

아라미드섬유쉬트로 휨 보강된 RC보의 부착파괴 방지에 관한 실험적 연구

An Experimental Study to Prevent Debonding Failure of RC Beams Strengthened by AFRP Sheet

최기선* 유영찬** 김금환***
Choi, Ki-Sun You, Young-Chan Kim, Keung-Hwan

Abstract

This study investigated the failure mechanism of RC beams strengthened with AFRP sheets. Total 5 half-scale RC beams were constructed and tested to estimate the effectiveness of various methods to prevent the debonding failure of AFRP sheets. From the experimental results, it was found that increasing bonded length or end U-wrappings does not prevent debonding failure. On the other hand, the beams with center U-wrappings and shear-keys reached the ultimate state with their sufficient performance. The center U-wrappings tended to control debonding of the longitudinal AFRP sheets because the growth of the longitudinal cracks along the edges of the composites was delayed. In case of shear-keys, it was sufficient to eliminate debonding and the beams failed by AFRP sheets rupture due to the sufficient bond mechanism.

요 지

본 연구에서는 아라미드섬유쉬트로 휨 보강된 RC 보의 파괴양상을 분석하고, 부착파괴를 방지하기 위한 실험연구를 수행하였다. 아라미드섬유쉬트의 부착파괴 방지상세에 대한 효과를 검증하기 위하여 총 5개의 실험체를 제작·실험하였다. 분석결과에 의하면 기존에 사용되어온 단순부착식이나 단부 U보강상세를 적용한 실험체는 아라미드섬유쉬트의 재료변형률보다 낮은 변형률에서 부착파괴되는 것으로 나타났다. 반면 본 연구에서 제안한 중앙부 U보강상세와 에폭시 전단키를 적용한 실험체는 아라미드섬유쉬트의 부착파괴를 억제함으로써 충분한 보강성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

Keywords : AFRP, Debonging failure, U-wrapping, Epoxy shear-key

핵심 용어 : 아라미드섬유쉬트, 부착파괴, U보강, 에폭시 전단키

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원, 공학박사

*** 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원, 공학박사

E-mail : ck-suny@kict.re.kr 031-910-0716

•본 논문에 대한 토의를 2007년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

FRP 복합체를 이용한 구조물의 휨 보강은 국내·외적으로 다양한 연구와 폭넓은 고찰을 바탕으로 이미 보편화되고 있으며, 각국의 학회와 전문기관을 중심으로 FRP보강공법에 관련된 설계지침(안)이 발표(6)(7)(15)(17)(18)(23)되고 있다. 이들 설계지침(안)의 공통적인 설계방법은 FRP복합체로 보강된 휨 부재를 파괴모드별로 구분하여 설계하는 것이다. 즉, 철근콘크리트 부재와 보강재 사이의 완전합성거동을 유지한 상태에서 극한하중에 도달하는 파괴와 FRP복합체가 극한응력에 도달하지 못하고 부재로부터 탈락 혹은 박리되는 부착파괴로 구분하고 있다. 이때 완전합성거동에 의한 파괴는 RC보를 구성하는 압축콘크리트 혹은 인장재인 FRP복합체가 극한응력에 도달하여 파괴되는 형태이므로 변형률적합조건과 힘평형조건을 이용하여 휨 내력을 명확히 계산할 수 있다. 반면, FRP복합체의 부착파괴는 파괴시의 FRP변형률이 불명확하기 때문에 현재까지는 적절한 설계방법이 제시되고 있지 못한 실정이다. 따라서 비교적 명확한 파괴시점을 예측할 수 있는 보강재의 파단을 유도하는 것이 바람직하며, 이를 위해서는 전통적인 단순부착식 보강방법을 개선하여 부착파괴를 방지할 수 있는 방안이 필요하다.

본 연구에서는 선행연구(4)에서 탄소섬유슈트의 조기 박리 파괴를 방지하기 위하여 제안되었던 보강상세를 아라미드섬유슈트를 대상으로 검증함과 동시에 본 연구진에 의하여 개발된 에폭시 전단기 보강상세의 적용성을 검증하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 FRP로 휨 보강된 부재의 파괴양상

FRP복합체의 휨 보강성능을 규명하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있으며, 이를 바탕으로 FRP복합체로 보강된 부재의 휨 보강설계를 위한 지침이 제안되고 있다. 각국의 설계지침을 분석한 결과 FRP복합체로 보강된 부재의 휨 보강설계는 파괴모드에 따라서 다음의 5가지로 구분하여 설계하고 있다.

