

섬유-강판 복합플레이트로 보강된 RC 보의 휨 거동에 관한 연구

Flexural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Steel Composite Plates

조 백 순* 김 성 도†

Cho, Baik-Soon Kim, Seong-Do

(논문접수일 : 2008년 6월 12일 ; 심사종료일 : 2008년 8월 3일)

요 지

철근콘크리트 보에 대한 섬유-강판 복합플레이트의 보강효과를 연구하였다. 합계 12개 철근콘크리트 보 중, 7개는 탄소 섬유-강판 복합플레이트(CSP)로 보강되었으며, 4개는 유리섬유-강판 복합플레이트(GSP)로 보강되었고, 나머지 1개는 비교를 목적으로 보강되지 않았다. 보강보 실험결과, 새로 개발된 섬유-강판 복합플레이트 보강시스템은 보강재의 조기탈락을 제어하여 연성파괴를 유도하는 것으로 나타났다. 본 연구에 사용된 CSP 보강보의 연성지수는 3.01~3.81, GSP 보강보의 연성지수는 3.55~4.95로 측정되었다. CSP 보강보 및 GSP 보강보의 최대하중은 보강하지 않은 기준보에 비해 각각 115%, 107% 향상된 것으로 측정되었다. 또한, 보강보 실험과 해석 결과들은 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 철근콘크리트 보강보, 탄소 섬유-강판 복합플레이트, 유리 섬유-강판 복합플레이트, 휨거동

Abstract

The effectiveness of a new fiber-steel composite plate designed specifically to be used for strengthening of reinforced concrete members has been investigated. Twelve reinforced concrete beams were tested. Seven of the beams were strengthened with carbon fiber-steel composite plate(CSP), four of the beams were strengthened with glass fiber-steel composite plate(GSP), and one beam was used as a control specimen. The experimental results showed that new strengthening system controls the premature debonding and provides a more ductile failure mode than other conventional strengthening systems. The observed ductility ratios were 3.01~3.81 and 3.55~4.95 for strengthened beam with CSP and GSP, respectively. The maximum load was increased by 115% and 107% for strengthened beam with CSP and GSP, respectively, comparing with control beam. In addition, experimental and analytical results were well agreed.

Keywords : strengthened RC beam, CSP, GSP, flexural behavior

1. 서 론

전통적으로 철근콘크리트 구조물의 보강방법으로 단면증설 보강공법, 강판부착보강공법, 강선을 이용한 포스트텐션 보강공법, FRP 시스템(섬유시트 및 복합재료판 등)보강공법 등이 널리 이용되어 왔다. 이들 보강공법들 중 FRP 시스템 보강공법은 무게비에 비해 높은 강도 및 높은 강성, 시공 및 유지관리의 우수성 등으로 철근콘크리트 구조물에 대한 우수

한 보강공법으로 인식되고 있다.

FRP 시스템으로 보강된 철근콘크리트 부재의 휨성능(휨 강도 및 휨강성)은 국내·외의 많은 논문에 의해 규명되었으며, 그 결과 FRP 시스템 보강공법의 건설현장 적용은 성공적인 것으로 판단된다. 그러나 보강재의 조기탈락에 의한 FRP 시스템 보강부재의 연성 감소는 FRP 시스템 보강공법의 적용을 제한하고 있다(Arduini and Nanni, 1997; Ross 등, 1999). 또한 이전에 발표된 많은 문헌들(정진환

† 책임저자, 정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 교수

Tel: 051-620-4754 ; Fax: 051-621-0729

E-mail: sdkim@ks.ac.kr

* 인제대학교 건설기술연구소 토목공학과 부교수

· 이 논문에 대한 토론을 2008년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2009년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

등, 2003; Brena 등, 2003; Grace 등, 2003)에 의하면 탄소섬유시트와 탄소섬유판의 파단변형률은 인장파단변형률의 50%~80%정도로 보고되었으며, FRP 시스템 보강부재의 연성을 향상시킬 수 있는 보강재 및 보강재의 조기탈락을 방지 또는 지연시킬 수 있는 정착시스템의 개발이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 보강보의 연성을 향상시킬 수 있는 콘크리트 구조물 보강재료, 강판과 섬유시트의 단점을 보완한 섬유-강판 복합플레이트(이하 복합플레이트)를 적용하였다. 복합플레이트 부착공법은 구조물 보강용 섬유와 얇은 전기아연도금 강판을 일체화한 복합플레이트를 콘크리트 구조물에 정착시켜 필요한 내하력을 확보하는 새로운 보강공법이다. 복합플레이트는 강판에 적정 양의 섬유를 함유하여 공장에서 제작되며, 강판을 중심으로 섬유는 적층으로 배치된다. 강판 외부에 있는 섬유는 강판의 부식을 방지하고, 모체인 콘크리트와 복합플레이트의 부착성을 향상시킨다. 강판과 섬유의 접착력을 최대화하기 위하여 전기아연도금 강판을 사용하였으며, 강판에 5×10mm의 타원형 구멍을 다수 천공하여 두 재료의 접착이 더 잘 되도록 하였다. 또한 강판은 강제앵커 사용을 가능하게 하여 복합플레이트와 콘크리트 면의 부착성을 향상시켰으며, 보강구조물의 높은 강도와 연성의 확보를 가능하게 하였다. 복합플레이트 단면구성을 그림 1에 도시하였다. 유연성이 좋은 얇은 두께의 복합플레이트는 탄소섬유와 강판이 접착된 CSP(Carbon fiber-Steel composite Plate)와 유리섬유와 강판이 접착된 GSP(Glass fiber-Steel composite Plate)로 구분된다.

