

강판 휨보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동

Structural Behavior of RC Beam Strengthened with Steel Plate

오병환* 강동욱** 조재열*** 채성태*** 이명규****
Oh, Byung Hwan Kang, Dong Ok Cho, Jae Yeol Chai, Sung Tai Lee, Myung Gyu

Abstract

In recent years, strengthening by epoxy-bonded steel plates, carbon fiber sheets, aramid fiber sheets and so on, is spotlighted. Among them, the method using steel plates is most widely applied. Most studies have dealt with strengthening by epoxy-bonded steel plates. However the actual behavior of strengthened RC beams are not well established. Particularly, the studies on the separation load that affects failure load of the beam are relatively insufficient.

In this study, test parameters are the magnitude of pre-load, plate length, plate thickness, existence and spacing of anchor bolt, the number of plate layer and the height of side strengthening. 17 reinforced concrete beams are strengthened by steel plates according to test parameters. Deflection, failure load, strains of reinforcing bar, concrete and plate are measured from tests(4 points loading). The failure mode, and separation load are analyzed from these measured data.

The difference between Roberts's theory and test results is discussed, and the prediction equation for separation load in the case of rip off is proposed.

1. 서 론

1970년대 들어와 보편화되기 시작한 강판접착공법은 시공기간이 짧고 사용중인 구조물에도 시공가능하며 인장부는 물론이고 압축력과 전단을 받는 부분에도 적용이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 이 공법에 대해서는 지금까지 많은 연구가 진행되어 오고 있으나, 보의 구조적 거동에 영향을 미치는 다

* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정회원, 삼성물산 건설부문 연구원
*** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정
**** 정회원, 전주대학교 토목환경공학과 교수

양한 인자들의 영향이나 강판의 변형, 강성, 파괴형태 등에 미치는 영향에 대해서는 구체적이고 체계적인 평가가 이루어지지 않고 있으며, 특히 강판접착공법에서 파괴에 큰 영향을 미치는 박리하중에 대한 연구는 아주 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 철근콘크리트 보 구조물의 보강에 대한 기초적인 연구로서 가장 널리 사용되고 있는 강판접착공법을 사용하여 휨에 대한 보강성능시험을 수행하고, 그 결과를 분석하여 박리하중을 계산하는 이론적인 과정을 제안하고자 한다.

2. 철근콘크리트 보부재의 판형보강실험

2.1 실험내용 및 방법

가로, 세로, 길이 각각 150, 250, 1,700mm인 보시험체 17개를 대상으로 휨인장에 대하여 강판을 보강재로써 제작하여, 제반의 변수에 대하여 실험을 하였다. 보강후 휨보강효과를 명확하게 보기 위하여 즉, 보강후 전단파괴를 피하기 위해 휨강도에 비해 전단강도가 크도록 설계하였으며, 시험체 제원은 다음 그림 1과 같다. 또한 보강실험에 앞서 실재료에 대한 전반적인 특성실험을 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 표 1과 같다.

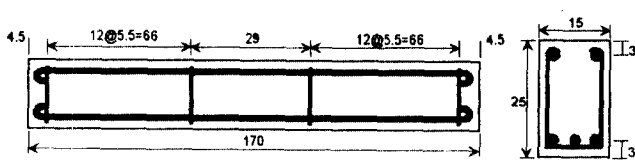


그림 1 시험체의 제원 및 철근의 배치도

표 1 사용재료의 특성

콘크리트	28일 압축강도	31.4Mpa
	활렬인장강도	2.25Mpa
	탄성계수	26,580Mpa
철 근	항복강도	470Mpa
	탄성계수	204,000Mpa
강 판	항복강도	292 Mpa
	탄성계수	210,000 Mpa
접 착 제	탄성계수	3,000 Mpa

본 실험에서 강판휨보강시 고려한 변수는 선행하중의 크기, 강판의 길이, 강판의 두께, 강판의 층수, 앵커볼트의 유무 및 간격, 측면보강이며, 가장 중요한 변수는 강판의 길이와 강판의 두께이다. 각 실험 변수에 따른 시험체명은 표 2에 제시하였다. 표 2에서 공백은 보강시험체간의 비교기준이 되는 F-S-Ld3의 항과 같음을 의미한다.

