

탄소 섬유시트로 보강된 철근콘크리트보의 부착파괴거동에 관한 실험적 연구

A Study on the Behavior of the Adhesive Failure of RC
Beams Strengthened by Carbon Fiber Sheet



박철림*

Park, Chil-Lim



황진석**

Hwang, Jin-Seog



박형철**

Park, Hyung-Choel



백명종***

Baek, Myung-Jong

ABSTRACT

Recently the Carbon Fiber Sheet(CFS) is widely used for strengthening damaged RC beams. To achieve full flexural capacity in RC beams strengthened by the CFS, the composite action is required and the adhesive failure should not occur. Therefore, in this experiment, the effect of the number of the sheet on the adhesive failure mode was examined.

According to the test results, the adhesive failure load level of all specimens are much the same regardless of the number of sheet. The behavior of adhesive failure was divided into two types, the pure adhesive failure and the cover peeling failure. The adhesive stresses were concentrated at the ends of sheet. The concentrated stresses ranged from 15.39 to 41.42 kg/cm² did not show uniform tendency. But the average adhesive stress had the value between 6.85 and 8.99 kg/cm² and the average of 7.38 kg/cm² was obtained. The average adhesive stresses were similar to the average theoretical value of 6.19 kg/cm² and the design adhesive stress of 6 kg/cm². The design adhesive stress to design anchorage

* 정희원, 대우건설기술 연구소 소장, 부사장
** 정희원, (주)대우건설기술연구소 선임연구원
*** 정희원, (주)대우건설 기술연구소 주임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1998년 2월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

length is reasonably satisfactory value.

Keywords : Concentrated Stress, Average Bond Stress, Adhesive Failure

1. 서론

이 논문은 인장축이 탄소섬유쉬트로 보강된 철근 콘크리트보의 부착과 파괴 거동에 관한 것이다. 최근 구조체의 손상이 발생하여 내력이 부족한 구조물에 대하여 탄소섬유쉬트를 보강함으로써 내력을 증진을 시키는 탄소섬유보강공법이 많이 행해지고 있다.^(2,5),8) 그러나 탄소섬유쉬트의 정착길이가 충분하지 않을 경우에는 탄소섬유쉬트의 단부에서 발생하는 부착과 파괴로 인하여 휨내력이 최대한 발현되지 못한다.^(1,2),3),5),6),8) 따라서 본 논문에서는 탄소섬유쉬트의 보강매수를 변수로 한 단순보 실험을 통하여 탄소섬유쉬트의 부착과 파괴현상을 관찰하고 파괴거동 및 파괴시 탄소섬유쉬트의 부착응력을 분석하여 부착과 파괴의 거동을 규명하고자 한다.

2. 실험의 개요

2.1 시험체의 종류 및 형상

시험체의 종류는 Table 1과 같으며 단면은 Fig.1과 같다. 시험체는 CONTROL 1개와 쉬트의 부착 매수에 따른 부착과 파괴거동을 분석하기 위한 8개의 시험체로 구성하였다. 시험체의 크기는 250×400×3400 (b×h×L) mm이며 인장철근은 3-D19, 압축 철근은 2-D10을 사용하였다. 그리고 전단파괴를 방

Table 1 Types of Beam (unit=mm)

Beam	Length of CFG	Number of sheet	Manufacturer of CFS
ACP1	2000	1	T
ACP2	2000	2	
ACP3	2000	3	
ACP4	2000	4	
ACP5	2000	1	
ACP6	2000	2	H
ACP7	2000	3	
ACP8	2000	4	
CONTROL	-	-	-

