

탄소섬유шит 보강 보의 실험 및 해석적 연구

An Experimental and analytical study of CFS strengthened Beams

황진석*

Hwang, Jin-Seog

Abstract

This paper deals with the flexural behaviors of R.C beams strengthened by carbon fiber sheets. The behaviors of strengthened beams which were preloaded up to 50%, 60% and 70% of the ultimate load of unstrengthened beam are compared with that of a beam which was not preloaded. The structural behaviors of strengthened beams are compared with analytical method in terms of load-strain of concrete, load-strain of steel bar, load-strain of CFS and failure load.

Four cases of analytical method are investigated according to cracked section or partially cracked section and including strain hardening effect of steel bar or not.

Comparing the results of test and analysis, both are similar in terms of load-strain of concrete, and failure load, the results of analytical method underestimate the failure load. But each results of load-strain of steel bar, load-strain of CFS near at failure is some different, thus near at failure the composite action between CFS and upper concrete is assumed to be disturbed.

Consequently, the analytical method was proved to be efficient and accurate in estimating the flexural response of CFS strengthened RC beams.

Key words : Preloading, Composite Action, Cracked Section, Partially cracked Section, Iterative analysis

* 정회원, 진주산업대학교 전임강사, 공학박사

● 본 논문에 대한 토의를 1999년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 1999년 4월호 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

휨내력이 부족하거나 손상된 철근콘크리트 구조물은 여러 가지 방법으로 보강될 수 있으며, 그 중의 하나는 부재의 인장축을 에폭시를 사용하여 강판으로 접착시켜 보강하는 방법이다. 이의 구조적인 보강효과에 관련하여 지난 20년동안 국내외에서 수많은 연구가 진행되어 왔으며^{(2),(8),(9),(11)}, 규명이 이루어져 왔다. 그러나 강판의 사용은 시공성 저하 및 부식의 가능성이 있어 이를 대체하기 위한 보강재료로서 FRP, 유리섬유, 탄소섬유, 아라미드섬유등이 개발되어 이의 구조적 거동에 대한 연구^{(1),(4),(5),(6),(7),(10)}와 사용이 증가되고 있다. 이러한 재료들은 강판에 비하여 내부식성이 높고, 유지비용이 낮으며, 시공성이 우수한 점이 있다.

본 연구에서는 인장축이 탄소섬유슈트(CFS)로 보강된 철근콘크리트보의 휨거동 및 성능에 대하여 실시한 실험결과와 반복해석법으로 구한 해석결과를 비교하였다.

보강보의 실험에서는 실험체를 보강전 사전가력이 없는 실험체와 Control실험체 내력의 50%, 60%, 70%를 사전가력한 후 보강한 실험체로 나누어 사전가력 여부에 따른 휨거동, 보강 후 내력 증진 및 극한내력의 추정등을 살펴보았으며, 반복해석법에서는 균열단면, 부분균열단면 및 철근의 재료모델링에 따라 네가지 경우에 대하여 비교하였다.

2. 실험의 개요 및 결과

2.1 실험체의 종류 및 형상⁽³⁾

실험체의 종류는 Table 1과 같으며 실험체의 단면과 가력도는 Fig. 1과 같다. 실험체는 Control 실험체 1개와 사전가력의 정도에 따른 휨거동을 분석하기 위한 4개 총 5개의 실험체로 구성하였다. 실험체의 크기는 250×400×3400(B×H×L)mm이며 인장철근은 3-D19, 압축철근은 2-D10을 사용하였다. 그리고 단부에는 D10을 100 mm

Table 1. 실험체의 종류

| 실험체 명칭 | CFS보강치수 (mm) | | 사전가력 (%) |
|---------|--------------|-----|----------|
| | 길이 | 폭 | |
| B0P | 2800 | 230 | 0 |
| B50P | 2800 | 230 | 50 |
| B60P | 2800 | 230 | 60 |
| B70P | 2800 | 230 | 70 |
| Control | - | - | - |

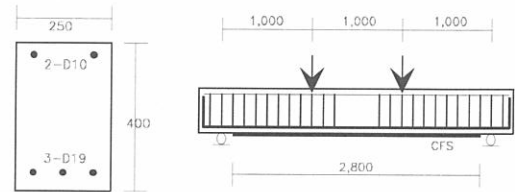


Fig. 1. 실험체 단면과 가력도

간격으로 배근하였으며 슈트의 보강매수는 전 실험체에 대하여 1매로 하였다.

