

부분 비부착 NSM Hybrid FRP 보강근에 의한 철근콘크리트보의 연성보강

이치돈^{1)*} · 정상모²⁾ · 원종필³⁾ · 이승환¹⁾

¹⁾중앙대학교 건축공학과 ²⁾한동대학교 토목공학과 ³⁾건국대학교 지역건설환경공학과

(2002년 12월 11일 원고접수, 2003년 1월 22일 심사완료)

Ductile Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Partially Unbonded NSM Hybrid FRP Rebars

Chadon Lee^{1)*}, Sang-Mo Chung²⁾, Jong-Pil Won³⁾, and Sng-Whan Lee¹⁾

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Chung-Ang University, Ansong, 456-756, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Han-Dong, University, 791-708, Korea

³⁾Dept. of Rural Engineering, Kon-Kuk, University, Seoul, 143-701, Korea

(Received December 11, 2002, Accepted January 22, 2003)

ABSTRACT

New strengthening method based on Near Surface Mounted technique (NSM) is suggested, which can overcome the brittle nature of failure inherent to those reinforced concrete beams strengthened with FRP composite materials. The suggested technique secures ductile failure of reinforced concrete beams by having the strengthening Hybrid FRP rebars unbonded in parts. Experiments were performed in order to compare structural behaviors of strengthened beams with and without unbonding along the Hybrid FRP rebars. Test results showed that only those beams strengthened by partially unbonded NSM failed in ductile manner. Theoretical expressions were derived for the minimum unbonded length of Hybrid FRP rebars with which ultimate strength of the reinforced concrete beam with partially unbonded NSM could be reached. The suggested partially unbonded NSM technique is expected to significantly improve the structural behavior of the strengthened beam with FRP composite materials.

Keywords : ductile strengthening, experiments, structural performance, hybrid FRP rebars, reinforced concrete beams

1. 서 론

최근 철근콘크리트 구조물의 노후화에 따른 보수, 보강 공법에 개발에 대한 필요성에 의하여 기존공법 및 새로운 공법에 대한 실험 및 이론 연구가 활발하게 진행되고 있다. 재료적인 측면에서는 기존의 강판보강 대신에 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유 등을 유지에 함침시킨 GFRP, CFRP, AFRP 등 복합소재(composite materials)를 보강재로 하여 연구가 진행되고 있다^{1~7)}.

외부 보강재로서의 복합소재의 가장 일반적인 형태로는 FRP sheet, FRP plate 및 FRP rebar를 그 예로 들 수 있다. FRP sheet의 경우에는 주로 휨재 또는 기둥에 대한 휨 및 전단 보강재, 그리고 구속재로 사용되고 있으며 대개의 경우, 콘크리트 면에 에폭시 등으로 직접 접착, 보강한다. FRP plate의 경우에는 휨재 하부에 접착하거나 휨재 측면에 보강하여 휨보강재 또는 전단보강재로 적용된다.

한편, 벽체 등의 부족한 휨내력을 보강하는 데에도 적용되고 있다. FRP rebar의 경우에는 NSM 공법 (Near Surface Mounted Strengthening: 이하 NSM 공법)으로 휨재의 하부 또는 상부면에 홈을 낸 후, FRP rebar를 삽입하고 에폭시로 충전하여 부족한 정 모멘트 및 부 모멘트를 보강하는 공법이다. NSM 공법은 전단보강에도 적용된다^{8~10)}.

구조적인 측면에서 기존의 강판보강재와 비교하여 FRP 복합소재의 최대 단점은 취성적인 파괴양상을 갖는데 있다고 할 수 있다.

Fig. 1은 철근 콘크리트 보와 이를 취성적인 FRP 복합소재로 보강한 경우의 하중-처짐 곡선에 대한 개략도이다. Fig. 1에서 나타나듯이 취성적인 FRP 복합소재로 보강된 보의 경우, 구조적으로 바람직하지 않은 취성파괴를 함을 알 수 있다. 취성적인 FRP 복합재를 철근콘크리트 구조물의 보강재로 적용할 경우, FRP 복합재 재료 자체의 취성으로 인한 보강된 구조물의 취성은 필연적인 것이었다고 할 수 있다. 따라서 일반 연성적인 철근콘크리트 부재의 거동과 상이한 거동을 갖는 FRP 보강재로 보강된 취성의 철근콘크리트부재의 구조적 안정성과 그 내력 산정에 대

* Corresponding author

Tel : 031-670-3346 Fax : 031-675-6489

E-mail : cdlee@cau.ac.kr

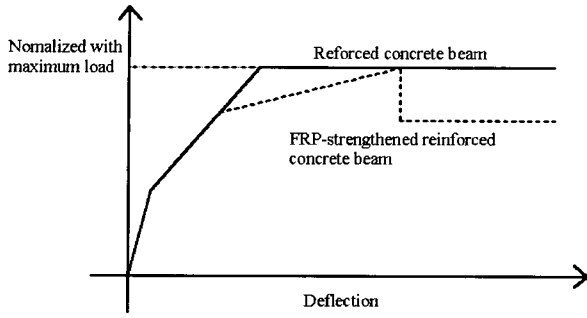
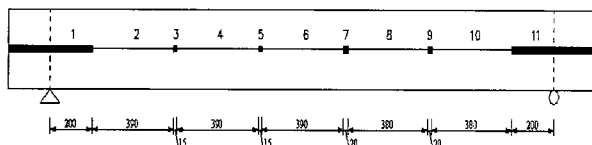


Fig. 1 Schematic load-deflection curves of reinforced concrete beams with and without brittle FRP strengthening composite materials.

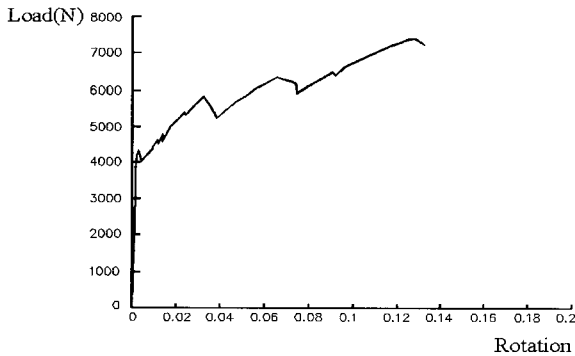
한 연구가 진행되고 있다¹⁻⁶⁾.

상기에서 언급한 바와 같이 FRP 복합재의 최대 단점은 취성적인 물성 및 이로 인한 보강구조물의 취성적인 거동에 있으므로 최근에는 이러한 취성을 극복하기 위한 연구가 진행되기 시작하였다. 이들 연구는 크게 공법적인 측면과 FRP 복합재 자체에 대한 재료적인 측면에서 진행되고 있다. 공법적인 측면에서는 J.M.Lees 와 C.J.Burgoyne¹¹⁾에 의하여 기존의 취성적이 FRP rebar를 부분적으로 구간별로 비부착과 부착을 교대로 실시하여 연성을 확보하고자 한 공법을 예로 들 수 있다(Fig. 2(a)). 이들의 실험결과에 따르면 하중이 증가함에 따라 부착된 구간의 일부에 debonding에 의한 파괴가 선행됨으로 인하여 연성이 확보됨이 관찰되었다(Fig. 2(b)).

