

탄소 및 아라미드섬유를 이용한 철근콘크리트 깊은 보의 전단보강에 관한 실험적 연구

조 병 완* · 김 영 진*
(99년 4월 22일 접수)

An Experimental Study on Shear Strengthening of the R/C Deep Beams
Using Carbon and Aramid Fibers

Byung-Wan Jo* · Young-Jin Kim*

Key Words : Carbon Fiber(탄소섬유), Aramid Fiber(아라미드섬유), Shear Strengthening
(전단보강), Deep Beam(깊은보), Anchorage(정착), Peeling-Off(박리), Fiber
Reinforcement(섬유보강)

Abstract

An experimental study was carried out to examine the structural behavior of reinforced concrete deep beams strengthened with aramid fiber sheets, carbon fiber sheets and plates, and to propose the reasonable strengthening method for the deteriorated R.C. deep beams. Results show that the most significant differences in behavior of reinforced concrete deep beams strengthened with fiber sheet and plate were mainly due to various fiber orientations and anchorage. Deep beams diagonally strengthened with carbon fibers show better performance compared with those of vertically, horizontally strengthened specimens and produce the increase in the shear resistance through the redistribution of internal forces after the initial cracks occur. However, strengthened deep beams without anchorages might show unreasonable, brittle peeling-off failure of fiber reinforcements.

1. 서 론

국가산업경제의 발달로 사회기반시설이 급격히
확충되면서, 장대교량이나 대형항만구조물 등에

보의 높이가 지간에 비하여 상대적으로 크고, 보의
폭이 지간이나 높이보다 매우 작은 보 형태인 철
근콘크리트 깊은보(deep beam)가 널리 사용되고
있다. 해안 및 해양공학에서 깊은보는 특히 잔교식

* 정회원, 한양대학교 토목공학과

부두의 전면벽이나 대형크레인 기초보로 사용되고 있으며, 일반적으로 깊은보란 보의 지간(l_n)과 유효높이(d)와의 비(l_n/d)가 5보다 작은 보, 또는 전단지간(a)과 유효높이의 비(a/d)가 2보다 작은 보이며, 깊은보의 강도는 휨내력이 지배적인 일반보의 구조거동과는 달리, 전단에 지배된다. 깊은보에서 발생하는 균열은 하중작용점과 지지점으로 진행되며 이러한 균열은 주철근에서 압축영역으로의 수평전단흐름을 파괴하며, 그러한 거동은 보작용에서 아치작용으로 변화시킨다. 또한 깊은보에서 발생하는 균열의 방향은 일반보의 사인장균열 기울기 (45°)보다 크고, 때로는 수직에 가깝게 되므로 수직스터럽 외에 수평방향의 전단철근이 필요하다.

철근콘크리트 구조물의 일반적인 보강공법으로 강판압착공법, 단면증설공법, 거더증설공법 등이 실용화단계에 이르렀으나 교량구조물과 잔교식 부두와 같은 해안구조물에 많이 사용되어온 강판 압착공법은 장기간 유해 환경에 노출됨으로써 에폭시 열화와 강판 부식 등의 문제가 대두되었다. 섬유보강플라스틱(fiber reinforced plastic)을 이용할 경우에는 직접적인 飛來鹽分과 같은 일반적인 부식환경에는 강재보다 유리하므로 여러가지 형태의 섬유보강플라스틱에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^{1)~5)}. 이러한 방법으로 보강된 철근콘크리트 구조물의 보강 후 파괴거동은 보강내용에 따라 휨 파괴 또는 압축파괴와 같은 내력 부족 파괴와 보강재의 박리(debonding)파괴로 분류할 수 있다⁶⁾. 이 중에서 박리파괴는 많은 연구자들이 이론적인 연구와 실험을 통해 접착제 파단, 보강재 박리(peeling off), 단부 응력집중에 의한 콘크리트 철근 덩개의 탈락(rip-off) 형태 등으로 구분할 수 있다. 그러나, 대부분의 연구가 휨내력이 지배적인 일반보에 집중되어 있으며 실제 취성파괴로 더 위험한 파괴양상을 보이는 깊은보의 전단보강에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 보의 높이가 지간에 비하여 상대적으로 큰 철근콘크리트 깊은보를 전단보강하기 위하여, 현재 섬유보강재로 널리 사용되고 있는 아라미드 슈트, 탄소섬유 슈트 및 판 등의 보강섬유의 종류, 섬유의 전단보강방향(수평, 수직 및 경사

보강), 섬유보강재 단부의 박리억제를 위한 정착유·무 등을 실험변수로 하여 정적파괴실험을 통해 구조적거동을 비교·분석한 후 합리적인 전단보강방법을 제시하고자 한다.

