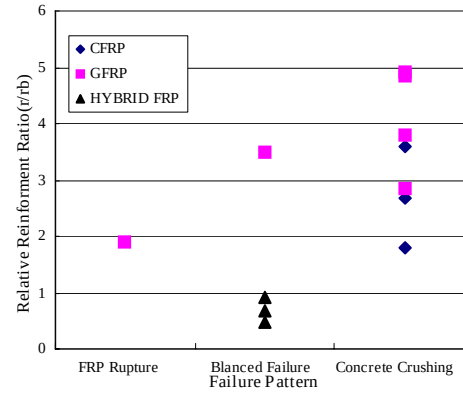
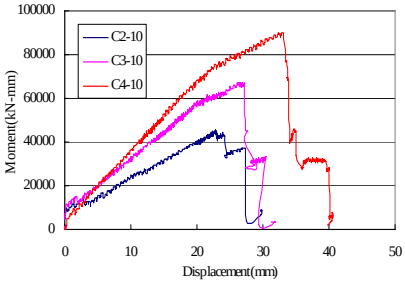
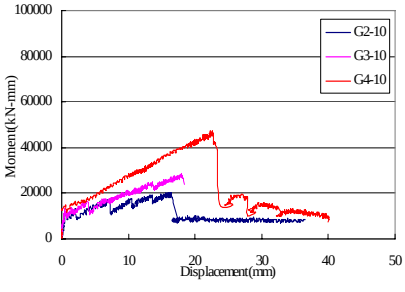


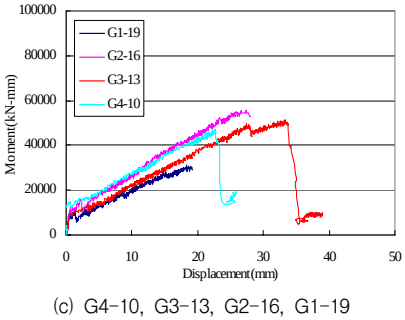
Fig. 5 보강비에 따른 파괴형태



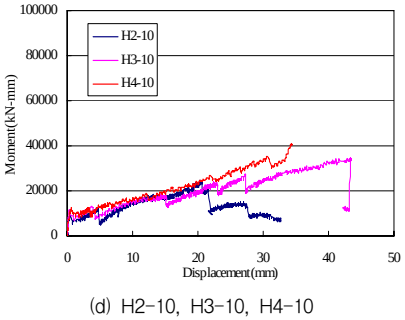
(a) C2-10, C3-10, C4-10



(b) G2-10, G3-10, G4-10



(c) G4-10, G3-13, G2-16, G1-19

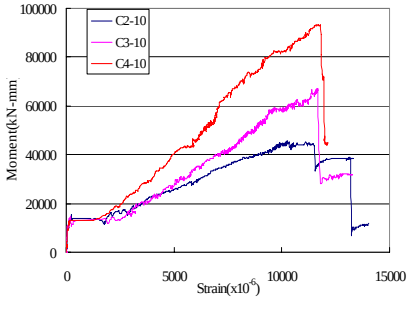


(d) H2-10, H3-10, H4-10

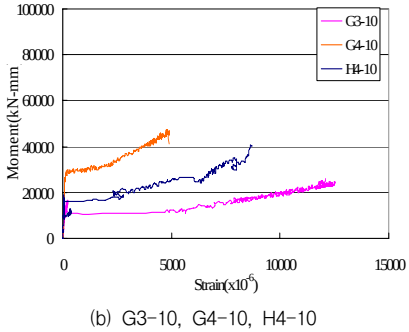
Fig. 6 모멘트-변위 곡선

4.2 모멘트-변위관계

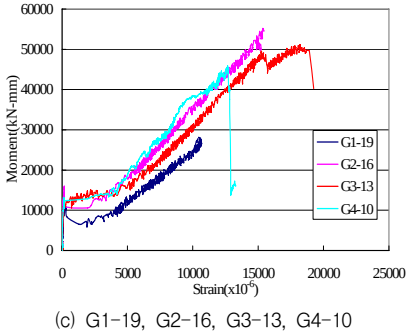
Fig. 6은 각 시험체별 모멘트-변위 곡선을 나타내었다. 그림에 나타낸 것과 같이 거의 모든 시험체의 균열모멘트는 보강량과 보강재의 종류에 관계없이 10000kN-mm인 것으로 나타났으며, 이는 철근콘크리트보의 경우와 같이 균열휨강도의 경우는 콘크리트 휨강도에 지배를 받는다는 사실을 나타내는 것이다. 균열하중이후 콘크리트와 보강재 사이의 응력재분배로



