아라미드 스트랩으로 프리스트레싱 횡구속된 RC 원형기둥의 일축압축거동에 관한 실험적 연구

한상훈¹⁾ · 홍기남¹⁾ · 이재범^{1)*}

¹⁾충북대학교 토목공학부

An Experimental Study on Uniaxial Compressive Behavior of RC Circular Columns Laterally Confined with Prestressing Aramid Fiber Strap

Sang-Hoon Han,¹⁾ Ki-Nam Hong,¹⁾ and Jae-Bum Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 361-763, Korea

ABSTRACT In this study, strength, stiffness and confinement effect with stress-strain and stress-volumetric strain curves for improved uniaxial compressive behavior of RC circular columns laterally confined with prestressing aramid fiber strap were experimentally investigated. The test variables were the specimens with or without axial reinforcing bar and the number and spacing of strap, prestressing level, the types of reinforcing fiber (CFS, GFS). As a result, the failure type of the columns was very stable and strength increase rate was about 73% comparison with the general RC columns. Moreover, the strain increase rate is very small and the axial displacement confinement effect was very effective compared with existry methods (CFS, GFS), the initial and final lateral confinement effect was excellent.

Keywords : RC circular column, prestressing aramid fiber strap, lateral confined effect, CFS, GFS

1. 서 론

노후 구조물을 설계연한까지 구조성능과 안전성을 확보하기 위한 노력은 꾸준히 진행되어 왔고, 이를 위하여 철근 및 콘크리트의 자체 구속력¹⁻³⁾과 더불어 탄소섬유,^{4,6)} 아라미드섬유,⁷⁾ 유리섬유^{8,9)} 복합재료를 구조물에 적용하여 보강하는 방법과 응력-변형을 해석모델들¹⁰⁻¹³⁾이 연구되어 왔으며 CFRP 보강근의 이용에 대한 연구¹⁴⁾도 진행되고 있다. 이들 보강공법은 에폭시 등의 접착제를 사용하여 섬유보강재를 모재와 일체화하여 구조물의 강도 및 강성과 내진성능을 증진시키는 공법적 특성을 지니고 있다. 그러나 지금까지 유리 및 탄소섬유시트를 사용하여 수행된 연구는 대부분 기둥의 외측부 전체 면적을 보강섬유로 감싸고 에폭시를 다시 도포하는 방법으로서 이는 접착의 확실성 문제, 콘크리트 통기성 등에 관한 문제점을 나타내었다.¹⁵⁾ 또한, 연성 증대 및 전단보강에 주안점을 두고 있었으며, 보강 섬유에 의해 가해지는 횡구속압의 크기가 작아 능동적 구속압에 의한 초기강성증대 및 최대중발현시의 변위의 감소를 기대할 수 없었다.

따라서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한

방법으로 아라미드 섬유 스트랩에 프리스트레스를 도입하는 방법을 개발하였다. 프리스트레스 스트랩으로 구속된 RC 보강 방법은 기존의 보 구조물에 적용된 프리스트레스 도입공법¹⁶⁻¹⁸⁾과는 차이가 있으므로 보강과정을 비교적 상세히 기술하였다. 프리스트레스의 도입에 적합한 아라미드 섬유를 사용하여 각각의 띠에 프리스트레스를 개별적으로 도입하였다. 이러한 보강실험 및 분석을 통하여 경제적인 문제뿐만 아니라, 부착의 확실성으로 인한 시공성과 통기성 그리고 파괴시의 안전성, 보강효과를 확보하고자 하였다. 즉, 아라미드 섬유에 프리스트레스를 도입하여 보강한 RC 원형기둥에 대하여 실험 변수에 따른 거동분석과 기존 보강방법과의 비교분석 및 프리스트레스 도입 수준 등에 의한 특성을 실험·분석하여 관련 및 추가연구에 필요한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

2. 시험체 제작 및 보강

2.1 실험 변수 및 시험체 제작

2.1.1 실험 변수

실험체는 원형의 무근 및 RC 기둥 공시체 15개를 제작하여 실험하였다. 사용된 콘크리트의 28일 설계기준강도는 25 MPa이며, 축방향 철근 및 띠철근의 항복강도는 모두 300 MPa이다. 시험체 내부의 실험변수로는 내부 주

