

탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 보강성능에 관한 연구

A Study on Structural Performance Evaluation of RC Beams Strengthened with CFRP Plate

김 중 구

Kim, Joong-Koo

요 약

이 연구는 같은 위치에 휨모멘트와 전단력이 최대가 되는 철근콘크리트 보에 대하여 휨모멘트 보강을 실시하는 경우, 탄소섬유판의 두께와 하중점 부위 및 탄소섬유판의 끝부분을 감싸는 탄소섬유슈트의 겹수를 변수로 하여 보의 구조적 거동을 실험하였다.

탄소섬유판의 두께의 증가에 따라 내력이 증가하였으나 선형적으로 비례하지 않았으며, 하중점에 감싼 탄소섬유슈트의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 보강시험의 주된 파괴가 탄소섬유판의 파단이 아닌 하중점 주위에서의 휨-전단균열에서부터 층분리가 시작되었고 하중점을 탄소섬유슈트로 감싼 경우 휨-전단균열 탄소섬유슈트의 바깥 부분으로 이동하기 때문이다. 또한 탄소섬유판 단부에 정착용으로 시공한 탄소섬유슈트는 하중점에서 발생한 취성파괴로 인하여 큰 효과를 나타내지 못하였다.

그러므로 재해상태에 따른 설계방법을 다르게 할 필요가 있으며, 특히 같은 위치에서 휨모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 탄소섬유판의 유효 두께는 최대 0.6mm로 하고 무보강보의 휨모멘트에 대한 보강된 보의 휨모멘트 비는 1.5-2.0으로 제한하는 것이 바람직하며, 0.6mm이상의 탄소섬유판을 사용하기 위하여 탄소섬유슈트로 하중점을 보강하는 경우 무보강보 휨모멘트의 1.5 배가 되는 위치이상 탄소섬유슈트를 연장하는 것이 바람직하다.

키워드 : 탄소섬유판, 탄소섬유슈트, 에폭시 몰탈, 보강, 박리, 휨-전단 균열

1. 서 론

철근콘크리트 부재는 사용하중의 증가, 용도변경, 설계·시공의 오류 등의 여러 가지 복합적 요인으로 인한 성능저하에 의하여 적절한 보수·보강이 필요하다. 이러한 경우 여러 가지 보강 방법이 있으며 1960년 중반에 철판부착공법이 한가지 방법으로 제시되었다. 그러나 철판부착공법은 철판의 부식, 철판이 무게에 의한 시공의 어려움 등 여러 가지 단점으로 인하여 1980년 초반부터 부식에 강하고 시공이 용이한 FRP(Fiber Reinforced Plastic)를 사용한 연구가 시작되었으며 현재 성공적으로 사용되고 있다.¹⁾

국내외에서 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드섬유 등을 이용한 섬유 보강공법의 사용이 증가하고 있으며 특히 탄소섬유를 이용한 다양한 연구²⁾⁻⁴⁾가 실시되고 있다.

보강에 사용되는 탄소섬유는 여러 겹을 차례로 에폭시를 사용

하여 부착하는 슈트 형태와 필요한 두께를 공장에서 제작하고 에폭시 몰탈을 사용하여 부착하는 판 형태가 있다.

후자의 에폭시 몰탈을 이용한 탄소섬유판 보강공법은 여러 번의 함침작업에 의하여 시공되는 탄소섬유슈트공법의 단점을 보완하여 한번에 부착을 시킴으로서 보강의 균질성을 확보하고 또한 공사비를 절감할 수 있다.

보강된 철근콘크리트 부재의 파괴양상은 보강형태와 작용하는 하중의 형태에 따라 판의 인장파괴, 판의 층분리, 접착제의 파괴, 콘크리트의 압축파괴, 등으로 분류할 수 있다.