한편, 재료적인 측면에서는 서로 상이한 재료적 특성을 갖는 섬유를 복합적으로 사용하여 FRP 재료 자체의 연성



(a) Intermediate unbonding of brittle FRP composite



(b) Load-rotation curve

Fig. 2 Reinforced concrete beam with intermediate unbonding of brittle FRP composite¹¹⁾

을 확보하고자 한 Hybrid FRP rebar에 대한 연구를 예로 들 수 있다¹²⁻¹⁴⁾. Hybrid FRP rebar의 경우, 응력-변형률 곡선이 철근과 같이 항복점을 가지며 잔류응력을 갖는다.

본 연구에서는 이러한 재료자체의 연성을 갖는 Hybrid FRP rebar에 대하여 구성 및 그 파괴 메카니즘에 대하여 간략히 고찰하였다. 또한 Hybrid FRP rebar를 철근콘크리트 휨 부재에 보강재로 적용할 경우, 보의 거동을 실험적으로 고찰하였으며 연성을 확보할 수 있는 공법을 NSM 공법을 중심으로 제시하고자 하였다.

2. Hybrid FRP rebar

Hybrid FRP rebar의 이론적 모델은 서로 다른 변형률을 가진 섬유 중 높은 변형률을 가진 섬유의 최적 혼입률을 결정하여 원하는 연성을 갖는 응력-변형률을 확보함에 그 근거를 두고 있다. 즉, 인장응력 하에서 고탄성계수를 가진 섬유의 파괴 후 변형률이 큰 저탄성계수의 섬유가 파괴되지 않고 소성변형을 발생시키게 된다. 이는 Hybrid FRP rebar의 초기 파괴후의 거동은 저탄성 계수의 섬유가 지배하며 소성변형 구간은 저탄성계수가 갖는 변형률에 의하여 결정되기 때문이다. 1980년 Averston과 Kelly¹²⁾는 일방향으로 배열된 FRP rebar의 이상적인 응력-변형률 곡선은 Fig. 3의 OABC와 같다고 하였다. σ_{LU} , σ_{HU} , σ'_H (여기서 LU : 낮은 변형률, HU:높은 변형률)는 각각 LU섬유의 극한 강도, HU섬유의 극한강도, LU섬유가 파괴되었을 때 HU섬유의 인장강도이다. 또한 이 곡선에서 HU섬유의 응력-변형률 관계는 OD와 같은 직선적인 관계를 보여 준다. Fig. 3에서 각 α 는 $E_L V_L / E_H V_H$ 로 표현할 수 있으며 E와 V는 섬유의 탄성계수 및 섬유 혼입률이다. L과 H는 낮은 변형률 및 높은 변형률을 갖는 섬유를 의미한다. 길이 δl 은 낮은 변형률 및 높은 변형률의 섬유 사이의 계면면적과 분산율이 증가할수록 감소한다.

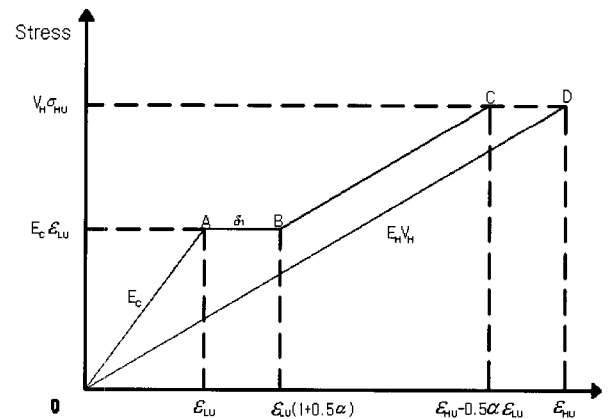


Fig. 3 Idealized stress-strain curve for hybrid FRP rebar

1999년 Tapfer¹³⁾는 변형률이 서로 다른 유리섬유와 탄소 섬유, 아라미드섬유와 탄소섬유를 사용하여 Hybrid FRP rebar를 설계하기 위하여 Fig. 4와 같은 모델을 제시하였다. Tapfer가 사용한 모델은 초기 탄성계수를 결정함에 있어 혼합법칙을 적용하였으며 Hybrid FRP rebar의 파괴는 rebar의 변형률이 고탄성계수를 갖는 섬유의 변형률에 도달하였을 때 파괴가 발생하기 시작하며, 이때 강도를 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$F'_C = \mu_H E_H \epsilon_H + \mu_L E_L \epsilon_L \quad (1)$$

여기서,

지수 L, H : 각각 저탄성 및 고탄성계수의 섬유

μ : 섬유의 체적비

E : 섬유의 탄성계수

ϵ : 섬유의 변형률

Tapfer는 고탄성계수 섬유의 파괴로 인한 충격으로 저탄성계수의 섬유가 약 5%~10% 정도 파괴된다고 하였으며 이로 인해 소성변형 구간의 FRP rebar는 저탄성계수 섬유의 강도에 80% 정도만을 유지한다고 하였다(식 2).

$$\mu_H E_H \epsilon_H + \mu_L E_L \epsilon_H = 0.8 \mu_L E_L \epsilon_L \quad (2)$$

한편, 최근 본 저자들에 의하여 Averston과 Kelly의 이상적인 Hybrid 복합체의 모델과 Tapfer의 응력-변형률 모델을 결합한 Hybrid FRP rebar의 응력-변형률 예측 모델이 개발되었다 (Fig. 5). 이 모델에서 FRP rebar의 초기 항복강도는 고탄성계수를 가진 섬유의 파괴 변형률에서의 값으로 정의하였다. 초기 항복강도에 도달한 후 그 후의 소성변형은 저탄성계수 섬유가 저항하는 구간으로 가정하였다. 본 연구에서는 상기의 이론 모델에 의하여 개발된 Hybrid FRP rebar를 NSM 공법으로 보강된 철근콘크리트보에 적용하여 연성을 확보할 수 있는 공법을 개발하고자 하였다.

3. 실험

3.1 재료

Table 1은 본 저자들에 의하여 개발된 Hybrid FRP rebar의 특성을 나타내고 있다. Hybrid FRP rebar의 인장 응력 실험은 Hybrid FRP rebar의 양단에 고정 grip을 설치한 후에 변위제어 UTM을 사용하여 실시하였다.

