

강판으로 보강된 RC보의 조기파괴제어에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Control of Premature Failure of RC Beams strengthened by Steel Plates

심종성* 한만엽** 김규선*** 이인범****
Sim, Jongsung, Han, Man Yup Kim, Gyuseon Lee, Inbum

ABSTRACT

In the case of reinforced concrete beams strengthening by steel plate, sometimes these beams collapse due to the stress concentration at the ends of steel plates before the design expected failure. This kind of failure is called premature failure. This study analyzes the behavior of strengthened RC beams to control premature failure of these plated beams with either changing the geometries at the ends of plates or strengthening steel plates beside the ends. The results from the former cases show that, the effect of expanded plates sections at the ends was very small, and the beams which are rounded the ends of plates effectively increased the initial rip-off loads about 14% compared with control beam but the ultimate loads was almost same. However, the beams in the latter cases effectively increased the initial and the ultimate rip-off loads with changing failure mode, especially around 14~19% in the ultimate rip-off load comparing with control beam.

1. 서론

콘크리트 구조물은 여러 가지 원인에 의해 손상을 입게 되며 손상을 입은 구조물은 적절한 보수 및 보강공법으로 신속하게 성능을 회복시켜야 한다. 현재 국내에서 많이 이용되는 보강공법으로는 강판부착공법과 신소재인 탄소섬유수트(CFS), 탄소섬유판(CFRP), 유리섬유판(GFRP) 등을 이용한 공법이 있다. 이중 강판보강공법은 강도에 비해 무거운 자중, 부식 문제와 같은 결함이 있지만, 저렴한 비용과 확실한 시공성 때문에 현재 폭 넓게 사용되는 보강공법이다. 그러나 아직까지 강판으로 보강된 구조물에 거동에 영향을 미치는 여러 가지 변수에 대해 많은 연구가 수행중에 있으며[3,7,9,10] 특히 설계성능을 다 발휘하지 못하고 단부에서 발생하는 응력집중현상으로 인하여 조기파괴(premature

* 한양대학교 토목·환경공학과 부교수

** 아주대학교 토목공학과 부교수

*** 한양대학교 산업과학연구소 연구원

**** 한양대학교 토목공학과 석사과정

failure)되는 박리파괴(rip-off failure)에 관한 연구는 아직도 국·내외적으로 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이다[3,4,5,6,7,8,11].

강판으로 보강된 RC보의 파괴메카니즘은 단부에서 콘크리트를 물고 떨어지며 파괴되는 박리파괴가 지배적이며 이는 보강재 단부의 콘크리트와 강판사이의 계면에서 집중되어 발생하는 전단응력과 수직응력으로 인해 유발된다[6,7,11]. 따라서 단부에서 발생하는 응력집중을 분산시킬수 있다면 보강재의 재료성능을 추가로 더 발휘할 수 있게 되므로 보강된 콘크리트 구조물의 내하력을 향상시킬수 있다.

본 연구에서는 폭 넓은 문헌연구를 통하여 강판으로 보강된 RC보의 박리거동을 분석하고 이를 토대로 단부에서 발생하는 응력집중현상을 제어할 수 있는 여러 가지 공법을 제안하였으며 이를 실험을 통해 분석하였다. 실험변수로는 보강길이, 3가지의 단부보강공법 즉 보강재 단부의 모서리의 모따기 처리에 의한 파괴역학적 접근, 단부 단면적 확대에 의한 부착력 증대, 그리고 단부 측면의 rip-off 파괴방지를 위한 단부측면 보강재 보강이 있으며 각 방법에 따른 효율성을 실험을 통해 검토하였다.

2. 실험계획

2.1 시험체 계획

시험체는 실험실의 조건과 시험체의 구조적 거동을 적합하게 나타낼 수 있는 크기로 계획하였다. 시험체는 control 시험체 1개와 보강재 단부의 기하학적 형상을 바꾸는 방법 즉, 단부의 부착면적확대 및 응력집중을 감소시키기 위하여 단부의 모서리를 모따기 하는 방법, 그리고 rip-off파괴를 제어하기 위해 단부 측면에 강판을 부착하는 방법에 따른 거동을 분석하기 위하여 8개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 크기는 $150 \times 300 \times 2400$ (b×h×L) mm이며 인장철근은 2-D13, 압축철근은 2-D10을 사용하였다. 그리고 전단파괴를 방지하기 위하여 스트립철근 D10을 100mm 간격으로 배근하였다.

