

접착 보강부재 단부에서의 응력분포에 관한 연구 (Studies on Stress Distribution at the end of the Bonded Strengthening Plate)

김지선¹⁾ 김경원¹⁾ 한만엽²⁾ 정영수³⁾ 홍영균⁴⁾
Kim J.S. Kim K.W. Han M.Y. Chung Y.S. Hong Y.K.

Abstract

Bonding strength of reinforcing material has been recognized to be the most important factor which determines the strengthening effect and the durability of repair work. The properties of bonding layers affects the stress distribution at the end of the plate, therefore the behavior of bonding layer has to be investigated. In this study, the stress distribution at the end of the bonded plate has been tested and compared with Roberts' analysis. Shear stress and vertical normal stress at the end of strengthening plate are analyzed and the effects of bonding layer thickness, plate thickness and plate length on the bonding behavior are tested. The test results showed that thickness is one of the most important factor, which is the thinner the thickness, the smaller the maximum stress.

1. 서론

1.1 연구배경

보강이 필요한 구조물의 보강재 중 강판과 탄소섬유 쉬트는 보강작업이 용이하고, 보강효과도 좋은 것으로 평가되어 외국에서는 구조물 보강에 일반적으로 사용되고 있으며 국내에서도 다양한 각도에서 연구가 진행되고 있다. 이러한 보강재들은 들보나 기둥, 슬라브 등 여러가지 부재의 보강에 적용이 되며 다양한 보강형태를 취할 수 있다. 교량에서 과도한 정모멘트를 감소시키고자 교량연속화를 실시할 경우 부재 연결부에 과도한 부모멘트로 인한 인장하중을 견디기 위해 보강재를 이용할 수 있고, 단순들보의 경우 하부에만 보강재를 접착하여 보강효과를 기대할 수도 있지만 보의 옆면까지 보강하면 휨에 대한 저항력을 크게 높일 수 있을 뿐만 아니라 전단에 대한 보

강효과까지 기대할 수 있다. 기존의 강판보강 들보시험을 고찰해 보면 여러가지 실험 변수들이 보강효과나 파괴형상등에 중요한 영향을 미치는 것을 알수 있고, 이러한 변수중 가장 중요한 요소는 강판의 보강길이인 것으로 알려져 있다. 기존에 발표된 에폭시접착 강판보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구에 따르면 강판의 길이가 충분히 클 경우 철근콘크리트보와 유사한 파괴형상 즉 지간중앙 휨인장파괴를 일으키고 충분한 보강효과를 발휘하는 것으로 나타났으나 보강길이가 짧은 경우에는 부재가 극한 내력에 도달하기 전에 강판단부에서 사인장파괴가 발생하거나 반복하중이 작용할 경우에는 단부의 부착제면에 계속적인 과도한 응력집중으로 인해 보강재의 박리가 발생하여 충분한 보강효과를 발휘하지 못하는 것으로 나타났다. 강판보강 길이가 보강효과에 크게 영향을 주는데 비해 강판두께나 강판폭의 변화는 보강효과에 그리 중요한 변수는 아닌 것으로 나타났다. 이러한 보강에 관한 이전 실험을 종합해 판단해 볼때 보강단부의 거동특성이 보강효과에 커다란 영향을

- 1) 정희원, 아주대학교 토목공학과 석사과정
- 2) 정희원, 아주대학교 토목공학과 부교수
- 3) 정희원, 중앙대학교 토목공학과 교수
- 4) 정희원, 홍익대학교 토목공학과 조교수

미칠 것으로 사료되므로, 에폭시 접착 강판보강에서 콘크리트와 강판의 부착, 특히 보강단부 부착계면에서의 부착거동에 관한 이해는 보강의 합리화, 적절한 보강계획의 수립 및 부적절한 보강방지를 위해 상당히 중요하리라 판단된다.

