

# 유리섬유 보강패널로 보강된 철근콘크리트 슬래브의 구조거동에 관한 연구

## Structural Behavior of R/C Slabs Strengthened by Glass Fiber Reinforced Plastic-Panels

김 우\*      김 행 준\*\*      이 성 문\*\*\*  
Kim, Woo    Kim, Haeng Joon    Lee, Sung Moon

### ABSTRACT

The structural behavior of reinforced concrete slabs strengthened by glass fiber reinforced plastic-panels experimentally investigated. The experimental variables are strengthening length, strengthening width, and pre-crack existence. The pre-cracked slabs are initially loaded to 70 percent of ultimate flexural capacity and subsequently repaired with GFRP-Panels bonded to the tension face of the slabs. Five one-way slabs were tested to failure. The main failure mode of strengthened slabs is separation failure by crack propagation from load point section to end of plate. The behavior of strengthened slabs is represented by maximum load, load-deflection curves and load-strain curves.

### 1. 서 론

성능저하된 철근콘크리트 구조물의 보강방법으로는 강판, 탄소섬유쉬트, 유리섬유쉬트에 에폭시접착제를 이용하여 접착시키는 접착공법과 기타 단면증설공법, 거더(Girder)증설공법, 프리스트레스 도입공법등이 적용되어 왔다. 특히, 에폭시접착 강판접착공법은 시공기간이 짧고 사용중인 구조물에도 적용이 가능하며, 인장은 물론 압축이나 전단을 받는 구조물에도 적용할 수 있다는 장점 때문에 교량이나 건축물의 보강에 널리 사용되었으나, 사용환경에 장시간 노출된 강판은 부식이 발생하며, 강판 자체의 자중이 커서 장경간을 갖는 구조물공사의 경우 강판사이의 이음부가 발생하며, 강판용접에 의한 이음부는 재질변화를 일으켜 국부적인 손상의 원인이 되기도 하였다. 탄소섬유쉬트나 유리섬유쉬트, 아라미드섬유쉬트 등 신소재 섬유쉬트에 의한 보강공법은 섬유자체의 인장강도가 높고 경량이며 피로하중에 대한 저항성이 우수한 장점이 있으나, 이를 에폭시에 함침하여 사용했을 경우에는 인장강도가 낮아

\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 목포과학대학 토목과 전임강사

\*\*\* 정희원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

지며, 콘크리트의 표면요철이나 불완전한 표면처리로 인한 기포의 발생 등이 문제점으로 지적되었다. 이와같은 문제점들을 개선하기 위하여 (주)케이콘에서는 수십 차례의 배합시험과 재료시험을 통하여 유리섬유 보강패널(Glass Fiber Reinforced Plastic-Panels : GFRP-Panels)을 제조하게 되었다. 유리섬유 보강패널은 상온에서는 경화되지 않지만, 150 °C이상에서 경화되는 성질을 가지는 잠재성 에폭시 수지류에 유리섬유를 함침시켜 제조된다. 보강패널을 구성하는 재료의 구성비율은 섬유의 심이 60~85%이며, 에폭시 수지류가 15~40%로 된다. 패널의 두께는 10mm이하의 박판이며, 보통 2~4mm의 두께로 제조된다. 패널의 폭은 100~1000mm정도로 롤(Roll)형태로 감겨져 밴딩되어 제공된다. 본 연구는 유리섬유 보강패널을 철근콘크리트 슬래브의 휨보강재로 사용했을 때의 보강효과와 구조거동을 실험적으로 알아보기 위하여 실시되었다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험 개요

철근콘크리트 슬래브를 유리섬유 보강패널로 보강할 때 실험변수로는 보강길이, 보강폭, 보강두께, 구조물의 손상정도, 에폭시접착제의 성능, 앵커볼트의 사용유무등을 고려할 필요가 있다. 본 실험에서 실험변수는 보강길이, 보강폭, 구조물의 손상정도를 나타내는 초기균열유무로 하였다. 실험은 먼저 일방향 철근 콘크리트 슬래브를 제작하여 실제 손상된 구조물로 모사하기 위하여 초기균열을 발생시켰다. 하중은 경간 중앙점에 1점 재하하였으며 기준시험체의 공칭휨강도에 해당하는 외력인 5.7 ton의 70%에 해당하는 4 ton까지 단조증가시켰다. 초기균열 발생 후, 각각의 실험변수에 따라 보강을 실시하여 경간 중앙점에 1점 재하하여 파괴시까지 가력하였다. 실험변수에 따른 시험체를 분류하면 표 1과 같다.

