CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 RC 보의 휨강도 해석

Analysis of the Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Fiber-Reinforced Polymer Plates

우 상 균* 홍 기 남** 한 상 훈*** 송 영 철****

Woo, Sang-Kyun Hong, Ki-Nam Han, Sang-Hoon Song, Young-Chul

Abstract

The purpose of this study is to analyse and compare experimentally flexural behavior of RC beams strengthened with CFRP plates by different methods, and finally suggest the evaluation equations of flexural capacity of RC beams with the aim of application of prestressed CFRP strengthening. The experimental parameters are compressive strength, reinforcement ratio, prestressing level and strengthening methods. The non-prestressed specimens failed on account of separation of the plates from the beams due to premature de-bonding, while most of the prestressed specimens failed due to CFRP plate fracture. The evaluation equations of flexural capacity of RC beams is suggested and these equations have a good reliability in predicting flexural strength of RC beams.

요 지

본 연구의 목적은 CFRP판을 다양한 방법으로 보강한 RC보의 휨거동을 실험적으로 비교·분석하고, 프리스트레싱 보강공법의 실용화를 목적으로 프리스트레싱 보강 RC부재의 휨성능 평가식을 제안하는 것이다. 실험변수로는 CFRP판의 보강방법, 콘크리트 압축강도, 인장철근비 그리고 프리스트레싱 수준 등을 고려하였다. 실험결과 프리스트레싱이 도입되지 않은 실험체는 조기 부착파괴로 인해 탄소판이 콘크리트로부터 탈락하면서 파괴된 반면, 프리스트레싱을 가한 대부분의 실험체는 CFRP판의 파단으로 파괴되었다. 프리스트레싱 보강된 부재의 휨강도를 예측할 수 있는 식을 제안하였으며, 실험결과와의 비교를 통하여 제안식은 휨강도 예측에 있어 충분한 정확도를 확보하고 있음을 확인하였다.

Keywords : CFRP plate, Bond, Prestressing, Flexural capacity, RC beams

핵심 용어 : 탄소섬유판, 부착, 프리스트레싱, 휨성능, RC 보

* 정회원, 한전 전력연구원 선임연구원

** 정회원, 충북대학교 토목공학과 전임강사

*** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수

**** 정회원, 한전 전력연구원 수석연구원

E-mail : wskyun@kepri.re.kr 042-865-5753

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2007년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

국내·외적으로 노후화된 철근콘크리트 구조물이 증가함에 따라 강판이나 FRP(fibe-reinforced polymer) 등을 이용한 구조물 보강사례가 증가하고 있으며, 이와 함께 전체 건설시장 가운데 구조물 보수·보강 분야의 비중은 크게 증가하고 있는 실정이다. 이에 따라 장기적인 관점에서 역학적인 특성뿐만 아니라 내부식성의 장점을 갖고 있는 탄소섬유 보강재와 같은 복합신소재가 기존의 강판대용으로 이용되면서 구조물의 유지관리 및 보수·보강 비용을 절감할 수 있게 되었다. 그러나 이러한 복합재료를 이용한 기존의 보강방법은 주로 표면부착을 통해 보강이 이루어지므로 보강재 단부에서의 응력집중과 통기성, 수분접촉 등의 환경적 요인에 의해 부식 및 박리(부착면 파괴)가 발생하여 보강재의 재료적 성능이 충분히 발휘되기도 전에 조기 파괴되는 문제점을 안고 있다.[8][9]

현재 국내에서는 철근 콘크리트 구조물의 보수·보강을 위해 강판접착공법, FRP 섬유부착공법, 외부 프리스트레싱 공법 등이 사용되고 있다. 특히, CFRP 쉬트 부착공법은 그동안 활발한 연구를 통해 많은 연구 성과들이 보고되어 있으며[3][4] 교량이나 건축물의 슬래브 보수·보강 등에 실무적으로 많이 적용되어 오고 있다. 그러나 CFRP 쉬트 부착공법은 시간이 경과함에 따라 누수 및 환경적인 요인으로 인해 콘크리트와 쉬트의 부착면이 들뜨거나 떨어지는 현상이 자주 발생하는 단점을 가지고 있다. 최근에는 CFRP 쉬트 부착공법의 대안으로 CFRP판을 이용한 보강공법에 대한 연구가 연구자들에 의해서 활발하게 진행되고 있다.[5][6] 이들의 연구결과를 분석해 보면 CFRP판으로 콘크리트 구조물을 보강할 경우 CFRP판의 보강량, 보강길이, 단부보강방법 등 여러 변수에 따라 서로 다른 구조적 거동을 기대하지만 실제 설계시 기대되는 CFRP판의 재료성능을 발휘하지 못한다. 이는 전단균열 또는 휨균열로 인해 가력점 근처 콘크리트 하단과 CFRP판의 접착면에 계면균열로 시작되어 단부로 진전되는 계면파괴박리 또는 CFRP판의 단부에서 발생하는 응력집중으로 인한 균열로 인하여 보강판이 피복콘크리트를 물고 떨어지는 단부파괴박리 등으로 인한 조기파괴가 발생하기 때문이다. 이러한 파괴 형태는 경제적인 측면이나 역학적 측면으로 바람직하지 않다. 특히, 보강설계시 조기파괴의 형태에 따른 파괴 메카니즘을 파악하고 그 파괴특성을 고려해야하는 문제점을 안고 있다.

