

탄소섬유쉬트로 보강된 RC부재의 철근량에 따른 휨 보강성능

Effect of Steel Reinforcement Ratio on the Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with CFRP Sheets

유 영 찬* 최 기 선** 김 긍 환***
You, Young Chan Choi, Ki Sun Kim, Keung Hwan

ABSTRACT

Experimental study has been performed in order to evaluate the effects of steel reinforcement ratio on the flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP sheets. The steel reinforcement ratio of 0.78% ($\rho_s/\rho_b = 24\%$) is selected to have balance failure when control RC beams were strengthened with 1 ply CFRP sheet. Total 6 half-scale specimens were manufactured including each unstrengthened specimens, which have 3 different reinforcement ratios. The specimens strengthened with CFRP sheet consist of under- or over-reinforced beams for the balanced failure condition. Moreover, the behavior of unstrengthened or strengthened beams were compared to evaluate flexural performance.

The results of this study show that the over-reinforced specimens were failed by concrete crushing prior to CFRP sheet failure by debonding or rupture. On the contrary, the under-reinforced specimen were failed by rupture of CFRP sheet.

1. 서 론

FRP 복합체의 보강설계에 관한 각국의 설계지침에 따르면, FRP 복합체로 휨 보강된 철근콘크리트 보는 부재의 파괴모드에 따라서 설계조건을 달리 적용하는 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트 압괴와 FRP 복합체의 파단에 의한 파괴는 완전합성거동을 유지한 상태에서 재료의 극한변형률에 도달하여 파괴되므로 각 재료의 설계강도를 대입하여 기존 휨 설계식으로 충분히 계산할 수 있다. 여기서, 완전합성거동은 보강된 부재의 최종파괴 시까지 모재와 보강재 사이에서 부착파괴가 발생하지 않고 콘크리트 압축파괴나 FRP복합체의 파단 중의 어느 한 가지 지배요인에 의해 부재의 내력이 결정되는 것을 의미한다.

한편, 상용화 되고 있는 FRP 보강재는 극한변형률이 대략 0.015~0.03 정도로 매우 크고, 접착제로 사용되는 에폭시 수지는 우수한 접착강도를 지니지만 계면 접착성능은 콘크리트의 인장강도에 의해 지배되기 때문에 통상적으로 부착파괴가 선행되는 것으로 보고되고 있다. 그러나 보강재의 파단강도 및 변형률이 낮은 재료나 부착파괴 방지상세를 적용한 경우에는 보강재의 파단이 발생할 수 있으며, 보강재량이 상대적으로 높아 FRP 복합체가 박리파괴 되기 전에 콘크리트 압괴가 선행하는 경우에는

* 정희원, 한국건설기술연구원 건축·도시연구부 수석연구원, 공학박사

** 정희원, 한국건설기술연구원, 건축·도시연구부 연구원

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

완전합성거동에 의해 설계할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 압축측 콘크리트가 극한변형률 0.003에 도달하는 시점과 인장측 FRP 복합체가 파단변형률에 도달하는 시점이 동시에 발생하는 균형파괴를 기준으로 철근량 및 보강재 양에 따른 보강 부재의 파괴양상을 파악하고 각 파괴모드에서의 보강성능을 검토하도록 하였다.

2. 연구내용 및 방법

FRP 복합체로 휨보강된 부재에서 콘크리트 압축파괴는 콘크리트의 변형률이 FRP 복합체가 파단변형률에 도달하기 이전에 한계 변형률인 0.003에 먼저 도달하여 파괴되는 형태로 압축재와 인장재의 평형조건보다 인장재의 양이 많을 경우 발생한다. 본 연구에서 축소모형 실험체로 계획된 부재를 탄소섬유쉬트 1매로 보강할 때 콘크리트와 FRP 복합체가 동시에 파괴상태에 도달하는 균형파괴시의 철근비는 $0.0078(\rho_s/\rho_b=24\%)$ 인 것으로 계산되었다. 따라서 탄소섬유쉬트를 1매 보강한 상태에서 인장철근비를 변수로 콘크리트의 압축파괴 이전에 FRP 복합체의 파단이 진행되는 조건과 콘크리트의 압괴에 의해 최종파괴는 조건에 대하여 각각의 파괴모드 및 휨 보강성능을 검토하였다.

3. 실험

실험체 제작에는 설계압축강도 30MPa의 레미콘을 사용하였으며, 인장, 압축 및 전단철근은 항복강도가 400MPa인 D10, D13 철근을 사용하였다. 보강재는 1방향 탄소섬유쉬트를 사용하였으며, 동일회사의 합침용 에폭시 수지를 이용하여 보강하였다. 실험체의 단면치수는 200×300mm로 인장측과 압축측 피복두께를 30mm로 하였으며, 지점간 거리 3,000mm, 전체 실험체 길이는 3,400mm로 계획하였다. 압축철근은 2-D10, 인장철근은 각 철근비를 달리하여 배근하였다. 실험체는 각 철근비에 따른 기준실험체를 포함하여 총 6개를 계획하였다.