특히 보의 단부 또는 보가 연결된 거더와 같이 집중하중이 작용하고 탄소섬유판의 두께가 두꺼운 경우 주된 파괴는 휨-전단균열이 발생한 위치에서 탄소섬유판의 박리에 의하여 발생한다.¹⁾²⁾

이 연구에서는 위에서 언급한 것과 같은 경우 탄소섬유판으로 보강된 보에 대한 탄소섬유판의 두께에 따른 휨 보강효과, 하중점과 탄소섬유판의 끝 부분을 감싸는데 따른 보강성능 및 파괴 후 거동 등의 실험결과를 비교, 분석하여 보수·보강 설계 및 시

* 일반회원, 고려정공주식회사 대표이사, 공학박사

공시 고려해야할 사항에 대한 자료를 얻는 것을 목적으로 한다.

2. 기존의 설계방법

탄소섬유를 사용한 보강에 대한 기존의 설계방법은 (1) 보강되지 않은 부재에 대한 검토 (2) 보강량 산정 (3) 보강된 부재에 대한 검토의 순서로 진행된다.

(1)에 대한 검토에서 화재와 같은 탄소섬유의 파괴를 고려하여 무보강부재의 휨에 대한 안전율은 1, 전단에 대한 안전율은 1.2로 하고 있다. (2)에서는 부족한 휨모멘트와 전단력에 대한 보강량을 산정하고 있으며, 무보강부재에 대한 보강부재의 휨 보강률을 2로 제한하고 있다. 또한 (3)에 대한 검토는 휨에 대한 검토, 전단에 대한 검토, 층분리에 대한 검토, 정착에 대한 검토, 사용성에 대한 검토를 요구하고 있다.

특히 층분리를 고려하여 SIKKA⁽³³⁾의 경우 같은 위치에서 휨모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 보강을 제한하고 있고, S&P⁽¹⁴⁾의 경우 탄소섬유의 변형률을 0.6-0.8%로 제한하고 있다.

3. 실험

3.1 시험체 계획 및 제작

시험체는 그림 1과 같이 폭 20cm 길이 30cm 길이 225cm로 계획하였으며, 주근은 2-HD13, 스테리핀은 HD10@100으로 배근하였다. 2장에 언급한 것과 같이 층분리 파괴를 일으키는 경

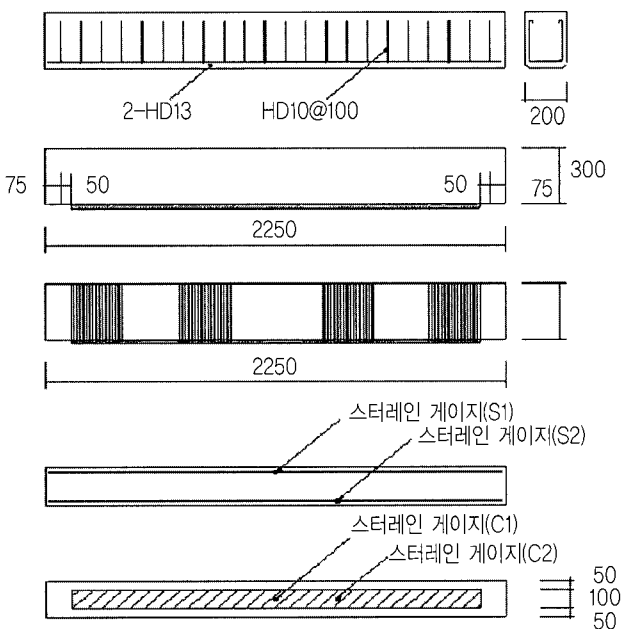


그림 1 보 시험체의 상세도 (단위: mm)

표 1 보 시험체의 변수

시험체	탄소섬유판		탄소섬유쉬트			비고
	두께 (mm)	폭 (cm)	무게 (g/m ²)	폭 (cm)	쉬트 갯수	
BN	—	—	—	—	0	무보강 시험체
B06-1	0.6	10	200	25	1	
B09-2	0.9	10	200	25	2	
B12-2	1.2	10	200	25	2	
B15-3	1.5	10	200	25	3	
B12-0	1.2	10	200	25	0	
B12-1	1.2	10	200	25	1	

* 탄소섬유판의 무게 : 0.6mm:600g/m², 0.9mm:900g/m², 1.2mm:1,200g/m², 1.5mm:1,500g/m²(길이방향)

우 탄소섬유판의 두께에 따른 보강성능을 검토하기 위하여 시험체의 하부에 0.6mm-1.5mm의 탄소섬유판을 부착하였으며, 하중점과 탄소섬유판의 끝 부분을 탄소섬유쉬트로 감싸는 경우의 정착효과를 평가하기 위하여 하중점과 탄소섬유판의 끝 부분에 200g/m²의 탄소섬유쉬트를 각각 0-3장 부착하였다.