Fig. 6은 이 Hybrid FRP rebar의 인장 응력-변형률을 나타낸다. 실험에 사용된 Hybrid FRP rebar는 탄소섬유와 아라미드를 혼합한 복합재로서 항복변형률까지는 직선적인 선형변형을 하다가 이후 응력의 가감이 나타나는 연성

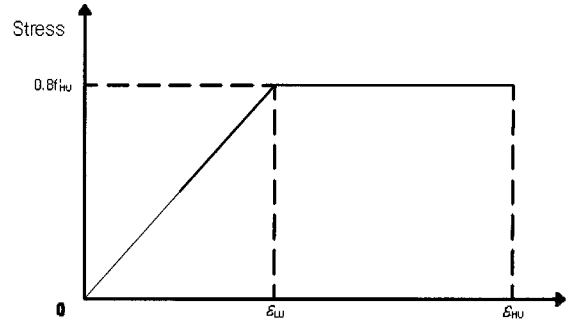


Fig. 4 Stress-strain curve for hybrid FRP rebar for tapfer model

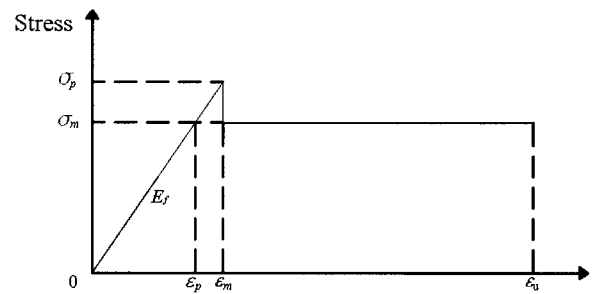


Fig. 5 Prediction model of stress-strain curve of hybrid FRP rebar

Table 1 Tensile properties of Hybrid FRP rebar

Dia. (mm)	Peak		Yield		Ultimate	
	Strain (%)	Stress (kgf/cm ²)	Strain (%)	Stress (kgf/cm ²)	Strain (%)	Stress (kgf/cm ²)
9.0	1.34	8,510	1.34	6,700	3.51	6,700

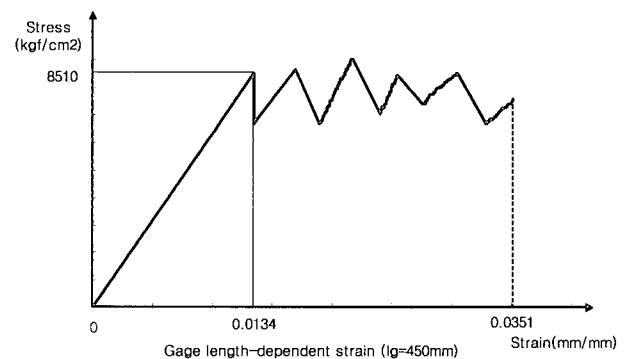


Fig.6 Typical stress-strain relations of Hybrid FRP rebar

을 확보함이 고찰되었다. 그러나 Hybrid FRP rebar의 경우, 심부의 섬유가 파단되는 위치에서 심부를 감싸는 외부 섬유의 변형이 집중됨으로써 위험단면이 형성된다. 따라서 철근의 항복메카니즘과는 상이하며 또한 변형률을 측정하

Table 2 Details of strengthened beams

Name	Specimens			Reinforcing bar					Hybrid FRP bar					Load	Type	Ultimate load (kgf)	Test/theory	
	Width (mm)	Depth (mm)	Length (mm)	Main bar		Stirrups	yield		Area (mm ²)	d _F (mm)	Embedded length							
				Bottom	Top		Strength (kgf/cm ²)	Strain (%)			Unbonded (mm)	Bonded (mm)						
	Area (mm ²)	ds (mm)	Area (mm ²)	d's (mm)														
PUNSM-1	150	250	2500	254	204	142	46.5	D10@100	3,000	0.0015	63.6	238	800	600x2	3point	PUNSM	4650	1.09
PUNSM-2	"	"	"	"	"	"	"	D10@100	"	"	"	"	1200	400x2	3point	PUNSM	4580	1.07
PUNSM-3	"	"	"	"	"	"	"	D10@100	"	"	"	"	800	600x2	4point	PUNSM	7370	1.14
BNSM-1	"	"	"	"	"	"	"	D10@100	"	"	"	"	-	2000	3point	BNSM	4500	1.05
BNSM-2	"	"	"	"	"	"	"	D10@100	"	"	"	"	-	2000	3point	BNSM	4500	1.05

기 위한 게이지 길이에 따라 변형률의 측정치가 다르게 나타날 수 있다. 이러한 항복메카니즘은 철근으로 철근콘크리트보를 보강한 경우와는 다른 구조적 파괴 메카니즘을 가져오게 되며 이에 대하여는 본 논문의 “3.3 보 파괴 실험”에서 설명하였다. 보강된 철근콘크리트 보에 적용된 콘크리트 압축강도 및 주철근 및 전단철근의 항복강도는 각각 $f_{ck} = 270 \text{ kgf/cm}^2$ 및 $f_y = 3,000 \text{ kgf/cm}^2$ 이다. 홈 충전용 에폭시는 액상 에폭시로서 압축강도 및 인장강도는 각각 $1,367 \text{ kgf/cm}^2$, 604 kgf/cm^2 이다.

3.2 보강실험체

기존의 FRP rebar는 NSM 공법에 적용되어 철근콘크리트 휨부재의 휨 및 전단내력을 증진시키는데 적용되었다⁷⁻¹⁰⁾. 본 연구에서는 Hybrid FRP rebar를 철근콘크리트 보 실험체에 NSM 공법으로 보 하부에 보강하여 휨내력을 증진시키고자 하였다. Fig. 7은 본 연구에서 수행한 보 실험체의 기하학적 형상 및 보강 방법을 나타내며 Table 2는 이들 보의 보강상세를 나타내고 있다.

본 연구에서는 두 가지 보강방법을 적용하였다. 즉, 기존의 NSM 공법과 같이 Hybrid FRP rebar를 홈 전체에 삽입한 후에 에폭시로 보강한 “부착 NSM 공법 (Bonded NSM: 이하 BNSM)”과 Hybrid FRP rebar의 양단만을 홈에 부착시킨 “부분 비부착 NSM 공법 (Partially Unbonded NSM: 이하 PUNSM)”으로 하였다. PUNSM 공법은 본 저자들에 의하여 Hybrid FRP rebar의 연성적인 특성이 보강 시에도 발휘될 수 있도록 본 연구에서 제안하고자 하는 공법이다. BNSM 실험체 및 PUNSM 실험체의 구체적인 제작과정은 다음과 같다. 보 실험체에 콘크리트를 타설 후, 28일이 경과한 후에 양날커터기로 보강홈을 낸다.

