

보수 · 보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동에 관한 기초연구

Structural Behavior of Strengthened RC Beams

오 병 환* 조 재 열** 차 수 원** 강 동 옥***
Oh, Byung Hwan Cho, Jae Yeol Cha, Soo Won Kang, Dong Ok

Abstracts

The final objective of this study is to develop the design criteria and practical guidelines for the reasonable strengthening of damaged beams. A basic experimental program was set up and several series of test beams have been prepared.

Major test variables include the strengthened beams by carbon fiber sheets as well as conventional steel plates. The results of the present study are discussed.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

오늘날 우리나라는 급속한 경제성장과 더불어 많은 물량의 건설이 급속히 이루어져 왔으며, 더우기 요즘들어 교통량의 증가 및 교통하중의 증량화로 교량구조물의 손상이 가속화되고 있는 실정이다.

최근 들어 이러한 교량구조물에 대한 안전진단에 관한 국내의 연구는 활발히 진행되어 구조물의 손상정도를 평가하는데 있어서는 어느 정도의 수준에 이르고 있으나 보수·보강에 있어서는 연구가 미흡한 상태이다.

보수·보강공법에 있어서 과거에는 보증설공법 및 외부프리스트레스도입공법 등이 주를 이루어 왔으나, 근래에는 고성능 접착제의 개발로 말미암아 압착공법이 주를 이루고 있다. 그 중에서도 1970년이래 강판보강공법이 가장 보편화되어 있으나 방청성 및 내피로성에 다소 결점이 나타나고 있으며, 요즘들어 자중을 증가시키지 않으며 높은 강성을 가지고, 또한

내식성 및 내자성 등이 뛰어난 새로운 신소재들이 개발되어 각광을 받기 시작하고 있다. 하지만 아직 시공실적이 적으며 재료의 박리 메카니즘에 대한 규명이 확실치 않아 그에 대한 연구의 필요성이 요구되고 있다.

본 실험에서는 국내에서도 가장 널리 사용되고있는 강판보강공법과 신소재인 카본쉬트를 사용한 압착공법에 대한 실험을 통하여 휨 및 전단에 대한 보강성능을 평가하고, 상호성능을 비교 평가하고자 한다.

1.2 연구내용 및 범위

본 연구에서는 국내에서 가장 널리 쓰이면서도 구체적인 지침 없이 반경험적으로 시행되고 있는 강판접착공법에 초점을 두었으며, 정적과피시험 및 피로시험을 통하여 강판접착후의 거동과 그 보강효과를 밝히고자 한다. 이를 위하여 광범위한 자료수집을 하였으며 국내외에서 기시행한 실험결과를 바탕으로 휨보강 및 전단보강에 대한 정적재하실험을 수행하였다. 또한 최근들어 주목을 받고 있는 카본쉬트에 의한 보강에 대하여 그 실효성을 밝히고자 강판과 동일한 실험을 하였다. 우선 본 논문에서는 기본실험결과를 발표하고자 한다.

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 토목공학과 박사과정

*** 서울대학교 토목공학과 석사과정

2. 실험방법

2.1 실험재료

본 실험에서는 설계기준강도 270kg/cm^2 의 콘크리트를 사용하였다. 물:시멘트:잔골재:굵은골재는 183:389:753:1033의 배합비를 사용하였고, 시멘트는 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재는 채석을 사용하였다.

인장철근 및 압축철근은 KS규격 강재기호 KS D 3503 통칭 SD30을 사용하였으며, 스티럽은 $\phi 6\text{mm}$ 의 철근을 사용하였다.

본 실험에서 사용된 보강강재는 KS규격 강재기호 KS D 3503, 일명 SS41 일반구조용 압연강재를 사용하였으며 카본슈트는 日本石油사의 제품(TU 크로스 ST200-50)으로써 그 기계적 특성은 표 1과 같다.

표 1 카본슈트의 특성

제품명	섬유함량 (g/m^2)	설계두께 (mm)	인장강도 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)
TU 크로스 ST200-50	200	0.11	>35500	2.35×10^9

본 실험에 사용된 접착제는 일본석유사 제품으로 그 특성은 표 2와 같다.