본 논문에서는 섬유-강판 복합플레이트로 보강된 보강보의 휨성능을 고찰하기 위하여, 7종류의 CSP와 4종류의 GSP로 보강된 11개의 복합플레이트 보강보와, 복합플레이트를 보강하지 않은 1개의 기준 철근콘크리트 보에 대한 체계적인 실험을 실시하였다. 복합플레이트 보강보 실험에서 측정된 하중-처짐 선도, 항복하중, 최대하중, 연성지수, 복합플레이트 파단변형률 등을 분석하여 보강보의 휨성능을 규명하였다.

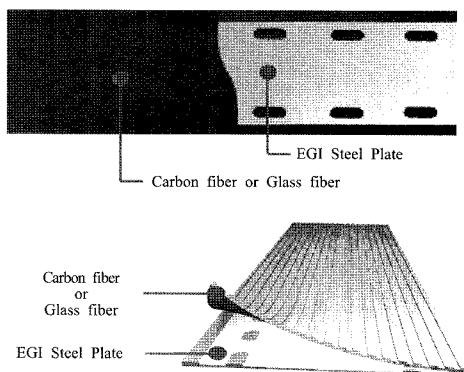


그림 1 복합플레이트의 단면구성

또한, 보강보 실험의 타당성을 입증하기 위하여 휨 실험 결과와 이론적인 해석 결과를 비교하였다.

2. 섬유-강판 복합플레이트 인장성능

복합플레이트의 인장성능을 측정하기 위하여 인장시험을 실시하였다. 복합플레이트 시편형태 및 크기(그림 2)는 ASTM D-638을 고려하여 제작하였다. 인장시험은 ASTM D-638의 규정을 준수하여 100 kN용량의 재료시험기를 이용하여 변위제어로 실시하였다. 하중속도는 재료시험기에 부착된 변위계를 1.0mm/분으로 지속적으로 제어하여 시편이 파단에 도달할 때까지 하중을 가하였으며, 유압식 그림을 사용하여 인장하중을 작용시켰다. 시편의 길이방향 변형률 측정을 위하여 전기저항식 변형률 게이지를 부착하였으며, 측정된 변형률은 응력-변형률 선도 및 탄성계수의 산정에 사용하였다.

탄소섬유가 40g/m 함유된 C-08040, 탄소섬유가 80g/m 함유된 C-08080, 탄소섬유가 120g/m 함유된 C-08120 등 3종류의 탄소섬유-강판 복합플레이트와, 유리섬유가 200g/m 함유된 G-08200 1종류의 유리섬유-강판 복합플레이트에 대한 인장시편을 제작하였다. 인장시험결과와 신뢰성을 확보하기 위하여 종류당 3개씩 합계 12개의 인장시편을 제작하였다. 복합플레이트의 인장시험에서 측정된 응력-변형률 선도를 그림 3에 도시하였다. C-08120, G-08200 및 복합플레이트를 구성하는 탄소섬유, 유리섬유, 강판에 대한 전형적인 인장시험 결과들을 그림에 함께 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 복합플레이트의 하중-변형률 선도는 이상화된 두 직선구간(I구간과 II구간)으로 구성되며, 두 구간은 강판의 항복에 의해 구분된

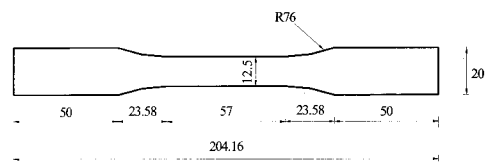


그림 2 섬유-강판 복합플레이트 인장시편의 형태 및 크기 (단위 :mm)

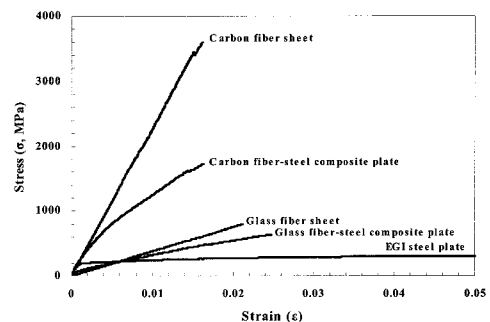


그림 3 복합플레이트의 인장시험에서 측정된 응력-변형률 선도

표 1 복합플레이트 인장시험에서 측정된 최대응력, 파단변형률 및 탄성계수

인장시편 명	최대응력 (MPa)	탄성계수(GPa)		파단 변형률
		I 구간	II 구간	
C-08040	770	213	45	0.0174
C-08080	1150	218	88	0.0151
C-08120	1620	224	129	0.0160
G-08200	610	94	27	0.0243

다. I구간은 복합플레이트의 구성 재료인 보강섬유 및 강관이 모두 탄성적인 거동을 하는 구간으로서 강관의 항복점까지 직 선적인 거동을 하며, II구간은 복합플레이트의 강관이 항복한 이후의 구간으로 섬유의 탄성거동이 지배하는 구간이다. 측정 된 최대응력, 파단변형률, 탄성계수를 표 1에 나타내었다.