표 2.1 실험변수 및 실험결과


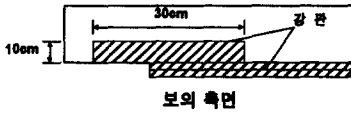
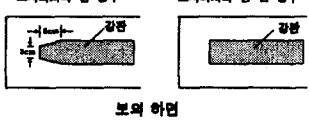
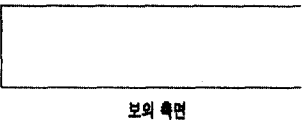
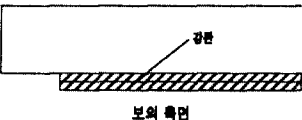
단부 보강 방법	보강방법	보강길이	초기 RIP-OFF하중 (ton)	파괴하중 (ton)	파괴모드	시험체명
부착면적 증대 (A)		0.6L	4.0	5.9	박리파괴	SP6-AY
		0.8L	6.5	8.3	박리파괴 (주철근항복)	SP8-AY
RIP OFF 방지 단부 측면 보강 (C)		0.6L	6.7	7.5	박리파괴 (사인장파괴)	SP6-CY
		0.8L	9.0	9.5	박리파괴 (사인장파괴)	SP8-CY
단부모서리 면처리를 안한 경우		0.6L	3.5	6.4	박리파괴	SP6-N

표 2.1 실험변수 및 실험결과(계속)

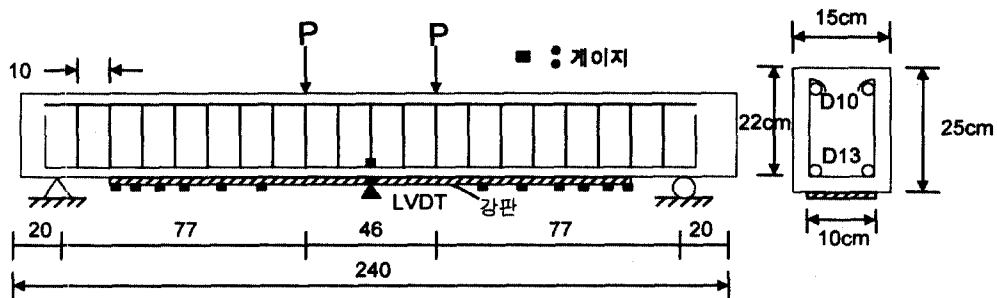
Control		-	-	6.0	휨 파괴	N-CON
		0.6L	4.0	6.3	박리파괴	SP6-Y(C)
		0.8L	6.5	8.5	박리파괴 (주철근항복)	SP8-Y(C)
		L	-	13.5	휨 파괴 (강판항복, 주철근항복)	SP1-Y(C)

2.2 시험체 제작 및 가력 방법

본 실험에서 사용된 콘크리트의 주문 설계강도는 280kg/cm^2 이고, 최대 굽은 골재치수 25mm인 기성품 콘크리트를 레미콘 회사에서 주문 의뢰하여 사용하였다. 시험체의 28일 압축강도 실험결과 콘크리트의 평균 압축강도는 276kg/cm^2 이었다. 콘크리트의 물성치는 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 공시체를 제작하여 압축강도 시험을 실시하여 얻은 결과를 정리하였다. 본 실험에서 사용된 콘크리트, 철근, 강판 및 에폭시의 물성은 표 2.2와 같으며, 시험체의 형상 및 철근상세는 그림 2.1에 나타내었다.

표 2.2 보수시험체에 사용된 재료의 역학적 성질

재료	물성	항복강도 (kg/cm^2)	압축강도 (kg/cm^2)	인장강도 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)
콘크리트	-	-	276	27	2.49×10^5
철근	-	4650	-	6700	2.04×10^6
강판	-	2380	-	3400	1.8×10^6
Epoxy Resin	-	-	700	200	10,000



2.1 시험체의 형상 및 제원

그림

강판은 에폭시를 주입하여 시험체 하면에 부착하였으며 접착제의 두께는 3mm가 유지되도록 하였다. 강판 단부에 발생하는 응력의 집중을 감소시키기 위하여 단부 모서리를 가공하는 것은 그라인더를 이용하여 처리하였다. 철근 게이지는 주철근에 2개를 부착하였고, 강판과 콘크리트계면에서 발생하는 전단응력 분포를 파악하기 위해서 강판에 총 13개를 부착하였다. 시험체의 가력은 200ton 규모의 만능시험기를 사용하였으며, 4점 재하 휨 시험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파괴양상

