

탄소섬유 메쉬를 사용한 철근콘크리트 보의 휨보강

Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber Mesh

서 수 연*

Seo, Soo-Yeon

윤 현 도**

Yun, Hyun-Do

최 창 식***

Choi, Chang-Sik

최 기 봉****

Choi, Ki-Bong

Abstract

The objective of this work is to study the flexural strengthening effectiveness of Carbon Fiber Mesh (CFM) in reinforced concrete beams. Flexural strengthening for a simply supported reinforced concrete (RC) beam using CFM is developed by bonding CFM to the soffit of the beam. In this experimental program, five medium-sized reinforced concrete beams strengthened with CFM are tested in bending to evaluate reinforcing effects of the CFM. The beams are designed to have high shear capacity so that expected dominant failure mode of specimens is bending. The reinforcing effect of CFM is small at crack initiation, but is considerable in flexural rigidity of the beam after crack initiation. In comparing the behaviors of strengthened and virgin beams each other, it is shown that the strength of RC beams can be enhanced by attaching CFM. A fairly good agreement between the measured values and the calculated ones is obtained at both the cracking strength and yield strength of the strengthened beams.

요 지

본 연구에서는 탄소섬유메쉬(Carbon Fiber Mesh, CFM)를 이용한 철근콘크리트 보의 휨보강 효과를 연구하며 CFM의 정착과 접착이음방법에 따른 영향을 연구하고자 한다. 휨이 지배적인 5개의 철근 콘크리트 실험체를 제작하고 CFM으로 보강한 후 단순지지형태로 가력을 하여 그 보강효과를 규명하고자 한다. 보의 전체 길이는 2400mm이며 깊이와 폭이 모두 300mm로서 휨이 지배될 수 있도록 실험체를 계획하였다. 실험으로부터, 균열이 시작되는 단계에서 CFM의 보강효과는 미약한 것으로 나타났으나, 균열발생 이후에는 보의 휨강성확보의 측면에서 효과가 있는 것으로 나타났다. 보강된 실험체와 보강되지 않은 실험체의 비교를 통하여 CFM보강효과를 확인할 수 있었으며, 균열발생시와 항복시에 대하여 보강효과를 반영하여 예측한 계산값과 실험결과가 좋은 일치를 보이는 것으로 나타났다.

Keywords : RC Beams, Carbon Fiber Mesh(CFM), Flexural Strengthening, Strength

핵심 용어 : 철근콘크리트 보, 탄소섬유메쉬, 휨보강, 강도

* 정희원, 충주대학교 건축공학과 조교수

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 부교수

*** 정희원, 한양대학교 건축공학부 부교수

**** 정희원, 경원대학교 건축공학과 교수

E-mail : syseo@chungju.ac.kr 043-841-5211

•본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2005년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

철근콘크리트는 콘크리트의 약점인 낮은 인장강도를 철근이 보완하고 철근의 약점인 부식과 좌굴을 콘크리트가 억제하는 상호보완작용을 함으로서 우수한 내구성능을 발휘하는 복합재료이다. 그러나 철근콘크리트 구조물은 구조설계, 재료와 시공이 부적절하거나 시공이후 자연 및 인위적인 영향을 받아 화학적·물리적으로 건설초기 물성을 상실하게 되며 점차 열화됨으로써 구조물의 안전성·사용성·내구성 및 기능성이 저하되어 내구연한이 점차 감소된다. 그러므로 철근콘크리트 구조물이 소요 내구연한동안 유효하게 그 기능을 발휘할 수 있도록 하기 위해서는 유지관리 즉, 구조물의 상태를 조사하여 열화손상부위에 대한 보수보강을 함으로서 구조물이 그 기능을 발휘할 수 있도록 해야 한다.

따라서, 최근에는 이러한 구조물의 사용성 또는 내하력 증진을 위하여 휨부재를 보강하는 보강방법으로 강판(Steel plate)을 에폭시로 접착하는 보강판 접착방법^{1),2)}이 주로 적용되고 있다. 그러나 강판 접착공법은 강판의 과도한 자중으로 인한 시공상의 어려움, 철근콘크리트 부재 내에서 철근과 콘크리트와 비교하여 뒤떨어지는 합성작용(Composite action), 온도변화, 합성 경계면의 접착력을 저하시키는 부식과 같은 내구성 문제와 강판의 박리에 의한 조기파괴 등의 결함이 문제점이 대두되고 있다.