- 1) 철근항복 이전의 콘크리트 압괴
- 2) 철근항복 이후의 콘크리트 압괴
- 3) 철근항복 이후의 FRP복합체 파단
- 4) FRP복합체의 단부탈락파괴
- 5) FRP복합체의 중앙부 박리파괴

여기서 1), 2)의 콘크리트 압괴에 의한 파괴와 3)의 FRP 보강재의 파단에 의한 파괴는 각각의 구성재료가 극한응력에 도달하여 파괴되는 경우로 기존의 휨 이론을 적용하여 충분히 예측이 가능하다. 또한 4)의 FRP복합체의 단부탈락 파괴모드는 많은 연구자(8)(9)에 의해 실험적, 이론적 접근이 이루어졌으며, 일정길이 이상의 정착길이를 확보하거나 정착상세에 의해 충분히 방지할 수 있는 것으로 고려되고 있다. 이에 따라 각 설계지침에서는 정착을 통한 단부탈락의 방지를 규정하며 별도로 설계에 반영하고 있지는 않다. 반면, FRP 보강재의 박리파괴는 기존연구(10)(11)에서도 실험 결과에 대한 현상을 확인하였을 뿐 명확한 이론적 접근이 이루어지고 있지 못하다. 한편 중앙부로부터 발생하는 박리파괴는 전단스팬 내의 하중가력점 부위에서 발생한 휨/전단 균열의 균열 폭이 증가되면서 FRP의 박리를 초래하고, 이후 단부로 진행되어 최종 파괴를 유발한다. 이러한 FRP복합체의 박리파괴는 부착길이, 보강재의 강성, 전단스팬비, 시공환경 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, 상호 복합적으로 작용하기 때문에 파괴시점을 예측하기가 매우 어렵다. 따라서 대부분의 설계지침(7)(15)(18)(23)에서도 보강설계시에는 FRP의 부착파괴를 피하도록 권고하며, 부착파괴를 고려할 경우 FRP의 변형률을 일정값 이하로 제한하는데 그치고 있다. 한편 ACI440(17)에서는 기존의 다양한 경험을 토대로 FRP의 부착파괴를 고려한 설계식을 제안하고 있으나 충분한 안전성을 확보하고 있지 못한 것으로 보고(12)되고 있다.

2.2 부착파괴 방지상세 제안

기존의 연구결과 및 설계지침에서 나타난 바와 같이 FRP복합체의 부착파괴에 대한 명확한 고찰이 선행되지 않은 상태에서는 보강설계의 안전성을 확보하기

위해서 극한강도의 예측이 가능한 FRP 보강재의 파단을 유도하는 것이 가장 이상적일 수 있다.

한편, FRP보강공법 개발 초기에는 FRP복합체와 콘크리트 사이의 부착력과 FRP복합체가 파단되는 인장력사이의 상관관계로부터 적정 부착길이를 산정하였으며, 이로 인하여 부착파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단하였다. 그러나 FRP복합체가 고강도화 되고, 강성이 증가함에 따라 단순부착력만으로는 부착파괴를 방지할 수 없는 한계를 인식하게 됨으로써 추가적인 정착상세의 필요성이 대두되었다. 기존 연구에서는 FRP복합체의 부착파괴메카니즘을 보강재 단부의 불연속면에서 발생하는 응력집중이 부착파괴를 유발하는 주원인으로 판단하였으며, 이에 따라 보강재 단부를 보강하는 부착파괴 방지상세에 대한 다양한 연구⁽¹⁹⁾⁽²²⁾가 진행되었다. 그러나 최근에는 Sebastian⁽¹¹⁾ 등에 의해 FRP복합체로 보강된 부재의 중앙부 박리파괴에 대한 연구결과가 보고되고 있으며, 일정길이를 확보한 상태에서는 부착길이에 관계없이 중앙부에서 발생하는 박리파괴가 주요 파괴모드로 작용할 수 있는 것으로 보고⁽²⁾되고 있다.

이에 따라 본 연구진은 선행연구⁽⁴⁾에서 부착파괴 방지상세로 중앙부 U보강 공법을 제안하였으며, 탄소섬유슈트 보강 실험체를 대상으로 그 효용성을 입증하였다. 이러한 중앙부 U보강 공법은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 박리가 시작되는 가력점 인근의 휨 전단균열 부를 보강함으로써 박리를 근본적으로 억제하기 때문에 부착을 유지한 상태에서 파단을 유도할 수 있는 것으로 나타났다.