*Corresponding author E-mail: jbtask@chungbuk.ac.kr

Received June 30, 2008, Revised August 31, 2008

Accepted November 20, 2008

©2009 by Korea Concrete Institute

(축방향)철근 유무, 띠철근의 유무 및 간격 (166, 83 mm)을 선택하였으며, 보강방법에 대한 변수로는 보강 아라미드 스트랩의 수와 간격, 프리스트레스 사전응력의 수준으로는 0, 35, 70, 100%를 선정하였다. 여기서 프리스트레스 사전 응력수준은 기둥 둘레길이의 1.2% 신장률을 기준으로 설정하였다. 이는 제작사의 추천 변형률이며, 그 이상일 경우 보강섬유의 급작스런 파단으로 실험체가 파괴되기 때문에 연성능력이 급격하게 감소하는 현상이 발생하게 된다. 또한, 기존 방법과의 비교를 위하여 탄소섬유 시트 (이하 CFS)와 유리섬유 시트 (이하 GFS)로 전면 보강한 시험체를 제작하여 그 결과를 상호 비교하였다. 모든 시험체는 보강 완료 후에 보강부 외측의 변형을 측정하기 위하여 좌우측면 및 상하부에 횡방향으로 변형률게이지를 부착하였다. 또한 단부 파괴 방지를 위하여 모든 시험체의 상하부 단부에 탄소섬유시트를 횡방향으로 부착하였다.

시험체 종류 및 실험변수는 Table 1과 같으며, 배근 및 단면 상세는 Fig. 1과 같다.

2.2 프리스트레싱 장치 및 보강 방법

2.2.1 프리스트레싱 장치 및 재료

프리스트레스가 적용된 섬유는 폭 30 mm의 스트랩 형태인 개별 아라미드 섬유를 사용하였으며, 기존 방법과의 비교에 사용된 보강섬유 CFS와 GFS의 물리적 특성은 Table 2와 같고 개략적인 응력-변형률 곡선은 Fig. 2에 주어져 있다. Figs. 3, 4에는 각각 아라미드 스트랩의 개

Table 1 Variables and details of specimens

Class	Axial reinforcement	Spacing of tied bar (mm)	Reinforcing fiber*	Prestressing level (%)	Strap (number)
A-1	-	-	-	-	-
A-2			A	100**	20
B-1	8-D10 (SD30)	-	-	-	-
B-2			A	100	20
C-1		166	-	-	-
C-2			A	100	20
D-1		83	-	-	-
D-2			G	-	-
D-3			C	-	-
D-4			A	0	20
D-5			A	35	20
D-6			A	70	20
D-7			A	100	20
D-8			A	100	10
D-9			A	100	5

*A : aramid fiber strap

G : glass fiber sheet

C : carbon fiber sheet

**1.2% strain of column circumference length

Fig. 1 Cross section details

Table 2 Mechanical properties of used fibers

Fiber (type)	Thickness (mm)	Modulus of elasticity (GPa)	Tensile strength (MPa)
Aramid (strap)	1.20	120	2,900
Carbon (sheet)	0.12	3,480	2.3×10^5
Glass (sheet)	0.60	70~85	2,400~3,500

략적인 프리스트레싱 작업순서 및 프리스트레스 도입용 프레임장치를 나타내었다.

2.2.2 프리스트레싱 보강 방법

1) 시험체 준비 및 아라미드 스트랩 임시부착

우선 시험체의 부착면 분진을 그라인더 및 에어 컴프레서를 사용하여 깨끗하게 제거하고 흠이 있을 경우 이를 에폭시 등으로 메워 준다. 그 후, 기둥의 한 면에 두께 0.6 mm × 폭 200 mm × 길이 (아라미드 섬유로 보강할 총 높이) 유리섬유 시트를 합침하여 만든 유리섬유판을 에폭시 레진을 사용하여 부착시킨 후 24시간 양생을 실시한다. 시험체 4면에 마킹 작업을 하여 그 선을 기준으

Fig. 2 Tensile stress-strain curve of used fibers

Fig. 3 Procedure for prestressing the reinforcement

Fig. 4 Prestressing facility (unit : mm)

Photo 1 Step 1~3 (see Fig. 3)

로 아라미드 섬유를 양면테이프 (완료 후 제거)를 사용하여 임시 부착한다 (Photo 1).

2) 프리스트레싱 프레임 장착

프리스트레스 도입용 좌우 메인 프레임을 간격 140 mm 로 하여 지지받침대 위에 설치하고 고정시킨다. 메인 프레임 사이에 조임장치를 삽입하고 조임장치가 상하로 잘 이동하는지를 확인한다. 프레임이 기둥의 수직면과 정확하게 일치하는지 수직레벨기로 검사하고, 프레임의 윗면을 조임띠를 사용하여 고정시킨다. 메인 프레임 사이에 일정간격을 유지시켜주는 스페이스바를 2~3개 설치한다.