탄소섬유쉬트로 보강한 실험체는 탄소섬유쉬트가 파단변형률에 도달하기까지 콘크리트 압축파괴가 발생하지 않도록 0.0076의 철근비를 보강한 실험체와 콘크리트의 압축파괴가 선행하되, 철근비의 증가에 따른 영향을 분석하기 위해 철근비를 각각 0.0172, 0.0232로 배근한 2개의 실험체로 구성하였다. 또한, 전단 보강근은 휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 철근을 100mm 간격으로 배근하였다. 대표적인 실험체의 형상 및 치수를 나타내면 그림 1과 같다. 휨 보강성능 실험은 250kN 용량의 Actuator로 4점재하하였으며, 변위 및 변형률의 측정 부위는 최대모멘트가 발생하는 중앙부에서 측정하였으며, 콘크리트 압축연단, 인장·압축주근 및 탄소섬유쉬트의 변형률을 측정하였다.

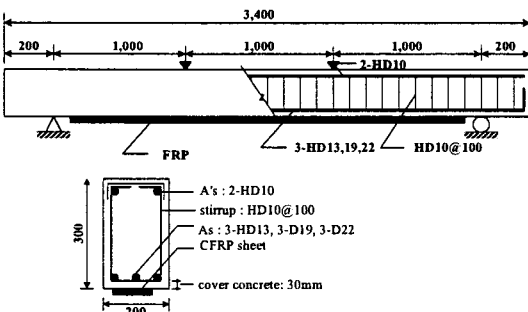


그림 1 실험체 형상 및 치수

표 1 실험체 상세 제원

실험체명	FRP 종류	n (ply)	t_f (mm)	l_f (mm)	ρ_s	비고
SCON-L	-	-	-	-	0.0076	$A_s=3-D13$
SCON-M	-	-	-	-	0.0172	$A_s=3-D19$
SCON-H	-	-	-	-	0.0232	$A_s=3-D22$
SFCS1-L	CFRP sheet	1	0.111	2,850	0.0076	$A_s=3-D13$
SFCS1-M					0.0172	$A_s=3-D19$
SFCS1-H					0.0232	$A_s=3-D22$

4. 실험결과

4.1 파괴유형

각 실험체의 최종파괴양상을 나타내면 그림 2~그림 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이, 무보강 실험체의 철근비에 따른 부재의 파괴양상은 모두 인장철근의 항복 이후에 중앙부의 압축측 콘크리트가 압괴되는 전형적인 휨 파괴 양상을 나타내며, 철근비가 증가할수록 항복이후에 나타나는 연성구간이 짧아진다. 반면 철근비에 따른 탄소섬유шит 보강실험체의 파괴양상은 균형보강근비 이하로 철근이 배근된 실험체에서는 탄소섬유шит의 파단에 의해 최대내력이 결정되었으며, 최종파괴시까지 콘크리트의 압축파괴는 발생하지 않았다. 반면, 균형보강근비 이상으로 철근이 배근된 실험체($\rho_s=0.0172, 0.0232$)에서는 철근항복 직후 콘크리트 상면에서부터 압괴가 발생하며, 중립축까지 압괴가 진행되면서 최종파괴되었다. 이때 인장측의 탄소섬유шит는 압괴가 진행되는 동안에도 부재와 완전합성거동을 유지하면서 박리나 파단과 같은 파괴의 징후는 보이지 않았다.



그림 2 $\rho_s=0.0232$ 실험체 파괴양상

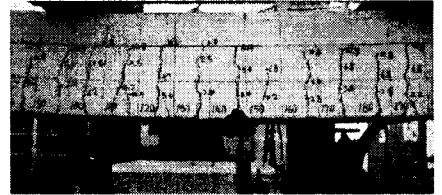
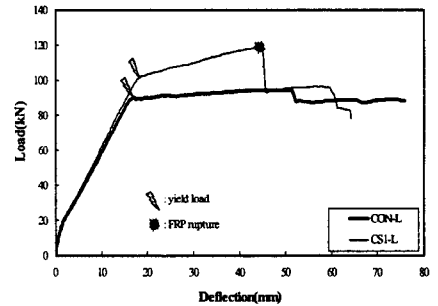


