

철근콘크리트깊은보의 탄소섬유압착공법에 대한 정적파괴실험 및 해석

Structural Analysis and Static Load Test for The R/C Deep Beam with CFS Strengthening

조병완* 김영진** 김 도***
Jo, Byung-Wan Kim, Young-Jin Kim, Do

ABSTRACT

Static load tests were performed to propose the appropriate strengthening method of R/C deep beam using Carbon Fiber Sheets and compared to those of nonlinear structural analysis. Fiber direction and anchorage method on the deep beam specimen were chosen as experimental variables, which lead to the following conclusions that initial shear cracks are independent of strengthening method and fiber directions perpendicular to the expected fracture mode, which was given by the nonlinear structural analysis, show better performance compared to those of horizontal and vertical fiber directions.

1. 서 론

근래에 들어 철근콘크리트 구조물이 대형화, 복잡화되면서 보의 높이가 지간에 비하여 상대적으로 크고, 보의 폭이 지간이나 높이보다 매우 작은 보 형태인 깊은보(Deep beam)가 많이 생겨났다.

일반적으로 보의 지간 l_n 과 유효높이 d 와의 비가 $l_n/d < 5$ 인 보, 또는 전단지간 a 일 때 $a/d < 2$ 인 보를 말하며, 하중재하시 일반보의 구조거동과는 달리, 깊은보의 강도는 전단에 지배되어 일반보의 사인장균열 기울기 45° 보다 크고, 때로는 수직에 가깝게 되어 수직스터럽을 배치하는 외에 수평방향의 전단철근이 필요하게 된다. 이러한 철근콘크리트 구조물의 내구성, 사용성확보를 위한 일반적인 보강공법으로 강관압착공법, 단면증설공법, 거더증설공법 등이 실용화단계에 이르렀으나, 도로의 교량구조물과 잔교식 부두와 같은 해안구조물에 많이 사용되어온 강관 압착공법은 장기간 유해 환경에 노출됨으로써 에폭시 열화와 강관 부식등의 문제가 대두되어, 여러 가지형태의 탄소섬유보강플라스틱 (Carbon Fiber Reinforced Plastic)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{2)~5)} 이런 방법으로 보강된 철근콘크리트 구조물의 보강 후 파괴거동은 보강내용에 따라 휨파괴 또는 압축파괴와 같은 내력 부족 파괴와 보강재의 debonding 파괴로 분류 할 수 있다.¹⁾ 이 중에서

* 한양대학교 지구환경건설공학부 부교수

** 한양대학교 토목공학과 석사

*** 한양대학교 토목공학과 석사과정

예측이 어려운 debonding은 많은 연구자들이 이론적인 연구와 실험을 통해 접착제 파단, 보강재 박리(peeling off), 단부 응력집중에 의한 콘크리트 덮개부의 탈락(rip-off) 형태로 구분하였으나, 대부분의 연구가 휨내력이 지배적인 일반보에 집중되었으며 실제 취성과파괴로 더 위험한 파괴양상을 보이는 깊은보의 전단보강에 대한 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 보의 높이가 지간에 비하여 상대적으로 큰 철근콘크리트 깊은보 구조물을 전단보강하기 위하여, 무보강 깊은보 공시체의 정적파괴실험을 행한 후 비선형구조해석을 통해 구조모델링을 검증하고, 다양한 형태의 깊은보에 비선형 구조해석을 통해 예상되는 파괴거동에 따라 탄소섬유를 이용한 합리적인 보강방법을 제시하기 위하여 섬유의 보강방향과 정착방법을 실험변수로 하여 파괴실험을 실시하였다.

2. Pilot 실험

다양한 형태를 갖는 현장의 장대 깊은보 구조물은 실내시험을 실시하기에는 축소 상사모델링에서 여러 어려운 점이 발견되어, 깊은보의 구조적 거동을 구현하는 일반 직사각형 단면의 깊은보를 제작하여 정적파괴 실험을 통해 비선형 구조해석 모델링의 적정성을 입증하고, 이를 실제 현장의 다양한 형태의 깊은보 구조물에 적용하여, 예상전단균열에 따른 적절한 전단보강방법을 제시하고자 실시하였다.

