

탄소섬유판으로 보강된 RC부재의 부착길이 변화에 따른 파괴모드 및 휨 보강성능

Failure Mode and Flexural Performance of RC Beams Strengthened with Different Bond Length of CFRP Strips

최기선*
Choi, Ki Sun

유영찬**
You, Young Chan

김금환***
Kim, Keung Hwan

ABSTRACT

The one of the commonly reported failure mode of the RC beam strengthened with FRP was caused by the separation of the concrete cover, so called delamination. Therefore, ACI440 recommended that concrete cover delamination can be prevented in strengthened beams if bond length of FRP composite be extended over a point of cracking moment. In this study, the failure mode and the flexural performance of RC beam with different bond length of FRP are estimated. Each bonded length is calculated based on the point of cracking moment with addition or subtraction of specific length(=150mm).

The results of this study show that mid-span debonding occurs in the specimen strengthened with CFRP strips which are bonded over the point of cracking moment, while concrete cover delamination occurs at the termination point of CFRP in the specimen with less bonded length than the point of cracking moment region.

1. 서론

통상적으로 FRP를 이용한 보강공법에서는 에폭시 수지를 접착제로 사용하여 RC부재와 FRP가 일체로 거동하도록 하며, 궁극적으로 FRP가 극한 재료강도에 이르러 파단될 때까지의 충분한 부착력을 확보하도록 부착길이를 산정한다. 이와 같은 방법에 기초하여 일본토목학회²⁾에서는 탄소섬유쉬트와 콘크리트와의 부착강도를 $\tau_f = 0.44\text{MPa}$ 로 가정하고, 부착길이를 산정하도록 제안하였다. 그러나 FRP복합체로 보강된 부재의 파괴양상에 대한 실험적·이론적 고찰로부터 단순히 부착길이로부터 얻어지는 부착력만으로는 FRP복합체의 파단시까지 충분한 부착성능을 유지하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 휨 부재의 곡률관계 및 균열 폭, 전단변형 등에 의해 FRP복합체를 부재로부터 박리시키는 수직응력이 발생하며, 이에 대하여 FRP는 매우 취약한 것으로 나타나고 있다. 따라서 현행 설계지침에서는 FRP복합체의 부착길이에 대한 규정을 단부탈락을 방지하기 위하여 일정길이를 확보하는 개념으로 한정하고 있다. 본 연구에서는 현행 설계지침에서 제시하는 부착길이를 근거로 부착길이를 변화시켜 실험을 수행함으로써 FRP복합체의 부착길이에 따른 보강부재의 파괴양상을 분석하고, 휨 보강성능에 미치는 영향을 파악하도록 하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 건축·도시연구부 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원, 건축·도시연구부 수석연구원, 공학박사

*** 정회원, 한국건설기술연구원, 건축·도시연구부 연구위원, 공학박사

2. 연구내용 및 방법

FRP 복합체의 박리파괴는 중앙부의 휨-전단균열로부터 발생되므로 일정길이 이상의 부착길이를 확보한 상태에서는 부착력의 부족에 의한 박리파괴는 발생하지 않는다. 그러나 FRP의 부착길이가 부재의 전단스팬 내에서 짧게 부착될 경우, 휨 모멘트에 의해 발생된 FRP의 인장력은 보강재 단부를 부재로부터 탈락시키는 힘으로 작용하며, 이러한 인장응력과 전단응력의 복합응력이 경사균열을 촉발하여 단부 탈락을 유발할 수 있는 것으로 보고되고 있다³⁾. 특히 단부탈락에 의한 파괴는 보강재 단부에서 발생하는 휨 균열로부터 시작되기 때문에 ACI440¹⁾에서는 부재의 길이방향으로 균열 모멘트 구간 지점으로부터 일정길이 이상으로 FRP 복합체의 부착길이를 연장할 경우 단부탈락에 의한 파괴를 방지할 수 있는 것으로 제안하고 있다. 이와 같은 분석에 따라 본 연구에서는 보강된 부재에 최대모멘트가 작용할 때, 균열모멘트 지점을 기준으로 FRP의 부착길이를 변화시킨 실험체를 계획하여 부착길이 변화에 따른 파괴모드의 변화와 휨 보강성능을 실험적으로 파악하도록 하였다.

