

탄소격자섬유를 이용한 RC 깊은보의 정적파괴실험

Static loading test of R/C deep beams with CFRP-Grids

조 병 완* 김 영 진** 태 기 호***
Jo, Byung-wan Kim, Young-jin Tae, Ghi-ho

ABSTRACT

Structural behavior of R/C deep beams was investigated and compared to those of specimens strengthened with CFRP Grids. Test results show that the crushing of compression strut for the unstrengthened R/C deep beams is changed to the group of several diagonal cracks at mid-depth within the shear span. Strengthened specimens grow to be more ductile after the redistribution of internal force on the CFRP Grids. The failure mode and variations of strains in the specimens are dependent on the shear span-to-depth ratio. The lower the shear span-to-depth ratio, the bigger failure load and the less variations in strain are observed. Additional anchorage of CFRP Grids does not only cause the improvement in the internal resistance, but also control the brittle shear failure of specimen after reaching the maximum loads.

1. 서 론

우리나라의 도로시설물은 1960년대에 주요 기간도로가 정비되기 시작했으며, 1960년대 말부터 1970년대 초반에 경부고속도로, 경인고속도로 및 호남고속도로가 건설되었다. 그러나, 1970년 이전에 건설된 구조물의 경우, 토목기술의 사회적 여건으로 인하여 그 당시 설계 및 시공된 구조물들은 저급재료, 낮은 설계기준 및 시공경험의 부족 등의 문제점을 안고 있으며, 1980년 이후에 건설된 교량은

① 설계 계산오차, 설계 도면 오차, 적용기준의 변화등의 설계요인
② 재료의 품질불량, 시공의 문제점등의 시공요인
③ 교통하중의 변화, 환경적 영향, 지진, 화재, 충돌 등의 외적요인
등으로 인한 구조물의 내하력 손실과 함께 누적교통량의 증가와 하중규모의 증가로 인하여 구조물의 안전문제는 심각히

우려되고 있으며, 구조물의 내력보강을 위한 보강기술의 확립이 요구되고 있다.

현재 국·내외적으로 내하력 상실 및 사용하중의 증가 등으로 말미암아 기존구조물의 성능향상을 위한 R/C 구조물의 여러가지 보강공법 즉 단면의 확장공법, 부재의 증설공법, 프리스트레싱 도입공법 및 강판 압착공법과 함께 최근 신소재로 개발된 탄소섬유(Carbon fiber), 아라미드 섬유(Aramid fiber) 및 유리섬유(Glass fiber) 등의 보강효과 및 보강후 보의 구조적 거동에 대한 연구가 활발히 이루어지고, 실용화 단계에 이르렀다. 그러나 대부분의 연구가 휨내력이 지배적인 일반보에 집중되어 있으며, 상대

* 정희원, 한양대학교 지구환경건설공학부 부교수, 공학박사

** 한양대학교 토목공학과, 석사

*** 한양대학교 토목공학과 석사과정

적으로 구조물 형상 및 상부구조물 등의 외적요인으로 인하여 보강재의 일체거동을 위한 정착길이 확보가 어렵고, 실제 취성파괴로 더 위험한 파괴양상을 보이는 깊은보의 전단보강에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 전단지간(a/d)이 1.25이고, L/a 이 5 이하인 깊은 보(길이 210cm, 높이 53cm, 폭 15cm) 시험체를 대상으로 탄소섬유 원사를 공장가공한 형태인 격자형 탄소섬유를 이용한 보강시험체에 대하여 전단지간에 따른 정적파괴실험을 실시함으로써, 섬유보강된 일반보와의 파괴거동의 차이점을 비교·분석하며, 깊은 보의 전단보강방법으로서 섬유보강재의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 깊은보의 전단파괴양상

R/C 보의 파괴양상은 주철근과 압축콘크리트 사이에서 수평면을 따라 전단흐름이 존재하는 보작용(Beam action)과 철근의 부착상실 혹은 사균열이 가력점에서 지지점까지 진행하여 수평전단흐름전이의 방해로 나타나는 아치작용(Arch action)으로 구별된다.