이러한 결함을 보완하기 위하여 매우 높은 인장강도와 탄성계수를 가지는 탄소섬유시트(Carbon fiber sheets)^{3),4)}나 탄소섬유적층판(Carbon fiber reinforced plastics laminate)^{5),6)} 등을 이용하여 구조물의 내력을 증진시키는 공법과 이에 관련된 많은 실험과 이론적 연구가 활발히 진행중이며 연구결과를 근거로 실제 구조물의 보강공사에 직접 적용되고 있는 단계에 있다. 그러나 탄소섬유시트와 같은 보강재는 지나치게 소재가 얇아 과도한 유연성을 갖으며 실제 구조물에 대한 보강 공사시 기존 구조체에 밀착되지 않아(주름이 잡힘) 보강효과를 저해한다. 또한 탄소섬유시트는 비내화 재료이므로 탄소섬유시트 보강 후 내화피복 모르터 등의 후속 공정이 요구된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 개발된 것이 탄소섬유메쉬(Carbon fiber mesh, 이하 CFM이라 칭함)이다. CFM은 자

중에 비해 높은 인장강도를 가지고 있으며, 가공성과 시공성이 용이하고 연성, 내부식성 그리고 경제성 등의 높은 장점을 가지고 있다.^{7),8),9),10)} 따라서 기존 구조물의 보강재에 대한 효율적인 활용과 합리적인 재료수급 측면에서 CFM을 이용한 보강기법 및 보강된 부재의 구조성능 규명과 사용성 향상에 대한 연구가 요구된다고 할 수 있다. CFM을 보나 슬래브 등의 구조부재에 적용하기 위해서는 광범위한 구조적인 거동의 평가가 선행되어야 한다.

이에 본 연구에서는 CFM을 철근콘크리트 보의 구조적인 보강재로써 적용가능성을 검토하기 위하여 CFM으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 보강효과를 평가하고 아울러 철근콘크리트 보의 CFM 보강시 CFM 보강비에 대한 한계값 등을 제시함으로써 CFM에 의한 철근콘크리트 구조물의 보강기법 개발을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 재료특성

시험체 제작에 사용된 콘크리트, 철근, 부착 모르터, CFM, 그리고 정착철물에 대한 재료시험을 각각의 KS 규정에 맞추어 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다. 콘크리트는 설계기준강도(f_{ck})가 24Mpa인 기성레미콘 제품을 사용하였으며, 실험시 압축강도(f_{cu})는 22Mpa로 나타났다. 주근 및 스테럽으로 사용된 철근인 HD13 및 HD10에 대한 재료실험결과는 Table 1과 같다.

CFM의 부착에 이용된 부착모르터의 압축강도는 KS L 5105 시험방법에 의한 5×5×5cm 큐빅 공시체 5개를 제작하여 압축강도 실험을 실시하였으며 실험결과 압축강도는 56~61Mpa로 나타났다. CFM은 Photo 1(a)와 같이 전체크기 100×110cm, 그리드

Table 1 철근의 기계적 성질

구분	규격	항복강도 (Mpa)	인장강도 (Mpa)	탄성계수 (Mpa)
철근	D10	482	652	2.06×10 ⁴
	D13	430	624	1.99×10 ⁴

이 240cm, 순경간 200cm의 장방형 복근보로 제작하였다. 유효깊이 d 는 25.5cm이며 인장철근은 3-HD13으로 최소철근비 규정을 만족시키고 있으며 전단보강근의 배근을 위하여 압축철근(2-HD10)을 배근하였다. CFM 보강이후에도 시험체의 휨파괴가 선행되도록 시험체는 충분히 전단보강되었다. 또한, 보의 중앙에서 좌우로 각각 20cm, 총 40cm구간에서 순수 휨만 유발되도록 2점 가력하였다.

2.3 시험체 제작

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 기성 레미콘으로 콘크리트 타설시 거푸집에 탈형이 편리하도록 박리제를 도포하였고 콘크리트 타설시 봉상 진동기를 사용하여 밀실하게 다짐하였다. 콘크리트 타설 후 1주일 동안 살수하여 대기중에서 양생시킨 후 거푸집을 탈형하였다. CFM 보강 시험체의 경우 타설 4주 후에 철근 콘크리트 보의 하부면과 부착 모르타르와의 부착력을 증진하기 위하여 CFM 보강면을 취핑 처리하였다. CFM의 고정용 정착크립은 힐티(Hilti)의 타정공구(모델명 : DX36M)를 이용하여 철근콘크리트 보에 고정하였으며, CFM이 철근콘크리트 보와 일체화되도록 고강도 부착 모르타르를 30mm 두께로 마감처리하였다. 모르타르 마감 처리전에 철근콘크리트 보의 기존 콘크리트 면과 부착 모르타르의 부착효과를 높이기 위하여 접착강화 프라이머를 미리 취핑된 면에 도포하였으며 이렇게 보강된 시험체는 1주일 동안 대기 양생하였다.

2.4 실험 방법

CFM으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 보강효과를 평가하기 위하여 전술한 방법에 의해 제작된 시험체는 Photo 3과 같이 단순지지 조건하에서 4점 재하되었다. 가력 및 도입하중의 측정은 50tonf 용량의 유압잭(Oil Jack) 및 30tonf 용량의 로드셀(Load cell)을 이용하였다. 하중 재하방법은 시험체의 항복하중까지는 하중조절방식, 그 이후부터는 변위조절방식에 의하여 가력하였다. 보 받침부의 지압파괴를 방지하기 위하여 두께 10mm 고무판을 설치하고 받침부에도 플레이트 판과 고무판을 설치하였다.