3. 실험

실험체 제작에는 설계압축강도 30MPa의 레미콘을 사용하였으며, 인장, 압축 및 전단철근은 항복강도가 400MPa인 D10, D13 철근을 사용하였다. 보강재는 1방향 탄소섬유판을 사용하였으며, 동일회사의 예폭시 수지를 이용하여 보강하였다. 실험체의 단면치수는 200×300mm로 인장축과 압축축 피복두께를 30mm로 하였으며, 지점간 거리 3,000mm, 전체 실험체 길이는 3,400mm로 계획하였다. 압축철근은 2-D10, 인장철근 3-D13으로 배근하였다. 실험체는 기준실험체를 포함하여 총 4개를 계획하였다. 단부 부착길이의 영향을 검토하기 위한 실험체는 탄소섬유판 2매를 폭방향으로 보강한 실험체를 대상으로 하였으며, 그림 1과 같이 보강된 부재의 최대내력이 작용할 때 균열모멘트 지점까지 보강한 실험체와 균열모멘트 지점보다 짧게 부착한 실험체 및 지점부로 길게 부착한 실험체를 계획하였다. 대표적인 실험체의 형상 및 치수를 나타내면 그림 2와 같다. 휨 보강성능 실험은 250kN 용량의 Actuator로 4점 재하하였으며, 변위 및 변형률의 측정 부위는 최대모멘트가 발생하는 중앙부에서 측정하였으며, 콘크리트 압축연단, 인장·압축주근 및 탄소섬유판의 변형률을 측정하였다.

표 1 실험체 상세 제원

실험체명	FRP 종류	n (ply)	t_f (mm)	l_f (mm)	ρ_s	비고
SCON-L	-	-	-	-	0.0076	$A_s=3-D13$
SFCP2-L	CFRP plate	2	1.2	2,850	0.0076	$A_s=3-D13$
SFCP2-L1				2,600	0.0172	$A_s=3-D19$
SFCP2-L2				2,300	0.0232	$A_s=3-D22$

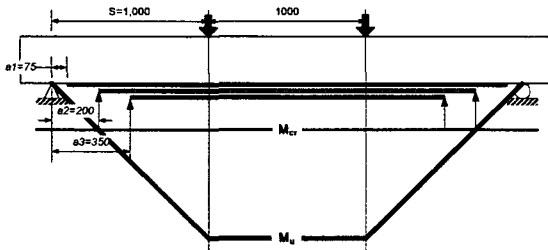


그림 1 부착길이 변수

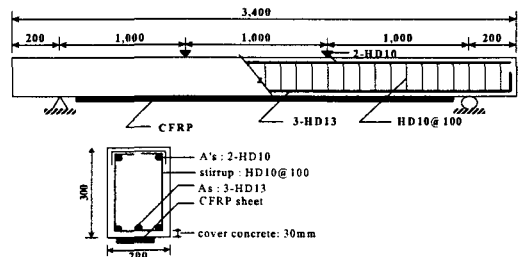


그림 2 실험체 형상 및 치수

4. 실험결과

4.1 파괴유형

탄소섬유판으로 보강된 부재에서 탄소섬유판의 부착길이에 따른 파괴양상을 나타내면 그림 3과 같다. 탄소섬유판의 부착길이를 균열모멘트 지점과 동일하거나 그보다 길게 부착한 실험체는 그림 3(a)와 같이 가력점에서 발생한 박리가 단부로 진행되면서 최종파괴되었으며, 탄소섬유판의 단부에는 휨균열이 발생하지 않았다. 반면, 탄소섬유판의 부착길이를 균열모멘트 지점보다 짧게 부착한 실험체는 그림 3(b)와 같이 보강재 단부에서 발생된 휨 균열이 콘크리트 인장주근을 따라 확장되었으며, 피복 콘크리트가 탈락되는 파괴양상이 나타났다.

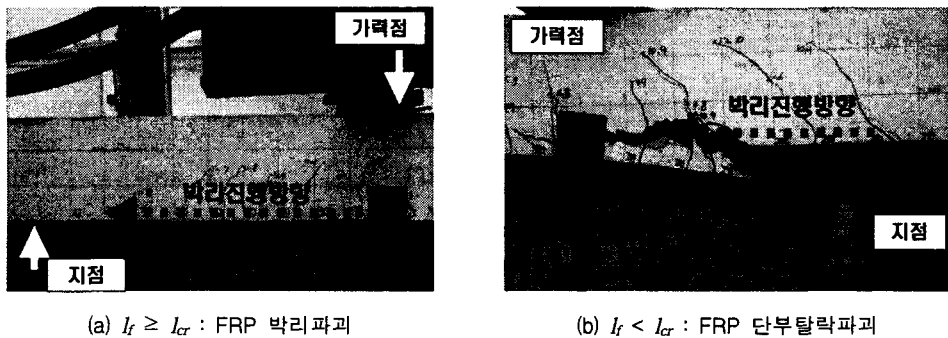


그림 3 탄소섬유판 부착길이에 따른 파괴양상

4.2 하중-변위 관계

탄소섬유판 2매를 보강한 실험체에서 탄소섬유판의 부착길이를 변수로 수행한 실험결과의 하중-변위 관계를 나타내면 그림 4와 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 최대하중은 탄소섬유판의 부착길이에 관계없이 비교적 유사하게 나타났지만 보강효과가 상실되는 시점으로부터 구한 탄소섬유판의 순수 보강성능(P)은 탄소섬유판의 단부탈락이 발생한 SFCP2-L2 실험체에서 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 보강재의 부착길이를 균열모멘트 지점 이상으로 확보하였을 경우 박리파괴가 발생하며, 부착길이에 관계없이 FRP 복합체의 보강성능은 동일한 것으로 나타났다. 따라서 탄소섬유판으로 휨 보강된 부재에서는 현행 설계지침에서 제안하고 있는 균열모멘트 구간 이상으로 부착길이를 확보할 경우 탄소섬유판의 단부탈락에 의한 파괴는 방지할 수 있을 것으로 판단되며, 이때 부착길이에 따른 보강성능의 저하는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

