

유리섬유쉬트에 의한 실물모형 RC보의 보강매수별 휨 보강효과

Flexural Strengthening with Multi-Layer GFRP Sheets on Full-Scale RC Beams

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

ABSTRACT

The specified tensile strength provided by the manufacturer is determined on the basis of the reliable lower limit ($X-3\sigma$: X =average tensile strength, σ =standard deviation) obtained from the material test results. Most of these data, however, are based on the test results of 1 layer of FRP sheet. Also, the partial strength reduction factor for strengthening RC members with FRP is based on the small-scale model tests. But, the failure mechanisms of small-scale model tests are reported to be different from those of the full-scale tests.

This paper present the test results of full-scale RC beams strengthened with multi-layer GFRP sheets up to 3 layer as well as the material tests. From the material tests, it was observed that the average tensile strengths of GFRP sheets are decreased as the number of layer are increased. Also the premature debonding failure of RC beams strengthened with multi-layer GFRP sheets are observed in inverse proportion to the number of GFRP sheets

1. 서 론

구조물 보강에 사용되는 FRP 복합체의 설계인장강도는 제조회사에서 제시하고 있는 재료시험결과를 바탕으로 재료인장강도의 신뢰 하한치($X-3\sigma$: X =평균인장강도, σ =표준편차)를 고려하여 산정하도록 권고하고 있다¹⁾. 그러나 이러한 시험결과는 1매의 FRP 복합체를 기준으로 산정되고 있어 현장 함침형으로 시공되는 쉬트형 FRP 복합체의 경우는 보강매수의 증가에 따른 재료특성을 고려하지 못하고 있다. 또한 많은 연구자에 의해 수행된 보강된 부재의 특성파악을 위한 실험연구는 대부분 축소모형 실험에 근간하고 있어 실물모형 실험에서 나타나는 파괴메커니즘의 변화, FRP 복합체의 파단강도의 저하 및 특히 보강매수의 증가에 따른 감소율의 증가 등을 충분히 설명하지 못하는 것으로 보고되고 있다²⁾. 따라서 실제부재에 대한 보강설계시에는 실물모형 실험에 근간하여 얻어진 보강매수의 증가에 따른 보강효과의 감소를 충분히 고려하여 안전한 설계가 되도록 하여야 한다. 본 연구에서는 유리섬유쉬트의 보강매수를 변수로 재료시험 및 실물모형 실험을 수행함으로써 다층 보강된 유리섬유쉬트의 역학적 특성과 RC 휨부재에 대한 보강성능을 파악하고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

*정회원, 한국건설기술연구원 건축연구부 수석연구원, 공학박사
**정회원, 한국건설기술연구원, 건축연구부 연구원
***정회원, 한국건설기술연구원, 건축연구부 연구위원, 공학박사

FRP로 휨보강된 부재의 파괴양상은 콘크리트 압괴 및 전단파괴와 같은 콘크리트의 파괴와 FRP 보강재의 파단 또는 여러 가지 형태의 부착파괴로 구분되어진다. 이러한 파괴메커니즘 중에서 특히 부착 파괴는 보 부재의 전단스팬비의 영향을 받는 것으로 나타났다. 즉, 부착길이가 전단스팬/보 춤의 비의 3이하이거나, 보강재의 단부가 부재의 균열모멘트 이상인 구간에 위치하도록 짧게 부착된 경우에는 단부에서 발생되는 박리가 지배적인 반면, 부착된 보강재 길이가 전단스팬/보 춤의 비의 3.5 이상일 때, 전단스팬/보 춤 비가 증가할수록 휨-전단균열에 의한 박리 발생 지점은 단부로부터 가력점 인근으로 이동하며, 그림 1과 같이 중앙부에서 단부로 박리가 진행되는 것으로 보고되고 있다³⁾.

