

先荷重을 받은 RC보의 CFRP-Rod 휨보강 효과에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on the Flexural Behavior of Pre-loaded RC Beams Strengthened with CFRP-Rod

예 상 민* 천 우 철** 강 주 원*** 박 성 무****
Ye, Sang-Min Chun, Woo-Chul Kang, Joo-Won Park, Sung-Moo

요 약

FRP를 이용한 보강법 중에서도 기존에 일반적으로 행해진 보강법은 Plate 또는 Sheet의 형태로 콘크리트 표면에 부착하여 추가적인 강도를 발현하도록 하는 것이다. 그러나 조기 박락파괴, 부착면의 정리, 보강 단부의 앵커시공, 부착면에 대한 내화처리 등의 어려움이 많다. 이러한 문제점들에 대한 방안으로 막대(Rod) 형태인 CFRP-Rod를 보강모체에 홈을 파고 매립하는 NSMR(Near Surface Mounted Reinforcement)공법이 제안되었고, CFRP-Rod의 보강량, 길이, 간격 등의 변수에 의한 휨보강 능력의 평가에 대한 연구가 이루어져왔다. 그러나 구조물에서 CFRP-Rod의 보강은 어느 정도의 하중이 보강부위에 계속 재하된 상태로 보강이 이루어지게 되므로 본 연구에서는 보강전에 가해지는 선하중(Pre-loading)의 크기를 주요변수로 선하중의 크기에 따른 구조물의 거동 특성을 분석하고자 하였고, 선하중의 크기의 결정은 무보강 시험체의 공칭모멘트와의 비로 결정하였다.

Abstract

Steel plate bonding method with epoxy is common applied to repair and strengthen RC structures, but Steel is apt to corrode quickly, hard to manufacture and heavy. To overcome these defects, it is carried out research on strengthening RC structures with FRP(Fibre Reinforced Polymer/Plastic) FRP is generally used in the shape of Plate or Sheet, but it has weak point such as premature failure, difficult work. To cope with these problem, NSMR(Near Surface Mounted Reinforcement) which uses CFRP in the shape of Rod is proposed and carried out active research on strengthening effect of variables such as quantity, anchorage length and space of CFRP-Rod. Strengthening with CFRP-Rod is carried out under loading to some degree in fact, and so the amount of pre-loading is selected as variable in this research. The amount of pre-loading is chosen in proportion to nominal strength of non-strengthened specimen with CFRP-Rod.

키워드 : 선하중, 휨보강, 탄소섬유막대, 표면매립공법

Keywords : Pre-loading, flexural strengthening, CFRP-rod, Near Surface Mounted Reinforcement(NSMR)

1. 서 론

1.1 연구의 배경

콘크리트가 발명된 이래, 경제성, 내구성, 내화성, 차음성 등 많은 장점으로 철근콘크리트 구조가 널리 사용되어 왔다. 그러나 낮은 인장강도와 Creep-변조

수축 등으로 인한 균열, 휨모멘트 등에 의한 균열 등으로 시간이 지날수록 콘크리트가 열화되고, 철근이 부식하는 등 내력이 저하되어 보수보강이 필요하게 된다. 또한 용도변경 등으로 인한 부담내력의 증가를 이유로 보강이 이루어지기도 한다. 보수보강 공법으로 강판(Steel Plate)을 에폭시로 외부 부착하는 보강판 접착방법이 주로 적용되어 왔으나, 높은 부식성, 가공성의 어려움, 무거운 자중 등의 문제점에 대한 대안으로 내부식성과 가공성이 뛰어난 가벼운 자중의 FRP(Fibre Reinforced Polymer/Plastic)를 사용한 보수보강 공법의 개발과 연구가 활발히 진행되고 있다.

* 정회원, (주)보루구조기술사사무소, 공학석사
** 학생회원, 영남대학교 건축학부 석사과정
*** 정회원, 영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사
**** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
Tel : 053-810-2428 Email : smpark@yu.ac.kr

기존의 FRP를 이용한 보강법은 Sheet나 Plate를 콘크리트 표면에 부착하여 추가적인 강도를 발현하도록 하는 것이다. 그러나 외부 표면에 부착된 보강재는 단부 및 콘크리트 균열부위의 응력집중에 따라 보강재로서의 성능을 충분히 발휘하기 전에 조기부착파괴에 이르는 경우가 많다. 따라서 이러한 조기 부착파괴를 방지하기 위한 방안으로 제시된 막대 형태로 보강모체에 매립하는 표면매립공법(Near Surface Mounted Reinforcement)이 제안되고 있다.