지하기 위하여 단부에는 D10을 100 mm 간격(Fig. 3(a)참조)으로 배근하였다.⁵⁾

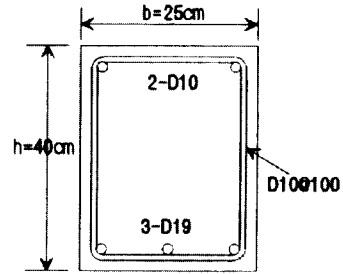


Fig.1 Section of Beams

2.2 가력계획

보의 스패ンは 3 m 이고, 하중은 양 지점으로부터 각각 1m 의 위치에서 2점가력을 실시 하였다. 가력은 용량이 100t 인 Actuator 를 사용하였다. 양단이 단순보인 가정을 만족시키기 위하여 지지점과 가력 지점에 핀 경계조건을 설치하였으며, 가력장치는 Fig.2와 같다. 가력시 하중이 낮아 부재가 탄성인 구간에서는 하중제어를 실시하였으며 이때 가력속도는 5kg/sec를 유지하였다. 그리고 스패중앙의 하단 인장철근의 변형도가 1500 μ 이상에서는 스패중앙점의 처짐량을 기준으로 변위제어를 실시하였고 가력속도는 0.004mm/sec를 유지하여 부재의 파괴시까지 가력하였다.

2.3 측정항목

단부박리의 거동을 파악하기 위하여 부재의 처짐량, 탄소섬유쉬트의 변형도, 철근의 변형도, 콘크리트의 변형도를 측정하였으며, 육안으로 균열의 발생을 관찰하였다.

처짐량의 측정에는 스트레인게이지식 (strain gauge type) 변위계를 사용하였으며, 부재의 양 지점과 스패중앙을 포함한 3개소의 부재 중심에서 측정

하였다. 탄소섬유쉬트 및 철근의 변형도는 스트레인 게이지(strain gauge : 3mm, 2mm)를 이용하여 측정하였으며 콘크리트의 변형도는 측면과 상부에 스트레인게이지(strain gauge : 60mm)를 설치하여 측정하였다. 각 측정장치의 부착위치는 Fig.3과 같다.

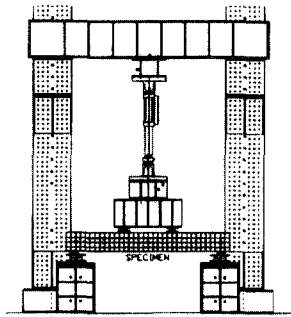
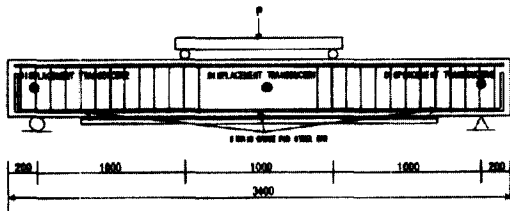


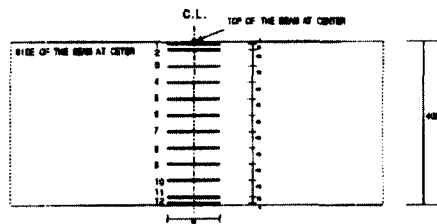
Fig. 2 Loading Frame



(a) Displacement Transducers and Strain Gauges



(b) Strain Gauges at CFS Surface



(c) Strain Gauges at Concrete Surface

Fig.3 Location of Measurement Instruments

2.4 탄소섬유쉬트의 보강 시공

탄소섬유쉬트의 보강 시공은 편의를 위하여 부재

를 뒤집어 놓은 상태에서 시공하였으며 콘크리트의 재령 28일에 실시하였다. H사 탄소섬유쉬트 1매의 시공은 다음과 같은 순서로 실시하였다.