A 프레임 (오른쪽 고정단)에 플랫바(flat bar)를 상하 2 개를 먼저 느슨하게 볼트로 체결하고 그 사이에 아라미

드 섬유 스트랩을 끼워 넣은 후, 스트랩을 잡아당긴 후 볼트를 조여 준다. 마지막으로, 조임 너트를 이용하여 고정시킨다. 당기는 힘은 dynamometric key를 사용하여 70 N/m의 힘으로 ‘뚝’ 소리가 들릴 때 까지 돌려준다. 반복하여 아래 줄부터 시작하여 위로 올라가면서 시행한다.

B 프레임 (왼쪽 이동단) 측면에 고정판을 나사를 이용하여 홈 사이에 상하 고정판을 설치한다. 고정 토크는 전과 동일하다 (Photo 2).

3) 아라미드 스트랩 프리스트레싱 작업

유압잭 거치 받침대 3개를 오른쪽 A 프레임에 설치하고 그 위에 유압잭 3개를 설치한다 (Fig. 3 참조). 이때 유의할 점은 프리스트레싱 작업 전에 먼저 유압을 조금 작용시켜 좌우 프레임에 설치된 아라미드 섬유가 팽팽하게 되어있는지를 확인하여야 하며, 메인 프레임의 상하 간의 간격이 일정한지도 확인하여야 한다. 프리스트레스 도입 작업은 유압 실린더를 이용하여 하단부터 수시로 확인 하며 소정의 신장율 만큼 실시한다 (Fig. 4와 Photo 3 참조).

4) 마무리 및 단부보강

프리스트레스 도입이 완료된 아라미드 섬유 스트랩의 단부를 유리섬유 판을 사용하여 고정시킨 후 24시간 동

Photo 2 Step 4 (see Fig. 3)

Photo 3 Step 5, 6 (see Fig. 3)

Photo 4 Strengthening completed specimens (step 7, 8 (see Fig. 3))

안 양생하고, 그 위에 에폭시를 완전 함침시까지 도포한다. 마지막으로 단부파괴를 방지하기 위하여 시험체 상하부에 탄소섬유로 단부보강을 실시한다.

Photo 4는 프리스트레싱 보강 완료 시험체의 전면과 후면, 단부 보강이 완료된 최종 모습을 나타내고 있다.

2.2.3 보강시험체 가력실험

실험에 사용된 시험기와 스트레인 게이지 및 LVDT 등의 측정기기의 배치는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5 Gauge positions and experiment set

- Structure reaction frame : Max. 7,000 kN
- Data logger : TDS-303
- Load cell : 7,000 kN
- LVDT : 100 mm : 2 EA
- Strain gauge : internal 3, external 6

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 파괴양상

무근 시험체인 A-1의 파괴양상은 표준공시체의 파괴양상과 비슷한 취성적인 파괴형태를 보였다. 반면, 보강 시험체의 전체적인 파괴형태를 관찰한 결과, 초기부터 도입된 프리스트레스에 의한 능동 구속압으로 인해 극히 미세한 팽창을 보이며, 이후 내부 콘크리트의 팽창으로부터 시작하여 콘크리트의 파괴가 시작되지만 철근이 항복한 후에도 프리스트레스가 도입된 아라미드 스트랩은 파단되지 않는 경향을 보였다. 이로 인해 그 형태를 유지하는 안정적인 파괴 형태를 보이고, 극한 하중부근에 이르러 아라미드 스트랩의 상부 유리섬유 고정판 부근이 박리하면서 파괴에 이르게 된다. 사실, B 계열의 보강 시험체는 단부 파괴가 발생하여 파괴양상만을 관찰하였다 (Photo 5).

3.1.1 주철근과 띠철근의 영향

축방향 철근과 띠철근이 없는 무보강 시험체 A-1은 취성 파괴의 경향을 보이나, 주 (축방향)철근이 배근된 C-2 시험체의 경우 파괴는 급작스럽게 발생하지 않았다. 콘크리트 파괴시점에 철근은 항복에 이르지 않았기 때문이다. 띠철근이 배근된 C 계열 시험체의 경우 띠철근으로 구속된 면적만큼 구속면적의 증가로 인하여 파괴 후 어느 정도 형태를 유지하며, 프리스트레스 아라미드 스트랩으로 보강한 C-2 시험체는 보다 안정된 파괴양상을 보였다. 이는 C-2 시험체와 모든 조건이 동일하고 띠철근만 1/2 좁은 간격으로 배근한 D-7 시험체에서 그 효과가 크다.