기존에 이루어진 CFRP-Rod를 표면 매립한 RC보의 휨 실험은 선하중이 없이 보강이 먼저 이루어진 후에 하중을 가한 휨 실험이었다. 본 연구는 구조적인 손상을 입은 상태에서 보수 보강이 이루어지는 실제 상황과 유사하게 시험체에 선하중을 가한 상태로 보강한 후 휨 실험을 수행한다. 보강위치는 실제현장에서 하부면 보다 시공이 용이한 측면보강으로 실험을 수행하였으며, 합리적인 보강설계법을 제정하는데 필요한 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

2. 실 험

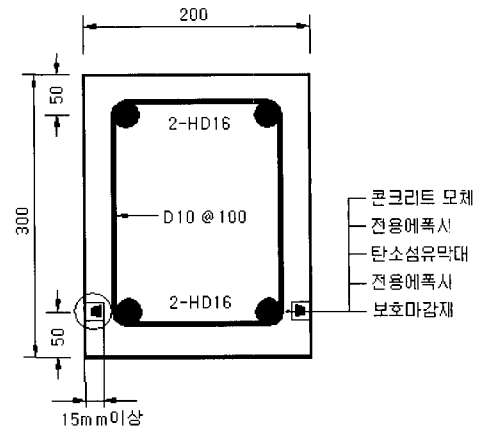
2.1 시험체 계획

본 실험은 시험체에 CFRP-rod를 보강하기 전 미리 가하는 선하중을 변수로 적용하기 위하여 규격 200mm×300mm×2700mm 의 복근 장방형 보로 계획하였다. 시험체의 휨 설계는 극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계 기준에 따라 설계하였으며, 인장철근 2-HD16, 압축철근 2-HD16와 전단파괴를 제어하기 위한 D10 전단보강근을 10cm간격으로 배근하였고, 인장철근비를 균형철근비의 35%로 배근하여 보강 후 콘크리트 압괴에 의한 파괴를 제어하였다.

피복두께는 CFRP-rod 삽입시 시험체의 철근배근에 영향이 없도록 50mm 확보하였다. CFRP-rod의 유효깊이는 인장철근의 유효깊이와 동일하게 시공하였으며, 그 형상은 <그림 1>과 같다.

본 실험에 적용된 규격은 다음과 같다.

- ① 콘크리트 강도 : 21 MPa
- ② 보강재의 규격 : 4mm×3mm×10mm (윗변×밑변×높이)



<그림 1> 보강단면상세

- ③ 보강재 위치 및 개수 : 측면보강, 2EA
- ④ 보강길이 : L_o+2d

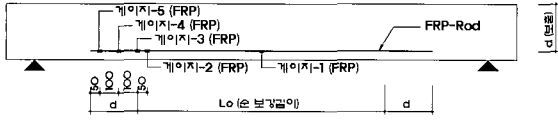
본 실험에 적용된 변수는 CFRP-Rod를 보강하기 전에 가하는 선하중으로, 기준시험체 공칭모멘트의 0%, 55%, 75%, 95%를 적용하였다.

선하중은 CB시험체의 공칭모멘트의 55%인 39.22kN, 75%인 53.15kN, 95%인 67.67kN의 경우로 계획하였다.

<표 1> 시험체명

| No | 시험체명 | 측면보강 개수 | 보강길이 | | 선하중 (CB 공칭모멘트비) |
|----|--------|---------|---------------|-------|-----------------|
| 1 | CB | - | - | - | - |
| 2 | SR2-0 | 2 | 1.57m (0.65L) | Lo+2d | 0 kN (0%) |
| 3 | SR2-55 | | | | 39.22kN (55%) |
| 4 | SR2-75 | | | | 53.15kN (75%) |
| 5 | SR2-95 | | | | 67.67kN (95%) |

