

탄소섬유판으로 보강한 철근콘크리트 슬래브의 파괴

Failure of RC Slabs Strengthened with CFRP Plate

김종구*

Kim, Joong-Koo

Abstract

Carbon fibre 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 slabs strengthened with CFRP plate 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 failure mode is a peeling-off of the CFRP plate due to flexural-shear crack. This is observed near the loading points with thick plates. Because of this failure mode, thickness of CFRP plates 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 slab and moment of unstrengthened slab is proposed 1.5-2.0.

Key words : slab, CFRP Plate, epoxy mortar, strengthening, delamination, flexural-shear crack

1. 서 론

철근콘크리트 부재는 사용하중의 증가나 용도 변경 또는 철근의 부식, 설계·시공의 오류 등의 여러 가지 복합적 요인으로 인하여 강도 또는 강성을 증진시키기 위한 보강이 필요하게 된다.

* 정회원, 한국안전진단기술연구소 소장, 공학박사

주어진 구조물의 형태와 주위 여건에 따라 여러 가지 보강방법이 있으며, 철판부착공법이 1960년 중반에 한가지 방법으로 제시되었다. 그러나 철판 부착공법은 시공상의 어려움과 철판의 부식 등의 단점이 조사되어 1980년 초반부터 탄소섬유시트(carbon-fibre reinforced plastic

● 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

sheet)를 사용한 연구가 시작되었으며 현재 성공적으로 사용되고 있다⁽¹⁾.

또한 탄소섬유 쉬트 대신 탄소섬유 판을 (CFRP Plate)을 사용하고 접착제로 예폭시 몰탈을 이용한 탄소섬유 판 보강 공법이 사용되고 있다. 탄소섬유 판은 일반적으로 플루트루션(Pultrusion)에 의하여 공장 생산이 이루어지고 현장 시공은 여러 번의 함침작업에 의하여 시공되는 탄소섬유 쉬트 공법의 단점을 보완하여 한번에 부착을 시킴으로서 보강의 균질성을 확보하고 또한 공사비를 절감할 수 있다.

탄소섬유 판으로 보강된 부재의 파괴 형태는 탄소섬유 판의 두께, 보강 길이 등의 보강 형태와 하중 상태에 따라 판의 인장파괴, 판의 충분리, 접착제의 파괴, 콘크리트의 압축파괴, 등으로 분류할 수 있다. 특히 슬래브의 단부 또는 슬래브 상부에 집중하중이 작용하는 경우처럼 같은 위치에서 모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 주된 파괴는 휨-전단균열이 발생한 위치에서 탄소섬유 판의 밖리에 의하여 발생한다⁽²⁾.

국내외에서 다양한 연구^{(3)~(11)}가 실시되고 있으며 이 연구에서는 위에서 언급한 것과 같은 경우 탄소섬유 판으로 보강된 슬래브에 대한 휨 보강 효과, 보강 성능 및 파괴 후 거동 등의 실험 결과를 비교, 분석하여 보수·보강 설계 시 고려해야 될 사항에 대한 자료를 얻는 것을 목적으로 한다.

2. 기존의 설계방법

탄소섬유를 사용한 보강에 대한 기존의 설계방법 중 휨보강을 위한 고려사항은 다음과 같이 분류할 수 있다.

1. 휨 설계(Design for flexure)
2. 충분리 설계(Design for delamination)
3. 정착설계(Design for anchorage)

위와 같은 설계과정 중에서 화재가 발생한 경우와 같이 탄소섬유의 파괴를 고려하여 사용하중에 대한 무보강부재의 안전율을 1로 제한하고 있다.

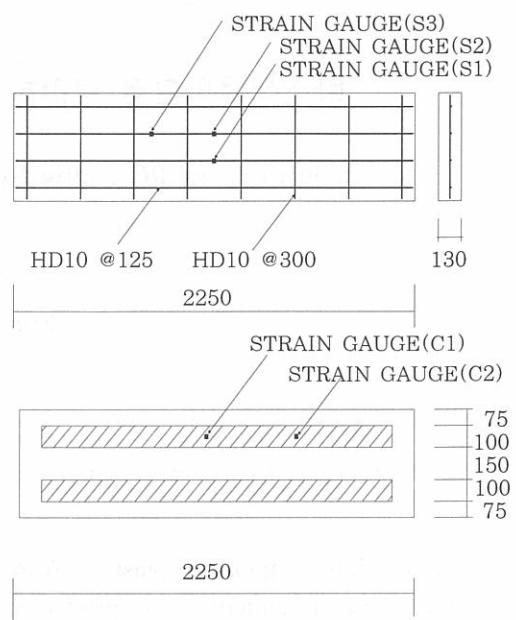


Fig. 1 Details of test slab (unit :mm)