2.1 공시체 제작

시험체 제작에 사용된 재료는 일반적으로 토목구조물의 하부구조물의 제작시 사용되는 콘크리트 배합강도 $\sigma_{ck} = 240\text{kg/cm}^2$ 의 레미콘, 철근은 항복강도 $\sigma_y = 3000\text{kg/cm}^2$ 의 D25, D13, D6을 사용하였다.

시험체의 형상, 치수, 철근의 배근 상황은 그림 3과 같이 폭15cm, 높이 53cm(유효높이 46cm)의 단면으로, 시험체의 길이는 210cm의 보 시험체이다. 섬유보강시 전단보강효과 검증을 위하여, 휨철근을 D25-2EA 2단 배근하였으며, 시험체 하부 지점부에서의 철근의 정착파괴를 방지하기 위하여 양단을 절곡하여 설계하였다. 또한, 시험체의 전단파괴를 유도하기 위하여 전단철근을 배근하지 않았으며 전단지간 a/d는 1.25이다.

2.2 재하방법

하중재하는 그림2와 같이 100ton 용량의 Schimazu사 만능시험기를 사용하여 순지간을 190cm로 유지시킨 후 전단지간 55cm위치에 대칭으로 4점재하 방식으로 강재 spreader beam을 사용하여 파괴시까지 5ton단위로 단조증가 시켰다. 그림3과 같이 부착된 철근 및 콘크리트 게이지의 데이터를 각 하중별로 data logger를 통해 자동으로 하였다.

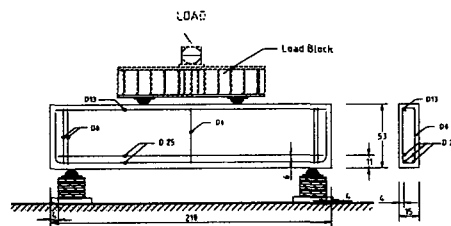
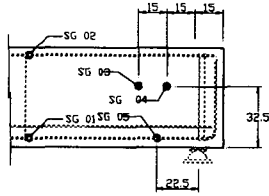
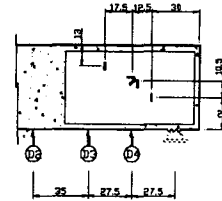


그림 1. 시험체의 형상, 치수 및 재하방법



● Imbedded gauge

(a) 철근 변형 게이지



— Fiber gauge
○ Displacement meter

(b) 섬유 변형 게이지

그림 2. 측정기기 부착위치.

2.3 실험결과

28ton에서 일반보의 휨시험과는 달리 복부 압축 전단균열이 발생하였으며, 이미 발생된 전단균열 주변에 새로운 전단균열이 다수 발생하였고, 재하하중이 45ton에 이르자, 발생된 전단균열이 지점과 하중재하점까지 성장한 후 압축대(compression strut)를 형성하면서, 약 49ton에서 처짐과 균열폭이 크게 증가하여 전단파괴 되었다. 약 10ton까지는 일정한 기울기를 보인 다음, 25ton에서 초기전단균열 발생과 함께 처짐에 단차를 이루며, 40ton을 넘어서면서 2차 파괴(전단균열이 전높이에 걸쳐 발생)로 인하여 또한번 처짐의 증가양상을 보인 후 최대하중 근처에서는 처짐의 급격한 증가를 나타내었으며, 하중-철근응력은 처짐곡선과 마찬가지로 일정한 응력증가를 나타낸 후 약 25ton에서 전단파괴 예상 부의 철근응력이 급격히 상승하여 32ton을 넘어서면서 시험체의 중앙부의 인장철근응력을 초과하였다. 최대하중 근처에서 처짐의 급격한 증가현상과 동일하게 전단부 철근의 인장응력 또한 증가 기울기가 급해졌다. 하중-변위곡선과 하중-인장철근응력곡선을 각각 그림 3과 그림4에 나타내었다.

