

강판 휨보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동

Structural Behavior of RC Beams Strengthened with Steel Plates



오병환*

Oh, Byung Hwan



조재열**

Cho, Jae Yeol



강동옥***

Kang, Dong Ok

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. Many studies have dealt with strengthening by epoxy-bonded steel plates. However, the effects of various influencing factors have not been clarified on the behavior of strengthened RC beams. Particularly, the studies on the separation loads that affect failure of the beams are relatively insufficient.

In this study, major test parameters include 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. A series of reinforced concrete beams are strengthened by steel plates according to above test parameters. The deflections, failure loads, strains of reinforcing bar, concrete and plate are measured at each loading step under third point loading condition. The failure modes and separation loads are analyzed from these measured data.

* 정회원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 장회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

*** 정회원, 삼성물산 건설부문 연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주
시면 1998년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

It is found from this study that the length and thickness of steel plates have great influences on the failure mechanism and failure load of strengthened beams. The effects of plate layers, side strengthening, and anchor bolts are also discussed. The present study provides various useful findings on the structural behavior of strengthened beams and forms a firm base for future application of strengthening procedures.

Keywords : RC beam, strengthening, steel plate, separation load, failure modes, rip-off failure

1. 서론

최근 들어 우리 나라는 장대교량 및 대형건물의 붕괴 등 구조물의 파괴 사고로 인하여, 기존 및 신설구조물의 안전성에 대한 관심이 그 어느 때보다도 높아지고 있다. 특히, 기존의 교량들은 1970년대 이후 급속한 경제발전과 더불어 교통량과 하중이 증가함에 따라 급속한 손상을 받고 있으며, 시공 당시의 설계 기준과 현재의 교통상황이 현저하게 차이가 나는 교량에 있어서는 손상 정도가 더욱 심각한 실정이다. 최근 들어 이렇게 손상된 구조물의 내하력을 평가하는 방안에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있으나 손상에 대한 합리적이고 적절한 보강 및 유지관리에 대한 연구는 미흡한 편이다. 또한, 경제적인 측면에서 일방적인 신설보다는 가능한 한 현 상태를 보수·보강하여 구조물 잔여수명을 연장하고 구조물의 내하력을 회복시키거나 증가시키는 방안이 더욱 시급하게 요구되고 있다.

보강공법에 있어서 설계방법이나 보강이 구조물에 미치는 영향 및 성능평가에 대한 이론적인 연구가 정립되지 않아 보수·보강공법의 선정, 보강량, 시공절차 및 평가 등이 반경험적이고 외국연구자료에 의존하고 있는 실정이다. [2]

현재, 구조적으로 손상을 입은 구조물들에 대한 보강방법으로는 강판, 카본슈트, 아라미드섬유슈트 등을 이용한 접착공법과 단면증가공법, 거더증설공법, 프리스트레스도입공법 등 여러 가지가 있으나 가장 널리 쓰이는 방법은 강판접착공법이다. 1970년대 들어와 보편화되기 시작한 강판접착공법의 장점은 시

공기간이 짧고 사용중인 구조물에도 시공가능하며 인장부는 물론이고 압축력과 전단을 받는 부분에도 적용이 가능하다는 점이다. 이 공법에 대해서는 지금까지 세계적으로 많은 연구가 진행되어 오고 있으나, 보의 구조적 거동에 영향을 미치는 다양한 인자들의 영향이나 강판의 변형, 강성, 파괴형태 등에 미치는 영향에 대해서는 체계적인 평가가 이루어지지 않고 있으며, 특히 강판접착공법에서 파괴에 큰 영향을 미치는 박리하중에 대한 연구는 미흡한 실정이다. [3,4,7,11,13]

따라서, 본 연구에서는 철근콘크리트 보구조물의 보강이론을 정립하기 위하여 가장 널리 사용되고 있는 강판접착공법을 사용하여 휨에 대한 보강성능시험을 수행하고, 그 결과를 분석하여 박리하중을 계산하는 보강이론을 정립하고자 한다.

주요실험변수로는 선행하중의 크기, 강판의 길이, 강판의 두께, 앵커볼트의 간격과 유무, 강판의 층수, 측면보강 유무 등으로써 실제 적용 가능한 변수들을 선택하였다. 또한, 구조물의 손상을 유도하기 위하여 선행하중을 재하한 후 보강을 하는 1 주기(Cycle) 하중재하방식을 택하였다.

실험결과를 이용하여 파괴형태, 인장, 압축 및 전단 철근의 변형도, 콘크리트와 강판의 변형도, 치짐을 분석하였다. 또한 각 변수별로 파괴하중에 미치는 효과를 비교·분석함으로써 강판보강시험체의 주파괴 원인인 박리거동을 분석하였다.

2. 철근콘크리트 보부재의 강판보강실험

2.1 실험내용

2.1.1 실험재료

보강실험에 앞서 각 재료에 대한 전반적인 역학적 특성실험을 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 표 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of material

Concrete	Compressive Strength	1.4 MPa
	Split Tensile Strength	2.25 MPa
	Elastic Modulus	26,580 MPa
Reinforcing Bars	Yield Strength	470 MPa
	Elastic Modulus	204,000 MPa
Steel Plate	Yield Strength	292 MPa
	Elastic Modulus	210,000 MPa
Adhesive	Elastic Modulus (Tens.)	3,000 MPa

2.1.2 시험체제원

가로, 세로, 길이 각각 150, 250, 1700mm인 보 시험체 17개를 대상으로 휨하중에 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. 한편, 인장철근의 경우 SD40의 D13철근 3개를, 압축철근의 경우 SD40의 D13철근 2개를, 스티럽은 SD40의 D10철근을 사용하였다.