근래 이러한 CFRP판 표면부착 공법의 문제점을 해결하기 위해 CFRP판에 프리스트레싱력을 도입하여 단부에 정착하는 공법에 관한 연구결과가 몇몇 연구자들에 의해 발표되었다. 특히, 유 등[7]은 CFRP판에 프리스트레싱 수준을 CFRP판의 인장강도를 기준으로 0%, 20%, 40%, 60%, 70%로 변화시킨 RC 보에 대한 휨실험을 실시하여 프리스트레싱 보강공법은 CFRP판에 도입된 프리스트레싱 수준에 의해 균열하중, 항복하중 및 공칭하중은 증가하며 최종파괴 시의 부재의 처짐은 감소한다고 보고하였다. 또한, 박 등[1]은 부착과 비부착식 CFRP판 프리스트레싱 공법으로 휨보강된 휨실험체에 대한 휨실험을 실시하고 휨성능 개선효과 및 연성능력을 평가하였다. 그러나 이 들의 연구는 휨성능에 영향을 미칠 수 있는 여러 변수들을 고려하지 않고 주로 프리스트레싱 수준에 초점을 맞춘 연구로서 프리스트레싱 공법으로 휨보강된 휨부재의 성능개선 효과를 총괄적으로 평가하기에는 무리가 있다.

따라서, 본 연구에서는 탄소섬유판을 이용한 프리스트레싱 보강공법의 실용화를 목적으로 프리스트레싱 보강 RC 부재의 휨성능 실험을 수행하고 평가식을 제안함으로써 프리스트레싱 보강설계의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 사용재료

2.1.1 콘크리트

본 연구에서는 콘크리트 강도에 따른 영향을 관찰하기 위해 네 가지 경우의 콘크리트 강도를 실험변수로 정하였다. 이를 위해 1종 포틀랜드시멘트와 25 mm 이하의 굵은골재를 사용하여 실험체를 제작하였으며, 압축강도로 각각 21 MPa, 28 MPa, 36 MPa 그리고

40 MPa을 목표강도로 설정하였다. 콘크리트 강도는 φ100 × 200 mm 크기의 원주형 공시체를 제작하여 수중양생한 후 재령 28일에서 측정한 압축강도를 기준으로 하였으며, 각 실험체에 대한 압축강도의 평균값은 21.8 MPa, 27.0 MPa, 33.0 MPa, 44.1 MPa로 나타났다.

2.1.2 철근

인장철근은 KS D 3504의 이형철근으로 SD 400을 사용하였다. 또한, 압축철근과 전단철근은 D10 철근을 사용하였으며, 그 재료 특성값은 Table 1과 같다.

Table 1 철근의 재료 특성값

철근치수	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	신장율 (%)
D10mm*	2×10^5	626.2	500.7	17.8
D13mm*		622.2	498.7	20.0
D16mm*		732.1	476.2	16.3
D19mm*		683.1	465.8	16.4

* KS D3504 SD400, INI Steel Company

2.1.3 CFRP판 및 에폭시

실험에 사용한 CFRP판은 스위스 S사에서 개발된 제품으로서 두께는 1.4mm이며 철근과 비교하여 탄성계수는 거의 같으나 인장강도는 약 5배인 재료이며, CFRP판의 부착에 사용된 에폭시는 같은 회사에서 생산된 제품으로서 재료 특성값은 Table 2, 3과 같다.

Table 2 CFRP판의 재료 물성값

제 품 명	탄성계수 (MPa)	극한강도 (MPa)	극한변형율 (%)
S & P Laminate (150/2000)	165,000	2,700 ~ 3,000	1.2

Table 3 에폭시의 재료 물성값

제품명	압축강도 (MPa)	휨강도 (MPa)	부착강도 (MPa)	경도
Epoxy resin200	80.3	42.2	3.0	84

2.1.4 프리스트레싱 장치

본 연구에 사용된 프리스트레싱 장치는 크게 유압을 이용해 실질적으로 프리스트레스를 가하는 유압장치와 콘크리트 모체에 고정되어 프리스트레스에 견디고 결국 실험체의 내하력 및 연성을 증가시키는데 중요한 역할을 하는 정착장치로 분류할 수 있다. 이 중 정착장치는 기존에 사용된 형태가 아닌 CFRP판을 접하는 부분에 곡률을 주어 일방향 섬유인 CFRP판의 쪼개짐과 슬립이 일어나지 않도록 하였다. Photo 1은 프리스트레싱 장치를 나타낸 것이다.

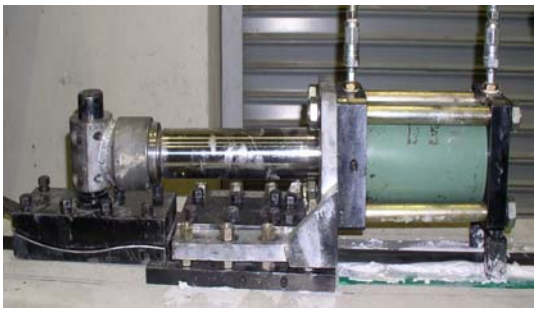


Photo 1 프리스트레싱 장치

2.2 실험 변수

휨실험에서 고려된 실험변수와 실험체는 Table 4와 같으며, 실험변수로는 CFRP판의 보강방법, 콘크리트 압축강도, 인장철근비 그리고 프리스트레싱 수준 등을 고려하였다.

2.3 실험 방법

2.3.1 실험체 제원

CFRP판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 휨성능 개선효과를 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 실험체를 제작하였으며, CFRP판을 RC보의 인장부에 부착한 후 실험을 수행하였다. 이때 보강된 실험체에서 휨파괴나 CFRP판의 박리파괴가 발생하기 전에 전단파괴가 발생되는 것을 방지하기 위해 전단철근을 150 mm 간격으로 배근하였다.