2.2 가력계획 및 측정항목

보의 스패ンは 3 m 이고 2점가력이 되도록 하였으며, 가력시 부재가 탄성인 구간에서는 응력제어로서 가력속도는 5 kg/sec를 유지하였으며, 스패중앙의 하단 인장철근의 변형도가 1500 microstrain 이상에서는 스패중앙점의 처짐량을 기준으로 변위제어로서 가력속도는 0.004 mm/sec로서 부재의 파괴시까지 가력하였다.

휨거동을 분석하기 위하여 부재의 처짐량과 콘크리트, 인장철근 및 슈트의 변형도를 측정하였다. 처짐의 측정에는 스트레인게이지식 (strain gauge type) 변위계를 사용하였으며, 부재의 양지점과 스패중앙을 포함한 3개소의 부재 중심에서 측정하였다. 부재 스패 중앙부에서의 CFS 및 철근의 변형도는 스트레인게이지(strain gauge: 3mm, 2mm)를 이용하여 측정하였으며, 스패 중앙부의 콘크리트의 최대압축변형도는 상부면에 설치한 스트레인게이지(strain gauge: 60 mm)를 사용하여 측정하였다.

2.3 사용재료의 물성

본 실험에 사용된 콘크리트, 철근, CFS 및 에폭시의 물성은 재료시험을 통하여 구하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

콘크리트의 물성치는 표준 양생한 $\varnothing 100 \times 200$ 공시체에 대하여 재령 28일에 실시한 결과로서 인장강도는 쪼갬시험법(splitting test)에 의한 것이다. 에폭시는 80℃로 6시간 고온양생하고 상온에서 7일 양생한 인장시험편과 휨시험편에 대하여 시험한 결과이며, CFS는 그 복합체의 인장시험편 시험을 통하여 구한 값이다.

Table 2. 사용재료의 물성

| 재료 | 압축강도 (kg/cm ²) | 항복강도 (kg/cm ²) | 인장강도 (kg/cm ²) | 휨강도 (kg/cm ²) | 연신율 (%) | 탄성계수 (kg/cm ²) |
|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------|-------------------------------|
| 콘크리트 | 237.5 | - | 25.5 | - | - | 2.31×10^9 |
| 철근 | - | 4,526 | 6,074 | - | 18.6 | 2.52×10^9 |
| CFS | - | - | 45,650 | - | - | 2.49×10^9 |
| 에폭시 | - | - | 507.2 | 691.5 | 3.76 | 3.34×10^4 |

2.4 실험의 결과

실험체의 하중과 중앙점 처짐을 Fig. 2에, 항복하중과 파괴하중을 Table 3에 나타내었다. 보강량이 1매이기 때문에 실험체의 강성 증가가 크지 않아 Control 실험체와 비교하여 처짐의 감소효과는 크게 나타나지 않았다. 그러나 항복하중은 Control 실험체에 비하여 6%~11% 증가하였으며, 철근의 항복이후에도 CFS는 탄성거동을 하여 부재의 2차강성이 발생되어 내력의 증가는 19%~21%인 것으로 나타났다. 사전가력의 실시 여부에 따라 잔류변형의 영향이 발생하였으나 이러한 잔류변형의 효과를 고려하면 사전가력의 여부에 관계없이 거의 동일한 휨거동을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 또한 파괴시의 콘크리트의 압축변형도는 모든 실험체에서 0.003 (3000microstrain)을 초과하였다.

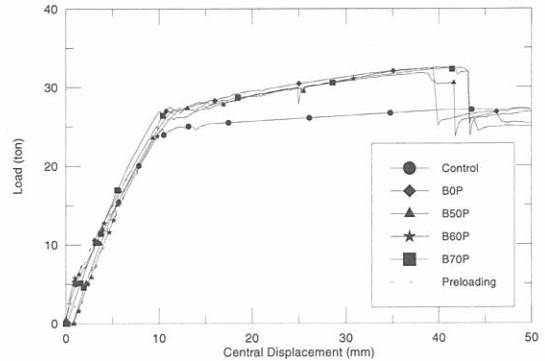


Fig. 2. 하중-처짐 곡선

Table 3. 보강효과 및 파괴모드

| 실험체 | 항복하중 (t) | 항복하중 증가율 | 파괴하중 (t) | 파괴하중 증가율 | 파괴모드 |
|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| B0P | 27.4 | 1.11 | 32.5 | 1.21 | CFS부착 파괴 |
| B50P | 26.8 | 1.08 | 31.8 | 1.19 | 휨인장 파괴 |
| B60P | 26.2 | 1.06 | 32.3 | 1.21 | CFS파단 |
| B70P | 27.0 | 1.09 | 32.5 | 1.21 | CFS부착 파괴 |
| Control | 24.7 | 1.00 | 26.8 | 1.00 | 휨인장 파괴 |