BNSM 실험체의 경우, Hybrid FRP rebar를 직접 홈에 삽입한 후에 에폭시를 충전하여 양생시킨다. PUNSM 실험체의 경우에는 먼저 Hybrid FRP rebar의 양단의 부착되는 소정의 길이만큼을 제외한 나머지 구간을 두께 0.1 mm 플라스틱 튜브를 이용하여 감싼다. 투명 튜브는 가능한 한 FRP rebar의 직경과 거의 같도록 하여 홈에 효율적으로 삽입되고 동시에 홈에 에폭시가 충전될 경우 튜브내로 에폭시가 스며들지 않도록 하였다. Hybrid FRP rebar의 중앙부를 튜브로 감싼 후에 홈에 전체를 삽입하고 홈 전체 길이에 대하여 에폭시로 충전하였다. PUNSM 실험

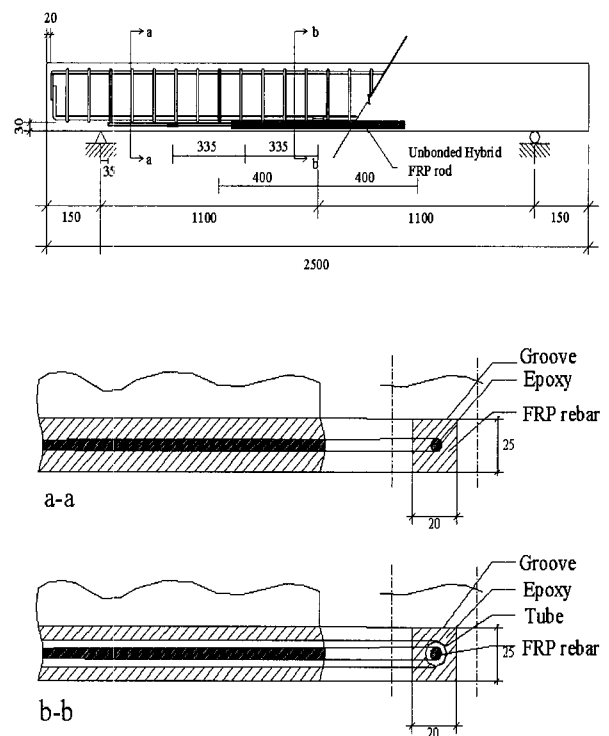


Fig. 7 Strengthening method for PUNSM beams

협체의 양단 최소정착길이(l_d)는 Eshani가 GFRP rebar에 대하여 제안한 $l_d = d_F \sigma_b / 189$ (여기서, l_d , d_F , σ_b 의 단위는 각각 cm, cm, kgf/cm^2)의 값인 319 mm 보다 크도록 하였다¹⁴⁾.

3.3 보 파괴 실험

실험은 단순 지지된 상태로 3점 또는 4점 하중을 가하여 휨 파괴를 실시하였다. 가력은 100 tf 용량의 변위제어 UTM을 사용하여 가력 하였다. Fig. 8은 Hybrid FRP rebar를 기존의 부착공법(BNSM) 및 본 연구에서 제안하고자 한 비부착공법(PUNSM)으로 보강한 보의 휨 거동을 나타내고 있다. 모든 보는 전형적인 휨 파괴 양상을 나타내었으며 흠입 부분에서의 부착파괴는 관찰되지 않았다.

3.3.1 BNSM 공법으로 보강된 보

BNSM 공법으로 보강된 보들(BNSM-1 및 BNSM-2)의 경우, 철근이 항복함에 따라 휨강성이 감소하여 내력이 증가하다가 최대내력에 이른 때에 Hybrid FRP rebar가 파괴음과 함께 취성적인 파괴를 하며 보의 내력이 보강 전과 보강 후의 내력 사이값으로 감소하는 전형적인 취성파괴를 나타내었다. 즉, Hybrid FRP rebar 자체는 연성적인 물성을 확보하고 있으나 이를 기존의 NSM 공법에 적용할 경우, 보강된 보는 취성파괴를 함이 관찰되었다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 BNSM 공법으로 보강된 보의 경우, 최대 균열이 발생한 위치와 Hybrid FRP rebar의 위험단면이 일치함을 볼 수 있다. 즉, 하중증가에 따른 보 하부면

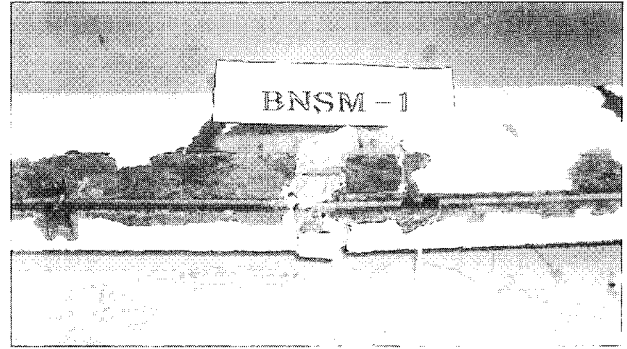


Fig. 9 Failure of Hybrid FRP rebar at the critical section of the beam strengthened with BNSM method

의 위험단면에서의 균열 폭이 증가함에 따라 Hybrid FRP rebar의 변형이 이 균열에 집중되어 발생하였고 이 변형의 크기가 Hybrid FRP rebar의 위험단면에서의 최대변형크기($w_{max} = 10mm$)에 이르게 된 경우, 취성파괴가 발생하였음이 관찰되었다. 실험에 의한 최대내력은 변형률적 합성에 근거한 이론치 이상으로 관찰되었다(Table 2).

3.3.2 PUNSM 공법으로 보강된 보

PUNSM 공법으로 보강된 보들(PUNSM-1, PUNSM-2, PUNSM-3)의 경우, 최대내력에 이르기까지는 BNSM 보강된 보와 유사한 거동을 나타내었으나 이 후, BNSM 공법으로 보강된 보와는 달리 이론에 의한 내력값을 유지하는 연성거동을 나타내었다(Fig. 8). BNSM 공법으로 보강된 보와는 달리 Hybrid FRP rebar의 최대변형이 철근콘크리트보의 최대균열에 집중되지 않았으며 보 하부균열의 폭이 증가함과 무관하게 항복변형이 발생하였음이 관찰되

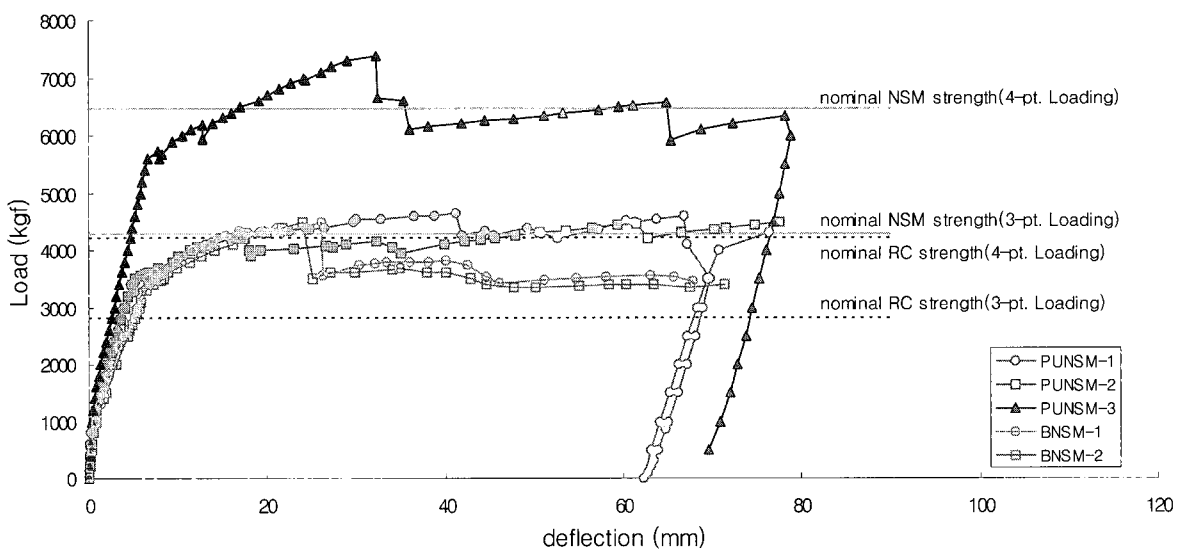


Fig. 8 Load-deflection curves of BNSM and PUNSM beams

었다. 모든 PUNSM 보에서 양단의 부착된 부분에서 정착 파괴는 관찰되지 않았다. 실험에 의한 최대내력은 변형률 적합성에 근거한 이론치 이상으로 관찰되었다(Table 2).

