# 論文 緊張アラミド繊維ベルトを用いた拘束コンクリート柱の 圧縮性状

中田 幸造<sup>\*1</sup>·山川 哲雄<sup>\*2</sup>·森下 陽一<sup>\*3</sup>·舛田 尚之<sup>\*4</sup>

要旨:アラミドベルトによりプレストレスを導入した横補強柱の能動的,受動的横拘束効 果を究明するために中心圧縮実験を行い,かつMander式とFEM解析による検討を行った。 その結果,プレストレスの導入で圧縮強度の上昇および応力下降域の勾配緩和が見られ, また材料の性能を最大限に引き出せることがわかった。ノンプレストレスでは圧縮強度の 上昇は低いが,応力下降域では中心圧縮ひずみの進行とともに受動的横拘束が増大し,圧 縮強度が再度上昇する現象が見られた。この現象をMander式およびFEM解析はほぼ再現 できることがわかった。

キーワード:アラミドベルト,プレストレス,構成則,横拘束効果,中心圧縮,FEM解析

1. 序

本研究は山川らによって提案されたアラミド 繊維ベルトやPC鋼棒を外帯筋状に配置して、プ レストレスを導入した RC 柱の恒久的および応 急的耐震補強法に関する基礎的研究に相当する。 プレストレスの導入は,従来の受動的横拘束効 果に加えて能動的横拘束効果を生じさせ、せん 断強度,圧縮強度および靭性を大きく改善させ 得ると考えられる。しかし,今までの山川らに よる一定軸力下の正負繰返し水平加力実験では, せん断補強効果は確認されているが,横拘束効 果に関してはプレストレスの導入に伴う能動的 効果と受動的効果について,これらの機構がま だ十分解明されていない。また,アラミド繊維 シートや炭素繊維シートをコンクリート柱に巻 き付け,面取り半径やシート枚数の大小により コンクリートの中心圧縮性状や構成則を検討し た既往の研究は散見されるが1)2),これらはすべ て受動的横拘束効果のみを検討の対象にしたも のであり,能動的横拘束効果まで検討の対象に した研究は見あたらない。

導入した場合の受動および能動的横拘束効果を コンクリートの構成則を通して検討することで ある。そこでまず,アラミド繊維ベルトにより プレストレスを導入した柱の中心圧縮実験を行 う。次に実験結果について既存の計算式や3次元 非線形有限要素法により解析的にも追求する。

#### 2. 実験概要

試験体は Fig. 1 のように 250mm × 250mm の 正方形断面で, 全高が 500mm である。本研究で は, アラミドベルトによる横拘束効果を実験的 に検証するために鉄筋を一切配筋していない。 アラミドベルトは,シングル・ダブルベルトとも 100mm のラップ長さを確保し,2液混合型エポ キシ樹脂で硬化させリング状に形成されている。 アラミドベルトとコーナーアングル間には,離 形フィルムを介在させて摩擦を低減させている (詳細図は文献3を参照)。

試験体シリーズは2種類で、シングルベルトシ リーズ(ベルト幅17mm)、ダブルベルトシリーズ (シングルベルトを平行に2組配置したもの)で あり、各々ノンプレストレスとプレストレスが

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博	尊 (正会員)
*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 ]	[博 (正会員)
*4 琉球大学 工学部 学生	

本論文の目的は,横補強材にプレストレスを

計画されている。加えてプレーンコンクリート も1体計画した。試験体数は5体である。アラミ ドベルトの間隔は65mm ,高さ方向に7段である。 これらの試験体一覧をTable1に示す。

アラミドベルトの材料特性を Table 2 に示す。 アラミドベルト(アラミド1)は2 層にして使用 した。試験体に使用したコンクリートは普通ポ ルトランドセメント,加力直前のシリンダー強 度は25.6MPaであり,Table 3の調合で混練した。 コンクリートの材料特性を Table 4 に示す。