3. 재료모델링과 해석방법

CFS로 보강된 보의 응답을 예측하기 위하여 반복해석법을 사용하였다. 일반적인 철근콘크리트 보 이론에 사용하는 기본적인 가정으로서 평면이었던 단면은 하중을 받은 후에도 평면을 유지하며, 부재 축을 따라서의 변형도는 직선이며, 철근과 콘크리트 간의 미끄러짐은 발생하지 않는 것으로 하였다. 또한 CFS로 보강된 보에 대해서는 CFS와 상부 콘크리트 간에는 미끄러짐이 발생하지 않고 일체성을 유지하는 것으로 가정하였다.

3.1 재료의 응력-변형 관계

이 실험에서 사용된 콘크리트에 대한 응력-변형

도 곡선은 Hognestad가 제안한 Fig. 3의 곡선⁽¹²⁾을 사용하였다. 콘크리트의 최대 변형도는 우리나라 규준에서 정의된 0.003을 사용하는 것으로 하였다.

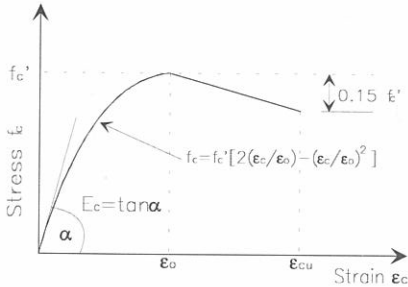


Fig. 3. 콘크리트의 응력-변형도 곡선

철근은 항복강도에 이르기까지는 거의 직선상태를 보이며 항복강도에 도달한 이후에는 변형경화구간을 나타난 후 파괴된다. 본 연구에서는 항복강도 이후의 탄성계수가 0인 완전한 소성인 경우와 변형경화를 고려한 경우⁽¹²⁾로 나누어 살펴보았으며 Fig. 4에 나타내었다.

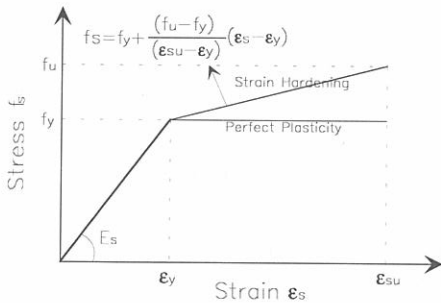


Fig. 4. 철근의 응력-변형도 곡선

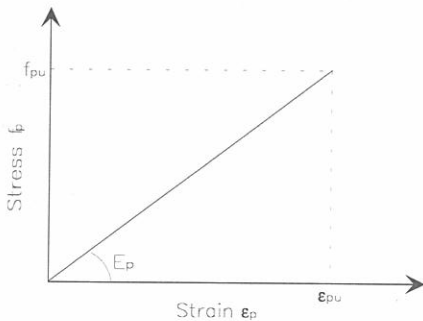


Fig. 5. 보강재 CFS의 인장에 대한 거동

인장력을 받는 CFS복합체는 파괴시까지 거의 직선으로 거동하며 시편시험을 기초로 Fig. 5와 같이 거동하는 것으로 모델링하였다.

3.2 반복해석법

철근콘크리트 보에 대한 단면 해석을 위해 변형도는 직선을 유지한다고 가정하였고, 인장측의 콘크리트가 부담하는 인장력에 따라 우리나라 규준에서 택하는 단면인 Fig. 6의 균열단면과 BS 규준⁽¹³⁾에서 규정한 Fig. 7의 부분균열단면을 사용하였다. 부분균열단면에서는 중립축 하부의 콘크리트가 어느 정도의 인장력을 부담하며, 그것은 Fig. 7에서 f_{ct} 가 $1.0 N/mm^2$ 으로 고정된다.