Table 4 실험변수

실험 체명	콘크리트 강도* (MPa)	보강방법	프리스트레싱 수준**(%)	인장철근비 (%)
MU-III	28.0 (27.0)	무보강	-	0.86
M0-III	28.0 (27.0)	표면부착	-	0.86
M4-III	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.4(0.40)	0.86
M6-III	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.6(0.61)	0.86
M8-III	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.8(0.80)	0.86
M4-I	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.4(0.51)	0.30
M6-I	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.6(0.60)	0.30
M8-I	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.8(0.73)	0.30
M6-II	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.6(0.61)	0.55
M8-II	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.8(0.80)	0.55
M6-IV	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.6(0.64)	1.26
M8-IV	28.0 (27.0)	프리스트레싱	0.8(0.72)	1.26
L6-III	21.0 (21.8)	프리스트레싱	0.6(0.59)	0.86
L8-III	21.0 (21.8)	프리스트레싱	0.8(0.77)	0.86
H6-III	36.0 (33.0)	프리스트레싱	0.6(0.57)	0.86
H8-III	36.0 (33.0)	프리스트레싱	0.8(0.78)	0.86
U7-I	40.0 (44.1)	프리스트레싱	0.7(0.65)	0.30
U7-II	40.0 (44.1)	프리스트레싱	0.7(0.69)	0.55
U7-III	40.0 (44.1)	프리스트레싱	0.7(0.70)	0.86
U7-IV	40.0 (44.1)	프리스트레싱	0.7(0.77)	1.26

주) * : 설계 강도(실제 강도)
** : 설계 프리스트레싱 수준(실제 프리스트레싱 수준)

L 6 -II
① ② ③

① : 콘크리트 강도, f_{ck}
(L=21.8MPa, M=27.0MPa, H=33.0MPa, U=44.1MPa)
② : (문자) 정착방법
(U=무보강, O=표면부착)
(숫자) 프리스트레싱 수준
(4=0.4%, 6=0.6%, 7=0.7%, 8=0.8%)
③ : 인장철근비
(I =0.3%, II=0.55%, III=0.86%, IV=1.26%)

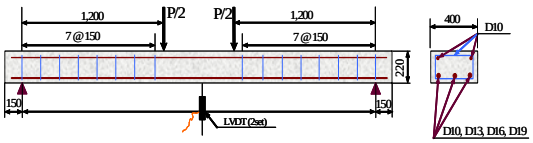
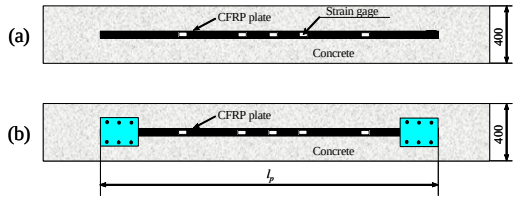


Fig. 1 실험체 상세(단위 : mm)



(a) 표면부착 (b) 단부정착

Fig. 2 보강 기구의 상세(단위 : mm)

2.3.2 보강 방법

실험체에 CFRP판을 보강하기 전 인장부에 묻어있는 레이턴스를 제거하기 위해 그라인딩을 하고 고압세척을 실시하였다. 프리스트레싱을 가하지 않고 표면부착만 하는 실험체는 부착위치에 에폭시를 얇게 바른 다음 CFRP판을 콘크리트면에 압착하는 방법으로 보강을 실시하였다. 탄소판의 보강길이는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 참고문헌 9를 참고하여 모든 실험체에서 순경간의 80%로 설정하였다. 한편, 프리스트레싱 보강하는 실험체는 먼저 Photo 2에 나타낸 정착장치를 설치하기 위한 앵커볼트 구멍을 햄머드릴을 이용하여 뚫고, 고압세척하여 앵커구멍에 남아있는 먼지를 제거하였다. 프리스트레스를 도입하는 방법은 ① 실험체의 양쪽 단부에 Photo 2에 나타낸 앵커 플레이트를 설치한 후 이를 이용하여 CFRP판의 한쪽을 고정한다. ② 에폭시를 슬래브의 하면에 얇게 바른 후 압착시킨다. ③ CFRP판의 다른 한쪽을 가동장치에 정착한 후 Photo 1에 나타낸 것과 같이 유압장치를 이용하여 가동장치를 밀어내어 프리스트레싱을 가한다. ④ 가동장치 앞쪽의 정착판에 CFRP판을 고정한다. CFRP판을 고정하기 위해서 사용된 정착장치의 정착면은 Photo 2에 나타낸 것과 같이 곡률을 주어 마찰력을 증가시켜 슬립이 발생하는 것을 방지하였다.

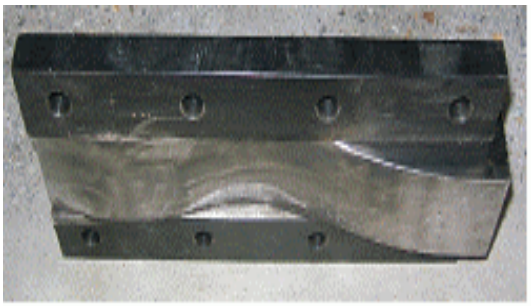


Photo 2 단부정착판 단면

2.3.3 하중재하 및 측정방법

CFRP판으로 보강한 실험체의 휨실험을 위해 Photo 3과 같이 시험장비를 구성하였으며, 유압잭을 통해 하중이 재하되도록 하였다. 하중재하는 5000 kN용량의 유압잭과 로드셀을 이용하였으며, 변위재하