# 3. 加力方法と測定方法

載荷はコンクリート部分のみの単調載荷で,1 端固定(下部),他端ピン(上部)の材端条件で 2000kN万能試験機を用いた。試験体の軸方向ひ ずみは, Fig. 2 に示す載荷板間のひずみ(検長 500mm)4箇所と試験体中央部(検長325mm)4 箇所の計8箇所測定した。試験体中央部の測定治 具は,対面側とバネにより締め付けており,試 験体表面と点で接している(Fig.2参照)。軸ひず みを2つの方法で測定したのは、載荷板間のひず みは大変形まで安定しているが,圧縮強度に至 るまでのひずみを正確に測定できないこと,試 験体中央部で測定したひずみは圧縮強度までは より正確に測定できるが,圧縮強度以降のひず みが乱れることなどがパイロット実験により判 明したためである。この2つの方法による軸ひず みを,後に述べる方法で修正して応力-ひずみ曲 線を求めた。



Fig. 1 Uniaxial compression specimen

**Talbe 1 Details of specimens** 

Specimen		G	Belt	Prestress	Lateral	Membrane
		<sub>c</sub> O <sub>B</sub>	Interval	level	pressure	stiffness
		(MPa)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
Plain	C02-A0	25.6	-	-	-	-
Single	C02-A65N	25.6	65.0	0.0	0.0	151.0
belt	C02-A65	23.0	05.0	826.0	2.1	151.0
Double	CA02-Aw65N	25.6	65.0	0.0	0.0	302.1
belts	CA02-Aw65	25.0	05.0	826.0	4.2	302.1

 $_{c}\sigma_{B}$ =cylinder strength before test.

Talbe 2 Material properties of aramid fiber belt

Aramid	Cross section	Width	Thickness	$\mathbf{f}_{\mathrm{u}}$	ε <sub>u</sub>	Е
fiber belt	$(mm^2)$	(mm)	(mm)	(MPa)	(%)	(GPa)
	10.4	17	0.612	2065	1.75	118

 $f_{\mu}$ =design strength,  $\varepsilon_{\mu}$ =design strain, E=Young's modulus.

**Talbe 3 Mix proportion** 

Cement	Water	Fine	Coarse	Admixture	Cement-	Sramn
Cement water	aggregate	aggregate	Auminture	water ratio	Siump	
$(kg/m^3)$	$(kg/m^3)$	$(kg/m^3)$	$(kg/m^3)$	$(kg/m^3)$	(%)	(cm)
240	202	947	856	0.96	84.0	18

# Talbe 4 Material properties of concrete

F <sub>c</sub>	$_{c}\sigma_{\mathrm{B}}$	ceB	Е
(MPa)	(MPa)	(%)	(MPa)
20.0	25.6	0.24	$2.61 \times 10^4$

 $F_c$ =design strength,  ${}_c\sigma_B$ =cylinder strength before test, E=Young's modulus.

#### 4. 実験結果

4.1 破壊状況

試験体の破壊状況を Photo 1 に示す。全試験体に共通する破 壊状況は,試験体の下部より上 部が激しく壊れる,非拘束領域 のコンクリートが外側にはらみ 出し,アラミドベルトやカプ ラーに接触する,高さ方向にお いてコーナーアングル間のコン



