

긴장된 CFRP판으로 보강된 대규모 RC 슬래브의 휨성능 평가

홍기남[†] · 한상훈 · 이병노 · 권용길*

충북대학교 토목공학과 · *K-water 연구소

(2009. 8. 19. 접수 / 2010. 4. 20. 채택)

Evaluation of Flexural Strength Capacity of Large Scale RC Slabs Strengthened with Prestressed CFRP Plate

Ki Nam Hong[†] · Sang Hoon Han · Lee Byong Ro · Sang Kyun Woo*

Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

*Korea Institute of Water and Environment

(Received August 19, 2009 / Accepted April 20, 2010)

Abstract : This paper presents the results of a study on flexural capacity of large size RC slabs strengthened with carbon fiber reinforced polymer(CFRP) plates. A total of 5 specimens of 6.0m length were tested in four point bending after strengthening them with externally bonded CFRP plates. The CFRP plates were bonded without prestress and with two prestress levels, 0.4% and 0.6% of CFRP plate strain. Test variables included the type of strengthening, prestressing level, and the effects according to each test variables are analysed. The experimental results show that proposed methods can increase significantly the flexural capacity such as strength, stiffness of the beam and the increase ranged between 36.2% and 63.2% of the load-carrying capacity of the control beams. The non-prestressed specimen failed by separation of the plate from the beam due to premature debonding while most of the prestressed specimens failed by CFRP plate fracture. And the cracking loads and maximum loads were increased proportionally to the prestress level.

Key Words : CFRP, flexural capacity, prestressing, strengthening method, premature debonding

1. 서론

FRP 외부부착 공법은 현재 철근콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트 구조물을 보강하기 위해 가장 많이 사용되고 있는 공법이다. FRP로 보강된 RC부재에 대한 구조적 거동 연구는 지난 수십년에 걸쳐 폭 넓게 진행되어 왔다¹⁻⁵⁾. 또한 ACI 440.2R-02⁶⁾ 및 CNR-DT⁷⁾ 등의 설계코드에 그 설계방법이 체계적으로 정립되어 있는 상태이다.

최근에는 FRP 외부부착 공법을 확장하여 프리스트레싱을 가한 일방향 FRP판을 구조물의 인장면에 부착하고, 양 단부를 앵커로 고정시켜 보강하는 방법(이하 프리스트레싱 공법)이 개발되어 국내·외적으로 연구되고 있다⁸⁻¹³⁾. 고강도 콘크리트 및 고성능 콘크리트의 개발과 함께 이 FRP 프리스트레싱 공법은 가까운 미래에 철근콘크리트 및 프리스

트레스트 콘크리트 구조물을 보강하는데 활용도가 클 것으로 예상되고 있다.

FRP재료로 보강된 RC 부재의 휨거동에 관한 실험적 연구는 일반적으로 프리스트레싱을 가하지 않은 FRP판이나 슈트를 사용한 축소 모형 실험체에 대해서 주로 수행되어 왔다. 몇몇 연구자들이 프리스트레싱을 가한 FRP판으로 보강된 실험체에 대한 실험적 연구를 수행하였다¹⁰⁻¹³⁾. 그러나 이 연구의 대부분도 축소 모형에 대해서 수행되었다. 또한 FRP의 최대강도를 발현하고, 콘크리트 지점으로부터의 FRP판 탈락으로 인한 파괴를 방지하는데 있어서의 정착장치에 대한 효율성을 검증한 연구자료는 매우 제한적이다.

이에 본 연구에서는 일반 및 긴장된 FRP판으로 보강된 실규모 RC슬래브에 대한 휨실험을 통해서 프리스트레싱 공법의 효율성을 검증하고, 축소 모형 실험체의 실험결과를 기초로 제시된 휨강도 예측식을 실구조물에 적용할 수 있는지 여부를 검토

[†] To whom correspondence should be addressed.
hong@chungbuk.ac.kr

하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 사용재료

본 연구에서는 1종 포틀랜드시멘트와 25mm 이하의 굵은골재를 사용하여 실험체를 제작하였다. 콘크리트의 목표강도는 40MPa로 설정하였다. 실제 콘크리트 강도는 $\phi 100 \times 200$ mm 크기의 원주형 공시체를 제작하여 수중양생한 후 제령 28일에서 측정된 압축강도를 기준으로 하였으며, 압축강도의 평균값은 44.1MPa로 나타났다. 실험체 제작을 위해 사용된 배합설계는 Table 1과 같다.