스트레인 게이지는 보의 중앙과 하중점의 주근과 탄소섬유판에 각각 부착하였다.

시험체는 총 7개를 제작하였으며, 표 1에 시험체 변수별 상세를 나타내었다.

3.2 사용 재료

휨보강시험체는 설계강도 21Mpa의 레미콘을 타설하였으며 동시에 공시체는 KSF 2405에 따라 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형 공시체 6개를 제작하여 시험체와 동일한 조건으로 양생하였다.

시험체 시험과 동시에 공시체의 압축강도를 측정하였으며 시험당시 공시체의 140일 압축강도는 실험결과 평균 압축강도는 26.9Mpa이었다.

사용된 콘크리트의 압축강도와 탄소섬유판의 역학적 성질은 표 2와 같다.

표 2(a) 콘크리트 압축강도

직경	높이	단면적	파괴하중	압축강도(140일)
10cm	20cm	78.54cm ²	211.3KN	26.9Mpa

표 2(b) 탄소섬유판의 기계적 성능

재료	인장강도	탄성계수	두께
CFRP 판	1.91×10 ⁹ Mpa	1.52×10 ⁵ Mpa	0.6,0.9,1.2,1.5mm

표 2(c) 탄소섬유쉬트의 기계적 성능

재료	인장강도	탄성계수	두께
탄소섬유쉬트	4.22×10 ⁹ Mpa	3.24×10 ⁵ Mpa	0.11 mm

3.3 시험체의 보수·보강

시험체의 보강은 휨보강을 위하여 에폭시몰탈 접착 탄소섬유판 보강공법을, 하중점과 탄소섬유판 끝 부분은 탄소섬유슈트 보강공법을 사용하였으며 그 공정은 다음과 같다.

탄소섬유판 보강은 콘크리트의 보강 면을 그라인더로 모체처리를 한 후 프라이머를 도포하고 보강재인 탄소섬유판의 표면을 신너계로 처리한 후 에폭시몰탈을 일정두께(2mm)로 도포한 후 각각의 변수에 따라 변화를 주어 접착하였다.

탄소섬유슈트 보강은 탄소섬유판 보강이 끝난 후 탄소섬유슈트를 부착할 위치에 대하여 모체처리를 한 후 프라이머를 도포하고 탄소섬유슈트의 겹 수에 따라 에폭시를 도포하고 탄소섬유를 부착한 후 함침을 시켰다.

3.4 시험체 설치 및 가력

시험체는 그림 2와 같이 시험체의 양단부에서 7.5cm 떨어진 위치에 힌지를 설치하여 시험체를 올려놓고, 가력은 층분리 파괴를 일으키기 쉽게 하기 위하여 시험체 위 중앙에서 양쪽으로 35cm 떨어진 곳에 힌지를 각각 설치하여 그 위에 H형강을 올려놓고 2소점 가력을 실시하였다.

가력중심은 추를 띄어 유지하였으며, 시험체의 수평을 유지하기 위해 수평기를 이용하여 보에 편심이 발생하지 않도록 가력하였다.

변위의 측정은 보의 중앙하부와 가력점 하부에 전자식 변위측정기(L.V.D.T)를 설치하여 처짐을 측정하였다.

측정위치와 가력은 Fig. 2와 같으며 하중의 가력은, 유압잭에 의하여 서서히 가력하였으며 최대하중이후 하중의 증가 없이 변위만 증가하면 가력을 중지하였다.