표 1 실험변수에 따른 보강시험체의 분류

| 실험변수   | 시험체명 | 보강재         |         | 비고       |
|--------|------|-------------|---------|----------|
|        |      | 보강길이(cm)    | 보강폭(cm) |          |
| 기본시험체  | CONT | -           | -       | -        |
| 보강길이   | PL1  | 230(=0.96L) | 50      | 70% 하중재하 |
|        | PL2  | 180(=0.75L) | 50      | 70% 하중재하 |
| 보강폭    | PL1W | 230(=0.96L) | 30      | 70% 하중재하 |
| 초기균열유무 | PLIC | 230(=0.96L) | 50      | 무균열      |

### 2.2 사용재료

시험체 제작에 사용한 콘크리트는 재령 28일의 압축강도가 210 kg/cm<sup>2</sup>로 설계된 래미콘을 사용하였으며, 압축강도를 시험한 결과 평균 264 kg/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 철근은 항복강도 SD30인 국내산 D10, D16 철근을 사용하였다. 시험 결과 철근의 항복강도는 3540 kg/cm<sup>2</sup>, 인장강도는 5108 kg/cm<sup>2</sup>로 측정되었다. 실험에 사용된 유리섬유 보강패널을 인장시험 한 결과 파단시까지 선형탄성거동을 나타내었다. 인장강도는 6044 kg/cm<sup>2</sup>, 인장탄성계수는  $0.58 \times 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>으로 측정되었다. 콘크리트와 유리섬유 보강패널의 접착에 사용한 에폭시수지는 인장강도 750 kg/cm<sup>2</sup>, 인장전단강도 160 kg/cm<sup>2</sup>로 측정되었다.

## 2.3 시험체의 설계 및 제작

### 2.3.1 기준시험체(CONT)

시험체의 설계는 건설교통부의 콘크리트구조 설계기준에서 규정하고 있는 강도설계법을 적용하였다. 철근콘크리트 슬래브는 그림 1과 같이 순경간 2.4m, 단면치수 50×15cm이고 사용철근비는 최대철근비 ( $\rho_{max} = 0.0314$ )의 56%인 0.0176으로 하였다. 이는 유리섬유 보강패널로 보강한 후에도 판넬의 면적을 포함한 전체철근비( $\rho = 0.0224$ )가 최대철근비를 초과하지 않도록 하기 위함이다. 인장철근은 5-D16이며, 압축철근은 5-D10, 배력철근으로 26-D10을 사용하여 복철근 철근콘크리트 슬래브로 제작하였다.

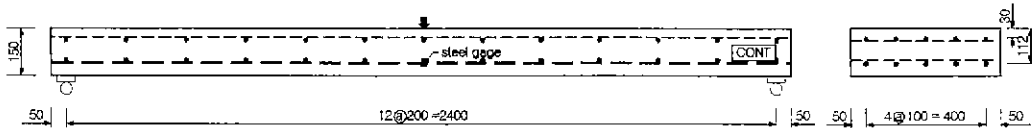


그림 1 기준시험체의 형상 및 단면제원

### 2.3.2 보강 시험체

유리섬유 보강패널로 보강한 시험체는 기준시험체와 동일한 재원에 각 실험변수에 따라 보강하여 제작하였으며, 대표적인 보강시험체인 보강길이 230cm, 보강폭 50cm인 시험체(PL1시험체)를 나타내면 그림 2와 같다.

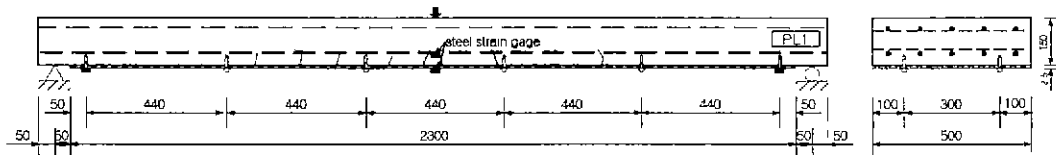


그림 2 보강길이 230cm(=0.96L)시험체 [PL1시험체]