실험체 제작에 사용된 철근은 KS D 3504의 이형철근으로 SD 400을 사용하였다. 인장철근과 배력철근으로 각각 D16과 D10을 배근하였다. 철근 인장실험을 통해 D16과 D10의 항복강도는 각각 476.2MPa와 500.7MPa로 나타났다. 실험체 휨보강을 위해 사용한 CFRP판은 국외 S사에서 생산되는 두께 1.4mm의 일방향 섬유재이며, 섬유혼입율은 63.4%이다. 본 실험에서는 폭 50mm의 CFRP판을 이용하여 실험체에 대한 보강을 수행하였으며, 재료 물성치는 Table 2와 같다. CFRP판 부착을 위해 사용된 에폭시도 S사에서 생산되는 레진 220을 사용하였다.

Table 1. Mixing properties of concrete

W/B (%)	s/a (%)	Unit weight(kg/m ³)					
		W	C	S	G	FA	AD
34.9	41.3	185	456	642	927	74	3,180

Table 2. Material properties of CFRP plate

	Modulus of elasticity(MPa)	Ultimate strength(MPa)	Ultimate strain(%)
S&P Laminate (150/2000)	165,000	2,700	1.4

2.2. 실험변수 및 실험체 제작

CFRP판으로 휨보강된 대형 철근콘크리트 슬래브의 휨보강 성능을 평가하기 위해 Fig. 1(a)와 같은 실험체를 제작하였다. 실험체의 총길이는 6,000mm이며, 순경간은 5,600mm이다. 또한 실험체의 폭은 1,200mm이며, 두께는 200mm로 설계하였다. 인장철근은 D16을 9개 배근하였으며, 배력철근은 D10을 150mm 간격으로 배근하였다. CFRP판 보강실험체는 CFRP판을 두 줄 보강하는 것으로 계획하였다. 휨실험에서 고려된 실험변수는 보강방법과 프리스트레싱 수준이다. 보강방법은 표면부착과 프리스트레싱 보강, 프리스트레싱 수준은 0, 0.4%, 0.6% 3가지 레벨을 고려하였다. Table 3에 실험체명과 실험변수를 정리하여 나타내었다. Fig. 1(b)는 CFRP판을 표면부착 보강한 실험체를 나타내며, (c)는

Table 3. Test variables

Specimen	Strengthening method	Prestressing level(%)	Prestressing force(kN)
RU	Un-plated	-	-
RS	Bonding	-	-
R0A	Anchor plate	-	-
R4A	Prestressed	0.4	51.0
R6A	Prestressed	0.6	90.0

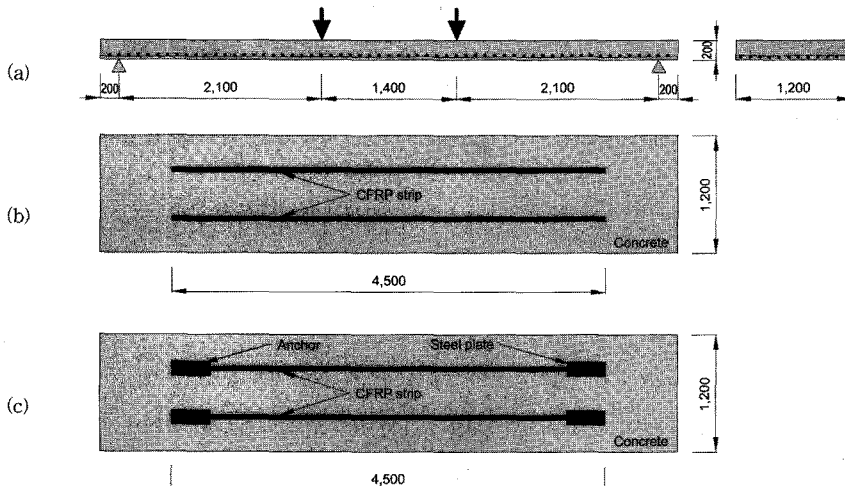


Fig. 1. Detail of specimen (unit: mm).