1.2 연구내용 및 방법

본연구에서는 강판단부의 응력집중현상을 연구한 Roberts의 제안식을 접착제의 전단·탄성계수, 강판의 두께·폭·길이등 변수에 따른 보강 강판 단부의 집중응력의 변화를 파악하고, 무근 들보에 강판보강을 실시한 시험체에 보강강판의 길이, 에폭시 접착법, 에폭시 두께의 변화등의 변수를 주어 단부에서의 부착응력의 변화 및 거동 특성의 양상을 파악하고, 이를 이론식과 비교 검토하고자 한다. 더불어 콘크리트와 강판이나 탄소섬유쉬트가 에폭시로 부착이 이루어 질 경우 전단부착강도, 주입법에 의한 사전단 부착하에서의 부착강도와 모아 - 쿨롱 이론에 의한 점착력(C)과 마찰계수(μ)를 산정하여 강판보강 단부에서의 부착강도와와의 관계를 고찰하고자 한다.

2. 실험

2.1 재료의 특성

2.1.1 콘크리트

본 실험에 사용한 콘크리트 배합 재료는 국내산 보통 포틀랜드시멘트(TYPE I)와 최대 골재치수 25mm인 쇄석 골재를 사용하였다. 콘크리트 강도는 제령 28일 기준 280kg/cm^2 이 되도록 하였다. No.4 체 통과한 잔골재를 사용하였다. 콘크리트 배합에 사용된 각 재료의 배합비는 생략하며, 콘크리트 압축강도 시험결과는 표 1.과 같다.

표 1. 콘크리트 압축강도

| 시료명 | 하중 (ton) | 압축강도 (kg/cm^2) | 파괴형태 | 평균 강도 |
|------|----------|---------------------------|------|-------|
| NO.1 | 23.2 | 295.4 | 전단파괴 | 278.3 |
| NO.2 | 21.76 | 277.1 | 전단파괴 | |
| NO.3 | 20.6 | 262.3 | 전단파괴 | |

2.1.2 에폭시 접착제

실험에서 콘크리트와 강판의 접착에 사용한 에폭시는 국내 T사에서 사용하고 있는 강판접착용 에폭시 제품을 사용하였는데, 압착용과 주입용이 있다. 표 2.에 실험에 사용된 에폭시의 물성을 나타내었다.

표 2. 에폭시 접착제의 물성

| 구분 | 압착용 | 주입용 |
|---------------------------|--------------------|--------------------|
| 배합비 (A : B) | 2 : 1 | 2 : 1 |
| 탄성계수 (kg/cm^2) | 3.56×10^4 | 3.56×10^4 |
| 압축강도 (kg/cm^2) | 840 ~ 910 | 840 ~ 910 |
| 휨 강도 (kg/cm^2) | 308 | 308 |
| 인장강도 (kg/cm^2) | 250 | 250 |

2.1.3 강판

본 실험의 시험체 제작에 사용된 강판은 항복강도 $2,400\text{kg/cm}^2$ 인 국내산 SS41강판을 사용하였고, 물성은 표 3.과 같다.

표 3. 강판의 기계적 성질

| 항복강도 kg/cm^2 | 탄성계수 kg/cm^2 |
|-----------------------|-----------------------|
| 4,200 | 2,040,000 |

2.1.4 탄소 섬유 쉬트

보강재로 사용한 탄소섬유(Carbon-Fiber Sheet)는 외국산 제품을 사용하였다. 실험에 사용된 탄소섬유쉬트의 역학적 성질은 표 4.과 같다.

표 4. 탄소섬유쉬트의 역학적 성질

| 섬유종류 | 단위비중 | 두께mm |
|---------------------------|---------------------------|---------|
| CF | 1.60 | 0.165 |
| 인장강도 (kg/cm^2) | 탄성계수 (kg/cm^2) | 파괴시 신장율 |
| 30,000 | 2.35×10^6 | 1.5 |

2.2 시험방법

2.2.1 무근 들보 보강 시험체

그림 1.과 같이 15*15*55cm 크기의 무근 들보시험체를 에폭시를 이용하여 길이 방향으로 접착한 이유는 교량 내하력 증강 공법중 교량연속화시 연결부의 공간을 탄성계수가 낮은 재료로 채웠을 경우의 현상을 파악하기 위함이다. 이렇게 제작한 들보는 바닥면을 그라인딩하고, 보강재를 접착한 시험체를 제작 후 재하하면서 보강재 단부에서의 인장변형율을 측정한다. 이를 이론식으로 부터 계산된 수치와 비교 분석한다.