4. 실험 분석

4.1 BNSM 공법으로 보강된 보

Hybrid FRP rebar의 경우, 겉보기 응력-변형률은 철근과 유사하게 항복 경향을 나타내나 항복 메카니즘은 철근과 매우 다르다. 철근의 경우, 한 단면에만 국한되지 않고 전단면에서 항복이 일어날 수 있으나 Hybrid FRP rebar의 경우에는 기본적으로 한 단면에서만 파괴가 선행되면서 항복현상을 나타내게 된다. 즉, Hybrid FRP rebar의 응력-변형률 특성은 변형률을 측정할 게이지 길이에 따라 다른 값을 갖게 되는 gage-dependent 한 값이라 할 수 있다. 따라서 Hybrid FRP rebar를 Fig. 10(a)에 나타난 기존의 NSM 공법에서와 같이 전 길이에 대하여 부착시킬 경우, 균열이 발생한 부분의 한 단면에서 Hybrid FRP rebar의 파괴가 주로 선행되어 Hybrid FRP rebar가 갖는 연성적인 장점을 살리지 못하고 다음과 같은 과정에 의하여 보강된 철근콘크리트 부재는 취성적인 파괴를 갖게 된다.

1) 첫 균열이 부재에 발생하기까지 전체적으로 Hybrid FRP rebar는 변형률 적합성에 의하여 변형이 발생한다(Fig. 10(b)).

2) 최대 휨내력을 받는 부분에 휨균열이 발생하면 하중이 증가함에 따라 Hybrid FRP rebar가 위치한 부위의 균열폭이 증가하게 된다(Fig. 10(c)).

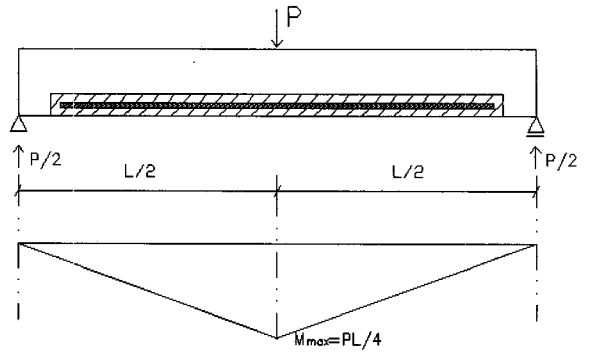
3) 보 하단의 균열폭이 증가함에 따라 균열폭에 비례하는 Hybrid FRP rebar의 변형이 발생한다(Fig. 10(c)). 즉, 보의 위험단면에서 균열폭과 같은 정도의 변형이 발생하는 변형집중 현상을 나타내어 Hybrid FRP rebar의 전체 유효 변형률의 감소를 가져오게 된다.

4) 균열이 발생한 위험단면에서 Hybrid FRP rebar의 집중된 변형(w)이 잔유강도를 더 이상 유지할 수 없는 최대치(w_{max})에 이르면 보강된 휨재는 취성적인 파괴를 일으키게 된다(Fig. 10(d)).

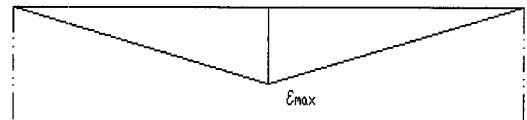
4.2 PUNSM 공법으로 보강된 보

본 연구에서 제시하는 PUNSM 공법의 특성은 다음과 같다: 1) 홈에 삽입되어 보강되는 Hybrid FRP rebar의 일부분을 부착시킴으로서 위험단면 주위에서의 Hybrid FRP rebar의 변형률이 부재 위험단면에서의 균열폭의 증가와 무관하게 하고; 2) 부재 비부착 구간 전체의 곡률에 의하여 Hybrid FRP rebar의 변형률이 결정되도록 함으로써 취성적인 파괴를 방지한다. Fig. 11는 이러한 개념을 개략

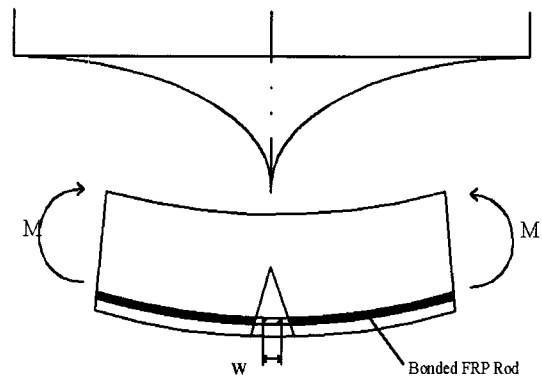
적으로 나타내고 있다. 비부착 NSM 공법으로 보강한 보 Fig. 11(a)의 파괴 메카니즘은 아래와 같다.



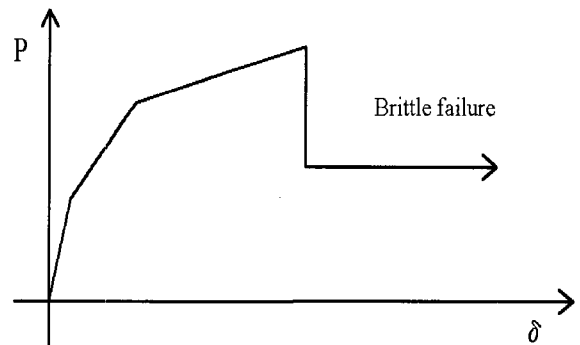
(a) BNSM beam and moment diagram



(b) Strain distribution of Hybrid FRP rebars in elastic stage

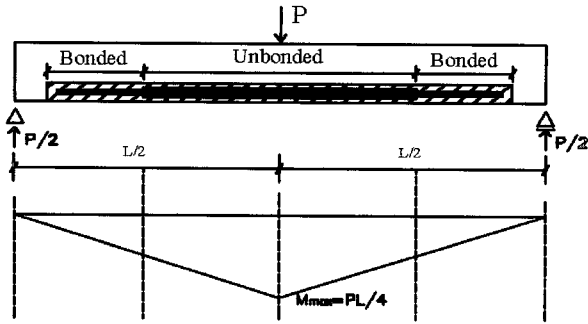


(c) Strain concentration of Hybrid FRP rebar at the critical section



(d) Brittle failure after peak load

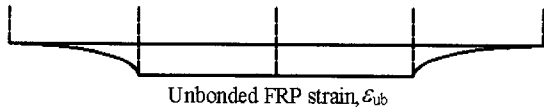
Fig. 10 Failure process of bonded NSM reinforced concrete beam with brittle Hybrid FRP rebars