그리고 SIKA⁽¹²⁾의 경우 같은 위치에서 휨모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 보강을 제안하고 있고, S&P⁽¹³⁾의 경우 무보강부재에 대한 보강부재의 안전율을 2로 탄소섬유의 변형률을 0.6~0.8%로 제한하고 있으며, 이러한 제한은 주로 충분리를 방지하기 위한 것이다.

3. 실험

3.1 시험체 계획 및 제작

시험체는 2장에서 언급한 것과 같이 충분리 파괴를 일으키는 경우 탄소섬유 판의 두께에 따른 영향을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 폭 50cm 길이 225cm 두께 13cm로 계획하였으며, 주근은 HD10 @ 125, 부근은 HD10 @ 300로 배근하였다. 스트레인 게이지는 슬래브의 중앙과 하중 점 위치의 주근과 탄소섬유 판에 각각 부착하였다.

시험체는 총 5개를 제작하였으며, Table 1에 시험체 변수별 상세를 나타내었다.

Table 1. Details of test slabs

Specimens	CFRP length (cm)	CFRP thickness (mm)	CFRP width (cm)	Remarks
SN	—	—	—	control slab
S06	200	0.6	10	
S09	200	0.9	10	
S12	200	1.2	10	
S15	200	1.5	10	

* Weight of CFRP : 0.6mm:600g/m²,
0.9mm:900g/m², (longitudinal direction)
1.2mm:1,200g/m², 1.5mm:1,500g/m²

Table 2(a). Compressive strength of concrete

Diameter	Height	Cross-section area	Failure load	Compressive strength(140D)
10cm	20cm	78.54cm ²	21.55ton	274kg/cm ²

Table 2(b). Mechanical properties of CFRP Plate

Material	Tensile strength	Modulus of elasticity
CFRP	1.95×10^4 kg/cm ²	1.55×10^6 kg/cm ²

3.2 사용 재료

휨보강시험체는 배합강도 210kg/cm²의 레미콘을 타설하였으며 동시에 공시체는 KSF 2405에 따라 지름 10cm, 높이 20cm의 원주형 공시체 6개를 제작하여 시험체와 동일한 조건으로 양생하였다.

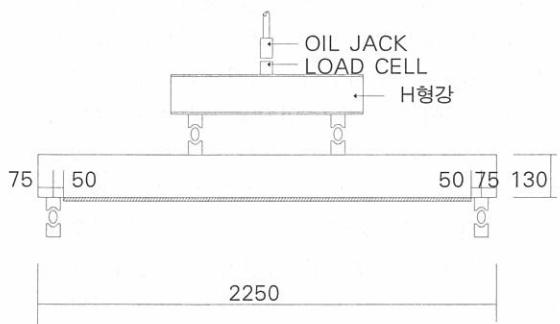


Fig. 2 Test set-up(unit : mm)

시험체 시험과 동시에 공시체의 압축강도를 측정하였으며 시험당시 공시체의 140일 압축강도는 실험결과 평균 압축강도가 274kg/cm²이었다. 사용된 콘크리트의 압축강도와 탄소섬유판의 역학적 성질은 Table 2와 같다.

3.3 시험체의 보수·보강

시험체의 보강은 에폭시몰탈 접착 탄소섬유판보강공법으로 공정은 다음과 같다. 콘크리트의 보강면을 그라인더로 모체처리를 한 후 프라이머를 도포하였다. 보강재인 탄소섬유판의 표면을 신너계로 처리한 후 에폭시몰탈을 일정두께(2mm)로 도포한 후 각각의 변수에 따라 변화를 주어 접착하였다.