3. 복합플레이트 보강보 실험

3.1 복합플레이트 보강보 제작

복합플레이트 보강보 실험에 사용된 철근콘크리트 보의 길이 2,700mm, 폭 200mm, 높이 300mm, 유효높이 250mm로 제작되었다. 인장 철근으로 D16 2본($\rho_s = 0.00794$)을 사용하 였으며, 압축 측에 D10 철근을 사용하여 전단철근의 설치를 용 이하게 하였다. 철근 콘크리트 보의 전단파괴를 방지하기 위하 여 스테럽(D10)을 100mm 간격으로 보의 전체 구간에 배근하 였다. 보강보 실험을 실시하는 날에 콘크리트 압축강도를 측정 하였으며, 압축강도는 양생기간에 큰 관계없이 약 30.6MPa로 측정되었다. 철근의 항복강도는 361.6MPa, 탄성계수는 221.2GPa로 측정되었다. 보강재 종류에 대한 보강보의 휨성 능을 고찰하기 위하여 폭 100mm인 CSP와 GSP를 철근콘크 리트 보의 하부에 길이 2,400mm로 보강하였다. 또한 보강재 양에 대한 보강보의 휨성능을 고찰하기 위하여 두께가 0.8mm 인 강관에 보강재 1.0m당 탄소섬유가 20~140g 함유된 CSP

표 2 섬유-강관 복합플레이트 보강보

시험체 종류	시험체 명	섬유 함유량
기준 보	Control	-
CSP 보강보	CSP 08020	탄소섬유 20g/m 함유
	CSP 08040	탄소섬유 40g/m 함유
	CSP 08060	탄소섬유 60g/m 함유
	CSP 08080	탄소섬유 80g/m 함유
	CSP 08100	탄소섬유 100g/m 함유
	CSP 08120	탄소섬유 120g/m 함유
	CSP 08140	탄소섬유 140g/m 함유
GSP 보강보	GSP 08100	유리섬유 100g/m 함유
	GSP 08200	유리섬유 200g/m 함유
	GSP 08300	유리섬유 300g/m 함유
	GSP 08400	유리섬유 400g/m 함유

와, 두께가 0.8mm인 강관에 보강재 1.0m당 유리섬유가 100 ~400g 함유된 GSP를 사용하였다. 콘크리트 표면에 에폭시 접착제 도포 후 복합플레이트를 부착시켰고 정착용 앵커를 350mm 간격으로 설치하였다. 복합플레이트 보강보의 단면, 철근 배근도, 보강재 부착위치, 앵커 설치위치를 그림 4에 도시 하였다. 기준 철근콘크리트 보가 포함된 12개의 복합플레이트 보강보들을 표 2에 나타내었다.

3.2 복합플레이트 보강보 실험방법

500kN 용량의 액추에이터를 사용하여 네 점 휨실험을 실 시하였다. 단순지지 경계조건을 만족하도록 실험보의 양쪽 단부에서 각각 100mm 떨어진 곳에 강제 롤러를 설치하여 실험보를 지지하였다.

실험보 중앙에서 좌우 250mm씩 떨어진 곳에 강제 가력 장 치를 이용하여 하중을 재하하였다. 두 가력점 사이 500mm 구 간은 순수 휨을 받게 된다. 하중을 균등하게 분포시키기 위하여 강제 가력 장치와 콘크리트면 사이에 고무판(길이 300mm, 폭

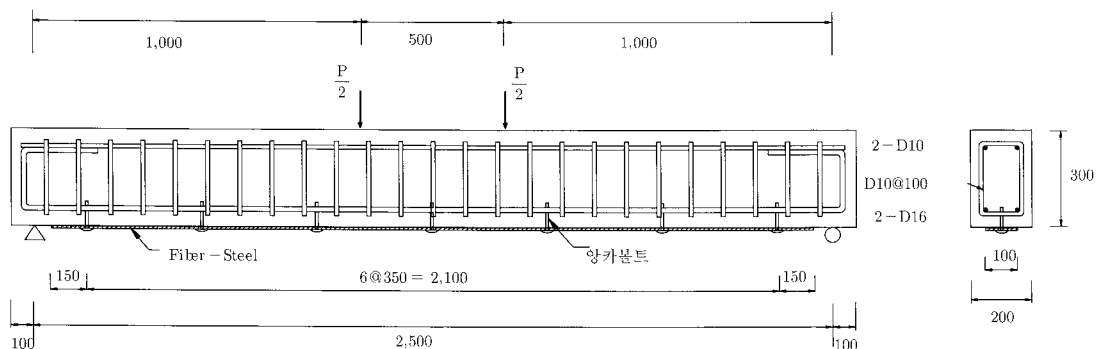


그림 4 복합플레이트 보강보의 단면, 철근 배근도, 보강재 부착위치, 앵커 설치위치(단위:mm)

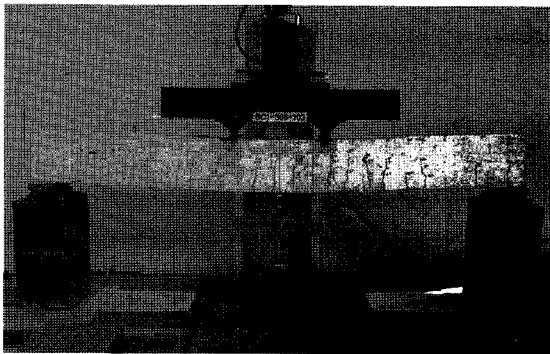


그림 5 복합플레이트 보강보의 설치 및 가력 상황

50mm, 두께 20mm)을 삽입하였다. 하중은 변위 제어방식으로 2.0mm/분의 속도로 가해졌다. 보강보의 설치 및 가력 상황을 그림 5에 나타내었다. 작용하중은 액츄에이터에 부착된 하중계에 의해 측정되었으며, 작용하중에 대한 실험보의 처짐은 보의 중앙 하부에 설치된 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하였다. 복합플레이트의 인장변형률을 측정하기 위하여 복합플레이트 하부에 보의 중앙에서 좌우로 150mm 떨어진 지점에 전기 저항식 변형률 게이지를 부착하였다. 또한 실험보의 콘크리트 압축변형률을 측정하기 위하여 콘크리트 압축상단에 2개의 변형률 게이지를 복합플레이트 게이지 부착 위치와 동일한 곳에 부착하였다. 측정된 변형률은 보강보 실험의 분석에 사용되며, 특히 보강재 파단변형률을 산정하는 데 사용하였다.

