

재하상태에 따른 탄소섬유보강공법의 휨 보강효과

Flexural Rehabilitation Effect of Pre-loaded Reinforced Concrete Beams Strengthened by C.F.S

한복규^{*} 홍건호^{**} 신영수^{***} 조하나^{****} 정혜교^{*****}
Han, Bok kyu Hong, Geon Ho Shin, Young Soo Cho, Ha na Chung, Hye Kyo

ABSTRACT

This paper is aimed to investigate flexural rehabilitation effect of pre-loaded reinforced concrete beams strengthened by carbon fiber sheet. Main Test parameters are reinforcement ratio and the magnitude of pre-loading and seven test beams are analyzed rehabilitation effect by carbon fiber sheet, load-deflection, failure mode, stress of reinforcing bar by the magnitude of pre-loading.

Test results show that internal force was showed pre-loaded specimens lower than no-loaded specimens during rehabilitation and changing stiffness was showed in the same way and failure mode showed brittle failure from all specimens

Key word : rehabilitation, pre-loading, C·F·S, failure mode

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 재료의 특성, 시공불량, 유지관리 소홀 등에 의해서 내구성, 안전성등의 저하를 초래하게 된다. 이에따라 구조물의 안전성 및 사용성을 확보하기 위해서는 부분적이거나 전체적인 구조물의 보수·보강을 필요로 하게 된다. 최근 국내에서 주로 사용되는 철근콘크리트 구조물의 보강공법으로는 강판보강공법, 탄소섬유 보강공법, 유리섬유 보강공법 등이 있다.

이와같은 보강공법중 탄소섬유 보강공법은 재료의 부식에 대한 염려가 없으며 작업성이 뛰어나 최근 국내에서 건축물의 보강재료로써 널리 이용되고 있으며 이에 따른 연구가 활발하게 이루어지고 있다.¹⁾²⁾ 하지만 아직까지는 탄소섬유 보강공법의 구조적 특성을 고려한 설계기준과 상호 평가가 미흡한 실정이다. 뿐만 아니라 실제 구조물의 경우에는 하중이 지속적으로 작용하고 있는 가운데 보강이 이루어짐에따라 보강전 철근의 변형이 발생하게 되어 철근과 탄소섬유에 동시에 하중을 가력하였던 기존의 연구결과와는 다른 양상을 가져올수 있다. 따라서 실제 구조물과 유사한 실험방법을 계획하고 이에 따른 연구가 필요하다.

* 호서대학교 건축학부 석사과정

** 정회원, 호서대학교 건축학부 교수

*** 정회원, 이화여대 건축학과 교수

**** 이화여대 건축학과 석사과정

***** 정회원, 현대건설 기술연구소 책임연구원

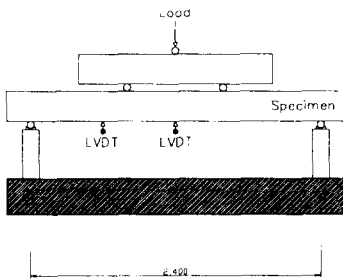
본 연구에서는 실제 구조물과 유사한 하중상태에서의 보강효과를 분석하기 위하여 재하레벨을 변수로 하여 탄소섬유 보강을 실시하였으며 재하상태에서 보강된 시험체는 양생기간을 거쳐 다시 하중을 증가시키며 보의 내력증가 효과 및 구조적 성능에 대한 연구를 실시함으로써 실제구조물에 대한 적용 기준을 제공하고자 하는데 목적이 있다.