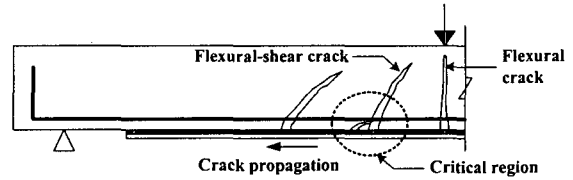


그림 3 FRP로 보강된 보의 중앙부 박리

3. 실험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계용 압축강도 240kgf/cm^2 인 레미콘이며, 철근은 HD10 전단철근과 HD19, HD22의 주철근을 사용하였다. 보강재는 1방향 유리섬유시트를 사용하였으며, 동일회사의 함침용 에폭시 수지를 이용하여 보강하였다. 본 연구에서는 보강매수의 증가에 따른 유리섬유시트의 역학적 특성을 파악하기 위하여 1~3매까지 적층하여 재료시험을 실시하였다.

실험체는 기준실험체를 포함하여 총 4개로 계획되었으며, 보강실험체는 유리섬유시트를 1~3매까지 보강한 실험체로 구성되었다. 모든 보강실험체는 균열부의 휨-전단변형에 의한 중앙부 박리를 방지하기 위하여 선행연구²⁾에서 그 유용성이 입증된 중앙부 U 보강상세를 적용하였다. 각 실험체 형상 및 배근상세는 그림 2와 같다.

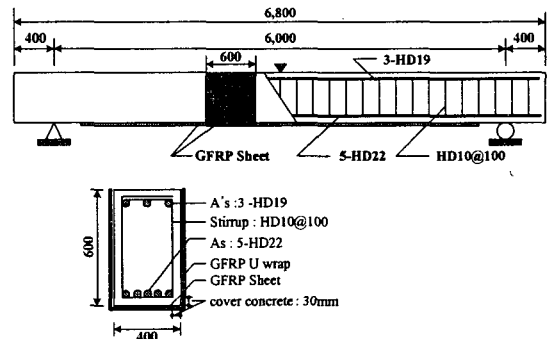


그림 4 실험체 형상 및 치수

4. 실험결과

4.1 파괴유형

유리섬유시트로 보강된 실험체는 그림 3에서 발생된 박리현상이 중앙부 U보강 상세에 의해 박리가 진행된 다음, 중앙부 U보강이 탈락되면서 최종 박리파괴에 도달하는 파괴유형을 나타내었다. 그러나 박리의 진행이 육안으로 관찰될 정도로 서서히 진행되어지며, 휨강성의 저하는 있지만 박리가 진행되는 과정에서도 하중과 변위가 꾸준히 증가하는 연성적인 거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한 박리파괴 발생 후에도 U 보강에 의한 부착력 지지로 일부 하중이 재 증가하는 경향을 보였지만, U보강이 탈락하면서

보는 바와 같이 철근항복 이후 중앙부에서 1차적으로 억제되다가, U보강면 하부를 관통하여 단부까지 2차



그림 5 보강실험체 파괴양상

부착성능이 상실되어 최종파괴 되는 것으로 나타났다.

4.2 하중-변위 관계

보강매수를 변수로 한 실험체의 하중-변위 곡선을 나타내면 그림 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이, 보강매수가 증가함에 따라 보강된 실험체의 항복하중 및 최종 파괴까지의 하중은 증가되는 경향을 나타내고 있으나, 보강매수가 증가함에 따라 강도증진 효과는 점차적으로 줄어들고 있음을 알 수 있다. 즉, 중앙부 U보강 상세는 하중 가력점 근처에서 발생하는 초기박리의 진전을 효과적으로 억제함으로써 하중-변위 곡선의 1차 박리 후에도 강성의 감소없이 지속적으로 하중이 증가되는 것으로 관측되었으나, U보강 상세의 외측에서 발생한 2차 박리에 의해 섬유유시트의 전면적인 박리가 발생되면서 최대내력이 결정되었다. 이와 같은 2차 박리시의 변형률은 보강매수가 증가함에 따라 감소되므로 보강매수에 따른 강도증진효과가 감소된 것으로 판단된다.