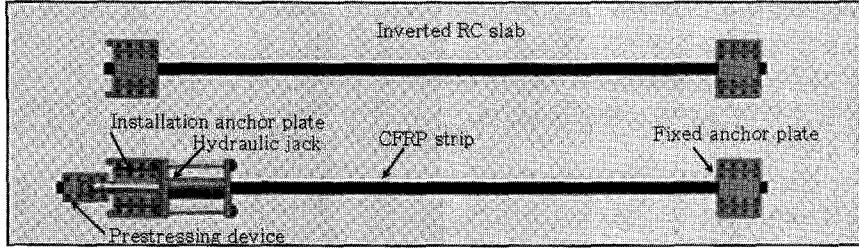


Fig. 2. Prestressing system of CFRP strip.

CFRP판을 프리스트레싱 보강한 후의 형상을 나타내고 있다. 표면부착 및 프리스트레싱보강 실험체는 모두 동일하게 CFRP판을 순직간 5,600mm의 80%인 4,500mm 구간에 걸쳐 보강하였다.

2.3. 보강방법 및 순서

제작된 RC 슬래브 실험체에 대한 프리스트레싱 보강방법 및 장치구성을 Fig. 2에 개략적으로 나타내었다. 보강순서를 정리하면 다음과 같다.

- ① 실험체 인장면에 햄머드릴을 이용하여 양단부에 각각 8개의 앵커볼트 삽입 홀을 형성한다.
- ② 형성된 홀에 앵커볼트를 설치하고 양단 정착 장치의 베이스 플레이트를 고정한다.
- ③ 실험체 인장면에 2~3mm의 에폭시를 도포하고 CFRP판을 콘크리트에 압착시킨다.
- ④ 고정단 정착장치에 CFRP판 한쪽을 고정하고, 반대쪽은 프리스트레싱 장치에 고정한다.
- ⑤ 유압장치를 가동단 베이스 플레이트 위에 설치한다.
- ⑥ 유압장치의 실린더와 프리스트레싱 장치를 일체로 고정한다.
- ⑦ 유압장치의 실린더를 앞으로 밀어내어 목표수준의 프리스트레싱력을 CFRP판에 도입한다.
- ⑧ 가동단 상부 플레이트의 볼트를 조여 CFRP판을 베이스 플레이트와 정착판 사이에 고정한다.
- ⑨ 유압장치와 프리스트레싱 장치를 제거하여 작업을 마무리 한다.

2.4. 실험방법

CFRP판으로 보강한 실험체의 휨실험을 위해 Photo 2와 같이 실험장비를 구성하였다. 실험과정에서 하중재하는 7,000kN 용량의 UTM을 이용하였다. 하중재하 방법은 예상 최대하중의 80%까지는 하중제어방식, 그 이후부터는 변위제어방식에 의해 4점 재하하였다. 또한 각 하중단계에서 보의 중앙부 인장철근에 4개의 스트레인 게이지와 슬래브

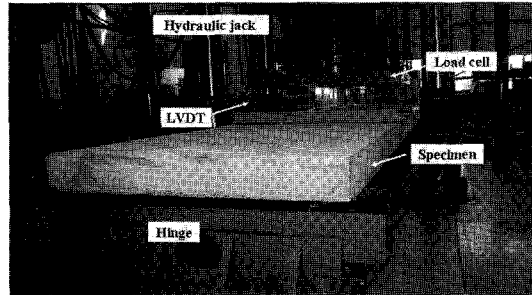


Photo 2. Test setup.

상부에 2개의 LVDT를 설치하여 철근의 변형률과 슬래브 중앙부의 처짐을 측정하였다. CFRP판에도 하중단계별 변형률을 측정하기 위해 12개의 스트레인 게이지를 부착하였다. CFRP판에 부착한 스트레인 게이지의 위치는 2개의 CFRP판 중에 한 개에는 판의 단부로부터 45cm, 125cm, 175cm, 205cm, 225cm, 245cm, 275cm, 325cm, 405cm 떨어진 곳에 9개를 부착하고, 다른 CFRP판에는 205mm, 225mm, 245mm의 위치에 3개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 취득된 데이터는 데이터 로거(data logger)를 이용하여 실험체의 최종 파괴 시까지 각 하중단계별로 저장하였다.