2. 실험계획 및 방법

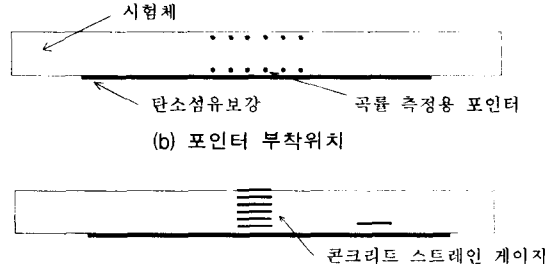
2.1 시험체 계획

본 연구에서는 휨부재의 인장측 단면의 탄소섬유 보강효과를 연구하기 위해서 단면이 15×25cm, 길이가 280cm인 기본시험체에 대하여 재하상태에서 탄소섬유보강을 실시하였고, 순스팬 2.4m의 단순보에 4점재하를 실시하였다. 실험장치는 다음 그림 1과 같다. 부재의 사용성 평가를 위해서 시험체의 중앙부위와 1/4지점에 처짐측정기(LVDT)를 설치하였다. 또한 하중증가에 따른 부재의 곡률변화를 관찰하기 위해서 모멘트가 일정한 중앙부에 스트레인 게이지 및 포인터를 설치하였다

시험체의 구성은 재하레벨 및 보강 철근비등 2가지에 대하여 총 7개의 시험체로 구성하였고 그 종류는 다음의 표 1과 같다.



(a) 실험장치도



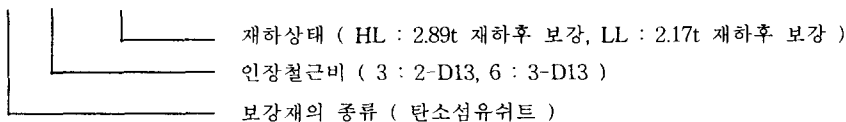
(c) 게이지 부착위치

그림 1. 실험장치 구성도

표 1. 시험체의 구성

구분	시험체지수(cm)	보강재료	인장철근	보강시재하하중(t)	기타
Control	15×25×280	-	2 - D13	-	기본시험체
Con-CF3	15×25×280	탄소섬유 2 ply	2 - D13	-	보강기본시험체
Con-CF6	15×25×280	탄소섬유 2 ply	3 - D13	-	보강기본시험체
CF3-LL	15×25×280	탄소섬유 2 ply	2 - D13	2.17	재하상태보강
CF3-HL	15×25×280	탄소섬유 2 ply	2 - D13	2.89	재하상태보강
CF6-LL	15×25×280	탄소섬유 2 ply	3 - D13	2.13	재하상태보강
CF6-HL	15×25×280	탄소섬유 2 ply	3 - D13	2.83	재하상태보강

CF 3 - HL

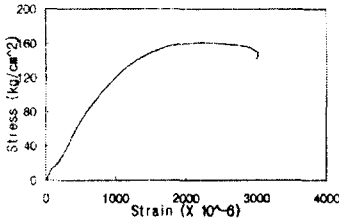


2.2 사용재료

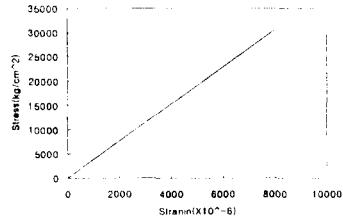
본 연구에 사용된 탄소섬유의 재료역학적 특성은 표 2와 같다.

표 2. 탄소섬유의 재료역학적 특성

섬유의 두께	인장강도	탄성계수	설계장도
0.165 mm	$3.58 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	$2.35 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$	$1.18 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$



(a) 콘크리트



(b) 탄소섬유

그림 2. 사용재료의 응력도-변형도 곡선

3. 실험결과 및 분석

3.1 탄소섬유 보강효과

재하상태에 따른 탄소섬유 보강효과를 분석하기 위해서 각각의 시험체에 대한 분석 결과는 다음의 표 3과 같다. ϕM_n 의 50% 하중을 가력한 상태에서 보강된 CF3-LL 시험체의 파괴모멘트와 70% 하중을 가력한 상태에서 보강된 CF3-HL 시험체의 파괴모멘트를 재하전 기본시험체에 탄소섬유로 보강한 Con-CF3 시험체와 비교하면 각각 0.89, 1.06배의 값을 나타내었다. 또한 인장 철근비를 증가시킨 CF6-LL, CF6-HL 시험체의 파괴모멘트를 Con-CF6 시험체와 비교하면 0.94, 0.84배의 값을 나타내고 있어 탄소섬유 보강효과가 재하레벨에 따라 다른 결과를 갖는 것으로 나타났다.