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 파괴 양상 및 최대하중

무보강인 기준시험체(CONT)는 전형적인 휨파괴 양상을 보였다. 5.7 ton의 항복하중에 도달한 후, 6 ton의 최대하중에 압축부분 콘크리트가 압괴되었다. 선형하중 재하 후 보강길이 230cm, 보강폭 50cm로 보강한 시험체(PL1)와 보강폭 30cm로 보강한 시험체(PL1W)는 하중증가에 따라 초기균열위치 사이에서 휨균열이 진전되기 시작하였으며, 최대하중단계에서 보강재와 콘크리트와의 부착면에서 수평방향으로 계면균열(Internal Crack)이 발생하여 지점쪽으로 진행하면서 막리되는 양상을 나타내었다. 선형하중 재하없이 무균열상태에서 보강폭 50cm, 보강길이 230cm를 보강한 시험체(PL1C)는 최대하중단계에서 경간 중앙점으로부터 약 25cm 떨어진 휨균열 위치에서 계면균열이 시작되어 지점쪽으로 진행하면서 파괴되었다. 선형하중 재하 후 보강폭 50cm, 보강길이 180cm로 보강한 시험체(PL2)는 7.3 ton의 하중에 보강재 단부근처에서 휨균열이 슬래브 높이의 약 1/2정도까지 진전된 후 사인장균열이 발생하였다. 11.6 ton의 하중에 사인장균열은 인장철근 높이에서 수평균열로 발전하여 파괴하였다. 그림 3은 각 시험체의 균열진행 형상을 나타내고 있으며, 최대하중은 표 2에 표시하였다.

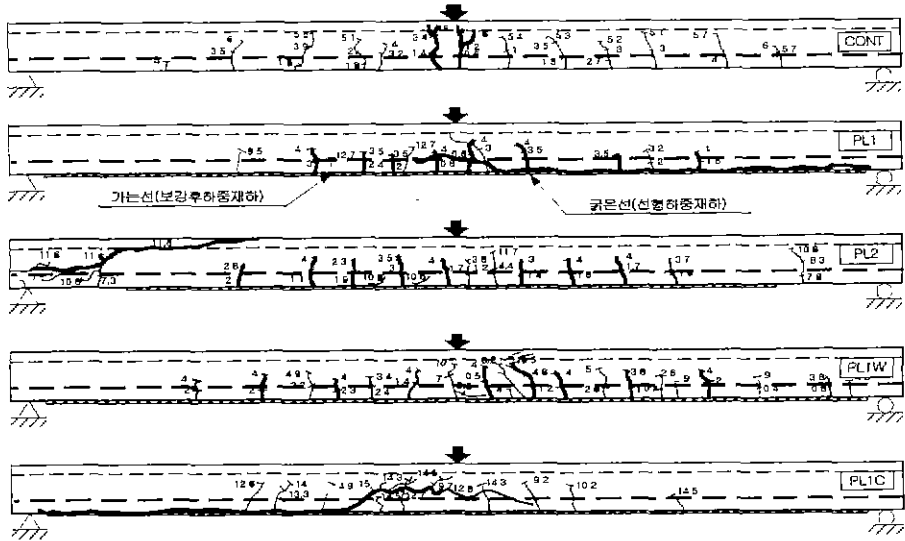


그림 3 각 시험체의 균열 및 파괴형상

표 2 최대하중 및 파괴양상

| 실험변수   | 시험체명 | 최대하중(Ton) |       | 실험값<br>이론값 | 파괴양상                     |
|--------|------|-----------|-------|------------|--------------------------|
|        |      | 실험값       | 이론값   |            |                          |
| 기준시험체  | CONT | 6.0       | 5.64  | 1.06       | 경간중앙 인장철근의 휨인장파괴         |
| 보강길이   | PL1  | 12.7      | 15.96 | 0.80       | 경간중앙 콘크리트와 보강재 계면에서 부착파괴 |
|        | PL2  | 11.6      | 15.96 | 0.72       | 보강재 단부근처 콘크리트의 사인장파괴     |
| 보강폭    | PL1W | 10.5      | 12.73 | 0.82       | 경간중앙 콘크리트와 보강재 계면에서 부착파괴 |
| 초기균열유무 | PL1C | 14.9      | 15.96 | 0.93       | 경간중앙 콘크리트와 보강재 계면에서 부착파괴 |

### 3.2 하중-처짐 곡선 및 휨강성 증가효과

하중증가에 따른 처짐량은 각 시험체의 경간 중앙에서 측정하였다. 그림 4의 하중-처짐곡선으로부터 실험변수에 따라 시험체의 거동특성을 정리, 분석하면 다음과 같다.