전 기간을 강판으로 보강한 시험체[SP1-Y(C)]를 제외하고 대부분 시험체에서 보강재가 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴(rip-off failure)를 하였다. SP1-Y(C)시험체의 경우 주철근과 강판이 모두 항복하면서 이상적인 휨파괴를 하였지만[그림 3.1 (a) 참조] 보강길이가 0.6L인 시험체들[SP6-AY, SP6-CY, SP6-Y(C), SP6-N]은 강판과 주철근 모두 항복하지 않았으며 보강길이가 0.8L인 시험체의 경우에는 주철근은 항복하였지만 강판이 항복하기 이전에 조기파괴 되었다[그림 3.1 (b) 참조]. rip-off파괴는 단부에서 응력집중으로 인해 발생하는 주응력이 콘크리트의 인장응력을 초과하면, 보강재 단부에서 시작하는 사인장균열이 발생하고 이 균열은 주철근 위치에서 수평하게 진전되다가 휨균열을 만나면서 급격하게 가력점을 향하여 진행되는 형태를 나타내게 된다. 그러나 rip-off파괴를 제어하기 위해서 측면하단에 강판을 부착한 경우[SP6-CY, SP8-CY]에는 단부에서 균열이 발생하지 못하고 콘크리트와 강판사이의 계면을 따라 균열이 진전되다가 측면에 부착된 강판의 끝에서 균열이 콘크리트로 타고 올라와서 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴양상을 나타내었다[그림 3.1 (c) 참조].

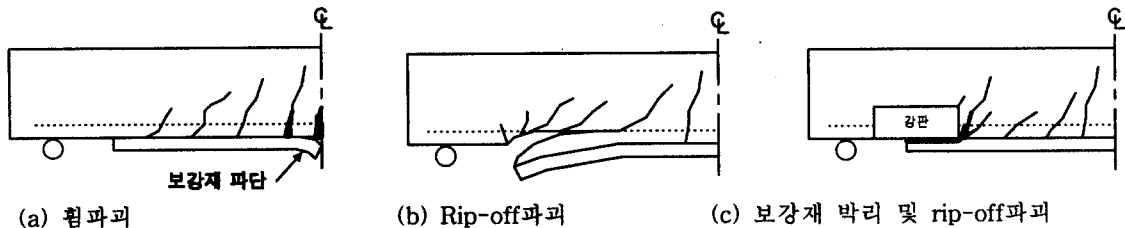
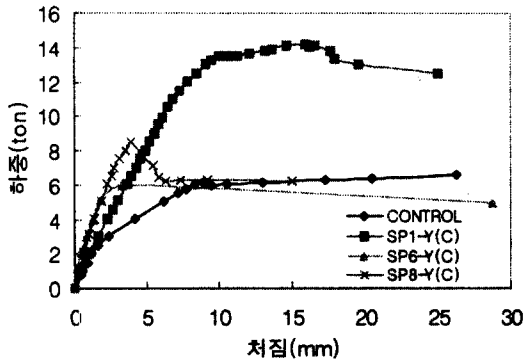