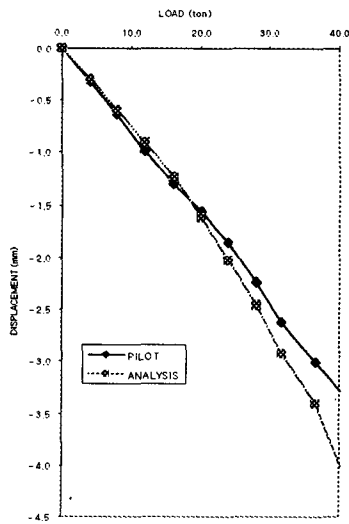


그림 3. 처짐곡선 (PILOT 과 해석치)

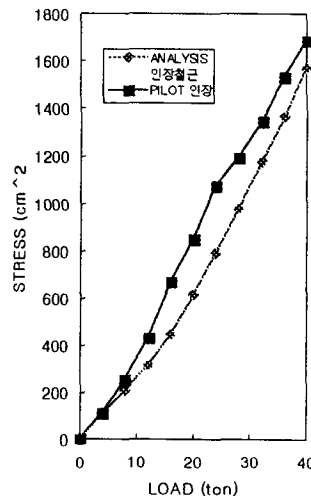


그림 4. 철근응력곡선 (PILOT 과 해석치)

2.4 비선형 구조 해석

상용프로그램인 LUSAS⁶⁾를 본 연구의 목적에 따라 변형시킨 프로그램을 사용하여 그림 5과 같이 콘크리트는 2D-삼각형 평면 응력요소로 철근은 2D BAR요소를 사용하여 비선형 구조해석을 하였다.

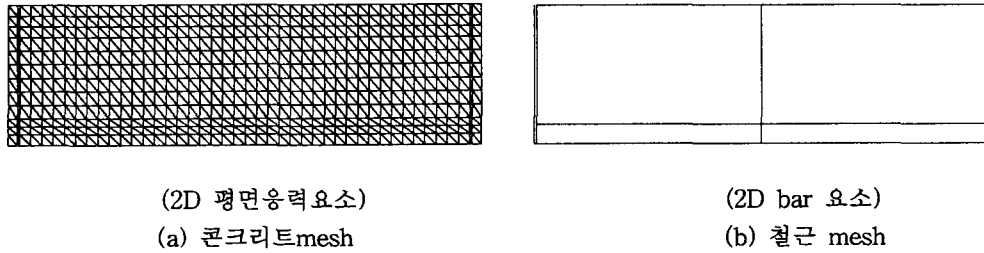


그림 5. 시험체의 구조해석모델.

콘크리트의 인장영역에서의 응력 - 변형률 관계는 일반적으로 균열발생전까지는 선형증가하고, 균열발생후에는 지수형태의 응력 - 변형률 관계를 고려하여 본 연구에서는 Bilinear 응력-변형률 곡선을 사용하였고, 콘크리트의 압축영역에서의 응력-변형률 곡선은 선형탄성거동하는 것으로 가정하였다.

콘크리트속의 철근의 응력-변형률 관계는 항복응력전까지 선형탄성 거동을 보이며, 항복응력 이후에 응력이 증가하는 strain-hardening영역을 고려하였다.⁷⁾

2.4 구조해석결과

그림 3,4에 하중-치짐곡선, 하중-인장응력곡선을 PILOT실험과 비교하여 나타내었다. 초기전단균열이 발생한 28TON근처에서 치짐과 인장응력곡선의 기울기가 급해졌으며, 최대하중근처에서 인장응력의 급격한 증가 현상을 보인다. 치짐곡선은 40ton에서 급격한 증가를 보여주며, 실험과 다소 차이가 나타나지만 거의 일치함을 보여준다. 그림 6에 보인바와 같이 정적파괴실험시 깊은보의 균열 양상인 하중재하점과 지점을 연결하는 압축과쇄대를 따른 사인장균열 양상을 보이고 있다. 따라서 깊은보에 사용된콘크리트 평면응력요소와 철근 bar요소가 깊은보의 비선형 구조적 거동을 합리적으로 보여줌에 따라, I형 교각의 Cap beam과 같이 다양한 형태의 깊은보에 비선형구조해석을 통해 예상되는 파괴거동에 따라 탄소섬유등을 이용하여 합리적인 보강방법을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