무보강기준시험체의 파괴하중인 140kN의 70%에 해당하는 100kN을 선행하중으로 재하하여 손상을 가한 후, 하중을 제거한 상태에서 보강을 하고, 다시 파괴시까지 하중을 재하하였다. 앞으로는 이와 같은 하중재하방식을 1주기 하중재하방식(1 cyclic loading)으로 칭한다. 기준시험체는 무보강시험체 1개를 파괴시까지 재하(monotonic loading)하고, 1개는 다른 보강시험체와 같이 1주기 하중재하(1 cyclic loading)방식으로 시험을 하여 선행하중의 효과 및 보강효과를 검토하는데 기준으로 삼았다.

F-S-Ld1과 F-S-Ld2의 경우는 각각 선행하중을 0kN과 60kN으로 가하여 선행하중의 크기가 100kN인 F-S-Ld3와 비교함으로써 선행하중의 크기가 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 하중재하는 보중앙으로부터 250mm 떨어진 두점에 재하하는 4점재하방식을 택하였다.

2.2 실험결과 및 분석

2.2.1 파괴양상

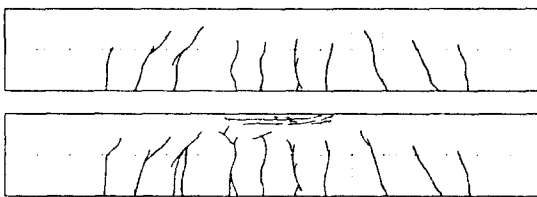
그림 2(a)는 무보강기준시험체의 균열 및 파괴양상이며, 그림 2(b)는 보강시험체의 전형적인 균열 및 파괴양상이다. 각각의 그림에서 윗그림은 보강전 선형하중 재하시의 균열양상이며, 아래그림은 보강후 파괴시의 균열양상이다.

무보강기준시험체가 인장철근의 항복에 이은 압축파괴의 양상을 나타내는 것과는 달리 강관휨보강시험체의 경우에는 강관이 콘크리트를 물고 떨어지면서(rip off) 사인장균열로 발전하여 결국 단파괴가 발생하는 것이 지배적인 파괴양상이라는 점이다. 그러나, 경우에 따라서는 인장철근의 항복(시험체 F-S-Ab1), 강관의 항복(시험체 F-S-Th1, F-S-Sd1, F-S-Sd2), 그리고 압축부의 파괴(F-S-Sd1)가 나타나기도 하였다. 강관이 콘크리트를 물고 떨어지는 현상(rip off)은 강관의 단부에서부터 시작하여, 사인장균열로 발전하거나 약 40mm의 높이(인장철근 바로위)를 유지하며 종방향(보시험체의 길이방향)으로 발전하는 양상이 복합적으로 나타났는데, 비록 같은 길이의 강관이라도

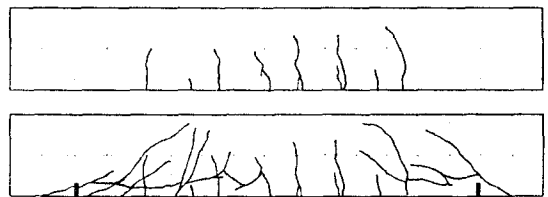
표 2 시험체명 및 실험변수

(Unit : mm)

시험체명	선형하중 크기	강관의 길이	강관의 두께	강관의 층수	앵커볼트의 간격 및 유무	측면보강
Cont-F-Mo	Monotonic Loading			Control Beams		
Cont-F-Cy	Cyclic Loading(10ton)					
F-S-Ld1	0 kN					
F-S-Ld2	60 kN					
F-S-Ld3	100 kN	1460	5	1	existence	none
F-S-Lt1		1280				
F-S-Lt2		720				
F-S-Th1			3			
F-S-Th2			6			
F-S-Th3			9			
F-S-Th4			12			
F-S-Lr1				1500+1500		
F-S-Lr3			3	1500+1500		
F-S-Ab1					none	
F-S-Ab3					space 430	
F-S-Sd1						height 125
F-S-Sd2						height 250



(a) 무보강시험체



(b) 보강시험체

그림 2 균열 및 파괴양상

두께가 두꺼워짐에 따라 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 양상(rip off)에서 rip off와 함께 접착계면에서의 박리(separation)가 일어나는 형태로 파괴양상이 바뀌었다. 대부분의 시험체에서 하중재하점사이의 구간에서는 새로운 휨균열의 발생이라든지 선행하중재하시 발생한 휨인장균열의 발전은 거의 없었다.

