

탄소격자섬유로 보강한 철근 콘크리트보의 휨파괴 특성에 관한 연구

조병완 · 태기호
한양대학교 토목공학과

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Grid-type Carbon Fiber Plastics

BYUNG-WAN JO AND GHI-HO TAE

Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ., Seoul 133-791, Korea

KEY WORDS: Carbon grid fiber 탄소격자섬유, Strengthening effect 보강효과, Separation failure 계면파괴, Anchor bolt effect 앵커볼트효과, Strengthening design 보강설계

ABSTRACT: Flexural fracture characteristics of newly-developed Grid-type carbon fiber plastics in the deteriorated reinforced concrete structures were investigated by the four-points fracture test to verify the strengthening effects in the beam specimens. Results showed that initial cracks appeared in the boundary layers of fibers embedded in the newly-placed mortar concrete slowly progressed to the direction of supports and showed fracture of fiber plastics and brittle failure of concrete in compression in sequence after the yielding of steel reinforcement. Accordingly, the reasonable area of Grid-type carbon-fiber plastics in the strengthening design of deteriorated RC structures should be limited and given based on the ultimate strength design method to avoid the brittle failure of concrete structures.

1. 서 론

건설구조물의 보수·보강은 설계목적에 적합한 안전성과 구조물의 내구년한을 증대시키기 위한 것으로 국내실정에 맞는 경제적인 보수·보강재료의 선택과 공법개발이 요구된다. 콘크리트 구조물의 보강공법에는 강판접착공법, 프리스트레싱공법, 단면의 증가공법, 부재의 증설공법 등이 있다. 이 중 구조물의 보강 기법중 하나인 강판접착공법은 에폭시를 사용하여 손상된 구조물의 표면에 강판을 접착시키거나 앵커볼트로 고정시킴으로써 강성을 증대시키는 공법이다. 그러나 강판은 자중이 크고, 앵커볼트를 위한 전공, 강판부식으로 성능이 저하되는 문제점이 있다. 이러한 이유로 최근에는 강판에 비해 자중이 상대적으로 작고 시공성이 좋으며, 재료자체의 인장강도가 강판에 비해 우수한 탄소섬유수트를 유용하게 사용하고 있다(한, 1993).

한편, 잔교식부두와 같은 항만구조물에서는 선박의 충돌하중이나 접안력 및 견인력으로 인한 장기적인 내력손실로 인하여 Girder부의 철근노출과 콘크리트가 탈락되는 현상이 발생하고 있다. 탄소섬유나 강판보강시 염분과 해수의 침투로 상판이나 섬유강도의 강도가 떨어지는 문제점이 보고되고 있는 반면 격자형 탄소섬유 보강재는 내방식성이 우수하고, 가벼워 일반적으로 항만구조물의 보강 뿐 만 아니라 철근대체 재료나 프리스트레스

콘크리트의 긴장재로서의 연구가 진행되고 있는 실정이다(조, 1999; 한 등, 1997). 따라서 본 연구에서는 잔교식 부두의 Girder부에 내력손실로 인한 철근덜개가 탈락한 경우를 고려하여 격자형 탄소섬유를 이용한 철근콘크리트보의 보강효과를 검증하였으며, 격자형 탄소섬유보강공법과 등가의 철근추가 보강공법으로 제작한 보강 시험체에 대하여 정적 휨파괴 실험을 실시함으로써 격자형 탄소섬유보강공법의 현장적용 가능성을 검토하였다. 아울러 탄소격자섬유보강 시험체의 휨특성 효과를 분석함으로써 탄소격자섬유를 이용한 철근콘크리트보의 보강설계 기초자료를 제시하고자 하였다.

2. 실험계획

2.1 실험변수

탄소격자섬유를 이용한 철근콘크리트보의 보강효과를 분석하기 위하여 Table 1과 같이 탄소격자섬유와 등가의 철근을 이용하여 보강길이, 보강방법을 변수로 하여 시험체를 제작하였으며, 보강시험체는 손상된 단면을 가정하여 철근덜개 5cm의 결손부위를 발생시키고 이 부분에 보수재료를 타설한 후에 보강방법, 보강길이를 달리하여 제작하였다.

2.2 사용재료의 물성

본 실험에 사용된 콘크리트, 철근, 격자형 연속섬유 및 에폭시의 물성은 재료실험을 통하여 구하였으며, 그 결과는 Table 2와 같다.

격자형 연속섬유 보강재의 경우 탄소섬유를 수지로 성형하여 시공성, 현장구조물의 형태, 편의성 및 강성을 고려한 제품으로 현재 일본에서 널리 쓰이고 있는 N사 제품 C₆ 사용하였으며, 그 형상은 Fig. 1과 같다.

