

# 에폭시 접착강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 강판단부의 거동특성

## Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy Bonded Steel Plates(EBSP)

신 영 수\*                      최 완 철\*\*  
Shin, Young Soo      Choi, Oan Chul  
홍 기 섭\*\*\*                      홍 영 균\*\*\*\*  
Hong, Gi Suop                      Hong, Young Kyun

### Abstract

This paper deals with the problem of plate separation and anchorage at the ends of steel plates strengthened by EBSP. Test results show that the reinforced concrete beams strengthened by EBSP occurs the premature failure without the beams achieving their full flexural strength at the end of plates.

The premature failure is the cause of stress concentrations in the adhesive layer of plate, reinforced concrete in case of lack of plate length. Then a simple, approximate procedure for predicting the shear and normal stress concentrations is investigated by Roberts's theory based on partial interaction theory. The theoretical results are compared, and show close agreement with test results. A method is derived for determining the plate length that prevents the premature anchorage zone failure.

### 1. 서 론

에폭시 접착강판으로 보강된 보가 구조적으로 안전하게 거동하기 위해서는 보강길이의 확보가 필수적이며 이는 최근 수행된 실험에서 입증된 바 있다.

즉 보강된 휨부재가 충분한 길이를 확보하지 못하면 극한내력에 도달하기 전에 접착강판 단부에서 사인장파괴가 발생하면서 부재가 파괴되는 양상이 발생한다.

\* 정회원, 단구조연구소 실장

\*\* 정회원, 숭실대학교 건축공학과 부교수

\*\*\* 정회원, 홍익대학교 건축학과 조교수

\*\*\*\* 정회원, 홍익대학교 건축학과 조교수

이러한 강판단부 탈락(peeling)현상에 의한 파괴는 취성파괴의 양상을 나타냄으로 강판단부에서의 거동을 밝히는 것이 에폭시접착 강판공법(EBSP)의 적용에 있어서 매우 중요하다.

즉 접착강판 단부에서 발생한 콘크리트 사인장파괴는 부재의 외부면에 보강된 강판이 특별한 정착기구를 갖지 않음으로 야기되는 응력집중이 접착계면에서 콘크리트에 전달되어 내부 철근 주변의 피복콘크리트를 탈락시키는 현상으로 강판보강시 이러한 현상을 방지할 수 있도록 설계되어야 한다.

본 연구에서는 콘크리트-에폭시-강판계면이 완전 접착되어 합성거동을 한다는 가정하에 강판단부의 응력집중현상을 규명한 Roberts의 연구에 근거하여 본 연구에서 실시한 실험결과와

계산된 강판단부 파괴하중을 비교·검토하였다.  
또한 보강길이-단부파괴하중간의 관계를 규명하고 강판단부 파괴를 방지하기 위하여 Roberts의 식을 수정하여 보강길이 검토식을 제안하였다.

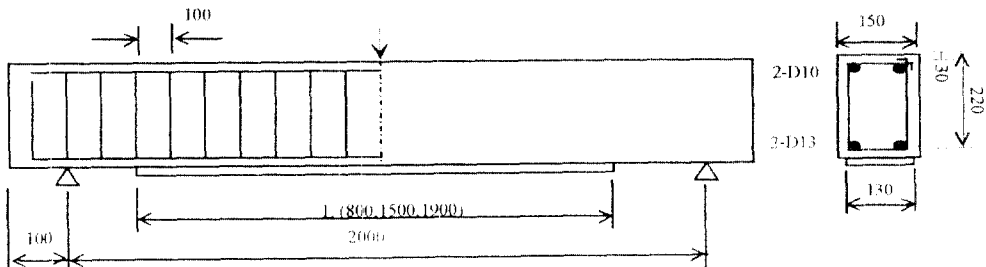
## 2. 실험 예

### 2.1 실험계획

에폭시 접착강판 보의 실험은 철근콘크리트 구조설계기준(건설부)의 공칭강도의 75%까지 가력하여 초기균열을 발생시켰다. 강판 길이·두께·폭 등을 변수로 하여 보강후의 시험체를 제작하였다. 보강후의 시험체를 가력장치에 설치하여 보의 중앙부에 집중하중을 가하여 파괴 시까지 재하하였다. 시험체 상세는 <그림1>과 같고 각 시험체의 강판 컷수 및 실험결과는 <표1>과 같다.