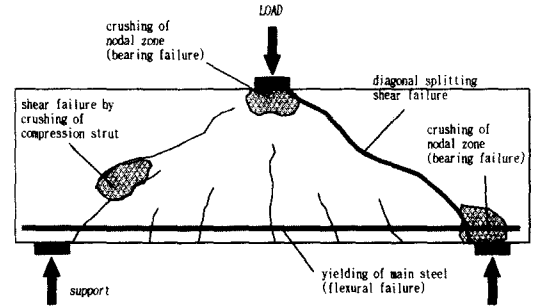


Fig. 1 Typical failure modes of deep beams

2. 깊은보의 구조적 거동

깊은보에 작용하는 하중은 하중재하점과 지지사이 에 형성되는 압축대(compression strut)를 통해 직접 지점으로 전달되며, Fig. 1에 보여진 바와 같이 극한전단강도의 약 20%의 하중에서 최대모멘트 부분 또는 지간 중앙부에 초기 휨균열이 발생하며, 극한파괴하중의 약 40%의 하중에서 전단지간내에 초기 사인장균열이 생기며, 하중이 점차 증가함에 따라 압축대 경사면을 따라 사인장 할렬파괴(I), 지점부 또는 하중재하부 파괴(II), 인장철근항복에 따른 휨파괴(III), 그리고 재하점과 지점을 연결하는 압축대 파괴(IV)등의 파괴모드 형태로 발전하게 된다.

이러한 깊은보의 파괴모드는 “strut-and-tie analogy”에 의해 설명되어지는 깊은보의 파괴모드에서 (II), (III) 파괴모드는 실제적으로 깊은보에 심각한 손상을 입히게 되며, 보강작업 또한 상당히 광범위하게 되고, (III) 파괴모드는 일반적인 휨보강방법에 의해 휨내력을 향상시키므로써 추가적인 휨균열 발생을 억제하게되며, (I), (IV) 파괴모드의 경우, 전형적인 깊은보의 전단파괴형상⁷⁾으로 휨파괴와 비교하여 매우 취성적인 파괴양상을 나타냄과 동시에 구조물의 형상과 하중위치에 따라 심도 깊은 보강방법의 연구가 필요한 실정이다.

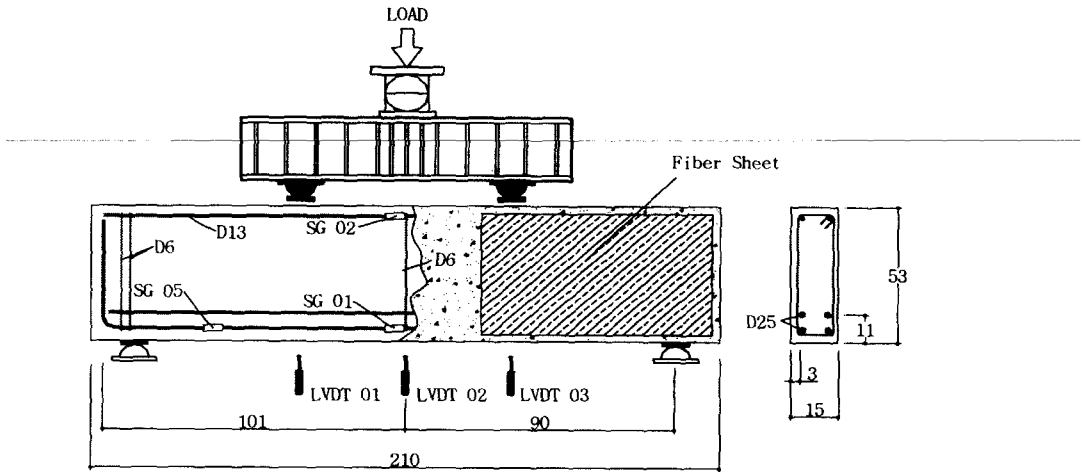


Fig. 2 Geometrical dimension of test specimens (all dimensions in mm)

따라서, 본 연구에서는 깊은보의 (I), (IV) 파괴 모드에 전단보강 후 깊은보의 거동을 관찰하는데 연구목적이 있다.