보의 중앙부 및 가력부 하단의 처짐을 측정하기 위



Photo 3 시험체의 설치상황

하여 3개의 변위계를 설치하였고 또한, 보의 재하 단계별 모멘트-곡률 관계를 측정하기 위하여 시험체 전면 압축측과 인장측에 2개의 변위계를 각각 설치하였다.

또한 보 주근의 변형률을 측정하기 위하여 순수 휨 구간 내 중앙부 철근에 2개, 구간 밖에 1개의 와이어 스트레인 게이지(Wire strain gauge, W.S.G.)를 부착하고 CFM 보강 시험체의 경우에는 휨인장측 철근과 CFM의 응력 분담률을 측정하기 위해 CFM 4개소에 W.S.G.를 부착하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴상황

Fig. 2는 5개 시험체에 대한 최종 파괴상황을 비교하여 나타낸 것으로 전체적인 파괴양상은 순수 휨구간에서 인장균열이 집중적으로 발생된 휨파괴 양상을 보이며 모든 시험체의 균열 및 파괴양상은 유사한 경향을 보이고 있다. 각 시험체의 균열진전 과정 및 최종 파괴양상은 다음과 같다.

ST#1 시험체는 CFM으로 보강되지 않은 표준 시험체로서 초기 휨균열은 보의 중앙부(순수 휨구간) 하단 인장측에서 발생되었다. 이후 하중이 증가됨에 따라 새로운 휨균열의 발생은 중앙부로부터 받침부쪽으로 진전되었으며 이미 발생된 휨균열은 인장측에서 중립축 방향으로 진전되며 균열폭이 증가되었다. 작용하중 10.06 tonf에 이르러 항복된 후 처짐과 균열이 급속도로 증가면서 작용하중 12.74 tonf에 이르러 최종파괴되었다.

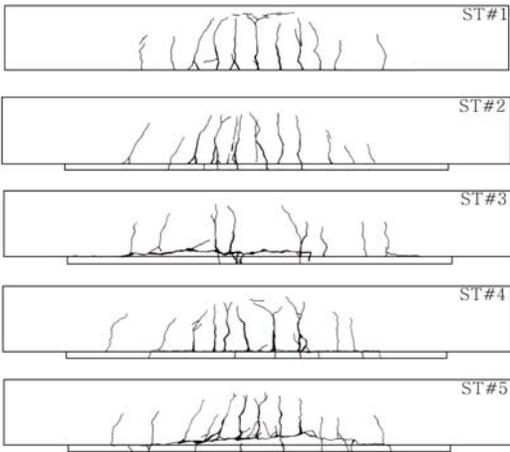


Fig. 2 실험체의 파괴상황

ST#2 시험체는 ST#1과 비교하여 CFM의 휨 보강 효과를 평가하기 위하여 계획된 시험체로 CFM으로 휨 보강된 표준 시험체이다. 먼저 CFM 부착면을 취평처리하고 CFM의 단부에 이를 철근콘크리트 보에 고정하기 위하여 정착철물을 설치하고 부착 모르타르 보강된 시험체이다. 작용하중 3.6tonf에서 부착모르타르의 중앙부에 휨균열이 발생한 후 보의 중앙부에서 균열의 수와 폭이 증가하면서 모재와 부착 모르타르 계면 박리가 발생되었다. 이후 작용하중이 증가됨에 따라 처짐이 초기 휨균열 발생이전에 비하여 완만하게 증가하며 작용하중 10.85tonf에 이르러 항복되었다. 작용하중 13.3tonf에 이르러 CFM의 파단에 의한 굉음과 함께 중앙부 부착 모르타르가 탈락되며 시험체가 최종파괴되었다. CFM의 파단후 ST#2 시험체는 CFM의 보강 효과를 상실하고 ST#1과 같은 CFM에 의해 휨보강되지 않은 철근콘크리트 보와 동일한 거동을 보였다.

ST#3 시험체는 ST#2와 비교하여 정착철물의 구조적인 효과를 평가하기 위하여 계획된 시험체로서 CFM 부착면을 취평처리하고 CFM 설치후 단부에 정착철물을 설치하지 않은 상태에서 부착 모르타르만으로 CFM을 부착하였다. 보 중앙부에서 초기 휨균열이 발생한 이후 하중이 증가됨에 따라 보 모재와 부착 모르타르 계면을 따라 발생한 수평균열 폭이 증가되면서 부착 모르타르의 박락으로 인하여 급격하게 내력이 저하되며 최종 파괴되었다.