3.3 복합플레이트 보강보 실험결과

3.3.1 보강보의 하중-처짐 선도 및 휨 거동

CSP 보강보 및 GSP 보강보 실험에서 측정된 하중-처짐 선도를 각각 그림 6과 그림 7에 도시하였다. 복합플레이트

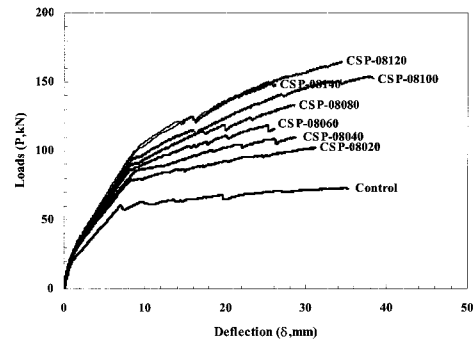


그림 6 CSP 보강보 실험에서 측정된 하중-처짐 선도

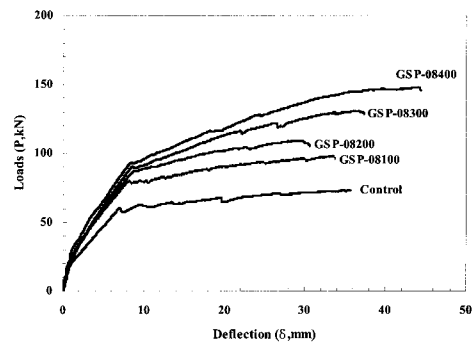


그림 7 GSP 보강보 실험에서 측정된 하중-처짐 선도

보강보의 하중-처짐 관계는 네 구간(균열이전구간, 강판항복이전구간, 철근항복이전구간, 항복이후구간)으로 나타날 것으로 예상했으나, 복합플레이트 내의 강판량이 인장 철근량에 비해 상대적으로 적어 뚜렷한 강판항복이전구간은 나타나지 않았으며, Elmihilmy and Tedesco(2000), 정진환 등(2003)이 언급한 이상화된 세 구간(균열이전구간, 항복이전구간, 항복이후구간)으로 나타남을 확인하였다. 복합플레이트 보강보 실험에서 측정된 균열하중, 항복하중, 최대하중, 각

표 3 복합플레이트 보강보 실험에서 측정된 하중과 휨강성

시험체 종류	시험체 명	균열이전구간		항복이전구간		항복이후구간	
		균열하중(kN)	휨강성(kN/mm)	항복하중(kN)	휨강성(kN/mm)	최대하중(kN)	휨강성(kN/mm)
기준 보	Control	17.54	23.98	61.41	6.759	75.2	0.510
CSP 보강보	CSP 08020	24.43	19.04	79.07	7.534	99.9	0.873
	CSP 08040	22.86	18.26	85.84	7.495	109.7	1.795
	CSP 08060	23.05	22.58	87.21	8.672	118.4	2.256
	CSP 08080	25.60	21.78	91.82	8.574	135.4	2.855
	CSP 08100	24.82	24.39	95.16	8.770	146.6	3.208
	CSP 08120	22.27	35.26	99.67	9.290	158.5	3.855
	CSP 08140	29.23	23.56	104.28	9.604	161.6	3.993
GSP 보강보	GSP 08100	22.66	11.15	80.93	7.632	99.0	1.001
	GSP 08200	22.86	8.79	86.43	8.476	111.1	1.511
	GSP 08300	23.45	8.29	88.58	9.172	126.8	1.972
	GSP 08400	25.60	9.24	93.69	9.967	155.6	2.472

구간의 하중-처짐 선도의 기울기인 휨강성을 표 3에 나타내었다.

균열하중은 보 하단의 인장응력이 콘크리트 휨인장강도 (f_t , 파괴계수)에 도달할 때의 하중이다. 복합플레이트 보강보 실험에서 측정된 보강보의 균열하중은 기준보의 균열하중보다 최대 67% 높은 것으로 측정되어, 콘크리트 최하단에 부착된 보강재는 콘크리트의 응력이 인장강도에 도달하는 것을 지연시키는 경향이 있는 것으로 나타났다. 그러나 보강재 양이 증가할수록 보강보의 휨강성은 향상되어야 함에도 불구하고 몇몇을 제외하고는 실험에서는 거의 일정하게 측정되었다. 이는 균열이전구간에서는 보강보의 휨강성이 보강재 종류와 양에 영향을 거의 받지 않을 뿐만 아니라, 보의 밑면 중앙부에 설치된 변위계에 의해 측정된 보의 처짐은 하중 전달장치의 탄성·비탄성 변형, 지점에서 실험보의 미끄러짐 등으로 인하여 다소 부정확하여, 휨강성의 크기에 영향을 미친 것으로 판단된다(Gopalaratnam 등, 1991). 따라서 균열이전구간에서 복합플레이트 보강재에 의한 보강보의 휨강성 향상은 무시할 수 있을 만큼 미소한 것으로 결론지을 수 있다.

항복하중은 보강보의 항복점 도달 하중이며, 인장 철근의 응력이 항복하중에 도달하였을 때의 하중과 일치한다. 본 연구에 사용된 CSP로 보강한 실험체의 항복하중은 기준보 대비 최대 70%의 항복하중 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨강성은 최대 42%의 휨강성 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, GSP로 보강한 실험체의 항복하중은 기준보 대비 최대 53%의 항복하중 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨강성은 최대 47%의 휨강성 증진효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, CSP와 GSP 보강보의 항복하중과 항복이전구간의 휨강성은 보강재 양에 비례하여 증가하는 것으로 측정되었다.