- ① 콘크리트면 그라인딩
- ② 프라이머 도포(표준도포량 0.3 kg/m²)
- ③ 프라이머 건조 및 요철 조정
- ④ 접착용 수지 도포(표준도포량 0.5 kg/m²)
- ⑤ 탄소섬유쉬트 부착
- ⑥ 함침용 수지 도포(표준도포량 0.3 kg/m²)

그리고 2매이상의 탄소섬유쉬트를 부착하는 시험체에서는 ④~⑥공정을 반복하여 실시하였다. T사 탄소섬유쉬트 1매의 시공순서도 위 H사의 순서와 동일하였으며, 접착용 수지의 표준도포량은 0.4 kg/m², 함침용 수지의 표준도포량은 0.2 kg/m²로 하였으며, 2매이상의 탄소섬유쉬트를 부착하는 시험체에서는 1매를 시공한 후 24 시간이 경과한 후 ④~⑥공정을 반복함으로써 다음 장을 시공하였다.

위와 같이 탄소섬유쉬트의 시공이 완료된 후 에폭시의 양생은 실험동내에서 실시하였으며 최소 2주이상 되도록 하였다.

2.5 사용재료의 물성

본 실험에 사용된 콘크리트, 철근, 탄소섬유쉬트 및 에폭시의 물성은 재료시험을 통하여 구하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 Property of Materials

(a) Concrete			
Compression Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)	
250.3	34.8	2.55 × 10 ⁴	
Age of Concrete : 28 days			
(b) Steel Deformed Bar of D19			
Yield Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Elongation Ratio (%)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)
4,526	6,074	18.6	2.52 × 10 ⁶
(c) CFS made by H			
Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)	Thickness (mm)	Width (mm)
49,935.7	2.67 × 10 ⁴	0.11	230

(d) CFS made by T

Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)	Thickness (mm)	Width (mm)
45,650.0	2.49×10^6	0.11	230

(e) Epoxy Resin made by H

Comp. Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Flexural Strength (kg/cm ²)	Elongation ratio (%)	Poisson's ratio	Modulus of Flexural Elasticity (kg/cm ²)	Modulus of Tensile Elasticity (kg/cm ²)
922.8	617.5	989.3	2.38	0.37	38.6×10^6	39.4×10^6

(d) Epoxy Resin made by T

Comp. Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Flexural Strength (kg/cm ²)	Elongation ratio (%)	Poisson's ratio	Modulus of Flexural Elasticity (kg/cm ²)	Modulus of Tensile Elasticity (kg/cm ²)
812.9	507.2	691.5	3.76	0.38	19.2×10^6	33.4×10^6

콘크리트의 물성치는 표준양생한 $\phi 100 \times 200$ 공시체에 대하여 재령 28일에 실시한 결과로서 인장강도는 쪼갬시험법(splitting test)에 의한 것이다. 그리고 에폭시는 80℃로 6시간 고온양생하고 상온에서 7일 양생한 후 실험한 결과이다.

3. 실험의 결과 및 분석

3.1 파괴거동

모든 시험체에 대하여 유도한 탄소섬유쉬트 부착 파괴가 발생하였다. 전 시험체의 하중-중앙점 처짐 그래프는 Fig.4와 같다. 그래프를 살펴보면 ACP1 시험체에서 ACP8 시험체까지 인장철근이 항복한 이후에 탄소섬유쉬트의 부착파괴가 발생하였으며, 탄소섬유쉬트의 부착매수에 따른 부착파괴하중의

Table 3 Load of Failure

Beam	Load	Load	Load
Beam	Beam	Beam	Beam
ACP1	30.69		32.08
ACP2	36.96		31.04
ACP3	44.14		30.28
ACP4	52.40		30.91
ACP5	31.12		29.32
ACP6	37.94		30.00
ACP7	45.83		32.15
ACP8	55.02		30.17
CONTROL	24.66		25.82

변화는 크지 않은 것으로 나타났으나 중앙점 처짐량에서는 약간의 차이가 발생한 것을 볼 수 있다. Table 3에서 변형도가 중립축으로부터의 거리에 비