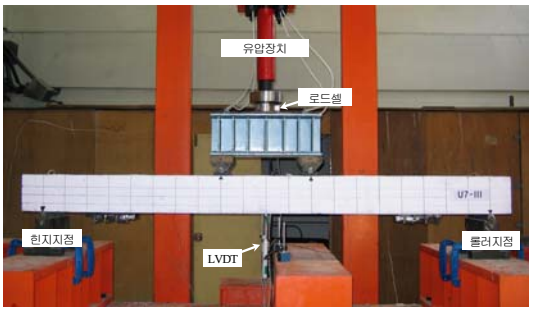


Photo 3 휨실험 전경

Fig. 3 계면 박리 파괴

방식에 의해 4점 재하하였다. 또한, 보의 중앙부 인장철근에 3개의 변형률 게이지와 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 CFRP판에 5개의 20000μ까지 측정이 가능한 소성게이지를 부착하여 변형률을 측정하였으며, 처짐을 측정하기 위해 변위계(linear variable displacement transducer, LVDT)를 Fig. 1과 같이 보의 중앙에 2개 설치하여 그 평균값을 변위로 취하였다. 또한, 데이터 로거(data logger)를 이용하여 실험체의 최종 파괴 시까지 실험체 중앙부에서의 처짐과 철근, 콘크리트 그리고 CFRP판의 변형률을 하중단계별로 측정하였다. 더불어 실험체의 초기균열과 균열진행상황, CFRP판의 탈락 등을 육안으로 관찰하여 기록하였으며, 각 하중단계에서 발생되는 균열을 부재면에 기록하여 실험 종료 후 균열도를 작성하고 사진촬영을 하였다.

3. 실험 결과

3.1 파괴모드

실험체의 파괴형태는 실험 시 콘크리트 균열의 발생과 진전, CFRP판의 탈락유무, 그리고 인장철근과 CFRP판에 부착한 변형률 게이지와 변위계의 값을 참고로 하여 각 실험체의 파괴과정과 최종파괴 형태를 결정하였다.

기준실험체인 MU-Ⅲ는 초기균열이 11.1kN에 발생하였으며, 하중이 증가하면서 실험체 인장부에 휨균열이 일정한 간격으로 발생하기 시작했다. 최대하중 이후 새로운 휨균열은 발생하지 않고 실험체 중앙부 근처의 균열이 압축부로 성장하면서 균열 폭이 증가하여 처짐이 크게 증가하였다. 최종파괴 시점에서는 인장부에 발생한 균열이 성장하여 압축부까지 도달하였으며, 이로 인해 압축부 콘크리트가 압괴하는 전형적인 휨파괴 양상을 나타내었다.

CFRP판을 표면부착한 M0-Ⅲ 실험체는 초기균열 발생 하중이 14.0kN으로 기준실험체보다 약간 큰 값을 나타내었다. 그러나 그 이후 발생하는 휨균열은 MU-Ⅲ와는 다르게 일정한 간격과 속도로 압축부로 진전하는 거동을 나타내었다. 최대하중에서도 MU-Ⅲ와 같이 새로운 휨균열은 발생하지 않았으며, 기 발생한 균열의 폭도 크게 증가하지는 않았다. 최대하중에서 급작스럽게 CFRP판의 단부에서 큰 소음이 발생하면서 CFRP판이 탈락하는 취성적인 파괴모드를 나타내었다.(Fig. 3)

프리스트레싱 보강한 모든 실험체의 경우 MU-Ⅲ나 M0-Ⅲ와 비교해서 초기균열 발생하중이 크게 증가하였으며, 균열이 지점부까지 균일한 간격으로 발생하였다. 철근의 변형률이 항복변형률 이상으로 증가하면서 CFRP판과 콘크리트의 부착면에서 약간의 파괴음이 발생하기 시작했다. 재하하중이 최대하중에 도달하면서 실험체의 중앙부에서 CFRP판과 콘크리트를 일체화시키고 있던 에폭시가 콘크리트로부터 떨어지면서 엄청난 폭음이 발생하였다. 재하하중은 부착면의 급작스런 탈락과 동시에 5~10 kN정도 급격하게 감소하였다가 다시 안정적으로 하중에 저항하는 거동을 보였다. 특히, 인장철근비가 작은 실험체(M4-I, M6-I, M8-I, U7-I)에서는 중앙부 CFRP판이 탈락하기 이전의 내력을 거의 100% 회복하였다. 실험이 지속적

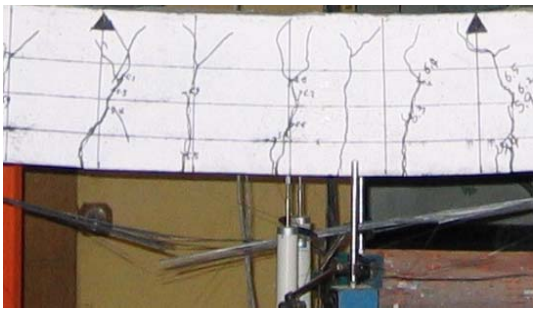


Fig. 4 CFRP판의 인장파괴

Fig. 5 정착판의 박락에 의한 파괴

으로 진행되면서 일부 실험체(L6-III, H8-III, U7-I, U7-III, U7-IV)에서는 중앙부 CFRP판의 탄소섬유들이 한 가닥씩 파단되어 떨어져 나가면서 점차적으로 내력을 상실하다가 순간적으로 CFRP판이 인장파단되는 파괴모드를 나타내었다.(Fig. 4) CFRP판이 파단된 위치는 실험체마다 약간의 차이는 있으나 크게 중앙부 근처에서 파괴된 실험체와 단부 정착판 끝에서 파단되는 실험체로 구분할 수 있었다. 이와 같이 CFRP판이 파단되는 위치가 다르게 나타나는 원인에 대해서는 명확한 원인을 찾을 수는 없었으나, CFRP판이 파단될 때의 실험체 중앙부의 인장변형률은 CFRP판 파단위치와 관계없이 CFRP판의 극한변형률 이상의 값을 나타내어 파단위치에 의한 보강효과의 영향은 거의 없는 것으로 판단되었다. 한편, M8-I과 M6-II 실험체는 정착판 설치작업 과정에 실험체에 손상이 발생하여 처짐이 증가하는 중에 갑작스럽게 단부 정착판 부근 균열의 폭이 급작스럽게 증가하면서 단부 정착판이 박락하여 파괴되었다.(Fig. 5)

실험종료 후 모든 실험체의 단부 정착판을 분해하여 CFRP판 슬립여부를 조사하였으나 단부 정착판에 정착된 CFRP판 표면에 슬립의 흔적은 보이지 않았다.

