

既存 RC 柱の靱性能に及ぼす アラミド繊維テープの巻き付け効果

永坂具也^{*1}・下田和幸^{*2}

Wrapping Effects of Aramid FRP Tape on Ductility Capacity of Existing R/C Columns

by

Tomoya NAGASAKA and Kazuyuki SHIMODA

(Received on Mar. 24, 1999, accepted on June 24, 1999)

Abstract

This study was carried out as a part of the experimental studies for improving the shear capacity and ductility of existing R/C columns, in which it was expected to fail in a brittle manner due to inadequate amount of hoops, by wrapping aramid FRP tape spirally around them. In the columns with shear span ratio of 1.5, wrapping of suitable amount of tape enabled to fail them in flexure and significantly improve their ductility. In extremely short columns with shear span ratio of 1.0, tape wrapping was effective in preventing a sudden drop of the loading capacity and in increasing the deformation capacity, even when the shear capacity could not exceed the flexural capacity yet. And still more amount of wrapped tape could finally change the failure mode of the columns from shear to flexure. The tape wrapping proved to be effective in improving not only the ductility of undamaged columns but also that of previously damaged columns. And, tape wrapping was effective in preventing the cover concrete from spalling off. Moreover it was demonstrated that the shear capacity and ductility of R/C columns wrapped with tape could be estimated by the combined index of hoop and tape, proposed in this paper.

Keywords : Existing R/C columns, Ductility capacity, Aramid FRP tape, Tape wrapping, Combined index

1. 序

本研究は、せん断補強筋量の不足により脆性的なせん断破壊が想定されるシアスパン比や軸圧の異なる既存鉄筋コンクリート (RC) 柱について、外表面にアラミド繊維テープ (以下、テープ) を螺旋状に巻き付けることにより柱の靱性能の改善を図る研究の一環として行ったものである。本論文では、これらの研究についての実験結果を報告するとともに、RC 柱に対する耐力や靱性能に及ぼすテープの巻き付け効果について検討している。

2. 実験概要

試験体は Fig. 1 に示すように、正負の水平力により試験対象区間 (クリアスパン: L) 中央を反曲点とする逆対称曲げモーメントを受ける柱を想定したものである。試験対象区間は一律に $300\text{mm} \times 300\text{mm}$ の正方形断面とし、四隅はテープの早期の損傷を避けるために面取りがなされており、テープ (テープ幅: $w_T = 37.5\text{mm}$) を所定のあきで螺旋状に密着して巻き付

けるものとした。対象試験体は Table 1 に示すようなシアスパン比や軸圧、既存 RC 部の配筋、テープの巻き付け仕様などの異なる 3 グループ計 21 体である。グループ 1 の AWT05-15R とグループ 2 の B-AKT05R はそれぞれテープを巻き付けていない試験体 NT-15 と B-NT00 の載荷実験終了後にテープを巻き付けたものである。柱両材端部の回転を拘束して相対水平移動を強制する建研式に準じて正負交番の繰り返し載荷をし、グループ 1 とグループ 3 については水平載荷中は水平変形に追従できる油圧ジャッキによって、鉛直荷重を一定に保持するものとした。本実験で使用した鉄筋とテープの力学特性を Table 2 と Table 3 にそれぞれ示す。

3. 実験結果

柱軸圧 $\sigma_0 = 3.81\text{MPa}$ であるグループ 1 とグループ 3 のテープを巻き付けていない試験体 NT-15, N-15, N-30 はいずれも対角線ひび割れが発生し帯筋が降伏した後に耐力が急減した。 $\sigma_0 = 0.0\text{MPa}$ であるグループ 2 のテープを巻き付けていない試験体 B-NT00 は付着割裂によると思われるひび割れが主筋沿いに発生して耐力が低下した。一方、テープの巻き付けられた試験体ではグループやテープの巻き付け量にかかわらず、ひび割れは試験体全域にわたって分散し、最大耐力発現後において柱表面に接着したテープの剝離および材端部のテープの盛り上がりが見られ、それらは部材角の増加とともに激しくなる傾