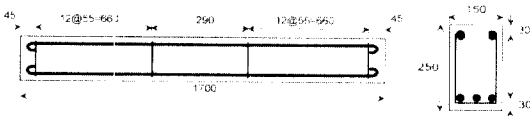


Fig. 1 Beam dimension and reinforcement details

2.1.3 실험변수

본 실험에서 강판휨보강시 고려한 변수는 보강 전에 발생한 선행하중의 크기, 강판의 길이, 강판의 두께, 강판의 층수, 앵커볼트의 유무 및 간격, 측면보강의 유무이며, 가장 중요한 변수는 강판의 길이와 강판의 두께이다. 각 실험변수에 따른 시험체명은 표 2에 제시하였고, 시험체의 형상은 그림 2와 같다. 이때, 모든 변수의 비교대상이 되는 기준은 시험체 P3(=L1)이다.

Table 2 Details of test beams

Test Beam Series	Magnitude of Load	Plate Length (mm)	Plate Thickness (mm)	Number of Anchor Bolts (mm)	Number of Plate Layers (number)	Side Plate Height (mm)	Remarks
No Strength extra	Control	0	-	-	-	-	
	Control Cycle	0	-	-	-	-	
Preload Effect	E1	100	1460	5	4	1	-
	E2	100	1460	5	4	1	-
	E3	100	1460	5	4	1	-
Plate Length Effect	L1	100	1280	5	4	1	-
	L2	100	720	5	4	1	-
Plate Thickness Effect	T1	100	1460	3	4	1	-
	T2	100	1460	6	4	1	-
	T3	100	1460	9	4	1	-
Layer Effect	L1	100	1460	5	4	2	- 2 Layers
	L2	100	1460	3	4	2	- 2 Layers
Anchor Bolt Effect	A1	100	1460	5	0	1	-
	A2	100	1460	5	4	1	-
Side Plate Effect	S1	100	1460	5	4	1	125
	S2	100	1460	5	4	1	250

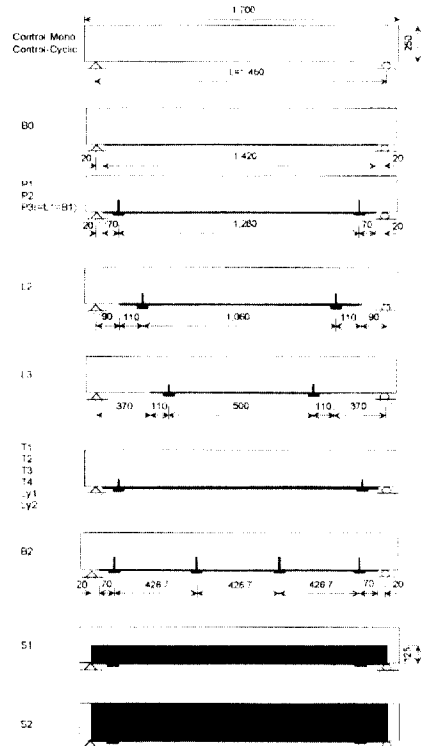


Fig. 2 Various repair schemes for damaged beam

2.1.4 하중재하방법

부보강기준시험체의 파괴하중인 140kN의 70%에 해당하는 100kN을 선행하중으로 재하하여 하중에 의한 손상을 가한 후, 하중을 제거한 상태에서 보강을 하고, 다시 파괴시까지 하중을 재하하였다. 앞으로는 이와 같은 하중재하방식을 1주기 하중재하방식(1 cyclic loading)으로 칭한다.

기준시험체는 부보강시험체 1개를 파괴시까지 재하(monotonic loading)하고, 1개는 다른 보강시험체와 같이 보강하지 않은 상태에서 1주기 하중재하(1 cyclic loading)방식으로 시험을 하여 선행하중의 효과 및 보강효과를 검토하는데 기준으로 삼았다.

P1과 P2의 경우는 각각 선행하중을 0kN과 60kN으로 가하여 선행하중의 크기가 100kN인 P3와 비교함으로써 선행하중의 크기가 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

하중은 보중앙으로부터 250mm 떨어진 두점에 재하하는 3등분점하중법으로 재하하였으며, 그림 3에 하중위치와 측정장치들의 위치를 표현하였다.

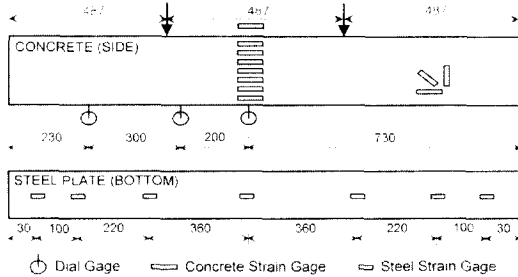


Fig. 3 Measurement schemes

3. 실험결과 및 분석

3.1 파괴양상

그림 4는 부보강기준시험체와 보강시험체의 균열 및 파괴양상이다.

부보강기준시험체가 인장철근의 항복에 이은 압축파괴의 양상을 나타내는 것과는 달리 강관휘보강시험체의 경우에는 강관이 콘크리트를 붙고 떨어지면 시(rip off) 사인장균열로 발전하여 결국 전단파괴가 발생하는 것이 지배적인 파괴양상이라는 점이다.[4] 그러나, 경우에 따라서는 인장철근의 항복(시험체

B0), 강관의 항복(시험체 T1, S1, S2), 그리고 압축부의 파괴(S1)가 나타나기도 하였다. S1은 측면보강이 중립축이까지만 인장과 전단에 대해 보강이 되었기 때문에 상대적으로 약한 콘크리트 압축부의 파괴가 발생한 것이고, S2는 중립축 위까지 전구간에 측면 보강된 강관이 압축저항력을 증가시켰기 때문에 압축파괴 이전에 강관이 항복한 것으로 나타나고 있다.