3. 실험 개요

3.1 시험체 제작 및 전단보강

시험체 제작에 사용된 재료는 일반적으로 건설구조물에 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 형상은 Fig. 2에 보여진 바와 같이 폭 15cm, 높이 53cm(유효높이 46cm)의 단면이며, 시험체의 길이는 210cm이다.

섬유보강시 전단보강효과 검증을 위하여, 휨철근은 2-D25를 2단 배근하였으며, 시험체 하부 지점

부에서 철근의 정착파괴를 방지하기 위하여 양단을 절곡하여 설계하였다. 또한, 시험체의 전단파괴를 유도하기 위하여 상·하 주철근 배근을 위한 수직철근(D6) 이외의 전단철근은 배근하지 않았으며 전단지간과 유효높이의 비는 1.25이다.

철근콘크리트 구조물을 보강하는 경우, 섬유보강공법의 보강 매트릭스인 에폭시의 박리에 의한 접착제 파괴 및 보강재 박리파괴가 중요한 파괴모드로서 보강재의 정착이 중요한 변수이다^{1)~5)}. 따라서 본 연구에서는 섬유보강재의 종류(아라미드, 탄소섬유쉬트 및 판)와 섬유의 방향(수직, 수평, 경사), 섬유보강재의 박리파괴를 예방하기 위한 정착방법으로 수직폐합자켓, 앵커볼트와 유리섬유앵커 등을 실험변수로 사용하였다. 아라미드, 탄소섬유쉬트, 판 및 에폭시의 재료적 특성과 실험변수, 시험체명을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 V, H, I는 수직, 수평, 경사보강의 보강방향

Table 1 Characteristics of carbon and aramid fibers

F R P	Thickness (mm)	Width (mm)	Tensile strength(kg/cm ²)	Tensile elasticity ratio(%)	Strain at failure	Modules of elasticity(kg/cm ²)
Aramid sheet	1.0	-	36,500	1.2	0.025	1.19×10^9
Carbon sheet	1.2	-	46,000	2.4	0.015	2.4×10^9
Carbon plate	1.2	50	46,000	2.4	0.015	2.4×10^9

Table 2 Test specimens and failure loads

Specimens		Strengthening methods	Loads at first crack(ton)	Loads at failure(ton)	Strengthening effect(%)
Pilot		Control	26	49.0	-
Aramid sheet	A-V2-W	vertical strengthening	26	58.4	17.0
	A-H2-W	horizontal strengthening	30	55.2	10.7
	A-H2-J	horizontal strengthening + vertical jacket	31	55.2	10.5
Carbon sheet	C-V2-W	vertical strengthening	27	50.1	0.0
	C-H2-Ac	horizontal strengthening + fiber anchorage	26	53.2	6.5
	C-I2-W	inclined strengthening	32	72.1	44.5
Carbon plate	S-I2-B	inclined stirrup + anchor bolt	29	62.2	24.6
	S-I2-S	inclined stirrup strengthening	32	74.3	44.8

을 나타내며, W, J, Ac, S는 각각 측면보강, 수직폐합자켓, 앵커볼트 정착, 섬유앵커 정착 및 스티럽형태보강 등을 나타낸다.