(a) C2-10, C3-10, C4-10



(b) G3-10, G4-10, H4-10

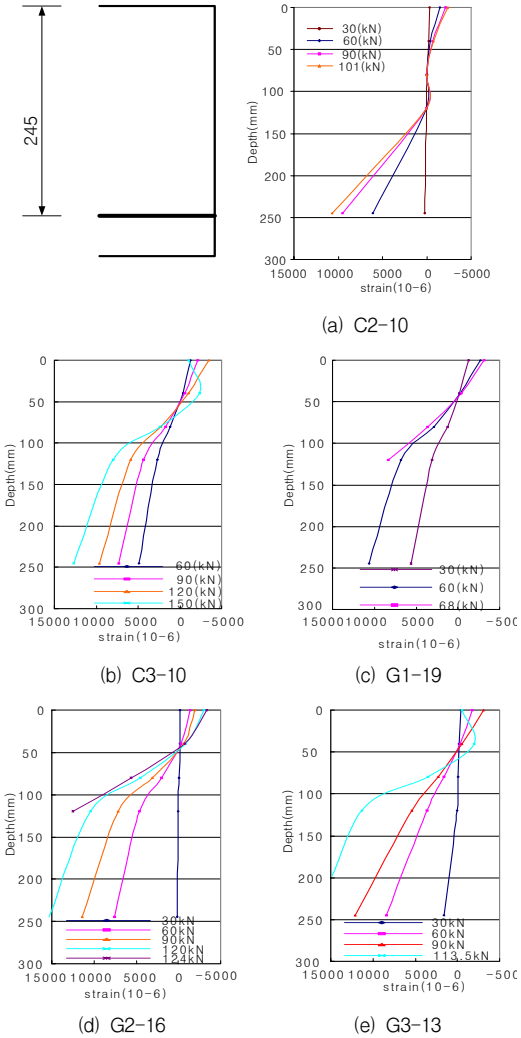


(c) G1-19, G2-16, G3-13, G4-10

Fig. 7 모멘트-변형율 곡선

인하여 하중 증가 없이 변형이 증가하는 현상이 나타났으며, 이는 Fig. 7의 모멘트-변형율 관계에서도 확인할 수 있다. 응력재분배 현상은 철근콘크리트보의 경우보다 뚜렷하게 나타나는 것으로 콘크리트와 FRP 보강재사이의 부착특성이 철근의 경우보다 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다.

균열하중 이후의 거동에서는 탄소섬유와 유리섬유 보강근으로 과보강된 부재 모두 선형적인 거동 후 최대 강도 이후에서 콘크리트 압괴 파괴가 발생하였다. 유리-탄소섬유 복합 보강근이 적용된 부재의 경우에는



(a) C2-10

(b) C3-10

(c) G1-19

(d) G2-16

(e) G3-13

Fig. 8 단면 변형율 분포

균열하중 이후 보강근내 섬유의 부분적인 파단 등으로 인하여 파괴시까지 수차례의 하중 증가-하락의 과정을 거친후 파괴되는 다소 연성적인 파괴형태로 부재가 파괴되었으나, 동일한 보강량의 유리섬유 시험체에 비하여 강도는 약간 작거나 같은 것으로 나타났다. 최대강도 이후, 탄소섬유 보강근의 경우 잔류강도가 거의 없는 반면 다른 보강근의 경우에는 일정정도의 잔류강도를 갖는 것으로 관찰되었다.