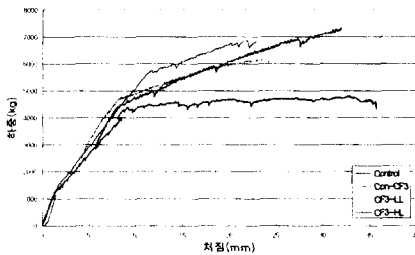
표 3. 실험결과 요약

구분	ϕM_n	② 파괴모멘트 (실험)	비율 (②/①)	비율 (/Con-CF)
Control	1.95	1.92	0.98	-
Con-CF3	2.84	2.75	0.97	1
CF3-LL	2.84	2.46	0.87	0.89
CF3-HL	2.84	2.92	1.03	1.06
Con-CF6	3.72	3.83	1.03	1
CF6-LL	3.72	3.61	0.97	0.94
CF6-HL	3.72	3.21	0.86	0.84

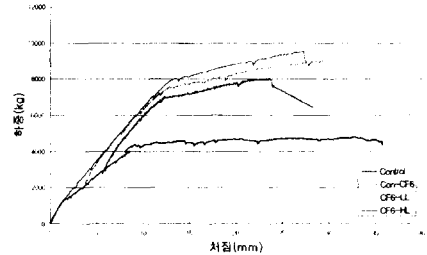
본 실험의 결과 재하전 탄소섬유로 보강한 시험체보다 CF3-HL 시험체를 제외한 전 시험체의 내력이 낮은 결과를 나타냈으며, 이와 같은 결과는 재하상태에서 보강한 시험체에서는 초기하중에 의한 철근의 잔류응력 변형이 보강이후에도 시험체에 지속적인 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.2 탄소섬유 보강 이후 강성의 변화

탄소섬유 보강 이후 부재의 하중-처짐 곡선을 보면 다음의 그림 3과 같으며, 하중-처짐 곡선의 기울기는 다음의 표 4와 같다. Control 시험체와 탄소섬유로 보강한 시험체를 비교하였을 경우 재하상태에 따라 강성의 변화를 갖는 것으로 나타났다. 본 실험에서 철근비 2-D13을 사용한 기본시험체에 재하전 탄소섬유로 보강한 Con-CF3 시험체와 Control 시험체를 비교하면 약 1.1배의 강성변화를 나타내었으며, 동일 철근비를 갖는 시험체에 재하상태에서 보강한 CF3-LL, CF3-HL 시험체는 Control 시험체의 1.15, 1.25배의 강성변화를 나타냈으며, 철근비가 같은 동일한 시험체를 비교하면 강성변화는 CF3-HL 시험체의 기울기 비가 Con-CF3 시험체보다 12% 높게 나타났다. 철근비 3-D13을 사용한 기본시험체에 탄소섬유로 보강한 시험의 강성변화는 보강시기와 관계없이 Control 시험체의 약 1.37배 이상의 강성변화를 갖는 것으로 나타났으며, 철근비가 같은 동일한 시험체를 비교하면 강성변화는 재하상태와 관계없이 일정한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 기본시험체에 탄소섬유로 보강한 이후 그림 3에서와 같이 보강 초기에 급격한 강성의 변화를 보이다가 일정한 하중 증가이후 강성의 변화가 일정하게 나타나는 현상을 볼 수 있다. 이처럼 탄소섬유로 보강한 시험체인 경우 보강 즉시 시험체의 내력에 관여하기 때문에 보강 초기에는 급격한 강성의 변화를 갖는 그래프의 형태로 나타나게 되며, 일정한 하중의 증가이후에는 인장철근이 항복하고 탄소섬유만이 작용함으로써 초기 하중상태와는 관계없이 일정한 강성변화를 갖는 것으로 판단된다.