3.1.2 보강 섬유의 종류

유리섬유 및 탄소섬유 보강 시험체 D-2와 D-3은 상당한 파열음과 함께 보강 섬유가 파단되는 매우 취성적인 파괴형태를 보였다. 반면, 프리스트레스 아라미드 섬유 스트랩으로 보강된 시험체 D-7의 경우 내부 콘크리트가 파괴되더라도 외부 보강 스트랩은 최종파괴시까지 파단되지 않고 그 형태를 유지시켜 주었다. 즉, 측면고정판의 박리를 완전파괴 시점으로 본다면, 내부 콘크리트, 측면 고정판, 외부콘크리트, 아라미드 섬유 스트랩 상부 고정판의 박리의 순서로 매우 점진적인 연성파괴형태를 나타내었다.

3.1.3 프리스트레스 아라미드 스트랩의 수

Photo 5(d)에서와 같이, 프리스트레스 보강 시험체의 파괴형태는 대부분 내부 콘크리트로의 팽창으로부터 진행되었는데 측면 프리스트레스 보강 스트랩의 배치 수가 증가할수록 그 구속면적이 증가되어 형태유지에 유효하다. 즉, 파괴에 대한 안정성 확보를 위해서는 아라미드 스트랩의 수가 20개/m 이상 배치되어야 한다고 판단된다.

(a) A, B, C series

(b) D-1, D-2, D-3

(c) D-4, D-5, D-6

(d) D-7, D-8, D-9

Photo 5 Failure mode of all tested specimens

3.2 강도 및 변형 특성

강도 및 변형 특성에 대한 분석으로서 Figs. 6~11에 축방향 응력-변형률 곡선, Figs. 12~15에 축방향 응력-체적

변형률 곡선을 나타내었다. 시험체의 체적변형률 ε_v 는 다음의 식으로 계산하였다.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_c + \varepsilon_r + \varepsilon_\theta = \varepsilon_c + 2\varepsilon_r \quad (1)$$

여기서, ε_c 는 축방향 변형률이며, $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta$ 로서, 각각 횡방향 변형률과 후프변형률이다.

3.2.1 A계열 시험체

A계열 시험체는 축방향 및 띠철근이 없는 무근 콘크리트 시험체인 A-1과 프리스트레스트 아라미드 스트랩만으로 보강된 A-2 시험체로 구성되며, 두 시험체의 결과 비교는 Figs. 6 및 12와 같다.

1) 강도특성

Fig. 6에서 무보강 콘크리트 기둥인 A-1 시험체와 비교하여 축방향 철근과 띠철근이 없이 프리스트레스만 도입한 A-2 시험체는 프리스트레스 효과로 인하여 약 56%의 파괴하중 증가효과를 보였다.

2) 변형 특성

무보강 콘크리트 기둥인 A-1 시험체는 표준 압축 공시체와 유사한 거동을 보이는 반면, 내부철근 없이 프리스트레스트 아라미드 섬유 스트랩만으로 보강한 A-2 시험체는 초기 변형 구속효과와 하중이 증가할수록 강성의 증가로 인한 구속효과가 점차 증가하는 현상을 나타내었다. 특히 일반 및 탄소섬유 보강공시체의 대부분에서 발견되는 축응력-변형률 곡선의 초기유사성이 발견되지 않았다. 이는 기존 보강 시험체에서의 보강은 능동적인 구속압이 없어 콘크리트가 팽창한 이후부터 그 효과가 발현되는 반면, 프리스트레스를 도입한 시험체는 하중 초기단계부터 구속효과를 발현하기 때문이다. 초기단계부터 능동 구속압에 의한 구속 효과를 발현함으로써 구조물 전체에 추가적인 변형을 가하지 않기 때문에 안전성

Fig. 6 Axial stress-strain curve (A series)

측면에서 매우 유효한 방법으로 판단된다.

3.2.2 C계열 시험체

C 계열 시험체는 모두 축방향 철근이 배치되어 있으며 띠철근이 166 mm 간격으로 배치되어 있는 상태로서, 여기에 프리스트레스트 아라미드 스트랩 추가 유무에 따른 결과 비교는 Figs. 7 및 12와 같다.

1) 강도특성

Fig. 7에서, 프리스트레스트 보강 시험체 C-2는 C-1 시험체와 비교하여 약 62%의 파괴하중 증가를 보이며, 이는 프리스트레스트 아라미드 스트랩의 횡구속이 파괴하중 증진에 효과적임을 알 수 있다.

2) 변형특성

Fig. 7에서 보는 바와 같이, 하중 초기단계부터 구속효과를 확인할 수 있으며, 하중이 증가할수록 강성 증가로 인한 구속효과를 보이고 있다. 또한, Fig. 12에서 A-2 시험체와 비교하여 최종 파괴시 체적 팽창의 경향을 보이지만, 초기 체적 변형률은 매우 작다. 즉, 프리스트레스의 도입과 스티럽의 배치가 콘크리트 초기 강성 증가 및 체적증가를 감소에 효과적이며, 구속 증진효과에도 유효한 영향을 주고 있는 것을 알 수 있다.