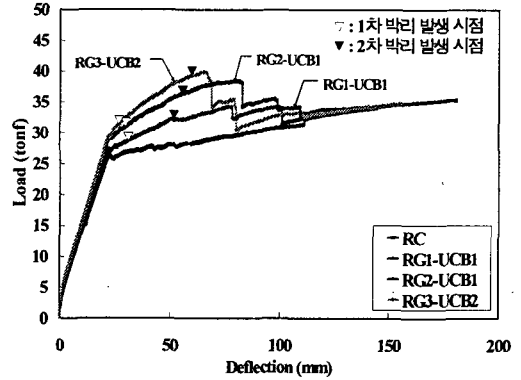


그림 6 하중-변위 곡선

4.3 유리섬유시트에 의한 보강성능의 평가

실험으로부터 유리섬유시트에 작용하는 인장응력을 1차박리시와 최종파괴시 별로 각각 환산하고, 이를 제조사에서 제시하고 있는 공칭인장강도와 비교하여 나타내면 표 3과 같다. 여기에서, 유리섬유시트로 휨 보강된 실물모형 실험체에서는 1차 박리가 발생된 후 특별한 하중의 증가 없이 파괴까지 발생하는 것이 일반적이다. 따라서 1차 박리발생에 의해 계산된 보강재의 응력비는 특별한 파괴방지상세를 적용하지 않은 경우의 박리변형률로서 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

표 2 실험결과와 해석결과와의 비교

실험체명	부착길이 (cm)	보강매수 (ply)	항복하중 (tonf)		1차박리			2차박리			최대하중			파괴형상
			Cal	Exp	P_{d1}	ϵ_{fd1}	P_{d2}	ϵ_{fd2}	Cal	Exp	ϵ_f			
RC	-	-	25.26	26.37	-	-	-	-	-	26.48	27.98	-	휨파괴	
RG1-UCB1	190	1	25.84	27.45	28.78	7,818	32.26	12,055	32.43	34.28	13,811	-	시트박리	
RG2-UCB1	380	2	26.40	29.10	30.70	5,203	36.27	10,759	38.31	38.49	12,461	-	시트박리	
RG3-UCB1	570	3	26.96	29.28	31.03	7,459	39.34	19,229	44.09	39.94	20,370	-	시트박리	

Cal : 계산식에 의한 하중값 Exp : 실험에서 측정된 하중값 P_d : 박리발생시 하중값
 ϵ_{fd} : 박리발생시 측정된 유리섬유시트의 변형률

표 3 유리섬유시트의 인장강도 비교

구분	보강매수 (ply)	P_u (tonf)	P_s (tonf)	ΔP_f (tonf)	ΔM_f (tonf·m)	T_f (kgf)	f_f (kgf/cm ²)	ϵ_{f-cal} (μ)	ϵ_{f-sg} (μ)	f_f/f_m
1차박리시	1	28.78	26.79	1.99	2.99	5,306	1,769	7,019	7,818	0.32
	2	30.70	26.72	3.98	5.97	10,703	1,784	7,079	5,203	0.32
	3	31.03	26.10	4.93	7.40	13,376	1,486	5,898	7,459	0.27
최종파괴시	1	34.28	29.39	4.89	7.34	13,039	4,346	17,247	13,811	0.78
	2	38.49	29.61	8.88	13.32	23,880	3,980	15,793	12,461	0.71
	3	39.34	28.60	10.74	16.11	29,139	3,238	12,848	20,370	0.58

P_u : 최대하중 P_s : 보강재 최종파괴 후 하중 ΔP_f : 하중증가량 ($P_u - P_s$)
 ΔM_f : 모멘트증가량 T_f : 유리섬유시트의 인장력 f_f : 유리섬유시트의 인장응력
 ϵ_{f-cal} : 계산된 유리섬유시트의 변형률 ϵ_{f-sg} : 측정된 유리섬유시트의 변형률 f_m : 유리섬유시트의 공칭인장강도

유리섬유시트의 1차 박리시 및 최종파괴시의 응력과 재료실험 결과를 비교하여 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 나타난 것과 같이 U보강 상세를 적용한 실험체의 최종파괴를 기준으로 산정된 인장응

력은 섬유쉬트의 파단이 아닌 2차 박리에 의한 박리파괴로 결정되어지므로 정확한 인장성능을 평가할 수 없으나, 재료시험결과와 비교하여 근사적으로 보강매수가 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 경향을 검증할 수 있었다.