*1 工学部建築学科教授

*2 工学研究科建築学専攻博士課程前期

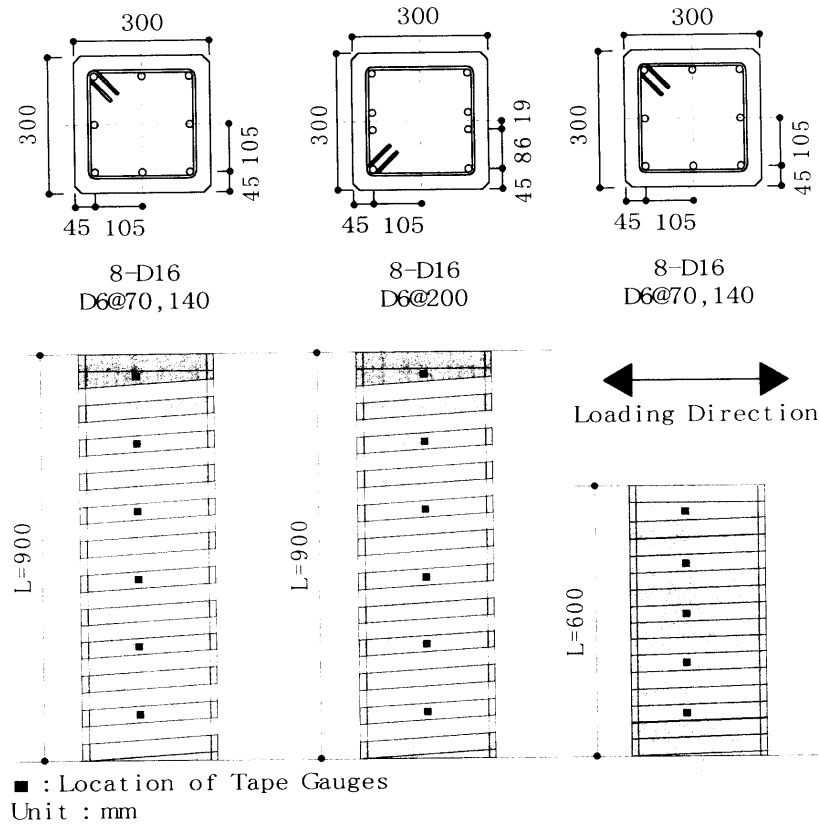


Fig. 1 Test specimen details.

Table 1 List of test specimen details.

Group	Name of Test Specimen	Existing		Shear Span Ratio	Axial Stress (MPa)	Wrapping of Tape		
		p _t (%) * ¹	p _w (%) * ²			Pitch (mm)	Spacing * ³	p _{Tw} (%)
1	NT-15	0.78	0.15	1.5	3.81	-	-	-
	AKT10-15					75.0	1.0 w _T	0.097
	AKT05-15					56.3	0.5 w _T	0.129
	AKT00-15					37.5	0.0 w _T	0.194
	AKT10-30		0.30			75.0	1.0 w _T	0.097
	AKT05-30					56.3	0.5 w _T	0.129
	AWT05-15R					56.3	0.5 w _T	0.130
	ATT05-15		0.15			56.3	0.5 w _T	0.136
	CTT10-15					75.0	1.0 w _T	0.040
	CTT05-15					56.3	0.5 w _T	0.053
2	B-NT00	1.04	0.11	1.5	0	-	-	-
	B-AKT10					75.0	1.0 w _T	0.097
	B-AKT05					56.3	0.5 w _T	0.129
	B-AKT00					37.5	0.0 w _T	0.194
	B-AKT05R					56.3	0.5 w _T	0.129
3	N-15	0.78	0.15	1.0	3.81	-	-	-
	AT10-15					75.0	1.0 w _T	0.097
	AT00-15					37.5	0.0 w _T	0.194
	AT0D-15					37.5	0.0 w _T	0.388
	N-30		0.30			-	-	-
	AT00-30					37.5	0.0 w _T	0.194

-Notes-

*¹ p_t : The flexural reinforcement ratio of longitudinal bars

*² p_w : The shear reinforcement ratio of hoops

*³ w_T : Width of fiber tape (≈ 37.5 mm)

Table 2 Mechanical properties of steel.