ST#4 시험체는 부착 모르타르가 보 모재의 계면에

일체화될 수 있도록 하기 위한 취평의 영향을 평가하기 위하여 계획된 시험체로서 작용하중이 증가됨에 따라 보 중앙부에서 초기 휨균열이 발생되었다. 또한, 보의 휨변형 및 모재와 부착 모르타르의 계면에 작용되는 전단응력이 증가되면서 계면이 취평처리된 다른 시험체와는 다르게 보 중앙부에서 부착 모르타르와 모재의 계면이 이격(들뜸)되는 현상이 나타났으며 특히 높은 응력 집중이 발생한 CFM 단부에서 부착 모르타르가 부분적으로 박리되면서 최종 파괴되었다. 이러한 결과로부터 부착 모르타르와 모재 콘크리트 계면의 취평여부는 CFM으로 보강된 철근콘크리트 보의 내력 및 파괴양상에 주요한 영향을 끼치고 있는 것으로 판단된다.

ST#5 시험체는 ST#2와 비교하여 CFM 단부에 설치된 정착철물의 개수 및 배치방법에 의한 영향을 평가하기 위하여 계획된 시험체로 작용하중 3.99tonf에서 부착 모르타르의 중앙부에서 초기 휨균열이 발생한 후 작용하중이 증가됨에 따라 가력점 좌측 하부에 발생한 휨 균열폭이 증가하면서 부착 모르타르가 박리되기 시작하였다. 이후 보 전체에 휨균열이 폭넓게 분산되었고 이미 발생한 휨균열은 균열폭이 점차 증가되었다. 작용하중 11.11tonf에 이르러 항복되었으며 13.2tonf에 이르러 CFM의 갑작스런 파단과 함께 최종 파괴되었다.

3.2 하중-변위 관계

1) CFM의 보강유무

CFM의 보강효과를 평가하기 위하여 Fig. 3에 ST#1 및 ST#2 시험체의 하중-처짐관계 곡선을 비교하여 나타내었다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 초기 휨균열 발생이후 CFM으로 휨보강된 ST#2 시험체의 강성이 다소 높게 나타나고 있으나 주근의 항복이전까지는 큰 차이를 보이고 있지는 않았다. 그러나 주근 항복이후 CFM으로 휨보강된 ST#2 시험체의 강성 및 강도는 표준 시험체 ST#1에 비하여 현저하게 증가되는 경향을 보였다. 이러한 경향은 CFM이 파단된 시점의 처짐량 17mm(1/118, 1은 보의 순지간)에 이를때까지 나타났으며 CFM이 파단되면서 급격한 강도 저하특성을 보였다. CFM 파단이후 하중-처짐 특성은 표준 시험체인 ST#1 시험체와 유사한 거동을 보였다.

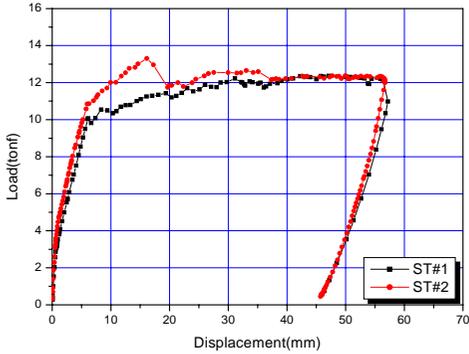


Fig. 3 CFM의 보강효과

이상과 같은 결과로부터 본 연구에서 적용한 CFM에 의한 철근콘크리트 보의 휨보강 방법은 철근콘크리트 보의 주근 항복이후 강성 및 강도증진에 효과적인 것으로 나타났다.

2) 계면의 취핑 처리 여부

ST#4 시험체는 CFM 보강시 모래 콘크리트와 부착모르터 계면의 취핑처리 여부에 따른 영향을 평가하기 위하여 계면에 취핑처리 하지 않은 상태에서 CFM을 보강하였다.

Fig. 4는 CFM 보강된 표준 시험체 ST#2와 ST#4 시험체에 대한 도입하중과 보 중앙부 처짐 관계를 비교하여 나타낸 것으로 두 시험체 모두 주근의 항복이후 중앙부 처짐이 10mm (1/200)에 이를 때까지 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 보의 중앙부 처짐량이 증가됨에 따라 계면에 작용되는 전단응력이 증가되어 중앙부 처짐 13mm(1/154)에 이르러 모래 콘크리트와 부착 모르터가 분리되었다. 계면에서 부착 모르터가 분리된 이후 이로 인하여 보 단면의 강성이 감소됨에 따라 표준 시험체 ST#2에 비하여 동일 작용하중 하에서도 처짐량이 큰 경향을 보였다. 그러나, 균열이 발생한 이후부터 변위가 증가됨에 따라 그 차이는 없어지는 것으로 나타났다. 이상과 같은 결과로부터 CFM 부착 모르터가 타설되는 모래 콘크리트 계면의 취핑은 부재 항복이후 두 이질재를 일체화하는데 중요한 역할을 하지만 보의 처짐량이 증가됨에 따라 그 영향이 미소해지는 것으로 나타났다.