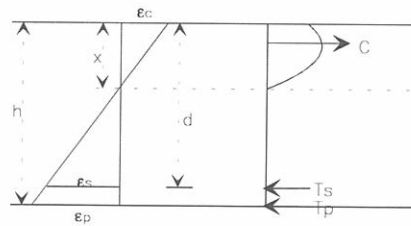


Fig. 6. 균열단면의 변형도 및 힘의 분포

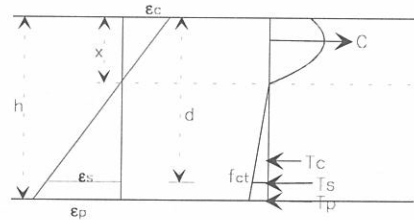


Fig. 7. 부분균열단면의 변형도 및 힘의 분포

보강보의 단면해석 과정은 먼저 콘크리트의 변형도를 가정하고 이와 함께 중립축거리를 가정하였다. 그러면 Fig. 6과 Fig. 7의 변형도 곡선으로부터 철근과 CFS의 변형도를 얻을 수 있으며 각 재료의 응력-변형 곡선으로부터 콘크리트, 철근, CFS의 응력과 각 합력을 구할 수 있다. 각 인장력의 합력과 압축력의 합력을 비교하여 평형이 만족되지 않으면 중립축거리를 다시 가정하여

위의 과정을 반복한다. 그 단면에서의 힘의 평형 조건이 이루어지면 정역학적으로 그 단면의 내부 모멘트와 외부의 하중을 구할 수 있다. 압축측 콘크리트의 변형도를 위의 과정을 반복하면 우리나라 규준에 따라 콘크리트의 변형도가 0.003에 이르기 까지 즉 부재의 파괴시까지의 이론적인 휨거동을 구할 수 있다. 이와 같은 과정을 Fig. 8에, 각 해석방법에 따른 경우를 Table 4에 나타내었다.

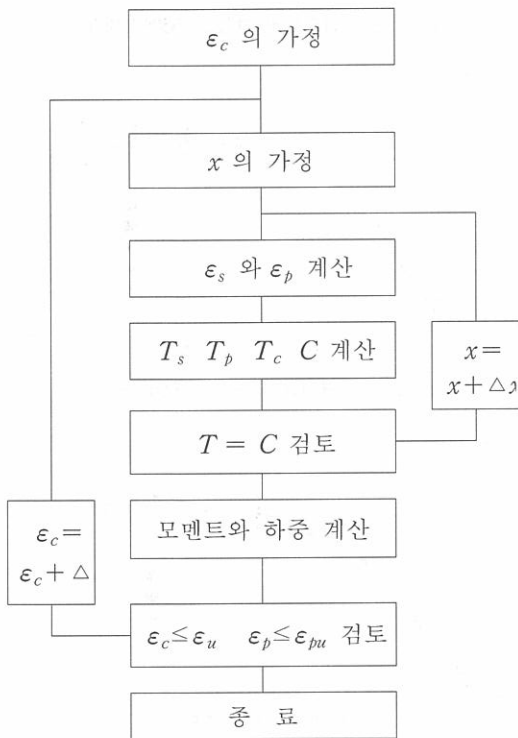


Fig. 8. Flow Chart

Table 4. 해석방법의 구분

| 구분 | 인장측 콘크리트 | 항복 후 철근 |
|-------|-----------------|---------------|
| CASE1 | 균열단면 (Fig. 6) | 완전소성 (Fig. 4) |
| CASE2 | 균열단면 (Fig. 6) | 변형경화 (Fig. 4) |
| CASE3 | 부분균열단면 (Fig. 7) | 완전소성 (Fig. 4) |
| CASE4 | 부분균열단면 (Fig. 7) | 변형경화 (Fig. 4) |

4. 해석결과 및 비교 · 검토

4.1 해석과 실험의 결과

보강을 실시하지 않은 Control실험체의 하중과 철근의 변형도, 하중과 콘크리트의 압축 변형도와 의 관계에 대한 해석결과와 실험결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 보강을 실시하고 사전가력을 하지 않은 BOP실험체와 Control실험체의 파괴강도의 50%, 60%, 70%로 사전가력을 실시하고 보강을 실시한 후 본가력을 실시한 B50P, B60P, B70P