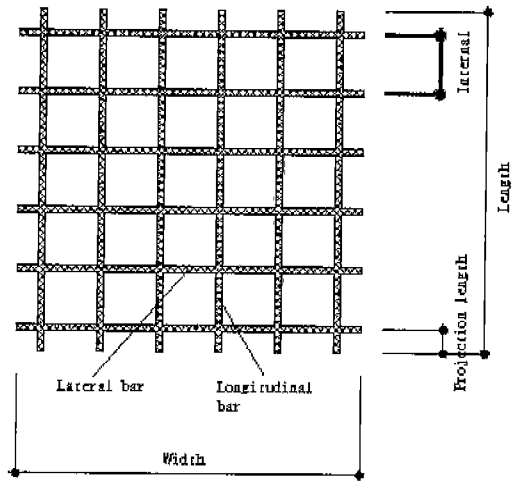


Fig. 1 CFRP-grids

Table 1 Types of beam specimens

Specimen	Design Strength (kg/cm ²)	Strengthening Material	Strengthening Length (L)	Strengthening plastics (가닥)
A-CON		Pilot	-	-
A-G11-C1 ⁽¹⁾	210	Grid fiber	L	3
A-G11-C2		Grid fiber	L	3
A-G12-C2		Grid fiber	L	4
A-G13-C2		Grid fiber	L	6
A-G21-C2		Grid fiber	0.8L	3
A-G31-C2		Grid fiber	0.6L	3
A-S14-C2		Steel	L	D13철근
B-CON		Pilot	-	-
B-G11-C1	280	Grid fiber	L	3
B-G11-C2		Grid fiber	L	3
B-G13-C2		Grid fiber	L	6
B-S14-C2		Steel	L	D13
B-S15-C2	Steel	L	D16	
C-CON		Pilot	-	-
C-G11-C1	350	Grid fiber	L	3
C-G11-C2		Grid fiber	L	3
C-G12-C2		Grid fiber	L	4
C-G13-C2		Grid fiber	L	6
C-S14-C2		Steel	L	D13
C-S15-C2	Steel	L	D16	

Note) C1 : Chipping Depths 3cm C2 : Chipping Depths 5cm

2.3 시험체 설계 및 제작

철근콘크리트보 시험체는 단면치수 20×30cm, 인장철근 2D-22, 압축철근 2D-16, 순지간 길이 2.6m, 총길이 3.0m로 Fig. 2와 같이 설계, 제작하였다(신, 1996). 전단보강근의 설치를 위하여 복철근보로 제작하였으며, 전단파괴를 최소화하기 위하여 전단철근인 스티럽 D13을 10cm간격으로 설치하였다.

손상된 시험체의 경우, 보수부위에 Air breaker를 이용하여 인장철근 부위까지 쪼아낸 후 보수단면을 Primer(액상수지:불=1:3)를 충분히 도포한 후에 준비한 보수재료를 손상부위에 타설하였다. 보강은 무보강 시험체에 대하여 2배의 모멘트 차이가 나도록 P_{max} 이하로 보강하였다. 보강길이는 순지간(L)에 대하여 0.6L, 0.8L, L의 비율로 보강되었고, 보의 밀면에 15cm 간격으로 양쪽에 지름 1cm, 깊이 10cm의 구멍을 뚫어 에폭시계 접착제로 채운 후 앵커볼트로 고정하였다.

Table 2 Properties of materials (a) Concrete material

Material Properties of Cement						
Cement (kg/cm ²)	Water (kg/cm ²)	Aggregate (kg/cm ²)	Gravel (kg/cm ²)	Admixture (kg/cm ²)	W/C (%)	S/A(%)
345/395/485	189	997/951/872	749/748/744	1.86/2.13/2.61	50.9/44.5/36.3	54/53/51(%)

(b) Steel deformed bar of D16, 22

Division	Yield Strength (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)
steel D16	5180	7160	2.03 × 10 ⁶
D22	4720	6230	2.03 × 10 ⁶

(c) CFRP-grids (NEFMAC)

Type	Gravity	Tensile Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)	Section Area (cm ²)
C6	1.42	12000	1000000	0.175

(d) Epoxy resin and repair material

Epoxy	Tensile Strength (kg/cm ²)	Compressive Strength (kg/cm ²)	Bending Strength (kg/cm ²)	Tensile Shear Strength (kg/cm ²)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)
EPX-3W	≥200	≥700	≥400	≥150	≥10,000
FP-E3P	431	924	692	135	30,100
Primix	580	100	-	-	1.31 × 10 ⁶