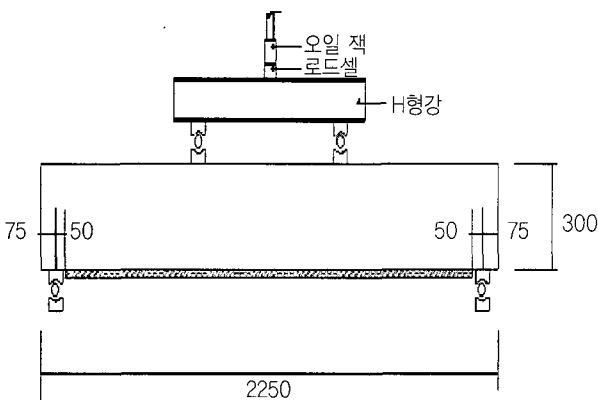


그림 2 시험체 셋업 (단위 : mm)

4. 분석 및 고찰

4.1 파괴양상

무보강시험체의 경우, 전형적인 휨파괴의 양상을 보였으며 최대하중 도달이후 배근된 인장철근에 의해 급격한 취성의 양상을

보이지는 않았다.

보강된 모든 시험체의 경우 휨균열은 시험체의 중앙과 하중점 주위에서 발생하였으며 초기균열 발생전 후에서 하중점 주위를 보강한 탄소섬유슈트에서 파괴음이 들리기 시작하였으며, 90-100KN에서 탄소섬유판의 파괴음이 발생하기 시작하였다. 탄소섬유판의 박리는 하중점 탄소섬유슈트의 단부 방향의 끝에서 발생한 휨균열 주위의 보강재 박리와 동시에 급격한 파괴를 일으켰다. 이와 같이 보강된 부재가 취성파괴를 일으키는 경우 정착용으로 단부에 부착된 탄소섬유슈트는 내력이나 연성을 증가시키는데 크게 기여하지 못하는 것으로 나타났다.

이러한 파괴양상은 탄소섬유판의 두께가 두껍고, 하중점 주위의 탄소섬유슈트의 보강범위가 충분하지 못할 경우 그림 3과 같이 휨-전단균열에 의한 층분리 현상에 의하여 발생하고, 또한 이와 같은 급격한 파괴가 발생하는 경우 단부의 정착보강범위가 충분하지 못하여 발생한 것으로 판단된다.

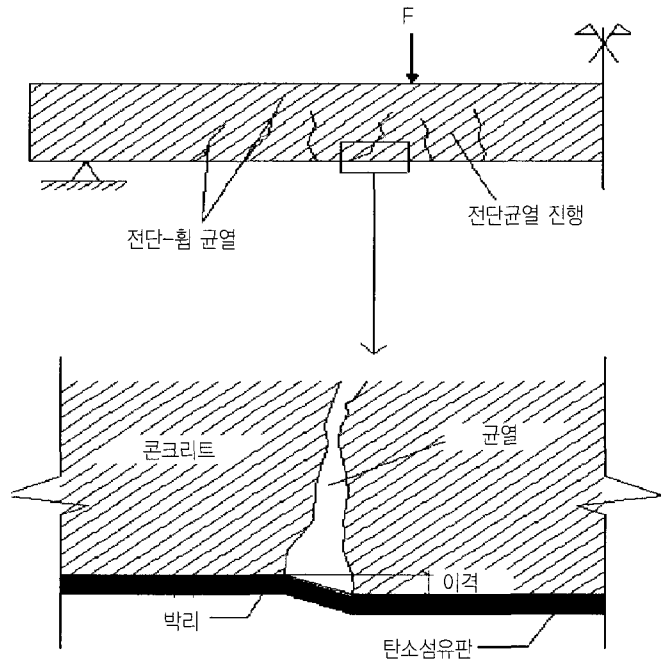


그림 3. 파괴 모드

4.2 균열 및 하중-처짐곡선

시험체 각각의 실험결과를 표 3에 나타냈으며, 보강시험체의 파괴하중은 무보강시험체에 비하여 64.0-99.3% 증가하는 것으로 나타났다. 이 표에 나타낸 초기균열시의 하중 및 처짐은 시험체의 보수·보강과 운반과정에서 중앙부에 미세한 균열이 발생하여, 무보강시험체에서 초기균열 발생 전의 하중-처짐곡선에서 측정된 기울기를 기준으로 하고 각 시험체에서 초기균열 발생 후의 하중-처짐곡선과 만나는 점에서 구하였다.