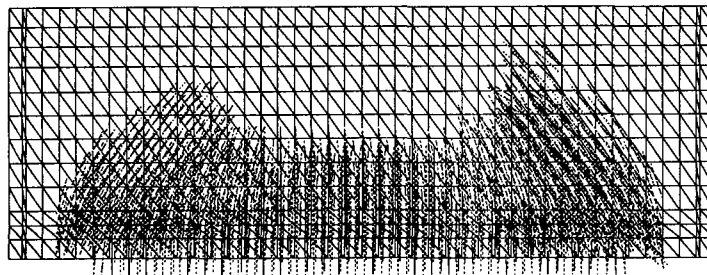


그림 6. 균열 양상

3. 탄소섬유보강

3.1 실험개요

기존섬유보강연구결과에 의하면, R/C구조물의 전단보강시 섬유와 정착길이를 충분히 확보하거나 구조물 전체를 감싸므로써 섬유의 박리에 의한 구보물의 급작스런 전단파괴를 방지하는 방법이 가장 효율적이라 할 수 있다.^{8)~10)} 그러나, 실제 전단보강을 필요로 하는 구조물들은 상부구조물 및 구조물형상 등으로 인한 작업 공간에 제약이 많고, 특히 교각 등의 구조물은 변단면을 형성함으로써 충분한 정착길이를 갖도록 하거나, 수직 또는 수평으로 감싸는 방법으로 시공하기가 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 전단지간, 섬유의 방향 및 섬유의 정착방법으로는 보강재의 단부박리 및 전단균열면의 응력집중에 의한 보강재 박리를 억제하기 위하여 pilot시험의 깊은보 공시체에 섬유앵커를 사용하였다. 탄소섬유의 특성과 실험변수를 표3과 표4에 나타내었다.

표 1. 탄소섬유 및 에폭시 특성

재료	성질	
탄소섬유 Sheet	인장강도 (kg/cm ²)	46,000
	인장탄성률 (%)	2.4
	섬유중량 (g/m ²)	300
	비중	1.82
	파단 시신율 (%)	1.5
	1층시공두께 (mm)	1.2
탄소섬유 Plate	Width (mm)	50
	Thickness (mm)	1.2
	Cross sectional area (mm ²)	60
	E (N/mm ²)	155,000
에폭시	극한인장강도(MPa)	552
	파단시신율	2%
	E (MPa)	27,800

표 2. 실험변수

시험체명	보강방법	
탄소섬유 Sheet	C-V2-W	측면수직보강+보강길이
	C-H2-Ac	측면수평보강+보강길이 + 섬유앵커정착
	C-I2-W	측면경사=자형보강 + 보강길이
탄소섬유 Plate	S-I2-B	측면경사스터립보강 + 보강길이 + 앵커볼트정착
	S-I2-S	측면경사스터립보강 + 보강길이

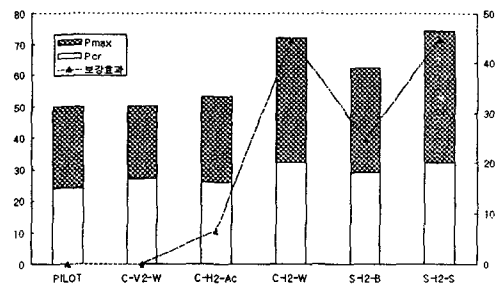
3.2 실험결과

Pilot시험의 무보강 실험체와 같은 방법으로 전단지간 55cm에 대칭으로 강재 spreader beam을 사용하여 4 점재하로 파괴시까지 단조증가시켜가며, 각 하중별로 인장, 압축 철근, 콘크리트 및 섬유 주방향의 변형을 및 주하중과 처짐을 Data logger를 통해 자동으로 측정하였다.

표 3. 시험체별 전단균열 발생하중 및 최대하중

시험체명	Pcr (ton)	Pmax (ton)	보강효과(%)
PILOT	28	49	-
C-V2-W	27	50.10	0.04
C-H2-Ac	26	53.16	6.53
C-I2-W	32	72.11	44.51
S-I2-B	29	62.17	24.59
S-I2-S	32	74.25	44.80

그림 7. 시험체별 전단균열 Pcr 및 Pmax, 보강효과.