3. 실험결과 및 분석

기존실험체 및 CFRP판으로 프리스트레싱 확보된 철근콘크리트 보의 휨실험 결과를 Table 4에 정리하여 나타내었다.

Table 4. Results of flexural test

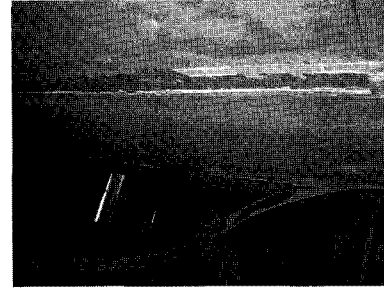
Specimen	Cracking load(kN)	Maximum Load(kN)	Ratio of increasing(%)	Failure mode
RU	12.7	125.6	0	Flexural failure
RS	15.1	151.5	20.7	Interface debonding
R0A	16.6	166.0	32.2	CFRP plate fracture
R4A	24.0	169.3	36.2	CFRP plate fracture
R6A	32.8	204.8	63.2	CFRP plate fracture

기준실험체와 비교하여 CFRP판을 표면 부착한 경우 하중저항능력이 20.7% 증가함을 보였으며, 프리스트레싱 보강된 실험체는 36.2~63.2% 증가하여 보강효과가 표면 부착한 경우에 비해 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

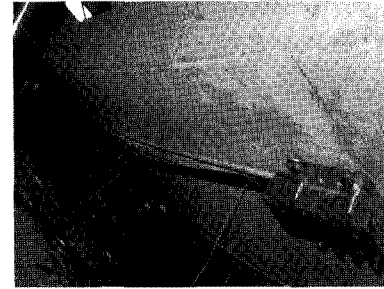
또한, 보강된 실험체의 경우 기준실험체에 비해 초기균열 발생시점의 하중이 증가하여 초기균열 억제효과도 확인할 수 있었다. 그러나 보강된 실험체는 CFRP판의 파단 또는 박리에 의해 취성적으로 파괴되므로 기준실험체에 비해 상대적으로 적은 처짐을 나타내었다.

3.1. 파괴모드

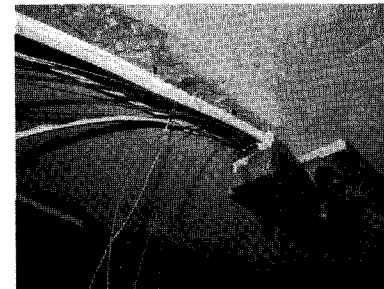
실험 종료 후의 대표적인 파괴형상을 Photo 3에 나타내었다. 기준실험체는 초기균열이 12.7kN에 발생하였으며, 하중이 점차 증가함에 따라 실험체 인장부의 휨균열이 일정한 간격으로 발생하였다. 최대하중이후 새로운 휨균열은 발생하지 않고, 실험체 중앙부 근처의 균열이 압축부로 성장하면서 균열 폭이 증가하여 처짐이 크게 증가하였다. 최종 파괴시점에서는 인장부에 발생한 균열이 압축부까지 도달하여 더 이상의 하중재하가 곤란하였다. 표면 부착 보강을 실시한 RS 실험체는 초기균열 발생 하중이 15.1kN으로 기준실험체보다 다소 큰 값을 나타내었다. 초기균열 발생 후 나타나는 휨균열은 일정한 간격과 성장속도로 압축부를 향해 진전하는 거동을 나타내었다. 최대하중에서는 기준실험체와 같이 새로운 휨균열은 발생하지 않았으며, 발생한 균열의 폭도 크게 증가하지는 않았다. 그러나 급작스럽게 CFRP판 단부에서 큰 소음이 발생하면서 CFRP판이 탈락하는 취성적인 파괴 모드를 나타내었다. 반면, 정착부가 설치된 R0A 실험체는 약 150 mm의 처짐이 발생한 시점에서 재하점 하면 CFRP판을 부착하는 에폭시 층이 모체 표면으로부터 탈락되었다. 그러나, 단부정착으로 인해 CFRP판이 완전히 탈락하지 않고 계속적으로 하중을 받으면서 처짐이 증가하다가 지점부 부근의 탄소판이 파단되면서 실험이 종료되었다. 프리스트레스를 도입한 R4A와 R6A 실험체는 기준실험체나 표면부착 실험체 RS와 비교해서 초기균열 발생하중이 크게 증가하였으며, 균열이 지점부까지 균등한 간격으로 발생하였다. 파괴 순서를 살펴보면, 철근 항복한 이후 보강된 CFRP판에서 섬유가 끊어지는 소리가 나기 시작하였다. 최대하중에 도달할수록 처짐이 증가하면서 CFRP판과 콘크리트를 일체화 시키고 있던 에