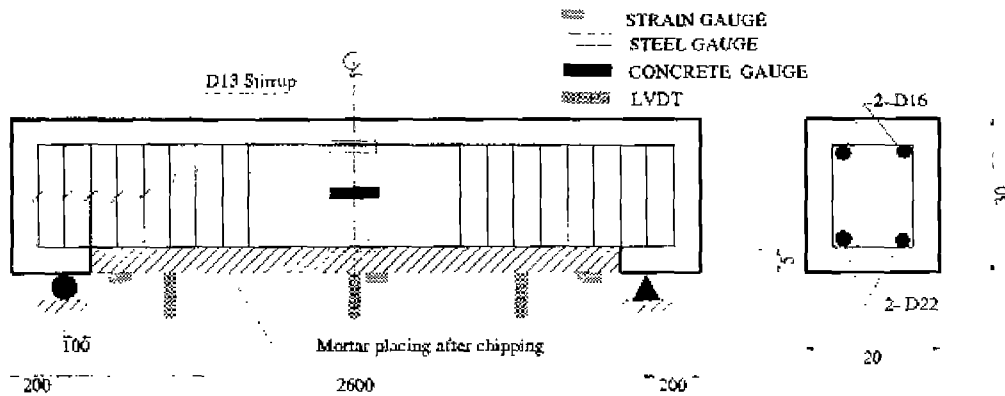


Fig. 2 Beam specimen

2.4 측정방법

시험체의 휨내력평가를 위한 하중재하는 Fig. 3과 같으며, 100ton용량의 만능시험기를 이용하여 4점 휨 재하방법이 적용되었다. 인장철근의 항복여부를 판단하기 위하여 중앙부에 철근 게이지를 주철근에 2개씩 설치하였으며, 보강재의 변형을 측정하기 위하여 보강재에 게이지를 설치하였다. 하중 재하방법은 초기에 0.5ton 간격으로 재하하였으며 최대하중 근처에서는 시간부의 처짐이 약 2mm가 되도록 변위제어방식(변위증가속도가 일정하게 되는 제어)으로 가력하여 철근과 보강재의 변형률, 부재의 처짐을 측정하였다.

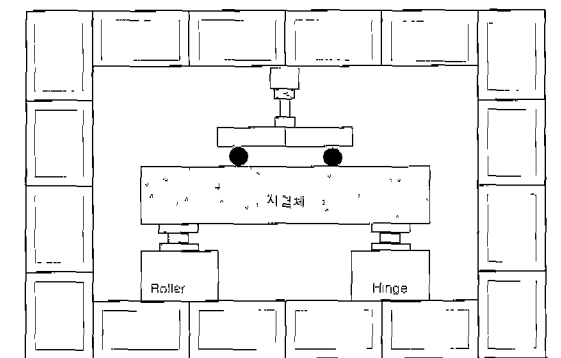


Fig. 3 Loading frame

3. 실험결과 및 고찰

3.1 보강재에 따른 RC보의 파괴양상

무보강 시험체의 경우 전형적인 휨 파괴의 양상으로 콘크리트 설계강도에 따라 3.0~3.6ton에서 초기균열이 발생하였으며 재하하중이 증가함에 따라 하중가력점 방향으로 균열폭이 확대되었다. 이에 반해 보수후 보강한 시험체의 경우 전단시간에서 발생한 균열이 고강도인 보수재의 영향에 의해 계면파괴균열로 진전하는 것을 볼 수 있다[Fig. 4 참조]. 탄소격자섬유 보강시험체의 경우, 초기균열은 보강길이에 따라 약간씩 차이를 보였으나, 전시간 까지 보강한 시험체를 제외한 1.5m 및 2.0m로 보강한 시험체에서 그림4와 같이 초기균열이 강도와 의 차이에 따라 3.5~5.4ton으로 보수재와의 계면에서 지점부로 진전되는 휨 박리파괴가 발생하였으며, 균열양상이 격자간격인 5cm 간격으로 거의 일정하게 나타났다.

탄소격자 섬유로 보강한 시험체의 파괴양상은 크게 3가지로 나타나는데 보수재료의 고강도화로 보 중앙부에서 발생한 콘크리트와 보수계면에서의 균열이 지점부로 진전되어 파괴되는 계면박리파괴, 시간중앙에서 철근항복 후 격자와 연결된 앵커볼트의 항복으로 인한 탄소격자섬유파괴, 그리고 격자섬유 항복 후 콘크리트 압축파괴로 나타났다. 그리고 보의 초기균열 하중, 항복하중, 연성지수, 보강효과, 파괴모드를 Table 3에 나타내었다.

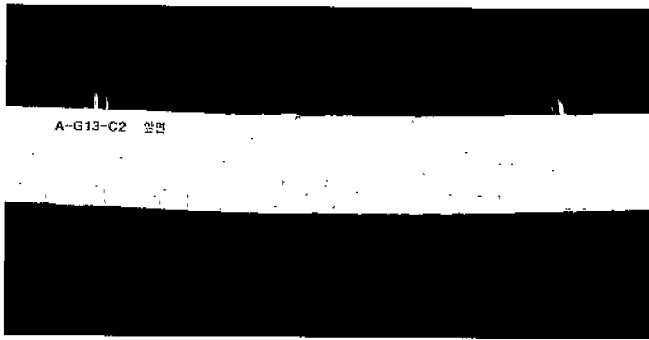


Fig 4 Failure of strengthened specimen

10%정도의 보강효과가 감소하는 것으로 나타났다.[Fig. 5 참조] 보강길이에 따른 시험체의 파괴양상을 살펴보면 보수계면에서의 균열이 성장하여 계면파괴됨과 동시에 휨파괴의 양상을 보였다. 그러나 강관이나 탄소섬유 보강시 문제가 되었던 단부에서 발생하는 rip-off파괴는 일어나지 않았다. 이것은 격자섬유 시공시 접착제의 사용을 피하고 앵커볼트로 고정하였기 때문에, 또한 보강방법상 철근깊이 까지 쫓아내기 후 보강하였기 때문인 것으로 생각된다.

따라서 보강길이를 전지간에 대하여 일정길이 이하로 보강하여도 탄소섬유보강의 경우, 기대되는 보강효과는 못미치지 만, 단부의 응력집중으로 문제가 되는 단부파괴를 방지할 수 있는 것으로 나타났다.