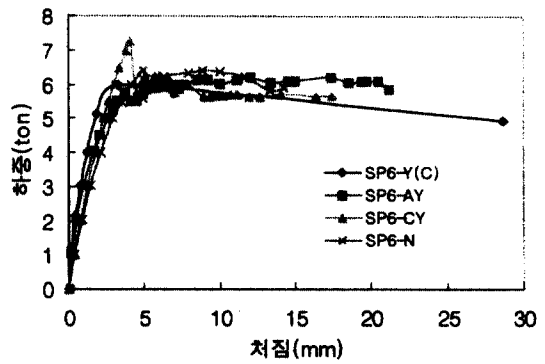
그림 3.1 파괴형태

3.2 결과 비교

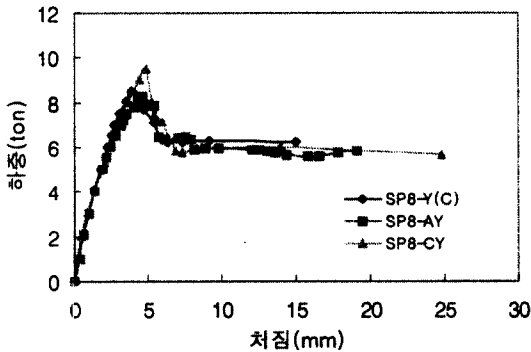
각 시험체의 하중-처짐 곡선은 그림 3.1에 나타내었다. 하중-처짐 곡선을 살펴보면 강판을 전 기간에 걸쳐 보강한 SP1-Y(C)의 경우 강판이 항복하면서 연성파괴 형태를 나타내고 있으며 나머지 보강 시험체 들은 강판이 rip-off되면서 급격히 내력이 떨어지는 취성파괴 형태를 나타내고 있다. 그림 3.3에는 시험체별 초기 rip-off하중 및 파괴하중을 나타내었다. 여기서 초기 rip-off하중은 보강재 단부에서 균열이 발생하여 주철근 위치까지 진행될 때의 하중을 의미한다. 각 변수별 초기 rip-off하중과 파괴하중을 검토해 보면 단부에 작용하는 전단력을 분산시켜 구조물에 발생하는 부착탈락으로 인한 파괴를 감소시키기 위하여 단부의 부착면적을 증가시킨 경우[SP6-AY, SP8-AY], 초기 rip-off하중 및 극한 rip-off하중 모두 control 시험체[SP6-Y(C), SP8-Y(C)]와 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 강판으로 보강된 시험체의 rip-off파괴 메카니즘에 그 이유를 찾을 수 있다. 보의 파괴가 부착파괴가 아닌 rip-off 파괴가 되므로, 보강재 폭의 영향이 미소하게 작용하여 그 차이가 미소한 것으로 판단



(a) 보강길이의 영향



(b) 보강길이가 0.6L인 경우



(c) 보강길이가 0.8L인 경우

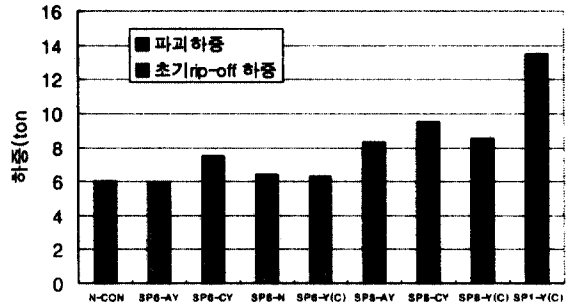


그림 3.2 하중-처짐 곡선

그림 3.3 각 변수별 초기 rip-off하중 및 파괴하중

되며, rip-off파괴시 보강재의 폭에 관한 영향은 참고문헌[12]에서도 고찰된 바 있다. 따라서, 단부의 부착면적을 증대시키는 방법은 부착, 탈락 파괴가 지배적인 CFS, GFRP의 보강 등에는 효과적일 수 있다.

단부의 측면하부에 강판을 부착시켜 rip-off파괴를 억제시킨 경우를 살펴보면 파괴하중의 경우 보강 길이가 0.6L, 0.8L 일 때[SP6-CY, SP8-CY], 각각 19%, 14%정도 향상되었다. 이는 [그림 3.2 참조] 강판 단부에서 발생한 전단응력과 수직응력으로 인한 주응력이 콘크리트의 인장응력을 초과하여도 측면에 부착된 강판에 의해 제어되기 때문이다. 그러나 하중이 증가하면서 계면에 발생하는 전단응력과 수직응력이 증가하게 되고, 접착제의 부착응력 혹은 인장응력을 초과하게 된다. 따라서 균열은 계면을 따라 진행되다가 측면에 부착된 강판이 끝나는 지점에서 급격히 사인장균열이 발생되면서 파괴된다 [그림 3.1 (c) 참조]. 이는 그림 3.4에 제시되어 있는 실험을 통해 측정된 계면전단응력의 수치를 통해서도 확인된다. 실험을 통해 측정된 SP8-Y(C)의 파괴시 단부에 발생하는 최대 계면전단응력은 $46\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도이지만, SP8-CY의 경우 $77\text{kg}/\text{cm}^2$ 정도로 측정되었다.