<표1> 시험체 분류 및 결과

시험체명	보강판			철근비			최대 하중 ton
	길이 m	두께 mm	폭 cm	$\rho$	$\rho_b$	$\rho/\rho_b$	
S2*130*0.8	0.8	2.3	13	0.0168	0.0236	0.7	5.1
S2*130*1.5	1.5	2.3	13	0.0168	0.0236	0.7	7.7
S2*130*1.9	1.9	2.3	13	0.0168	0.0236	0.7	10.3
S3*130*1.5	1.5	3.3	13	0.0207	0.0236	0.9	7.6
S4*130*1.5	1.5	4.0	13	0.0235	0.0236	1.0	6.8



<그림1> 시험체 상세

### 2.2 실험 재료

보시험체 제작에 사용된 콘크리트는 재령 28일 압축강도는 208kg/cm<sup>2</sup>을 사용하였다. 사용철근은 항복강도 4680kg/cm<sup>2</sup>, 강판은 항복강도 2380kg/cm<sup>2</sup>를 사용하였다. 접착제로 사용된 에폭시의 물성은 <표2>와 같다.

<표2> 에폭시 수지 물성 (동계형) 단위:kg/cm<sup>2</sup>

에폭시 종류	인장 강도	압축 강도	휨강도	인장전단 강도	탄성 계수
EPX-3W	200 이상	700 이상	400 이상	150 이상	10000 이상

### 2.3 실험결과 고찰

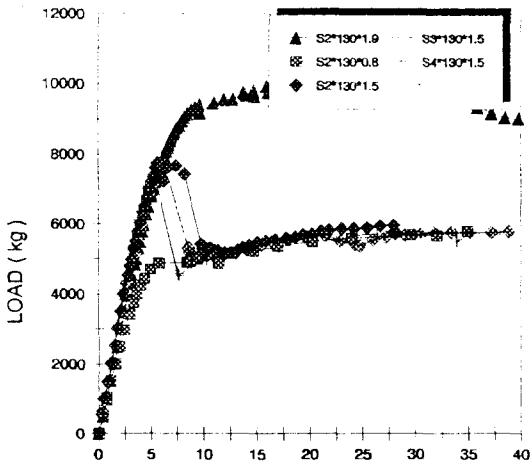
#### 2.3.1 파괴형상

하중 초기단계에서는 전 지간에 걸쳐 골고루 휨균열이 발생하나 일정한 하중점을 지나서는 휨균열의 진전은 억제되고 대신 강판단부에서 새로운 사균열이 생성된다. 사균열은 점차 폭과 높이가 증가하여 인장철근 높이 까지 45° 이하의 경사각으로 진행된다. 파괴 직전에는 사균열이 인장철근 높이에서 수평방향의 균열로 발전하여 결국은 보의 피복이 떨어져 나오는 파괴형상을 나타내었다. 이러한 현상이 발생한 후 강판단부에서 일정한 간격으로 사인장균열이 발생하면서 보의 중앙쪽으로 이동된다.

#### 2.3.2 하중-처짐관계

5개의 시험체에 대한 하중-처짐곡선을 <그림2>과 같다. 보강길이가 가장 짧은 S2\*130\*0.8

시험체는 다른 두 시험체에 비해 매우 빨리 부재가 항복하였다. 강판길이를 1.5m로 했을 경우 보강길이가 0.8m인 시험체에 비해 처짐 조절효과가 뚜렷이 나타났다. 그러나 1.5m 보강한 시험체나 0.8m 보강한 시험체도 강판단부의 거동에 의해 처짐 및 파괴양상에 영향을 받았으며 이러한 현상에 의해 두 시험체 모두 최대 하중이후에는 강판단부의 사인장균열에 의해 부재내력이 급격히 감소하여 강판길이가 충분히 확보되지 못하였을때 일어나는 현상이 나타났다. 강판길이를 1.9m로 보강한 S2\*130\*1.9 시험체는 다른 시험체에 비해 처짐 조절효과가 뚜렷히 나타났고 부재항복이후에도 급격한 내력감소현상은 나타나지 않았다. 따라서 충분한 강판길이를 확보해야 사용하중하에서 처짐을 효과적으로 조절할 수 있고 부재의 연성파괴를 유도할 수 있다.



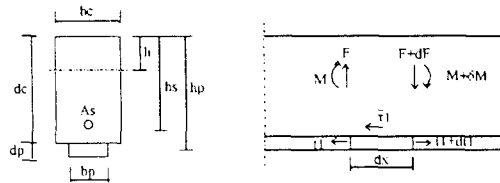
〈그림2〉 하중-처짐곡선

이상에서 강판보강된 시험체의 경우 보강길이에 의해 보강된 부재의 균열 및 구조적거동에 큰 영향을 받았다.

### 3. 강판단부의 응력집중에 대한 이론

보강된 단면과 보강되지 않은 단면의 경계점(강판의 단부) 근처에서 최대 전단응력과 수직응력의 집중현상이 나타난다. 집중응력의 크기는 주로 접합제의 전단·탄성계수, 강판의 두께·폭·길이의 변수에 따라 달라진다. 집중응력은 다음과 같은 단계를 통해 계산할 수 있다.