3.2 보강재의 보강길이 영향

보강재 보강길이에 따른 영향을 살펴보면 보강재를 전지간에 걸쳐 보강한 경우와 비교하여 0.8L(208cm)로 보강한 경우 거의 동일한 보강효과를 나타냈지만 보강길이가 지간길이의 0.5L(130cm)로 보강한 경우에는 전길이의 경우와 비교하여

3.3 보강방법에 대한 영향

강관이나 탄소섬유쉬트의 경우 단부에서 일어나는 rip-off파괴를 방지하기 위해서 U형이나 폐합하는 방법, 또는 앵커를 추가하는 방법을 이용하여 보강연구가 수행되고 있다. 그러나

Table 3 Experiment results

Specimen	initial crack loads (ton)	Yielding loads (ton)	$\frac{P_u}{P_y}$	Failure loads (ton)	Strengthening effect(%)	Failure mode
A-Const	3.0	11.73	1.02	12.10	0	Flexural Failure
A-G11-C1	3.3	12.20	1.16	14.20	17.4	Flexural Failure
A-G11-C2	3.6	12.86	1.13	14.50	19.2	Debonding
A-G12-C2	4.0	13.64	1.25	17.00	40.5	Debonding
A-G13-C2	5.2	16.35	1.13	18.50	52.9	Debonding
A-G21-C2	4.3	13.02	1.15	15.04	24.3	Debonding
A-G31-C2	4.8	16.35	1.13	18.50	17.36	Debonding
A-S14-C2	4.5	15.83	1.04	16.50	36.4	Flexural Failure
B-Const	3.3	11.97	1.11	13.30	0	Flexural Failure
B-G11-C1	4.0	12.55	1.09	13.70	3.0	Flexural Failure
B-G11-C2	5.0	12.95	1.24	16.08	21.0	Debonding
B-G13-C2	5.4	13.20	1.29	17.00	27.8	Debonding
B-S14-C2	4.5	13.65	1.27	17.30	30.1	Flexural Failure
B-S15-C2	5.2	17.50	1.12	19.67	47.9	Flexural Failure
C-Const	3.6	13.02	1.04	13.60	0	Flexural Failure
C-G11-C1	4.8	13.21	1.22	16.10	18.4	Flexural Failure
C-G11-C2	5.2	13.55	1.26	17.05	25.4	Debonding
C-G12-C2	5.4	14.05	1.27	17.87	31.4	Debonding
C-G13-C2	5.5	15.06	1.22	18.42	35.4	Debonding
C-S14-C2	5.0	16.82	1.15	19.30	42.0	Flexural Failure
C-S15-C2	5.5	18.20	1.09	19.80	45.6	Flexural Failure

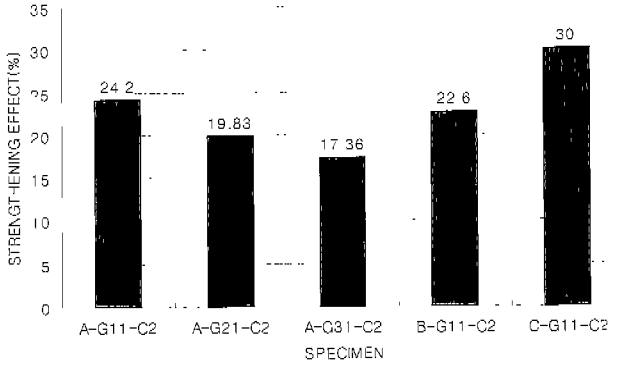


Fig. 5 Relationships between strengthening effects and strengthening length

그 파괴형태가 보강단부 측면이 전단에 의해 찢어지면서 U형 보강재가 단부보강 효과를 충분히 발휘하지 못하는 것으로 보고되고 있다(배, 1998; 신, 1995). 따라서, 본 실험에서는 격자 섬유와 철근과의 일체성을 확보시킬 수 있는 점을 고려하여 쪼아내기 깊이를 변수로 하여 철근얕게 깊이까지 쪼아낸 5cm와 일부만 쪼아낸 3cm를 비교함으로써 그 특성 및 파괴 형태를 고찰하였으며, 격자섬유대신 등가철근으로 추가보강함으로써 그 내력 및 효과를 비교 고찰하였다. 그 결과 Fig. 6에 보여진 바와 같이 손상된 보의 철근깊이 5cm까지 면처리 후 철근과 일체 보강한 시험체의 격자섬유의 항복변형률은 $\epsilon_{fy} = 0.003$, $\sigma_{fy} = 3000\text{kg/cm}^2$ 이며, 3cm까지 쪼아낸 후 보강한 시험체의 항복변형률은 $\epsilon_{fy} = 0.002$, $\sigma_{fy} = 2000\text{kg/cm}^2$ 으로 나타났다. 이것은 철근과의 일체성 확보로 인한 휨 변형의 차이로 생각된다. 또한 5cm까지 쪼아낸 후 보강한 경우에는(A-C2, B-C2, C-C2) 4ton 근처에서 초기균열이 발생한 후 3cm까지 쪼아낸 경우보다 연성이 증가함에 따라, 변형률의 기울기가 감소하지만, 파괴하중은 두경우 모두 14ton 근처에서 발생하였다. 따라서 보강시 철근면까지 쪼아내기 한 후 철근과의 정착을 통해 합성거동을 확보하는 것이 연성파괴를 유도하며 보강성능을 향상시키는 것으로 생각된다.[Fig. 6 참조] 또한, 사용된 섬유보강재가 철근의 공칭 단면적으로 환산하면 0.175cm^2 으로써 D6 철근에 가깝다. 따라서 Fig. 7에 나타났듯이 C₆ 격자형 탄소섬유에 의한 20~30%의 보강효과는 철근을 추가적으로 보강한 시험체의 경우(Table 3 참조)와 비교해 볼 때 상대적으로 만족할 만한 것이라 생각된다.