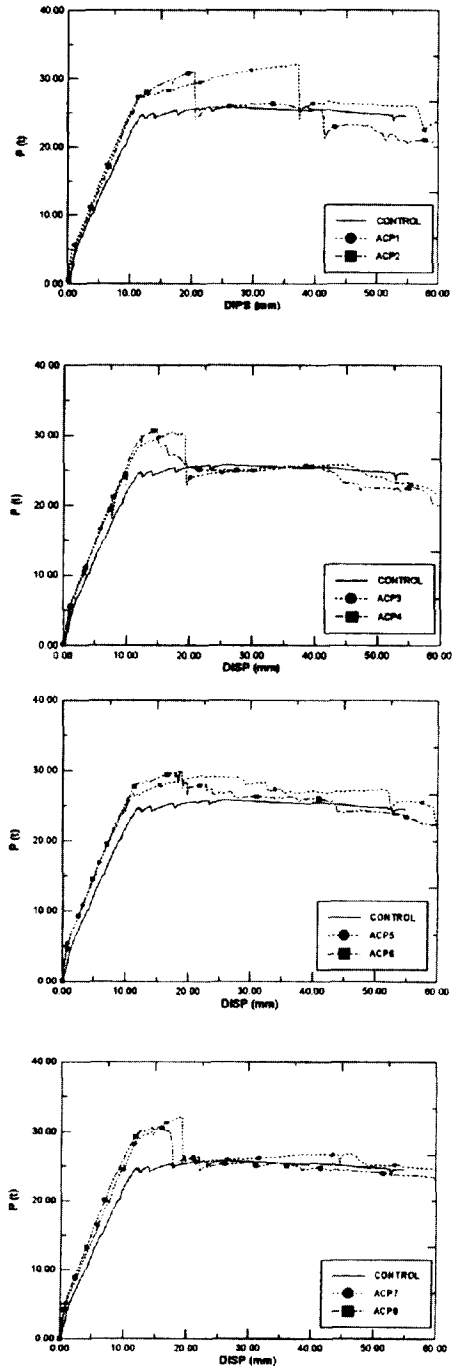
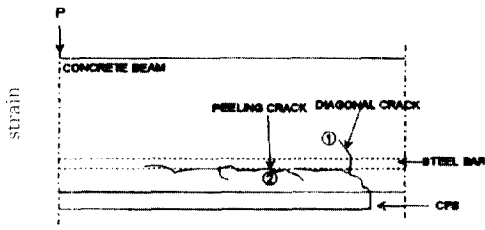
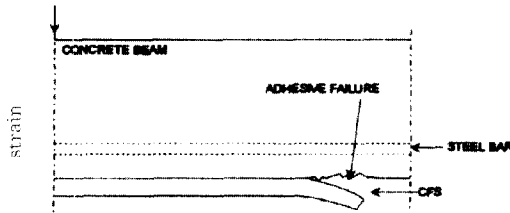


Fig. 4 Load-Deflection of beams



(a) cover peeling failure



(b) pure adhesive failure

Fig.5 Types of Adhesive Failure

레한다는 가정을 포함한 일반 철근콘크리트 보이론을 적용하여 건설부 철근콘크리트 설계기준¹⁾에 의한 예상 휨파괴하중과 부착파괴하중을 보면 부착파괴로 인하여 최대 휨내력에 도달하지 못한 것을 알 수 있다.^{5),9)}

파괴거동을 비교하면 ACP3 시험체와 ACP4 시험체에서는 단부의 전단균열이 하부의 인장철근을 따라 수평방향으로 진전되면서 콘크리트 피복이 박리되며 파괴된 피복박리파괴가 발생하였고, 이 시험체를 제외한 나머지 시험체에서는 탄소섬유쉬트와 콘크리트간의 부착이 급격히 저하되면서 파괴되는 순수부착파괴가 발생하였으며 그 자세한 박리파괴양상은 Fig.5와 같다.^{6),8)}

특히, 순수부착파괴에서는 탄소섬유쉬트가 한꺼번에 부착파괴로 떨어지지 않고 부재의 종방향으로 찢어지면서 단계적으로 박리되었으며 이에 따라 하중-중량점 처짐 그래프에서 단계적인 하중의 감소가 나타났다.