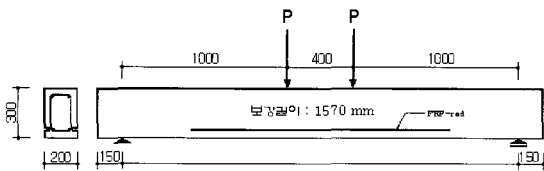
측정항목은 하중, 시험체 중앙부의 처짐, CFRP-Rod 및 철근의 변형률, 콘크리트의 변형률 등으로 DATA LOGGER(TDS-601)를 사용하여 측정하였다. 처짐 측정에는 전기식 변위계(LVDT-100A)를 사용하였고, 시험체 중앙 하단과 U.T.M 가력점의 2개소에 설치하였다. CFRP-rod의 보강길이는 1.57m (0.65L)의 길이로 보강하였으며, CFRP-rod의 위치별 변형률을 파악하기 위하여 그림2와 같이 CFRP-rod에 5개의 Strain gauge를 설치하였다.



〈그림 2〉 CFRP-rod의 Strain gauge 위치도

철근의 압축 및 인장 변형률을 파악하기 위하여 시험체의 중앙 상, 하부 2개소 및 위치별 인장변형률을 CFRP-Rod의 변형률과 비교하기 위하여 2개소에 Strain gauge (FLA-5-1L)를 설치하였다. 또한 콘크리트의 압축 및 인장변형률과 중립축 위치를 알아보기 위해 시험체의 표면에 3개의 1방향 게이지 (PL-60)를 부착하였다.

시험체 설치상황 및 가력점은 U.T.M을 사용하여 단순지지 조건하에 대칭 2점 가력 하였다.



〈그림 3〉 시험체형상 및 가력상황

2.2 사용재료의 물리적 성질

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 21MPa로 굵은 골재 최대치수 25mm, slump 150mm인 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트의 압축강도 시험결과와 철근 및 보강재, 접착제의 물성치는 <표 2>와 <표 3>과 같다.

〈표 2〉 각 재료의 특징

| 종류 | 콘크리트 | CFRP | 철근(HD16) |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 탄성계수(MPa) | 2.13×10^4 | 1.50×10^5 | 1.96×10^5 |
| 압축강도(MPa) | 21 | - | - |
| 인장강도(MPa) | - | 1637.71 | - |
| 항복강도(MPa) | - | - | 392.27 |

〈표 3〉 접착용 전용에폭시의 재료적 특성

| 측정항목 | 결과치 | 시험방법 |
|------------------------------|--------|----------|
| 부착강도(MPa) | 3.54 | KSF 4715 |
| 압축강도(MPa) | 109.84 | KSM 3015 |
| 굴곡강도(MPa) | 62.47 | KSM 3015 |
| 샤르피 충격강도 ($N \cdot m/m^2$) | 4413 | KSM 3015 |

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴거동

CB 시험체에서는 CFRP-Rod보강한 보의 효과를 비교하기 위한 무보강 기준시험체로서, 인장철근을 균형철근비($\rho_{max} = 0.0228$)의 35%로 배근하여 인장파괴를 유도하였다. 실험결과, 최초 균열은 재하점 근처 중앙부 밑면에서 발생하였으며, 균열이 단부방향으로 파급되는 전형적인 휨균열 양상을 보였다.

SR2-0 시험체는 선하중이 없이 보강된 시험체로서, 최초 균열은 13.24kN 정도에 재하점 부근에서 발생하였으며, 이후 보 표면 전체에 잔균열들이 발생하였다.

하중을 기준시험체 공칭모멘트의 55%인 39.22kN로 미리 가한 후 CFRP-Rod보강을 한 SR2-55 시험체는 최초 균열은 22.26kN에서 재하점 근처에서 발생하였고, 보강 전에 생긴 균열들은 모두 인장철근의 유효깊이 이하에서 발생하였다. 보강 이후의 균열 양상은 재하점 부근의 일부 균열들이 하중이 증가할수록 폭이 벌어지며 진전되는 양상을 보였다. 보강과 양생 기간동안 지속적인 하중의 재하로 생긴 잔류변형은 0.23mm로 나타났다. 이 시험체는 중앙부 인장철근의 strain gauge 손상으로 중앙부에서의 인장철근의 데이터를 얻을 수 없었다.