3.4 하중-변위관계

무보강 시험체의 경우 12ton까지는 일정한 기울기를 보이고 12ton을 넘어서 2차파괴로 인하여 급격한 처짐이 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 탄소섬유 쉬트나 강판의 경우 철근이 항복한 이후 일정한 처짐의 증가와 함께 급격히 감소하는, 즉 보강재가 파단 또는 벗겨지는 결과가 보고되고 있다. 그러나 본 연구의 실험결과 Fig. 8에 의하면 보강길이에 무관하게 거의 모든 시험편이 철근이 항복한 이후 일정한 처짐 증가와 함께 보강재

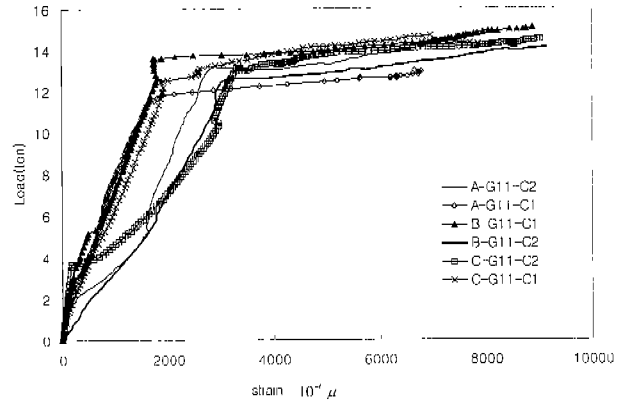


Fig. 6 Load-strain curves by chipping

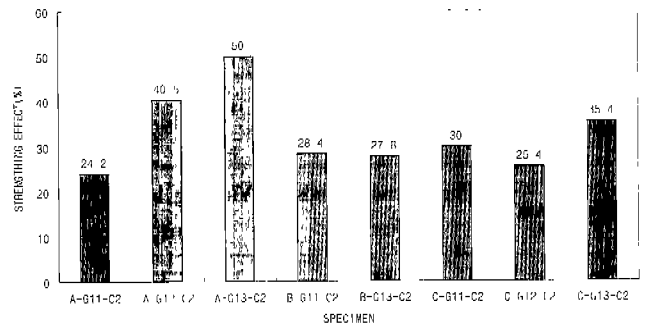


Fig. 7 Relationships between strengthening effects and strengthening method

가 파단되는 양상은 피하였고 충분한 연성거동을 보인 후에 보강재가 파단되는 것으로 나타났다. 이것은 보강재로 자체는 전형적인 취성재료이지만 철근과의 일체성 확보로 인하여 효과로 생각되며 구조물 보강시 어리움이 있긴 하지만 일체성 여부를 고려할 필요가 있다고 생각된다.

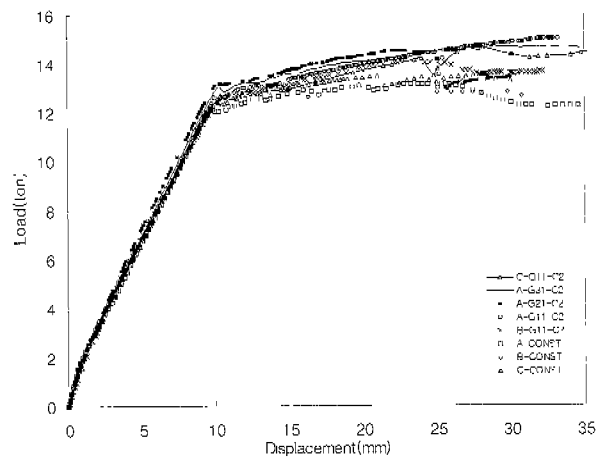


Fig. 8 Load-displacement curves

3.5 보강에 따른 지점부의 영향

기존의 연구결과는 강관이나 탄소섬유 쉬트로 보강하는 경우 지점부의 rip-off 파괴가 나타나는 것으로 보고되고 있다(배, 1998). Fig. 9 에서와 같이 탄소격자섬유의 경우 철근과의 일체성 확보로 인한 앵커볼트와 에폭시의 효과로 인하여 rip-off 파괴를 피할 수 있었으나 보수재료와 콘크리트와의 강도차이로 인한 개면박리파괴가 나타났다.