표 3 시험 결과

시험체	초기균열		최대하중		최대하중의 증가율(%)
	하중 (KN)	처짐 (mm)	하중 (KN)	처짐 (mm)	
BN	23.1	0.51	92.6	14.0	
B06-1	36.1	1.76	151.8	26.3	64.0
B09-2	37.9	1.78	157.6	21.4	70.2
B12-2	42.5	1.88	170.1	18.6	83.8
B15-3	32.1	1.49	179.0	18.8	93.3
B12-0	37.7	1.12	155.0	14.7	67.5
B12-1	32.1	1.61	152.6	16.5	64.9

시험체에 발생한 균열은 표 4 및 그림 4에 나타난 것과 같이 보강시험체의 경우 무보강시험체에 비하여 균열이 분산되었으며, 초기균열의 발생은 무보강시험체에 비하여 현저하게 증가하는 경향을 나타냈으나 탄소섬유판의 보강량과 선형비례관계를 나타내지는 않았다. 여기서 균열의 개수는 탄소섬유를 제외한 부분에서 발생한 균열로 나타났다.

그림 5(a)와 같이 보강된 시험체의 초기 기울기는 무보강시험체가 항복하기 전까지의 기울기와 비슷하나 철근의 항복 후에는 탄소섬유판의 두께가 두꺼울수록 기울기가 가파르게 나타나 증가되는 하중에 따른 처짐을 제어할 수 있어 사용성 향상에 유용한 것으로 나타났다.

그림 5(b)와 같이 탄소섬유쉬트의 겹 수에 따른 기울기 변화는 작았으나 최종 파괴하중은 탄소섬유쉬트의 겹 수가 많을수록 약

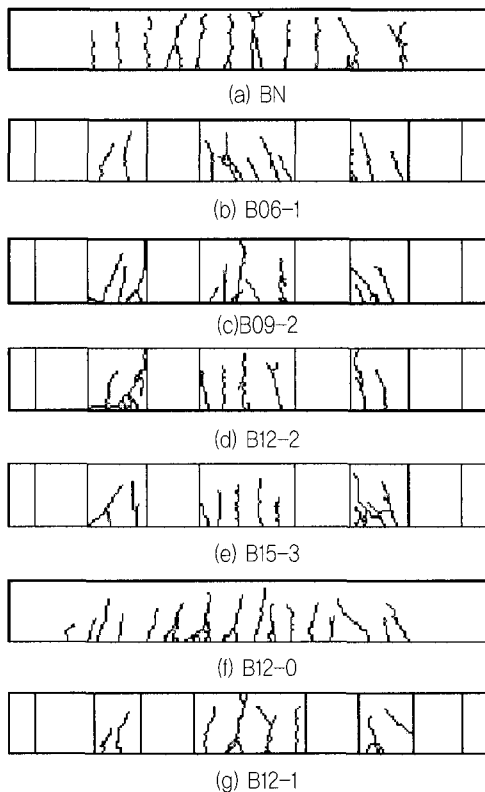


그림 4. 균열 패턴

간 증가하는 경향을 나타냈으며, 최종적으로는 취성적인 파괴양상을 나타냈다.