**보강길이 :** 보강길이 2.3m(=0.96L)로 보강한 시험체(PL1)는 12.7 ton의 하중에 경간중앙에서 보강재 박리 이후 시험체의 거동은 기준시험체의 경우와 동일하였다. 보강길이 1.8m(=0.75L)로 보강한 시험체(PL2)는 11.6 ton의 하중에 보강재 단부근처의 휨균열 선단에서 사인장균열이 발생하여 지점과 하중재 하점 쪽으로 진행하면서 파괴되었다. PL2시험체의 하중-처짐 곡선을 보면 최대하중 이후 급격하게 부재내력이 감소하고 있음을 보여주고 있다. 따라서 콘크리트의 사인장파괴에 의한 급격한 내력감소를 방지하기 위해서는 충분한 보강길이를 확보해야 할 것으로 판단된다.

**보강폭 :** 보강폭 30cm로 보강한 시험체(PL1W)는 10.5 ton의 하중에 대칭으로 보강된 한쪽 패널이 먼저 부착파괴 하였으며, 최대하중 작용시 처짐량은 26.56 mm로 비교적 큰 처짐량을 보였다. 이는 보

표 3 각 시험체의 처짐 및 휨강성 증가효과

| 시험 변수  | 시험 체명 | 실험값      |                 |          |                 | 이론값      |          |                 | 실험값<br>이론값 |
|--------|-------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|----------|-----------------|------------|
|        |       | 2.8 t    |                 | 5.7 t    |                 | 2.8 t    | 5.7 t    | 5.7 t           |            |
|        |       | 처짐<br>mm | 보강<br>효과<br>(%) | 처짐<br>mm | 보강<br>효과<br>(%) | 처짐<br>mm | 처짐<br>mm | 보강<br>효과<br>(%) | 보강<br>효과   |
| 기준 시험체 | CONT  | 5.08     | -               | 13.3     | -               | 6.40     | 13.03    | -               | -          |
| 보강 길이  | PL1   | 3.07     | 65              | 7.17     | 85              | 2.21     | 4.50     | 1.90            | 0.45       |
|        | PL2   | 3.13     | 62              | 7.56     | 76              | 2.21     | 4.50     | 1.90            | 0.40       |
| 보강폭    | PL1W  | 3.90     | 30              | 9.17     | 45              | 2.90     | 5.90     | 1.20            | 0.38       |
| 초기균열유무 | PL1C  | 2.51     | 102             | 7.25     | 83              | 2.21     | 4.50     | 1.90            | 0.44       |

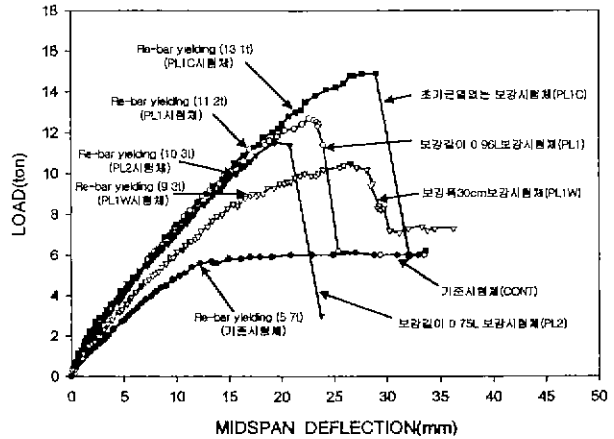


그림 4 보강시험체의 하중-처짐 곡선

강폭 50cm 보강한 시험체(PL1)의 처짐량보다 더 큰 처짐( $\Delta\delta=3.93$  mm)이 발생한 후에 파괴되었다. 그 이유는 각각 15cm 폭으로 보강한 경우가 에폭시 접착체의 주입이 충분하여 접착성능의 향상에 따라 파괴인성이 증가한 것으로 판단된다. 표 3에서 보여주고 있는 바와 같이 기준시험체의 사용하중(Service Load)인 2.8 ton의 하중 작용시 처짐량을 비교하면 기준시험체(CONT)는 5.08 mm, 30cm 폭으로 보강한 시험체(PL1W)는 3.90 mm, 50cm 폭으로 보강한 시험체(PL1)는 3.07 mm로 나타났다. 따라서, 보강폭이 증가함에 따라 처짐은 이에 선형비례하여 감소함을 알 수 있다.

초기균열유무 : 초기균열이 없는 상태에서 보강한 시험체(PL1C)는 초기균열이 있는 상태에서 보강한 시험체(PL1)와 비교하여 파괴시까지의 휨강성(Flexural Stiffness)은 거의 같으나, 최대하중과 처짐량이 약간 증가 되었음을 알 수 있다. 이는 초기균열이 있는 시험체(PL1)가 초기균열이 없는 시험체(PL1C)에 비해 단면의 휨내력은 같지만, 균열개수의 증가에 의한 부착응력의 증가로 콘크리트와 보강재 사이의 계면에서 조기에 박리된 것으로 판단된다.