Group	Type of Bar	Grade	Area (mm ²)	Modulus of Elasticity (×10 ⁵ MPa)	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)
1	D16	SD295A	199	1.93	351	547
	D6	SD295A	32	1.73	311	540
2	D16	SD345	199	1.81	375	560
	D6	SD345	32	1.87	410	531
3	D16	SD295A	199	1.78	333	492
	D6	SD295A	32	1.82	306	511

Table 3 Mechanical properties of fiber tape.

Type of Fiber Tape	Thickness (mm)	Area (mm ²)	Modulus of Elasticity (×10 ⁵ MPa)	Rupture Strength (MPa)	Elongation (%)
AKT	0.291	10.9	1.30	2480	1.5
AWT	0.292	10.9	1.19	2440	1.7
ATT	0.307	11.5	0.88	2930	2.5
CTT	0.118	4.44	2.52	4230	1.4

向がみられた。グループ3の $p_{rw}=0.097\%$ の試験体AT10-15と $p_{rw}=0.194\%$ の試験体AT00-15を除くテープを巻き付けたすべての試験体において、柱両材端部の引張鉄筋の降伏が確認されたことより破壊モードはすべて曲げ破壊と判定された。AT10-15は試験区間全域にせん断ひび割れが入り帯筋が降伏し、最大耐力発現時に柱頭での圧縮鉄筋のひずみの急増が確認されたことや柱脚部の主筋は引張降伏していないことからせん断圧縮破壊と判定され、AT00-15についても柱中央部の帯筋が降伏し、柱脚部の主筋には引張降伏がみられなかったことからせん断破壊と判定されたが、両試験体とも急激なせん断耐力の低下はみられず靱性的な破壊モードとなった。グループ1のAWT05-15Rを除いてテープの破断や被りコンクリートの剥落は載荷終了時に至るまでみられなかった。Fig. 2に破壊状況図の1例を、Table 4に実験結果を示すが表中の終局時部材角 R_u はFig. 3の実験で得られた水平せん断力と部材角との関係の包絡線上で、最大耐力後、最大耐力の80%に耐力が低下したときを終局点と定義しその時の部材角を表す。また吸収エネルギー量 E_n はこの包絡線と変位軸で囲まれる面積として算出した。

4. テープの補強効果

4.1 最大耐力

Fig. 4に各試験体の最大耐力発現時および終局時におけるテープの最大ひずみを示す。同図中において最大耐力発現時のテープの最大ひずみに着目すると、アラミド繊維テープの場合、 $p_w=0.15\%$ でテープ幅に等しいあきを有するものと1/2のあきを有するもの、また $p_w=0.11\%$ で損傷後にテープを巻き付けたものでは0.6前後の値を示し、あきなしのものはシアスパン比1.0のAT00-15のみが0.7以上の値を示したほかは0.3程度であった。グループ1とグループ3の $p_w=0.30\%$ の試験体はいずれも0.5%以下の値を示した。以上より、最大耐力時のテープの有効ひずみを $\varepsilon_{re}=0.6\%$ と仮定して、帯筋とテープからなる柱の複合せん断補強指標¹⁾を求め、最大耐力との関係をFig. 5に示す。同図中の実線はグループ3のせん断破壊した試験体(□)におけるせん断耐力検討のための修正広沢式によるせん断耐力計算値である。同図より、せん断耐力実験値の増大傾向がほぼ一貫した形に捉えられ、このようなシアスバ