2.2.2 파괴하중

표 3은 강판휨보강시험체의 파괴하중을 표로써 제시한 것이다. 실험값은 실험결과로부터 얻은 최대하중을 나타내며, 이론값은 다음의 세가지 방법에 의하여 계산하였다. (1)은 강도감소계수를 고려하지 않은 공칭강도로서 재료의 물성치는 설계기준값을 사용한 것이다. (2)는 강도감소계수를 고려하지 않은 공칭강도로서 재료의 물성치는 실험으로부터 얻은 값을 사용한 것이다. (3)은 강도감소계수만을 고려한 극한강도로서 재료의 물성치는 설계기준값을 사용한 것이다. 이상의 세가지 방법 모두 콘크리트와 강판이 완전일체 거동한다는 가정하에 가장 위험단면에서의 단면력을 계산한 것으로 최대모멘트가 발생하는 구간에서 계산된 값이다.

전체적으로 강판휨보강시험체의 경우 이론적으로 예상한 파괴하중보다 훨씬 낮은 하중에서 파괴에 이른 것을 알 수 있다. 이는 무보강시험체와는 달리 강판보강시험체의 경우 강판의 항복 및 콘크리트의 압축파괴 이외의 다른 원인에 의해 파괴가 일어난다는 것을 말해주고 있는 것이다. 즉, 강판휨보강시험체의 경우 기존의 강도설계법에 의한 휨 및 전단에 대한 설계이외에 박리거동에 의한 영향도 고려해야 함을 알 수 있다.

표 3 파괴하중 및 박리하중

시험체명	파괴하중(kN)				실험치 박리하중 (kN)	박리하중 (kN)	전단응력 (Mpa)	법선응력 (Mpa)	파괴양상
	실험치	이론치							
		(1)	(2)	(3)					
Cont-F-Mo	146.3	126.1	141.1	107.2	-	-	-	-	-
Cont-F-Cy	143.0	126.1	141.1	107.2	-	-	-	-	-
F-S-Ld1	190.1	282.6	329.7	240.2	113.4	197.1	2.88	1.31	Ri, Sh
F-S-Ld2	200.3	282.6	329.7	240.2	136.3	132.6	5.14	2.34	Ri, Sh
F-S-Ld3	101.0	282.6	329.7	240.2	147.1	132.6	5.55	2.52	Ri, Sh
F-S-Lt1	158.0	282.6	329.7	240.2	110.7	99.7	5.55	2.53	Ri
F-S-Lt2	155.6	161.7	180.9	137.4	76.9	51.9	7.41	3.37	Ri
F-S-Th1	204.0	223.9	259.5	190.3	161.4	132.3	6.10	2.44	Ri, Yi, Sh
F-S-Th2	103.1	310.0	362.2	263.5	143.2	133.8	5.35	2.55	Ri, Sh
F-S-Th3	179.0	384.2	449.2	326.6	110.6	138.4	4.00	2.11	Ri, Se, Sh
F-S-Th4	186.4	446.7	520.5	379.7	98.2	142.7	3.44	1.95	Ri, Se, Sh
F-S-Lr1	229.8	410.0	479.1	348.5	149.2	-	-	-	Ri, Se, Sh
F-S-Lr3	225.9	313.7	353.6	266.6	126.2	-	-	-	Ri, Se, Sh
F-S-Ab1	167.5	282.6	329.7	240.2	143.7	132.6	5.42	2.47	Se, Yi
F-S-Ab3	194.9	282.6	329.7	240.2	144.3	132.6	5.44	2.48	Ri, Se, Sh
F-S-Sd1	301.9	≥282.6	≥329.7	≥240.2	214.7	>132.6	8.10	3.68	Ri, Yi, Sh, Co
F-S-Sd2	430.8	≥282.6	≥329.7	≥240.2	308.3	>132.6	11.63	5.29	Ri, Yi, Sh

Ri : Ripoff-콘크리트물고 ~떨어지는 현상

Se : Separation-보강재의 박리#

Dc : Diagonal ~Crack#

Yi : Yield-철근~및~강판의 ~항복#

Co : Compression ~failure-콘크리트 ~압축파괴

2.2.3 기타 특성 분석

본 연구에서는 다이얼게이지 및 변형게이지를 이용하여 치짐, 인장 및 압축철근의 변형도, 콘크리트의 변형도, 강판의 변형도를 측정하였다. 이를 토대로 하여 시험체의 파괴양상, 파괴시점, 강성의 변화, 박리시점들을 확인하였으며, 각 실험변수별 효과를 분석하였으나, 이에 대한 자세한 설명은 설명하기로 한다.