강관이 콘크리트를 붙고떨어지는 현상(rip off)은 강관의 단부에서부터 시작하여, 사인장균열로 발전하거나 약 40mm의 높이(인장철근 바로 밑)를 유지하며 종방향(보시험체의 길이방향)으로 발전하는 양상이 복합적으로 나타났는데, 비록 같은 길이의 강관이라도 두께가 두꺼워짐에 따라 강관이 콘크리트를 붙고떨어지는 양상(rip off)에서 rip off와 함께 접촉계면에서의 박리(separation)가 일어나는 형태로 파괴양상이 바뀌었다.

대부분의 시험체에서 하중재하점사이의 구간에서는 새로운 휨균열의 발생이라든지 선행하중재하시 발생한 휨인장균열의 발전은 거의 없었다.

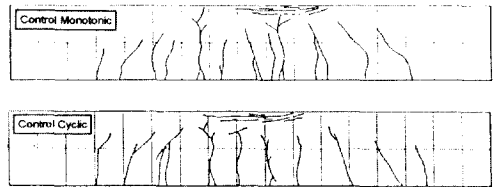
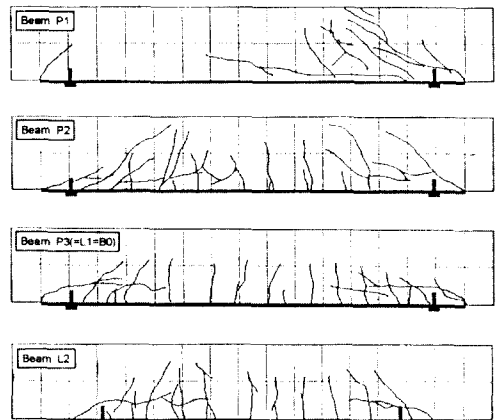


Fig. 4(a) Crack patterns and failure modes of Non-strengthened beams



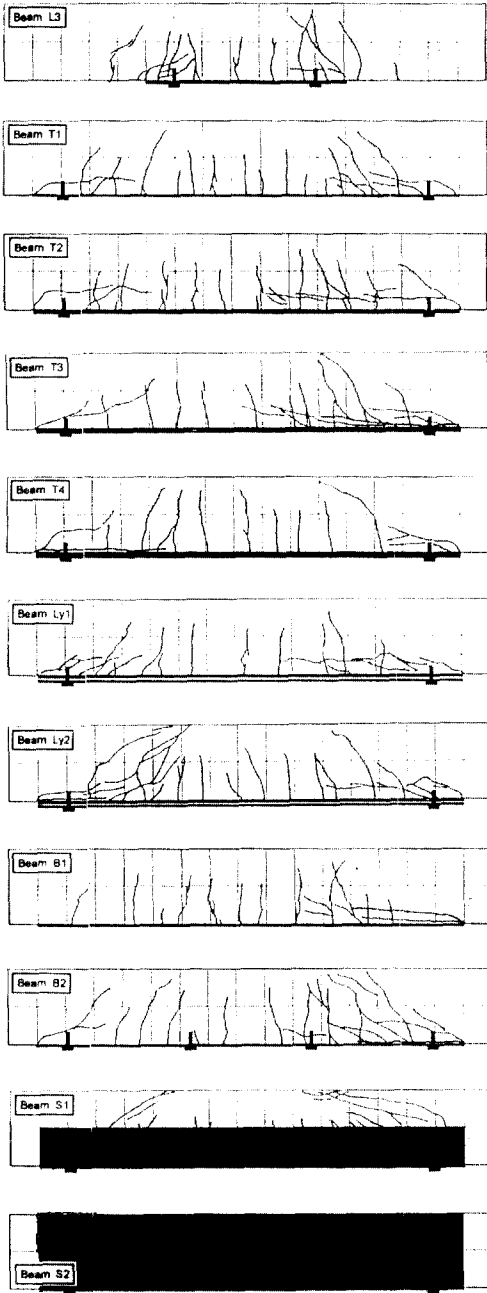


Fig. 4(b) Crack patterns and failure modes of strengthened beams

3.2 파괴하중

표 3은 강관휨보강시험체의 파괴하중을 표로써 제시한 것이다. 실험값은 실험결과로부터 얻은 최대하

중을 나타내며, 이론값은 다음의 세 가지 방법에 의하여 계산된 저항력이다.

(1) 강도감소계수를 고려하지 않은 공칭강도모써 재료의 물성치는 설계기준값을 사용한 것이다.

(2) 강도감소계수를 고려하지 않은 공칭강도모써 재료의 물성치는 실험으로부터 얻은 값을 사용한 것이다.

(3) 강도감소계수만을 고려한 극한강도모써 재료의 물성치는 설계기준값을 사용한 것이다.

위의 세 가지 방법 모두 콘크리트와 강관이 완전일체거동 한다는 가정 하에 가장 위험단면에서의 단면력을 계산한 것으로 최대모멘트가 발생하는 구간에서 계산된 값이다.

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

표 3에서 보듯이 무보강시험체의 경우는 (2)항의 기존의 보이론으로 계산한 값과 실제 파괴하중이 유사한 반면, 보강시험체의 경우는 실제 파괴하중이 훨씬 작은 하중에서 일어나고 있다. 이것은 파괴양상에서 기술하였듯이 박리에 의해 파괴하중이 큰 영향을 받는 것을 뜻하며, 따라서 보강설계나 해석시에 박리에 대한 검토가 반드시 뒤따라야 한다.