3.2.3 D계열 시험체

D 계열 시험체는 모든 조건이 C 계열 시험체와 같고 시험체의 띠철근 간격을 1/2 (83 mm)로 조밀하게 배근한 상태이다. 축방향 철근과 띠철근 (간격 83 mm)만으로 제작한 시험체인 일반 무보강 시험체 (D-1)와 기존의 보강 방법인 유리섬유 (D-2), 탄소섬유 (D-3), 프리스트레스트 아라미드 섬유 스트랩 (D-7)으로 각각 보강한 시험체와 그 결과를 상호 비교하였으며, Figs. 8과 13에 그 결과를 나타내었다. 또한, Figs. 9와 14에서 프리스트레스 도입 수준에 따른 양상을 비교하고자 D-4 (0%), D-6 (70%), D-7 (100%)를 비교하였으며, Figs. 10과 15에서 프리스트레스트 보강 스트랩의 수를 5, 10, 20개로 변화시켰을 경우를 비교하였다. 마지막으로 일반 시험체와 축방향 철근 유무 및 띠철근의 간격의 변화에 대한 양상을 Figs. 11과 16에 나타내었다.

3.2.4 기존보강방법과의 비교

1) 강도특성

Fig. 8에서, 모든 내부 조건이 같은 상태에서 유리섬유 보강 시험체 D-2, 탄소섬유로 보강한 시험체 D-3, 프리스트레스트 아라미드 스트랩으로 프리스트레스트 보강한 D-7 시험체를 비교하였다. 실험 결과, 모든 보강 시험체는 일반 RC 시험체인 D-1보다 높은 파괴강도를 갖는 결과를 보였으며, 유리섬유로 전면을 보강한 시험체 D-2가 가장 높은 강도를 보이나 프리스트레스트 아라미드 스트랩 보강 시험체 D-7과의 차이는 19% 정도이다.

Fig. 7 Axial stress-strain curve (C series)

Fig. 8 Axial stress-strain curve according to the fiber type (D series)

Fig. 9 Axial stress-strain curve according to the fiber prestressed level (D series)

Fig. 10 Axial stress-strain curve according to the number of aramid strap type (D series)

Fig. 11 Axial stress-strain curve according to the axial bar and stirrup spacing (D series)

Fig. 12 Axial stress-volumetric strain curve (A, C series)

2) 변형특성

프리스트레스트 아라미드 섬유 스트랩으로 보강한 시험체 D-7은 기존의 보강방법과 비교하여 우수한 초기 및 장기 강성증가를 보이며, Fig. 13에서 초기 체적 팽창률이 가장 작음을 확인할 수 있다. 즉, 기존의 방법과 비교하여 상대적으로 작은 보강면적으로 효과적인 횡 구속 효과와 낮은 초기 체적 변형률을 가지는 결과를 나타내었다.

3.2.5 프리스트레스 도입 수준에 따른 비교

동일 조건의 시험체에 프리스트레스 도입 수준이 각각 0% (D-4), 70% (D-6), 100% (D-7)일 경우의 실험 결과는 Figs. 9와 14에 나타내었다.

1) 강도특성

Fig. 9에서 보듯이, 일반 RC 기둥인 D-1 시험체와 비교하여 프리스트레스를 도입하지 않고 아라미드 스트랩을 표면 부착한 D-4는 약 48% 이상의 강도 증진을 보였으며, 여기에 프리스트레스 도입수준 70%인 시험체 D-6에서는 추가적으로 약 15%가 증진되며, 프리스트레스 도입수준 100%인 시험체 D-7은 약 11%의 추가적인 강도 증진효과를 나타내었다. 즉, 일반 RC 기둥과 비교하여, 아라미드 스트랩을 단순 부착할 경우 약 48%, 프리스트레스 100%를 도입할 경우 약 73%의 강도 증진효과를 보인다.

2) 변형특성

Fig. 9에서 보는 바와 같이, 일반 RC 시험체 D-1과 비교하여 프리스트레스 수준이 증가할수록 초기 및 파괴시의 강성이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 프리스트레스 도입율이 100%인 D-7 시험체가 가장 확실한 강성증진으로 인한 초기 및 장기 구속효과를 확인할 수 있다. 또한, Fig. 14에서 보는 바와 같이, 프리스트레스 도입률 70% 까지는 체적이 팽창하면서 파괴에 이르나, 프

Fig. 13 Axial stress-volumetric strain curve according to the fiber type (D series)

Fig. 14 Axial stress-volumetric strain curve according to the applied fiber prestressed level (D series)

리스트레스 도입률이 100%일 경우 체적이 감소하면서 파괴되었다. 즉, 프리스트레스 아라미드 스트립에 의한 구속효과 증진으로 인하여 횡변형률은 억제되고 축변형률이 증가하여 결국 체적이 감소하는 것을 알 수 있다.