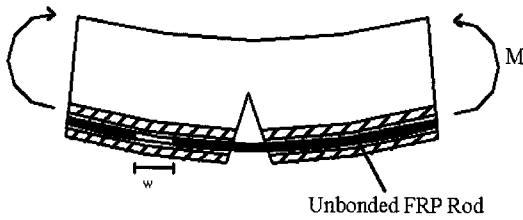
(a) PUNSM beam and moment diagram



(b) Strain distribution of Hybrid FRP rebar in elastic stage

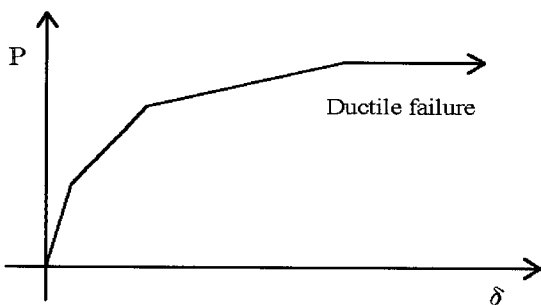


Unbonded FRP strain, ϵ_{ub}



Unbonded FRP Rod

(c) Strain distribution of Hybrid FRP rebar near the ultimate stage

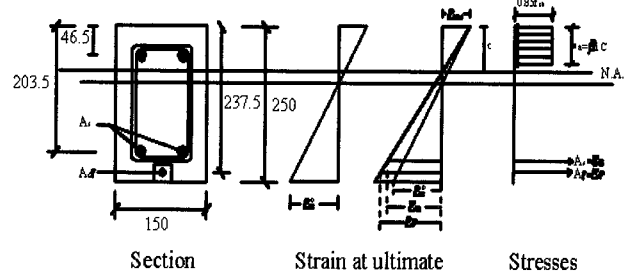


(d) Ductile failure with residual strength

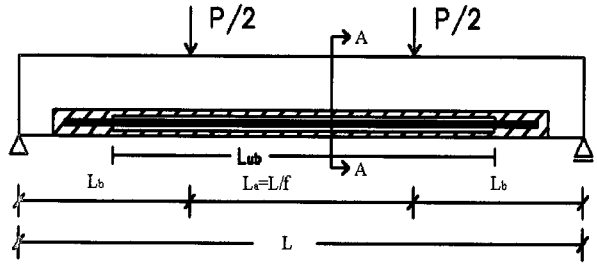
Fig. 11 Failure process of unbonded NSM reinforced concrete beam with ductile Hybrid FRP rebars

1) 첫 균열이 부재에 발생하기까지 전체적으로 Hybrid FRP rebar는 변형률 적합성에 의하여 변형이 발생한다 (Fig. 11(b)).

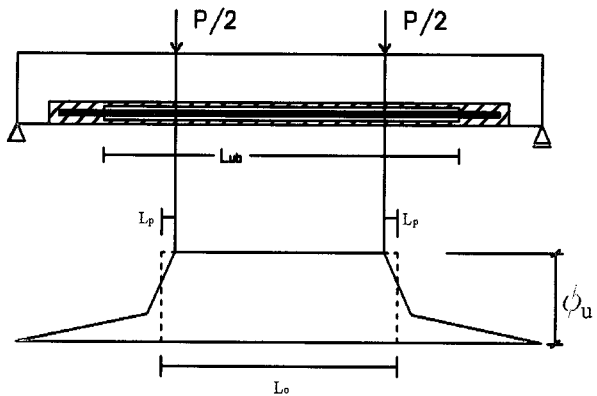
2) 최대 휨내력을 받는 부분에 휨균열이 발생하면 하중



Section Strain at ultimate Stresses



(a) Strain and idealized stress distributions in NSM beam (unit=mm)



(b) Real and idealized curvature distributions under 4-point loading

Fig. 12 Stress, strain and curvature distributions at ultimate stage of NSM beam

이 증가함에 따라 균열폭이 증가하게 된다(Fig. 11(c)).

3) 최대 휨내력 받는 부분을 중심으로 Hybrid FRPrebar의 일부를 비부착 시켜놓았으므로 균열폭이 증가함에 무관하게 비부착된 부분의 곡률에 따라 평균변형률이 발생하게 된다. 즉, 균열이 발생한 곳에 변형이 집중되지 않을 뿐 아니라 균열폭과는 상관없이 비부착된 보 부분의 곡률의 크기에 따라 변형률이 발생하게 된다(Fig. 11(c)).

따라서 기존의 방법대로 보강한 경우와는 달리 Hybrid FRP rebar의 전체 유효 변형률의 감소가 발생하지 않는다. 4) 보가 최대 내력에 도달한 이후에도 연성적인 거동을 나타낸다(Fig. 11(d)).

5. 극한 시 연성확보를 위한 최소한의 비부착 길이

본 절에서는 PUNSM 공법 적용 시, 철근콘크리트 휨 부재의 극한 시에 연성적 거동의 확보를 위한 최소한의 비부착 길이를 이론적으로 산정하여 제시하였다. Fig. 12는 휨응력을 받는 단순지지된 철근콘크리트 휨재의 하중 조건 및 이 보의 극한 시 곡률의 개략적인 분포를 나타내고 있다. Fig. 12에서 점선은 실제 곡률을 이상화시킨 그림이다. Fig. 13은 Hybrid FRP rebar의 변형률 크기에 따른 변형 정도와 Hybrid FRP rebar의 응력-변형률을 나타낸다.

Fig. 12에 의하여 비부착된 부분의 Hybrid FRP rebar의 변형률, ϵ_{ub} 의 값은 아래와 같다.

$$\Delta L = \phi_{ub} \cdot (d_F - c) \times L_o \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{ub} &= \epsilon_{avg} = \frac{\Delta L}{L_{ub}} \\ &= \phi_{ub} \cdot (d_F - c) \times \frac{L_o}{L_{ub}} \end{aligned} \quad (4a)$$

$$L_{ub} \geq L_o \quad (4b)$$

여기서, $\phi_{ub} = \frac{\epsilon_{cu}}{c}$

$$\epsilon_{cu} = 0.003$$

$$L_o = L_a + 2 \cdot L_p$$

$$L_a = \frac{L}{f}, f = 10 \text{ (3점 하중)}$$

$$f = 3 \text{ (등분포 또는 4점 하중)}^{15,16},$$

$$L_p = 0.5 \cdot d_s^{17}, c = \text{중립축 거리,}$$

d_s, d_F = 압축단에서 철근 및 FRP rebar까지의 거리.