(a) specimen RS



(b) specimen R4A



(c) specimen R6A

Photo 3. Failure mode of specimen.

폭시 층이 모체로부터 탈락하면서 큰 폭음이 발생하였다. 그 이후에도 CFRP판은 계속 하중을 지지하고 있었으나, 부착파괴는 연속적으로 발생하였다. 실험체의 중앙변위가 빠른 속도로 증가하고, CFRP판의 탄소 섬유들이 한 가닥씩 끊어지면서 점차 내력을 상실하다가 순간적으로 CFRP판이 파단되는 파괴모드를 나타내었다.

3.2. 보강방법의 영향

각 실험체의 최대하중을 Table 4에서 확인할 수 있다. 기준실험체를 기준으로 표면부착 보강된 RS 실험체는 최대하중이 약 20% 증가하였으나 단부 정착 보강한 R0A 실험체는 32%의 증가를 보였다. 즉, 표면부착이후 단부를 정착하는 것만으로 상당 수준의 보강효율이 향상됨을 알 수 있다. 한편, 프리스트레싱된 CFRP판으로 보강된 실험체 R4A와

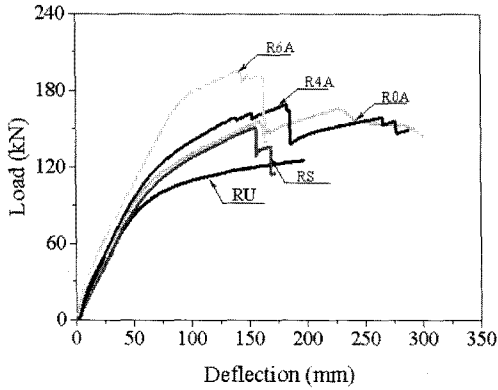


Fig. 3. Load-deflection curves at the mid-span.

R6A는 각각 36%와 63%의 하중 증가율을 나타내었다. 이는 CFRP판에 프리스트레스를 도입함으로써 동일한 양의 CFRP 사용하더라도 보다 우수한 보강효과를 얻을 수 있다는 것을 보이는 것으로 실구조물에 대한 프리스트레싱 공법의 적용성을 입증한 결과라 할 수 있다.

Fig. 3은 각 실험체의 하중-처짐 거동을 나타낸 그림이다. Fig. 3은 각 보강방법의 특성을 잘 설명하고 있다. 표면부착 공법을 적용한 RS는 최대하중 발현이후 CFRP판 박락에 의한 매우 취성적인 거동을 보이고 있다. 단부정착을 실시한 R0A 실험체는 중앙부 탄소판이 콘크리트면으로부터 떨어진 이후에도 계속적으로 하중을 유지하면서 연성이 크게 증가하는 거동을 보이고 있다. R4A 실험체는 R0A 실험체보다 다소 최대하중이 증가하였으나 연성이 감소하는 경향을 나타내고 있다. R6A 실험체는 다른 실험체에 비해 휨강도가 월등하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 프리스트레싱 보강공법을 실구조물에 적용하는 경우 0.6% 정도의 프리스트레스를 도입하여야 충분한 강도증가 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 보강 실험체의 하중-중앙CFRP판의 변형을 관계를 나타낸 것이다. 표면 부착한 보강한 RS 실험체의 중앙 CFRP 변형률이 0.96%가 발현되었을 때 부착파괴가 발생되었음을 알 수 있다. R0A 실험체는 CFRP판의 변형률이 약 1.06%에서 응력 집중으로 인해 파단되었다. R4A는 CFRP판의 최대 변형률이 1.33%가 발생된 상태에서 실험이 종료되었다. 한편 R6A 실험체는 CFRP판의 최대 변형률이 1.52%로 나타나 0.6% 프리스트레싱 보강공법의 적용을 통해서 CFRP판 재료성능을 100%까지 활용할 수 있음을 알 수 있다.