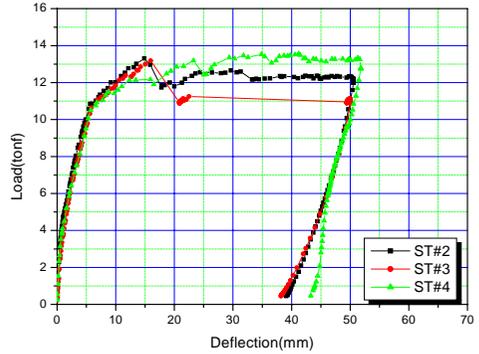


Fig. 4 계면의 취핑(Chipping) 영향

3) 정착철물의 영향

본 연구에서는 CFM에 의해 철근콘크리트 휨재의 휨보강시 CFM의 정착을 위하여 설치된 정착철물의 영향을 규명하기 위하여 정착철물이 단부에 각각 6개씩 설치된 ST#2와 9개의 정착철물이 설치된 ST#5 시험체의 하중-변위 관계를 Fig. 5에 비교하여 나타내었다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 정착철물의 개수와 배치가 다른 세 시험체 모두 재하 초기부터 최대내력에 이를 때까지 표준 시험체인 ST#2와 대등한 거동을 보이고 있으나 최대내력이후의 거동은 CFM 단부에 설치된 정착철물의 설치 유무 및 개수에 따라 다소 차이를 보이고 있다.

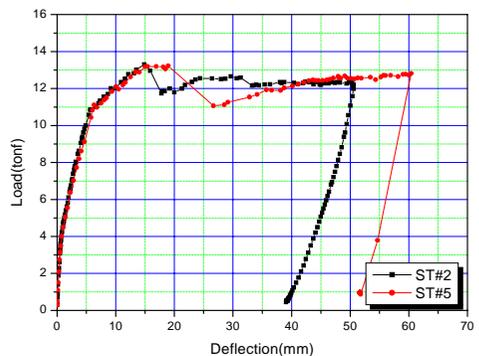


Fig. 5 정착철물의 영향

Fig. 4에 나타난 정착철물이 설치되지 않은 ST#3 시험체는 표준 시험체인 ST#2에 비하여 최대내력 이후 급격하게 파괴되는 경향을 보였으며 이는 높은 응력집중이 유발되는 CFM 단부에 정착철물이 설치되지 않아 모재와 부착 모르타르의 계면에 작용되는 전단응력에 의해 수평균열이 발생된 이후 보 단부의 부착 모르타르가 급격하게 탈락되었기 때문인 것으로 판단된다.

ST#5 시험체에서 정착철물은 3개씩 CFM의 단부로부터 150mm 간격으로 3열이 배치되었으며 다른 조건은 두 시험체와 동일하다. ST#5 시험체의 경우도 초기 휨균열은 보 중앙부 인장측 하부에 발생되었으며 재하초기단계에서 보 중앙부에서 모재와 부착 모르타르의 계면에 수평균열이 발생되었고 이러한 균열은 하중이 증가됨에 따라 받침부쪽으로 점차 진전되었다. 또한 휨균열도 보의 전 지간에 걸쳐 폭넓게 확장되었다. 이는 넓은 구간에 걸쳐 추가로 설치된 정착철물로 인해 응력이 전 지간의 CFM에 균등하게 분배되었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 이유로 Fig. 5에 나타난 바와 같이 다른 두 시험체에 비하여 최대내력을 안정되게 유지하는 강도특성을 보이고 있다. 그러나 최대내력 이후에는 표준 시험체에 비하여 상대적으로 급격하게 강도가 저하되는 특성을 보이고 있다.

3.3 모멘트-곡률 관계

Fig. 6은 순수 휨구간에서 보 단면의 휨압축 및 인장측에 설치된 변위계에 의해 측정된 변형률로부터 산정

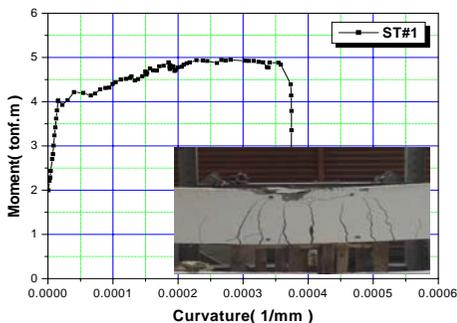
된 곡률과 모멘트의 상관관계이다. Fig. 6(a)는 CFM이 보강되지 않은 ST#1 시험체의 모멘트-곡률 관계로서 Fig. 6(b)와 같이 CFM으로 보강된 ST#2 시험체에 비하여 낮은 항복 및 극한 모멘트를 보이며 또한 항복이후에도 낮은 곡률 연성을 보이고 있다.

이상과 같은 결과로부터 본 연구에서 철근콘크리트 보의 휨보강 방법으로 적용한 CFM에 의한 보강방법은 목표강도 및 연성증진에 효과적인 것으로 평가된다.