선하중이 기준시험체의 공칭모멘트의 75%인 53.15kN로 가해진 상태로 보강된 SR2-75 시험체는 최초 균열은 16.77kN에서 재하점 근처에서 발생하였고, 보강 전에 압축연단에서 150mm 거리까지 전형적인 휨 파괴 균열 진행을 보이며 진전되었다. 보강 이후의 균열 양상은 새로운 균열의 발생은 거의 없이 보강 전 생긴 균열 중 재하점 부근의 일부 균열들이 진전되는 양상을 보였다. 보강과 양생기간 중에 생긴 잔류변형은 0.42mm로 나타났다.

선하중을 기준시험체의 공칭모멘트의 95%인 67.67kN까지 가한 시험체 SR2-95는 최초 균열은 19.32kN에서 재하점 근처에서 발생하였다. 보강 전의 균열은 전형적인 휨 파괴 균열 진행을 보이며 압축연단에서 130mm 거리까지 진전되었다. 보강 이후 새로운 균열의 발생은 거의 없었고, 보강 전 생긴 균열 중 재하점 부근의 일부 균열들의 폭이 크게

벌어지는 균열 양상을 보였다. 보강과 양생기간 중에 생긴 잔류변형은 0.81mm로 나타났으며 파괴는 CFRP-Rod의 부착력 손실에 의해 일어났다.

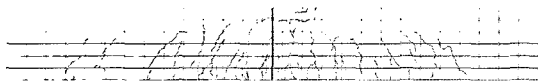
위 설명의 각 시험체 파괴양상을 표 4에 정리하여 나타내었으며, <그림 4>와 <그림 5>는 선하중 재하 및 보강 후 재하 실험한 시험체 균열 양상을 보여준다.

<표 4> 시험체 파괴양상

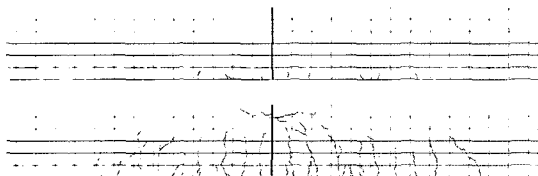
| No | 시험체명 | 선하중 (CB 공칭모멘트비) | 파괴양상 |
|----|--------|--------------------|-----------------|
| 1 | CB | - | 휨 인장파괴 |
| 2 | SR2-0 | 0 kN (0%) | 콘크리트 압괴에 의한 파괴 |
| 3 | SR2-55 | 39.22 kN (55%) | |
| 4 | SR2-75 | 53.15 kN (75%) | |
| 5 | SR2-95 | 67.67 kN (95%) | 보강재 부착상실에 의한 파괴 |



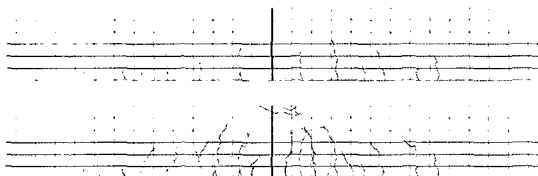
(a) CB 시험체



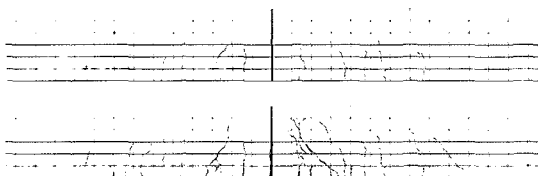
(b) SR2-0 시험체



(c) SR2-55 시험체 보강 전·후



(d) SR2-75 시험체 보강 전·후



(e) SR2-95 시험체 보강 전·후

<그림 4> 각 시험체의 균열양상

3.2 최대하중의 결정

<표 5>는 시험체의 실험결과를 나타낸 것으로 최대하중은 FRP 보강재의 선형탄성거동 및 파괴양상을 고려하여 파괴 이전의 반곡점을 최대하중점으로 선정하였으며, 최대하중의 이론값은 평형방정식과 변형률 적합성에 따른 비례식에 근거한 Canadian 규준에 의해 다음 식을 사용하여 계산하였다.