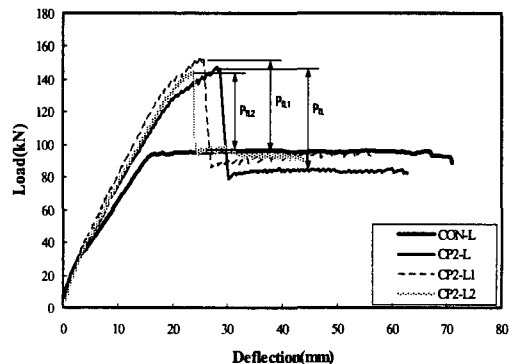


그림 4 하중-변위 곡선

4.3 탄소섬유판의 유효변형률

본 연구의 하중-변위관계에서 구한 탄소섬유판의 순수 보강성능(P)으로부터 탄소섬유판의 유효변형률을 계산하면 표 2와 같다. 탄소섬유판으로 보강된 실험체에서 부착길이를 균열모멘트 구간 이상으로 확보한 실험체에서는 계산된 유효변형률이 거의 동등한 것으로 나타났다. 반면 탄소섬유판이 균열

모멘트 구간 이하로 부착되어 탄소섬유판의 단부탈락이 발생한 실험체는 탄소섬유판의 유효변형률이 0.0048로 크게 감소한 것을 알 수 있다.

이와 같이 FRP 복합체로 보강된 부재에서 부착길이가 보강성능에 미치는 영향은 부착길이에 따른 파괴양상으로 설명될 수 있다. 즉 양단부의 균열모멘트 구간을 기준으로 부착길이의 확보 여부에 따라 FRP 복합체의 박리파괴와 단부탈락파괴로 구분되며, FRP 복합체의 박리파괴에서는 부착길이에 따른 보강성능의 차이가 발생하지 않는 것으로 판단된다. 그러나 균열모멘트 구간보다 짧게 부착된 실험체에서는 FRP 복합체의 단부탈락에 의한 파괴가 발생되며, 박리파괴에 비하여 보강성능은 감소되는 것으로 나타났다.

표 2 탄소섬유판의 부착길이에 따른 실험결과

실험체명	Yield		Ultimate			P _{fail}	ε _{fc}	파괴양상
	P _y	δ _y	P _u	δ _u	ε _{fu}			
SCON-L	94.2	16.3	95.3	26.7	-	-	-	휨파괴
SFCP2-L	123.1	18.8	147.9	28.2	0.0054	82.3	0.00667	중앙부박리
SFCP2-L1	136.8	19.2	152.6	25.1	0.0051	88.2	0.00654	중앙부박리
SFCP2-L2	137.1	21.2	144.0	23.4	0.0040	96.1	0.00481	단부탈락

5. 결 론

탄소섬유판의 단부 부착길이를 변수로 한 RC보에 대한 보강성능 실험으로부터 다음과 같은 결론은 얻었다.

- 탄소섬유판으로 휨 보강된 부재에서는 양단부의 균열모멘트 구간을 기준으로 부착길이의 확보 여부에 따라 탄소섬유판의 박리파괴와 단부탈락파괴로 구분되며, 균열모멘트 구간보다 짧게 부착된 경우에는 단부탈락에 의한 파괴가 발생되고, 박리파괴에 비하여 보강성능은 감소한다.
- 탄소섬유판으로 휨 보강된 부재에서 균열모멘트 구간 이상으로 탄소섬유판을 부착할 경우 박리파괴가 발생하며, 이때 부착길이가 증가하여도 탄소섬유판의 보강성능은 동일한 것으로 나타났다.
- 탄소섬유판으로 휨 보강을 실시할 경우 현행설계지침에서 제시하는 부착길이는 단부탈락을 방지할 수 있는 상제로서 타당성이 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출원하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004 건설기술기반구축사업 R&D/2004 기반구축 A13 “시설물 보강공법 성능인증을 위한 시험항목·방법 및 평가기준 설정 연구”의 일부로서, 관계제위께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- ACI 440. 2R-02 “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, ACI Committee 440
- 土木學會コンクリト委員會, 콘크리트構造物の補強指針(案), 土木學會, 1999, pp94
- Wendel M. Sebastian, “Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams” Journal of Structural Engineering, July 2001., pp792-798
- 한국건설기술연구원(2006), 시설물 보강공법 성능인증을 위한 시험항목·방법 및 평가기준 설정 연구.