최대하중은 실험 중 측정된 하중의 최대값으로 하였다. CSP로 보강된 실험체의 최대하중은 기준보 대비 최대 115%의 최대하중 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨강성은 최대 680%의 휨강성 증진효과가 있는 것으로 나타났다. GSP로 보강된 실험체의 최대하중은 기준보 대비 최대 107%의 최대하중 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 휨강성은 최대 380%의 휨강성 증진효과가 있는 것으로 나타났다. 따라서 보강재의 보강효과는 항복이후구간에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 항복이전구간과 마찬가지로 CSP와 GSP 보강보의 최대하중과 항복이후구간의 휨강성도 보강재 양에 비례하여 증가하는 것으로 측정되었다.

3.3.2 보강보의 연성

연성거동을 하는 구조물은 최대수용하중에 도달하기 전에 시각적으로 판별 가능한 변형, 처짐, 균열 등이 발생되어 구조물이 파괴에 도달하기 전 사전징후를 인식하고 사전조치를 취할 수 있는 기회를 부여함으로써 급작스러운 파괴에 대한 방지책을 수립할 수 있다. 따라서 KCI, ACI, AISC규준 등은 강도감소계수 ϕ 를 결정함에 있어서 구조부재의 연성거동을 중요한 항목 중 하나로 취급하고 있다. KCI 및 ACI 규준은 콘크리트의 취약한 인장성능을 철근으로 보강하며, 취성재료인 콘크리트에 철근의 연성성질을 이용하여 철근콘크리트 구조물의 파괴형태를 연성으로 유도함을 주목적으로 하고 있다. 규준에 적합하게 설계된 철근콘크리트 구조물은 파괴에 도달하기 전에 인장철근이 항복변형률에 도달한 후 파괴에 도달하여 연성적인 파괴 형태를 나타낸다.

본 연구에서 복합플레이트의 구성요소 중 섬유는 파단에 도달할 때까지 탄성거동을 하며, 최대강도에 도달할 때까지 파단사전징후를 나타내지 않는 취성재료이다. 따라서 복합플레이트로 보강된 철근콘크리트 구조물의 연성거동을 규명하는 것은 아주 중요한 작업이다. 복합플레이트 보강보실험에서 측정된 하중-처짐 선도에 의한 연성지수를 이용하여 보강보의 연성거동을 고찰하였다.

복합플레이트 보강보의 항복하중시 처짐 δ_y 에 대한 최대하중시 처짐 δ_u 의 비를 연성지수라고 정의하였으며 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

각 복합플레이트 보강보의 항복하중시 처짐, 최대하중시 처짐, 그리고 연성지수를 표 4에 정리하였다.

CSP 보강보의 최대하중 시 처짐은 보강재 양과는 무관하

표 4 실험보에 대한 처짐 및 연성지수

시험체 종류	시험체 명	항복하중시 처짐 (δ_y , mm)	최대하중시 처짐 (δ_u , mm)	연성지수 (μ)
기준 보	Control	6.82	37.22	5.46
CSP 보강보	CSP 08020	8.06	30.48	3.78
	CSP 08040	8.79	28.62	3.26
	CSP 08060	8.38	25.22	3.01
	CSP 08080	8.52	29.22	3.43
	CSP 08100	8.77	38.26	4.36
	CSP 08120	8.64	34.40	3.98
	CSP 08140	8.38	26.22	3.13
GSP 보강보	GSP 08100	8.19	33.69	4.11
	GSP 08200	8.45	30.61	3.62
	GSP 08300	8.57	37.31	4.35
	GSP 08400	8.49	44.35	5.22

계 25.22~38.26mm로 측정되었으며, 연성지수는 3.01~4.36으로 나타났다. 그러나 GSP 보강보의 경우 유리섬유 보강재 양이 증가할수록 최대하중시 처짐은 증가하였고, 연성지수는 3.62~5.22로 나타나 GSP 보강보의 연성은 보강재 양에 비례하는 경향이 있음을 알 수 있다. 결론적으로 복합플레이트 보강보의 연성능력은 철근콘크리트보의 연성능력보다 낮은 것으로 나타났으나 보강보의 연성지수가 3.0이상으로 측정되어 복합플레이트 보강보의 연성능력은 우수한 것으로 판단할 수 있다.

3.3.3 보강보의 균열분포

가력점과 가력점 사이 순수 휨모멘트 구간에서 기준보 하단의 응력이 콘크리트 휨인장강도에 도달함과 동시에 콘크리트에 초기 인장균열은 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 발생한 균열은 중립축을 향해 보의 상부로 진행되었다. 본 연구에 적용된 기준보에 발생한 균열과 균열 사이의 간격은 약 150~200mm로 측정되었으며, 항복점 도달시 균열폭은 약 1.0mm로 측정되었다. 보의 최대하중에 도달할 때까지 균열과 균열 사이에 새로운 균열은 대체로 발생하지 않았으며, 균열폭은 증가하여 약 4.0mm정도로 측정되었다(그림 8). 복합플레이트 보강보의 경우, 최초로 발생한 균열분포는 기준보의 균열분포상태와 비슷한 것으로 측정되었다. 하중이 증가함에 따라 균열 폭의 증가와 함께 균열과 균열 사이에 평균적으로 하나의 새로운 균열이 발생하였다. 항복점 도달시 보강보의 균열폭은 약 0.4mm로 측정되었으며, 최대하중 도달시 균열 폭은 약 1.0mm에 이르는 것으로 측정되어 보강보의 균열폭은 기준보보다 적은 것으로 측정되었다(그림 9). 보강보의 하부에 부착된 복합플레이트는 콘크리트 균열 폭을 억제할 수 있는 것으로 나타났으며, 사용성 측면에서 볼 때 중요한 관점으로 인식될 수 있다. 보강보의 하부 콘크리트에 발생한 새로운 균열은 콘크리트가 인장강도에 도달할 때 가능한 것으로 보의 하부에 부착된 복합플레이트는 콘크리트의 응력을 구속하는 힘이 있는 것으로 판단된다.