3.2 하중 재하방법

하중재하는 Fig. 2에 보여진 바와 같이 100 ton 용량의 만능시험기를 사용하여 순지간을 190cm로 유지시킨 후 지점으로부터 55cm위치에 강재 보를 사용하여 4점 재하 방식으로 파괴시까지 1ton단위로 하중을 증가시켰으며, 중앙부와 전단파괴 예상부의 인장철근과 압축철근의 변형률(SG 01, 02, 05)과 처짐(LVDT 01~03)을 각 하중별로 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

무보강 깊은보의 경우, Fig. 3에 보여진 바와 같이 26ton에서 복부 압축 전단균열이 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 발생된 전단균열 주변에 새로운 전단균열이 다수 발생하였고, 45ton에서 복부 전단균열이 지점과 하중재하점까지 성장한 후 압축대를 형성하면서 49ton에서 처짐과 균열폭이 증가하여 전단파괴되었다.

섬유보강된 시험체의 경우, 전단균열발생으로 인해 전단파괴 예상구간에서의 변형률이 급격히 변하는 26~32ton에서 시험체의 지점과 하중재하점

사이에서 초기압축전단균열이 발생하였으며, 보강 시험체별 파괴양상을 Table 3에 정리하였다.



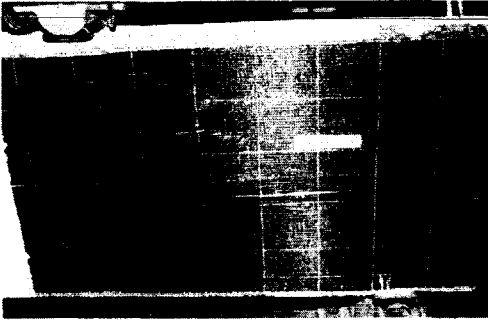
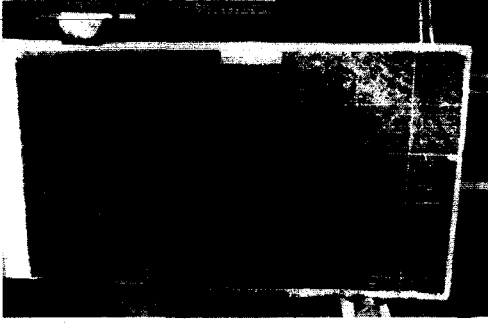
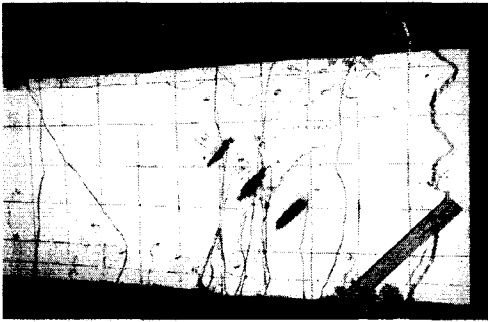
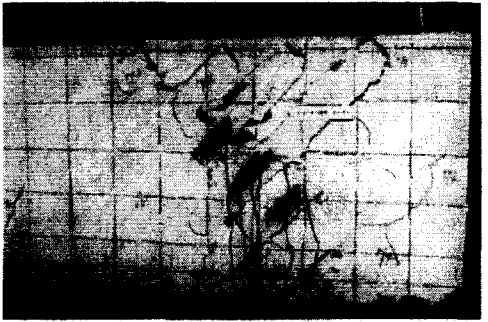
Fig. 3 Crack patterns of pilot deep beam

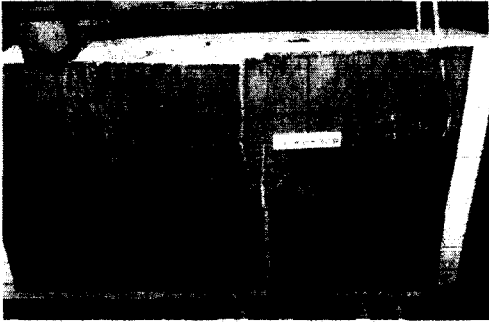
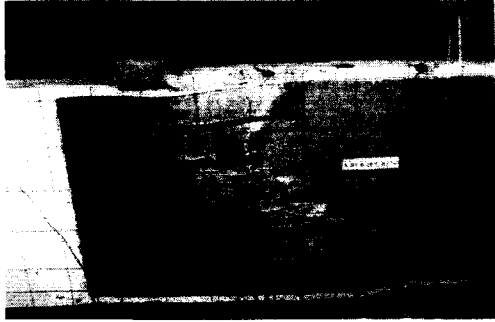


4.1 시험체별 파괴양상

보강섬유종류 등의 실험변수에 무관하게 대부분의 시험체가 26~32ton에서 초기압축전단균열이 발생하였으며, 정착을 병행하지 않은 수직·수평보강형태의 시험체는 하중이 증가함에 따라 발생된 균열면에서의 응력집중으로 인해 초기 균열면 근처에서 발생된 박리가 점차적으로 확장됨과 함께 섬유의 휘어짐 현상으로 콘크리트 전단균열폭이 급격히 증가한 후 전단파괴되는 양상을 보였다.