Fig. 2 Instrument for axial strain

クリートは粉々に砕ける,等が観察された。プ レストレス試験体は,シングルベルトについて は上から2段目,ダブルベルトについては3段目 が破断した。

4.2 応力 - ひずみ関係

前述の理由により、ノンプレストレス試験体 を修正したものとプレストレス試験体を Fig. 3 に示す(全シリーズ)。修正するにあたって,圧 縮強度時までは試験体中央部で測定した軸ひず みを用いた。それ以降は載荷板で測定された軸 ひずみを圧縮強度時のひずみの差だけ試験体中 央部で測定されたひずみまでシフトして用いた。 修正した部分のひずみを破線で示す。また、プ レストレス試験体では,試験体中央部で測定し た軸ひずみをそのまま用いた。Fig.3より,ノン プレストレス試験体の応力-ひずみ曲線は,圧縮 強度以降,強度がいったん低下するものの,ひ ずみが進むにつれて再び圧縮強度が上昇する傾 向にある。これは圧縮ひずみが進むにつれて受 動的横拘束が次第に大きくなるためである。シ ングルベルトとダブルベルトの違いは,圧縮強 度がほとんど変わらないので,応力下降域の勾 配が顕著か否かにあると考えられる。これは剛 性の差異によるものと考えられる。また次節で も述べるが,ノンプレストレス試験体では圧縮 強度まではほとんどアラミドベルトのひずみは 上昇しない。従って,強度の不整合はプレーン コンクリート強度のばらつきによると考えられ る。プレストレス試験体は,圧縮強度の上昇お よび圧縮強度以降の強度低下が緩やかになり、 プレストレスを導入した効果が見られる。また, アラミドベルトがプレストレス試験体でのみ破 断したことを考えると,プレストレスを導入す ることで,材料の能力を最大限に引き出すこと が出来ると考えられる。

4.3 アラミドベルトひずみ - 圧縮ひずみ関係

Fig.1にアラミドベルトのひずみゲージ貼付箇 所を示す。Fig.4にアラミドベルト周方向ひずみ とコンクリート柱の平均圧縮ひずみ関係を代表 してシングルベルトシリーズについて示す。



**Photo 1 Failure modes** 



Fig. 5 Test results

 Table 5 Test results

Specimen	$_{c}\sigma_{cB}$	$_{c}\epsilon_{cB}$	${}_c\sigma_{cB}\!/{}_c\sigma_{B}$	$_{\rm c}\sigma_{\rm B}$	$_{c}\epsilon_{B}$
	(MPa)	(%)		(MPa)	(%)
C02-A0(plane)	17.6	0.15	0.68		
C02-A65N	19.5	0.27	0.75		
C02-A65	21.2	0.53	0.82	25.6	0.24
C02-Aw65N	18.0	0.33	0.69		
C02-Aw65	24.5	0.31	0.94		

 $_{c}\sigma_{cB}$  = compressive strength of confined concrete,

 $_{c}\epsilon_{cB}$ =strain of confined concrete at peak point,

 $_{c}\sigma_{B}$ =cylinder strength,  $_{c}\epsilon_{B}$ =strain of cylinder at peak point.



Fig. 4 Strain of aramid fiber belts versus axial strain of confined concrete column

**Fig. 4**では,継手部と対面側の柱頭(No.1),柱 中央(No.4),柱脚(No.7)のひずみを示してい る。しかし,C02-A65Nでは測定不備により柱脚 (No.7)のデータを喪失したのでNo.6のひずみ

を示している。グラフの縦軸はアラミドベルト のひずみ,横軸はコンクリート柱の圧縮ひずみ を示している。C02-A65には約7000µのプレスト レスを導入した。グラフ中の垂直破線は各試験 体の圧縮強度時のひずみであり,また参考まで に連続繊維シートのせん断用設計引張強度算定 に使用されている有効ひずみ度4(0.7%)を一点 鎖線で示してある。Fig. 4よりノンプレストレス 試験体であるC02-A65Nは、圧縮強度までのひず みは非常に小さい。しかし,圧縮強度以降のひ ずみの増大は著しく, 靭性能増大に多いに寄与 していることがわかる。プレストレス試験体で ある C02-A65 は, 圧縮ひずみの初期からアラミ ドベルトのひずみが上昇し、ノンプレストレス 試験体に比べて受動的横拘束による強度上昇が 見られることがわかる。またグラフより,柱上 部のアラミドベルトほどひずみが大きい。従っ て,柱上部のアラミドベルトにより圧縮強度の 上昇量は支配されたと考えられる。