보강비가 거의 동일한 G2-16과 G3-13 시험체의 경우, 강도는 거의 동일하게 나타났으나, G3-13 시험체의 강성이 약간 낮게 관찰되었으며, 이는 FRP간의 순간격의 차이에 의한 국부적인 할렬부착파괴에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 모멘트-변형율관계

균열하중 거동에서 모든 시험체가 균열하중이후 내력의 증가 없이 일정정도 변위가 증가한 후 균열면의 응력재분배가 이루어진 후 내력이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 Fig. 7의 하중-변형율 관계에서 명확히 관찰할 수 있다. 이는 기존의 철근콘크리트 보의 균열 이후 응력재분배 현상보다 크게 나타나는 것으로서 FRP보강근의 상대적으로 부족한 부착강도 특성에 기인하는 것이라 판단된다.[8)-10)] 응력재분배 이후 하중과 보강근의 중앙부 변형율의 관계는 파괴시까지 선형을 이루는 것으로 나타났으며, H계열의 시험체만 이중선형 형태를 나타내었다.

보 중앙단면의 변형율 분포를 분석하기 위하여 시험체의 중앙부 압축측 콘크리트부터 3cm 간격으로 총 4개의 콘크리트 게이지를 설치하여 하중단계별 변형률 분포를 측정하였으며, 5개 시험체의 결과를 Fig. 8에 도시하였다.

5. 결 론

1) FRP 휨보강근으로 보강된 시험체의 경우 인장강도가 가장 높은 탄소섬유 보강근의 경우가 휨강도가 가장 높게 나타났으며, 복합섬유의 경우 강도의 증진효과보다는 연성적인 휨거동을 나타내는 것으

로 관찰되었다. 따라서 사용성 측면에서는 복합섬유 보강재의 경우가 보다 효과적인 것으로 판단된다.

2) 본 연구에서 FRP 휨 보강근의 구조성능 분석결과, 추후 휨 설계 계수 등의 연구를 통하여 FRP 보강근을 적용한 콘크리트 구조물의 현장 적용성에 대한 추가적인 분석되어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가연구원 지정 R&D (C105B1030001-05B0303-00110)연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI 440.1R-01. “Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars”. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001. p. 41
2. ISIS Canada: Design Manual 3. Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers. The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, September 2001. p. 207.
3. Pecce M., Manfredi G. and Cosenza E., “Experimental response and code models of GFRP RC beams in bending”, J. Compos. Constr.4 4, 2000, pp. 182-190.
4. Houssam A. Toutanji, Mohamed Saafi “Flexural Behavior of Concrete beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer(GFRP) Bars”, ACI Structural Journal, 2000. 9, pp. 712-719.
5. Benmokrame B., Chaallal O. and Masmoudi R. “FLexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bar”, ACI Structural Journal, 1996. 1, pp. 46-55.
6. Pilakoutas, K. Neocleous and M. Guadagnini, “Design philosophy issues of fiber reinforced polymer reinforced concrete structures”, ASCE J Compos Constr 6, 2002. 3, pp. 154-161
7. Theriault M. and Benmokrane B., “Effects of FRP reinforcement ratio and concrete strength on flexural behavior of concrete beams”, J Compos Construct 2, 1998. 1, pp. 7-16.
8. Newhook J., Ghali A. and Tadros G., “Cracking and deformability of concrete flexural sections with fiber reinforced polymer”, ASCE J Struct Eng128, 2001. 9, pp. 1195-1201.
9. Masmoudi R., Benmokrane B. and Chaallal O., “Cracking behaviour of concrete beams reinforced with fiber reinforced plastic rebars”, Can J Civil Eng23, 1996, pp. 1172-1179.
10. Faza SS, GangaRao HVS., “Pre- and post-cracking deflection behaviour of concrete beams reinforced with fibre-reinforced plastic rebars”, In: Neale KW, Labossiere P, editors. Proceedings of 1st international conference on advanced composite materials in bridges and structures (ACMBS 1), CSCE, Sherbrooke, Que.; 1992. pp. 151-60.

(접수일자 : 2007년 4월 18일)