$$M_n = C_c(d - \frac{a}{2}) + C_s(d - d') + T_{frp}(h - d) \quad (1-a)$$

$$C_c = 0.85f_{ck}b\beta_1c \quad (1-b)$$

$$C_s = \epsilon'_s E_s A'_s \quad (1-c)$$

$$T_s = f_y A_s \quad (1-d)$$

$$T_{frp} = \epsilon_{frp} E_{frp} A_{frp} \quad (1-e)$$

여기서, A'_s : 압축철근 단면적

ϵ'_s : 압축철근 변형률

f'_s : 압축철근 응력

C_c : 압축철근에 작용하는 압축력의 크기

d' : 압축연단에서 압축철근까지의 거리

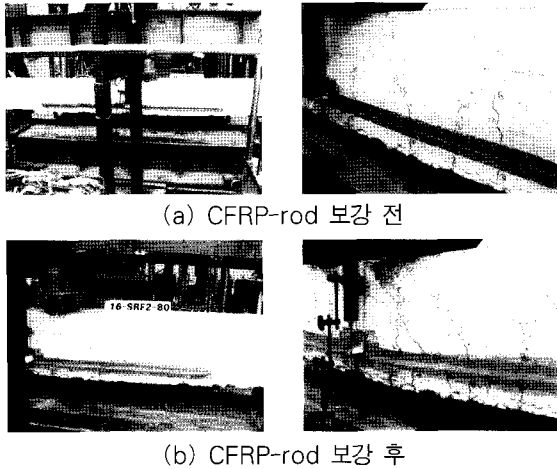
3.3 선하중의 따른 보강성능

선하중을 재하하지 않은 상태로 CFRP-Rod 보강이 이루어진 SR2-0 시험체는 CFRP-Rod와 인장철근이 함께 내력을 부담하므로 <그림 6(a)>에서 보는 것처럼 CB 시험체에 비하여 높은 강성을 보이고, 인장철근의 항복값도 CB 시험체에 비하여 높게 나타나고 있다. 시험체는 콘크리트 압괴에 의한 파

<표 5> 실험결과 및 비교분석 일람표

| 시험체명 | 최대하중 | | | 선하중에 따른 최대하중 감소비(%) |
|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| | 이론(kN) | 실험(kN) | 처짐(mm) | |
| CB | 70.82 | 98.36 | 29.49 | - |
| SR2-0 | 107.15 | 125.53 | 29.68 | - |
| SR2-55 | | 124.84 | 25.72 | 0.55 |
| SR2-75 | | 106.50 | 29.98 | 15.16 |
| SR2-95 | | 108.85 | 25.39 | 13.28 |

※ CB 시험체는 타 FRP로 보강된 타 시험체와의 비교를 위해 공칭강도 M_n 을 최대이론하중으로 사용했다.



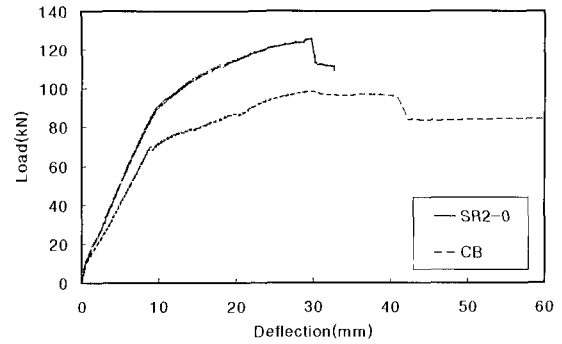
(그림 5) SR2 시험체의 균열 전·후 양상

피로 실험이 종결되었으며, 이는 인장철근 항복 후 CFRP-Rod가 충분한 휨 내력을 발휘하였음을 알 수 있다.