표 2 접착수지의 특성 (kg/cm^2)

	제품명	압축강도	인장강도	휨강도	탄성계수
	프라이머 E200P	-	34	-	-
	접착수지 E2500	914	451	830	2.72×10^4

한편, E2500을 사용한 콘크리트와 카본슈트와의 접착강도는 약 36kg/cm^2 정도이다

2.2 시험체 설계 및 제작

연구대상으로써 철근콘크리트보를 선택하여 $15 \times 18 \times 150\text{cm}$ 크기의 철근콘크리트보를 총 10개 제작하여, 이 중 6개는 휨시험시 4개는 전단시험시 사용코자 하였다. 부재의 제원 및 철근의 배치현황은 그림 1과 같다. D13 철근을 인장부와 압축부에 각각 3개와 2개 설치하

였으며 각각의 피복 두께는 3cm로 하였다. 한편, 전단시험체의 경우 전단과피를 유도하기 위하여 전단철근을 생략하였다.

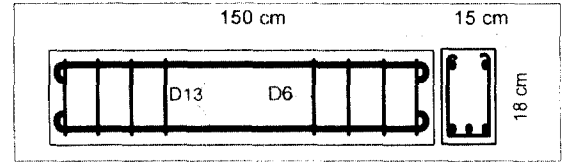


그림 1 시험체의 제원 및 철근배치도

또한, 콘크리트타설시에 원형공시체($\phi 15 \times 30\text{cm}$)를 3개 제작하여 보부재시험시 압축강도를 측정하였다. 그 결과 평균 344kg/cm^2 으로써 설계기준강도 270kg/cm^2 을 상회하는 것으로 나타났다.

휨에대한 강판보강설계는 콘크리트와 강판이 완전 일체거동을 한다는 가정하에 강도설계법으로 설계하였으며, 카본슈트보강설계는 생산되는 제품의 두께가 일률적이므로 카본슈트(ST200) 1매를 접착한 응력을 검토하였다.

2.3 실험변수

본 실험은 재료적인 측면에서 강판보강과 카본슈트보강으로 나눌 수 있으며, 보강의 구조적 측면에서 휨보강시험과 전단보강시험으로 크게 나눌 수 있다.

표 3 실험변수에 따른 시험체 분류

변수 및 표기번호						시험체명
보강대상	보강재종류	보강길이	앵커유무	기타		
휨보강 기준부재						B*CTR
전단보강 기준부재						S*CTR
B	S	L	-	-		BSL
		S	-	-		BSS
		S	B	-		BSSB
	C	L	-	-		BCL
S		J	-		BCSJ	
S	C	-	-	1		SC1
		-	-	2		SC2
		-	-	3		SC3
B:휨보강 S:전단보강	S:강판 C:카본슈트	L:105cm S: 76cm	B:앵커 J:재킷 앵커	1:측면보강 2:측면+ 하면보강 3:측면+ 휨보강		

2.4 하중재하 및 측정

본 실험에 있어서 실험장치에 대한 개략적인 그림을 그림 2에 나타내었다.

서울대학교 공과대학 토목공학과 실험실내에 설치되어 있는 프레임에 높이 약 1 m의 공간을 확보하여 원형강봉($\varphi 30 \text{ mm}$)을 사용하여 지점부를 설치하였다.

하중재하관은 두께 3 cm(유압잭이 닿는 부분은 5 cm)의 강판을 사용함으로써 재하관에서 발생할 수 있는 변형을 최소화하였다. 하중가력은 유압잭을 사용하였으며 횡프레임(지지대)과 유압잭 사이에 로드셀을 장착하였다.

측정항목은 크게 하중, 처짐 그리고 스트레인(철근, 콘크리트, 보강재)으로 분류할 수 있는데 각각 로드셀, 다이얼 게이지 그리고 스트레인게이지를 사용하여 그 데이터를 스위칭 박스(Switching Box)를 통하여 데이터로거(Data Logger)로 출력하는 형식으로 측정을 하였다. 측정은 재하하중 0.25 ton마다 측정하였다.

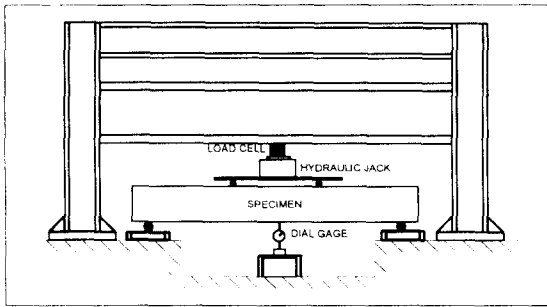


그림 2 실험장치 개략도

(1) 선행하중재하

시험체의 노후화를 유도하기 위한 방법으로 보강전 모든 시험체에 선행하중을 재하하는 방법을 택하였는데 선행하중의 크기를 결정하기 위하여 휨보강부재(스티럽이 있는 부재) 1개와 전단보강부재(스티럽이 없는 경우) 1개를 각각 휨파괴와 전단파괴가 일어날때까지 하중을 재하하였다.