선행하중크기에 따라서는 무보강기준시험체에 비해 약 40%정도의 강도증가를 나타내며 파괴하중의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 오히려 미세하게나마 선행하중의 크기가 증가함에 따라 파괴하중이 증가하고 있는데, 이것은 선행하중에 의해 발생한 균열이 단면이차모멘트를 감소시키고, 이로 인해 박리하중과 파괴하중이 감소할 것이라는 일반적인 예상과는 다른 결과이다. 이것은 파괴의 원인이 인장파괴나 압축파괴 또는 전단파괴가 아닌 rip off에 의한 파괴이기 때문인 것으로 사료된다.

강관길이의 영향을 보면, L2는 L1에 비해 각 단부로부터 약 9cm정도 약간 짧아짐에도 불구하고 급격

Table 3 Failure loads of beams

Beam	Central Deflection (mm)			
	Experimental	Theoretical		
		(1)	(2)	(3)
Cont-Mono	146.3	126.1	141.1	107.2
Cont-Cyclic	143.0	126.1	141.1	107.2
P1	190.1	282.6	329.7	240.2
P2	200.3	282.6	329.7	240.2
P3	201.0	282.6	329.7	240.2
L1	201.0	282.6	329.7	240.2
L2	158.0	282.6	329.7	240.2
L3	155.6	161.7	180.9	137.4
T1	204.0	224.9	259.5	190.3
T2	203.1	310.0	362.2	263.5
T3	179.0	384.2	449.2	326.6
T4	186.4	446.7	520.5	379.7
Ly1	229.8	410.0	479.1	348.5
Ly2	225.9	313.7	353.6	266.6
B0	167.5	282.6	329.7	240.2
B1	201.0	282.6	329.7	240.2
B2	194.9	282.6	329.7	240.2
S1	301.9	>282.6	>329.7	>240.2
S2	430.8	>282.6	>329.7	>240.2

한 강도의 감소를 보임을 알 수 있다. L3의 경우는 강관의 길이가 너무 짧아 강관 단부에서 휨에 의한 파괴가 발생한 경우이다. 따라서, 강관길이는 파괴하중에 큰 영향을 미치며, 강관길이를 길게 하는 것이 보강효과가 커서 오히려 경제적임을 알 수 있다.

표 3에서 보듯이 강관의 두께가 증가함에 따라 실험값과 이론값의 차이는 점점 증가하고 있다. 이것은 일체기둥의 가정 하에 계산된 이론값은 보강관 두께가 증가함에 따라 증가하나, 실제 실험결과는 강관 두께가 증가함에 따라 박리가 빨리 일어나 박리하중이 감소함으로써 파괴하중이 줄어들거나 또는 이론적인 증가량보다 적게 증가하기 때문이다. 강관의 두께가 어느 한도에 이르면 파괴양상이 바뀌듯이 휨보강성능도 강관이 어느 두께 이상이 되는 순간 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 비추어 볼 때, rip off와 함께 접착계면에서의 박리(separation)가 발생하는 경우에는 휨보강성능이 급격히 저하되고 있음을 알 수 있다.

층효과에 대해서 살펴보면, Ly1과 Ly2의 경우에는 같은 두께인 T2와 T4에 비해 보강효과가 19%와 27%의 증가를 보였다. 이것은 강관의 유효두께는 같더라도 층으로 나누어 부착을 하는 경우에는 응력전

달과정에서 강관+접착제+콘크리트계면 사이에 발생하는 부착응력이 감소하여 종국적으로 박리하중을 증가시켜 파괴하중을 높이는 결과를 가져온 것으로 판단된다.

표 3에서 보듯이 앵커볼트가 없는 B0는 20%의 강도증진효과를 보이는 반면 앵커볼트가 있는 B1과 B2는 각각 41%와 36%의 강도증진효과를 보이고 있다. 이것으로써 앵커볼트의 유무는 파괴하중에 미치는 영향이 크며, 앵커볼트의 간격은 파괴하중에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.

측면보강을 한 S1과 S2의 경우, 인장부보강만 고려하여 계산한 예상파괴하중 329.7kN과 비교해 보면, 파괴하중이 301.9kN인 S1의 경우는 박리를 제어하는데는 어느 정도 효과가 있었지만 파괴하중이 430.8kN인 S2는 인장부(하면)에 부착된 강관이 박리를 어느 정도 방지하였으나 측면에서 강관 박리가 일어나 전단파괴가 일어났음을 알 수 있다.

3.3 하중-처짐 관계

그림 5(b)는 선행하중제하, 하중제거 그리고 하중재제하의 과정을 포함한 강관휨보강시험체에 대한 하중-처짐관계를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 5(a)의 무보강시험체의 그래프와 비교하여 보면, 휨강성의 증가를 확인하게 볼 수 있다.

표 4는 하중단계별 처짐값을 나타낸 것인데, 하중단계 60kN은 강도감소계수와 하중증가계수를 고려하여 얻은 하중이고, 100kN은 하중증가계수는 고려하지 않고 강도감소계수만을 고려하여 얻은 하중이며, 140kN은 무보강시험체의 파괴하중을 나타낸다.

표 4를 살펴보면, 선행하중이 단성영역내의 하중이므로 선행하중의 크기는 처짐량에 거의 영향을 미치지 못했으며, 앵커볼트의 유무도 영향이 적어 처짐량이 비슷했다. 강관의 길이가 짧을수록 보의 강성이 작으므로 처짐량은 증가하였다. 또한, 두께가 두꺼워짐에 따라 처짐이 줄어들다가 늘어나는 경향을 보이고 있는데, 이것은 일정 두께 이상이 되면 박리에 의한 영향의 증가로 인해 보의 강성이 완전일체기둥을 가정한 이론값에 미치지 못하기 때문으로 생각된다.