(a) 하중-처짐곡선(CF 3계열)



(b) 하중-처짐곡선(CF 6계열)

그림 3. 시험체의 하중-처짐곡선

표 4. 하중-처짐곡선의 기울기

구분	Control	Con-CF3	CF3-LL	CF3-HL	Con-CF6	CF6-LL	CF6-HL
절단하중(kg)	398	441	458	496	570	540	555
기울기비 (/Control)	1	1.11 (1)	1.15 (1.04)	1.25 (1.12)	1.43 (1)	1.37 (0.95)	1.39 (0.97)

3.3 파괴양상

시험체의 전체적인 파괴양상은 탄소섬유와 시험체 사이의 부분 탈리 현상이 발생한 이후 시험체가 급격하게 파괴되는 취성파괴 양상을 보였다. 재하상태에서 보강한 시험체인 경우 초기하중의 영향으로 발생한 균열의 선단에서부터 균열이 진전된 이후에 시험체와 탄소섬유 사이의 부분 탈리 현상 나타났으며, 시험체의 내력이 급격하게 감소하는 파괴양상을 보였다. 재하전에 보강한 Con-CF3, Con -CF6의 시험체인 경우 철근비와 관계없이 탄소섬유와 시험체 사이의 부분 탈리 현상이 6ton에서 동일하게 발생하였다. 특히, 그림 3에서 보는바와 같이 ϕM_n 의 70% 하중을 가력한 상태에서 보강한 CF6-HL 시험체인 경우 탄소섬유와 시험체 사이의 탈리 현상이 다른 시험체보다 빠르게 나타났으며 내력 또한 급격한 감소를 보이는 파괴양상이 뚜렷하게 나타났다. 본 실험의 결과 탄소섬유 보강 효과를 기대하기 위해서는 콘크리트면에 탄소섬유를 부착하는 과정에서 많은 주의가 필요한 것으로 사료된다. 뿐만 아니라, 탄소섬유로 보강한 시험체에서 나타나는 취성파괴에 대한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

3.4 재하레벨에 따른 철근의 응력도 분석

탄소섬유 보강 이후 부재의 하중-처짐 곡선을 살펴보면 그림 3에서 나타나듯이 하중이 증가함에 따라 철근과 탄소섬유가 함께 하중에 대해 거동하며, 일정 하중의 증가 이후 철근의 항복으로 인하여 강성의 변화를 갖는 그래프의 양상을 보이고 있다.

기존의 보강 설계방법에 의하면 재하레벨과 관계없이 일정한 저항 모멘트값을 가진다. 본 실험결과 그림 3에서 나타나듯이 시험체의 저항 모멘트(항복상태)는 재하레벨에 따라 다르게 나타나고 있다. 재하전 보강한 시험체인 경우 초기하중을 가력하지 않은 상태에서 보강을 실시하였기 때문에 철근이 항복에 이르기까지 초기하중부터 탄소섬유와 철근이 하중에 대해 거동하게 된다. 하지만 재하상태에서 보강한 시험체인 경우 초기하중에 의한 철근의 잔류응력이 발생한 상태에서 보강을 실시하기 때문에 보강 이후에도 시험체에 지속적인 영향을 미치게 된다. 따라서 시험체의 저항 모멘트는 재하레벨에 따른 철근의 잔류응력 변형 양 만큼 탄소섬유 저항 모멘트값에 고려해 주어야 한다. 재하상태에 따른 철근 및 탄소섬유의 변형도 그래프는 다음 그림 4와 같다. 철근의 잔류응력을 고려하지 않은 시험체의 항복모멘트(M_{n1})와 재하레벨에 따른 철근의 잔류응력을 고려한 시험체의 항복모멘트(M_{n2}) 값은 다음 표 5와 같다. 본 실험의 결과 재하전에 보강한 시험체의 항복 모멘트와 실험 항복모멘트값은 큰 차이