3.2.6 아라미드 스트랩 수에 따른 비교

프리스트레스 수준 도입율과 주철근 및 띠배근 등 모든 조건이 동일할 경우 아라미드 스트랩 수를 20(D-7), 10(D-8), 5(D-9)로 변화시킬 경우의 강도변화는 Fig. 10, 15와 같다.

1) 강도특성

Fig. 10에서 보는 바와 같이, 일반 RC 기둥 D-1과 비교하여 프리스트레스가 도입된 아라미드 스트랩의 수가 증가 증가할수록 강도는 증진하였다. 즉, 스트랩 수가 5개/

Fig. 15 Axial stress-volumetric strain curve according to the number of aramid strap (D series)

m일 경우 25%, 10개/m일 경우 28%, 20개/m일 경우 73%의 강도 증진 효과를 보였다. 여기서, 스트랩 수가 5, 10개일 경우의 결과는 강도 증진 비율이 미소하여 효과를 기대하기 어렵다고 판단된다. 따라서 안정적인 강도 확보 측면에서 아라미드 섬유 스트랩 수는 20개/m 이상이어야 한다고 사료된다.

2) 변형특성

Fig. 10에서, 프리스트레스 아라미드 스트랩의 수가 증가할수록 강성 증진으로 인한 구속효과가 증가하는 경향을 보였다. 즉, 20개/m의 프리스트레스 스트랩으로 보강한 D-7 시험체의 변위구속으로 인한 강성증가효과를 확인할 수 있었다. 또한, Fig. 15에서 보는 바와 같이, 보강 스트랩의 수가 5개/m, 10개/m일 경우 체적이 팽창하면서 파괴되는 반면, 20개/m로 보강된 D-7 시험체의 경우 횡구속으로 인하여 축방향 압축 변형만이 발생하여 파괴에 이르는 것으로 판단된다.

따라서, 안정적인 강도와 더불어 강성증진 및 효과적인 구속효과를 발현하기 위해서는 1.0 m 당 최소 20개의 스트랩이 필요하다.

3.2.7 주 (축방향)철근 및 띠철근의 영향

프리스트레스 도입 수준과 아라미드 섬유 스트랩 수가 20개/m으로 동일한 경우의 주 (축방향)철근과 띠철근의 유무, 띠철근 간격에 따른 변화양상은 Figs. 11과 16에 나타내었다.

1) 강도특성

Fig. 11에서, A-2 시험체에 주 (축방향)철근과 166 mm 간격의 띠철근을 배근한 C-2 시험체의 강도증진은 있으나 증가량은 10% 이하로서 매우 미소하였다. 그러나 동일조건에서 띠철근의 간격을 1/2 (83 mm)로 변화시킨 D-

Fig. 16 Axial stress-volumetric strain curve according to the axial bar and stirrup spacing

7 시험체의 경우 상대적으로 확실한 하중증가 양상과 약 32%의 강도 증진을 확인할 수 있었다. 띠철근이 촘촘하게 배치될 경우 횡구속 면적이 증가하여 횡구속력을 증진시키는 일반적인 경향¹⁾과 유사한 결론을 얻을 수 있었다.

2) 변형특성

Fig. 11에서 일반 콘크리트 기둥 A-2와 비교하여 주 (축방향) 철근과 166 mm 간격의 띠철근이 배치된 C-2 시험체의 강성이 증가된 것을 확인할 수 있으며, 동일 조건에서 띠철근의 간격을 1/2 (83 mm)로 변화시킨 D-7 시험체가 보다 더 강성이 증진된 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 16에서 일반 콘크리트 기둥인 A-2 시험체와 비교하여 축방향 철근과 166 mm 간격의 띠철근을 배치한 C-2 시험체의 강성은 증가하지만 파괴 부근에 도달하면서 점차 체적이 팽창하는 경향을 나타내었다. 그러나 동일 조건에서 띠철근의 간격을 1/2 (83 mm)로 변화시킬 경우 구속면적의 증가로 인하여 횡변형이 구속되어 결국 축방향 압축만이 발생하고 체적이 감소하였다. 그 변화량도 미소하게 변화하였다. 즉, 축방향 철근 및 띠철근의 배치와 상대적으로 촘촘한 띠철근 간격이 기둥의 강도 증진은 물론 강성증진과 구속효과에 기여하는 것을 확인할 수 있었으며, D-7 시험체의 구속효과가 가장 확실하게 나타났으며, 체적 변화량도 가장 미소한 결과를 보였다.