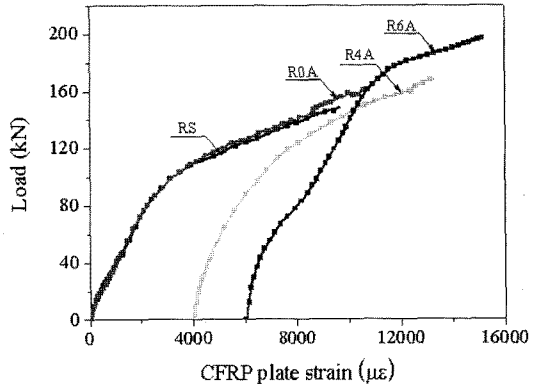


Fig. 4. Load-CFRP strain curves at the mid-span.

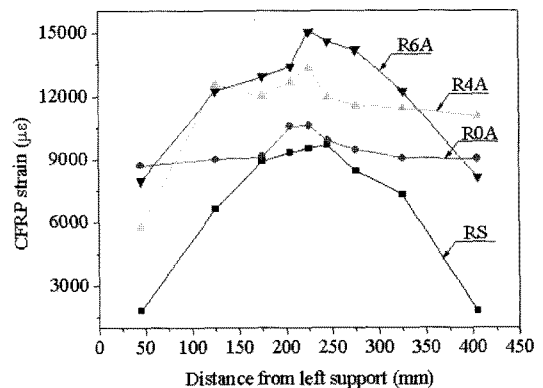


Fig. 5. CFRP strain distribution at the maximum load.

Fig. 5에는 보강 실험체들의 최대하중 발현 시 길이방향의 CFRP판 변형률 분포를 나타내었다. RS 실험체는 최대하중까지 CFRP판 변형률이 중앙부에만 크게 발생하고 단부로 갈수록 작아지는 경향을 나타내고 있다.

이 시점이 지나면서 휨균열 폭이 증가하여 부착면에 부착응력 이상의 전단응력이 발생하면서 CFRP판이 탈락한 것으로 판단된다. R0A는 최대하중 발현시점에서 이미 휨균열 폭이 크게 성장하여 CFRP판이 콘크리트 인장면으로부터 탈락하여 전 구간에 거의 일정한 변형률이 발생하고 있음을 보이고 있다. R04는 최대하중 발현시점에서 한쪽 단부의 CFRP판이 탈락하여 매우 큰 변형률이 발생하고 있어, 실험체에 상당히 큰 균열이 발생되었음을 알 수 있다. 반면, R06은 최대하중 발현시점까지 인장면으로부터 CFRP판의 탈락이 발생하지 않았음을 확인할 수 있다. 이는 초기부터 충분한 축력이 작용하여 휨균열 폭이 크게 성장하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

4. 휨강도 해석

참고문헌 11은 CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 RC보의 휨강도를 콘크리트와 CFRP판이 완전부착이라고 가정하여 간단하게 계산할 수 있는 예측식을 제안하였다. 본 연구에서는 참고문헌 11의 제안식을 기초로 휨강도를 계산하여 실험결과와 비교하였다. 예측식에서 그들은 과다보강보와 과소보강보를 평가할 수 있는 균형보강비 평가식으로 식 (1)을 제안하였다.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_{ck}}{f_f} \left(\frac{0.003}{0.003 + \epsilon_s} \right) - \rho_{s1} \frac{f_y}{f_f} \quad (1)$$