한편, 부착파괴를 방지 또는 지연시키기 위하여 적용되는 U보강 공법은 웹면을 갖는 부재에만 제한적으로 적용할 수 있다. 따라서 본 연구진에서는 보다 일반적으로 적용할 수 있는 부착파괴 방지상세를 개발

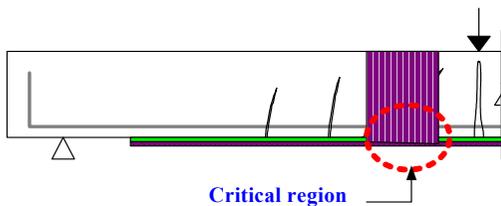


Fig. 1 중앙부 U보강 상세

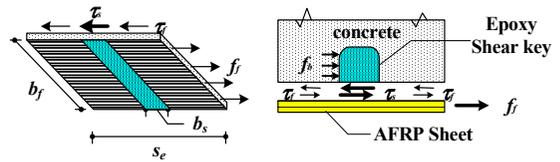


Fig. 2 에폭시 전단키의 응력전달 메카니즘



Photo 1 에폭시 전단키 시공

하고자 하였으며, 순수 에폭시 수지의 인장전단강도를 유지하고, 접촉계면에서의 부착파괴를 억제할 수 있는 에폭시 수지 전단키를 고안하였다.

본 연구진에 의해서 개발된 에폭시 전단키는 Fig. 2와 같이 콘크리트 부착면에 에폭시 전단키를 형성하여 부분적으로 부착력의 증가를 유도한 것이며, Photo 1에 나타난 바와 같이 아라미드섬유슈트가 부착될 콘크리트 하부에 일정간격으로 콘크리트를 오목하게 파취하고 이를 고점도의 에폭시 수지로 충전시켜 전단키를 형성한 후에 아라미드섬유슈트를 부착하는 공법이다.

3. 실험

3.1 재료실험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도 24MPa의 레미콘이며, 인장, 압축 및 전단철근은 항복강도가 400MPa인 D10, D13 철근을 사용하였다. 보강재로 사용된 아라미드섬유슈트와 함침용 에폭시 수지의 재료시험 결과는 Table 1 및 Table 2와 같다.

Table 1 아라미드섬유쉬트 재료특성

종류	두께 (mm)	인장강도 (MPa)		탄성계수 (GPa)		극한변형률
		Nominal	Test	Nominal	Test	
AFRP	0.193	2,100	2,826	110	124	0.02

Table 2 에폭시 수지 재료특성

종류	압축강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	휨강도 (MPa)	부착강도 (MPa)
AFRP	72.7	25.8	55.8	9.3

3.2 가력 및 측정

아라미드섬유쉬트의 휨 보강성능 실험을 위하여 Fig. 3과 같이 가력골조를 설치하고 250kN 용량의 Actuator로 3점 가력하였다. 변위 및 변형률의 측정 부위는 최대모멘트가 발생하는 중앙부에서의 측정하였으며, 각각 콘크리트의 압축연단, 인장·압축철근 및 아라미드섬유쉬트의 변형률을 측정하였다.

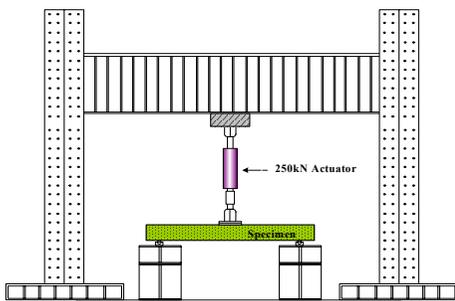


Fig. 3 실험체 가력상황

3.3 실험체 개요

실험체는 폭 150mm 높이 250mm로, 지점길이 2,400mm, 전체 실험체 길이 3,000mm로 계획하였다. 일반적인 철근콘크리트 보에서는 인장철근의 단면적이 압축철근 단면적보다 큰 것이 정상이나 아라미드섬유쉬트로 보강된 축소모형 실험체에서는 단면해석결과 아라미드섬유쉬트가 파단변형률에 이르기 전에 콘

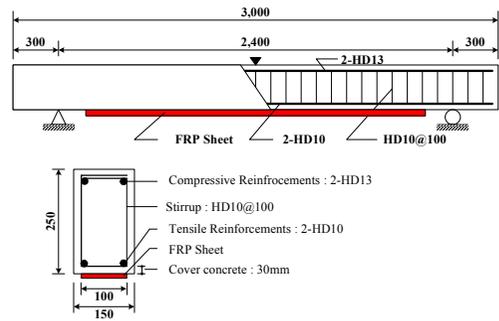


Fig. 4 실험체 형상 및 치수

Table 3 실험체 일람

실험체	τ_f^* (MPa)	부착길이 (mm)	보강폭 (mm)	정착상세
EC	-	-	-	-
EA1-B1	0.44	1,900	100	-
EA1-UEB2	0.60	1,400	100	단부U보강
EA1-UCB2	0.60	1,400	100	중앙부U보강
EA1-SB1	0.44	1,900	100	에폭시전단키

* τ_f : FRP복합체와 콘크리트 사이의 설계부착강도

크리트 연단에서 압축극한변형률($\epsilon_c=0.003$)에 도달하는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에서는 아라미드섬유쉬트의 보강으로 인한 콘크리트 연단에서의 압괴를 방지하기 위하여 축소모형 실험체의 압축철근으로 2-D13, 인장철근을 2-D10으로 배근하였다. 전단 보강근은 휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 철근을 100mm 간격으로 배근하였다. 각 실험체의 형상 및 치수는 Fig. 4와 같다.