표 4 균열 갯수

시험체	BN	B06-1	B09-2	B12-2	B15-3	B12-0	B12-1
측면균열	7	10	11	9	10	11	8

표 5 탄소섬유판의 변형률

시험체	증가 모멘트 (KN · m)	실험에 의한 변형률	계산에 의한 응력 (Mpa)	계산에 의한 변형률	계산에 의한
					응력 인장강도
BN	0		-	-	-
B06-1	59.2	0.0072	1314	0.0087	68.7
B09-2	65.0	-	965	0.0064	50.5
B12-2	77.6	0.0056	870	0.0057	45.5
B15-3	86.4	0.0065	779	0.0051	40.7
B12-0	62.5	0.0057	694	0.0046	36.3
B12-1	60.0	0.0059	669	0.0044	34.8

4.4 탄소섬유판의 변형률

시험체의 최대내력 도달이전 중앙부위의 모든 인장철근은 항복하였으며 이후 추가되는 내력은 탄소섬유판이 부담하였다. 시험체의 최대하중에 도달하기 전에 중앙부의 인장철근이 항복하여 철근의 응력-변형률 곡선과 유사한 모습을 보였으며, 인장철근의 항복이후 추가되는 모든 하중을 탄소섬유판이 부담하였으며, 탄소섬유판의 변형률은 시험결과 일부 변형률 측정기가 훼손되었으나 그림 5와 같이 탄소섬유판의 파단 변형률인 0.0126에 도달하기전인 0.0056-0.0072에서 보강재 박리와 동시에 모든 시험체가 파괴되는 결과를 나타냈다.

보강재의 변형률을 이론적으로 계산하기 위하여 베르누이 원리와 철근콘크리트 슬래브와 보강재가 최종적으로 파괴되기 전까지 완전히 부착되어 있다고 가정하였다. 변형률은 0.0044-0.0087로 나타나 측정된 변형률과 비슷하게 계산되었으며 보강재의 물성을 충분히 발휘하지 못한 것으로 나타났다.

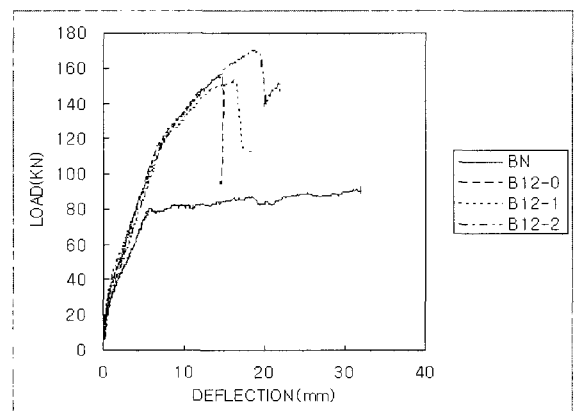


그림 5(a). 다른 겹수의 탄소섬유쉬트로 보강된 보의 하중-처짐 곡선

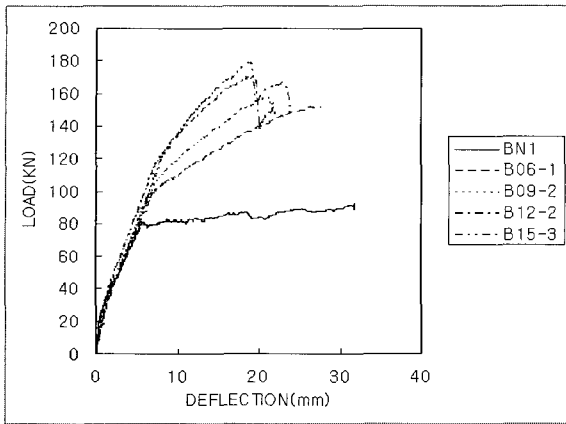


Fig 5(b). 다른 두께의 탄소섬유판과 다른 겹수의 탄소섬유 슈트로 보강된 보의 하중-처짐 곡선

4.5 탄소섬유판 두께의 영향

같은 위치에서 모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 그림 6과 같이 탄소섬유판의 두께에 따라 처짐이 감소하고 내력이 증가하는 양상을 보였으나 내력증가량이 탄소섬유판의 두께에 선형적으로 비례하지는 않은 것으로 나타났다. 이는 하중점에 보강된 탄소섬유슈트에 의한 보강 폭이 충분하지 못하여 주된 파괴가 휨-전단균열이 발생한 위치에서 탄소섬유판이 파단 되기 전에 탄소섬유판과 콘크리트 모체의 층분리에 의하여 발생하기 때문이다.