여기서, $\rho_{s1} = A_s / bd_f$: 인장철근의 철근비이며, 보강비 $\rho_f = A_f / bd_f$ 가 평형보강비 ρ_{fb} 보다 작으면 콘크리트보다 CFRP판의 파단이 먼저 발생하는 과소보강보가 되고, 보강비 ρ_f 가 평형보강비 ρ_{fb} 보다 크면 압축단 콘크리트가 먼저 파괴되는 과다보강보가 된다. 과소보강보의 경우 CFRP판의 인장응력을 식 (2)와 같이 재료의 한계변형률을 이용하여 계산하는 것이 가능하며, 과다보강보의 경우 콘크리트 압축파괴 시의 실제 CFRP판의 변형률을 재료 비선형을 고려한 단면해석을 통해 도출하여 식 (3)을 통해서 인장응력을 산정하도록 하고 있다.

$$f_f = E_f \epsilon_{fu} \quad (2)$$

$$f_f = E_f \epsilon_f \quad (3)$$

보의 공칭 휨강도 M_n 은 식 (4)와 (5)를 통하여 산정한다.

$$M_n = A_f f_f \left(d_f - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{A_f f_f + A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (5)$$

식 (1)~(5)을 통해서 평가한 결과는 CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 실험체 모두 과소보강 실험체로 나타났다. 그리고 실구조물 실험체에 대한 휨강도 평가식의 적용성을 평가하기 위해 계산값과 실험결과를 Fig. 6에 비교하여 나타내었다. Fig. 6로부터 알 수 있듯이 계산값은 R0A와 R4A 실험체의 휨강도를 과대평가하는 것으로 나타났다.

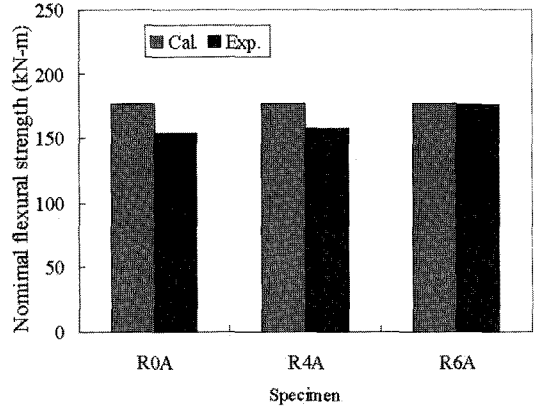


Fig. 6. Comparison of nominal flexural strength with experimental results.

반면, R6A 실험체의 휨강도를 정확하게 예측하는 것으로 나타났다. 즉, 평가식은 프리스트레싱 수준이 0.6% 이상인 경우에 정확하게 휨강도를 예측할 수 있다는 것을 의미하는 것이다. 이와 같이 프리스트레싱 실험체에 대한 휨강도 평가식이 R0A와 R4A 실험체의 휨강도를 과대 평가하는 이유는 다음과 같은 이유로 설명될 수 있을 것이다. 프리스트레싱 수준이 낮은 경우 충분한 축력이 작용하지 못하여 인장부 휨균열 폭이 크게 증가하게 된다. 이때 균열부에 부착한 CFRP판에는 국부적으로 큰 인장응력이 발생하게 되어 CFRP판이 파단된다. 즉, CFRP판의 항복강도에 해당하는 인장력이 미쳐 발현되지 못한 상황에서 CFRP판이 조기 파단되는 것이다. 반면, 0.6% 이상의 프리스트레싱을 가하는 경우 충분한 압축력이 작용하여 균열폭이 제어되고 인장부 CFRP판이 순수 휨인장에 의해 파단됨으로 충분한 휨강도가 발현되는 것이다. 평가식에서도 이와 같이 CFRP판이 순수 휨인장에 의해 파단되는 상황을 가정하여 식이 전개되었으므로 R0와 R4A 실험체의 휨거동을 과대평가 하고 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통해서 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 기준실험체와 비교하여 CFRP판을 표면 부착한 경우 하중저항능력이 20.7% 증가함을 보였으며, 프리스트레싱 보강된 실험체는 36.2~63.2% 증가하여 보강효과가 표면부착한 경우에 비해 크게 개선됨을 확인할 수 있었다.