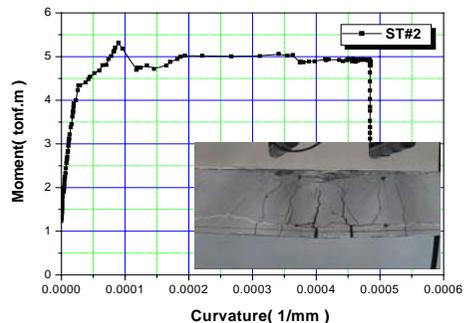
3.4 최대강도 비교

CFM으로 비보강 및 보강된 철근콘크리트 보의 정적 재하 실험으로부터 구한 시험체별 균열모멘트, 항복하중 및 최대하중을 Table 3에 각각 비교하여 나타내었다. 또한, 기존 철근콘크리트 보와 CFM 휨보강재가 일체화되었으며 철근콘크리트 부재의 휨내력 산정시 기본가정을 근거로 단면 해석하여 계산된 CFM 보강된 보의 휨강도와 실험결과를 비교하여 나타내었다. 표에 나타난 바와 같이 CFM에 의해 휨보강된 모든 시험체는 단면해석에 의해 계산된 휨내력을 5~6% 상회하고 있는 것으로 나타났다.

이상과 같은 결과로부터 CFM으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 내력은 기존 철근콘크리트 보의 휨내력 산정시 적용되는 기본가정을 근거로 단면해석에 의해 산정이 가능할 것으로 판단되며, 본 연구에서 적용한 CFM에 의한 휨보강 방법은 강도 증진측면에서 유효한 보강방법으로 평가된다.



(a) ST#1 시험체



(b) ST#2 시험체

Fig. 6 모멘트-곡률 곡선

Table 3 실험결과

시험체	PUSD	균열발생시		항복시		극한시		P _{max} /P _{USD}
		P _{cr} (tonf)	δ _{cr} (mm)	P _y (tonf)	δ _y (mm)	P _{max} (tonf)	δ _{max} (mm)	
ST#1	-	3.41	1.70	10.06	5.88	12.74	31.13	-
ST#2	12.58	3.60	0.59	10.85	5.64	13.30	14.89	1.06
ST#3	12.58	3.62	0.92	10.64	5.87	13.18	15.97	1.05
ST#4	12.58	3.53	0.66	10.50	5.73	13.19	23.26	1.05
ST#5	12.58	3.99	0.78	11.11	6.32	13.22	18.97	1.05

3.5 처짐

받침부로부터 거리 a에 대칭하중(P/2)을 4점 가력된 단순보에서 중앙부의 즉시 처짐량은 다음과 같은 식(1)으로 표현할 수 있다.

$$y_{max} = \frac{Pa}{48E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \quad (1)$$

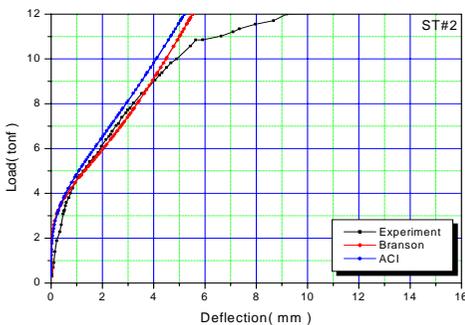
여기서, E_c는 콘크리트 탄성계수, L은 지간, I_e는 유효단면 2차 모멘트이다.

CFM으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 처짐특성을 예측하는데 기존 철근콘크리트 보의 처짐량 산정방법의 적용가능성을 검토하고자 한다. 정적재하시 식(1)에 의한 처짐량 산정을 위하여 CFM으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 단면 2차 모멘트는 보에 작용된 최대 모멘트(M₀)가 균열모멘트(M_{cr})를 초과하지 않는 경우 보강재(철근과 CFM)의 영향을 무시한 단면에

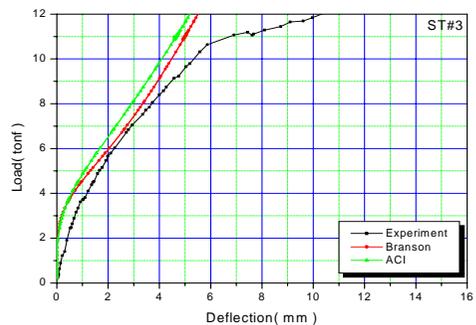
대한 전체 단면 2차 모멘트(I_g)를 적용한다. 보에 작용된 최대 모멘트가 균열 모멘트를 초과한 경우 작용하면 균열이 발생하여 부재의 강성이 변화하므로 균열 모멘트 이후에는 아래와 같이 보강재를 등가의 콘크리트 단면적으로 환산하여 구한 유효 단면 2차 모멘트(I_e)를 구하여 처짐량을 산정한다. 여기서 균열 단면에 대한 단면 2차 모멘트(I_{cr})는 중립축 하부 콘크리트를 무시하고 압축측 콘크리트와 철근 및 인장측 보강재를 콘크리트로 변환한 변환 단면에 대한 단면 2차 모멘트이다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m\right] I_{cr} \leq I_g, (M > M_{cr}) \quad (2)$$