수직방향으로 자켓을 폐합시켜 정착보강을 병행한 경우, 초기균열억제 및 최대하중에는 큰 보강효

Table 3 Shear fracture patterns of strengthened specimens

C-H2-Ac	C-I2-W
	
<p>Peeling-off failure occurred along internal crack at 53ton and as displacement became large, fiber reinforcement was torn laterally but no peeling-off occurred at anchorage zone.</p>	<p>Initial bending cracks occurred and peeling-off about bearing point occurred by bearing stress at 50ton. And partial elliptic peeling-off occurred diagonally at 67ton, the top and bottom of crack zone was peeled off in the shape of triangle at 72ton.</p>
S-I2-B	S-I2-S
	
<p>Initial crack occurred at 29ton and shearing failure occurred at 62.17ton. Section loss by additional anchorage reduced P_{max} in contrast with S-I2-S but abrupt peeling-off failure reduced at the edge of reinforcement.</p>	<p>Initial shearing crack occurred at 32ton. The shearing crack extended to bearing point and loading point. Peeling-off shearing failure occurred along crack at the parts of insufficient reinforcement.</p>

A-V2-W	A-H2-W
	
<p>Peeling-off of reinforcement and shearing failure occurred suddenly at 59ton. Peeling off failure occurred along the crack diagonally.</p>	<p>Initial crack occurred diagonally at 47-50ton. Shearing failure occurred along the crack after peeling-off.</p>
A-H2-J	C-V2-W
	
<p>The initial crack of fiber-epoxy occurred at 41ton and shearing failure occurred along crack but the peeling off of fiber stopped at the vertical jacket.</p>	<p>Partial peeling-off occurred at 50ton and suddenly the peeling-off failure in a triangular form occurred round the crack at 51ton.</p>

과를 나타내지 않았으나 지점과 하중재하점을 향하여 대각선방향으로 진행되는 섬유박리가 수직폐합 정착보강부위에서 더 이상 진전하지 않았다.

Pilot 시험체와 비교하여, 초기 균열면 근처에서 섬유의 꺾임과 함께 박리가 진행된 수직·수평방향으로 보강한 시험체 보다 경사방향으로 보강된 시험체의 보강효과가 크게 나타났는데 이는 1방향 인장응력에만 저항하는 섬유보강재가 초기압축 전단균열 발생 후 균열면에 직각으로 보강한 섬유가 균열폭의 증가에 저항하면서 시험체의 전단내력을 향상시킨 것으로 판단된다.

4.2 하중-처짐

Fig. 4에 보여진 바와 같이 하중재하에 따른 시간중량의 처짐은 섬유의 종류 및 섬유보강방향에 따라 다소 차이가 있으나, 최대하중 근처에서 처짐이 급격하게 증가하는 무보강 시험체와 비교하여 섬유보강시험체의 처짐은 보강재의 완전박리 발생 전까지 효과적으로 처짐을 제어하였으며, 특히 수직·수평 보강형태보다는 경사방향의 보강시험체의 처짐제어효과가 크게 나타났다.