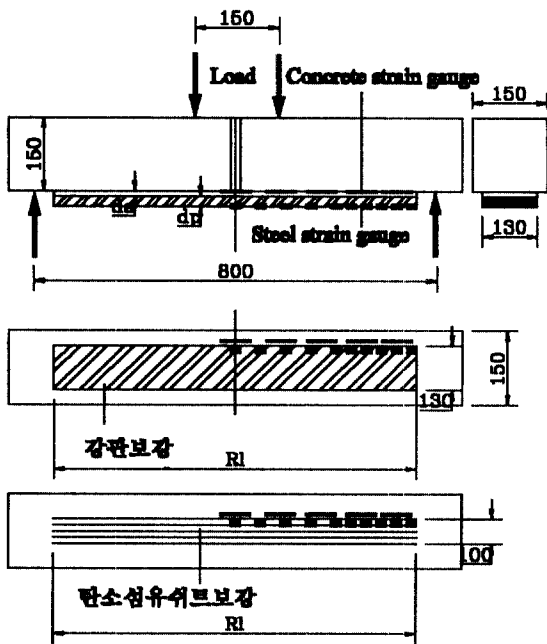


그림 1. 무근 들보 휨부착 시험체

2.2.2 부착강도시험용 시험체

1) 강판의 직접전단 부착시험

콘크리트 양쪽면에 두께 약 20mm강판을 정해진 면적으로 두께 3mm의 간격에 에폭시를 주입하여 제작한 시험체와, 강판을 압착하여 제작한 시험체를 이용하여 직접 전단시의 부착강도를 측정한다. 이때 모멘트에 의한 강판의 박리응력을 최소로 하기 위해 강판의 상부를 경사지게 깎아 편심을 최대한 으로 줄인

다.(그림 2. 참조)

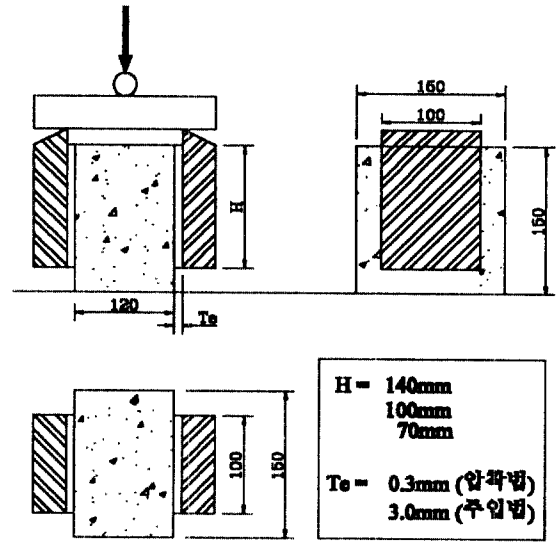


그림 2. 강판 직접전단 부착 시험체

2) 탄소섬유 쉬트의 부착시험

그림 3.와 같이 시험체를 제작한 후 인장하중을 가하여 부착면에 전단을 시험한다.

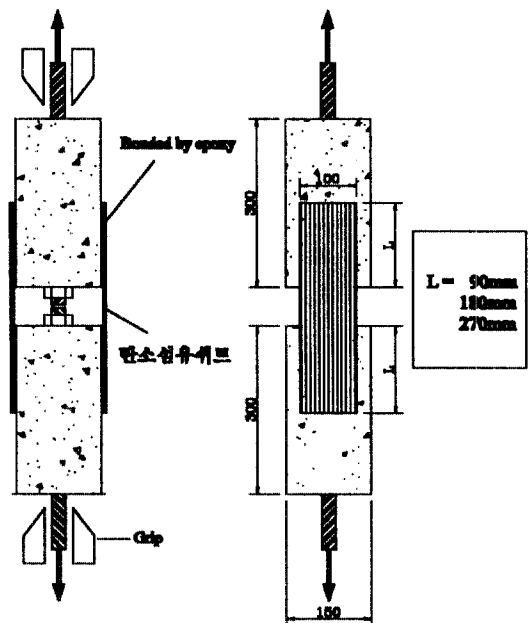


그림 3. 탄소섬유 쉬트 부착강도 시험체

3) 사전단 부착시험

에폭시 주입시의 강도 특성을 관찰하기

위해 시험체 모두를 주입법으로 제작하였다.