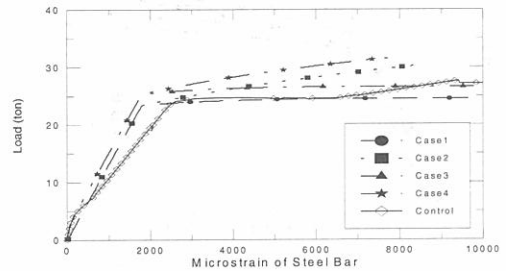


Fig. 9. 철근의 변형도 (Control실험체)

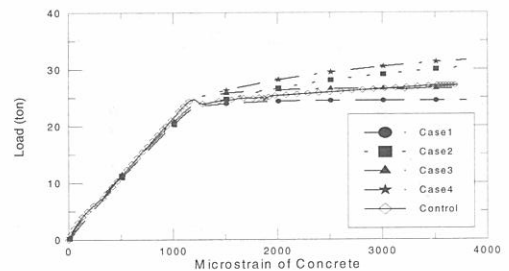


Fig. 10. 콘크리트의 압축변형도(Control실험체)

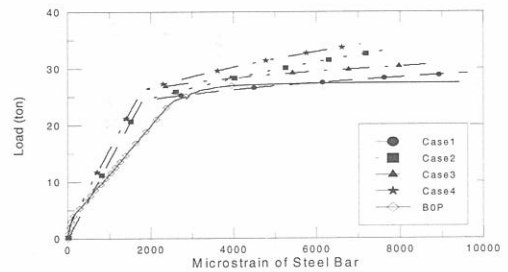


Fig. 11-1. 철근의 변형도 (BOP실험체)

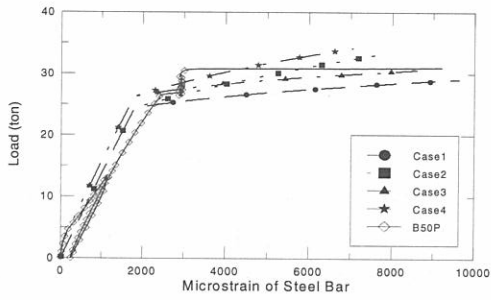


Fig. 11-2. 철근의 변형도 (B50P실험체)

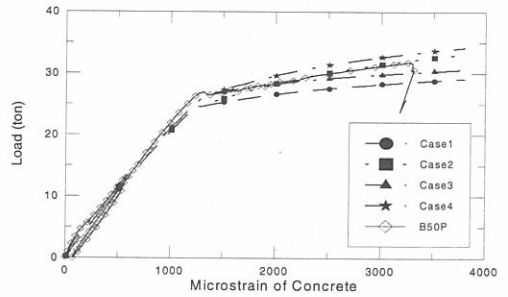


Fig. 12-2. 콘크리트의 변형도 (B50P실험체)

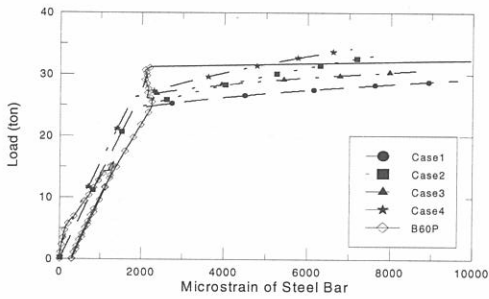


Fig. 11-3. 철근의 변형도 (B60P실험체)

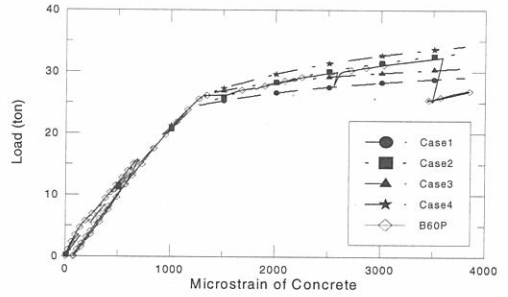


Fig. 12-3. 콘크리트의 변형도 (B60P실험체)

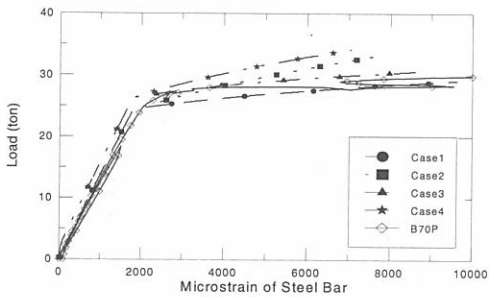


Fig. 11-4. 철근의 변형도 (B70P실험체)