휨보강부재의 경우 기준시험체의 시험에서 얻은 극한하중의 약 70%에 해당하는 7.5ton을 선행하중으로 선정하였으며 전단보강부재의

경우는 첫 사인장 균열이 나타난 시점이 약 7ton으로 관측되어 휨보강 시험체와 동일하게 7.5ton의 선행하중을 재하하였다. 보강을 위한 하중제거시에는 모든 부재에 대해서 약 0.25ton/sec 속도로 하중을 제거하였다.

(2) 보강후 하중재하

선행하중재하로써 손상을 가한 부재에 대해 보강을 한 후 1회에 0.25ton씩 하중을 재하하며 그때그때의 부재의 외관상의 변화를 육안과 아이게이지로써 측정을 하였다. 또한 매 하중단계마다 측정을 하였으며 파괴시점까지 하중을 재하하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 휨보강 시험결과

본 실험에서는 압축파괴가 일어나지 않도록 하기 위하여 압축철근을 배근하였으므로 철근 및 보강재의 항복 및 파단 시점을 시험체의 파괴시점으로 보았다. 즉, 인장철근이 항복하는 시점을 약 2000μ ($E=2.04e6 \text{ kg/cm}^2$ 일때 약 4080 kg/cm^2 에 해당)의 변형도가 발생할 때로 보고 강판의 경우는 약 1400μ ($E=2.1e6 \text{ kg/cm}^2$ 일때 약 2940 kg/cm^2 에 해당)의 변형도가 발생하는 시점을 항복으로 보았으며, 카본슈트의 경우는 취성파괴를 일으키므로 파단이 일어나는 시점을 파괴로 보았다.

또한 본절에서 최종파괴하중 및 형상이라는 인장철근 및 보강재의 파단 후 하중을 계속재하하여 더이상 하중이 증가하지 않는 시점에서의 하중 및 형상을 일컫는다. 즉, 두 보강재가 모두 파괴에 이르렀거나, 먼저 압축파괴가 발생하였을 때를 말한다. 하지만 본 실험에서는 어떠한 시험체에서도 압축파괴가 발생하지 않았다.

3.1.1 파괴형상

다음 표 4는 휨보강 시험체별 파괴하중 및 최종파괴하중, 그리고 파괴유형을 표로 요약, 제시한 것이다.

표 4 휨보강 시험체별 파괴형상

시험체명	항복하중 (ton)	최종 파괴하중 (ton)	최종 파괴형상
Cont-B	9.3	9.75	휨 파괴
BSSB	10.7	10.95	사인장 파괴
BSS	7.1	9.99	휨 파괴
BSL	12.40	12.40	사인장 파괴
BCSJ	8.5	10.29	휨 파괴
BCL	9.45	9.45	사인장 파괴

시험체 BSSB의 경우 약 8.6ton에서 단부로부터 앵커볼트까지 강관의 박리가 일어났으며, BSS의 경우 약 4.5ton에서 강관박리가 시작되었다. 시험체 BSL의 경우 강관단부에서부터 사인장균열이 나타났으며, BCSJ의 경우 카본슈트의 파단과 함께 휨파괴가 발생하였다.

3.1.2 극한하중분석

강도설계법에 근거하여 이론적으로 극한휨하중과 극한전단하중을 계산하여 실험치와 비교하였다. 이때 콘크리트의 압축강도는 표준공시체 시험으로부터 얻은 평균압축강도 $344kg/cm^2$ 을 사용하였다. 그 결과는 다음 표 5와 같다.

표 5 휨보강 시험체별 극한하중

시험체명	실험치		이론치		최종 파괴 원인
	항복하중 (ton)	최종 파괴하중 (ton)	극한 휨하중 (ton)	극한 전단하중 (ton)	
Cont-B	9.3	9.75	7.3	8.8	휨
BSSB	10.7	10.95	13.2	8.8	사인장
BSS	7.1	9.99	13.2	8.8	휨
BSL	12.4	12.4	13.2	8.8	사인장
BCSJ	8.5	10.29	10.1	8.8	휨
BCL	9.45	9.45	10.1	8.8	사인장

위의 표에서 볼 수 있듯이 보강 시험체의 경우 강도설계법에 따라 계산한 극한 휨하중을 능가하는 것이 어느 시험체도 없었다.