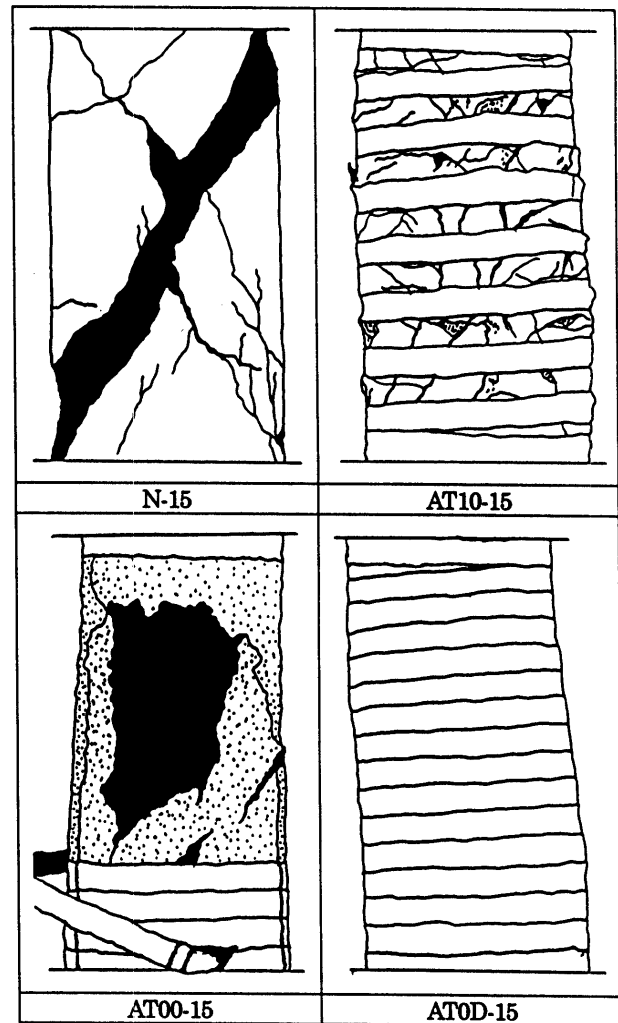


Fig. 2 Final failure patterns (ex. Group3).

ン比1.0の極短柱においても複合補強指標が有効であり、テープの巻き付け量を増すことによって曲げ破壊への移行が可能であることが示された(試験体AT0D-15 AT00-30)。

Table 4 Experimental results.

Group	Name of Test Specimen	Compressive Strength (MPa)	Maximum Capacity (kN)		R_{max}^{*3} ($\times 10^{-3}$ rad)	R_u^{*4} ($\times 10^{-3}$ rad)	E_n^{*5} (kNmm)	Mode of Failure
			Q_{mu}^{*1}	Q_{max}^{*2}				
1	NT-15	21.4	216	227	10	13	1853	Shear
	AKT10-15	20.6	214	237	20	30	4241	Flexural
	AKT05-15	17.5	203	223	20	30	4199	Flexural
	AKT00-15	17.8	206	235	19	40	6390	Flexural
	AKT10-30	17.7	204	232	20	45	7963	Flexural
	AKT05-30	17.0	202	240	28	55	10269	Flexural
	AWT05-15R	19.7	212	240	20	35	6088	Flexural
	ATT05-15	16.5	200	217	9	31	5576	Flexural
	CTT10-15	17.7	204	212	10	26	3876	Flexural
2	NT05-15	17.3	203	202	10	31	5233	Flexural
	B-NT00	20.7	152	138	8	10	643	Shear
	B-AKT10	23.5	154	170	17	51	6699	Flexural
	B-AKT05	24.3	155	169	18	53	6569	Flexural
	B-AKT00	23.0	154	175	20	60	7233	Flexural
3	B-AKT05R	23.8	154	169	20	60	6763	Flexural
	N-15	23.3	318	221	4	9	1721	Shear
	AT10-15	26.3	326	258	10	31	4445	Shear
	AT00-15	23.6	320	280	16	33	4771	Shear
	AT0D-15	24.3	323	318	19	38	6779	Flexural
	N-30	20.0	310	226	9	13	1815	Shear
	AT00-30	27.7	328	321	19	37	6924	Flexural