5. Mander 式による予測

5.1 アラミドベルトへの適用方法

ここでは, Mander ら<sup>5)</sup>により提案された構成 則を用いて今回の実験結果の予測を試みる。ま ず受動的,能動的横拘束効果をどのように考え たかを説明する。拘束効果係数k<sub>a</sub>は,横補強筋 への適用方法をアラミドベルトへの適用方法に 読み替えて算出した(Fig.5参照)。

$$k_{e} = \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{(w_{i}')^{2}}{6b^{2}}\right) \left(1 - \frac{s'}{2b}\right)^{2}$$
(1)

 $k_e$ :拘束効果係数

wi': コーナーアングル間の水平内法距離

- s : アラミドベルトの間隔 (s=65)
- s':コーナーアングル間の隙間(s'=15)

b : 柱断面の幅

次にプレストレス導入による能動および受動 的横拘束効果は,有効横拘束圧fl'で考慮した。 ここで式(2)のf<sub>A</sub>はプレストレス値であり,ノ ンプレストレス試験体では0,プレストレス試験 体では826MPaである。また,受動的横拘束効果



Fig. 5 Effective area of confined concrete

を考慮する f<sub>p</sub>は, 圧縮ひずみの進行とともに増 大するアラミドベルトのひずみを式(2)に反映 するために, アラミドベルトひずみと圧縮ひず みの関係から(例えば Fig. 4), No.1 ~ No.7のそ れぞれのベルトについて回帰直線を求め, この 回帰直線の傾きの平均によりアラミドベルトひ ずみと圧縮ひずみを関係付けた(式(3))。

$$\mathbf{f}_{1}' = \mathbf{f}_{1} \cdot \mathbf{k}_{e} = \boldsymbol{\rho} \cdot (\mathbf{f}_{P} + \mathbf{f}_{A}) \cdot \mathbf{k}_{e} \cdot \boldsymbol{\alpha}$$
(2)

$$f_{\rm P} = E_{\rm A} \cdot a\varepsilon_{\rm c}$$
 (3)  $\rho = \frac{2A \cdot b}{b^2 s}$  (4)

$$f'_{cc} = f'_{co} \left( -1.257 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f'_1}{f'_{co}}} - 2\frac{f'_1}{f'_{co}} \right)$$
(5)

- ρ :アラミドベルトの1方向の体積比
- f<sub>p</sub>:アラミドベルトによる受動的横拘束圧

f<sub>A</sub>:プレストレスによる能動的横拘束圧

(826MPa)

- a :回帰直線の傾き(平均値)
- E<sub>4</sub>:アラミドベルトのヤング係数
- α:低減係数
- ε : 横補強コンクリート柱の圧縮ひずみ
- A:1組のアラミドベルト断面積
- b':1方向のアラミドベルトの長さ
- f'...: プレーンコンクリートの圧縮強度

5.2 実験結果との比較

**Fig. 6**に Mander 式による予測結果と実験結果 の比較を示す。**Fig. 6**の破線は有効横拘束圧fl'に 低減係数を乗じていないものであり,細い実線 は有効横拘束圧fl'にノンプレストレス試験体で はα=0.2,プレストレス試験体ではα=0.25の低 減係数αを乗じたものである。**Fig. 6**より,低 減係数を乗じることで実験挙動を比較的良く予



Fig. 6 Comparison of experimental and caluculated stress-strain curves 測出来るようになった。しかし、Fig. 6(a)(b) のノンプレストレス試験体では,シングルベル トとダブルベルトの差異がほとんど見らず,ま た(c),(d)のプレストレス試験体でも圧縮強 度の差異以外はそれほど大きな違いを見出すこ とは出来ない。圧縮強度の計算結果を実験値で 除した値は, 0.91~0.99である。

FEM 解析による予測 6.