4. 결 론

RC 원형 기둥 시험체에 대하여 프리스트레스를 도입한 아라미드 섬유 스트랩으로 보강하여 능동 구속압을 도입하는 기존 방법을 개선한 보강방법을 실시하여 실험을 수행하였으며 그 연구 결과 및 고찰을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 프리스트레스를 도입한 아라미드 스트랩으로 보강한 시험체의 파괴양상은 콘크리트의 파괴로부터 시작되며, 스트랩을 최종 고정시키는 상부 고정판의 박리가 발생하며 파괴에 이르는 것으로 나타났다.
- 2) 철근의 존재는 프리스트레스스트 아라미드 섬유 스트랩 보강 기둥의 강도 증진에 효과적이며, 띠철근의 간격이 촘촘할 경우 그 체적 변형률이 감소하는 효과를 기대할 수 있다. 또한 주철근과 스트랩의 동등한 조건에서 프리스트레스스트 섬유 스트랩 보강 기둥은 약 73% 이상의 강도증진 효과를 보였다.
- 3) 프리스트레스스트 아라미드 섬유 스트랩의 수가 5개 일 경우와 비교하여 10개인 경우의 강도증진효과는 크지 않았다. 또한, 프리스트레스 도입을 35%와 70%도 유효하지 않은 경향을 보였다. 또한 두 경우 모두 파괴 부근에 이르러 체적이 팽창하는 경향을 보이게 되어 파괴에 대한 안정성 확보 측면에서 그 효과를 보장할 수 없는 것으로 판단된다. 즉, 안정적인 강도 발현과 구속효과를 위한 아라미드 스트

랩의 최소수는 20개/m이며, 프리스트레스 도입률은 100%(보강길이의 1.2%)로 하여야 한다고 판단된다.

- 4) 일반적인 RC 기둥인 D-1과 비교하여 프리스트레스스트 아라미드 섬유 스트랩으로 보강한 D-7 시험체는 초기 및 파괴시의 변위 증가율은 매우 작은 높은 강성을 보이고 있으며, 이로 인한 구속효과가 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 또한 파괴시까지 체적 팽창률이 매우 작은 안정적인 파괴 형태를 보였다.
- 5) 기존의 보강방법들과 비교하면, 탄소섬유시트 및 유리섬유시트로 보강한 RC 기둥은 그 파괴양상이 매우 취성적이며, 파괴 부근에 이르러 체적이 팽창하게 되는 양상을 보인다. 반면, 프리스트레스스트 스트랩으로 보강한 기둥은 상대적으로 작은 면적으로 상당히 우수한 강도증진 효과를 나타내며, 강성 증진으로 인한 구속효과가 가장 우수하며 체적 변형률도 매우 작다. 특히 초기 구속효과 증진에 매우 유효함을 알 수 있었다.
- 6) 기존의 제안된 식들은 보강 섬유에 어떠한 외력도 가하지 않은 상태를 전제로 이론식을 유도하고 있어 프리스트레스가 도입된 본 연구에서의 시험체에는 적용이 난해하고, 전면이 아닌 개별적인 띠를 구성하여 보강한 시험체에 대한 연구도 매우 미진한 상태이다. 또한, 대부분의 연구결과가 표준공시체 수준의 비교적 작은 시험체를 대상으로 하고 있으므로 실제 구조와의 차이점이 분명 존재할 것으로 판단된다. 따라서, 실제 크기의 실험과 프리스트레스스트 보강 시험체에 대한 정식화 및 그 효과의 정량화를 위해서는 추가적인 실험과 연구 결과 축적이 요구된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Mander, J. B., Priestley, J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, 1988, pp. 1804~1826.
2. Hong, K. N. and Han, S. H., "Uniaxial Compression Behavior of High-Strength Concrete Confined by Low-Volumetric Ratio Lateral Ties," *Journal of Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 5, 2005, pp. 843~852.
3. Madas, P. and Elnashai, A. S., "A New Passive Confinement Model for the Analysis of Concrete Structures Subjected to Cyclic and Transient Dynamic Loading," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 21, No. 2, 1992, pp. 409~431.
4. Shahawy, M., Mirmiran, A., and Beitelman, T., "Test and Modeling of Carbon-Wrapped Concrete Columns," *Composites Part B : Engineering*, Vol. 31, Issues 6-7, 2000, pp. 471~480.