같은 두께라도 2층으로 보강한 경우가 1층으로 보강한 경우보다 많은 처짐량을 보이고 있는 것으로 보아 2층의 경우에 파괴하중이 보다 크게 나오는 것은

Table 4 Central deflections at various load levels

Beam	Central Deflection (mm)			
	60 kN	100 kN	140 kN	at Failure Load
Cont-Mono	1.64	3.29	5.04	6.46
Cont-Cyclic	2.59	3.92	5.68	7.67
P1	1.10	1.70	2.72	5.45
P2	1.23	1.63	2.12	4.28
P3	1.30	1.69	2.63	5.35
L1	1.30	1.69	2.63	5.35
L2	1.47	1.91	2.95	4.16
L3	1.40	2.14	3.30	5.58
T1	1.52	2.11	2.71	5.76
T2	1.71	2.26	2.73	6.31
T3	2.61	3.77	4.68	6.87
T4	1.23	1.70	2.47	4.4
Ly1	2.30	2.94	3.71	7.60
Ly2	2.01	2.54	3.11	6.99
B0	1.30	1.69	2.63	5.35
B1	1.85	2.41	2.88	4.61
B2	1.67	2.48	3.10	5.63
S1	1.28	1.76	2.14	8.17
S2	1.63	1.97	2.27	6.17

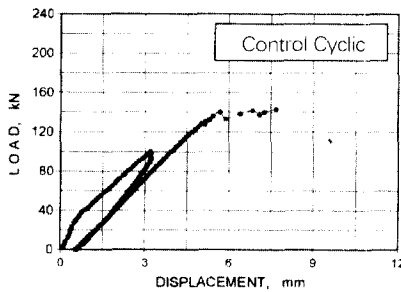


Fig. 5(a) Applied load versus central deflection curves of control specimens

2층 사이의 접착제가 완충작용으로써 박리를 제어하는 효과이며, 오히려 강성은 떨어짐을 알 수 있다.

측면보강을 한 S1과 S2의 경우, 처짐에 대한 제어가 각각 기준시험체에 비해 62%와 60%로써 가장 좋은 처짐제어효과를 나타냈다. 이것은 측면보강으로 인하여 강성의 증가뿐만 아니라 부착력의 증대로 인장부에 부착된 강관이 제강성을 발휘한 결과라고 판단된다.

3.4 하중-인장철근변형도관계

그림 6(b)는 강관휨보강시험체에 대한 하중-인장철근변형도관계를 그래프로 나타낸 것이다. 하중-처짐관계 그래프와 마찬가지로 선형하중재하, 하중제거 그리고 하중재제하의 과정을 포함시켜 그림 6(a)의 무보강시험체의 그림과 비교하였다. 그림 6(b)에서 볼 때, 최대하중 도달이후 약 1000×10^{-6} 주위에서 인장철근이 마치 항복한 것과 같은 거동을 나타내

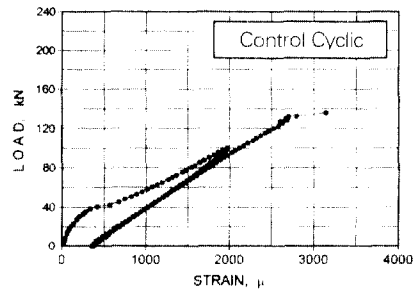


Fig. 6(a) Applied load versus tensile strain of reinforcing bars curves of control specimens

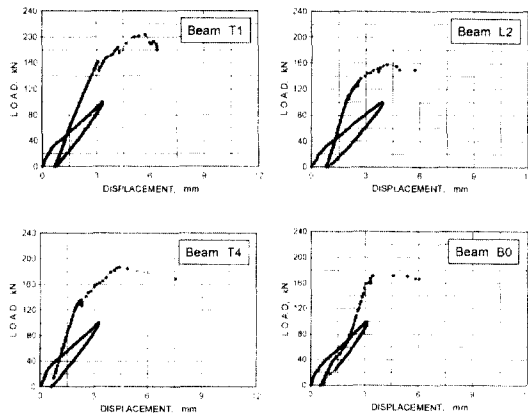


Fig. 5(b) Applied load versus central deflection curves of strengthened specimens

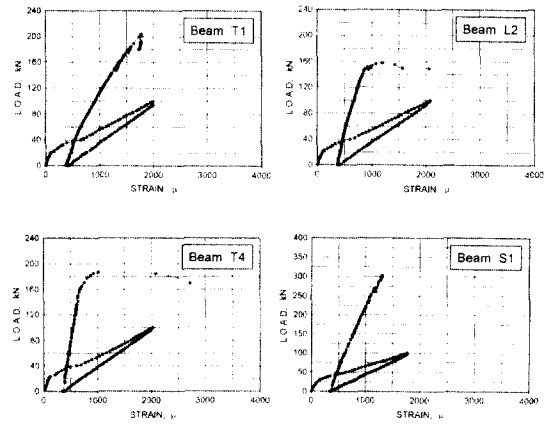


Fig. 6(b) Applied load versus tensile strain of reinforcing bars curves of strengthened specimens

Table 5 Tensile strains of reinforcing bars at various load levels

Beam	Tensile Strain ($\times 10^3$)			
	60 kN	100 kN	140 kN	at Failure Load
Cont-Mono	925	1781	Y	Y
Cont-Cyclic	1378	2116	Y	Y
P1	149	367	608	1023
P2	485	671	865	1231
P3	632	853	1130	1723
L1	632	853	1130	1723
L2	540	697	855	1291
L3	489	645	890	1446
T1	655	933	1232	1826
T2	509	651	787	1756
T3	416	600	724	1814
T4	466	543	620	1020
Ly1	494	611	708	1263
Ly2	374	738	901	1533
B0	632	853	1130	1723
B1	567	722	884	1547
B2	449	539	631	820
S1	508	645	789	1371
S2	508	618	711	1915

고 있는데, 이것은 강관이 콘크리트를 물고떨어지는 rip off 현상으로 인하여 철근의 피복이 떨어짐과 동시에 강관이 부담하던 힘이 갑자기 인장철근으로 전달되어, 단시간에 큰 변형도를 유발한 것이다.