3.4 시험체 설치 및 가력

시험체는 Fig. 2와 같이 시험체의 양단부에서 7.5cm 떨어진 위치에 힌지를 설치하여 시험체를 올려놓고, 가력은 충분히 파괴를 일으키기 쉽게 하기 위하여 시험체 위 중앙에서 양쪽으로 35cm 떨어진 곳에 힌지를 각각 설치하여 그 위에 H형강을 올려놓고 2소점 가력을 실시하였다. 가력중심은 추를 띠어 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 최대하중 이후 하중의 증가 없이 변위만 증가하거나 급작스러운 하중감소가 발생하면 가력을 중지하였다.

4. 분석 및 고찰

4.1 파괴양상

무보강시험체의 경우, 전형적인 휨파괴의 양상

을 보였으며 최대하중 도달 이후 배근된 인장철근에 의해 급격한 취성의 양상을 보이지는 않았으나, 보강된 모든 시험체는 휨 균열의 발생 후 최대하중에서 보강재 박리와 동시에 하중점에서 급격한 파괴를 일으켰다.

파괴양상은 박리 전 보강재와 모체의 접착부분에서 소리가 발생하였으며 Fig. 3과 같이 휨-전단균열에 의한 충분리 현상 후 급격한 파괴를 보였다. 따라서 보강재의 두께에 따라 내력의 증가는 뚜렷이 나타나지 않았다.

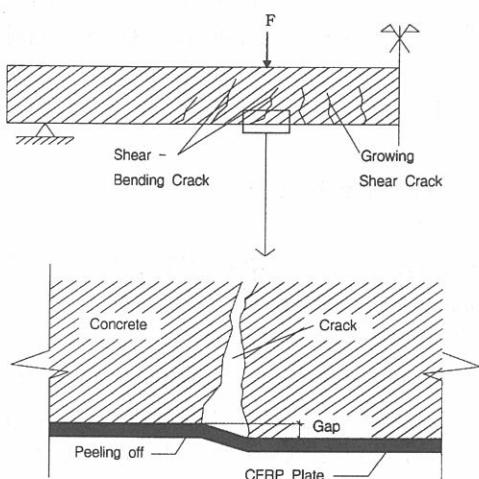


Fig. 3 Failure mode

4.2 균열 및 하중-처짐곡선

시험체 각각의 실험결과는 Table 3에 나타냈으며 초기균열은 무보강시험체에서 초기균열 발생 전의 하중-처짐곡선에서 측정된 기울기를 기

Table 3. Test results

Specimens	First crack		Maximum load		Failure mode
	load (ton)	defl. (mm.)	load (ton)	defl. (mm.)	
SN	1.42	1.53	3.65	47.3	
S06	2.33	2.99	8.55	36.0	peeling-off
S09	1.89	2.22	8.81	37.1	peeling-off
S12	2.82	3.33	8.69	37.3	peeling-off
S15	2.42	2.44	11.48	29.5	peeling-off

준으로 하고 각 시험체에서 초기균열 발생 후의 하중-처짐곡선과 만나는 점에서 구하였다.

시험체에 발생한 균열은 Fig. 4 및 Table 4에 나타난 것과 같이 보강시험체의 경우 무보강시험체에 비하여 현저하게 균열이 분산되었으나, 초기 균열의 발생은 탄소섬유판의 보강량과 비례관계를 나타내지는 않았다. 여기서 하부균열의 개수는 탄소섬유를 제외한 부분에서 발생한 균열의 평균으로 나타냈다.

Fig. 5와 같이 보강된 시험체에서 하중이 증가함에 따른 상당한 처짐이 발생하여 일부 에너지 흡수능력이 있는 것으로 판단되나, 최종적으로는 취성적인 파괴양상을 나타냈다. 또한 하중의 증가에 따른 처짐을 제어할 수 있어 사용성 향상에 유용한 것으로 나타났다.

이 실험에서 최대하중은 1.5mm 탄소섬유판에서는 높게 나타났으나 나머지 0.6, 0.9, 1.2mm의 탄소섬유판으로 보강된 시험체에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 보강시험체가 휨-전단균열에 의한 충분리 현상에 의하여 파괴되었으므로 큰 차이를 나타내지 않은 것으로 나타났다.