이 원인은 두가지 방향으로 생각해 볼 수 있는데 첫째, 극한 휨하중의 계산시 콘크리트와 철근 및 보강재(카본슈트 및 강관)는 완전일체거동은 물론 각각의 재료에 생기는 변화율

은 모두 중립축으로부터 떨어진 거리에 비례한다는 가정이 보장된 부재의 단면내력을 과대평가하게 된 결과라고 판단된다. 다른 한 가지는 강관이나 카본슈트가 제성능을 발휘하지 못하여 비롯된 결과라고 생각하는 것인데, 이 때 앞 절에서 파괴형상을 살펴보았듯이 시험체 BCSJ를 제외하고는 강관이 항복하거나, 카본슈트의 파단으로 파괴된 경우가 없었으므로 후자의 원인이 주된 요인이라 판단된다. 즉, 파괴시 보강관이 실제로 항복하지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

각 시험체의 파괴형상과 관계없이 파괴하중 및 최종파괴하중을 비교하면 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있다.

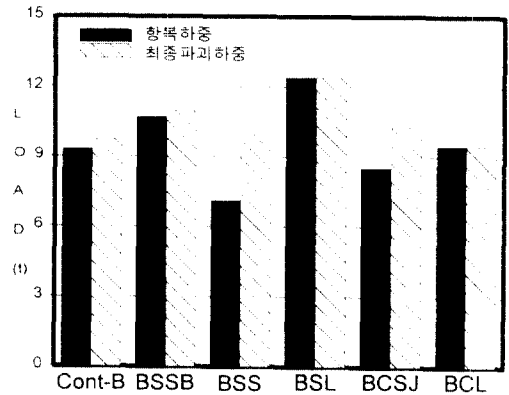


그림 3 각 시험체별 항복하중 및 최종파괴하중

3.1.3 하중-처짐관계 분석

그림 4와 5에서 볼 수 있듯이 모든 시험체에서 보강후 하중재하시 선형하중재하시와 비교할 때 처짐의 제어 효과가 거의 없는 것으로 나타났다. 오히려 정도의 차이는 있지만 다소 증가하는 것으로 나타났다. 즉 처짐량으로써 보강된 보의 내력증강효과를 판단하기는 어려운 것으로 사료된다.

3.1.4 하중-변형도관계 분석

인장철근에 부착한 게이지로부터 얻은 하중-변형도 관계로부터 하중-처짐관계에서 받

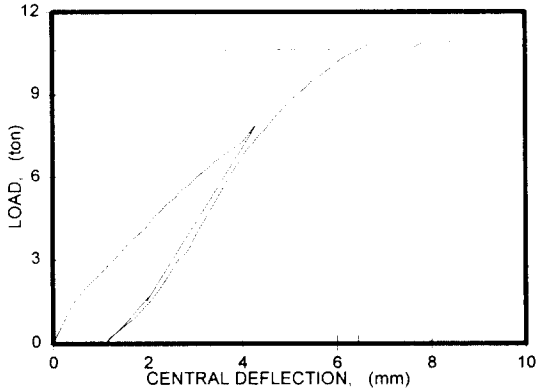


그림 4 시험체 BSSB의 하중-처짐 곡선

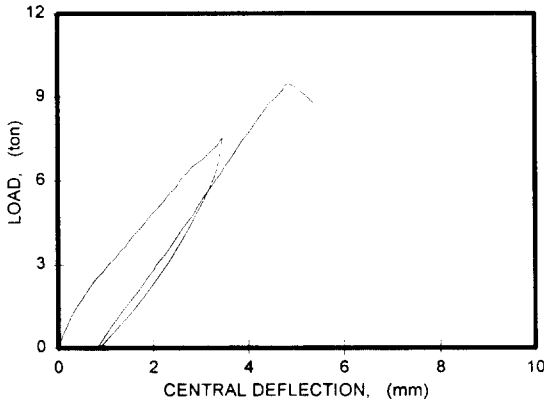


그림 5 시험체 BCL의 하중-처짐 곡선

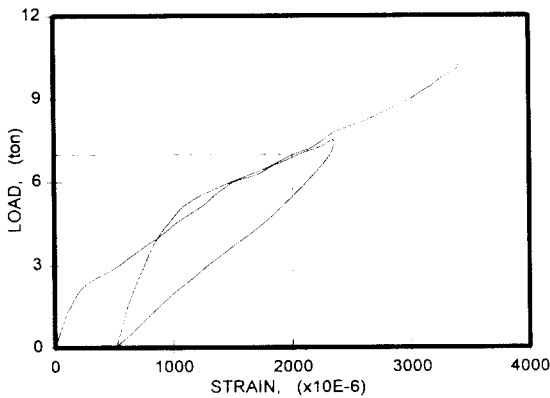


그림6 시험체 BSS의 하중-변형도곡선(인장철근)