표 5는 하중단계별 인장철근변형도를 나타낸 것인데, 하중-치짐관계에서와 마찬가지로 3단계의 하중 단계로 나누어 제시하였으며, Y는 항복(yield)을 의미한다.

무보강기준시험체들이 인장철근의 항복과 함께 파괴가 일어난 반면 강관보강시험체들은 파괴에 이르더라도 변형도가 2000×10^{-3} 미만으로 항복변형도(철근 인장시험결과 약 2300×10^{-3})에 이르지 않았다. 결국 철근의 인장변형을 제어하는데 아주 효과적인을 알 수가 있으며, 파괴 또한 인장철근의 항복에 의한 인장파괴가 아니라는 것을 알 수 있다.

표 5에서 볼 수 있듯이 선행하중을 많이 가한 P3가 선행하중을 적게 준 P1보다 인장철근변형이 크게 발생하고 있고 강관 두께가 두꺼울수록 즉, T4가 파괴 시 인장 철근 변형도가 작는데 그 이유는 강관보강 효과로 변형이 작다가 강관의 조기 박리로 인하여 인장철근의 변형이 크게 발생되기 이전에 부재파괴가 일어나기 때문인 것으로 나타나고 있다. 또한 앵커볼

트가 있는 경우 보강효과가 커져 인장철근 변형은 상대적으로 작은 것으로 사료된다.

3.5 하중-콘크리트압축변형도관계

다음 표 6은 강관휘보강시험체에 대한 하중-콘크리트압축변형도관계를 하중단계별로 나타낸 것이다.

표 6에서 볼 수 있듯이 전체적으로 각 보강시험체에서 무보강시험체보다 약 40~60% 정도의 압축변형도 제어효과가 있었는데, 이것은 인장부의 보강으로 인하여 중립축이 내려감으로써 최상단 콘크리트의 압축변형도가 줄어든 것으로 사료되고 있다.

Table 6 Compressive strains of concrete at various load levels

Beam	Compressive Strain ($\times 10^{-3}$)			
	60 kN	100 kN	140 kN	at Failure Load
Cont-Mono	-	-	-	-
Cont-Cyclic	469	760	1182	1763
P1	215	376	562	779
P2	253	420	596	863
P3	247	399	559	813
L1	247	399	559	813
L2	244	404	554	682
L3	255	420	606	951
T1	230	404	581	854
T2	206	332	478	821
T3	201	338	468	857
T4	202	334	469	684
Ly1	195	325	442	810
Ly2	231	393	546	980
B0	247	399	559	813
B1	241	398	550	794
B2	218	370	521	770
S1	225	393	555	1206
S2	162	275	390	1378

3.6 하중-강관변형도관계

그림 7은 강관휘보강시험체에 대한 하중-강관인장 변형도관계를 그래프로 나타낸 것이며, 표 7은 하중 단계별로 강관의 중앙에 부착된 변형게이지로부터 얻은 변형도를 하중 단계별로 제시한 것이다.

그림 7의 범례에 나타난 'plate(1)' 과 'plate(7)' 은 강관의 단부에 부착한 게이지를 나타내며, 'plate(4)' 는 강관의 중앙에 부착된 게이지를 뜻한다. 그림에서 볼 수 있듯이 강관의 중앙부에 붙인 게이지로부터 얻은 하중-변형도관계에서는 최대하중에

도달할 때까지 강판의 변형도가 단조증가하고 있으나, 강판의 단부에 붙인 게이지로부터 얻은 하중-변형도곡선은 최대하중에 도달하기 전 어느 시점에서 변형도가 갑자기 감소하는 양상을 나타낸다. 이는 강판의 박리(separation) 또는 rip off 현상이 시작됨으로써 강판응력이 줄어드는 것을 나타내고 있으며, 따라서 이 시점을 강판의 박리시점으로 볼 수 있다.

강판의 경우 설계공칭항복강도가 240 MPa 이며, 인장시험으로부터 얻은 항복강도는 약 292 MPa이다. 강판의 탄성계수를 210,000 MPa로 볼 때 항복에 이르기 위한 변형도는 설계치와 실험치의 경우 각

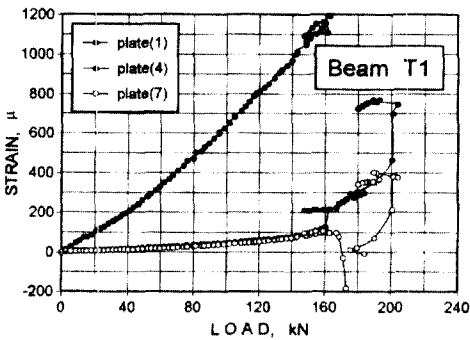


Fig. 7 Applied load versus strain of steel plates curves of strengthened specimens

Table 7 Tensile strains of steel plates at various load levels

Beam	Tensile Strain ($\times 10^{-3}$)			
	60 kN	100 kN	140 kN	at Failure Load
Cont-Mono	-	-	-	-
Cont-Cyclic	-	-	-	-
P1	221	427	707	867
P2	263	458	657	851
P3	276	455	625	843
L1	276	455	625	843
L2	218	394	568	553
L3	206	346	459	384
T1	331	634	970	1427
T2	280	450	589	852
T3	176	306	436	297
T4	139	234	339	355
Ly1	166	294	415	539
Ly2	231	423	606	902
B0	276	455	625	843
B1	235	404	568	519
B2	240	439	659	897
S1	196	353	498	1268
S2	183	308	452	2034

각 약 1143×10^{-6} 과 1390×10^{-6} 이다. 표 7에서 볼 때 파괴하중에서 이 변형도수준에 이른 시험체는 T1, S1, 그리고 S2 뿐이었다. 즉, 나머지 시험체는 강판의 효율적 이용이 되기 전에 박리 등으로 파괴된 것으로 판단된다.