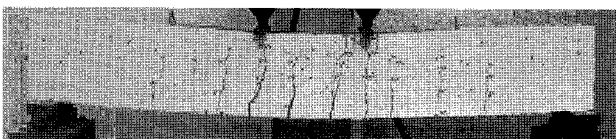


그림 8 철근 콘크리트 기준보의 균열분포



그림 9 복합플레이트 보강보의 균열분포

4. 복합플레이트 보강보의 휨해석과 실험 결과 비교

보강보의 휨해석에 적용된 콘크리트 압축응력-변형률 관계는 Shah 등(1983)의 제안식, 콘크리트 인장응력-변형률 관계는 Gopalaratnam 등(1985)의 제안식을 사용하였다. 이들 조건을 적용한 응력 분포도를 그림 10에 나타내었다. 철근과 강판의 응력-변형률 관계는 변형률 경화를 무시하였으며, 섬유의 응력-변형률 관계는 파괴에 도달할 때까지 탄성적인 응력-변형률 선도를 적용하였다. 보강단면 구성 재료들

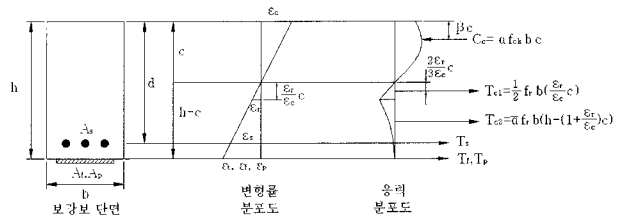


그림 10 항복이전구간 및 항복이후구간의 보강보 단면, 변형률 분포도, 응력 분포도

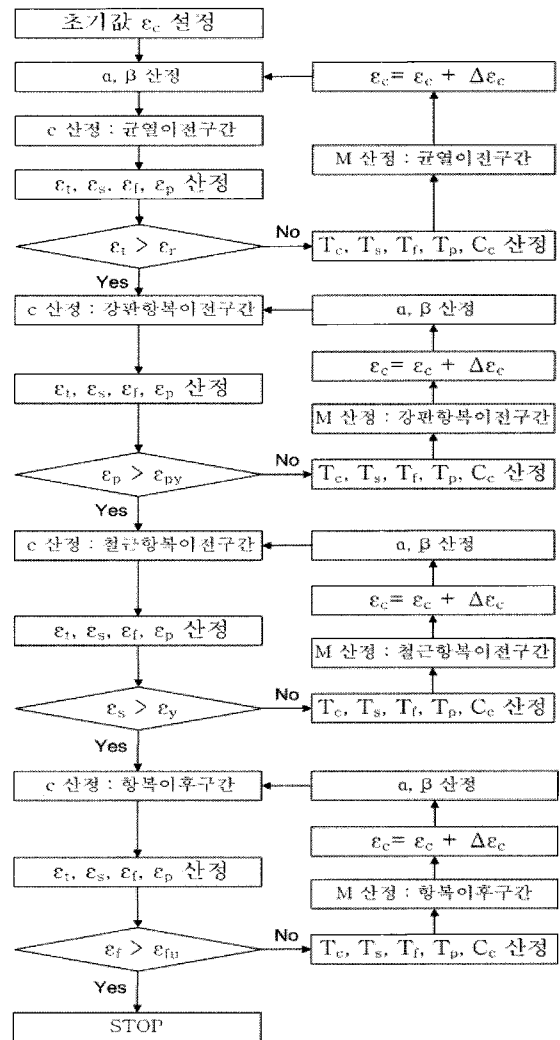


그림 11 각각의 콘크리트 압축변형률 εc 단계에서 탄소 섬유시트 보강 철근콘크리트 보의 저항모멘트 M 산정 흐름도

표 5 복합플레이트 보강단면의 휨해석에 적용된 각 구간에 대한 중립축거리와 휨모멘트 산정을 위한 관계식

구간	구성재료의 거동 상태	중립축 거리 c	휨모멘트 M
균열 이전	$\epsilon_t \leq \epsilon_r$ $\epsilon_p < \epsilon_{py}$ $\epsilon_s < \epsilon_y$	$\left(\alpha f_{ck} b - \frac{b}{2} E_c \epsilon_c\right) c^2$ $+ (A_f E_f + A_s E_s + A_p E_p + t h E_c) \epsilon_c c$ $- \left(A_f E_f h + A_s E_s d + A_p E_p h + \frac{b}{2} h^2 E_c\right) \epsilon_c = 0$	$T_c \left(\frac{2}{3}(h-c) + (c-\beta c)\right)$ $+ T_s (d-\beta c) + T_f (h-\beta c)$ $+ T_p (h-\beta c)$
강판항복 이전	$\epsilon_t > \epsilon_r$ $\epsilon_p \leq \epsilon_{py}$ $\epsilon_s < \epsilon_y$	$\left(\alpha f_{ck} b - \frac{b f_r \epsilon_r}{2 \epsilon_c} + \bar{\alpha} f_r b \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c}\right)\right) c^2$ $+ (A_f E_f \epsilon_c + A_s E_s \epsilon_c + A_p E_p \epsilon_c - \bar{\alpha} f_r t h) c$ $- (A_f E_f h + A_s E_s d + A_p E_p h) \epsilon_c = 0$	$T_{cl} \left(\frac{2 \epsilon_r}{3 \epsilon_c} + 1 - \beta\right) c$ $+ T_{c2} \left(\frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} c + \bar{\beta} \left(h - c - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c} c\right) + (c - \beta c)\right)$ $+ T_s (d - \beta c) + T_f (h - \beta c)$ $+ T_p (h - \beta c)$