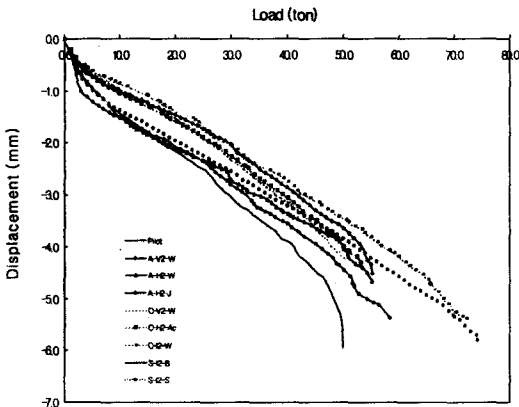


Fig. 4 Load-displacement curves

4.3 하중-철근응력

Figs. 5~7에 보여진 바와 같이 시험체별 중앙부 인장철근과 압축철근의 응력은 경사방향 보강형태가 수평·수직보강형태보다 인장응력분담효과가

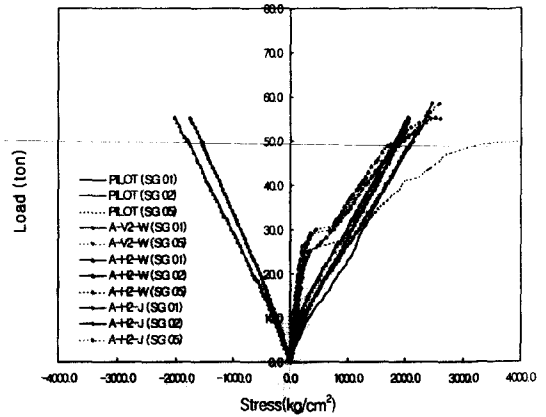


Fig. 5 Load-stress curves of strengthened specimens using aramid fiber sheet

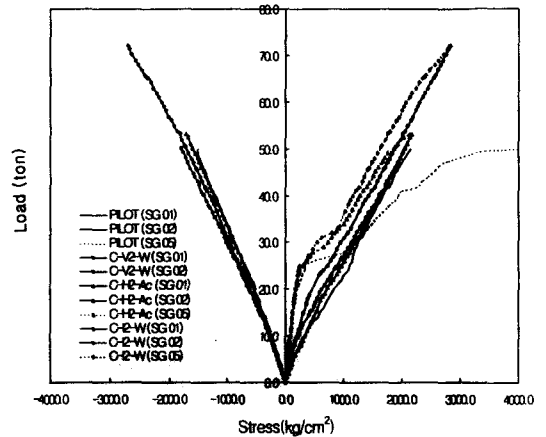


Fig. 6 Load-stress curves of strengthened specimens using carbon fiber sheet

어느 정도 큰 것으로 나타났다. 무보강시험체의 중앙부 인장철근 응력(SG 5)이 탄성영역에서 초기 전단균열 발생 후 급격히 증가하여 전단파괴구간의 인장철근 응력(SG 1)을 초과하였으나 탄성영역을 지나 소성영역을 갈수록 점점 유사해 지는 것을 알 수 있었다. 섬유보강된 시험체의 전단파괴부 인장응력은 초기전단균열이 발생하기 전에는 1방향 인장응력에 저항하는 보강재가 내력분담을 못하므로 큰 응력 차이를 나타내지 않았으며, 전단균열 발생 후 내력의 재분배와 함께 전단균열폭의 증가에 저항하면서 섬유의 완전 박리가 발생할 때까지

전단에 효과적으로 저항하였다. 또한 경사방향으로 보강된 시험체의 전단내력 분담이 가장 크게 나타났으며, 수직보강보다는 수평보강형태가 내력보강 효과가 큰 것으로 나타났다.

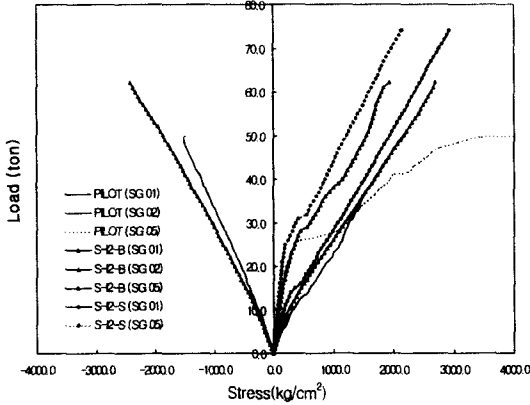


Fig. 7 Load-stress curves of strengthened specimens using carbon fiber plate

5. 결 론

일반보와 비교해서 전단거동 특성이 뚜렷한 철근콘크리트 깊은보의 합리적인 전단보강방법 연구를 위하여 아라미드 및 탄소섬유를 이용한 보강섬유의 종류, 섬유의 보강방향, 보강재 단부의 박리억제를 위한 정착유무 등을 실험변수로 하여 정적파괴실험 후 구조적 거동을 비교한 결과는 다음과 같다.