4.3 탄소섬유판의 변형률

보강에 사용된 탄소섬유판의 파단시 변형률은 0.0126이다. 이것은 콘크리트 파괴시 변형량(0.003)에 비하여 4.2배, 철근의 항복강도시 변형률(0.002)에 6.3배이다.

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 탄소섬유판의 파단 변형률인 0.0126에 도달하기전인 0.0052-0.0074에서 보강재 박리와 동시에 모든 시험체가 파괴되는 결과를 나타냈다.

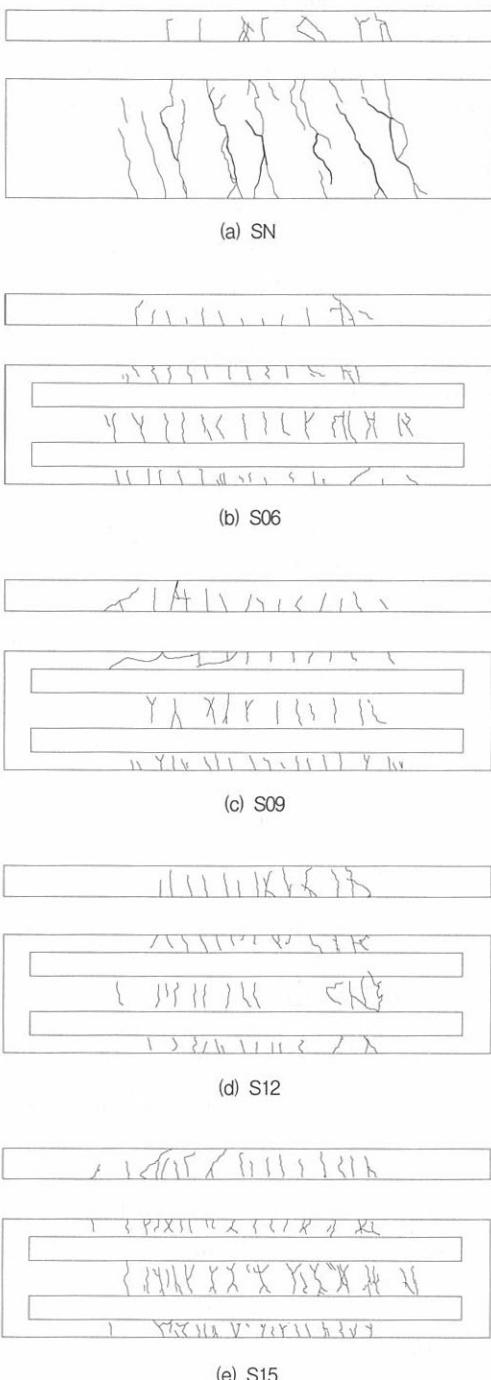


Fig. 4 Crack Pattern

Table 4. Number of cracks

Specimens	SN	S06	S09	S12	S15
Side crack	7	12	14	13	16
Bottom crack	9	16	13.7	13	17.3

Table 5. Strain of CRRP Plate

Specimens	Increasing moment (t · m)	Strain by test	Stress by calculation (ton/cm ²)	Strain by calculation	Stress by calculation
				Tensile strength (%)	Tensile strength (%)
SN	0	-	-	-	-
S06	1.72	0.0074	12.36	0.0079	63.4
S09	1.81	-	8.70	0.0057	44.6
S12	1.76	-	6.37	0.0041	32.7
S15	2.74	0.0052	8.14	0.0053	41.8

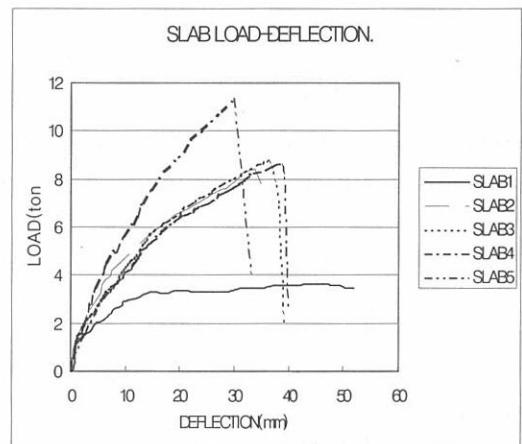


Fig. 5 Load-deflection Curve

또한 보강재의 변형률을 이론적으로 계산하기 위하여 베르누이원리와 철근콘크리트 슬래브와 보강재가 최종적으로 파괴되기 전까지 완전히 부착되어 있다고 가정하였다. 변형률은 0.0041-0.0079로 나타나 보강재의 물성을 충분히 발휘하지 못한 것으로 나타났다.