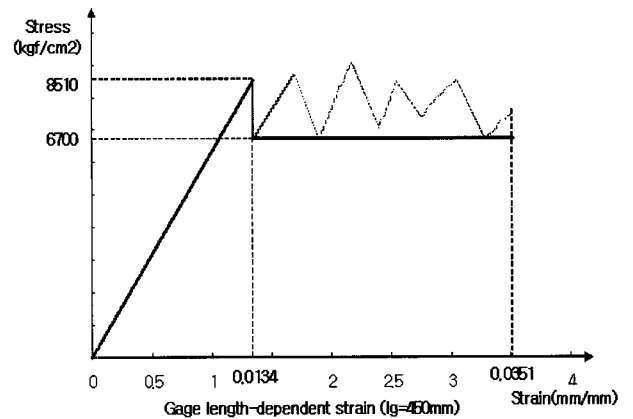
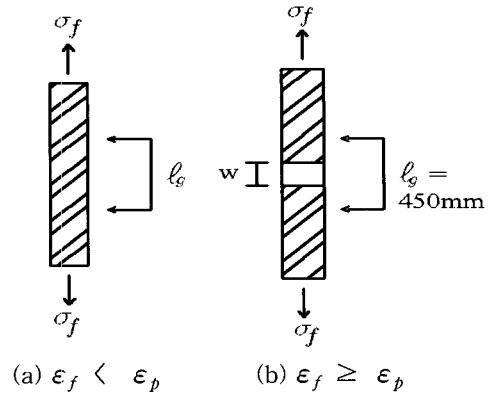
상기에서 중립축거리 c 는 단면의 평형조건으로부터 산정할 수 있다. Fig. 12(a)의 단면내력에서 극한시에 FRP rebar의 응력이 항복 후의 값을 갖는다고 하면 평형조건은 다음과 같다.

$$A_s \cdot f_y + A_f \cdot \sigma_p \quad (5)$$

$$= 0.85 f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot c \cdot b$$

$$c = \frac{A_s \cdot f_y + A_f \cdot \sigma_p}{0.85 \cdot f_{ck} \cdot \beta_1 \cdot b} \quad (6)$$

따라서 보의 비부착된 Hybrid FRP rebar의 변형률은 다음과 같다.



(c) Idealized stress-strain relations of Hybrid FRP rebar ($l_g=450\text{mm}$)

Fig. 13 Conceptual stress-strain relations of Hybrid FRP rebar

$$\epsilon_{ub} = \frac{\epsilon_{cu} \cdot (d_F - c)}{c} \times \frac{L_o}{L_{ub}} \quad (7)$$

한편, Fig. 14와 같은 Hybrid FRP rebar의 응력-변형률 관계는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_f = E_f \cdot \epsilon_f \text{ 만일 } \epsilon_f < \epsilon_m$$

$$\sigma_f = \sigma_p \text{ 만일 } \epsilon_f \geq \epsilon_m \quad (8)$$

Hybrid FRP rebar의 종곡 변형률을 ϵ_u 라고 하면 임의의 게이지값에 대한 이 rebar의 종곡 변형률(ϵ_u)의 값은 아래와 같이 유도된다. 단, Hybrid FRP rebar의 변형률보다 큰 변형률이 작용하게 되면 모든 단면에 최대잔유인장력인 σ_p 가 작용한다고 가정한다. 만일 Hybrid FRP rebar의 변형이 그 최대 변형률(ϵ_m)보다 큰 변형률을 갖는 상태라면 위험단면에 w 만큼의 변위가 발생하였다고 할 수 있다. 따라서 원래의 게이지 길이는 다음의 l 과 같이 그

총길이가 인장된 상태이다.

$$l = l_g + w + (l_g - w) \times \frac{\sigma_p}{E_f} \quad (9)$$

또는 게이지 길이에 대하여 추가로 늘어난 길이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta l &= l - l_g \\ &= w + (l_g - w) \times \frac{\sigma_p}{E_f} \end{aligned} \quad (10)$$

변형이 증가하여 최대변형률인 ϵ_u 에 도달하게 되면 위험단면에서의 인장폭 w 도 그 최대값인 w_{\max} 에 이르게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta l_{\max} &= w_{\max} + (l_g - w_{\max}) \times \frac{\sigma_p}{E_f} \\ \text{또는} \\ l_g \times \epsilon_u &= (1 - \epsilon_p) \cdot w_{\max} + l_g \cdot \epsilon_p \end{aligned} \quad (11)$$

상기의 (11)식을 ϵ_u 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$\epsilon_u = \epsilon_p + (1 - \epsilon_p) \cdot \frac{w_{\max}}{l_g} \quad (12)$$

Hybrid FRP rebar를 이용하여 비부착된 NSM 공법으로 보강된 철근콘크리트 휨재가 극한 하중에 도달한 경우, Hybrid FRP rebar의 파단으로 인한 취성적인 파괴가 일어나지 않기 위하여는 다음과 같은 조건이 성립하여야 한다.

$$\epsilon_{ub} \leq \epsilon_u \quad (13)$$

따라서 극한하중 시에 비부착된 Hybrid FRP rebar가 연성을 확보하기 위한 비부착 길이조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon_{cu} \cdot (d_F - c)}{c} \times \frac{L_o}{L_{ub}} \\ \leq \epsilon_p + (1 - \epsilon_p) \frac{w_{\max}}{L_{ub}} \end{aligned} \quad (14)$$

상기 식 (14)에서 우항은 식 (12)의 l_g 를 L_{ub} 로 치환하여 산정하였다. 상기 식 (14)로부터 최소 비부착길이는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_{ub} \geq \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_p} \left(\frac{d_F}{c} - 1 \right) \left(\frac{L}{f} + d_s \right) \\ - \left(\frac{1}{\epsilon_p} - 1 \right) w_{\max} \end{aligned} \quad (15a)$$

또한 식 (4b)로부터,

$$L_{ub} \geq \frac{L}{f} + d_s \quad (15b)$$

상기 식 (15b)의 조건은 L_o 구간 내에서 비부착이 이루어질 경우, L_o 내의 부착된 구간에서 FRP rebar에 인장응력에 의한 위험단면이 발생할 수 있는 것을 방지하기 위한 조건이다. 따라서 최소 비부착길이는 식 (15a)와 식 (15b)의 값 중 큰 값으로 한다. 본 실험체들의 최소비부착 길이 충족여부를 확인하기 위한 값들은 아래와 같다:

$$\begin{aligned} \omega_{\max} &= 10 \text{ mm}, \epsilon_{cu} = 0.003, \epsilon_p = 0.01055 \\ L &= 2,200 \text{ mm}, d_s = 204 \text{ mm}, d_F = 238 \text{ mm}. \end{aligned}$$