또한 보강재의 량에 따라서도 낮은 변형률에서 하중 증가 후 취성파괴되는 급격한 차이를 보였으며, 철근항복 후 극한하중상태에서 보강재의 파단으로 파괴되었다. 보강길이를 0.6L로 보강한 경우 철근의 변형률 곡선과 유사한 거동을 보여 보강 효과는 없는 것으로 나타났다(Table 3 참조).

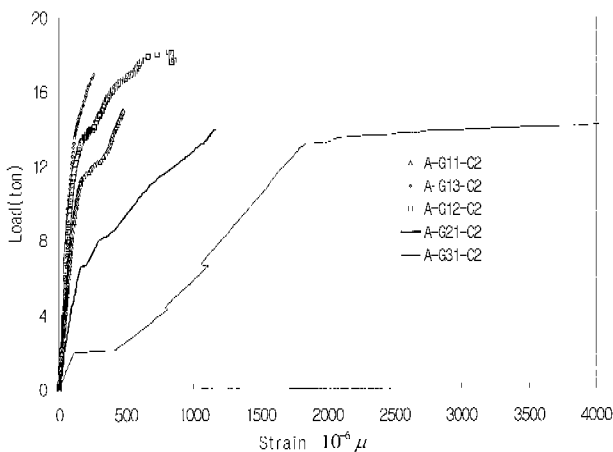


Fig. 9 Load-strain curves bearing of strengthening length

4. 탄소격자섬유량의 제한

4.1 개요

보강된 부재가 보강효과를 발휘하기 위해서는 먼저 적절한 보강설계가 되어 있어야 하며 외부나 내부에 보강된 격자섬유의 변형, 볼트의 탈락등을 방지할수 있는 방법을 선택하여야 한다. 실험결과 격자섬유로 보강된 단면은 사용철근비 및 보강재량, 보강길이에 영향을 받으므로 압축부위의 콘크리트가 철근이나 보강재보다 먼저 취성파괴되지 않도록 주어진 철근이나 격자섬유 보강에 대한 보강량을 제한할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 철근콘크리트 강도설계법을 적용하여 탄소격자섬유의 적정사용량을 제안하고자 한다.

4.2 최대보강비 산정

탄소격자섬유의 경우 강관과는 달리 변형률 경화현상을 거치지 않고 극한변형률에 도달 할 때까지 탄성적인 취성거동을 하는 섬유쉬트와 같다고 할 수 있으나 격자섬유의 경우, 재료가 가지는 특성상 콘크리트 속에 매립되어 철근과의 일체성을 확보할 수 있는 것으로 평가되고 있다. 이러한 취성거동을 하는 격자섬유로 보강된 단면의 설계시 안전에 대한 고려가 필요하며, 보강단면의 파괴를 결정짓는 주철근 및 탄소격자섬유

보강재의 량을 결정해야 한다.

따라서 본 논문에서는 실험에서 얻은 자료를 근거로 하여 항복변형률을 조사하여 Table 4 에 나타내었으며, 이때 변형률의 관계가 Hooke의 법칙이 성립하는 것으로 나타났다.(Fig 10 참조)

변형률의 적합조건은 일반적으로 다음과 같은 식으로 평가되어 질 수 있으며, 격자섬유의 변형률 값에 대하여 안전율을 도입하여 부재의 설계에 반영할 수 있다고 말할 수 있다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [(1-\nu^2)\sigma_x - \nu(1+\nu)\sigma_y] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [(1-\nu^2)\sigma_y - \nu(1+\nu)\sigma_x] \\ \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned} \quad (4.1)$$

따라서 기존연구의 쉬트형 탄소섬유 경우와 마찬가지로 철근이 항복한 후 하중증가와 함께 탄소격자섬유가 파괴되는 것으로 가정하여 탄소격자섬유의 파단과 동시에 콘크리트가 극한변형률에 도달되는 평형상태를 가정함으로써, 다음과 같은 제약조건을 얻을 수 있다(Edinonial, 1995; Sugita, 1993).

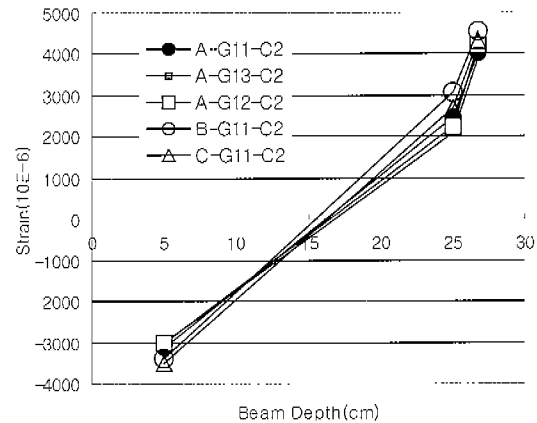


Fig. 10 Strain curves to the specimen depth

Table 4 Yield strains of specimens (unit: μ)

specimen	Type	Concrete	Steel	CFRP-Grid
A-G11-C2		-3120	2470	2512
A-G21-C2		-3012	2074	2721
A-G31-C2		-3000	2250	2371
A-G12-C2		-3620	2004	3237
9A-G13-C2		-3373	1974	2741
B-G11-C2		-3385	2051	3121
B-G13-C2		-3672	2143	2405
C-G11-C2		-3507	1987	3156
C-G12-C2		-3571	2097	2813
C-G13-C2		-3895	2104	2565