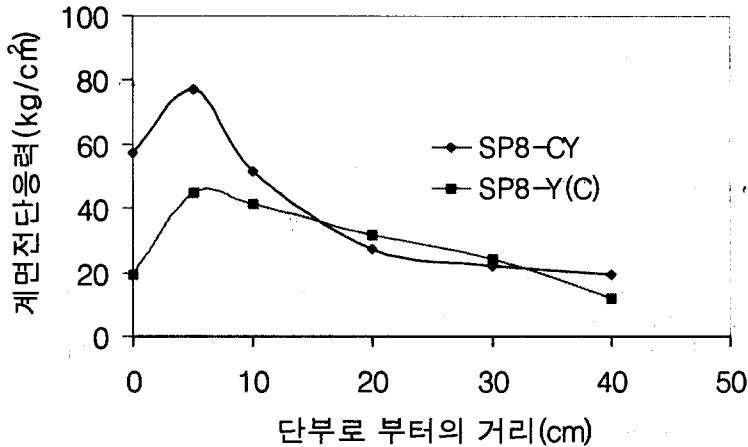


그림 3.4 시험체 단부에서 발생한 계면전단응력

마지막으로 0.6L로 보강된 시험체 중 강판의 단부 모서리를 모따기를 하여 응력집중현상을 완화시킨 시험체와 모따기를 하지 않은 시험체의 초기 rip-off 하중과 파괴하중을 비교하여 응력집중 감소효과를 검토하였다. 실험결과 모따기 처리한 SP6-Y(C) 시험체는 초기 rip-off 하중이 14% 정도 증가하였으나, 종국의 극한 rip-off 하중은 거의 동일하였다. 이는 단부를 모따기 처리함으로써 초기 균열을 미소하게 감소시킬 수 있지만 극한 rip-off 파괴 강도에는 큰 영향은 미치지 않는 것을 알 수 있다. 따라서 강판으로 보강한 경우 단부의 형상은 기본적으로 모따기를 수행하는 것이 응력집중을 조금이라도 감소시킬 수 있으므로 바람직하다.

4. 결론

본 연구를 통해서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 단부의 전단력을 분산시켜 부착탈락으로 인한 파괴를 감소시키기 위하여 단부의 강판과 시험체와의 부착면적을 증가시킨 경우 보강된 RC보의 조기파괴 거동에는 큰 영향을 미치지 않았지만 이런 방법은 부착 파괴가 지배적인 CFS, GFRP의 보강 등에 효과적일 수 있다.
2. 단부의 측면하부에 강판을 부착시켜 rip-off 파괴를 억제시킨 경우 보강길이가 0.6L, 0.8L일 때 각각 19%, 14% 정도의 파괴하중 증가를 나타내었으며 파괴모드도 rip-off 파괴에서 계면균열파괴로 전환되었다.
3. 강판의 단부 모서리를 모따기하여 응력집중현상을 완화시킨 시험체는 그렇지 않은 시험체와 비교하여 초기 rip-off 하중이 14% 증가하였고, 종국의 극한 rip-off 하중은 거의 동일하였다. 그러나 단부의 모서리 처리는 초기의 응력집중을 감소시키므로 반드시 강판으로 보강할 경우 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 주관하는 "96 건설기술 연구개발과제를 수행함으로써 얻어진 결과이며 저자들은 건설교통부의 후원에 대한 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Arduini, M. et. al., "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams", ACI Structural Journal, July-Aug 1997, pp.363-370.
2. Hutchinson, A. R. & Rahimi, H., "Behaviour of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Fibre Reinforced Plastics", Proceedings of Fifth International Conference on Structural Faults and Repair, Vol.3, 1993, pp.221-228.
3. Jones, R. et. al., "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates", The Structural Engineer, Vol.66, No.5, Mar 1988, pp.85-94.
4. Oehlers, D. J. et. al., "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.4, April 1990, pp.978-995.
5. Quantrill, R. J. et. al., "Predictions of the Maximum Plate End Stresses of FRP Strengthened Beams: Part II", Magazine of Concrete Research, No.177, 1996, pp.343-351.
6. Robert, T. M., "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams", The Structural Engineer, Vol.67, No.12, June 1989, pp.229-233.
7. Swamy, R. N. et. al., "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams", The Structural Engineer, Vol.67, No.3, Feb 1989, pp.45-54.
8. Ziraba, Y. N. et. al., "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates", ACE Structural Journal, Nov-Dec 1994, pp.639-646.
9. 심종성 외 2명, "손상된 R/C보의 보강후 피로거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제16권, 제 I -2호, 1996. 3, pp.135-142.
10. 심종성 외 1명, "강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트보에 대한 해석적 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 제9권, 6호, 1997. 12, pp.129-137.
11. 오병환 외 2명, "강판 휩보강된 철근콘크리트보의 파괴기구 및 박리하중산정 이론연구", 콘크리트학회지, 제9권, 6호, 1997. 12, pp.243-254.
12. 최완철 외 3명, "에폭시접착 강판보강 철근콘크리트보의 역학적거동에 관한 연구", 숭실대학교 생산기술 연구소, 1994. 10,