5. 고찰

5.1 파괴양상

실험변수에 무관하게 대부분의 시험체가 26~32ton에서 시험체에 초기압축전단균열이 발생하며, 정착을 병행하지 않은 수직·수평보강형태의 시험체는 발생된 균열면에 응력이 집중되어 균열면에서 발생된 박리가 하중이 증가함에 따라 점차적으로 확장됨과 함께 섬유유 휘어짐 현상으로 콘크리트 전단균열폭이 급격히 증가됨으로써, 보강효과 또한 크지 않은 것으로 나타났다. 반면에 경사보강의 경우, 상대적으로 수직·수평보강 형태 보다는 18~20ton정도 전단내력이 증가하였으며, 이는 균열발생 후 균열면에 직각으로 보강한 섬유유 균열폭의 증가에 저항하면서 시험체의 전단내력을 향상시켰으며, 앵커볼트를 이용하여 정착을 한 경우에 단면손실 및 앵커볼트 정착시 시험편에 가력한 충격등으로 오히려 보강효과가 떨어지는 역효과를 보였는데, 이는 보강시험체의 폭이 상대적으로 좁기 때문인 것으로 추정된다.

5.2 시험체별 처짐 및 인장철근 응력

그림10에 나타내었듯이 PILOT 시험체는 약 10ton까지는 일정한 기울기를 보인 다음, 25ton에서 초기전단 균열 발생과 함께 처짐에 단차를 이루며, 40ton을 넘어서면서 2차 파괴(전단균열이 전높이에 걸쳐 발생)로 인하여 또한번 처짐의 증가양상을 보인후 최대하중 근처에서는 처짐의 급격한 증가를 나타내었다, 보강시험체의 경우 PILOT 시험체와 거의 비슷한 양상을 보였으며, 섬유보강방향에 따라 다소 차이가 있으나, 처짐제어 효과가 있는 것으로 나타났다. 시험체별 처짐을 보면 탄소섬유 PLATE로 보강한 시험체의 처짐이 상대적으로 탄소섬유 SHEET로 보강한 시험체보다 처짐제어효과가 큰 것으로 나타났다.

PILOT 시험체의 하중-철근응력은 그림11에 나타내었듯이 처짐곡선과 마찬가지로 일정한 응력증가를 나타낸 후 약 25ton에서 전단파괴예상부의 철근응력이 급격히 상승하여 32ton을 넘어서면서 시험체의 중앙부의 인장철근응력을 초과하였다.

탄소섬유로 보강한 시험체는 보강방향 및 정착에 따라 인장철근의 응력에는 큰 차이를 나타내지 않았고, 경사방향 보강형태가 수평·수직보강형태보다 인장응력 분담효과가 큰 것으로 나타났다.

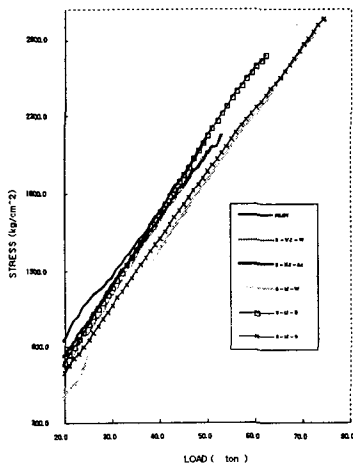


그림 8. 인장철근 응력곡선.

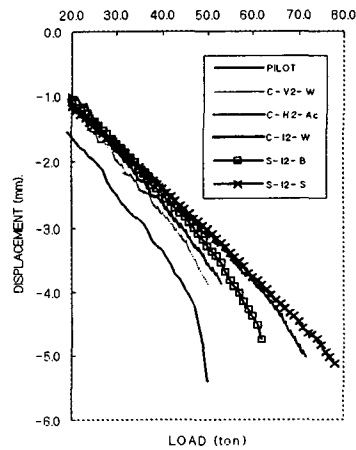


그림 9. 시험체별 처짐.