-Notes-

*1 Q_{mu} : The flexural capacity calculated by the sectional analysis

*2 Q_{max} : The experimental value of maximum capacity

*3 R_{max} : The rotational angle at the maximum capacity

*4 R_u : The rotational angle at the ultimate state

*5 E_n : The absorbed energy

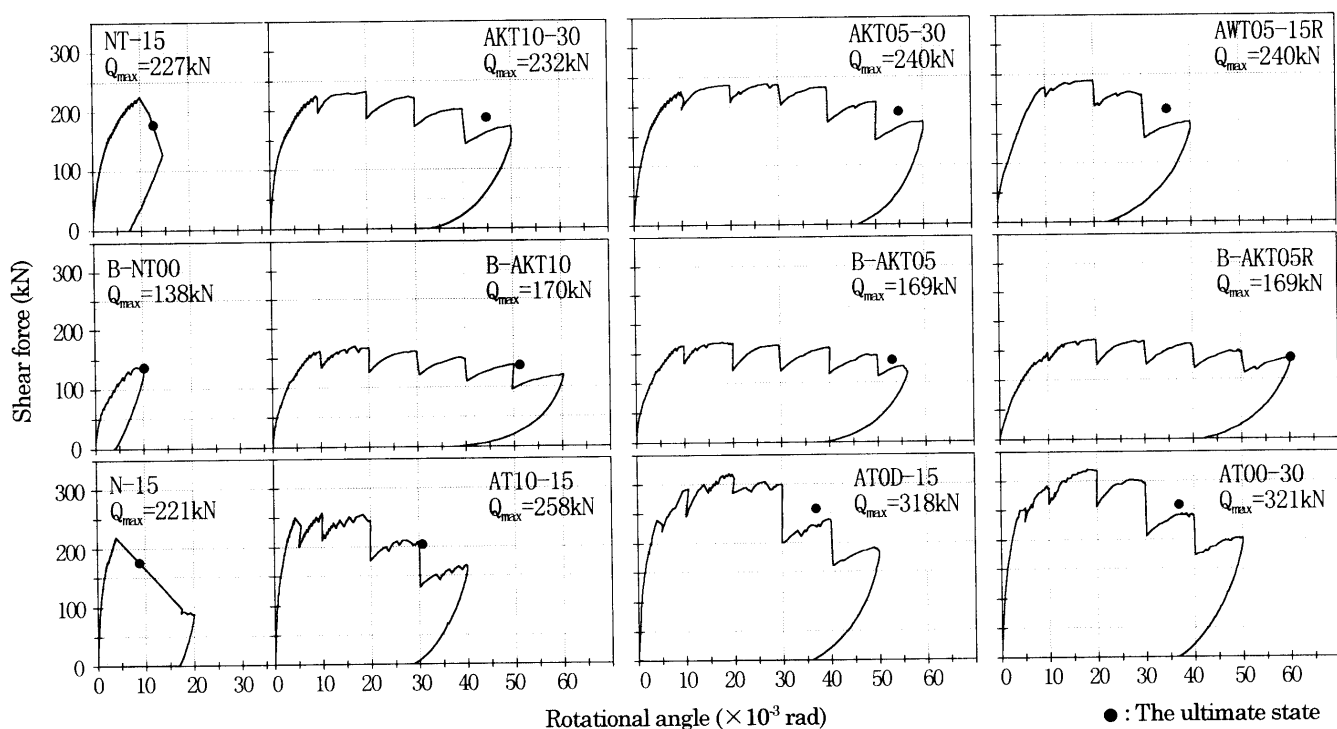


Fig. 3 Envelope curves of load rotational angle.