철근항복 이전	$\epsilon_t > \epsilon_r$ $\epsilon_p > \epsilon_{py}$ $\epsilon_s \leq \epsilon_y$	$\left(\alpha f_{ck} b - \frac{b f_r \epsilon_r}{2 \epsilon_c} + \bar{\alpha} f_r b \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c}\right)\right) c^2$ $+ (A_f E_f \epsilon_c + A_s E_s \epsilon_c - A_p f_{py} - \bar{\alpha} f_r t h) c$ $- (A_f E_f h + A_s E_s d) \epsilon_c = 0$	
항복 이후	$\epsilon_t > \epsilon_r$ $\epsilon_p > \epsilon_{py}$ $\epsilon_s > \epsilon_y$	$\left(\alpha f_{ck} b - \frac{b f_r \epsilon_r}{2 \epsilon_c} + \bar{\alpha} f_r b \left(1 + \frac{\epsilon_r}{\epsilon_c}\right)\right) c^2$ $+ (A_f E_f \epsilon_c - A_s f_y - A_p f_{py} - \bar{\alpha} f_r t h) c$ $- A_f E_f h \epsilon_c = 0$	

의 거동 상태에 따라 네 구간으로 나누어 보강단면의 휨성능을 해석하였다. 힘의 평형조건과 변형을 적합조건을 만족시킨 각 구간의 중립축거리 c 와 보강단면의 휨모멘트 산정을 위한 관계식들을 표 5에 기술하였고, 각각의 콘크리트 압축 변형을 단계에서 보강보의 휨모멘트를 산정하는 과정을 그림 11에 도시하였다.

표 5의 중립축 거리 및 휨모멘트를 산정하는 식에 나타나는 변수들은 그림 10에 잘 표현되어 있으며, 특히 구성재료들의 변형률인 ϵ_c , ϵ_t , ϵ_r 는 각각 콘크리트의 압축, 인장, 인장파괴 변형률, ϵ_p , ϵ_{py} 는 각각 강판의 인장, 항복 변형률, ϵ_s , ϵ_y 는 각각 철근의 인장, 항복 변형률, ϵ_r , ϵ_{tu} 는 각각 FRP의 인장, 인장파단 변형률을 의미한다.

복합플레이트 보강보들 중 대표적으로 CSP 08120, GSP 08400에 대해 휨해석과 휨실험에서 구해진 하중-처짐 선도들을 각각 그림 12와 그림 13에서 비교하였다. 이론적 해석에 의한 하중-처짐 선도들에도 네 구간(균열이전구간, 강판항복이전구간, 철근항복이전구간, 항복이후구간)이 아닌 세 개의 구간(균열이전구간, 항복이전구간, 항복이후구간)만이 나타났다. 이는 앞서 복합플레이트 보강보 실험결과에서도 언급했듯이 복합플레이트 내의 강판량이 인장 철근량에 비해 상대적으로 적어 뚜렷한 강판항복이전구간을 나타내지 못한 결과로 판단할 수 있다.

복합 플레이트 보강보의 휨해석에서는 보 하단에 부착된 보강재가 콘크리트의 인장응력을 구속하는 것으로 고려하였으며, 보 하부 콘크리트 평균 인장응력(f_t)의 성능을 휨 인장강도(f_r)의 0%, 10%, 20%로 간주하여 보강보의 휨 거

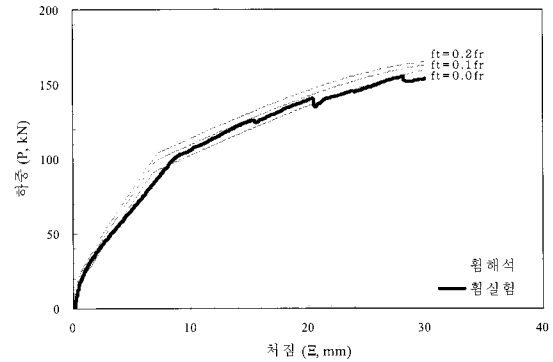


그림 12 CSP 08120 보강보 실험과 휨해석의 하중-처짐 선도

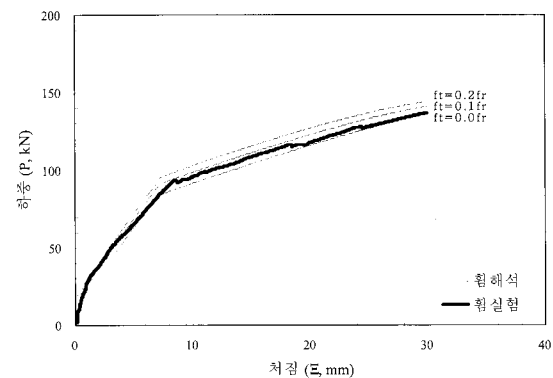


그림 13 GSP 08400 보강보 실험과 휨해석의 하중-처짐 선도

동을 해석하였다. $f_t = 0.1 f_r$ 로 휨해석한 보강보의 하중-처짐 선도가 실험에서 측정된 최대하중에 도달할 때까지의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으며, $f_t = 0.0 f_r$ 의 경우는 실험에 의해 측정된 휨성능이 다소 낮게, $f_t = 0.2 f_r$ 의 경우