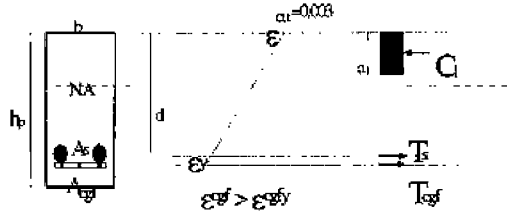


Fig. 11 Balanced section of specimen strengthened with CFRP-grids

Fig 11 에서 P_b 를 유도하기 위한 조건은 다음과 같다.

$$C_1 = T_s$$

$$0.85 \sigma_{ck} a b = \sigma_y A_s$$

양변에 $bd \sigma_y$ 로 나누면

$$\frac{0.85 \sigma_{ck} k_1 c_b}{d \sigma_y} = \frac{A_s}{bd} \quad (4.2)$$

여기서 중립축 위치는 변형을 선도로 부터 다음과 같다.

$$C_b = \frac{0.003}{(0.003 + \varepsilon_{cgf})} h_p \quad (4.3)$$

위의 C_b 값을 식 (4.2)에 대입하면 탄소격자섬유로 보강된 단면의 평형철근비를 얻을 수 있다.

$$P_b = \frac{A_s}{bd} = \frac{0.85 \sigma_{ck} k_1}{d \sigma_y} \frac{0.003}{(0.003 + \varepsilon_{cgf})} h_p \quad (4.4)$$

여기서 k_1 값은 설계강도에 대하여 각각 정해지는 상수이다. 그러므로 보강단면의 최대철근비는 다음과 같이 구할수 있다.

$$P_{max} = 0.75 P_b$$

또한 탄소격자섬유의 평형보강비($P_b \cdot cgf$)도 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_1 = T_{cgf}$$

$$0.85 \sigma_{ck} a b = \sigma_{cgf} A_{cgf}$$

여기서,

$$\sigma_{cgf} = E_{cgf} \varepsilon_{cgf} \text{ 이고, 양변에 } bd \sigma_{cgf} \text{ 로 나누어 주면}$$

$$\frac{A_{cgf}}{bd} = \frac{0.85 \sigma_{ck} a}{d \sigma_{cgf}} = P_b \cdot cgf \quad (4.5)$$

여기서 앞에서 구한 C_b 값을 위 식에 대입하면 다음과 같이 탄소격자섬유의 평형 보강비를 얻게 된다.

$$P_b \cdot cgf = \frac{0.003}{(0.003 + \varepsilon_{cgf})} h_p \frac{0.85 \sigma_{ck} k_1}{d \sigma_{cgf}} \quad (4.6)$$

원 실험결과 탄소격자섬유의 최대변형율이 1.2%~1.43%이

(Kobayashi *et al.*, 1997; Taanasis *et al.*, 1993), 순수인장 실험시 파단변형율은 1.5%~1.7%로 약 80~84%의 분포를 보이고 있다. 이 값의 평균값을 위의 식 4.5에 ε_{cgf} 대신 $0.82 \varepsilon_{cgf}$ 를 대입하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$C_b = \frac{0.00255}{(0.003 + 0.82 \varepsilon_{cgf})} \frac{\sigma_{ck} k_1}{\sigma_{cgf}} \quad (4.7)$$

$$P_{cgf} = \frac{0.00255}{(0.00246 + 0.6724 \varepsilon_{cgf})} \frac{h_p}{\sigma_{cgf} d} \quad (4.8)$$

보강비가 충분한 안전을 확보하기 위하여 보강단면의 최대 보강비 P_{max} 는 강도설계법의 개념에 따라 다음과 같이 제한되어야 할 것이다.

$$P_{max \cdot cgf} = 0.75 P_b \cdot cgf \quad (4.9)$$

4.2 적용단면 고찰

본 논문에서 실험한 보강단면의 파괴형태를 검증하기 위해 앞에서 계산한 식으로 계산을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

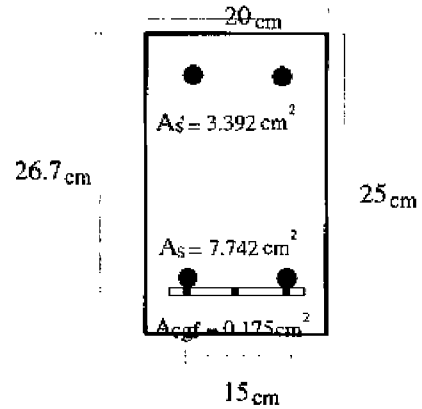


Fig. 12 Dimensions of section

계산된 단면에 대한 설계조건은

$$\sigma_{ck} = 350 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{cgf} = 12000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_s = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$\varepsilon_{cgf} = 1.2\%$$