실험체는 총 5개로 무보강 실험체와 단순 부착된 B1실험체, 밀면 보강 후에 중앙부 가력점에서 100mm 떨어진 위치에 폭 200mm의 아라미드섬유쉬트를 이용하여 U 보강한 UCB2와 보강재 단부에 폭 200mm로 U 보강한 UEB2 실험체 및 폭 20mm, 깊이 20mm의 에폭시 전단키를 100mm 간격으로 보강 면에 매립한 SB1 실험체로 구성된다. 각 실험체의 세부상세를 정리하면 Table 3과 같다.

4. 실험결과 분석

4.1 파괴양상

정착상세를 적용하지 않고 아라미드섬유쉬트를 단순 부착한 실험체에서는 Photo 2에서 보는 바와 같이 중앙부 하중가력점 부위의 휨-전단균열로부터 최초박리가 발생하였으며, 하중의 증가에 따라서 발생한 박리는 단부 쪽으로 진행되어 최종파괴되었다.

한편 기존에 보편적으로 사용되어온 단부 U형 정착상세를 적용한 실험체는 초기 박리 발생 및 진행과정은 단순부착실험체와 동일하게 나타난다. 그러나 단부의 U형 정착에 의해 일시적으로 박리의 진행이 억제되었으며, 단부 U 보강 경계면에서 아라미드섬유쉬트가 파단되면서 최종파괴되었다.

이에 대하여 중앙부를 U보강한 실험체는 가력점 하부에서 휨균열의 확장에 의해 부분적인 박리가 관찰되었지만 인접한 U보강에 의해서 박리의 진행이 억제되었으며, 주된 박리파괴를 유발하는 가력점으로부터 유효깊이만큼 떨어진 위치에서의 휨 전단균열에 의한 박리는 U보강에 의해 초기부터 효과적으로 억제되어 나타나지 않았다. 따라서 Photo 4에서 나타난 바와 같이 중앙부에서 아라미드섬유쉬트의 파단에 의해 최종파괴되었다.

반면, 본 연구에서 제안한 에폭시 전단키를 매립하고 아라미드섬유쉬트 1매를 보강한 실험체는 앞에서 언급한 바와 같이 박리파괴를 유발하는 위험단면의 위치에서 국부적인 박리가 발생하였으나, 인접한 에폭시 전단키에 의해서 박리의 진행이 효과적으로 억제되었다. 또한, 하중의 증가에 따라 부재의 소성역은 점차 단부로 확장되며 이에 따라 휨-전단균열에 의한 추가적인 박리발생 구역도 확장되었지만 길이방향으로 매설된 에폭시 전단키에 의해 추가적인 박리는 발생하지 않았다. 따라서 Photo 5에 나타난 바와 같이 국부적인 박리 외에 구조물의 보강성능을 저하시키는 박리는 발생하지 않았으며, 중앙부에서 아라미드섬유쉬트의 파단에 의해 최종파괴되었다.

4.2 하중-변위 관계

4.2.1 단순부착실험체

아라미드섬유쉬트를 단순 부착한 실험체는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 철근이 항복한 이후에는 아라미

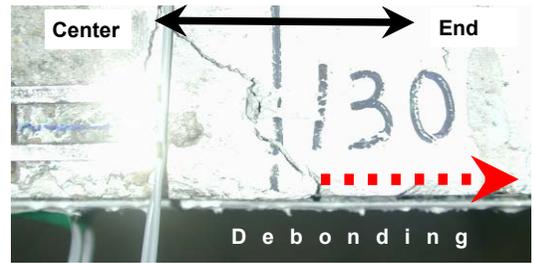


Photo 2 단순부착실험체 파괴형상(박리파괴)

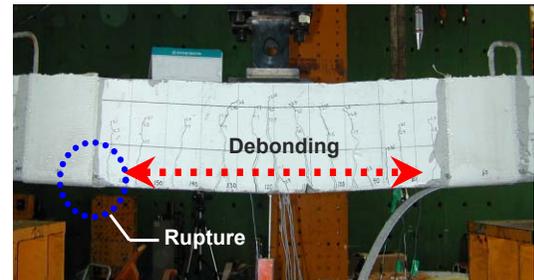


Photo 3 단부 U보강 실험체 파괴형상(박리후 파단)