단계1. 콘크리트-에폭시-강판의 접착면이 완전 접착(perfect-bond)되었다는 가정하에서 보이론을 통해 응력을 계산하면,



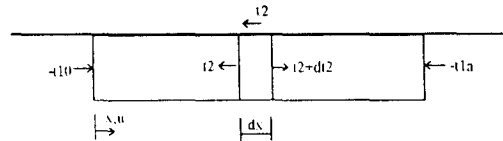
〈그림3〉 보의 단면치수 및 부재력

보이론으로부터  $\bar{\tau}_1$  와  $t_1$ 는

$$t_1 = \frac{M b_p d_p}{I} (h_p - h) \quad \text{식(1)}$$

$$\bar{\tau}_1 = \frac{F b_p d_p}{I} (h_p - h) \quad \text{식(2)}$$

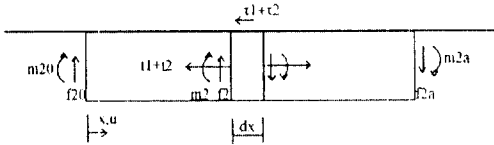
단계2. 강판의 경계조건(boundary condition)에 따라 강판끝에는 축력이 발생하지 않으므로 단계1에서 발생된 경계력들의 반대힘을 〈그림4〉와 같이 작용시켜 계산치를 수정해야 한다.



〈그림4〉 강판에 작용하는 축력

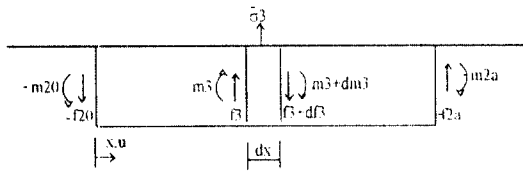
$$\bar{\tau}_2 = \sqrt{\frac{K_s}{E_p b_p d_p}} (-t_{10} \sinh ax + \frac{t_{10} \cosh aa - t_{1a}}{\sinh aa} \cosh ax) \quad \text{식(3)}$$

단계1과 단계2의 힘들을 중첩(superposition)시키면 <그림5>과 같다.



<그림5> 강판단부의 부재력

단계 3. 강판의 경계조건에 따라 강판끝에는 전단력, 휨모멘트가 발생하지 않으므로 단계2에서 발생된 경계력들의 반대힘을 <그림6>과 같이 작용시켜 계산치를 수정해야 한다.



<그림6> 강판의 부재력

$$\bar{\sigma}_3 = 2 e^{-ax} [ (f_{20} \gamma + m_{20} \gamma^2) \cos \gamma x - m_{20} \gamma^2 \sin \gamma x ] \quad \text{식(4)}$$

단계1, 단계2, 단계3의 힘들을 중첩시키면 강판단부에서의 단위길이당 수직응력( $\bar{\sigma}_3$ )과 단위길이당 전단응력( $\bar{\tau}$ )을 구할 수 있다.

최대 응력은 강판단부에서 발생하고 계산의 편의를 위하여 위 식을 간단히 정리하여 최대 전단응력( $\tau_0$ )과 수직응력( $\sigma_0$ )을 구하면

$$\tau_0 = (F_0 + M_0 \sqrt{\frac{K_s}{E_p b_p d_p}}) \times \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - h) \quad \text{식(5)}$$

$$\sigma_0 = \tau_0 d_p \left( \frac{K_n}{4 E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{식(6)}$$

#### 4. 소요 보강길이 계산

Roberts의 제안식에 근거하여 단부파괴하중-강판길이 관계를 유도하면 식(7)과 같다.

$$P = 2 f_{ud} \left[ \frac{k_1}{2} + 50k_2 \left( 1.13 - \frac{L}{200} \right) \right] (k_3 + \sqrt{k_3^2 + 4}) \quad \text{식(7)}$$

단,  $f_{ud}$  = 콘크리트 직접인장강도( $kg/cm^2$ )

$$k_1 = \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - h)$$

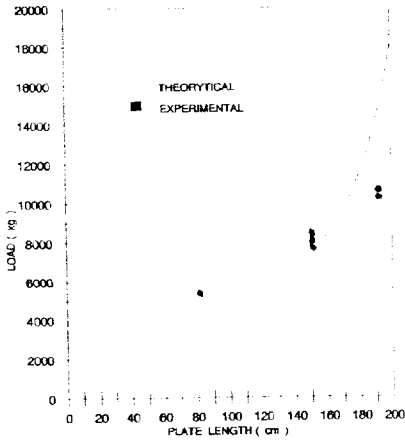
$$k_2 = k_1 \sqrt{\frac{K_s}{E_p b_p d_p}}$$

$$k_3 = d_p \left( \frac{K_n}{4 E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}}$$

<그림7>의 이론곡선은 강판보강길이가 전체지간길이인 2.0m까지 보강할 경우 강판단부에서 응력집중에 의한 파괴하중을 17ton 정도로 나타냈다. 또한 이론곡선에 의하면 보강된 단면의 공칭강도를 실험결과인 10ton으로 보았을 때 강판단부파괴를 방지하기 위해서는 1.8m이상으로 강판길이를 확보해야 한다.