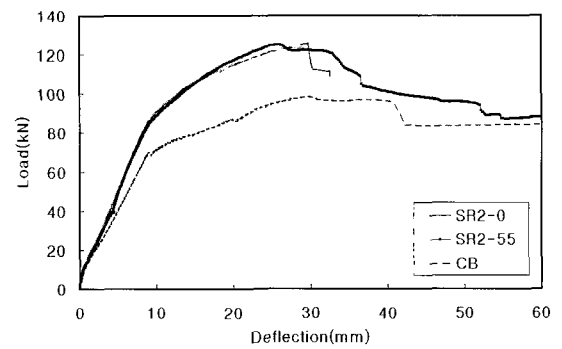
39.22kN(기준시험체 공칭모멘트의 55%)의 선하중이 재하된 SR2-55 시험체의 거동은 <그림 6(b)>에서 알 수 있듯이 보강전에는 인장철근으로 인장내력을 부담하는 CB 시험체에 근접하게 나타났으며, 보강된 시점 이후부터 최대하중에 이르기까지는 인장철근과 CFRP-Rod가 함께 인장내력을 부담하는 SR2-0 시험체와 거의 유사한 거동을 나타내었다. 보강전에는 CB 시험체와, 보강 이후에는 SR2-0 시험체와 비슷한 기울기를 가짐을 보여주고 있다. 보강 전에 생긴 균열들의 진전은 인장철근과 CFRP-Rod의 유효깊이에도 미치지 못하여 거동에 영향을 끼치지 않는 것으로 사료된다.

53.15kN(기준시험체 공칭모멘트의 75%)의 선하중이 재하된 SR2-75 시험체의 거동은 <그림 6(c)>에서 보는 것처럼 보강이전 구간에서는 인장철근으로 인장내력을 부담하는 CB 시험체와 거의 일치하였고, 보강이 이루어지는 약 53.15kN 이후부터 인장철근이 항복하기까지의 구간은 인장철근과 CFRP-Rod가 함께 내력을 부담하는 SR2-0 시험체와 유사한 거동을 보인다. 인장철근이 항복한 하중 70.90kN 이후에는 CFRP-Rod만이 내력을 부담하면서 균열의 진전으로 인해 조금씩 강성의 저하됨을 나타내고 있다.

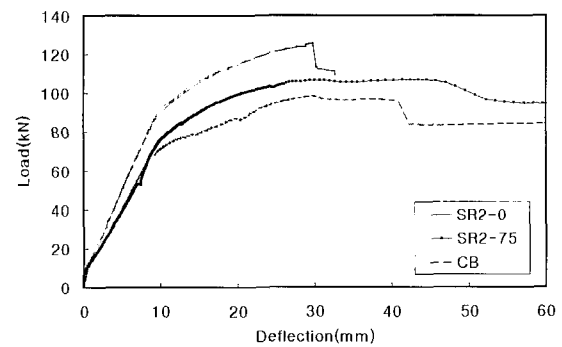
<그림 6(d)>에서와 같이 67.67kN(기준시험체 공칭모멘트의 95%)의 선하중이 재하된 SR2-95 시험체



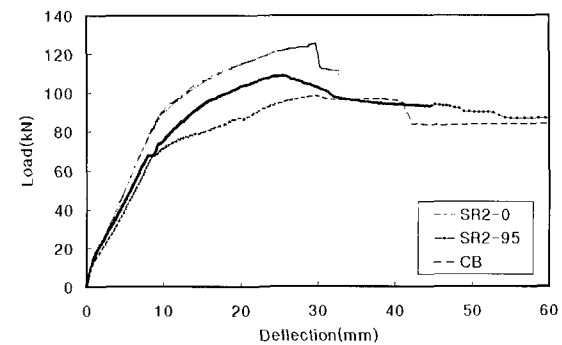
(a) SR2-0



(b) SR2-55



(c) SR2-75



(d) SR2-95

<그림 6> 각 시험체의 하중-처짐 곡선 비교

의 경우는 CFRP-Rod 보강전에는 다른 시험체와 같이 인장철근이 인장내력을 부담하는 CB 시험체와 유사한 강성과 거동을 보였고, 보강 직후 하중 71.88kN에서 바로 인장철근이 항복한 것으로 나타났다. 보강시점에서 철근이 항복하기까지의 4.21kN의 내력만 인장철근과 CFRP-Rod가 함께 부담하고, 그 이후부터는 CFRP-Rod만이 내력을 부담하게 되는 것을 알 수 있다.

SR2-95 시험체는 보강 전에 기준시험체 공칭모멘트의 95%의 선하중이 가해졌기에 이미 균열이 상당히 진전되어 보의 강성이 저하된 상태로 보강이 이루어지게 된다. 이렇게 저하된 강성으로 인하여, 계속되는 내력증가로 커지는 처짐량과 CFRP-Rod 변형량의 차이로 모체와 보강재 사이에서 응력이 집중되고, 이러한 응력집중은 모체와 보강재 사이의 접촉면에서 부착력 상실을 일으켜 CFRP-Rod의 능력을 효과적으로 발휘하지 못한 채 SR2-55 시험체에 비해 낮은 하중상태에서 파괴에 도달한 것으로 사료된다.