식(2)에서 m은 국내 및 ACI 규준에서 3으로 규정하고 있으며 Branson은 4로 제한하고 있다. 본 연구에서는 CFM으로 휨보강된 보의 처짐량 산정시 규준식 및 Branson의 제안식의 적용 가능성을 검토하기



(a) ST#2 시험체



(b) ST#3 시험체

Fig. 7 하중-변위곡선

위하여 실험결과로부터 측정된 시험체의 처짐량과 두 계산식에 의해 계산된 단면 강성을 이용하여 산정된 처짐량을 비교하였다. Fig. 7은 CFM으로 보강된 표준 시험체인 ST#2와 ST#2와 동일조건에서 CFM의 단부에서 정착철물이 설치되지 않은 ST#3 시험체의 처짐량을 기준식과 Branson에 의한 계산식을 적용하여 산정된 처짐량을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 CFM으로 휨보강된 ST#2 시험체의 정적 단조제하시 처짐특성은 현행 기준식 및 제안식을 이용하여 예측이 가능할 것으로 판단되나 국내의 기준식에 의한 계산결과는 Branson 제안식에 의한 계산결과보다 실험결과를 과대평가하는 경향을 보이고 있다. ST#3 시험체는 CFM의 단부에 정착철물이 설치되지 않아 CFM이 모재 콘크리트와 일체화되지 않아 구조적인 성능을 충분히 발휘하기전 미끄러짐이 발생되어 실험결과에 의한 처짐량이 계산결과에 비하여 낮게 평가되고 있는 것으로 판단된다.

4. CFM의 제한량

4.1 최대 CFM 보강비

여기서 유도되는 보강재의 제한량 및 설계강도 산정은 철근콘크리트 부재의 휨내력 산정시 적용되는 기본가정과 CFM은 선형탄성체이며 모재와 완전부착상태라는 가정하에서 유도된다.

연성적인 파괴를 유도하기 위하여 압축측 콘크리트의 압괴보다 인장측 철근의 항복이 선행되어야 한다. 이는 균형파괴(Balanced failure)를 유발하는 CFM 단면적에 비하여 적은 단면으로 보강시 가능하게 된다. 여기서 최대 CFM의 보강비는 보강이전의 단면에 대한 균형철근비와 주근비의 차로써 아래와 같은 절차로 유도할 수 있다.

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c_{bal}} = \frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_y}{d}$$

$$c_{bal} = \frac{0.003}{0.003 + f_y/E_s} d = \frac{6,000}{6,000 + f_y} d \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c_{bal}} = \frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_f^{c_{bal}}}{h}$$

$$\varepsilon_f^{bal} = 0.003 \left(\frac{6,000 + f_y}{6,000} \frac{h}{d} - 1 \right) - \varepsilon_o \quad (4)$$

$$0.85 f_{ck} b \beta_1 c_{bal} = A_s f_y + A_f^{bal} E_f \varepsilon_f^{bal} \quad (5)$$

이상과 같은 식 (3)과 (4)를 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{E_f \varepsilon_f^{bal}}{f_y} \rho_f^{bal} = 0.85 \beta_1 \frac{f_{ck}}{f_y} \frac{6,000}{6,000 + f_y} - \rho_s$$

$$\rho_f^{bal} = \frac{f_y}{f_f^{bal}} (\rho_s^{bal} - \rho_s) \quad (6)$$

여기서 $\rho_f^{bal} = A_f^{bal}/bd$ 이고 ε_f^{bal} 는 식(4)에 의해 계산된다. 식(6)에 의하면 균형 철근비로 보강된 단면을 갖는 보는 CFM으로 보강시 연성적인 거동의 확보가 불가능하게 되지만 현행 기준식에서 보의 최대 철근비로 균형 철근비의 75%로 제한하므로 이러한 경우는 발생되지 않는다. CFM으로 휨보강된 보가 연성적인 거동을 하도록 하기 위하여 최대 CFM 보강비는 일반적인 철근콘크리트 휨재와 동일하게 적용될 수 있으므로 최대 CFM 보강비는 다음 식(7)과 같이 정될 수 있다.