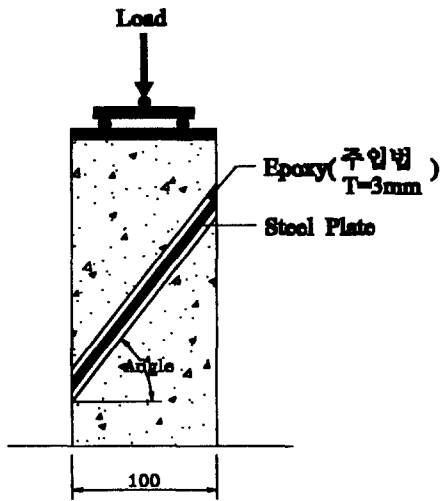


그림 4. 사전단 부착 시험체

2.3 시험체 변수 및 제작

무근 들보 보강시험체의 시험변수는 보강재의 길이, 에폭시 두께, 강판의 두께등이다. 콘크리트와 강판 부착시에는 콘크리트 면과 강판을 그라인딩하고 표면을 말끔히 청소한 후 부착을 실시하였고, 탄소섬유 슈트 부착시에는 미리 콘크리트 면에 프라이머를 도포하였다. 탄소섬유 슈트는 슈트 부착용 에폭시를 이용하였으며, 전단 시험체는 1Ply로 들보 보강 시험체는 2Ply로 시공하였다.

각 시험체별 변수값 및 분류를 표 5, 6, 7에 나타내었다.

표 5. 무근들보 휨부착시험 시험체

(단위: mm, L=800mm)

| 보강재 | 접착법 | 접착 길이 | 에폭시 두께 | 보강재 단면적 | 공시체명 |
|---------|-----|-------|--------|----------|--------------|
| 강판 | 주입법 | 0.95L | 3 | 130×3 | I-0.95L-E3 |
| | | | 5 | | I-0.95L-E5 |
| | | 0.85L | 3 | | I-0.85L-E3 |
| | | | 20 | | I-0.85L-E20 |
| | 압착법 | 0.95L | 0.3 | 130×5 | P-0.95L-T5 |
| | | 0.85L | | 130×3 | P-0.85L-T3 |
| 탄소섬유 슈트 | 압착법 | 0.95L | 0.3 | 100×2PLY | P-0.95L-E0.3 |
| | | 0.85L | | 100×2PLY | P-0.85L-E0.3 |

시험체 기호의 설명

(예) I - 0.95L-E3

*접착법 - I : 주입법

P : 압착법

*정착길이 - 0.95L=0,95×800=760

0.85L=0,85×800=680

*에폭시 두께 - E3 : 3mm

E20 : 기본적인 에폭시 두께는 3mm이다. 단, 강판단부 부분의 콘크리트를 약간 제거하고 에폭시로 이곳을 채운 두께를 20mm로 한다.(그림 1.참조)

*강판두께 - T5 : 5mm

T3 : 3mm

표 6. 직접전단 부착시험 시험체

| 부착 보강재 | 작용 하중 | 에폭시 두께 | 부착면적 |
|------------|-------|----------------|---------|
| 강판 부착 | 압 축 | 0.3mm (압착법) | 100×140 |
| | | | 100×100 |
| | | | 100×70 |
| | | 3.0mm (주입법) | 100×140 |
| | | | 100×100 |
| | | | 100×70 |
| 탄소섬유 슈트 부착 | 인 장 | 0.3mm (압착법) | 100×90 |
| | | | 100×180 |
| | | | 100×270 |

표 7. 사전단 부착 시험체

| 부착 응력 조건 | 에폭시 두께 | 시험체명 | 시험변수 |
|----------|--------------|-------|--------|
| | | | 사면의 각도 |
| 압축 사 전단 | 3mm (주입법) | OS55° | 55° |
| | | OS60° | 60° |
| | | OS65° | 65° |
| | | OS70° | 70° |

2.4 재하 및 측정방법

무근들보 보강시험체의 하중재하는 일반 휨들보의 재하시험과 유사하며, 재하하중량을 검출하기 위하여 유압재 하부면에 로드셀을 설치하였다. 보강재의 단부로부터 10mm간격으로 6mm 스트레인 게이지 10개를 부착하여 축방향 변형율을 측정하고, 보시험체의 변위를 측정하기 위하여 중앙부에 변위계를 설치하였다. 설치한 센서로부터 나오는 데이터는 UPC Card와 컴퓨터를 이용하여 정리하였다.