3.4 중앙부 CFRP-Rod의 변형률

<그림 7>은 CFRP-Rod의 중앙부에 부착한 strain gauge의 하중-변형률 곡선으로 그 값들은 <표 6>에 정리되어 있다.

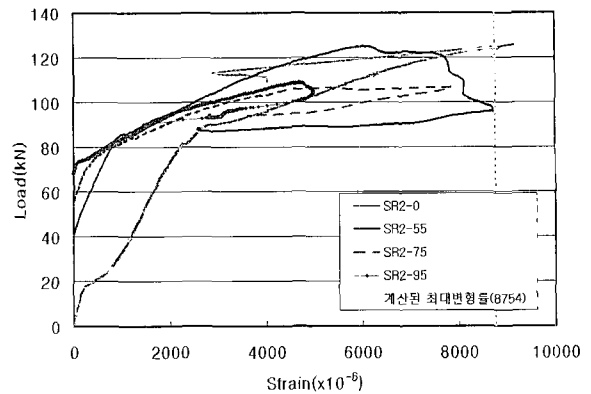
선하중이 클수록 인장철근 항복하중시점부터 최대하중에 이르기까지 strain의 차이가 작은 것으로 나타나 보강 효율이 떨어짐을 알 수 있다.

보강으로 인한 내력의 증가 효과가 큰 SR2-0, SR2-55 시험체의 경우, 최대변형률이 9159.43×10^{-6} , 8720.7×10^{-6} 로 CFRP-Rod의 최대변형률이 계산상의

<표 6> 중앙부 CFRP-Rod의 변형률

| 구분 | 인장철근 항복 ($\times 10^6$) | 최대하중시 ($\times 10^6$) | 최대하중시 인장철근항복 ($\times 10^6$) | 최대값 ($\times 10^6$) |
|--------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| SR2-0 | 2730.19 | 9159.43 | 6429.24 | 9159.43 |
| SR2-55 | 1063.21 | 6034.90 | 4971.69 | 8720.75 |
| SR2-75 | 292.45 | 5176.41 | 4883.96 | 7824.53 |
| SR2-95 | 50.94 | 4674.53 | 4623.59 | 4970.75 |

※ SR2-55 시험체의 인장철근의 항복하중은 strain gauge의 손상으로 data를 얻을 수 없었으나, 시험체의 하중-처짐 곡선에서 강성이 저하되고, 다른 시험체들의 처짐과 유사한 지점인 85.81kN을 인장철근 항복시점으로 사용하였다.



<그림 7> 중앙부 CFRP-Rod의 하중-변형률 곡선

최대변형률인 8754×10^{-6} 를 초과하거나 거의 근접하게 나타나 CFRP-Rod가 충분한 보강성능을 발휘한 것으로 나타난다. 반면에 SR2-95 시험체의 경우, 최대변형률은 타시험체에 훨씬 못 미치는 4970.75×10^{-6} 으로 모체와 보강재 사이에서 부착력의 상실로 인해 CFRP-Rod의 보강성능을 제대로 발휘하지 못하였다는 것을 알 수 있다.

3.5 선하중의 정도에 따른 보강 효과 고찰

보강이후 확실한 내력의 증가가 있음을 전 시험체에서 발견할 수 있었고, 선하중이 사용하중 이하인 범위에서 재하된 SR2-55 시험체와 그 이상인 SR2-75, SR2-95 시험체가 인장철근이 항복한 이후부터 확연히 구분되는 거동을 보이는 것을 알 수 있었다.

또한 재하중 보강이라는 실험의 특성상 발생된 보강 및 양생기간 동안의 잔류변형이 SR2-55, SR2-75, SR2-95 시험체 순으로 각각 0.23mm, 0.42mm, 0.81mm로 나타나 선하중의 크기가 기준 시험체 공칭강도에 근접할수록 잔류변형이 커짐을 알 수 있었다. 이는 선하중이 클수록 진전된 균열이 강성의 저하에 영향을 끼쳐 잔류변형이 일어나기 쉬울 것으로 사료된다.