기존의 여러 연구에 의하면, 깊은보의 전단파괴양상은 경사진 균열이 하중작용점과 지지점으로 진행된다. 이러한 균열은 사실상 주철근에서 압축영역으로의 수평전단흐름을 파괴하며, 그러한 거동은 보작용(Beam action)에서 아치작용(Arch action)으로 변화시킨다. 여기서 주철근은 아치기구(Arch mechanism)에서 인장재 역할을 하고 지점에서 지점까지 균일한 인장력을 가진다. 아치기구는 하중에 대한 저항능력이 매우 크므로 깊은 보는 사인장균열이 발생한 후에도 상당한 보유강도를 보인다. 가장 일반적인 파괴모드의 경우는 그림 1에서 알수있듯이 1) 지점이나 하중의 가력점부근에서의 콘크리트의 붕괴 2) 피로파괴를 야기시키는 인장축 철근의 항복으로인한 파괴 3) 콘크리트의 compression strut의 파괴 4) 콘크리트 사인장파괴 로 나눌수 있다.

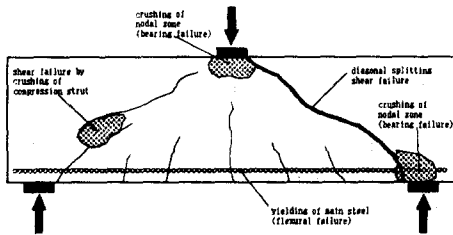


그림. 1 깊은보의 일반적인 파괴모드

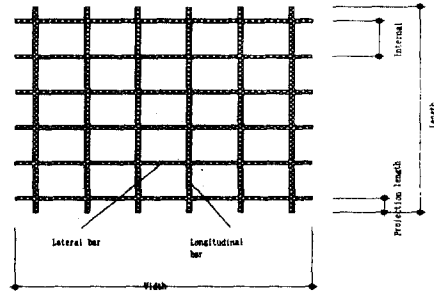


그림. 2 탄소격자연속섬유(Names of CFRP Grid)

3. 전단보강 실험

3.1 개요

본 연구는 섬유보강재를 이용한 깊은 보의 전단보강을 연구하기 위하여, 전체 시험체의 구성을 크게 2가지로 나누었다. 첫째, 보강길이에 따른 섬유보강의 보강효과 비교 및 거동분석, 둘째, 보강재의 정착유무에 따른 보강시험체의 전단파괴 저항능력의 변화 등을 고찰하기 위하여, 다음과 같이 시험체를 계획하였다.

시험체는 순지간이 190cm, 유효높이가 45cm인 높이가 큰 단순보로서 섬유보강시 전단보강효과 검증 을 위하여, 휨철근을 D25-2EA를 2단 배근하고, 시험체 하부 지점부에서의 철근의 정착파괴를 방지

하기 위하여 양단을 90° 절곡 설계했다. 또한, 시험체의 전단파괴를 유도하기 위하여 상하단의 주철근의 위치확보를 위한 D6의 수직철근을 제외하고는 전단철근은 배근하지 않았으며, 표준시험체의 형상 및 재료를 그림 3(b)에 나타내었다.

시험체 제작에 사용한 재료는 표 1 과 같이 콘크리트와 철근의 경우, 일반적으로 토목구조물의 하부 구조물 제작시 사용되는 콘크리트 배합강도 240kg/cm² 의 레미콘과 항복강도 3000kg/cm² 의 D25, D13, D6을 사용하였으며, 시험체 보강재료는 탄소섬유 원사를 가공한 형태인 격자형 탄소섬유를 사용하여 콘크리트 타설후 재령 28일이 경과한 후 각 실험변수에 따른 보강길이 및 정착방법에 맞추어 보강을 실시하였다.

표 1. 콘크리트 및 철근 사용재료

Concrete		
σ_{ck}	maximum size of coarse aggregate	Slump
240 kg/cm ²	20 mm	13 cm
Steel		
σ_y	E	Size
3,000 kg/cm ²	2.1×E6 kg/cm ²	D6, D13, D25

본 실험에서 사용한 격자형 보강섬유는 일본에서 일반적으로 가장 널리쓰여지고 있는 탄소섬유 원사를 사용한 격자형 탄소섬유로서(그림 2참조) 단면적이 6.6mm인 C4이며, 탄소섬유 Plate와 격자형 탄소섬유의 사용재료에 대한 기본적인 물성치를 나타내면 표 2와 같다.