표 6 $f_t = 0.1 f_r$ 로 간주하여 휨해석한 복합플레이트 보강보의 최대하중과 실험에서 측정된 최대하중의 비교

시험체 종류	시험체 명	복합플레이트 변형률	최대하중		
			실험	해석	실험 해석
기준 보	Control		7.67	7.06	1.086
CSP 보강보	CSP 08020	0.011130	10.19	10.14	1.005
	CSP 08040	0.009440	11.18	11.04	1.013
	CSP 08060	0.009630	12.07	12.36	0.977
	CSP 08080	0.009750	13.80	13.64	1.011
	CSP 08100	0.009820	14.94	14.87	1.005
	CSP 08120	0.009770	16.16	15.97	1.012
	CSP 08140	0.009580	16.47	16.91	0.974
GSP 보강보	GSP 08100	0.001228	10.09	10.15	0.994
	GSP 08200	0.001148	11.32	11.70	0.968
	GSP 08300	0.001138	12.93	13.21	0.979
	GSP 08400	0.001192	15.86	14.85	1.068

는 실험에 의해 측정된 휨성능이 다소 높게 평가됨을 알 수 있다. 따라서 복합플레이트로 보강한 철근콘크리트 보의 휨 해석은 보 하부의 콘크리트 평균인장성능을 콘크리트 휨인장 강도의 10%로 고려하는 것이 타당한 것으로 판단할 수 있다.

$f_t = 0.1 f_r$ 로 간주하여 휨해석한 복합플레이트 보강보의 최대하중과 실험에서 측정된 최대하중을 표 6에 비교하였다. 표 6에 나타난 복합플레이트 변형률은 보강보 실험에서 측정된 최대하중에 대응하는 변형률이며, 이를 기준으로 보강보 휨해석에 의한 최대하중을 산정하였다. 표의 실험/해석 비를 살펴보면 복합플레이트 보강보 최대하중에 대한 실험결과와 보강보 휨해석은 잘 일치함을 알 수 있으며, 본 연구에서의 이론적 보강보 휨해석은 타당한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문은 철근콘크리트 보에 대한 섬유-강판 복합플레이트의 보강 효과를 실험으로 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. CSP 보강보와 GSP 보강보의 항복하중은 기준보 대비 각각 최대 70%와 53% 크게 나타났으며, CSP 보강보와 GSP 보강보의 항복이전구간의 휨강성은 기준보 대비 최대 42%와 47%의 증진효과가 있는 것으로 나타났다.
2. CSP 보강보와 GSP 보강보의 최대하중은 기준보 대비 각각 최대 115%와 107% 크게 나타났으며, CSP 보강보와 GSP 보강보의 항복이후구간의 휨강성은 기준보 대비 최대 680%와 380%의 증진효과가 있는 것으로

로 나타났다. 섬유-강판 복합플레이트에 의한 보강효과가 가장 탁월하게 구현된 구간은 항복이후구간으로 나타났다.

3. CSP 보강보의 연성지수는 3.01~4.36으로 나타났으며, GSP 보강보의 연성지수는 3.62~5.22로 나타났다. 복합플레이트 보강보의 연성능력은 철근콘크리트보의 연성능력보다 낮은 것으로 나타났으나 보강보의 연성지수가 3.0이상으로 측정되어 복합플레이트 보강보의 연성능력은 우수한 것으로 나타났다.
4. 복합플레이트 보강단면의 휨 해석 및 보강보 실험을 통해 하중-처짐 선도, 하중, 휨강성 등을 비교한 결과 대체로 일치하는 것으로 나타나 제안된 보강단면 휨해석의 타당성을 입증하였다. 보강단면 휨해석에 사용된 콘크리트 인장성능은 보강단면의 하부 콘크리트 평균인장 응력을 휨 인장강도의 10%로 고려하였다.

감사의 글

이 논문은 2004년 인제대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것이다.

참 고 문 헌

정진환, 김성도, 조백순, 이우철 (2003) 탄소섬유시트 보강 철근콘크리트 보의 공칭휨모멘트-I. 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 23(5A), pp.921~929.

Arduini, M., Nanni, A. (1997) Behavior of Precracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets, *Journal of Composites for Construction*, 1(2), pp.63~70.

Brena, S. F., Bramblett, R. M., Wood, S. L., Kreger, M. E. (2003) Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites, *ACI Structural Journal*, 100(1) Jan-Feb., pp.36~46.

El-Mihilmy, M. T., Tedesco, J. W. (2000) Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126(6), pp.684~691.

Gopalaratnam, V. S., Shah, S. P. (1985) Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension, *ACI Journal*, 82(3), pp.310~323.

Gopalaratnam, V. S., Shah, S. P., Batson, G. B., Criwell, M. E., Ramakrishnan, V., Wecharatana, M. (1991) Fracture Toughness of Fiber Reinforced

- Concrete, *ACI Materials Journal*, 88(4), pp.339~353.
- Grace, N. F., Ragheb, W. F., Abdel-Sayed, G.** (2003) Flexural and Shear Strengthening of Concrete Beams Using New Triaxially Braided Ductile Fabric, *ACI Structural Journal*, 100(6), pp.804~814.
- Ross, C. A., Jerome, D. M., Tedesco, J. W., Hughes, M. L.** (1999) Strengthening of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Composite Laminates, *ACI Structural Journal*, 96(2), pp.212~220.
- Shah, S. P. and Fafitis, A., Arnold, R.** (1983) Cyclic Loading of Spirally Reinforced Concrete, *Journal of Structural Engineering*, 109(7), pp.1695~1710.