선하중의 재하로 균열이 보 내부에까지 걸쳐서 전반적으로 발생하게 되면 양측 측면 보강으로는 보내부의 균열까지 효과적으로 제어하기는 힘들 것으로 판단되며, 측면보강과 하부면보강의 보강효과가 유사하다는 기존의 연구는 선하중이 없는 조건에서 이

리한 균열들이 없었기 때문일 것으로 사료된다.

이러한 선하중의 크기에 따른 균열로 인한 보강성의 저하와 거동의 특성을 고려하여 보강효과를 극대화시키기 위해서 사용상태와 손상정도의 파악과 적절한 보강 시기의 선택이 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 보강시점에서의 선하중의 정도에 따른 CFRP-Rod로 매립 보강한 철근콘크리트보의 휨 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 기준시험체 공칭모멘트 55%의 선하중이 재하된 SR2-55 시험체의 거동은 보강전에는 CB 시험체와, 보강된 시점 이후부터는 최대하중에 이르기까지는 SR2-0 시험체와 거의 유사한 거동을 나타냈다.
- (2) 기준시험체 공칭모멘트 75%의 선하중이 재하된 SR2-75 시험체의 거동은 보강이전 구간에서는 CB 시험체와 거의 일치하였고, 보강이후 인장철근이 항복하기까지의 구간에서는 SR2-0 시험체와 유사한 거동을 보인다.
- (3) 기준시험체 공칭모멘트 95%의 선하중이 재하된 SR2-95 시험체의 경우는 CFRP-Rod 보강 전에는 다른 시험체와 같이 CB 시험체와 유사한 강성과 거동을 보였고, 보강 직후에는 인장철근이 하중 71.88kN에서 바로 항복하여 더 큰 내력을 부담하지 못하고 CFRP-Rod에 내력이 집중되면서, 모체와 보강재 접촉면에서 부착력 상실을 일으켜 CFRP-Rod의 능력을 효과적으로 발휘하지 못한 채 파괴에 도달한 것으로 사료된다.
- (4) 선하중이 클수록 인장철근 항복하중시점부터 최대하중까지 strain의 차이가 작은 것으로 나타나 보강효율이 떨어짐을 알 수 있었다. SR2-95 시험체에서는 최대변형률이 계산상의 최대변형률에 크게 못 미치게 나타나 보강성능을 제대로 발휘하지 못하였다는 것을 알 수 있다.
- (5) 향후 연구에서는 효과적인 보강효과를 위하여 보수를 동반한 하부 인장면에서의 보강에 대한 연구와 하부면에서 보강에 필요한 소요 깊이를 확보할 수 없는 경우를 대비한 보단면의 증설을 통한 보강에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 2003.5.
2. 김상식, 철근콘크리트구조설계, 3판, 문운당, 2004.
3. Park, R. and Paulay, T., Reinforced Concrete Structure, John Wiley & Sons. 1975.
4. Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., FRP Strengthened RC Structure, John Wiley & Sons, LTD. 2001.
5. Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-bonded Fibre Reinforced Polymers, ISIS CANADA, 2001.
6. 김정숙, 탄소판으로 보강된 RC보에 있어서 보강판 조기 탈락거동에 관한연구, 영남대학교 대학원 석사학위 논문, 2001.
7. 최준영, 매입형탄소막대(CFRP)로 보강한 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 실험적 연구, 영남대학교 대학원 석사학위 논문, 2003.
8. 김성원, 탄소막대(CFRP-rod)로 매립 보강된 RC보의 휨 보강효과에 관한 실험적 연구, 영남대학교 대학원 석사학위 논문, 2004.
9. 강성후, 박선준, 김민성 “FREPRO로 휨 보강된 철근콘크리트보의 성능 개선 평가를 위한 실험적 연구” 대한토목학회논문집, 제23권, 제3A호, pp.397-405, 2003.
10. 박중열, 황선일, 조홍동, 한상훈 “CFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 거동 특성” 한국구조물진단학회, 제7권, 제3호, pp.125-131, 2003.
11. Deric J. Oehlers, Sung-Moo Park, M. S. Mohamed Ali (2003) “A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs.”, Composites, part A 34: applied science and manufacturing, pp. 887-897