표 2. 탄소격자섬유속섬유의 특징

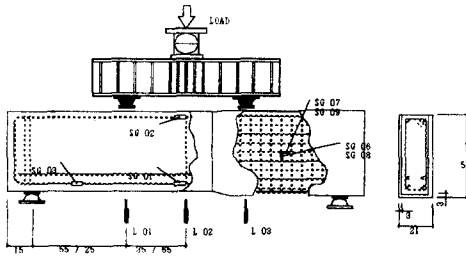
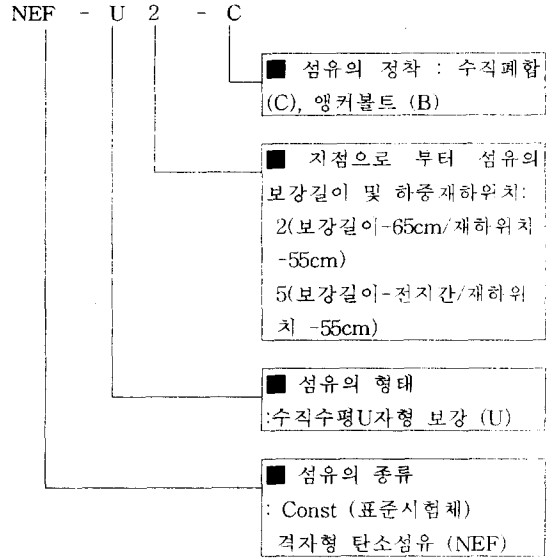
Type	Bar number	Maximum load(ton)	Rigidity (tons)	Standard weight(g/m)	Type	Bar number	Maximum load(ton)	Rigidity (ton)	Standard weight(g/m)
G	G2	0.26	12.9	7	C	C2	0.26	22	3.2
	G3	0.52	25.8	15		C3	0.52	44	6.3
	G4	0.78	38.7	22		C4	0.78	66	9.5
	G6	2.1	103	60		C6	2.1	175	25
	G10	4.7	232	130		C10	4.7	392	56
	G13	7.8	387	220		C13	7.8	650	92
	G16	12.7	593	340		C16	12.0	1000	142
	G19	17.7	877	510		C19	17.7	1480	210
	G22	23.4	1160	670		C22	23.4	1950	277

3.2 실험 변수

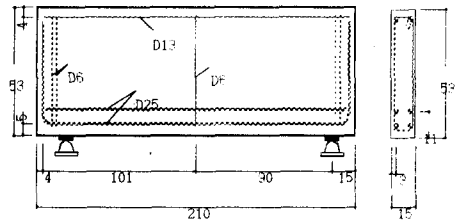
기존섬유보강연구결과에 의하면, R/C구조물의 전단보강시 섬유의 정착길이를 충분히 확보하거나 구조물 전체를 감싸므로써 구조물의 전단내력 증진과 함께, 섬유의 박리에 의한 구조물의 급작스런 전단 파괴를 방지하는 방법이 가장 효율적이라 할 수 있다. 그러나, 실제 전단보강을 필요로 하는 구조물들은 상부구조물 및 구조물형상 등으로 인한 작업공간에 제약이 많고, 특히 교각 등의 구조물은 변단면을 형성함으로써 충분한 정착길이를 갖도록 하거나, 수직 또는 수평으로 감싸는 방법으로 시공하기가 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 보강길이 및 섬유의 정착방법 등을 실험변수로 사용하였으며, 시험체명은 "섬유종류-보강형태, 보강길이-부착형태"에 따라 배열하였으며, 실험변수에 따른 시험체명을 나타내면 표 3과 같다.