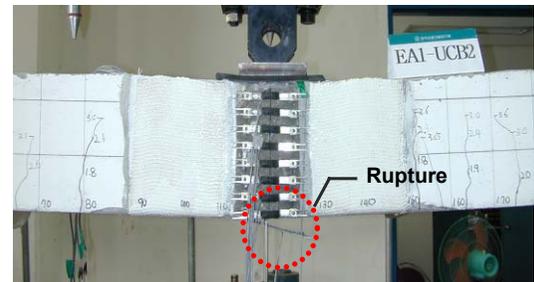


Photo 4 중앙부 U보강 실험체 파괴형상(파단)

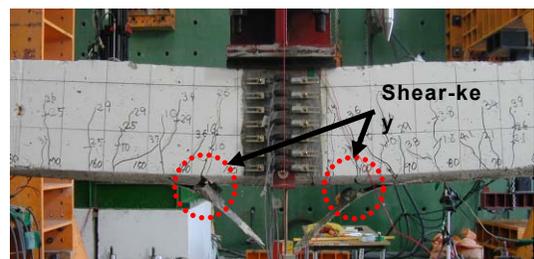


Photo 5 에폭시 전단키 매립 실험체 파괴형상(파단)

드섬유쉬트가 하중을 부담함에 따라 보강된 실험체에서 추가적인 내력의 증가가 나타났으며, 중앙부에서 박리가 발생하고 단부 쪽으로 점진적으로 박리가 진행

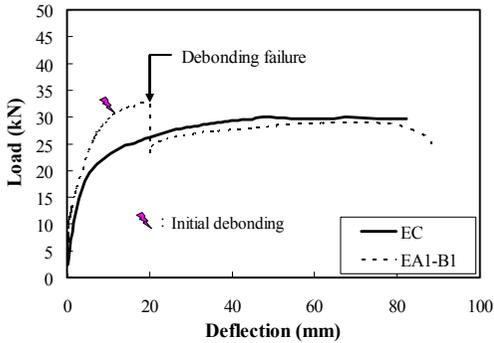


Fig. 5 단순부착실험체 하중-변위곡선

되는 동안에는 부분적인 비부착으로 인해 부재의 휨강성이 감소하고 변형이 증가한다. 한편 중앙부에서 발생된 박리가 보강재 단부까지 진행되면 부착파괴에 의해 아라미드섬유쉬트에 의한 하중지지능력을 상실하게 되며, 하중이 급격히 저하된다. 이후에는 일반 무보강보와 일치된 거동을 보인다. 이와 같이 정착상세를 적용하지 않고 단순부착된 실험체는 박리파괴에 의해 지배되며, 이때 ACI440⁽¹⁷⁾에서 제시하는 정착길이를 확보하여도 박리파괴는 발생하는 것으로 나타났다. 즉, 기존 설계지침에서 제안하는 부착길이의 확보는 단부탈락에 의한 파괴에는 효과적이거나, 중앙부 박리에 의한 파괴는 방지할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서 아라미드섬유쉬트의 부착길이를 확보함으로써 부착파괴를 방지하는 기존의 설계용 부착강도 개념은 아라미드섬유쉬트의 경우에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

4.2.2 U형 정착상세 보강실험체

기존의 정착상세로 보편적으로 사용되어온 단부U보강상세를 적용한 EG1-UEB2 실험체는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 중앙부에서 박리의 시작과 함께 강성이 급격히 저하되고, 이후 단부쪽으로 박리가 진행되는 동안에는 하중-변위 곡선이 완만한 기울기를 나타내면서 상당히 연성적인 거동을 나타내었다. 또한 단부 U보강 실험체는 U보강을 실시하지 않은 실험체에 비하여 변형능력은 증가되지만, 섬유쉬트의 박리가 중앙부에서부터 단부까지 광범위하게 진행되므로 내력 측면에서는 바람직하지 못한 것으로 판단된다. 이에

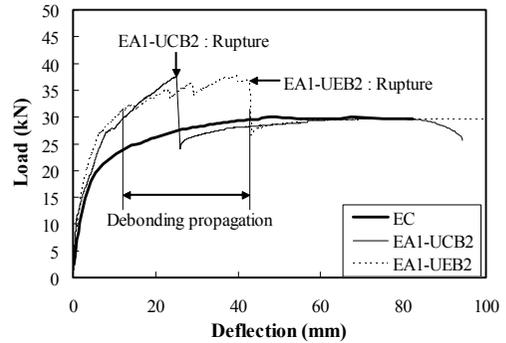


Fig. 6 U형 보강실험체 하중-변위곡선

대하여 본 연구진에 의해 제안된 아라미드섬유쉬트로 중앙부를 U보강한 EG1-UCB2 실험체는 박리발생이 예상되는 가력점 주변을 U형으로 보강함으로써 초기 박리를 효과적으로 억제하기 때문에 박리에 의한 강성저하 없이 아라미드섬유쉬트의 파단하중에 도달한다. 따라서 박리가 예상되는 중앙부의 위험단면을 U형 보강하는 방법은 박리파괴를 효과적으로 억제하며, 재료의 극한강도를 유도할 수 있는 효율적인 보강상세로 판단된다.