그리고 박리파괴하중의 크기에 대한 탄소섬유 및 에폭시의 종류별 영향은 H가 T에 비하여 약간 약간 낮거나 거의 동일한 것으로 나타났다.

3.2 일체거동평가

탄소섬유쉬트로 보강된 보가 최대 내력을 발휘하

Table 4 Neutral Axis of Beams at Different Load

시험체	3 ton		15 ton		Exp/ Theory	
	Exp (cm)	Theory (cm)	Exp/ Theory	Exp (cm)		Theory (cm)
ACP1	18.00	21.48	0.84	16.66	14.96	1.11
ACP2	18.73	21.53	0.87	16.09	15.97	1.01
ACP3	19.32	21.57	0.90	18.00	16.88	1.07
ACP4	20.27	21.62	0.94	18.34	17.70	1.04
ACP5	19.75	21.48	0.91	24.52	18.44	1.33
ACP6	19.56	21.53	0.91	18.29	19.12	0.96
ACP7	19.92	21.58	0.92	13.95	14.96	0.93
ACP8	19.51	21.63	0.90	14.31	14.96	0.96
CONTROL	18.68	21.21	0.88	14.64	12.41	1.18

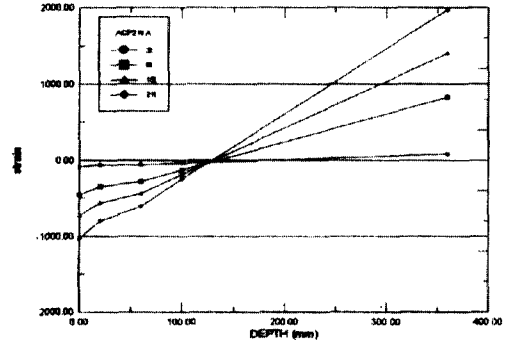
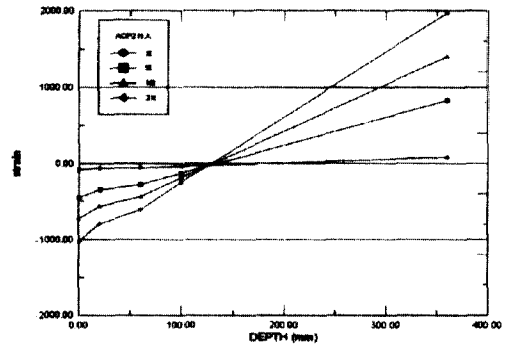


Fig.6 Neutral Axis of Beams at Different Load

고 일반적인 철근콘크리트 보이론으로 내력 및 응력을 평가하기 위해서는 보와 탄소섬유의 일체거동이 성립되어야 한다. 따라서 이러한 일체거동 여부를 살펴보기 위하여 하중에 따른 중립축과 중앙점 처짐량을 비교하였다.^{5),9)}

중립축은 Fig.6과 같이 하중의 증가에 따라서 높아지는 것을 볼 수 있다. 그리고 각 하중별 중립축과 변위의 값을 앞에서와 같이 건설부 기준¹⁾에 의한 이론치와 비교하여 Table 4와 Table 5에 나타내었다. 각

시험체별로 하중이 15t일 때 ACP5 시험체의 중립축을 제외하면 실험치와 이론치는 10 % 내외의 차이가 발생하였다. 그러나 콘크리트 재료의 불균일성, 재료의 비선형성 및 실험의 오차 등을 감안할 때 실험치와 이론치는 상당히 부합되는 것으로 볼 수 있다.

그러므로 탄소섬유쉬트 보강시 쉬트와 콘크리트는 탄소섬유쉬트의 부착파괴가 발생하기 전까지 일체거동을 하는 것으로 판단된다. 따라서 탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보는 일반적인 보에 대한 해석 방법으로 내력과 응력을 평가할 수 있는 것으로 사료된다.