$$\rho_f^{max} = 0.75 \rho_f^{bal} \quad (7)$$

4.2 최소 CFM 보강비

전술한 바와 같이 CFM으로 보강된 철근콘크리트 보가 연성적인 거동을 확보하기 위해서는 CFM의 파단에 앞서 주근의 항복이 선행된 이후 압축측 콘크리트가 압괴되도록 하여야 한다. 따라서 휨 압축부 콘크리트의 압괴시 CFM의 응력은 설계강도(f_{tw})보다 적어야 한다. 이를 위하여 CFM의 최소 보강비는 휨 압축부 콘크리트의 압괴시 CFM의 응력이 설계강도가 되도록 하기 위한 CFM 보강비 이상으로 규정한다. 이러한 보강비는 적합조건 및 평형조건을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{c_b^{min}} = \frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}^c}{h}$$

$$c_b^{min} = \frac{0.003h}{0.003 + \varepsilon_{fu} + \varepsilon_o} = \frac{a_b^{min}}{\beta_1} \quad (8)$$

$$0.85 f_{ck} b a_b^{\min} = A_s f_y + A_c^{\min} f_{fu}$$

$$\rho_f^{\min} = 0.85 \frac{f_{ck}}{f_{fu}} \left(\frac{a_b^{\min}}{d} \right) - \rho_s \frac{f_y}{f_{fu}} \quad (9)$$

주근비가 낮은 경우를 제외하고 식(9)의 두 번째 항은 첫 번째 항에 비하여 크므로 최소 보강근비(ρ_f^{\min})는 음의 값을 갖는다. 여기서 음의 부호는 휨 압축 측 콘크리트의 압괴이전에 CFM의 응력이 설계강도에 도달되지 못한다는 것을 의미한다.

이상과 같은 방법에 의해 계산된 본 연구대상 시험체의 최대 및 최소 CFM 보강비는 각각 1.127%, 0.053%로 시험체의 CFM 보강비 0.056%는 최대 및 최소 보강근비범위로 연성적인 거동을 보이고 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

CFM으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동 특성에 관한 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) CFM에 의한 철근콘크리트 보의 휨보강 방법은 초기 휨균열 발생이후 휨강성 및 강도증진에 효과적 인 것으로 나타났다.
- 2) 철근콘크리트 보의 휨 보강재로서 CFM의 적용시 CFM이 철근콘크리트 보와 일체성을 확보하여 구조적인 보강효과를 발휘하도록 하기 위해서는 부 착 모르타르와 모재의 계면에 대한 칩핑(Chipping) 처리 및 CFM 단부에 정착철물 등을 이용한 적정 한 정착이 요구된다.
- 3) CFM으로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 휨내력은 휨재의 기본가정을 이용한 계산값에 비하여 5~6% 높게 나타난 바 CFM이 철근콘크리트 보와 일체화되었다는 가정하에서 휨이론에 의해 내력산 정이 가능한 것으로 판단된다. 또한 처짐량도 현행 규준식 또는 Branson의 제안식에 의한 유효 휨강 성을 이용하여 추정이 가능한 것으로 판단된다.
- 4) CFM을 이용한 철근콘크리트 보의 휨 보강시 휨압 축파괴와 같은 취성적인 파괴를 억제하기 위한 CFM의 보강비에 대한 제한범위를 제시하였으며 이러한 제한값에 대하여 보다 많은 실험자료를 근거로 지속적인 검증과 보완이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 사회기반시설물평가 중점연구단의 연구비 지원에 의한 연구로서 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 심종성 외, "강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 RC보의 파괴거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 1995, pp.319-324
2. 심종성 외, "철근, 강판 및 CFRP를 적용한 RC보의 보강효과 비교연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표논문집, 제8권 1호, 통권14집, 1996, 5, pp.323-327
3. 조영홍 외 "탄소섬유 보강부재의 단부탈락 방지 방안에 관한 실험", 콘크리트학회 가을학술발표대회 논문집, 12권, 2호, 2000, pp.1013-1018
4. 이현호, 구은숙, "탄소섬유시트와 아라미드섬유시트로 보강한 보의 휨 성능 비교 연구.", 대한건축학회 14권 9호, 65-72, 1998. 9.
5. Amir M. Malek, "Ultimate Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Web-Bonded Fiber-Reinforced Plastic Plates", ACI Structural Journal, pp.391-399, 1998.
6. Mahmoud T. El-Mihilmy, "Deflection of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Plates", ACI Structural Journal, pp.679-688, 2000.
7. 서수연 외, "복합섬유메쉬 하이그리드를 이용한 철근콘크리트 구조물 보강", 한국구조물 진단학회 학회지, 제7권 제3호, 2003, pp.61-66
8. 성수영, "탄소섬유메쉬로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 구조성능," 충남대학교 대학원 박사학위 논문. 2003
9. 홍익대학교 과학기술연구소, "탄소섬유그리드를 이용한 콘크리트 구조물의 보수보강공법 연구", 1999
10. 조병완 외, "격자형 탄소섬유로 보강한 R/C보의 보강효과", 한국콘크리트학회 논문집 15권 3호, 2003, pp. 377-385.
11. 윤현도 외, "탄소섬유메쉬와 콘크리트의 부착파괴 거동", 한국콘크리트학회 논문집, 제15권 제6호, 2003. 12, pp.769-777

(접수일자 : 2005년 3월 22일)