3.2 결과분석

Table 5에 나타낸 것과 같이 본 실험에서는 보강이 이루어지지 않은 기준실험체로 MU-III 실험체만을 제작하여 휨실험을 실시하였으나, MU-III 실험체에 대한 실험결과와 이론적으로 산정한 파괴하중을 비교할 때 그 차이가 매우 미소하여 이론식으로도 충분한 정확도를 가지고 무보강 실험체의 파괴하중을 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 Table 5에 나타낸 실험체 중에서 무보강 기준실험체가 없는 실험체는 이론식을 기준으로 산정한 파괴예상하중을 가지고 보강효과를 평가하여 제시하였다.

기준실험체 및 CFRP판으로 프리스트레싱 휨보강된 철근콘크리트 실험체의 휨실험 결과는 Table 6과 같다. 실험결과 기준실험체와 비교하여 CFRP판을 표면부착한 경우 하중저항능력이 20.6% 증가하였으며, 프리스트레싱 보강된 실험체는 46.7~243.0% 증가하여 보강효과가 표면부착한 경우에 비해 크게 개선됨을 확인할 수 있었다. 또한, 프리스트레싱 보강된 실험체의 경우 기준실험체에 비해 초기균열 발생시점의 하중이 크게 증가하여 초기균열 억제효과가 매우 큰 것을 확인할 수 있었다. 그러나 프리스트레싱 보강된 실험체는 CFRP판의 파단에 의해 취성적으로 파괴되므로 기준실험체에 비해 상대적으로 처짐은 작게 나타났다.

4. 휨강도 해석

4.1 평형보강비

CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 부재의 휨강도 해석을 위해서는 먼저 파괴모드를 결정해야 한다. 파괴모드를 결정하기 위해 파괴 시 콘크리트와 CFRP판이 동시에 파괴되는 것으로 가정하여 변형률 분포를 나타내면 Fig. 6(a)와 같다. 이 때 압축단 콘크리트의 변형률은 극한변형률 0.003이고, CFRP판 부착위치의 변형률 ε_3은 CFRP판의 극한변형률 ε_{fu}에서

Table 5 휨실험 결과

실험체명	초기균열 하중(kN)	기준실험체 예상파괴하중(kN)	철근항복 시		최대하중 시			파괴모드
			하중(kN)	처짐(mm)	하중(kN)	처짐(mm)	증가율(%)	
MU-III	11.1	74.3	60.0	18.3	74.1	69.7	-	휨파괴
M0-III	14.0	74.3	74.3	20.2	89.6	35.2	20.6	계면박리
M4-III	32.1	74.3	92.2	22.1	112.7	50.1	51.7	인장파괴
M6-III	33.6	74.3	98.2	22.9	118.4	42.2	59.4	인장파괴
M8-III	39.8	74.3	112.4	25.0	125.1	36.8	68.4	인장파괴
M4-I	29.7	30.3	72.0	22.0	81.7	41.7	169.6	인장파괴
M6-I	31.8	30.3	74.1	20.6	87.3	54.8	188.1	인장파괴
M8-I	35.5	30.3	80.1	21.7	90.6	49.5	199.0	-
M6-II	39.1	51.7	95.6	23.4	109.2	34.9	111.2	-
M8-II	35.8	51.7	104.3	28.6	116.3	40.4	125.0	인장파괴
M6-IV	37.0	99.5	137.8	29.2	146.0	36.4	46.7	인장파괴
M8-IV	32.2	99.5	137.1	28.8	151.9	41.4	52.7	인장파괴
L6-III	26.0	72.5	97.4	25.4	111.7	38.9	54.1	인장파괴
L8-III	28.8	72.5	110.1	25.6	121.9	35.7	68.1	인장파괴
H6-III	32.7	75.6	105.0	23.1	126.2	53.2	66.9	인장파괴
H8-III	39.2	75.6	110.8	24.9	126.8	46.6	67.7	인장파괴
U7-I	42.9	30.7	77.1	13.7	105.3	58.1	243.0	인장파괴
U7-II	47.8	53.0	102.2	19.6	125.4	60.6	136.6	인장파괴
U7-III	45.6	77.1	121.9	19.9	138.3	44.0	79.4	인장파괴
U7-IV	46.5	105.1	142.3	23.1	170.5	56.4	62.2	인장파괴

Table 6 휨강도의 비교

실험 체명	보강비 ρ_f(%)	철근비 ρ_{sl}(%)	평형보강비 ρ_{fb}(%)	판정	파괴시 CFRP판 응력(MPa)	공칭휨강도 (kN · m)	
						계산치 $M_{n,cal}$	실험치 $M_{n,\exp}$
M4-III	0.08	0.677	0.092	과소보강	2,310	73.54	67.64
M6-III	0.08	0.677	0.136	과소보강	2,310	73.54	71.02
M8-III	0.08	0.677	0.191	과소보강	2,310	73.54	75.04
M4-I	0.08	0.243	0.197	과소보강	2,310	49.18	49.01
M6-I	0.08	0.243	0.218	과소보강	2,310	49.18	52.40
M8-I	0.08	0.243	0.253	과소보강	2,310	49.18	54.36
M6-II	0.08	0.432	0.184	과소보강	2,310	60.19	65.50
M8-II	0.08	0.432	0.240	과소보강	2,310	60.19	69.77
M6-IV	0.08	0.977	0.085	과소보강	2,310	88.44	87.60
M8-IV	0.08	0.977	0.108	과소보강	2,310	88.44	91.16
L6-III	0.08	0.677	0.073	과다보강	2,210	69.54	67.01
L8-III	0.08	0.677	0.112	과소보강	2,310	70.65	73.16
H6-III	0.08	0.677	0.217	과소보강	2,310	76.20	75.14
H8-III	0.08	0.677	0.297	과소보강	2,310	76.20	76.10
U7-I	0.08	0.243	0.415	과소보강	2,310	50.67	63.18
U7-II	0.08	0.432	0.400	과소보강	2,310	62.67	75.21
U7-III	0.08	0.677	0.356	과소보강	2,310	77.67	82.97
U7-IV	0.08	0.977	0.331	과소보강	2,310	95.15	102.30