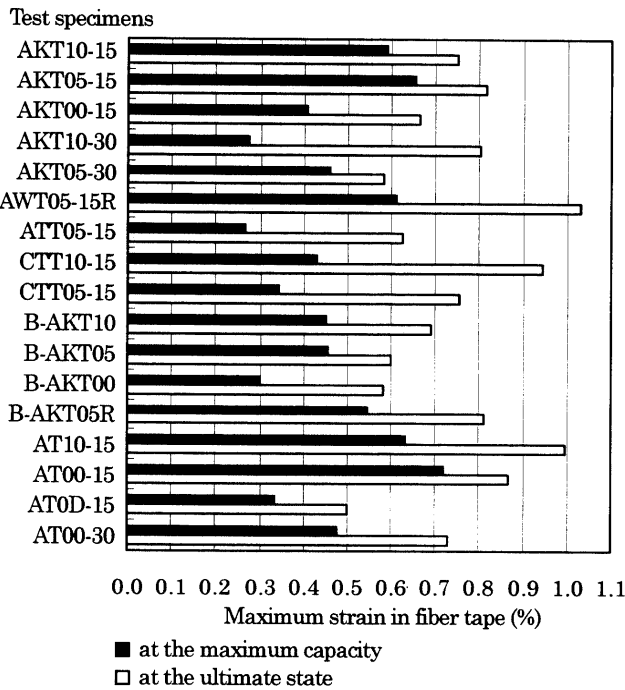
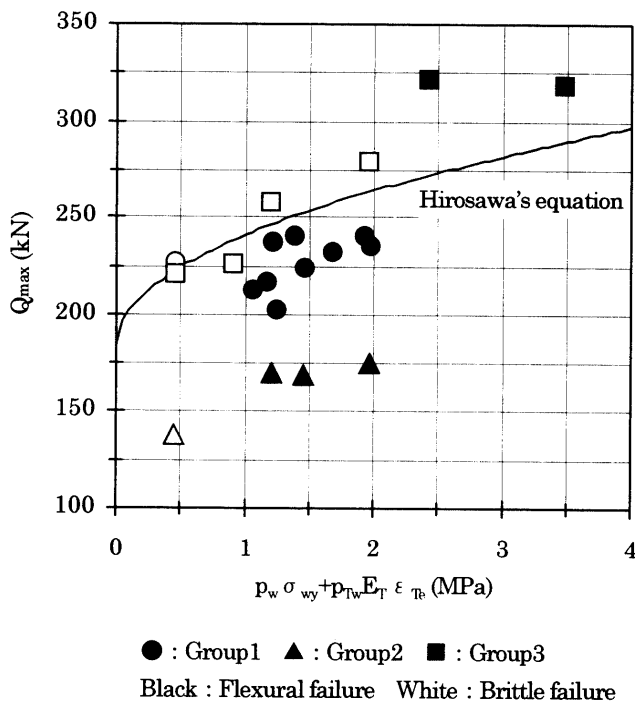
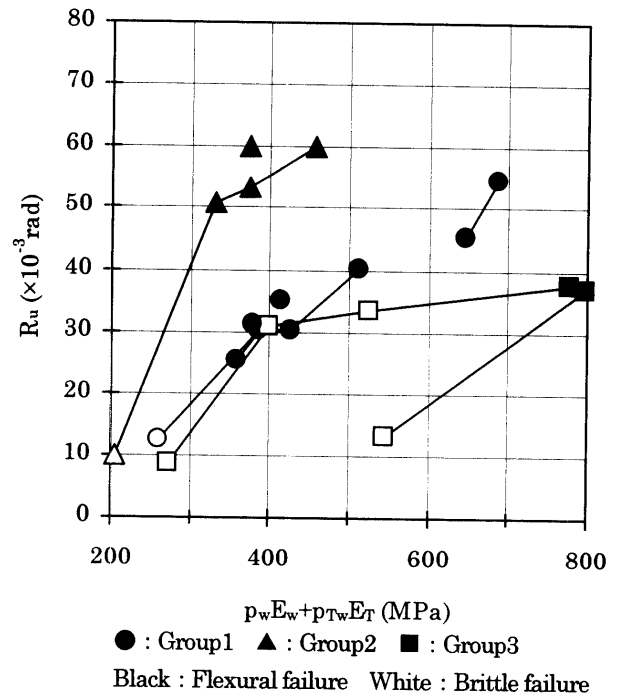
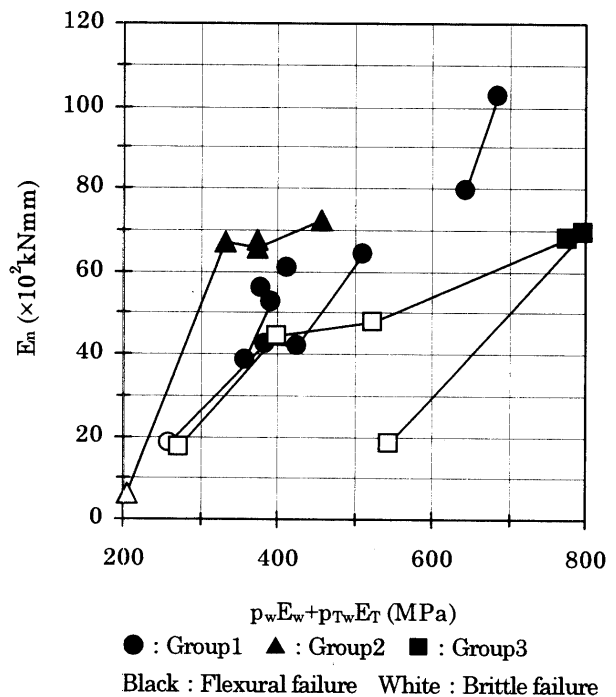