한편, 보강재의 박리파괴를 허용할 경우 설계강도는 부착길이, 보강량, 표면상태 및 시공환경 등 많은 요인에 의하여 강도가 감소될 수 있으며, 실험을 통해서 평가하는 방법도 실험자의 조건에 따라 다르게 나타나기 때문에 정확히 추측하는 것은 현재로서는 불가능할 것으로 생각된다. 그러나 섬유쉬트의 1차 박리를 기준으로 하여 계산된 섬유쉬트의 박리변형률은 통상 재료설계강도의 30% 정도까지 감소되는 것으로 나타났으며, 중앙부 보강상세를 적용한 경우에도 재료설계강도의 50% 정도까지 저하되므로 본 제안치를 기준으로 보강설계를 실시할 경우 비교적 안전한 설계가 될 수 있을 것으로 판단된다.

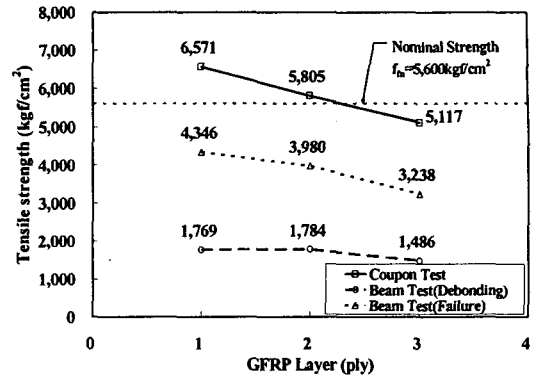


그림 7 보강매수별 유리섬유쉬트의 인장응력(부착파괴시)

5. 결론

국내에서 적용되고 있는 유리섬유쉬트 보강공법에서 보강매수의 증가에 따른 실물모형 보에서의 보강성능을 검토하기 위한 실험으로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 유리섬유쉬트로 보강된 실물모형 실험체에서 1차 박리시를 기준으로 하여 계산된 섬유쉬트의 박리 변형률은 통상 재료 설계강도의 30%까지 감소되며, 중앙부 보강상세를 적용한 경우에도 재료 설계 강도의 50% 정도까지 저하되는 것으로 나타났다. 따라서, 본 제안치를 기준으로 보강설계를 실시할 경우 비교적 안전한 설계가 될 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 유리섬유쉬트로 보강된 실물모형 실험체에 중앙부 U보강 상세를 적용하면, 하중 작용점 근처에서 발생하는 조기박리 현상을 상당히 억제하는 것으로 나타났으나, 하중의 증가에 따라 U보강 외측에서의 2차 박리가 추가로 발생되어 전면적인 박리파괴가 발생되었다. 따라서, 본 실험에서 검토된 U보강 상세의 제원만으로는 섬유쉬트의 박리파괴를 근본적으로 억제하기는 부족할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ACI Committee 440. (2002), "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures".
2. 유명찬, 최기선, 김궁환. (2005), Effect of Multi-Layer Carbon Fiber Sheet Used for Strengthening Reinforced Concrete Beams. 콘크리트학회 논문집, 통권85호, pp149~156
3. L C Hollaway, M B Leeming. (2000), "Strengthening of reinforced concrete structures", Woodhead Publishing Ltd., pp91~99
4. 土木學會 콘크리트委員會. (1999), "콘크리트 구조물의 보강지침(案)", 土木學會, pp94