### 3.3 평균부착응력(Average Bond Stress)

유리섬유 보강패널로 철근콘크리트 슬래브의 하면에 휨보강을 실시한 후 실험한 결과 콘크리트의 사인장파괴가 발생한 PL2시험체를 제외한 모든 보강시험체가 최대휨강도에 도달하기 전에 부착파괴하였다. 따라서, 콘크리트와 보강재 사이의 접착계면에서 부착응력을 검토하여야 한다. 콘크리트와 유리섬유 보강판사이의 부착응력은 주로 부착전단응력(Bond Shear Stress)에 의해 발생하며, 부착파괴시 평균부착응력은 최대휨모멘트 발생지점의 변형률로부터 다음 식에 의하여 계산할 수 있다.

$$\tau_a = \frac{\epsilon_{\max} E_p A_p}{b_p \cdot l_a} \quad (1) \quad \text{여기서, } \tau_a = \text{부착파괴시 평균부착응력, } l_a = \text{보강재의 정착길이}$$

$\epsilon_{\max}$  = 최대 휨모멘트 발생지점의 변형률

위의 식 (1)을 이용하여 각 보강시험체의 부착파괴 하중으로부터 평균부착응력을 계산한 결과 5.42~6.50 kg/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 평균값은 5.8 kg/cm<sup>2</sup>로 계산되었다. 따라서, 유리섬유 보강패널로 보강설계시

콘크리트와 보강재 사이의 평균부착응력이 5.8 kg/cm<sup>2</sup> 정도일 때, 부착파괴를 일으키는 것으로 판단된다. 한편 위의 식 (1)에서 유리섬유 보강패널로 보강한 보강시험체의 휨파괴를 보장하기 위한 보강재의 정착길이는 다음 식으로 된다.

$$\therefore l_a = \frac{f_{bu} \cdot d_p}{\tau_a} \quad (2) \quad \text{여기서, } f_{bu} = \text{유리섬유 보강판넬의 인장강도}$$

식 (2)에서 평균부착응력( $\tau_a$ )은 5.8 kg/cm<sup>2</sup>으로 일정하므로 보강시험체의 휨파괴를 보장하기 위해서는 보강패널의 두께( $d_p$ ) 또는 인장강도( $f_{bu}$ )를 감소시키거나, 위험단면으로부터의 정착길이( $l_a$ )를 증가시켜야 한다. 본 실험의 경우, 각 보강시험체의 평균부착응력이 5.8 kg/cm<sup>2</sup>일 때 식 (2)에 의하여 정착길이를 계산한 결과 2.57 m로 평가되었다.

#### 4. 결 론

유리섬유 보강패널(GFRP-Panels)로 휨보강된 철근콘크리트 슬래브를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유리섬유 보강패널로 휨보강된 모든 보강시험체는 인장철근이 항복하기 전까지 철근콘크리트 구체와 일체거동을 함으로써, 휨강성(Flexural Stiffness) 및 휨강도(Flexural Strength)의 증진 효과가 뚜렷이 나타났다. 본 실험에서는 보강폭 50cm, 보강길이 230cm(0.96L)로 보강한 시험체(PL1, PL1C)의 경우, 휨강성은 83~85%, 휨강도는 105~118%의 증가가 있었다.
- (2) 본 실험의 경우, 보강된 시험체가 최대내력에 도달하기 전에 보강재 단부근처 콘크리트의 사인장 파괴 또는 지간중앙점에서 보강재 단부로 진행되는 부착파괴에 의해, 보강재의 휨보강 성능을 충분히 발휘하지 못한 것으로 나타났다. 따라서, 휨파괴를 보장하기 위해서는 충분한 보강길이와 정착길이를 확보하여야 하며, 정착길이의 확보가 곤란한 경우에는 보강두께를 제한하거나 보강재의 인장강도를 감소시켜 사용하여야 할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 (주)케미콘의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다

#### 참 고 문 헌

- (1) 최완철, 홍기섭, 홍영균, 신영수, "에폭시접착 강판보강 철근콘크리트 보의 역학적 거동에 관한 연구", 숭실대학교 생산기술연구소, 1994. 10
- (2) Alfarabi Sharif et al, "Strength of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates", ACI Structural Journal, V91, No.2, 1994, pp160~168
- (3) Hamid Saadatmanesh, Mohammad R, Ehisani, "RC Beams Strengthened with GFRP plates- I, II", Journal of Structural Engineering ASCE, Vol.117, No.11, Nov., 1991, pp3417~3455