4.6 탄소섬유슈트 겹 수의 영향

1.2mm 탄소섬유판으로 보강된 보에 탄소섬유슈트 0-2겹을 각각 부착시킨 결과 그림 7에서와 같이 탄소섬유슈트 겹 수의 증가에 따라 내력이 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 하중점에 부착된 탄소섬유슈트의 폭이 충분하지 않아 휨 균열이 탄소섬유슈트 바깥쪽으로 전파되고 이 위치에서 휨-전단균열에 의한 탄소섬유판과 콘크리트 모체의 층분리에 의하여 발생하기 때문이다.

또한 이러한 파괴양상을 보이는 경우 단부 보강효과가 충분히 발휘되지 않는 것으로 나타났다.

4.7 공법 및 설계의 유의사항

주파괴양상이 층분리에 의하여 발생하고 탄소섬유판의 두께 및 탄소섬유슈트의 겹수에 따라 보강효과가 선형적으로 비례하지 않는 것으로 나타나 공법적용 및 설계시 1) 탄소섬유판의 제작 및 시공시 판의 평탄성을 유지하도록 하며 2) 탄소섬유판의 두께에 따라 보강성능을 선형적으로 증가시키지 않고, 최대 보강 두께를 제한하며 3) 탄소섬유슈트에 의한 하중점 보강 및 단

부 정착의 경우 전체적으로 실시하고 단부보강의 경우 보강성능의 증가 보다 보강공법의 내구성 향상에 무게를 두어야 할 것으로 판단된다

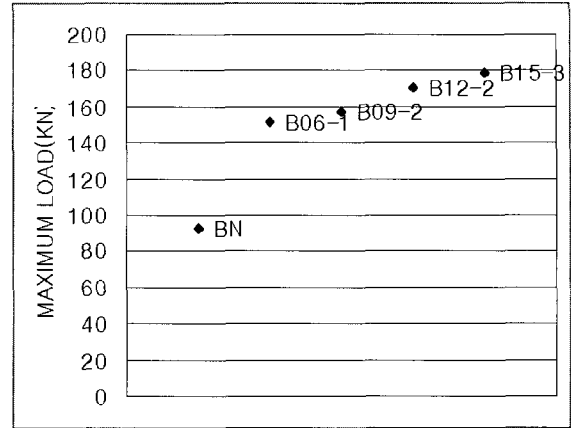


그림 6 다른 두께의 탄소섬유판과 다른 겹수의 탄소섬유 슈트로 보강된 보의 최대하중

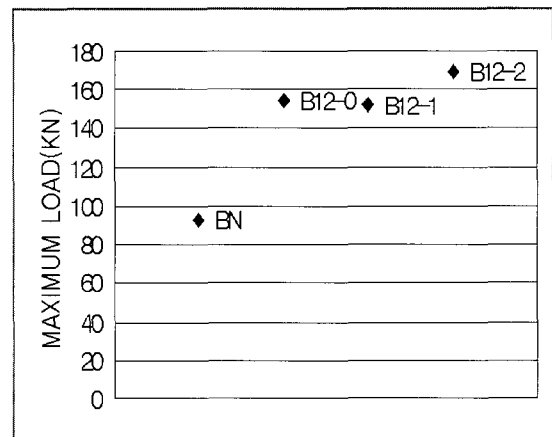


Fig 7 다른 겹수의 탄소섬유슈트로 보강된 보의 최대하중

5. 결론

탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보에 집중하중이 작용하여 같은 위치에서 휨모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우의 휨 보강효과를 파악하기 위하여 실시한 보의 실험결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄소섬유판으로 보강된 모든 보는 무보강시험체와 비교하여 내력증대효과를 나타냈으며 파괴양상은 주로 기력점 부위에 발생한 휨-전단균열에 의한 콘크리트박리(층분리)에 의한 것으로 나타났다.
- (2) 하중점과 단부를 탄소섬유슈트로 보강하는 경우 내력증가에 효과는 있으나 일부분을 보강하는 경우 탄소섬유슈트 바깥쪽으로 균열이 전파되어 충분한 보강효과를 나타내지

못하였다.