견할 수 없었던 보강효과를 알 수 있었으며, 보강재 길이의 효과 및 앵커 볼트의 효과 등도 알 수 있었다. (그림 6참조)

하지만 카본슈트의 경우 예상과는 달리 변형 억제 측면에서 그다지 효과를 보이지 못하는 것으로 나타났다.

또한 강관중심에서의 하중-변형도 관계로부터 사인장파괴와 보강재의 박리를 예측할 수 있었다.

3.1.5 보강재의 박리응력에 대한 분석

본 연구에서는 Roberts T. M.의 이론을 이용하여 제시된 단부박리하중과 실험결과와 비교 고찰을 수행하였다. 또한 파괴하중하에서 단부에 발생하는 전단응력(Shear Stress) 및 법선응력(Normal Stress)을 계산하여 본 실험에서 사용된 보강재 및 콘크리트 적층물의 평균인장시험으로부터 얻은 접착강도와 비교 검토를 하였다.

표 6은 실험치인 파괴하중 및 박리여부와 이론에 따라 계산한 단부박리하중 및 각 시험체의 파괴하중에서의 단부전단응력 및 단부법선응력을 나타낸 것이다.

표 6 단부박리하중 및 응력분포

시험체명	실험치		이론치		
	파괴하중 (ton)	박리여부	단부박리하중 (ton)	전단응력 (kg/cm ²)	법선응력 (kg/cm ²)
BSSB	9.3	○	4.49	121.7	43.0
BSS	10.7	○	4.49	131.2	46.3
BSL	12.4	×	7.60	81.2	28.7
BCSJ	8.55	×	7.53	53.8	8.95
BCL	9.45	×	13.75	24.9	4.14

4. 결론

본 연구에서 수행한 구조부재실험의 결과에 대한 이론적 분석 및 고찰한 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 휨보강시험의 경우 보강길이가 길수록 정착장치의 유효성을 검증하였다.
- (2) 휨보강의 경우 처짐제어에는 그다지 효과가 없는 것으로 나타났다.
- (3) 하중-변형도 관계로부터 보강효과를 확실

히 하였다.

- (4) 단부거동의 특성을 고찰하여 본 결과 Roberts의 이론과 대체로 부합하는 것으로 나타났다.
- (5) 전단보강의 경우 카본쉬트 압착공법이 큰 효과를 기대할 수 있다는 결론에 도달하였다.
- (6) 앞으로도 보강효과의 이론정립을 위한 계속적인 연구가 요망된다.

감사의 글

본 연구에 있어 실험수행에 많은 도움을 주신 (주)경우엔지니어링에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. R.N. Swamy, R. Jones, J.W. Bloxham, "Structural behavior of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plate", *The Structural Engineer*, Vol.65A, No.2, 1987, pp59-68
2. R. Jones, R.N. Swamy, A. Charif, "Plate separation and anchorage of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plate", *The Structural Engineer*, Vol.66, No.5, 1988, pp85-94
3. R.N. Swamy, R. Jones, A. Charif, "The Effect of external plate reinforcement on the strengthening of structurally damaged RC beams", *The Structural Engineer*, Vol.67, No.3, 1989, pp45-55
4. T.M. Roberts, "Approximate analysis of shear and normal stress concentrations in the adhesive layer of plated RC beams", *The Structural Engineer*, Vol.67, No.12, 1989, pp229-233
5. Alfarabi Sharif, G.J. Al-Sulaimani, I.A. Basunbul, M.H. Baluch, B.N. Ghaleb, "Strengthening of initially loaded

reinforced concrete beams using FRP plates", *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.2, 1994, pp160-168

6. Ghazi. J. Al-Sulaimani, Alfarabi Sharif, I.A. Basunbul, M.H. Baluch, B.N. Ghaleb, "Shear repair of reinforced concrete by fiberglass plate bonding", *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.3, 1994, pp458-464
7. Y.N. Ziraba, M.H. Baluch, I.A. Basunbul, A.M. Sharif, A.K. Azad, G.J. Al-Sulaimani, "Guideline toward the design of reinforced concrete beams with external plate", *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.6, 1994, pp639-646