프리스트레싱 수준 ε_1과 CFRP판 부착위치의 콘크리트가 초기 압축상태에서 변형률 0의 상태로 이동하는데 필요한 변형률 변화량 ε_2를 뺀 값이다. 이때의 응력분포는 Fig. 6(c)와 같으며 힘의 평형조건을 만족하기 위해서는 식 (1)을 만족하여야 한다.

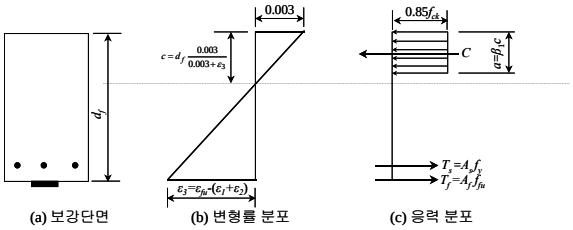


Fig. 6 강도이론에 의한 RC 보의 해석

$$A_f f_{fu} + A_s f_y = 0.85 f_{ck} \beta_1 bc \quad (1)$$

여기서, A_s : 인장철근의 단면적

A_f : CFRP판의 단면적

이때의 중립축 위치는 Fig. 6(b)에서 삼각형 닮음비를 이용하면 식 (2)와 같다.

$$c = d_f \frac{0.003}{0.003 + \varepsilon_3} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (3)과 같이 CFRP판으로 보강된 부재의 평형보강비 ρ_{fb}를 얻을 수 있다.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_{ck}}{f_{fu}} \left(\frac{0.003}{0.003 + \varepsilon_3} \right) - \rho_{sl} \frac{f_y}{f_{fu}} \quad (3)$$

여기서, $\rho_{sl} = A_s / bd_f$: 인장철근의 철근비

보강비 $\rho_f = A_f / bd_f$가 평형보강비 ρ_{fb}보다 작으면 콘크리트보다 CFRP판의 파단이 먼저 발생하는 과소보강보가 되고, 보강비 ρ_f가 평형보강비 ρ_{fb}보다 크면 압축단 콘크리트가 먼저 파괴되는 과다보강보가 된다.

4.2 과소보강보의 해석

CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 RC보가 균열 후 파괴에 이르는 과정에서 콘크리트의 휨응력 분포는 RC보와 크게 다를 바가 없다. 즉, 파괴 시의 프리스트레싱 보강된 과소보강보의 콘크리트 변형률분포는 Fig. 7과 같다. 또한, CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 보의 휨강도는 일반적인 휨이론의 기본가정들과 CFRP판과 콘크리트간의 완전부착 가정이 성립될 수 있다. Fig. 7의 ①은 CFRP판을 콘크리트에 부착시키는 에폭시가 완전히 양생된 이후의 CFRP판의 변형률로 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

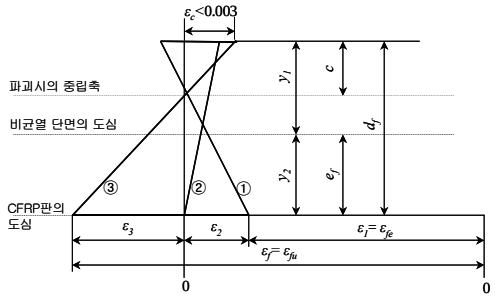


Fig. 7 과소보강보의 변형율 분포

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{fe} = \frac{P_e}{E_f A_f} \quad (4)$$

여기서, P_e : 에폭시가 경화된 이후의 긴장력

E_f : CFRP판의 탄성계수

A_f : CFRP판의 단면적

Fig. 7의 ②는 CFRP판 부착면에서의 콘크리트 응력이 0으로 감소되는 하중단계에서의 변형률을 의미한다. 콘크리트리트와 CFRP판 사이의 부착이 완전부착 상태를 유지한다고 가정하면 ①의 단계에서 ②의 단계로 진행했을 때 CFRP판 변형률의 증가는 같은 위치에 있는 콘크리트 변형률의 감소량과 같다. 그 값은 인장철근의 영향을 고려하여 식 (5)로 계산할 수 있다.

$$\varepsilon_2 = \frac{P_e}{A_{ct}E_c}\left(1+\frac{e_f^2}{r_{ct}^2}\right) \quad (5)$$

여기서, A_{ct} : 콘크리트 유효환산 단면적

r_{ct} : 유효환산단면적의 회전반경

e_f : 비균열 단면의 도심으로부터 CFRP 판 부착위치까지의 거리

과소보강보는 콘크리트의 변형률이 0.003에 도달하기 전에 CFRP판이 파단하기 때문에 파괴단계 ③에 이르게 되면 CFRP판 변형률 증가량은 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{fu} - (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \quad (6)$$

따라서, 파괴 시의 CFRP판의 총변형률 ε_f는 식 (7)과 같다.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{fu} = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (7)$$

즉, 파괴 시 CFRP판의 응력은 식 (8)로 계산할 수 있다.

$$f_{fu} = E_f \varepsilon_{fu} \quad (8)$$

따라서, 보의 공칭 휨강도 M_n은 등가응력블록을 이용하여 식 (9)로 계산할 수 있다.

$$M_n = A_f f_{fu}\left(d_f - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y\left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (9)$$

$$a = \frac{A_f f_{fu} + A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (10)$$

여기서, d : 인장철근 도심에서 압축측 연단까지의 거리

CFRP판의 파단으로 파괴되는 부재의 파괴 시 압축단 콘크리트의 변형률이 0.003보다 작기 때문에 식 (10)과 같이 등가응력블록을 이용하는 경우 모멘트 팔 길이가 약간 증가하게 되나 부재의 휨강도에 대한 영향은 크지 않다.