선행하중이 0 kN 과 60 kN 인 경우에 있어서는 차이가 있으나, 60 kN 과 100 kN 에서는 차이가 크지 않다. 또한, 100 kN 까지는 P1의 변형도가 작다가 그 이상의 하중에서는 P1의 변형도가 선행하중을 받은 부재에 비해 크다. 이것은 휨균열을 손상부위로 생각해 보면, 이해할 수 있다. 휨균열이 있는 P2와 P3의 경우에는 휨균열부에 집중된 응력이 박리응력의 감소로 이어짐으로써 박리로 인한 강판부착길이의 감소가 늦게 일어난 것으로 생각된다.

강판길이가 짧을수록 변형도가 작게 나타나는 것은 강판길이가 짧을수록 보강효과의 저하를 의미하는 것으로 판단된다.

2층으로 보강한 Ly2의 경우에 있어서는 처짐 등과 같은 특성에서는 1층으로 보강한 T4의 경우에 비해 제어효과가 떨어지지만 강판인장변형도가 크게 나타남으로써 강판이 보다 효율적으로 사용되었음을 알 수 있다. 이것은 파괴하중이 증가한 현상을 설명해 주고 있다.

앵커볼트가 없는 B0의 경우 앵커볼트가 있는 경우와 초기에는 큰 차이가 없으나 파괴하중시에 낮은 변형도를 보이고 있다. 이것으로부터 앵커볼트가 일부 박리 발생 후에 강판이 보다 효율적으로 사용되는데 기여함을 알 수 있다.

앵커볼트의 유무 및 간격이 강판의 변형도에 미치는 영향을 보다 자세히 알아보기 위하여 하중단계별로 부착된 게이지 값을 그림 8에 나타내었다. 하중이 증가함에 따라 앵커볼트가 없는 B0의 변형도가 앵커볼트가 있는 시험체에 비해 떨어짐을 알 수 있으며, 앵커볼트의 간격은 차이를 보이고 있지 않다. 또한, 파괴시의 그림으로부터 앵커볼트의 유무에 따라 파괴시의 응력배분이 큰 차이를 보임을 알 수 있으며, 앵커볼트의 간격에 따라서는 중앙부의 변형도가 같은 것과 응력배분의 형상으로부터 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그림에서 (-)값은 박리로 인하여 응력계가 변한 결과이다.

측면보강을 한 S1과 S2는 140 kN 까지는 다른

시험체와 별다른 차이가 없으나 파괴시에 상대적으로 큰 변형도를 보이고 있다. 이것은 앞서 파괴하중에서 말한 대로 박리제어에 효과적이기 때문에 강판을 효율적으로 사용하고 있음을 뜻한다.

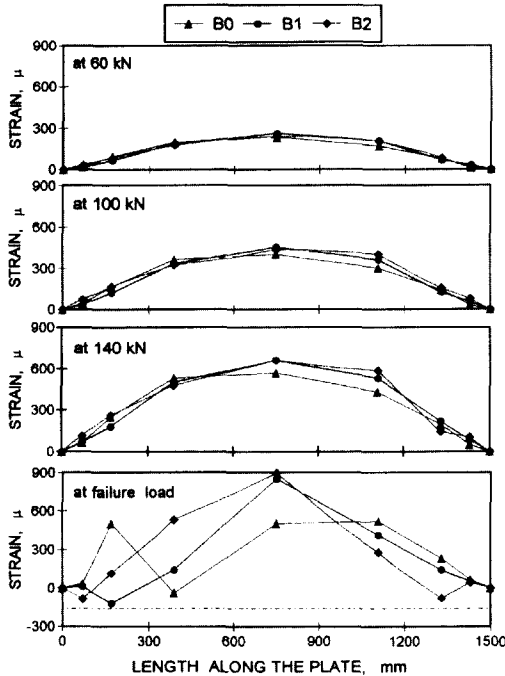


Fig. 8 Anchor-bolt effects on strain of steel plates

4. 결론

최근 들어 구조물의 노후화와 하중의 증가현상 등에 의한 부재의 내하력 부족으로 보강의 중요성이 크게 대두되고 있다. 그러나, 이러한 보강은 그 기술적 방법과 이론이 아직도 정립되지 않은 실정이다. 특히, 강판보강에서 가장 중요한 박리하중과 박리현상의 구조거동이 명확히 정리되어 있지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 강판보강공법에 영향을 미치는 주요인자의 구조적 거동에의 영향을 분석하기 위하여 일련의 포괄적인 실험연구를 수행하였다. 실험의 주요변수로는 보강전의 선행하중의 크기, 강판의 보강길이, 강판두께, 앵커볼트의 유무 및 간격, 강판의 층수, 측면 보강여부와 보강 높이 등을 주요실험변수로 하여 포괄적인 실험을 수행하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 본 연구결과 보강이전에 작용한 선행하중의 크기는 보강후의 구조적인 성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 이것은 보강전 작용했던 하중이 어느 정도 큰 경우에도 보강후의 성능이 저하되지 않는다는 것을 보여주고 있다.