#### 6.1 解析概要

中心圧縮試験体のシミュレーションは,4体 行った。解析変数は,ベルトタイプ(シングル, ダブル), プレストレスの有無(0,826MPa)で ある。解析は,汎用有限要素プログラム micro DIANAを用いた非線形3次元弾塑性有限要素解 析である。コンクリートとコーナーアングルに は三次元要素、アラミドベルトにはトラス要素、 コンクリートとコーナーアングル間およびコー ナーアングルとアラミドベルト間は一軸圧縮力 のみを受ける構造界面要素を用いた。コーナー アングルとアラミドベルト間では,引張力には 抵抗せず,圧縮力は剛に抵抗する。また,コンク リートとコーナーアングル間ではFig.7に示す 構成則に従うものとした。つまり、この部分の 界面要素により実験での応力ひずみ曲線の再現 を試みた。コンクリートの構成則は,引張側は ひび割れまで弾性, ひび割れ後は直線的に強度 低下するとした。圧縮側はプレーンコンクリー ト柱の実験圧縮強度を Mander 式<sup>5)</sup> に適用した (拘束効果係数は0)応力-ひずみ関係を用いた。 破壊基準は Drucker-Prager を使用し,内部摩擦



(a) Unconfined concrete (b) Aramid fiber belt



(c) Interface element

Fig. 7 Constitutive lows





角は27.5度と仮定した。Fig.7に使用した材料 の構成則を示す。

## 6.2 解析モデル

解析モデルを Fig. 8 に示す。解析モデルは,断 面に対して 1/8 モデルであり,材軸方向は2分割 である。対称面上の節点は,対称軸方向と高さ 方向を除く全ての自由度を拘束した。プレスト レスによる横拘束圧は,コーナーアングルの接 触するコンクリート部分に一定の応力として与 えた。以上の状態で解析モデルの上面に一様な 鉛直強制変位を与えた。

# 6.3 解析結果と実験結果の比較

解析結果と実験結果の比較をFig.9(a)~(d) に示す。全体的に解析は実験挙動をおおよそ捕 らえている。また(a),(b)より,圧縮強度以降 の強度上昇及び剛性の違いによる上昇量の差が 表現出来ている。(c),(d)より,緩やかな応力 下降域および補強量の相違による強度低下の差 を表現出来ている。

## 7. 結論

1) ノンプレストレス試験体の圧縮強度は,プ レーンコンクリートとそれほど変わらなかった。 しかし,圧縮強度以降,いったん強度が低下し, その後再び強度が上昇する特徴が見られた。

2) プレストレスを導入すると圧縮強度が上昇 し,応力下降域の勾配が緩やかになった。

3) 圧縮強度時のアラミドベルトのひずみは,全 ての試験体で小さかった。従って受動的横拘束 効果は,それほど圧縮強度上昇には寄与しない と考えられる。しかし,圧縮強度以降では受動 的横拘束効果の影響が大きい。

4) Mander式を実験結果に適用した結果,ノンプ レストレス,プレストレス試験体ともに低減係 数を乗じるとほぼ実験結果を予測出来ることが わかった。

5) FEM 解析の結果, 各試験体の応力-ひずみ性 状をほぼ再現できた。

今回は横補強材としてアラミドベルトを使用 したが,PC鋼棒を用いた場合についても今後研 究を展開する予定である。

## 謝辞

本研究は,平成13年度科学研究費補助金(基盤研究 (B),(展開)13555159,代表者:山川哲雄)の助成を受 けた。

#### 参考文献

1) 杉本敏和, 益尾潔, 谷垣正治, 角田敦: アラミド繊 維シートおよび炭素繊維シートによる RC 柱の圧縮靭性 に関する補強効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.1489-1494, 1999

2)山川哲雄,張愛暉,佐藤元:アラミド繊維シートを用 いた RC 柱の耐震補強に関する研究,日本建築学会構造 系論文集,No.545,pp.111-117,2001.7

3) 舛田尚之,中田幸造,山川哲雄,森下陽一:アラミド ベルトによりプレストレスを導入したコンクリート柱の 中心圧縮性状 その1 中心圧縮実験,日本建築学会九 州支部研究報告,2003.3

4)日本建築防災協会:連続繊維補強材を用いた既存鉄 筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の 耐震改修設計・施工指針,日本建築防災協会,1999.9 5)Madner,J.B, Priestley, M.J.N., and Park, R., Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.114, No.8. August1988, pp.1804-1826.