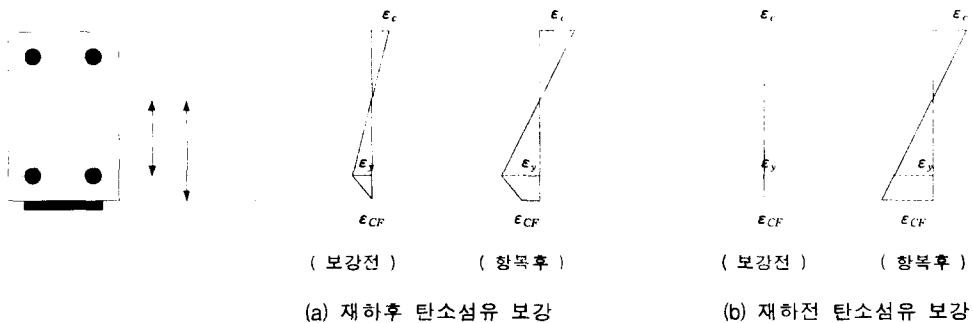


그림 4. 철근 및 탄소섬유 변형도

가 없는 것으로 나타났으며, 재하상태에서 보강한 시험체인 경우 철근의 잔류응력을 고려하지 않은 시험체의 항복 모멘트(M_{m1})보다 철근의 잔류응력을 고려한 시험체의 항복모멘트(M_{m2})값이 실험 항복 모멘트값과 근접한 결과를 나타내었다. 따라서 시험체의 항복모멘트 값을 산정하기 위해서는 재하레벨에 따른 철근의 잔류응력 변형에 대한 검토가 필요하며, 이에 따른 지속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

표 5. 실험결과 요약

구분	① M_{m1}	② M_{m2}	③ 항복모멘트(실험)	비율(③/①)	비율(③/②)
Control	1.96	1.96	1.73	0.88	0.88
Con-CF3	2.35	2.35	2.27	0.97	0.97
CF3-LL	2.35	2.19	1.90	0.81	0.87
CF3-HL	2.35	2.13	1.80	0.77	0.85
Con-CF6	3.21	3.21	3.22	1.00	1.00
CF6-LL	3.21	3.11	3.01	0.94	0.97
CF6-HL	3.21	3.07	2.77	0.86	0.90

3. 결론

본 연구의 실험결과에 따라 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 탄소섬유 보강에 따른 내력의 증가는 재하전에 보강한 시험체의 내력보다 재하상태에서 보강한 시험체의 내력이 낮게 나타났다.
- 2) 탄소섬유 보강 이후 강성의 변화는 재하전에 보강한 시험체와 재하상태에서 보강한 시험체가 유사한 것으로 나타났다.
- 3) 탄소섬유 보강 이후 시험체의 파괴양상은 탄소섬유와 시험체 사이의 탈리 현상이 발생하며 시험체의 내력이 급격히 감소하는 취성 파괴 형태로 모든 시험체에서 공통적으로 나타났다. 따라서, 탄소섬유의 탈리를 방지할 수 있는 방안에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.
- 4) 탄소섬유 보강 이후 재하레벨에 따른 철근의 응력도 분석은 철근의 잔류응력을 고려하지 않은 시험체의 항복모멘트보다 철근의 잔류응력을 고려한 시험체의 항복모멘트값이 실험 항복 모멘트값과 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 시험체의 항복 모멘트값을 산정하기 위해서는 재하레벨에 따른 철근의 잔류응력에 대한 고려한 선행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원과 (주) 태창 S.M.S의 시험체 보강지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 관계자 여러분의 도움에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 이영재, 문희중, 이경언, 정상진, 정란, "강판, 탄소섬유슈트, 탄소섬유판으로 휨보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동", 한국콘크리트 학회 97 가을 학술발표회 논문집 제9권 2호, 통권 제 17집 1997, pp. 691~696
- 2) 정란, 이영자, 문희중, 이경언, 정상진, "재하상태에서 보강된 철근 콘크리트보의 보강재료에 따른 구조적 거동", 한국콘크리트 학회지, 제 11권 1호, 1999. 2