(2) 강판의 길이는 구조적 보강효과에 큰 영향을 미치며 강판의 길이가 짧은 경우 보강효과가 급격히 떨어져 보강효과가 매우 떨어짐을 규명하였다. 따라서 소요길이이상의 강판보강이 되어야 소정의 보강효과를 얻을 수 있다.

(3) 강판의 두께가 두꺼워짐에 따라 이론적으로는 보강효과가 커져야 하나 실제 실험결과 오히려 보강효과가 떨어지고 있으며 이의 주요인은 강판이 충분한 보강효과를 발휘하기 이전에 박리가 일어나기 때문으로 분석되었다. 특히 강판의 어느 정도 이상의 두께증가는 오히려 박리하중을 감소시키는 결과를 얻었다. 따라서 최대인장철근량 이내의 범위에서 강판두께가 제한되는 것이 바람직하다.

(4) 강판의 보강층수효과를 분석한 결과 같은 두께를 두 층으로 나누어 보강한 결과 오히려 보강효과가 다소 향상되는 결과를 얻었다. 이것은 각층의 두께가 얇은 경우가 박리현상에 오히려 유리함을 보여주고 있다.

(5) 앵커볼트의 효과를 분석한 결과 앵커볼트가 있는 경우에 가장 보강효과가 좋았으며, 이것은 인장부의 강판이 충분히 거동할 수 있는 정착효과와 함께 측면의 추가 강판이 휨강성을 추가시키기 때문으로 판단된다.

(6) 본 연구결과 강판의 휨보강은 강판의 단순박리(separation) 보다는 강판이 보강단부의 콘크리트를 물고떨어지는 현상(rip off)에 의해 파괴되는 것으로 나타났으며, 이 현상이 고려되어야 한다.

참고문헌

1. Alfarabi Sharif, G. J., Al-Sulaimani, and I. A. Basunbul, "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates", *ACI Structural Journal*, March-April 1994, pp.160-168
2. Y.N Ziraba, M.H. Baluch Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, and I. A. Basunbul, "Guidelines

- toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates", ACI Structural Journal, November-December 1994, pp.639-646
3. M. Hussain, Alfarabi Sharif, I. A. Basunbui, and M.H. Baluchi, "Flexural Behavior of Precracked Reinforced Concrete Beams Strengthened Externally by Steel Plates", ACI Structural Journal, January-February 1995, pp.14-22
 4. 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
 5. 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
 6. Swamy R. N., Johns R. and Charif A., "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams", The Structural Engineering, Vol. 67, February 1989, pp.45-54
 7. Swamy R. N., B. Hobbs and M. Roberts, "Structural Behaviour of Externally Bonded, Steel Plated RC Beams after Long-Term Exposure", The Structural Engineering, Vol. 73, August 1995, pp.255-261
 8. Philip A. Ritchie, David A. Thomas, Le-Wu Lu and Guy M. Connelly, "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics", ACI Structural Journal, July-August, 1991, pp.490-500
 9. Deric John Oehlers, and John Paul Moran, "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 4, April 1990, pp.978-993
 10. Deric John Oehlers, "Reinforced Concrete Beams with Plates Glued to Their Soffits", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 8, August 1992, pp.2023-2038
 11. S. Zhang, et. al., "Prediction of Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Steel Plates", Proc. Instn Civil Engrs Structs & Bldgs, Vol. 110, August 1995, pp257-268
 12. J. Cairns, "Load Relief during Structural Repairs to Reinforced Concrete Beams", Proc. Instn Civil Engrs Structs & Bldgs, Vol. 99, Nov 1993, pp417-427
 13. 최완철 외, "에폭시 접착강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제6권, 제1호, 1994, pp25-29
 14. 심종성 외, "강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 R/C보의 구조적 거동 특성 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집 (1), 1995, pp207-210

요 약

구조적으로 손상을 입은 구조물들에 대한 보강방법으로 강판, 카본슈트, 아라미드섬유슈트 등을 이용한 접착공법이 최근 들어 많이 사용되고 있으며, 그중 가장 널리 쓰이는 방법은 강판접착공법이다. 강판접착공법에 대해서는 많은 연구가 진행되어 오고 있으나, 보의 구조적 거동에 영향을 미치는 다양한 인자들의 영향이나 강성, 파괴양상 등에 미치는 영향들에 대해서는 체계적인 평가가 이루어지지 않은 실정이며, 특히 강판접착공법에서 파괴에 큰 영향을 미치는 박리하중에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 일련의 철근콘크리트보부재를 대상으로 하여 주요실험변수로 선행하중의 크기, 강판의 길이, 강판의 두께, 앵커볼트의 간격과 유무, 강판의 층수, 측면보강높이를 실험변수로 하여, 휨인장에 대해 강판접착공법을 적용하여 포괄적인 실험을 수행하였다. 3등분점하중법의 실험결과를 이용하여 처짐, 인장 및 압축 철근의 변형도, 콘크리트와 강판의 변형도를 분석하였고, 이를 토대로 파괴양상과 파괴하중을 분석하였다.

본 연구결과 강관길이와 강관두께, 앵커볼트의 유무 등은 보의 파괴양상과 파괴하중에 커다란 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 강관이 짧을수록 그리고 강관의 두께가 두꺼울수록 박리가 빨리 일어나며, 따라서 이들의 영향이 반드시 고려되어야 한다. 또한 강관의 보강층수도 영향을 주며 측면보강도 매우 효과적임을 보여주고 있다.

(접수일자 : 1997. 7. 22)