Table 5 Deflection of beams at Different Load

시험체	9 ton			12 ton		
	Exp (cm)	Theory (cm)	Exp/Theory	Exp (cm)	Theory (cm)	Exp/Theory
ACP1	2.52	2.59	0.97	3.78	3.53	1.07
ACP2	2.57	2.52	1.01	3.92	3.41	1.14
ACP3	2.39	2.47	0.97	3.65	3.36	1.09
ACP4	2.50	2.41	1.04	3.63	3.28	1.10
ACP5	2.42	2.58	0.94	3.62	3.53	1.03
ACP6	2.42	2.52	0.96	3.36	3.43	0.98
ACP7	2.42	2.45	1.07	3.57	3.34	1.07
ACPS	2.30	2.39	0.96	3.43	3.56	0.96
CONTROL	2.84	2.65	1.07	4.07	3.63	1.12

3.3 부착 전단 응력도

탄소섬유쉬트의 변형도를 측정하여 탄소섬유쉬트와 접착용 수지 간의 부착전단응력¹¹⁾을 구할 수 있다. 부착전단응력은 탄소섬유쉬트에서 두 지점 사이의 인장력 차이를 두 지점 사이의 면적으로 나누어 구할 수 있다. 따라서 부착응력은 다음과 같다.

$$\tau_i = \frac{(\epsilon_{i+1} - \epsilon_i)E_{cf}A_{cf}}{b_{cf}l_i} \quad (1)$$

여기에서 τ_i = i 구간의 부착전단응력

ϵ = 탄소섬유쉬트의 변형

E_{cf} = 탄소섬유쉬트의 탄성계수

A_{cf} = 탄소섬유쉬트의 면적

b_{cf} = 탄소섬유쉬트의 폭

l_i = i 구간의 길이

그리고 부착파괴시 평균부착응력을 최대모멘트가 발생하는 지점의 변형도로 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$\bar{\tau} = \frac{\epsilon_{\max}E_{cf}A_{cf}}{b_{cf}l_a} \quad (2)$$

여기에서 $\bar{\tau}$ = 부착파괴시 평균부착응력

ϵ_{\max} = 최대모멘트 발생지점의 변형도

l_a = 탄소섬유쉬트의 정착길이

또한 이러한 부착파괴시 평균부착응력은 부착 파괴 하중으로부터 이론적으로 구할 수 있다. 즉 다음 식과 같이 일반적인 보이론으로부터 부착파괴시의 탄소섬유쉬트 응력을 직접 구하여 평균부착응력을 계산할 수 있다.

$$\bar{\tau}(\text{theory}) = \frac{f_{cf}A_{cf}}{b_{cf}l_a} \quad (3)$$

여기에서

$$f_{cf} = \frac{Mn_{cf}(h - kd)}{I}$$

M = 부착파괴시 모멘트

n_{cf} = 콘크리트에 대한 CFS의 탄성계수비

h = 보의 총

ka = 중립축 거리

I = 보의 강성

f_{cf} = 탄소섬유쉬트의 응력

Fig.7에서 탄소섬유쉬트의 부착응력을 살펴보면 하중의 증가에 따라 단부에서 응력이 집중되는 현상을 볼 수 있다. 이러한 응력집중현상으로 인하여 단부에서 부착이 파괴되기 시작하여 전체적인 부착파괴가 발생하게 되는 것으로 볼 수 있다.¹²⁾

Table 6 Adhesive Stress of CFS at Failure

Beam	Max. Adhesive Stress (Exp.1) (kg/cm ²)	Average Adhesive Stress (Exp.2) (kg/cm ²)	Average Adhesive Stress (Theory) (kg/cm ²)	Exp.2/Theory
ACP1	41.42	8.03	6.16	1.31
ACP2	16.70	6.85	6.21	1.10
ACP3	15.39	8.44	5.83	1.45
ACP4	20.48	7.45	5.74	1.30
ACP1	8.25	3.23	6.53	0.49
ACP2	9.88	3.76	6.41	0.59
ACP3	17.49	8.99	6.59	1.36
ACP4	20.55	7.23	6.06	1.19

각 시험체에 대하여 이러한 응력집중현상에 따른 최대부착응력과 부착파괴시의 평균부착응력을 Table 6에 나타내었다.