2.2.4 박리하중

앞서 제시한 표 3에 강판휨보강시험체에 대한 강판의 박리하중과 기존의 연구결과로써 분석한 Roberts의 박리하중산정에 대한 이론을 이용하여 계산한 박리하중을 표로써 제시한 것이다.

Roberts의 박리이론은 접착계면에서 발생하는 전단응력이 실제의 콘크리트+접착제+강판 사이의 전단강도에 이르게 되면 계면파괴가 일어나 박리(separation)가 발생한다고 제시하고 있다. 하지만 본 실험결과를 볼 때 박리보다도 rip off현상에 의해 파괴가 일어나는 경우가 더욱 많았다.

따라서, Roberts의 박리이론에 근거하여 rip off가 발생한 시험체의 박리하중을 예측하고 시험치와 비교한다는 것은 무리가 있다고 판단된다.

즉, rip off현상에 의한 박리하중(박리:separation과 rip off는 분명 차이가 있지만, 편의상 그 중 어느 현상이 일어나는 하중을 박리하중이라 칭한다.)을 예측하기 위해서는 콘크리트의 인장강도와 연관을 가져야 한다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 rip off, rip off와 separation이 함께 발생하는 경우를 구분하여 박리하중 예측식을 제안하였다. 또한 표 3에 파괴양상을 함께 제시하여 박리거동 분석시 이용하였다.

3. 박리하중 산정식 제안

본 연구결과를 토대로 할 때 강판의 길이를 최대한 길게 하는 것이 바람직하므로, 강판을 최대한 길게 보강한다는 가정하에서는 강판의 두께가 박리하중에 가장 큰 영향을 미치는 변수가 된다. 따라서, 강판의 두께에 따른 박리하중의 변화를 예측하는 것이 중요하며, 이 절에서는 Roberts의 이론에 의한 계산값과 실험값을 비교함으로써 수정·보완된 박리하중 예측식의 토대를 마련하도록 하였다.

먼저 separation에 의한 박리하중의 급격한 저하를 피하기 위한 두께 제한은 기존의 최대 철근비에 의한 두께 제한으로 할 수 있다.

$$d_p \leq \frac{b_c d \rho_{\max} - A_s \sigma_{ys}}{b_c \sigma_{yp}} \quad (1)$$

Rip off는 강판 단부의 콘크리트부에서 파괴가 발생하는 것이므로, 콘크리트에 작용하는 주응력의 크기가 콘크리트의 휨인장응력과 관련이 있는 일정 한계에 도달할 때 파괴가 발생하는 것이며, separation은 강판단부에서의 전단응력값이 0이므로, 강판단부가 아닌 강판단부로부터 떨어진 지점의 접착층에서 발생하는 전단응력이 계면접착응력을 초과할 때 발생하는 것이다. 먼저, rip off의 경우에 대해서 정리하면, 파괴시의 주응력이 콘크리트 활렬인장강도와 선형관계가 있다고 하면 식 2와 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{(\sigma_0 + \sigma_s)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 - \sigma_s}{2}\right)^2 + \tau_0^2} \geq \phi f'_c \quad (\text{Rip off의 경우}) \quad (2)$$

여기서, f_c 는 콘크리트의 활렬인장강도이고, ϕ 는 선형계수이다.