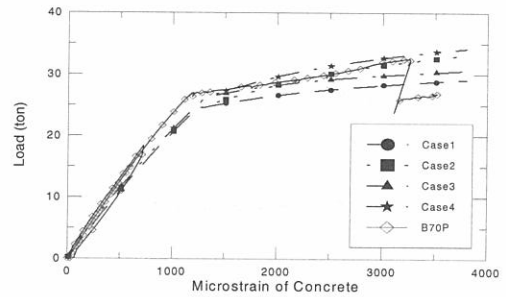


Fig. 12-4. 콘크리트의 변형도 (B70P실험체)

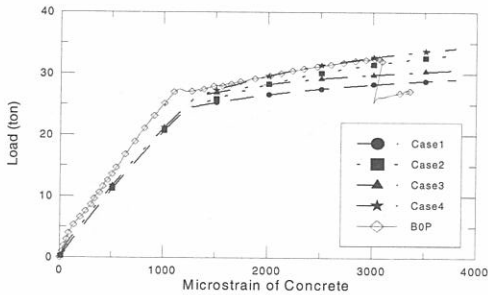


Fig. 12-1. 콘크리트의 변형도 (B0P실험체)

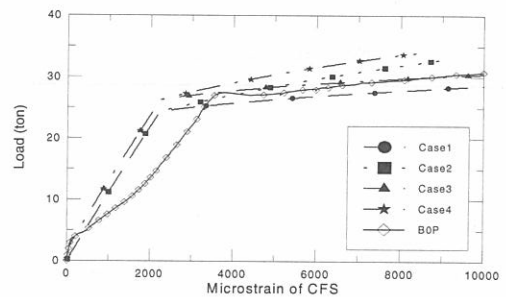


Fig. 13-1. CFS의 변형도(B0P실험체)

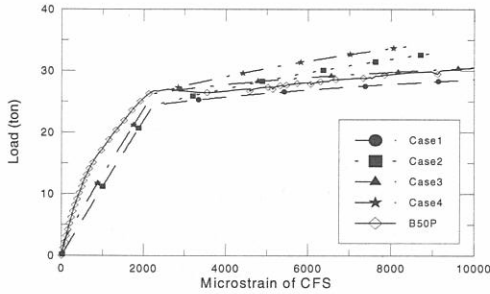


Fig. 13-2. CFS의 변형도(B50P실험체)

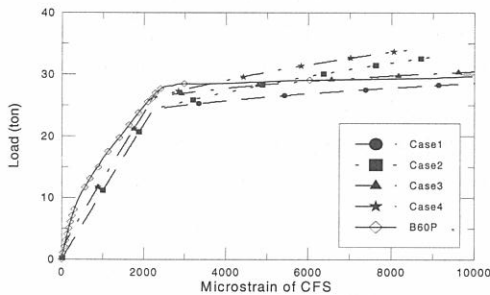


Fig. 13-3. CFS의 변형도(B60P실험체)

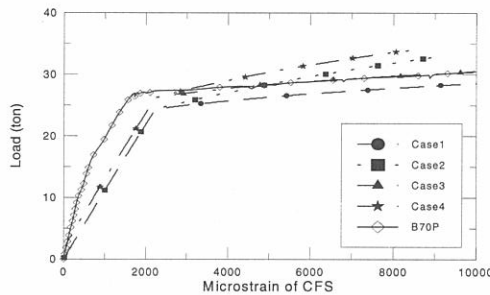


Fig. 13-4. CFS의 변형도(B70P실험체)

실험체에 대한 해석결과와 실험결과를 Fig. 11~Fig. 13에 나타내었으며, 각 실험체의 인장철근의 변형도, 콘크리트의 압축변형도, CFS의 인장변형도를 나타내었다.

4.2 결과의 비교 · 검토

하중과 인장철근의 변형도에 대한 Fig. 9, Fig. 11을 보면 사전가력을 받지 않았던 경우는 해석치에 대하여 실험치의 곡선의 기울기는 초기에는 약간 크며, 하중이 증가함에 따라 작아지는 것으로

나타났다. 사전가력을 실시한 실험체에서는 사전가력에 의한 인장철근의 잔류변형도만큼의 차이가 발생하였으나 곡선의 기울기는 해석치와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

하중과 콘크리트의 압축변형도에 대한 곡선인 Fig. 10(Control실험체), Fig.12(보강실험체)에서는 실험치가 해석치의 결과 곡선 사이에 존재하여 상당히 정확한 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

하중과 CFS의 인장변형도에 대한 곡선인 Fig. 13에서는 해석치에 비해 실험치의 곡선의 기울기가 사전가력의 여부에 따라 차이를 나타내었으나 부재의 항복 이후에는 해석치의 결과 곡선 사이에 존재하는 것으로 나타났다.