Table 6에 따르면 부착파괴시 단부에서 집중되는 최대부착응력은 $41.42 \sim 15.39 \text{ kg/cm}^2$ 로서 큰 편차를 나타내었는데, 이것은 탄소섬유쉬트에는 휘강성이 없어 하중의 증가에 따라 콘크리트에 균열이 발생하게 되면 그 부분에 응력이 집중하게 되므로 전체적으로 불균일한 응력분포를 나타내기 때문인 것으로 사료된다.

그러나 실험에서 구한 평균부착응력은 ACP5 시험체와 ACP6 시험체를 제외하면 $6.85 \sim 8.99 \text{ kg/cm}^2$ (평균 = 7.83 kg/cm^2) 인 값을 나타내었으며 각 시험체별 편차도 최대부착응력에 비하여 현저하지 않았다.

따라서 탄소섬유쉬트에서는 재료의 특성상 전체적으로 불균일한 응력분포를 나타내었지만, 부착파괴시의 평균부착응력은 쉬트의 매수에 관계없이 비슷한 결과를 보이게 되며, 또한 이것을 이론치와 비교하여도 큰 차이는 나타나지 않았다.

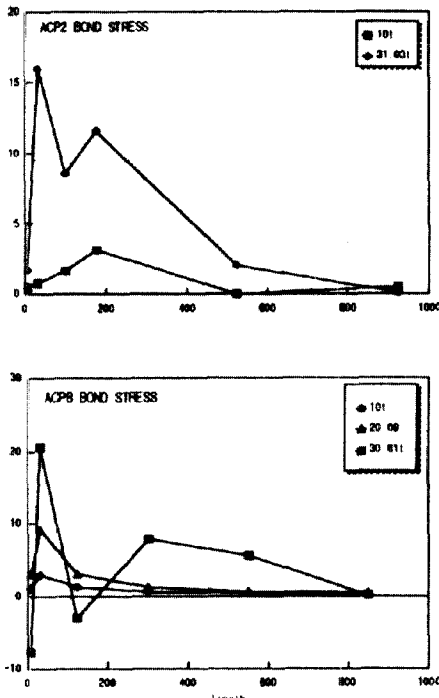


Fig.7 Adhesive Stress between CFS and Epoxy

결국 탄소섬유쉬트의 부착파괴는 단부에 집중되는 최대부착응력도로서 그 발생여부를 평가할 수 없으며, 쉬트의 정착길이에 대한 평균부착응력이 어떤 값(본 실험에서는 7.83 kg/cm^2) 이상이면 부착파괴가 발생하는 것으로 볼 수 있다. 또한 본 실험에서 얻은 평균부착응력은 쉬트의 보강설계시 정착길이의 산정에 사용되는 평균부착응력 6 kg/cm^2 보다 약간 큰 값을 나타내므로 설계에 사용되는 평균부착응력이 합리적인 값이라는 것을 간접적으로 평가할 수 있다.

4. 결론

본 실험을 통하여 다음과 나타난 결과는 다음과 같다.

1. 탄소섬유쉬트보강 시험체에서 부착파괴가 발생하기 이전에는 내력증진을 나타낸다. 부착파괴가 발생하는 하중레벨은 탄소섬유쉬트의 보강매수에 따라 큰 변화가 없었다.

2. 부착파괴의 거동은 에폭시의 파괴에 의한 순수 부착파괴와 콘크리트 피복이 떨어져 나오는 피복박리파괴의 두가지로 나타났다.