부착강도 측정용 시험체의 재하 역시 유

압착을 이용하여 실시하고 로드셀을 이용하여 파괴하중을 구하였다.

3 결과 및 분석

3.1 강판단부의 거동 특성

강판단부의 응력집중 현상을 연구한 Roberts의 제안식에 따르면 콘크리트-에폭시-강판이 완전한 합성거동을 한다고 가정할 때 보강 강판단부에서 전단응력과 수직응력의 집중현상이 나타나고, 집중응력의 크기는 주로 접착제의 전단·탄성계수, 강판의 두께·폭·길이의 변수에 따라 달라진다. 복잡한 전계과정을 거쳐 유도된 강판단부에서의 전단응력(τ)과 수직응력(σ)을 요약하여 표현하면 다음 식과 같다.

$$\tau = (\tau_1 + \tau_2) / b_p$$

$$\sigma = \sigma_3 / b_p$$

여기서

τ_1 = 휨모멘트에 의해 부착계면에 발생하는 단위길이당 전단력으로

$$\tau_1 = \frac{F b_p d_p (h_p - h)}{I}$$

(단, F = 부재에 작용하는 전단력

b_p = 강판 폭, d_p = 강판 두께

I = 부재의 단면 2차모멘트

h_p = 강판의 유효거리, h = 중립축 거리)

τ_2 = 강판의 경계조건에 따라 강판끝에는

축력이 발생하지 않으므로 이를 보정할 경우에 발생하는 단위길이당 전단력

$$\tau_2 = K_s u \quad (\text{단, } u = \text{축방향변위})$$

$$K_s = G_a \frac{b_a}{d_a} \quad (\text{단, } G_a = \text{접착제의 전단계수}$$

b_a = 접착제폭, d_a = 두께)

그리고

$$\sigma_3 = K_n w \quad (\text{단, } w = \text{수직방향변위})$$

$$K_n = E_a \frac{b_a}{d_a} \quad (\text{단, } E_a = \text{접착제의 탄성계수})$$

이다. 그러나 위식들에 포함된 값들은 여러 가지 물성치와 실험 변수들로 함수로 구체적인 식은 복잡한 관계로 생각하기로 한다.

3.2 보강 시험체의 단부 응력

시험체 I - 0.95L-E3의 물성을 위식에 대입하여 부착면의 전단응력과 수직응력의 분포를 강판 단부로 부터 Plotting하면 그림 5.와 같은 응력분포를 가지는 것으로 나타났다.

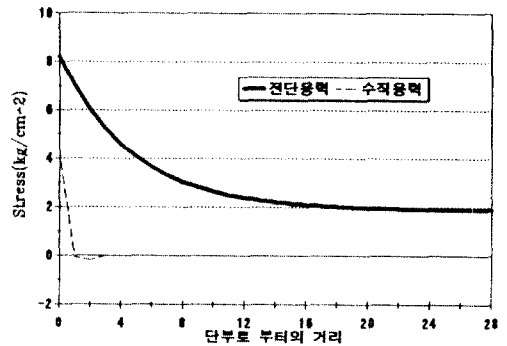


그림 5. 강판 단부 접착면에서의 응력분포

또한 여러 가지 변수들 중 에폭시 두께와 강판 두께 및 보강길이에 따른 단부의 최대수직응력과 전단응력의 변화를 살펴보면 다음과 같다. (계산에 대입한 수치는 본 연구에 사용된 보강재나 시험체의 치수나 물성값이며 그림 6, 7, 8은 단순히 변수값의 변화에 따른 단부 최대응력의 변화 양상을 보고자 함이 목적이다.)