4.2.3 에폭시 전단기 매립 실험체

에폭시 전단기를 매립하고 아라미드섬유쉬트 1매를 보강한 실험체를 동일한 부착길이를 갖는 단순 부착 실험체와 비교하면 Fig. 7과 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 에폭시 전단기를 매립한 실험체는 초기박리의 발생과 진행이 효과적으로 억제되었기 때문에 박리에 의한 하중의 감소나 휨 강성의 저하 없이 아라미드섬유쉬트의 파단하중까지 도달하였다.

또한 보강효과가 상실되는 시점의 하중차로부터 평가되는 아라미드섬유쉬트의 보강성능을 비교하면 단순 부착 실험체에 비하여 에폭시 전단기를 매립한 실험체의 보강성능은 대략 2배 이상 증가한 것으로 나타났다. 따라서 에폭시 전단기에 의한 보강상세는 아라미드섬유쉬트의 부착파괴를 방지하고 보강성능을 극대화할 수 있는 매우 유용한 방법으로 판단된다. 단, 전단기 매립에 의한 보강상세는 전단기의 형상 및 매립정도에 따라 보강성능에 영향을 미칠 수 있으므로 추가적인 연구를 통한 규명이 필요할 것으로 판단된다.

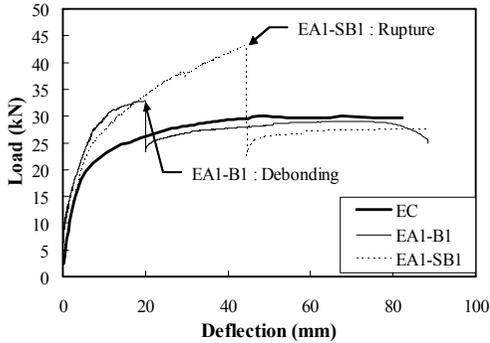


Fig. 7 에폭시 전단키 매립 실험체 하중-변위 곡선

4.3 아라미드섬유쉬트의 유효변형률

아라미드섬유쉬트로 보강된 부재의 최대내력은 보강되는 RC부재의 내력에 아라미드섬유쉬트에 의해 추가되는 내력을 증첩하여 계산할 수 있다. 이때 아라미드섬유쉬트에 의한 내력증가분은 다양한 요인에 의해 설계강도 이하에서 파괴될 수 있으므로 파괴시점의 유효변형률로 평가되어야 한다. 또한, 일반적으로 RC부재의 휨강도는 Table 4에 나타난 바와 같이 실험값이 이론값을 초과하며, 이를 고려하지 않을 경우, 보강된 부재의 휨 보강성능을 평가할 때 Fig. 8의 ΔP_{RC} 만큼 과대평가하게 된다. 따라서 순수 아라미드섬유쉬트의 보강성능을 평가하기 위해서는 보강효과가 상실되는 시점의 하중차이로부터 식(1)과 같이 구하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 여기서 아라미드섬유쉬트의 순

수 보강성능은 식(2)와 같이 표현할 수 있으며, 식(3)의 최종과괴 시점의 a 값을 식(2)에 대입하여 ϵ_f 에 대한 2차방정식을 유도하면 아라미드섬유쉬트의 유효변형률을 구할 수 있다.