4.4 탄소섬유판 두께의 영향

이 실험결과 같은 위치에서 모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 탄소섬유판의 두께에 따른 영

향은 크지 않은 것으로 나타났으며 이는 주된 파괴양상이 휨-전단균열이 발생한 위치에서 탄소섬유판이 파단되기 전에 탄소섬유판과 콘크리트 모체의 충분리에 의하여 발생하기 때문이다.

5. 결 론

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

(1) 탄소섬유판으로 보강된 모든 휨부재는 무보강시험체와 비교시 내력증대효과를 나타냈으며 파괴양상은 주로 가력점 부위에 발생한 휨-전단균열에 의한 콘크리트박리(충분리)에 의한 것으로 나타났다.

(2) 위와 같이 충분리 현상에 의한 파괴양상을 나타냈으므로 0.6mm이상의 탄소섬유판을 사용하는 경우 두께에 따른 내력의 차이는 뚜렷이 나타나지 않았다.

(3) 같은 위치에서 휨모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 탄소섬유판의 두께는 최대 0.6mm로 하고 무보강슬래브의 휨모멘트에 대한 보강된 슬래브의 휨모멘트는 1.5-2.0으로 제한하는 것이 바람직하다.

(4) 이 실험과 달리 등분포하중을 받는 경우에 대한 검정이 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 신원건축크리닉의 연구비 지원으로 수행된 연구로서, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- John L., "Alternative Materials for the reinforcement and prestressing of concrete",

Blackie Academic & professional, 1993

- 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
- 구은숙, 이현호, 정하선, "CFS의 휨보강성능에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집 제10권 1호, 1998(2)
- 정란, 김성철, 이희경, 유성훈, 김중구, "탄소섬유판을 이용한 철근콘크리트 보의 휨 보강 성능", 구조물진단학회지, 1999. 2.
- 건설교통부, "철근콘크리트 구조물의 균열평가 및 제어대책에 관한 연구", 1997
- 정란, 이영재, 문희중, 이경언, 정상진, "재하상태에서 보강된 철근콘크리트 보의 보강재료에 따른 구조적 거동", 한국콘크리트학회논문집 제11권 제1호, 1999. 2
- 홍상균, 박기철, 정현수, "보강재를 사용한 철근콘크리트 보의 휨내력보강에 관한 실험적연구", 대한건축학회학술발표논문집 제16권 제2호, 1996. 10. 26
- Deuring M., "CFRP Laminates in the Construction Industry", EMPA Research Report, Feb. 1994
- 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
- Nikolaos Plevris et al. "Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates", Journal of Structural Engineering, July 1995
- Alfarabi Sharif et al. "Strengthening of Initially Loaded R/C Beams Using FRP Plates" ACI Structural Journal V.91, No.2, March-April 1994
- Sika, "Design Procedure" pp. 1-41
- S&P Clever reinforcement company, "30× less weight than steel for the same tensile force" pp. 1-11

요 약

이 연구는 탄소섬유판공법을 사용하여 보강된 철근콘크리트 슬래브에 집중하중 즉 같은 위치에서 휨모멘트와 전단력이 동시에 최대가 되는 경우에 대하여 탄소섬유판의 두께를 변수로 하여 슬래브의 구조적 거동을 실험하였다.

탄소섬유판의 두께에 따른 내력의 차이는 뚜렷이 나타나지 않았으며 이는 보강시험의 주된 파괴가 탄소섬유판의 파단이 아닌 하중점 주위에서의 휨-전단균열에서부터 충분리가 시작되기 때문이다.

그러므로 재하상태에 따른 설계방법을 다르게 할 필요가 있으며, 특히 같은 위치에서 휨모멘트와 전단력이 최대가 되는 경우 탄소섬유판의 두께는 최대 0.6mm로 하고 무보강슬래브의 휨모멘트에 대한 보강된 슬래브의 휨모멘트는 1.5-2.0으로 제한하는 것이 바람직하다.

(접수일자 : 1999. 9. 16)