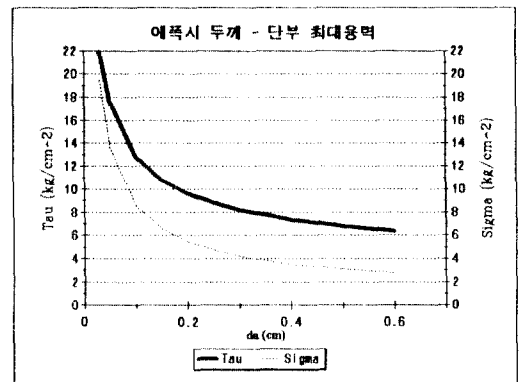


그림 6. d_a 의 변화에 따른 단부 최대응력

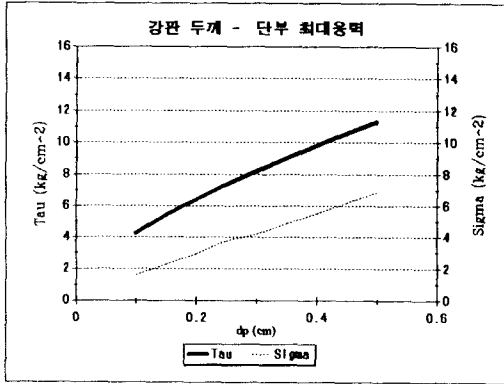


그림 7. d_t 의 변화에 따른 단부 최대응력

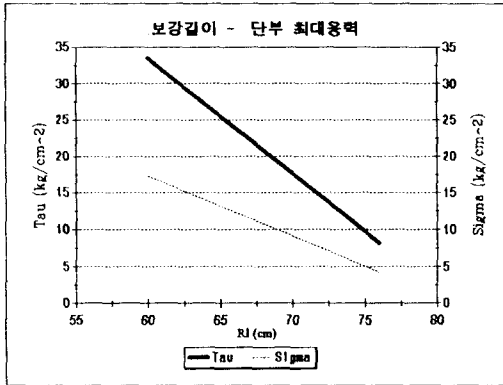


그림 8. 보강길이 변화에 따른 단부 최대응력

2.6 결론

본 연구 결과 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 강판 접착 보강틀보의 단부거동은 이론적으로 고찰 할 경우, 상당히 많은 변수가 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 그중 가장 중요한 영향인자는 에폭시 두께와 보강길이인 것으로 판단된다.
- 2) 보강길이가 지간에 비해 짧아 질수록 단부의 최대전단응력과 수직응력값은 증가하고 그 비율도 점점 커지는 것으로 나타났다.
- 3) 에폭시 두께가 클수록 최대전단응력과 수

직응력의 값은 빠르게 감소하나, 두께가 어느 정도 이상에서는 최대응력값은 더 이상 작아지지 않고 일정한 값을 보인다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 보수 보강 재료 및 공법 개발 연구의 세부과제로서 수행된 연구임을 밝히며, 연구에 도움을 주신분들께 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 1) Sika, "Concrete Restoration Systems"
- 2) ACI SP-85, "Rehabilitation, Renovation, and Preservation of Concrete and Masonry Structures.", 1985
- 3) ACI, "Repair and Rehabilitation of Concrete - Structures Seminar Course Manual/SCM-16(87)", 1987
- 4) Peter H. Emmons, "Concrete Repair and Maintenance Illustrated.", 1974
- 5) Roberts T.M.: Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams, The Structural Engineer, Vol.67, June 1989, pp. 229-233
- 6) Roberts T.M. and Haji-Kazemi H. : Theoretical Study of The Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates, The Structural Engineer, March 1989, pp. 39-55
- 7) (주) T.S BOND 건설공업 "강판접착 보강공법을 중심으로 한 보수·보강용 에폭시 수지 기술자료.", 1994
- 8) (주) T.S BOND 건설공업, "탄소섬유 Sheet 보강공법 기술자료."
- 9) 숭실대학교 생산기술 연구소, "에폭시 접착 강판보강 철근콘크리트의 역학적 거동에 관한 연구.", 1994
- 10) KCI, "제7권 6호 (특집: 콘크리트구조물의 보수·보강기법).", 1995.12