$$M_j = M_n^{test} - M_{fail}^{test} \quad (1)$$

M_n^{test} : 보강부재의 최대모멘트 실험값

M_{fail}^{test} : 보강재 파괴 후 모멘트 실험값

$$M_j = A_f E_f \epsilon_f (h - \frac{a}{2}) \quad (2)$$

$$a = \frac{A_s f_y + A_f E_f \epsilon_f}{0.85 f_{ck} b} \quad (3)$$

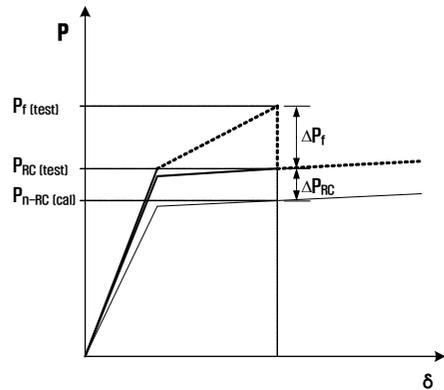


Fig. 8 FRP복합체의 보강성능 평가

Table 4 실험결과

실험체	철근항복시		박리발생시		극한하중시					파괴모드
	계산값 (kN)	실험값 (kN)	실험값 (kN)	ϵ_f (μ)	계산값 (kN)	실험값 (kN)	δ (mm)	ϵ_c (μ)	ϵ_f (μ)	
EC	19.0	21.5	-	-	20.4	29.4	41.43	3,000	-	휨 파괴
EA1-B1	20.7	27.6	31.0	8,181	35.3	32.8	19.98	3,212	8,570	아라미드섬유쉬트 박리
EA1-UEB2	20.7	27.3	29.0	5,941	35.3	37.6	42.66	3,395	8,681	아라미드섬유쉬트 박리 후 파단
EA1-UCB2	20.7	27.8	-	-	35.3	37.7	25.12	2,604	12,222	아라미드섬유쉬트 파단
EA1-SB1	20.7	23.0	-	-	35.3	43.3	44.16	3,566	19,640	아라미드섬유쉬트 파단

ϵ_f : 아라미드섬유쉬트의 변형률

ϵ_c : 콘크리트 압축변형률

δ : 중앙부 처짐

Table 5 아라미드섬유슈트의 유효변형률

실험체	P_u (kN)	P_{fail} (kN)	P_f (kN)	M_f (kN · m)	T_f (kN)	f_f (MPa)	ϵ_{fe} (μ)	$\epsilon_{f(test)}$ (μ)	$\epsilon_{fe}/\epsilon_{fn}$
EA1-B1	32.8	25.1	7.7	4.62	19.45	1,007	9,161	8,570	0.48
EA1-UEB2	37.6	28.0	9.6	5.76	24.33	1,260	11,460	8,681	0.60
EA1-UCB2	37.7	26.0	11.7	7.02	29.76	1,542	14,020	12,222	0.73
EA1-SB1	43.3	25.9	17.4	10.44	44.73	2,318	21,068	19,640	1.10

P_u : 최대하중

M_f : FRP에 의한 모멘트 증가분

ϵ_{fe} : FRP의 유효변형률

P_{fail} : 보강효과 상실 후 하중

T_f : FRP의 인장력

$\epsilon_{f(test)}$: 실험에서 측정된 FRP의 변형률

P_f : FRP에 의한 하중증가분($P_u - P_{fail}$)

f_f : FRP의 인장응력

ϵ_{fn} : 재료실험으로부터 얻어진 공칭과단변형률

Table 5는 아라미드섬유슈트의 보강효과가 상실되는 순간의 하중차이로부터 아라미드섬유슈트의 유효변형률을 계산하여 나타낸 것이다. 조기부착파괴가 발생한 단순부착실험체는 재료변형률의 48%에서 파괴된 것으로 나타났으며, 기존에 보편적으로 사용되어온 단부 U보강 실험체는 재료변형률의 60%에서 파괴되었다. 즉, 단부 U보강 실험체에서는 비록 아라미드섬유슈트의 파단에 의해 최종파괴되었지만 이미 부재 전구간에 걸쳐 박리가 진행되었으며, 비부착 거동에 의해 최대하중에 도달하였기 때문에 보강효과는 크지 않았다. 한편, 중앙부 U보강을 적용한 실험체는 아라미드섬유슈트의 박리를 효과적으로 억제하기 때문에 기존 보강상세에 비하여 보강성능이 증가하였다. 그러나 U보강 면에서의 응력집중으로 재료변형률의 73%에서 아라미드섬유슈트가 파괴되었다. 반면, 에폭시 전단기를 매립한 실험체는 아라미드섬유슈트의 박리를 억제함과 동시에 재료변형률의 100% 이상을 발휘하며 최종적으로 파괴되었다. 이상의 결과로부터 단순부착과 같이 아라미드섬유슈트의 박리파괴를 기준으로 보강설계를 실시할 경우에는 아라미드섬유슈트의 극한변형률의 50%까지 강도저하를 고려하여야 하며, 본 연구에서 제안하는 에폭시 전단기를 정착상세로 적용할 경우에는 아라미드섬유슈트의 극한변형률을 100% 활용하여 설계가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 아라미드섬유슈트로 휨 보강된 RC보의 부착파괴를 방지하기 위한 기존의 보강상세 및