결국 총 6개의 시험체 중 강판길이를 1.9m로 보강된 2개의 시험체만이 강판단부파괴를 방지할 수 있는 필요강판길이가 확보되어 극한내력이 발휘될 수 있었고 강판길이가 1.9m미만인

나머지 4개의 시험체는 모두 극한내력에 도달 되기 이전에 강판단부에서 파괴가 발생하였다.



<그림7> 강판길이-단부파괴하중 곡선

### 5. 실험값과 제안식의 강도비교

본 연구에서 수행한 실험값과 제안식에 의한 계산값을 <표3>에 비교하였다.

<표3> 실험값과 계산값의 비교

시험체명	실험값 (ton)	계산값 (ton)	실험값/계산값
S2#130#0.8	4.5	4.0	1.13
S2#130#1.5	7.7	7.3	1.05
S2#130#1.9	*	17.0	*
S3#130#1.5	7.6	7.1	1.01
S4#130#1.5	6.8	7.0	0.97

주) \* 은 인장항복후 콘크리트 압축파괴.

강판단부의 파괴는 강판의 탈락에 의해 발생하는데 이는 강판단부에서 응력이 집중되어 이 응력들의 주응력에 의해 콘크리트 직접인장강도(direct tensile stress)를 초과하였을 때 콘크리트가 항복하여 발생한다. 이러한 항복하중을 계산하여 <표3>에서와 같이 실험값과 비교하였다. 콘크리트 직접인장강도는 일반적으로 콘크리트 압축강도의 5-7%정도가 되는 것으

로 알려져 있으나 본 연구에서는 압축강도의 5.5%로 계산하였다. <표3>에서 계산값과 실험값과의 오차는 10%정도로 나타났다.

본 연구에서 적용한 Roberts의 약산해는 강판단부파괴가 발생된 시험체들의 실험결과와 대체적으로 일치하였다. 특히 강판길이에 따른 단부파괴하중의 영향을 잘 나타내고 있다.

### 6. 보강길이에 관한 제안식

강판보강 설계시 강판단부파괴의한 극한 내력에 도달하기 전에 부재가 항복하는 현상을 막기 위해서는 다음제안식 식(8)로 보강단면과 보강길이를 계산해야 한다.

$$(k_1 V + k_2 M) (k_3 + \sqrt{k_3^2 + 4}) \leq 2 f_t \text{식(8)}$$

단,  $V$  = 강판단부에 작용하는 전단력(kg)

$M$  = 강판단부에서  $\frac{d_c + d_p}{2}$  떨어진 지점에 작용되는 휨모멘트(kg-cm)

$f_t$  = 콘크리트 직접인장강도(kg/cm<sup>2</sup>)

$$k_1 = \frac{b_p d_p}{I b_a} (h_p - h)$$

$$k_2 = k_1 \sqrt{\frac{K_s}{E_p b_p d_p}}$$

$$k_3 = d_p \left( \frac{K_n}{4 E_p I_p} \right)^{\frac{1}{4}}$$

### 7. 결론

접착강판단부의 거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 강판으로 휨부재를 보강할 경우 강판단부

에서 응력집중현상이 발생하여 콘크리트 사인장파괴현상이 나타났다. 사인장파괴 하중을 규명한 이론해와 실험결과를 비교할때 Roberts의 약산해는 10%정도 안전측 오차가 발생하여 실험의 결과와 부합하는 것으로 확인되었다.

(2) 강판보강설계시 강판단부의 응력집중현상을 피하기 위해서는 강판단부에서 전단력 및 모멘트를 검토해야 하며 그 검토식은 식(8)를 만족하는지 여부를 확인하여야 한다.

.이 연구는 (주) T.S본드 건설공업의 연구비와 시험체 제작지원에 의해 이루어졌음을 밝히고, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참 고 문 헌

1. 최원철, 신영수, 홍영균, 홍기섭, 류해준, "에폭시로 보강된 콘크리트 접합계면의 접착성능" 1994년 대한건축학회 춘계학술발표회 논문집
2. 최원철, 신영수, 홍영균, 홍기섭, "에폭시 접착 강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 1994. 5
3. "에폭시 접착강판 보강된 철근콘크리트 보의 역학적 거동에 관한 연구", 숭실대학교 생산기술연구소, 1994. 10
4. 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계기준및 해설, 건설부, 1990
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, 1989
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