실험치와 해석치간의 오차를 살펴보기 위하여 철근의 항복시의 하중, 콘크리트의 압축변형도 및 부재의 파괴시 즉 콘크리트의 압축변형도가 0.003일 때의 하중, 철근의 변형도, CFS의 변형도를 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

Table 5의 보강을 실시하지 않은 Control실험체에서 철근의 항복시 콘크리트의 변형도와 하중에 대한 실험치와 해석치간에는 해석방법의 차이에 관계없이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

보강실험체에서는 콘크리트의 변형도와 하중값은 잘 일치하였으며, CFS의 변형도는 B60P실험체, B70P실험체에서는 두 결과가 잘 일치되었으나 B0P실험체, B50P실험체에서는 해석치에 비해

Table 5. 철근의 항복시의 결과치의 비교

| 구분 | 실험체 명칭 | 콘크리트의 변형도 ($\times 10^6$) | CFS의 변형도 ($\times 10^6$) | 하중 (ton) | |
|----|-------------|-----------------------------|----------------------------|----------|------|
| 실험 | Control | 1,197 | - | 24.7 | |
| | B0P | 1,139 | 3,682 | 27.4 | |
| | B50P | 1,372 | 4,141 | 26.8 | |
| | B60P | 1,435 | 2,214 | 26.2 | |
| | B70P | 1,256 | 1,859 | 27.0 | |
| 해석 | Control 실험체 | CASE1 | 1,190 | - | 23.3 |
| | | CASE2 | 1,190 | - | 23.3 |
| | | CASE3 | 1,290 | - | 25.4 |
| | | CASE4 | 1,290 | - | 25.4 |
| | 보강 실험체 | CASE1 | 1,230 | 2,237 | 24.3 |
| | | CASE2 | 1,230 | 2,237 | 24.4 |
| | | CASE3 | 1,320 | 2,248 | 26.3 |
| | | CASE4 | 1,320 | 2,248 | 26.3 |

Table 6. 콘크리트의 압괴시의 결과치의 비교

| 구분 | 실험체 명칭 | 인장철근의 변형도 ($\times 10^{-6}$) | CFS의 변형도 ($\times 10^{-6}$) | 하중 (ton) | |
|----|-------------|--------------------------------|-------------------------------|----------|------|
| 실험 | Control | 6,830 | - | 26.6 | |
| | BOP | 11,136 | 11,369 | 32.4 | |
| | B5OP | 11,809 | 11,330 | 31.2 | |
| | B6OP | 12,171 | 11,294 | 31.0 | |
| | B7OP | 10,779 | 12,005 | 32.0 | |
| 해석 | Control 실험체 | CASE1 | 9,154 | - | 24.5 |
| | | CASE2 | 6,991 | - | 29.1 |
| | | CASE3 | 7,859 | - | 26.6 |
| | | CASE4 | 6,325 | - | 30.5 |
| | 보강 실험체 | CASE1 | 7,585 | 9,097 | 28.2 |
| | | CASE2 | 6,276 | 7,601 | 31.5 |
| | | CASE3 | 6,741 | 8,132 | 29.8 |
| | | CASE4 | 5,743 | 6,992 | 32.7 |