3. 부착파괴전 하중에 따른 중립축과 중앙점 처짐량을 건설부규준에 의한 이론치와 비교한 결과 실험치와 이론치가 부합되는 경향을 나타내었다. 따라서 탄소섬유쉬트의 박리가 발생하기 이전에는 탄소섬유쉬트와 콘크리트가 일체거동을 하는 것으로 볼 수 있으며 일반적인 규준 또는 탄성해석법으로 내력 및 응력을 산정할 수 있다.

4. 탄소섬유쉬트의 부착응력은 단부에서 집중되는 현상이 발생하지만 그 크기에는 일정한 경향이 나타나지 않았다. 그러나 평균부착응력은 평균 7.83 kg/cm^2 의 값을 나타내었으며 이론치와 유사한 값을 나타내었다. 따라서 탄소섬유쉬트의 부착파괴는 쉬트의 정착길이에 대한 평균부착응력으로 예상할 수 있으며, 본 실험의 경우에는 평균 7.83 kg/cm^2 이상이면 부착파괴가 발생하는 것으로 볼 수 있다.

5. 본 실험에서 얻은 평균부착응력 7.83 kg/cm^2 이 현재 탄소섬유쉬트의 보강시 사용하는 설계용 평균부착응력 6 kg/cm^2 과 유사한 값으로 나타났다. 따라서 설계용 평균부착응력은 합리적인 값으로 사료된다.

참고 문헌

1. 宇治公隆, "既設構造物の補強におけるシート状連続炭素纖維の付着特性," 土木學會第47回年次學術講演會, 平成4年
2. 宇治公隆, 横田和直, 池田尚治, "シート状炭素纖維による既設構造物の耐荷性能向上機構," 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 14, No. 2, 1992
3. 池田尚治, "途中定着部を有する既設鐵筋コンクリート部材のシート状連續炭素纖維にせん斷補強效果," 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 15, No. 2, 1993
4. 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계기준 및 해설, 건설부, 1994
5. Swamy, R. N., Jones, R., and Charif, A., "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams," Structural Engineer, Vol. 67, No. 3, February, 1989
6. Jones, R., Swamy, R. N., and Charif, A., "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates," Structural Engineer, Vol. 66, No. 5, March, 1988
7. Ziraba, Y. N., "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plate," ACI Structural Journal, Vol. 91, NO. 6, November-December, 1994
8. 신영수, 홍기섭, 최완철, 홍영균, "탄소섬유쉬트로 밀면보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동," 大韓建築學會論文集, 11卷8號, 通卷82號, 1995

요 약

최근 손상된 구조물에 탄소섬유쉬트 보강공법이 많이 사용되고 있다. 탄소섬유쉬트 보강에 따른 휨내력의 증진이 이루어지기 위해서는 보와 탄소섬유쉬트의 일체거동이 이루어져야 하며, 쉬트단부에서 부착파괴가 발생하지 않아야 한다. 따라서 이번 실험에서는 탄소섬유쉬트의 보강매수에 따른 부착파괴의 거동을 살펴보았다. 전시험체에서 부착파괴가 발생하였으며 부착파괴가 발생한 하중의 크기는 보강매수에 관계 없이 비슷하였다. 부착파괴의 거동은 순수부착파괴와 피복바리파괴로 구분될 수 있었으며 부착응력은 단부에서 집중현상이 나타났고 집중된 응력의 크기는 $15.39 \sim 41.42 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났다. 정착길이내의 평균부착응력은 $6.85 \sim 8.99 \text{ kg/cm}^2$ 으로서 평균 7.38 kg/cm^2 이고 이 값은 이론치인 6.19 kg/cm^2 보다 약간 높으며 설계부착응력인 6 kg/cm^2 에 부합되는 것으로 나타났다. 따라서 설계부착응력 6 kg/cm^2 은 정착길이의 설계시 합리적 값으로 평가되었다.

(접수일자 : 1997. 8. 26)