4점재하의 경우 Rip off에 의한 박리하중 예측식을 전개하면 다음과 같다. 한편, Roberts의 이론은 제안사항으로 M_0 대신 지점에서 $(d + d_p)/2$ 만큼 떨어진 점의 모멘트인 M^* 로 대체함으로써 강판두께에 의한 영향이 적어지는 문제점을 지니고 있다. 따라서, M_0 를 그대로 사용하여 전단응력을 구하였으며 또한, Roberts의 이론에서 m_{20} 대신 강판에 작용하는 인장응력과 강판중양에서의 거리의 곱을 강판중양에 대해 적분하여 모멘트를 구하면 범선응력은 식 3이 된다. 각 식을 A, B, C, D라는 문자를 사용하여 간단히 표현하였다.

$$\sigma_0 = \frac{Pb_p d_p^3}{12I_b} (\gamma + L\gamma^2) + \tau_0 d_p \left(\frac{K_n}{4E_p I_p} \right)^{1/4} \quad (3)$$

$$= PB + PA d_p \gamma = PB + PC$$

강판이 콘크리트에 접촉되어 있어서 선행하중 재하시에 발생한 휩균열이 보강후에 더 이상 진전되지 않으며, 강판 단부 근처의 콘크리트부에는 균열이 존재하지 않으므로 완전균열단면으로 볼 수는 없다. 즉, 콘크리트에 작용하는 인장응력은 0과 비균열단면에서의 σ_x 값 사이에 존재하므로, 실제로는 다음 식 5에서 보듯이 0과 1 사이의 계수를 곱한 값이 된다.

$$\sigma_x = \beta P \frac{E_c L (h_p - X)}{2E_p I} = PD \quad (0 < \beta < 1) \quad (4)$$

식 3과 식 4를 식 2에 대입하면 박리하중은 식 5와 같이 된다.

$$P = \frac{\phi f_c}{\frac{B+C+D}{2} + \sqrt{\left(\frac{B+C-D}{2}\right)^2 + A^2}} \quad (5)$$

한편, separation에 의한 박리하중 계산식은 다음 식 6과 같이 최대 전단응력이 계면접착응력을 초과할 때 발생한다.

$$\tau \geq \tau_{interface} \quad (\text{Saparation의 경우}) \quad (6)$$

4. 결 론

본 연구에서는 강판휨보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동에 대해 살펴보고, 거동에 지배적 영향을 미치는 박리하중의 예측식을 제안하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 철근콘크리트보부재를 대상으로 선행하중의 크기, 강판의 길이, 강판의 두께, 강판의 층 수, 앵커 볼트의 효과, 측면보강 등을 변수로 하여 보강효과를 검토하였다.
- 2) 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 현상(rip off)이 파괴를 좌우하는 원인이며, 강판의 길이가 짧아질수록 박리하중이 감소하여 파괴하중이 급격히 감소함을 알 수 있었다.

- 3) 강판의 두께가 박리하중을 결정짓는 중요한 인자이며, 어느 한계 이상의 두께에서는 separation이 함께 발생함으로써 박리하중을 급격히 감소시켜 휨강도를 저하시키므로 평형파괴를 유도하는 최대 철근비로써 최대 강판두께를 제한하도록 제안하였다.
- 4) 앵커볼트가 단부에서의 박리를 구속하는 효과를 나타냈지만, 앵커볼트의 간격은 박리거동에 영향을 거의 미치지 않음을 알 수 있었다.
- 5) 지점으로부터 강판의 단부까지의 거리가 증가함에 따라 박리하중은 감소하며, 특히 지점부위에서 박리하중의 감소가 급격하므로 강판을 최대한 길게 보강하는 것이 바람직하다.
- 6) Roberts의 이론은 강판의 두께가 두꺼워짐에 따라 박리하중이 오히려 증가하는 경향을 보이고 있어 실험결과와 차이를 보이고 있다. 이것은 접착계면에서의 파괴가 아닌 강판이 콘크리트를 물고 떨어지는 rip off에 의해 파괴가 발생하기 때문이며, 또한 Roberts 이론의 전개과정에서 M_0 대신 M^* 로 대체하는데서 기인한다.
- 7) 강판휨보강시 파괴에 지배적인 영향을 미치는 박리하중에 대해, 최대철근비를 초과하지 않는 강판두께의 범위안에서 적용할 수 있는 예측식을 제안하였다.

참 고 문 헌

1. Y.N Ziraba, M.H. Baluch Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaaaimani, and I. A. Basunbul, "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates", ACI Structural Journal, November-December 1994, pp.639-646
2. Johns R. Swamy R. N., and Bloxham, "Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", The Structural Engineering, Vol. 65A, No. 2, February 1987, pp.59-68
3. Johns R. Swamy R. N., and Charif A., "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", The Structural Engineering, Vol. 66, March 1988, pp.85-94
4. Roberts T. M., "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams", The Structural Engineering, Vol. 67, June 1989, pp.229-233