표 3. 실험 변수에 따른 시험체명

보강재료	공시체명	보강방법
전단지간 $a/d=1.25$		
표준 시험체	CONST $a/d=1.25$	무보강+전단지간 $a/d=1.25$
격자형 탄소섬유	NEF-U2-C1	수직수평U자형보강+보강길이 (2V)+앵커볼트정착+수직폐합
	NEF-U5-U1	수직수평U자형보강+보강길이 (5V)+앵커볼트정착
	NEF-U2-U1	수직수평U자형보강+보강길이 (2V)+앵커볼트정착
	NEF-U2-U2	수직수평U자형보강+보강길이 (2V)+앵커볼트정착(2배)



(a) 시험 Set-up



(b) 시험시편의 기하학적 형상/치수(mm)

그림. 3 Test specimen

3.3 실험 방법

3.3.1 재 하 방법

그림 3(a)에 나타내었듯이 하중 재하는 100ton 용량의 Shimadzu사 만능시험기를 사용하였으며, 시험체에 대하여 순지간을 190cm로 유지시킨후 지점위치에서 55cm위치에 대칭으로 4점재하로 하중을 파괴까지 변위제어 방법으로 하중을 가력하였다.

3.3.2 측정 방법

각 하중별로 인장·압축철근, 콘크리트 및 섬유 주방향의 변형률 및 주응력과 처짐을 측정하였다. 특히 전단보강으로 인하여 균열의 진전상태를 관찰할 수 없는, 시험체에 대해서는 초기전단균열 변형률 및 콘크리트 변형률을 측정하면서 표면의 박리여부를 면밀히 관찰하였다.

4. 실험 결과

4.1 표준 깊은보의 파괴

표준시험체 CONST의 경우, 28ton에서 복부 압축 전단파괴가 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 이미 발생된 전단균열 주변에 새로운 전단균열이 다수 발생하였고, 재하하중이 45ton에 이르자, 발생된 전단균열이 지점과 하중재하점까지 성장한 후, 약 49ton에서 전단균열의 균열폭이 크게 증가하면서 전단파괴되었다. 그림 4는 균열양상의 분포를 보여주고 있다.

4.2 CFRP-Grid 시험체

시험체를 U자형 보강재로 아래위로 폐합한 경우, 아랫부분과 측면만을 U자형 보강재로 보강한 시험체와 비교하여 초기전단균열발생하중을 크게 증대시켜 42ton 근처에서 초기전단균열이 발생하여 80ton 근처에서 발생한 균열 하중재하점과 지점부 근처까지 진전되었으나 파괴시 까지 다수의 전단균열과 함께 휨균열이 35cm 길이 까지 발생하였으며, 지점과 하중재하점사이의 넓은 분포에 걸쳐 균열이 발생하였다. 최대하중 93.20ton에 도달한 후에도 매우 안정적인 파괴양상을 나타내었으며 처짐이 증가함에 따라 콘크리트 면과 리프리트의 박리에 따른 보강섬유의 박리소리가 발생하였다. 다음 그림 5는 탄소직자섬유로 수직폐합 보강한 시험체의 파괴양상을 보여주고 있다.

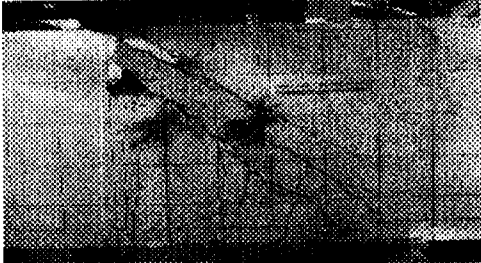


그림. 4 표준시험체의 균열양상(a/d=1.25)



그림. 5 Group of diagonal cracks (NEF-U2-C1)

4.3 하중-변위관계

그림 6 에 나타내었듯이 CONST 표준시험체는 약 10ton까지는 초기하중 재하시 하부지점에 시험체가 맞추어 지는 과정에서 처짐이 증가한 후 일정한 기울기를 보인 다음, 25ton에서 초기전단균열 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.