2) 표면 부착 보강한 RS는 실험체의 중앙 CFRP 변형률이 0.96%가 발생되었을 때 부착파괴가 발생되었다. R0A와 R4A 실험체는 각각 CFRP판의 변형률이 1.06%와 1.33%가 발생된 상태에서 응력집중으로 인해 파단 되었다. 한편 R6A 실험체는 CFRP판의 최대변형률이 1.52%로 나타나 0.6% 프리스트레싱 보강공법의 적용을 통해서 CFRP판 재료성능을 거의 100%까지 활용할 수 있음을 알 수 있었다.

3) 0.6% 프리스트레싱을 도입한 CFRP으로 보강된 실험체는 다른 실험체에 비해 최대하중이 크게 증가하였다. 즉, 프리스트레싱 보강공법을 실구조물에 적용하는 경우 0.6% 수준 이상으로 프리스트레싱력을 도입해야 프리스트레싱에 대한 효과가 명확하게 발현되는 것을 알 수 있었다.

4) 참고문헌 11)에서 제안된 프리스트레싱 보강 부재의 휨강도 예측식과 실험결과와의 비교를 통해서 참고문헌 11)에서 제시한 휨강도 예측식은 0.6% 수준 이상의 프리스트레싱가 도입되어야 실구조물의 보강효과를 적절하게 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 보다 명확한 프리스트레싱 보강 설계기준 및 설계식의 정립을 위해서는 추가적인 실험적·해석적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 오용복, 권영용, “탄소섬유슈트 보강된 철근콘크리트 보의 보강철근비에 따른 구조적 거동”, 콘크리트학회지, 제10권, 제2호, pp. 119~126, 1998.
- 2) 심종성, 배인환, “탄소섬유슈트로 보강된 철근콘크리트의 계면박리에 대한 해석적 연구”, 콘크리트학회지, 제11권, 제2호, pp. 177~186, 1999.
- 3) 김규선, 김종성, “보강판으로 성능개선된 RC보의 조기파괴거동”, 대한토목학회논문집, 제19권, 제1-4호, pp. 561~570, 1999.
- 4) 양동석, 박선규, 이용학, “강연선 및 탄소섬유슈트로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨거동 특성”, 콘크리트학회논문집, 제14권, 제2호, pp. 216~222, 2002.
- 5) 박상렬, 김태우, “CFRP판으로 부착된 R.C 보의 복부정착 형태에 따른 보강효과”, 대한토목학회 논문집, 제23권, 제6A호, pp. 1113~1121, 2003.
- 6) ACI Committee 440, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures(ACI 440.2R-02)”, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, p. 45, 2002.
- 7) CNR-Italian Research Council, Advisory Committee on Technical Recommendations for Construction, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC Structures, Masonry Structures(CNR-DT 200/2004)”, Rome, Italy, pp. 144, 2004.
- 8) Garden, H. N., and Holloway, L. C., “An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates”, Composites Part B, Vol. 29, pp. 411~424, 1998.
- 9) Quattrill, R. J., and Holloway, L. C., “The Flexural Rehabilitation of Reinforced Concrete Beams by the Use of Prestressed Advanced Composite Plates”, Composites Science and Technology, Vol. 58, pp. 1259~12, 1998.
- 10) 양동석, 박준명, 유영찬, 박선규, “프리스트레스트 탄소판으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동 및 해석”, 한국콘크리트학회 논문집, 제19권, 제2호, pp. 467~474, 2007.
- 11) 이상균, 홍기남, 한상훈, 송영철, “CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 RC 보의 휨강도 해석”, 한국구조물진단학회지, 제11권, 제1호, pp. 181~192, 2007.
- 12) 한국건설기술연구원, 외부프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강공법 개발, 건설교통부연구개발사업, E01-01, 2004-2205.
- 13) 김형수, 홍기남, 이상균, 송영철, 한상훈, “프리스트레스트를 가한 CFRP판으로 보강한 철근콘크리트 보의 휨성능 개선”, 한국콘크리트학회 봄학술 발표대회논문집, 제17권, 제1호, pp. 471~474, 2005.