본 연구에서 제안된 전단기 보강상세에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 단순부착된 아라미드섬유슈트는 기존 설계지침에서 제안하는 부착길이를 확보한 상태에서도 중앙부에서 발생하는 박리균열에 의해 조기부착파괴되었다.
- 2) 박리파괴를 방지하기 위하여 기존에 제안되었던 「단부 U보강」 상세는 단부에서 최종박리파괴를 일부 지연시킬 수 있으나, 중앙부로부터 발생되어 단부로 진전되는 아라미드섬유슈트의 박리를 근본적으로 억제할 수는 없는 것으로 나타났다.
- 3) 「중앙부 U보강」 상세는 중앙부에서의 초기박리를 효과적으로 억제하여 충분한 보강성능을 발휘하면서 최대하중에 도달하였다. 따라서 중앙부 U보강 상세는 섬유슈트의 박리를 억제·방지할 수 있는 유용한 보강방법으로 판단된다.
- 4) 에폭시 전단기에 의한 부착파괴 방지상세는 중앙부에서의 초기박리 및 박리의 진행을 지속적으로 억제하여 보강성능을 극대화 할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시하는 에폭시 전단기형 정착상세는 아라미드섬유슈트의 부착파괴 방지상세로 적용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 '01 건설핵심기술연구개발사업(제안D-04) 「철근콘크리트 건축물 보강공법의 개발 및 성능평가」의 일부분으로 수행된 연구임을 밝히며, 관계제후께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. (주)한국화이버/한국카본, 탄소섬유시트 공법 기술자료(II), 해림, 1998, pp. 52.
2. 최기선, 유영찬, 이진용, 김광환, "유리섬유시트로 휨보강된 RC 보의 부착파괴 방지상세 관한 실험적 연구" 봄학술발표회논문집, 한국콘크리트학회, 제15권 1호, 2003, pp. 531-536.
3. 건설교통부, 한국건설기술연구원, "철근콘크리트 건축구조물 보수·보강 공법의 성능평가에 관한 연구", 건설교통부 연구과제, 2003.
4. 유영찬, 최기선, 김광환, "An Experimental Study to Prevent Debonding Failure of Full-Scale RC Beam Strengthened with Multi-Layer CFS", 콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제16권 6호, 2004, pp. 867-874.
5. 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, pp. 94.
6. 日本土木學會 "連續纖維シートを用いたコンクリト構造物の補修補強指針".
7. CEB-FIP, "Externally bonded FRP reinforcement for RC structures", Technical report, bulletin 14, March 2001.
8. H.Saadatmanesh et al, "Design guidelines for flexural strengthening of RC beams with FRP plates" Journal of Composite for Construction, Nov. 1998, pp. 158-164.
9. Y. N. Ziraba, et al, "Guidelines toward the design of reinforced concrete beams with external plates" ACI Structural Journal Nov-Dec. 1994. pp. 639-646.
10. Sergio F. Breña, et al, "Effect of Carbon Fiber Reinforced Polymer Laminate Configuration on the Behavior of Strengthened Reinforced Concrete Beams" Journal of Composite for Construction, May-June 2004, pp. 229-240.
11. Wendel M. Sebastian, "Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams", Journal of Structural Engineering, July 2001, pp. 792-798.
12. Christopher K. Y. Leung, et al, "Empirical Approach for Determining Ultimate FRP Strain in FRP-Strengthened Concrete Beams" Journal of Composite for Construction, March-April 2006, pp. 125-138.
13. Hota V. S. GangaRao, P. V. Vijay., "Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped with Carbon Fabric" Journal of Structural Engineering, ASCE, Jan 1998, pp. 3-10.
14. Hamid Rahimi, Allan Hutchinson, "Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates" Journal of Composites for Construction, ASCE, Feb 2001, pp. 44-56.
15. ISIS CANADA "Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer" Design Manual.
16. L. C. Hollaway, M. B. Leeming, "Strengthening of reinforced concrete structures", WOODHEAD Publishing Ltd. 2000, pp. 94.
17. ACI 440. 2R-02 "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI Committee 440.
18. Concrete Society Technical Report No. 55, "Design guidance for Strengthening concrete structures using fibre composite materials", The Concrete Society.
19. G.Spadea, F.Bencardino, R.N.Swamy, "Structural behavior of composite RC beams with externally bonded CFRP" Journal of Composites for Construction, ASCE, Aug 1998, pp. 132-137.
20. Marco Arduini, Angelo Di Tommaso, Antonio Nanni, "Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams" ACI Structural Journal, Jul-Aug 1997, pp. 363-370.
21. Alfarabi Sharif, G.J.Al-Sulaimani, I.A. Basunbul, M. H. Baluch, B. N. Ghaleb, "Strengthening of initially loaded reinforced concrete beams using FRP plates" ACI Structural Journal, Mar-April 1994, pp. 160-168.
22. Anthony J. Lamanna, Lawrence C. Bank, David W. Scott, "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips" Journal of Composites for Construction, ASCE, May-Jun 2004, pp. 203-210.
23. CSA Standard, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", S806-02, Canadial Standards Association.

(접수일자 : 2006년 9월 5일)