1) 섬유보강시험체의 경우, 무보강시험체와 비교할 때 초기균열하중은 거의 유사하나, 정적파괴하중은 섬유의 종류에 무관하게 수평·수직보강 시험체의 경우 약 10%, 경사보강시험체의 경우, 약 40%까지 증가하여, 깊은보의 전단보강시 섬유의 종류보다는 섬유의 보강방향이 전단 균열 발생 후 내력의 재분배를 통해 더욱 유효하게 작용하고 있음을 알 수 있다.

2) 섬유보강에 따른 파괴거동은 무보강 시험체의 경우, 하중재하점과 지지점을 연결하는 압축대의 큰취성 균열폭이 섬유를 보강함에 따라 균열폭은 감소하나, 탄소섬유 슈트와 판의 경우는 콘크리트

의 경사균열과 함께 급작스런 취성과파괴양상을 보이며, 아라미드 섬유의 경우는 섬유의 연성으로 인해 보다 안정적인 연성과파괴양상을 보이고 있다.

3) 무보강시험체의 전단파괴구간의 인장철근 응력이 초기전단균열 발생 후 급격히 증가하는데 반하여, 섬유보강재를 이용한 전단보강시 초기전단균열발생 후 균열증가에 저항하면서 섬유의 완전박리가 발생할 때까지 전단에 효과적으로 저항하였다.

4) 수직폐합형태 또는 섬유앵커정착을 병행한 경우, 초기균열 억제 및 파괴하중에는 큰 보강효과를 보이지 않으나, 압축대 방향으로 진행하는 계면에서의 섬유박리파괴가 정착부위에서는 상당히 감소되어, 취성적인 섬유박리파괴는 다소 효과적인 것으로 나타났다.

5) 전단보강시 섬유보강방향에 따라 전단내력 증진뿐만 아니라, 처짐제어와 함께 인장철근이 받는 인장응력의 일부를 부담하는 것으로 나타났으며, 특히 경사방향으로 보강된 시험체가 수직·수평방향으로 보강된 시험체 보다 상대적으로 효과적인 것으로 나타났다.

따라서 철근콘크리트 깊은보의 전단보강시 섬유보강방향은 예상균열방향에 직각인 경사방향보강이 효과적이며 이는 주인장 응력이 경사방향이므로 경사지게 보강하였을 때 보강효과가 큰 것으로 생각된다. 또한 실제 현장의 깊은보 구조물에서는 구조해석을 통해 주응력도를 작성하고 주응력에 직각인 경사방향으로 보강하는 것이 합리적인 전단보강방법인 것으로 판단되며, 취성적인 박리파괴를 억제하기 위한 충분한 정착이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 심종성, 박성재, 배인환, "강판 및 탄소섬유sheet로 보강된 R/C보의 피로거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄학술 발표회 논문집, 제7권, 1호(통권 제12집), pp.319~324, 1995.3
- 2) 한국도로공사, "노후콘크리트 구조부재의 구조실험과 분석", 한국도로공사 연구보고서, 1996

- 3) 청조엔지니어링, “탄소섬유, 아라미드섬유, 강판을 이용한 철근콘크리트 보의 내력보강에 관한 실험 연구”, 청조엔지니어링 연구보고서, 1996
- 4) Hisabe, N., “Experimental Study on Carbon Fiber Sheet for Shear Strengthening”, Proceeding of International Conference on Engineering Materials, June, pp.8~11, 1997
- 5) Norris, T., “Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheet”, ASCE, July, pp.903~911, 1997
- 6) Teng, S., “Performance of Strengthened Concrete Deep Beams Predamaged in Shear”, ACI Structural Journal, March-April, pp.159~171, 1996
- 7) Scordelis, B., “Nonlinear Analysis of RC Shells of General Form”, Proceedings of ASCE, Vol.101, March, pp.523~538, 1975