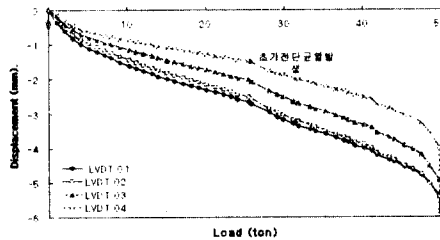


그림. 6 Load-displacement curve

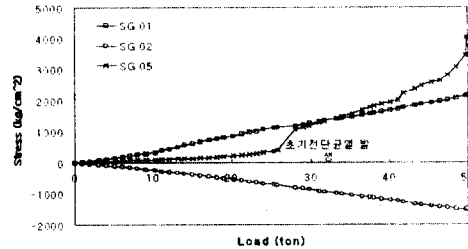


그림. 7 Load-steel, CFRP-Grid Stress Curve

4.4 하중-철근, 탄소격자섬유 용력

하중-철근용력은 처짐곡선과 마찬가지로 그림 7에 나타났듯이 일정한 용력증가를 나타낸 후 약 25ton에서 전단파괴예상부의 철근용력이 급격히 상승하여 32ton을 넘어서면서 시험체의 중앙부의 인장철근용력을 초과하였다. 이는 전단균열 발생과 함께 수평전단흐름이 파괴되어 보작용(Beam action)에서 아치작용(Arch action)으로 변환하는 과정에서 주철근이 아치기구(Arch mechanism)에서 인장재 역할을 함으로서 인장용력이 커지게 되며, 지점부의 파괴로 인한 전단부 인장철근의 용력집중에 의하여 중앙부의 주철근의 용력보다 커지는 양상을 나타내며, 최대하중 근처에서 처짐의 급격한 증가현상과 동일하게 전단부 철근의 인장용력 또한 증가 기울기가 급해졌다. 섬유의 보강방법에 따라 다소 상이한 결과를 보이거나, 대체로 섬유보강시 표준시험체와 비교할 때 처짐을 억제하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

보강된 깊은보의 정적실험 결과 보강길이 및 정착유무에 따라 보강효과와 파괴양상 및 구조거동에 차이를 나타내었으며, 실험변수별로 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 초기전단균열 발생하중은 전단지간에 따라 상이하며 전단지간이 1.25의 경우는 섬유보강에 무관하게 거의 같은 하중에서 초기전단균열이 발생되었으며, 섬유보강된 Deep beam의 전단파괴는 압축전단파괴(failure of compression strut)로 인하여 초기전단균열이 발생하므로써 1방향 인장용력에만 저항하는 보강재의 경우, 초기균열을 크게 억제하지 못하였다.
- 2) 앵커볼트로 정착을 병행한 경우, 측면보강섬유의 급작스런 박리파괴를 억제하였으나, 균열면을 중심으로 일정구간의 박리로 인하여 시험체가 파괴됨으로서 큰 보강효과를 나타내지 못하였다.
- 3) 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.

REFERENCES

1. Alshegeir, A., and Ramirez, J. A., "Strut-Tie Approach in Pretensioned Deep Beams", ACI Structural Journal, V. 89, No. 3, May-June 1992, pp. 296-304.
2. Ashraf F. Ashour "Tests of Reinforced Concrete Continuous Deep Beams", ACI Structural Journal, V. 94, No. 1, January-February 1997, pp. 3-12.
3. Rogowsky, D. M.; MacGregor, J. G.; and Ong, S. Y., "Tests of Reinforced Concrete Deep Beams," ACI Structural Journal, V. 83, No. 4, July-Aug. 1986, pp. 614-623.
4. Kong, F. K.; Robins, P. J.; and Cole, D. F., "Web Reinforcement Effects on Deep Beams," ACI Journal, Proceedings V. 67, No. 6, Dec. 1970, pp. 1010-1017.
5. Susanto Teng, "Performance of Strengthened Concrete Deep Beams Predamaged in Shear", ACI Structural Journal, V. 93, No. 2, March-April 1996, pp. 159-171.
6. W. AHN, G. GERVOIS, and D. V. REDDY "Laminate Bonding for Concrete Repair and Retrofit-an Overview"
7. Zhang, S., Raoof, M. and Wood, L. A. "Prediction of Peeling Failure of Reinforced Concrete Beams with Externally Bonded Steel Plates" Proc. Instn. Civ. Engrs, 257-268, 1995.