4.3 과다보강보의 해석

과다보강보의 ε_1와 ε_2의 산정방법은 과소보강보와 동일하다. 한편, 과다보강보는 파괴단계 ③에 이르게 되면 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 중립축은 압축단에서 c의 거리에 있게 된다. 이 때 CFRP판 변형률 증가량은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

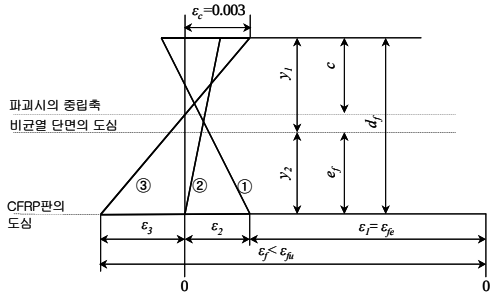


Fig. 8 과다보강보의 변형율 분포

$$\varepsilon_3 = 0.003\frac{d-c}{c} \quad (11)$$

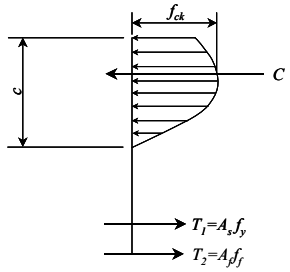


Fig. 9 과다보강보의 응력 분포

그러나, 식 (11)에서 중립축 위치 c는 미지수로 Fig. 8에 나타낸 변형의 적합조건과 Fig. 9에 나타낸 힘의 평형조건을 만족하도록 시산법으로 결정하여야 한다.

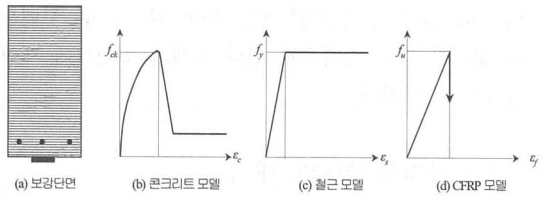


Fig. 10 재료 모델

본 연구에서는 파괴 시 중립축 위치 c와 CFRP판의 변형률을 Fig. 10(a)에 나타낸 비선형 단면해석을 통해서 해석적으로 결정하였다. 비선형 단면해석에서는 콘크리트 단면을 100개의 미소요소로 분할하여 식 (12)와 (13)에 나타낸 비구속 콘크리트의 응력-변형률모델을 적용하였다. 또한, 철근은 Fig. 10(c)와 같이 완전탄소성 재료모델을 적용하였으며, CFRP판은 Fig. 10(d)에 나타낸 것과 같이 극한변형률까지는 탄성거동을 하는 탄성모델로 가정하였다.

$$\varepsilon_c \le 0.002,\ f_c = f_{ck}\left[2\left(\frac{\varepsilon_c}{0.002}\right)-\left(\frac{\varepsilon_c}{0.002}\right)^2\right] \quad (12)$$

$$\varepsilon_c > 0.002,\ f_c = f_{ck}[1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \ge 0.2 f_{ck} \quad (13)$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3+0.29 f_{ck}}{145 f_{ck}} - 0.002} \quad (14)$$

비선형 단면해석을 통해서 먼저 Fig. 8의 변형의 적합조건과 Fig. 9의 힘의 평형조건을 만족하는 중립축 위치 c를 결정하고, 이 값을 식 (11)에 대입하여 ε_3을 결정하였다. 즉, 과다보강보의 파괴 시 CFRP판의 변형률은 식 (15)와 같다.

$$\varepsilon_f = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 < \varepsilon_{fu} \quad (15)$$

또한, 파괴 시 CFRP판의 응력은 식 (16)으로 계산할 수 있다.

$$f_f = E_f \varepsilon_f \quad (16)$$

따라서, 보의 공칭 휨강도 M_n은 등가응력 식 (18)을 이용하여 식 (17)으로 계산할 수 있다.

$$M_n = A_f f_f\left(d_f - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y\left(d - \frac{a}{2}\right) \quad (17)$$

$$a = \frac{A_f f_f + A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (18)$$

4.4 휨강도의 비교

Table 6에 본 실험의 실험체 중에서 무보강 실험체 MU-III와 표면부착 보강된 M0-III 실험체를 제외한 모든 실험체에 대해서 파괴모드 판정결과를 나타내었다. CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 실험체 중에서 L6-III 실험체만이 CFRP판의 파단 이전에 콘크리트가 압괴하는 과다보강 실험체로 나타났으며, 그 외의 실험체는 모두 과소보강 실험체로 나타났다. 그리고, 제안 휨강도 평가식의 정확도를 평가하기 위해서 제안식으로 산정된 공칭 휨강도와 실험결과로부터 얻은 휨강도를 Table 6과 Fig. 11에 비교하여 나타내었다. Fig. 11로부터 알 수 있듯이 계산값은 비교적 정확하게 실험결과를 예측하는 것으로 나타났다. 일반적으로 설계에 있어서는 안전을 위하여 공칭휨강도 M_n에 강도 감소계수 ϕ=0.85를 곱한 설계 휨강도 M_d를 사용한다.

$$M_d = \phi\left[A_f f_{fu}\left(d_f - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y\left(d - \frac{a}{2}\right)\right] \quad \text{(과소보강)} \quad (19)$$

$$M_d = \phi\left[A_f f_f\left(d_f - \frac{a}{2}\right) + A_s f_y\left(d - \frac{a}{2}\right)\right] \quad \text{(과다보강)} \quad (20)$$

설계 휨강도 M_d에 대한 안전성을 평가하기 위해 M_d와 $M_{n,\exp}$의 비교를 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12로부터 식 (19)와 식 (20)으로 산정된 설계 휨강도 식은 모든 실험체에 대해 실험결과를 안전측으로 예측하는 것으로 나타나 CFRP판 프리스트레싱 보강공법의 설계식으로 이용하여도 무방한 것으로 판단된다.