그림 3 $\rho_s=0.0076$ 실험체 파괴양상

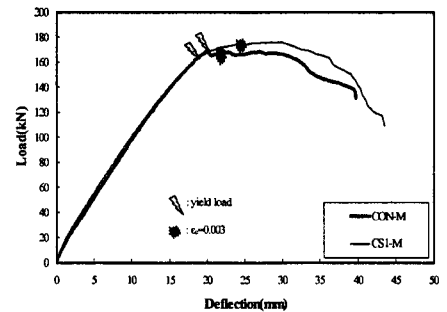
4.2 하중-변위 관계

철근비에 따른 보강부재의 하중-변위관계를 나타내면 그림 4와 같다. 모재의 철근비가 균형보강근비 이하로 배근한 실험체에서는 그림 4(a)와 같이 무보강 실험체와 탄소섬유шит 1매 보강한 실험체 모두 철근항복 이후에 충분한 연성구간을 갖는다. 또한 보강실험체에서 탄소섬유шит가 파단에 의해 최종파괴될 때까지 압축콘크리트의 파괴는 발생하지 않았다. 따라서 균형보강근비 이하로 철근이 배근된 경우에는 탄소섬유шит의 파단까지 충분한 보강성능을 발휘할 수 있다. 반면 모재의 철근비가 균형보강근비 이상으로 배근된 실험체에서는 그림 4(b)와 그림 4(c)에서 나타난 바와 같이 철근항복 직후에 압축콘크리트의 변형률이 0.003에 도달하였으며, 철근비가 증가할수록 그 시점은 짧아진다. 특히 철근비 0.0232로 배근하고 탄소섬유шит 1매를 보강한 실험체는 항복과 동시에 압축변형률이 0.003에 도달하였다. 따라서 조기에 콘크리트 압축파괴가 발생하므로 탄소섬유шит의 재료성능에 비하여 보강효과가 매우 적은 것을 알 수 있다.

각 실험체의 실험결과와 기존 휨설계식을 이용한 계산값을 비교하면 표 2와 같다. 표에서 나타난 바와 같이 무보강 실험체는 실험값이 계산값을 상회하는 것으로

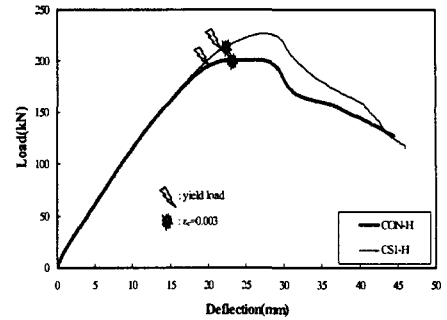


(a) $\rho_s=0.0076$ 실험체



(b) $\rho_s=0.0172$ 실험체

나타났으며, 이러한 RC부재의 강도여유분을 고려하여 보강실험체의 실험값과 계산값을 비교하면 대체로 유사한 것으로 나타났다. 따라서 보강된 실험체에서 콘크리트 압축파괴나 탄소섬유쉬트의 파단과 같이 완전합성거동에 의해 파괴되는 경우에는 변형을 적합조건 및 힘의 평형식을 이용하여 부재 내력을 계산할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 탄소섬유쉬트의 파단에 의한 파괴는 현장 조건 및 작업속련도와 같이 합침과정에서 발생할 수 있는 결함요인으로 인해 실제 재료강도에 비하여 감소하는 경향이 있으므로 보강설계에서는 적절한 부분감소계수의 도입이 필요할 것으로 사료된다.



(c) $\rho_s=0.0232$ 실험체
그림 4 하중-변위 곡선

표 2 인장철근비에 따른 휨 보강성능 실험결과

실험체명	Yield		Nominal($\epsilon_c=0.003$)			Ultimate			Theoretical		파괴양상
	P_y	δ_y	P_n	δ_n	ϵ_{fn}	P_u	δ_u	ϵ_{fu}	P_n	ϵ_{fn}	
SCON-L	90.4	17.0	93.2	37.1	-	-	-	-	72.9	-	conc.압괴
SCON-M	168.8	20.0	167.9	22.5	-	-	-	-	151.7	-	conc.압괴
SCON-H	196.8	20.4	200.3	22.0	-	-	-	-	193.6	-	conc.압괴
SFCS1-L	100.8	17.9	-	-	-	119.3	44.3	0.0109	104.1	0.0154	CFRP파단
SFCS1-M	163.5	18.9	174.6	25.6	0.0049	-	-	-	165.1	0.0074	conc.압괴
SFCS1-H	213.1	22.0	215.4	22.7	0.0030	-	-	-	201.8	0.0051	conc.압괴

5. 결론

- 탄소섬유쉬트 1매로 보강할 때 콘크리트와 FRP 복합체가 동시에 파괴상태에 도달하는 균형과괴시의 철근비 이하에서는 탄소섬유쉬트의 파단에 의해 파괴되며, 충분한 보강성능을 발휘한다.
- 탄소섬유쉬트 1매를 보강하고 균형보강근비 이상으로 과도하게 배근된 부재에서는 탄소섬유쉬트의 파괴 이전에 콘크리트 압괴가 발생하며, 탄소섬유쉬트에 의한 보강성능은 크게 감소한다.
- 탄소섬유쉬트로 보강된 부재에서 콘크리트 압축파괴나 탄소섬유쉬트의 파단과 같이 완전합성거동에 의해 파괴되는 경우에는 기존 휨 이론식과 같이 변형을 적합조건 및 힘의 평형식을 이용하여 부재내력을 충분히 예측할 수 있을 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, 관계제위에 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
- ISIS CANADA "Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer" Design Manual
- 한국건설기술연구원(2006), 시설물 보강공법 성능인증을 위한 시험항목·방법 및 평가기준 설정 연구.