- (3) 탄소섬유쉬트로 하중점을 보강하지 않는 경우 탄소섬유판의 두께는 최대 0.6mm로 하고 무보강보의 휨모멘트에 대한 보강된 보의 휨모멘트의 비율은 1.5-2.0으로 제한하는 것이 바람직하다.
- (4) 0.6mm이상의 탄소섬유판을 사용하기 위하여 탄소섬유쉬트로 하중점을 보강하는 경우 무보강보의 휨모멘트에 대한 보강된 보의 휨모멘트 비율이 1.5 되는 위치까지 탄소섬유쉬트를 연장하는 것이 바람직하다.
- (5) 이 실험과 달리 등분포하중을 받는 경우에 대한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) John L., "Alternative Materials for the reinforcement and prestressing of concrete", Blackie Academic & professional, 1993
- 2) 김중구, "탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 슬래브의 파괴", 구조물진단학회지 제3권 제3호, 1999. 7.
- 3) 구은숙, 이현호, 정하선, "CFS의 휨보강성능에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회논문집 제10권 1호, 1998. 2
- 4) 정란, 김성철, 이희경, 유성훈, 김중구, "탄소섬유판을 이용한 철근콘크리트 보의 휨 보강 성능", 구조물진단학회지 제3권 제1호, 1999. 2.
- 5) 건설교통부, "철근콘크리트 구조물의 균열평가 및 제어대

책에 관한 연구, 1997

- 6) 홍상균, 박기철, 정현수, "보강재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨내력보강에 관한 실험적연구", 대한건축학회학술발표논문집 제16권 제2호, 1996. 10. 26
- 7) 김중구, "탄소섬유판으로 보강한 철근콘크리트 슬래브의 파괴", 구조물진단학회지, 제3권 3호, 1999. 7
- 8) Deuring M., "CFRP Laminates in the Construction Industry", EMPA Research Report, Feb. 1994
- 9) Y.N. Ziraba et al. "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates" ACI Structural Journal, Vol.9, No.6, November-December 1994
- 10) Nikolaos Plevris et al. "Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates", Journal of Structural Engineering, July 1995
- 11) Alfarabi Sharif et al. "Strengthening of Initially Loaded R/C Beams Using FRP Plates" ACI Structural Journal V.91, No.2, March-April 1994
- 12) Kaiser, H.P., "Strengthening of reinforced concrete with epoxy-bonded carbon-fibre plastic, Doctoral Thesis, Diss. ETH NO. 8918, 1989, ETH Zurich CH-8092 Zurich, Switzerland
- 13) Sika, "Design Procedure" pp. 1-41
- 14) S&P Clever reinforcement company, "30× less weight than steel for the same tensile force" pp. 1-11

Abstract

Carbon fiber reinforced plastic(CFRP) plate is one of the alternative materials for strengthening of reinforced and prestressed concrete members due to excellent strength and light weight.

In this paper, the behavior of beams strengthened with CFRP plate and CFS(Carbon fiber sheet) is observed and analyzed from the test results. Especially specimens with thick plate is tested when large moment and large shear force appear in same position.

The main failure mode is a peeling-off of the CFRP plate near the loading points due to flexural-shear crack, Because of this failure mode, failure load is not linearly proportional to the thickness of CFRP plates. When beam is wrapped with CFS around only loading point, it does not influence on the failure loads.

Depending on the loading pattern, it is necessary to consider different design criteria for reinforced concrete members with external reinforcement. When large moment and large shear force appear in same location, maximum thickness may limit to 0.6mm and ratio between moment of strengthened beam and moment of unstrengthened beam is proposed 1.5-2.0. In order to use the plate of thicker than 6mm, CFS may be extended to the location which moment of strengthened beam is 1.5 times than moment of unstrengthened beam.

Keywords : beam, CFRP Plate, CFS, epoxy mortar, strengthening, delamination, flexural-shear crack