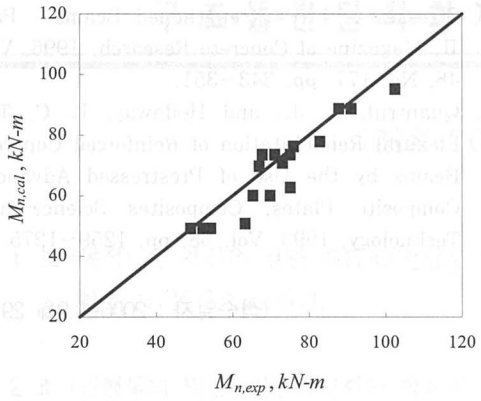


Fig. 11 실험결과와 공칭 휨강도의 비교

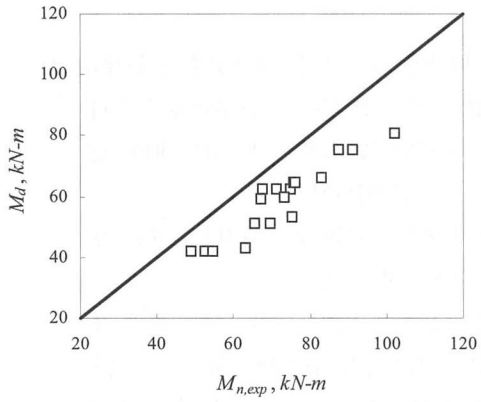


Fig. 12 실험결과와 설계 휨강도의 비교

5. 결 론

이상의 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 기준실험체에 비해 CFRP판을 표면부착한 경우 파괴하중은 20.6 % 증가하였으며, 프리스트레싱 보강한 경우는 46.7 ~ 243.0 %까지 증가하여 보강에 따른 휨성능 증대효과를 나타내었다. 또한, 표면부착 보강한 경우는 CFRP판의 변형률이 약 0.67 %에서 계면박리 파괴가 일어난 반면, 프리스트레싱 보강한 경우는 극한 변형률을 넘어 항복인장강도에 가까운 약 1.3 % ~ 1.5 %에서 파괴됨을 알 수 있었다.
2) CFRP판의 프리스트레싱 보강을 통해 콘크리트의 초기균열 발생시점을 상당히 지연시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 프리스트레싱 보강한 경우 프리스트레싱 수준이 증가함에 따라 파괴하중이 증가하였다.
3) 인장철근비가 작을수록 즉, 인장철근비가 0.30 %일 때 169.6 ~ 243.0 %, 0.55 %일 때 111.2 ~ 136.6 %, 0.86 %일 때 51.7 ~ 79.4 %, 1.26 %일 때 46.7 ~ 62.2 %의 하중증가율을 보여 보강효과가 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 보다 효과적인 CFRP판의 프리스트레싱 보강을 위해서는 앵커볼트의 길이나 보강길이에 요구되는 적정 프리스트레싱 수준을 결정하는 것이 중요하며, 이는 향후 연구를 통해 정량적인 평가가 가능할 것으로 판단된다.
4) 프리스트레싱 보강된 부재의 휨강도를 예측할 수 있는 식을 제안하였으며, 실험결과와의 비교를 통하여 제안식은 휨강도 예측에 있어 충분한 정확도를 확보하고 있었다.

감사의 글

본 연구는 산자부 전력산업연구개발사업의 지원 하에 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 박종섭, 박영환, 유영준, 정우택, 강재윤, "부착 또는 비부착된 탄소판으로 긴장 보강한 RC 보의 보강성능", 한국콘크리트학회 봄학술발표대회논문집, 제17권, 1호, 2005. 4, pp. 279-282.
2. 박중열, "탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 거동 특성 및 보강설계", 충북대학교 토목공학과, 박사학위논문, 2003. 5, pp. 41-46.
3. 양동석, 박선규, 이용학, "강연선 및 탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동 특성", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 14, No. 2, 2002, pp. 216-222.
4. 심종성, 배인환, "탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트의 계면박리에 대한 해석적 연구", 한국콘크리트학회지, 제11권, 2호, 1999, pp. 177-186.

5. 박상렬, 김태우, "CFRP판으로 부착된 RC 보의 복부 정착 형태에 따른 보강효과", 대한토목학회논문집, 제23권, 6A호, 2003, pp. 1113-1121.
6. 김규선, 김종성, "보강판으로 성능개선된 RC 보의 조기파괴거동", 대한토목학회논문집, 제19권, I-4호, 1999, pp. 561-570.
7. 유영찬, 최기선, 박영환, 박종섭, 김긍환, "외부 부착형 프리스트레스 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨거동", 한국콘크리트학회 봄학술발표대회논문집, 제17권, 1호, 2005. 4, pp. 255-258.
8. Quantrill, R. J., Hollaway, L. C. and Thorne, A. M. Predictions of the Maximum Plate End Stresses of FRP Strengthened Beams : Part II, Magazine of Concrete Research, 1996, Vol. 48, No. 177, pp. 343~351.
9. Quantrill, R. J., and Hollaway, L. C. The Flexural Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams by the Use of Prestressed Advanced Composite Plates. Composites Science and Technology, 1998, Vol. 58, pp. 1259~1275.

(접수일자 : 2006년 9월 29일)