이다. 먼저 제안된 식에 의한 평형 및 최대 주철근비를 계산하면

$$P_b = \frac{0.003 \times 0.85 \times 350 \times 0.85}{0.003 + 0.82 \times 0.012} \frac{26.7}{25}$$

$$= 0.01577$$

$$P_{max} = 0.75 P_b = 0.75 \times 0.01577 = 0.01183$$

$$P_s = \frac{7.742}{20 \times 25} = 0.155$$

다음으로 제안된 식에 의해 탄소격자섬유의 경우 평형 및 최대철근비를 계산하면

$$P_{b \cdot cgf} = \frac{0.003 \times 0.85 \times 350 \times 0.85}{(0.003 + 0.82 \times 0.012)(0.82 \times 12000)} \times \frac{26.7}{25} = 0.00641$$

$$P_{max \cdot cgf} = 0.75 P_{b \cdot cgf} = 0.00481$$

$$P_{cgf} = \frac{0.175 \times 3}{20 \times 25} = 0.00105$$

$$\therefore 0.00105(3\text{가닥}) < 0.00481(P_{max})$$

계산된 탄소격자섬유 보강단면의 파괴 모드를 고찰하면 Thanasis 등이 제안한 파괴모드(Thanasis et al., 1993) 이론에서 철근이 항복하고 탄소격자섬유의 파단으로 부재가 파괴되는 영역과 잘 일치한다. 또한 보강된 시험체의 실험결과와 같은 양상을 보여준다.

5. 결 론

본 연구는 폴리머 시멘트계 보수재료를 사용하여 보수한 후 CFRP-Grid로 보강된 RC보의 보강성능을 실험적 방법을 통하여 고찰하였으며, 보강길이, 보강방법, 철근대용여부 등의 영향을 실험적으로 고찰하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 보수재 타설시 먼처리 여부가 보수재의 보수성능을 향상시킨다는 사실을 다시 확인할 수 있었으며, 구조물의 내력을 손상시키지 않는 범위내에서 탄소격자섬유로 보강을 할 경우, 인장철근 부분까지 쪼아내기(chipping)를 실시한 후 보강을 해주는 것이 보강효과증진의 측면에서 반드시 필요하다.
- (2) 보수후 탄소격자로 보강된 보의 휨 실험결과 주된 파괴형태는 휨에 의한 철근항복 후 보강재의 취성 박리파괴로 나타났다. 또한, 보수재료가 보의 기동에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 탄소격자섬유의 파괴모드는 보강길이나 설계강도에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 취성파괴를 피하기 위해서는 일정간격(20cm)의 앵커볼트를 섬유와 콘크리트에 연결하거나, 철근과의 정착이 필요한 것으로 나타났다.
- (3) 탄소격자섬유로 보강한 철근콘크리트 보의 경우 각 변수별로 20~30%정도의 보강효과를 보였다. 기대보다는 다소 작았지만 보강으로 인하여 수철근 항복 후 강성이 향상되었음을 알수 있었다. 그러나 탄소격자섬유의 경우 등가의 철근보강방법과 상대적으로 비교해 볼 때 20~30%의 보강효과는 만족스

러운 것으로 생각된다.

(4) 기존에 제안된 탄소섬유쉬트 보강단면에 대한 최대보강비 및 파괴모드에 대해 탄소격자섬유를 적용한 결과 만족할 만한 결론을 얻었으며 탄소격자섬유의 계산결과와 실험결과와도 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 탄소격자섬유를 이용하여 RC 구조물을 보강설계 할 때는 보강후 콘크리트의 압축파괴에 따른 취성파괴를 방지하기 위하여 보강제량을 적절한 범위내에서 제한하는 것이 필요한 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 배인환(1998). "강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트 보의 휨해석 및 설계기법 연구", 한양대학교 공학박사학위논문.
- 신영수, 홍기섭, 최완철, 홍영균(1995). "탄소섬유쉬트로 밀면보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동", 대한토목학회 논문집 11권 8호.
- 신현복, 문제길, 변동균(1996). "철근콘크리트", 동명사.
- 조병완(1999). "탄소 및 아라미드섬유를 이용한 철근콘크리트 깊은보의 전단보강에 관한 실험적 연구", 한국해양공학회 논문집 13권 3호, pp 56~64.
- 한국도로공사(1993). "노후콘크리트 부재의 보수 및 보강기법에 대한 실험적연구", 1993년도 연구보고서.
- 한만엽, 홍영균, 황의승(1997). "보수·보강재료 및 공법개발 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제6권, 제1호, pp 592~597.
- Editorial Committee(1995). "Design Guideline for FRP-Reinforced Concrete Construction", Continuous Fiber Reinforced Concrete, Gihodo.
- JSCE(1996). "Specifications for Design and Construction of Concrete Structures using FRP", Concrete Library 88.
- Kobayashi, Rahman(1997). "Crack Width Prediction for NEFMAC-Reinforced Flexural Members", Architectural Institute of Japan, Vol 2, Oct, pp 447~454.
- Sugita, M.(1993). "NEFMAC- Grid Type Reinforcement, Fiber-Reinforced-Plastic(FRP) Structures for Concrete Structures: Properties and Applications", A. Nanni(Ed), Elsevier Amsterdam, pp 355~385.
- Thanasis, M., Nanni, A.(1993). "Flexural Behavior and Design of Concrete Using FRP Rods", J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 11, pp 3344~3359.

1999년 8월 2일 원고 접수

2000년 1월 31일 수정본 채택