6. 결 론

탄소섬유를 이용하여 보강된 깊은보의 정적 파괴 실험 결과 섬유의 보강방향 및 정착유무에 따라 보강효과와 파괴양상 및 구조거동에 차이를 실험변수별로 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 섬유보강에 무관하게 거의 같은 하중에서 초기전단균열이 발생되었으며, 섬유보강된 Deep beam의 전단 파괴는 압축전단파괴(failure of compression strut)로 인하여 초기전단균열이 발생하므로서 1방향 인장응력에만 저항하는 섬유보강재의 경우, 초기균열을 크게 억제하지 못하였다.
- (2) 수직보강형태의 시험체는 보강효과가 거의 나타나지 않았고, 경사보강의 경우, 보강효과가 크게 나타났는데 이는 균열발생 후 균열면에 직각으로 보강한 섬유가 균열폭의 증가에 저항하면서 시험체의 전단내력을 향상시켰다.
- (3) 섬유앵커로 정착을 병행한 경우, 측면보강섬유의 급작스런 박리파괴를 억제하였으나, 균열면을 중심으로 일정구간의 박리로 인하여 시험체가 파괴됨으로서 큰 보강효과를 나타내지 못하였다. 반면에 π 자형 정착을 병행한 경사보강시험체는 측면경사보강한 시험체와 비교하여 보강효과를 14%정도 상승시키며 정착부로 인하여 보강재의 완전박리를 구속함으로써 시험체의 취성파괴양상을 감소시켰다.
- (4) 섬유의 충분한 정착길이를 확보할 수 있는 휨보강의 경우와는 달리, 측면보강의 경우 섬유파단강도에 도달하기 전에 섬유에폭시와 콘크리트 계면에서 박리(Adhesion bond failure)가 시작되었으며, 박리된 콘크리트 표면에 에폭시의 함침흔적이 없는 것으로 미루어 볼 때, 보강재의 인장강도 및 에폭시의 전단강도와 함께 콘크리트강도가 박리억제에 기여할 것으로 추측된다.
- (5) 전단보강시 섬유보강방향에 따라 전단내력 증진뿐만 아니라, 처짐제어와 함께 인장철근이 받는 인장응력의 일부를 부담하는 것으로 나타났다.

따라서 깊은보의 초기전단균열은 섬유방향과 정착유무에 관계없이 거의 같은 하중에서 발생하며, 하중이 증가함에 따라 하중재하점과 지점을 연결하는 압축대(compression strut)의 파괴모드 형태를 보이므로, 비선형 구조해석을 통해 예상되는 파괴균열형상에 직각방향으로 섬유를 배향하고, 깊은보의 모서리등을 둥글게 Rounding 하여 섬유파단을 방지한채 π 자형 또는 가능한 폐합형태의 보강을 통해 합리적인 깊은보의 전단보강이 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. T. M. Roberts et al (1989), "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive layer of Plated RC Beams", The Structural Engineer Volume 67 No.12/20
2. 심종성 외 6인 (1995), "강판 및 탄소섬유 sheet로 보강된 R/C보의 피로거동에 관한 연구", 한국 콘크리트 학회 봄 학술발표회 논문집, 제7권, 1호(통권 제12집), pp319~324

3. 심종성 외 3인 (1995), "흑트강섬유보강 철근콘크리트보의 전단거동에 대한 실험적 연구", 한국콘크리트 학회 제7권 5호, pp.179~188
4. 심종성 외 2인 (1996), "손상된 R/C보의 보강후 피로거동에 관한 실험적 연구」 대한토목학회 논문집 제16 권 제 I -2호, pp.135~142
5. 이창근 외 2인 (1996), "노후콘크리트 구조부재의 구조실험과 분석" 한국도로공사 연구 보고서
6. FEA Ltd, LUSAS Manual
7. Scordelis et al (1975), "Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form." Proceedings ,ASCE,V.101,ST3, Mar. pp.523-538
8. Tom Norris et al (1997) "Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheet"ASCE July pp.903~911
9. Nobuhiro Hisabe et al (1997) "Experimental Study on Carbon Fiber Sheet for Shear Strengthening" International Conference on Engineering Materials June 8-11
10. 정현수 외 6인 (1996) "탄소섬유, 아라미드 섬유, 강판을 이용한 철근콘크리트 보의 내력 보강에 관한 실험 연구" 창조엔지니어링 연구보고서