실험치의 값이 상당히 큰 값으로 나타났으며 이것은 부분적으로 계측시 문제가 있었던 것으로 보여진다. 모든 실험체는 콘크리트의 압축변형도가 0.003이상에서 파괴되었으므로 우리나라 규준에서 규정한 콘크리트의 최대압축변형도 $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에서 파괴되는 것으로 가정하는 것은 안전측의 결과가 될 것이며, 해석치와 실험치의 모든 부재는 인장철근의 항복 후 CFS 가 최대변형도에 도달하기 전에 콘크리트의 압괴에 의한 휨 파괴의 결과로 나타났다. Table 6의 보강실험체의 실험에서 콘크리트의 압괴시 파괴하중은 31.0t~32.4t 으로서 해석치의 CASE2, CASE4와 가까운 값을 나타내었으며 CASE1, CASE3는 실험치보다 약간 낮은 값을 나타내었으며, 결과적으로 파괴하중에 대한 해석치는 모든 경우에 안전한 값으로 나타났다. 하지만 콘크리트의 압괴시 인장철근과 CFS의 변형도는 해석치에 비하여 실험치가 상당히 높은 값을 나타내었으며, 부분적으로 인장철근이 CFS의 변형도보다 큰 값을 보이는 경우도 있어 파괴 근방에서는 균열발생으로 인하여 콘크리트와 인장철근 및 콘크리트와 CFS 간에는 어느 정도의 변형도 불일치가 발생하는 것을 알 수 있다.

그리고 실험치와 해석치의 비교에서 사전가력의 영향은 철근항복시 및 콘크리트 압괴시 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

5. 결론

사전가력을 하지 않은 실험체와 사전가력을 보강전 내력의 50%, 60% 및 70%로 실시한 실험체에 대하여 CFS로 보강하여 휨거동을 평가한 실험결과와 반복해석법에 의한 휨거동을 비교하였다. 네가지 경우의 해석법에 따른 하중과 콘크리트의 압축변형도는 실험결과와 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 하중과 CFS의 인장변형도는 초기에는 곡선의 기울기의 차이가 발생하였으나 항복 이후는 두 결과가 상당히 근접되는 것으로 나타났다. 파괴하중에 대해서는 균열단면, 부분균열 단면으로서 철근의 변형경화를 고려한 경우가 다른 경우에 비하여 실험값에 일치하는 것으로 나타났으며, 다른 경우는 실험시의 파괴하중을 과소평가하는 것으로 나타나, 어떤 경우의 해석법도 안전한 결과를 가져왔다.

또한 콘크리트의 압괴시 인장철근 및 CFS의 변형도에 대해서는 해석치와 실험치에는 약간의 차이가 발생하였으며, 사전가력의 영향은 거의 나타나지 않았다. 따라서 해석적인 방법으로 CFS로 보강된 보의 휨거동을 충분히 검증할 수 있는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 신영수, 홍기섭, 최완철, 홍영균, “탄소섬유쉬트로 밀면 보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동,” 대한건축학회논문집, 제11권, 제8호, 1995년 8월
2. 심종성, 배인환, “강판 및 탄소섬유로 보강된 철근 콘크리트보에 대한 해석적 연구”, 한국콘크리트학회지, 제9권 6호, 1997년 12월
3. 김지영, 박형철, 김대영, 황진석, 박철림, “탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 제14권 제1호, 1998, pp.319-326
4. 오용복, 권영웅, “탄소섬유쉬트 보강된 철근콘크리트보의 보강철근비에 따른 구조적 거동,” 한국콘크리트학회지, 제10권 2호, 1998년 4월
5. 小松憲一, 井上和夫, 明星徹, “炭素纖維シート補強

-
- RC梁の曲げ強度研究,” 土木學會第49回年次學術講演會, 平成6年9月
6. 田中良典, 小林朗, “損傷下のRC梁の炭素纖維シートによる曲げ補強,” 土木學會第49回年次學術講演會, 平成6年9月
 7. 小林哲也 外, “炭素纖維シート補強RCはりの曲げ性狀に及ぼすシートの接着状態の影響,” 土木學會第50回年次學術講演會, 平成7年9月
 8. Swamy, R. N., Jones, R., and Charif, A., “The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams,” *Structural Engineer*, Vol. 67, No. 3, February, 1989, pp.45-54
 9. Ziraba, Y. N., “Guidlines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plate,” *ACI Structural Journal*, Vol. 91, NO. 6, November-December, 1994
 10. Quantrill R.J., Hollaway L.C., and Thorne A.M., “Experimental and analytical investigation of FRP strengthened beam response:Part I”, *Magazine of Concrete Research*, 1996, Vol.48, No.177, pp.331-342
 11. Ziraba, Y. N., “Guidlines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plate,” *ACI Structural Journal*, Vol. 91, NO. 6, November-December, 1994
 12. Chu-Kia Wang and C.G.Salmon, “Reinforced Concrete Design”, Harper & Row, 1985
 13. British Standards Institute, “Structural Use of Concrete, BS8110:1985”, London, 1985

(접수일자 : 98.10. 9)