5. Wang, Y. C. and Hsu, K., "Design of FRP-Wrapped Reinforced Concrete Columns for Enhancing Axial Load Carrying Capacity," *Composite Structures*, Vol. 82, Issues 1, 2008, pp. 132~139.
6. Lin, H. J. and Liao, C. I., "Compressive Strength of Reinforced Concrete Column Confined by Composite Material," *Composite Structures*, Vol. 65, Issues 2, 2004, pp. 239~250.
7. Toutanji, H. and Deng, Y., "Strength and Durability Performance of Concrete Axially Loaded Members Confined with AFRP Composite Sheets," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 33, Issues 4, 2002, pp. 225~261.
8. Wang, Y. C. and Restrepo, J. I., "Investigation of Concentrically Loaded Reinforced Concrete Column with Glass Fiber-Reinforced Polymer Jacket," *ACI Structural Journal*, Vol. 98, No. 3, 2001, pp. 277~385.
9. 조순호, "GFRP로 구속된 원형단면 콘크리트 단주의 강도 및 변형 특성," 콘크리트학회 논문집, 19권, 1호, 2007, pp. 121~130.
10. Porta, A., Manfredi, G., and Cosenza, E., "Ultimate Behaviour of Axially Loaded RC Wall-Like Columns Confined with GFRP," *Composites Part B : Engineering*, Vol. 37, Issues 7~8, 2006, pp. 670~478.
11. Youssef, M. N., Feng, M. Q., and Mosallam, A. S., "Stress-Strain Model for Concrete Confined by FRP Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 38, Issues 5~6, 2007, pp. 614~628.
12. 이대형, 김영섭, 정영수, "FRP로 보강된 콘크리트의 강도 및 변형률 예측," 콘크리트학회 논문집, 19권, 3호, 2007, pp. 253~263.
13. 조순호, "FRP 합성재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 응답 예측," 콘크리트학회 논문집, 19권, 6호, 2007, pp. 803~810.
14. 서대원, 한범석, 신성우, "FRP 보강근을 주근으로 사용한 일방향 콘크리트 슬래브의 거동," 콘크리트학회 논문집, 19권, 6호, 2007, pp. 763~771.
15. 서수연, 윤현도, 최기봉, "탄소섬유로 휨보강된 RC 보의 부착 손실에 대한 거동 특성," 콘크리트학회 논문집, 19권, 6호, 2007, pp. 795~802.
16. 홍성남, 김태완, 박선규, 박종섭, 박영환, "프리스트레스가 도입된 표면매립 CFRP를 이용한 교각 두부 보강에 관한 연구," 콘크리트학회 논문집, 19권, 5호, 2007, pp. 595~602.
17. 박상렬, 김창훈, 홍성룡, "외부 CFRP 프리스트레싱으로 보강된 PSC 보에서 CFRP 텐션의 극한응력," 콘크리트학회 논문집, 19권, 6호, 2007, pp. 735~744.
18. 한상훈, 홍기남, 김형진, 우상균, "CFRP 판으로 프리스트레싱 보강된 RC 보의 휨거동에 관한 실험적 연구," 대한토목학회 논문집, 26권, 24호, 2006, pp. 301~310.

요 약 본 연구에서는 기존의 연구방법을 개선한 프리스트레스가 도입된 아라미드 스트랩으로 횡 구속된 RC 원형 기둥의 일축압축 거동에 대하여 강도와 변위에 의한 강성 및 구속효과에 대하여 연구하였으며, 그 프리스트레싱 보강 방법 및 과정에 대하여 비교적 상세히 소개하였다. 이 방법으로 보강된 기둥의 파괴형태는 초기 능동 구속압의 작용으로 인하여 변위 증가율이 매우 낮으며 이후 최종 파괴시까지도 그 형상이 유지되는 매우 안정적인 파괴형태를 보이게 된다. 파괴하중 비교 결과 일반 RC 기둥과 비교하여 73% 이상 강도증진 효과를 나타내었다. 또한 변형 증가율이 매우 작으며 이로 인한 변위구속효과가 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 기존의 보강방법 (CFS, GFS)과의 비교를 통하여, 상대적으로 작은 면적으로 우수한 강도증진을 보이며 강성증가로 인한 구속효과 역시 우수하며 체적 증가율도 팽창하지 않는 결과를 보였다. 특히, 콘크리트 팽창 이후부터 발휘되는 기존 방법의 구속효과와는 달리, 초기부터 도입되는 프리스트레스 긴장력에 의한 초기변형 구속효과가 매우 탁월하며, 최종 파괴시까지 체적 변형률이 팽창하지 않는 안정적인 결과를 나타낸다.

핵심용어 : RC 원형 기둥, 프리스트레싱 아라미드 스트랩, 횡 구속효과, CFS, GFS