식 (15)에 의한 PUNSM 실험체의 이론적인 최소 비부착 길이값은 PUNSM-1, PUNSM-2, PUNSM-3 의 경우 각각 424 mm, 424 mm, 937 mm이다. 실제 비부착된 길이는 800 mm, 1200 mm, 800 mm로서 PUNSM-1 및 PUNSM-2 실험체는 최소 비부착 길이를 만족하나 PUNSM-3의 경우, 실제 비부착 길이는 이론적인 최소 비부착 길이의 약 85 %임을 알 수 있다. 그러나 PUNSM-3의 이론적인 최소비부착 길이 937 mm는 식 (15b)에 의한 조건에 의한 값이며 실험관찰 결과, Hybrid FRP rebar의 위험단면이 비부착 구간 내에 발생함으로써 연성적 거동을 확보하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 FRP 복합소재로 보강된 보의 최대 취약점인 취성적인 파괴를 방지하고 연성적인 거동을 확보하기 위한 새로운 공법을 제시하고자 하였다. 제안된 공법은 연성을 갖는 Hybrid FRP rebar를 NSM 공법에 적용하되 일부 구간을 비부착 시킴으로서 연성을 확보하는 방법이다.

본 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) Hybrid FRP rebar는 항복응력 시에 위험단면에서 국부적인 항복현상을 나타내므로 변형률이 측정 게이지 길이에 따라 다른 값을 가진다.

- 2) Hybrid FRP rebar를 기존의 부착 NSM 공법에 적용하여 철근콘크리트보를 보강할 경우, Hybrid FRP rebar의 국부적인 항복현상에 따른 파괴 메카니즘이 발생한다. 따라서 Hybrid FRP rebar의 변형은 보의 위험단면 균열 증가에 종속된 국부적인 집중변형 현상을 일으켜 보의 취성파괴를 발생시킨다.
- 3) Hybrid FRP rebar를 사용하되 부분 비부착 NSM 공법으로 철근콘크리트보를 보강하면 보강된 보의 위험단면에서의 최대 균열크기의 증가와 무관하게 비부착된 구간에서 항복현상이 발생하므로 연성을 확보할 수 있다.
- 4) Hybrid FRP rebar를 비부착 NSM 공법으로 철근콘크리트 보를 보강할 경우, Hybrid FRP rebar의 게이지 길이에 종속된 변형률과 국부적인 항복메카니즘을 극복하기 위한 최소한의 Hybrid FRP rebar의 비부착 길이가 필요하다. 본 연구에서는 이 길이에 대한 이론식을 제안하였으며 이에 대한 추가적인 실험 검증이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 동원 건설(주)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 본 연구자들은 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Shahawy M., Chaallal O., Beitelman T.E. and Adna E.S., "Flexural Strengthening with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites of Preloaded Full-Scale Girders," *ACI Structural Journal*, Vol.98, No.5, September~October 2001, pp.735~742.
2. Shin Y.S. and Lee C.D., "Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with CFRP Laminates at Different Levels of Sustaining Load," Accepted for publication in *ACI Structural Journal*.
3. Plevris N., Triantafillou T.C., and Veneziano D., "Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates," *Journal of Structural Engineering*, Vol.11, No.7, 1995, pp.1037~1044.
4. Arockiasamy M., Sowrirajan R., Shahawy M., and Beitelman T.E., "Repair of Damaged Pretensioned Solid Slab Using CFRP Laminates," Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Edited by Taerwe,L., Rilem, 1995, pp.492~500.

5. Saadatmanesh H. and Ehsani M. R., "RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study," *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.11, November 1991, pp.3417~3433.
6. Saadatmanesh H. and Ehsani M.R., "RC Beams Strengthened with FRP Plates. II: Analysis and Parametric Study," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.11, November 1991, pp.3434~3455.
7. Grace N. F., "Continuous CFRP Prestressed Concrete bridges," *Concrete International*, Oct. 1999, pp.42~47.
8. Alkhrdaji T., Nanni A., Chen G. and Barker M., "Solid RC Decks Strengthened with FRP," *Concrete International*, Oct. 1999, pp.31~41.
9. Lorenzis L. D. and Nanni A., "Strengthening of RC Structures with Near Surface Mounted FRP Rods," Report of Center for Infrastructure Engineering Studies, University of Missouri-Rolla, CIES 99~10, p.123.
10. Khalifa A., Alkhrdaji T., Nanni A., and Lansburg S., "Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement," *Concrete International*, Oct. 1999, pp.49~54.
11. Lees J. M. and Burgoyne C., "Analysis of Concrete Beams with Partially Bonded Composite Reinforcement," *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.2, March~April 2000, pp.252~258.
12. Averston J. and Kelly A., "Tensile First Cracking Strain and Strength of Hybrid Composites and Laminates," Phil, London, 1980, A294, pp.519~534.
13. Tamuzs V., Tefers R., Apinis R., and Modniks J., "Pull-out, flexural rotation capacity and creep tests using hybrid composite rods and CFCC rods for reinforcement in concrete," Institute of Polymer Mechanics Latian Academy of Sciences Aizkraukles 23, Riga, LV-1006 S-412 96, Latvia, Work No: 32, Publication: 99:4, 1999, pp.7~11.
14. Ehsani M. R.; Saadatmanesh H.; and Tao S., "Design Recommendation for Bond of GFRP Rebars to Concrete," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 122, No.3, 1996, pp.247~257.
15. Mattock A. H., "Discussion of "Rotational Capacity of Concrete Beams," by W.Corley, Proceedings, *ASCE*, V.93, ST2, Apr.1967, pp.519~522.
16. Harajili M. H. and Hijazi S., "Evaluation of the Ultimate Steel Stress in Unbonded Partially Prestressed Members," *Journal*, Precast/Prestressed oncrete Institute.
17. Park, Robert and Paulay, Thomas, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York, 1975, p.769.

요 약

철근콘크리트를 FRP 복합재로 보강할 경우, 취성파괴를 방지하고 연성파괴를 확보할 수 있는 새로운 기법을 표면매립공법 (Near Surface Mounted technique: 이하 NSM 공법)에 근거하여 제시하였다. 제안된 기법은 Hybrid FRP rebar를 부분적으로 비부착 시킴으로서 보강된 보의 연성을 확보한다. Hybrid FRP rebar의 일부를 비부착으로 한 경우와 전부를 부착으로 한 경우의 NSM 공법에 의한 FRP 보강된 철근 콘크리트보의 거동을 비교하기 위한 실험을 실시하였다. 실험 결과, 부분 비부착 NSM 공법으로 보강된 철근 콘크리트보만이 연성거동을 함이 관찰되었다. 부분 비부착 보강된 보의 극한 시 내력을 확보하기 위한 최소한의 FRP의 부분 비부착길이를 이론적으로 산정하여 제시하였다. 제시된 부분 비부착 NSM 공법은 FRP 복합재로 보강된 철근 콘크리트 부재의 구조적 거동을 크게 향상시킬 수 있으리라 기대된다.

핵심용어 : 비부착 NSM공법, 연성거동, FRP 복합재, 철근 콘크리트 부재