Fig. 4 Maximum strains in fiber tape.


Fig. 5 Relationship between the maximum capacity, Q_{max} and the reinforcing index, $p_w \sigma_{wy} + p_{Tw} E_T \epsilon_{Te}$.

4.2 靱性能

ここでは、各試験体の終局時部材角と吸収エネルギー量に対するテープの補強効果について検討する。鉄筋コンクリート部材の靱性が損なわれる主たる要因はコンクリートの早期の圧縮破壊もしくは付着破壊と考えられ、靱性向上にはコンクリートをどの程度横拘束できるかが大きな問題である。そこで、柱部材のコンクリートの横拘束に貢献するものとして、既存の帯筋と巻き付けられたテープの軸引張剛性に着目して、以下のような検討を行った。ただし、コンクリートを横拘束できる帯筋、


Fig. 6 Relationship between the ultimate rotational angle, R_u and the reinforcing index, $p_w E_w + p_{Tw} E_T$.

Fig. 7 Relationship between the absorbed energy, E_n and the reinforcing index, $p_w E_w + p_{Tw} E_T$.

テープの各々の長さの違いについては無視するものとした。

帯筋とテープからなる複合補剛指標を $p_w E_w + p_{Tw} E_T$ (p_w : 帯筋比, E_w : 帯筋のヤング係数, p_{Tw} : テープ補強比, E_T : テープのヤング係数) として各々の試験体について算出し、終局時部材角 R_u との関係を図 6 に示す。同図では、同一グループにおけるテープ無補強試験体とテープ補強試験体とをテープの巻き付け量の増大順に直線で結んでいる。同図より、 $\sigma_0 = 3.81 \text{ MPa}$ のグループ 1 とグループ 3 はシアスパン比の違いに

よらず、 $p_{rw}=0.097\%$ だけテープを巻き付けることによって $R_u=10\times 10^{-3}\text{rad}$ 前後から $R_u=30\times 10^{-3}\text{rad}$ まで増大し、 $\sigma_0=0.0\text{MPa}$ のグループ 2 については $R_u=10\times 10^{-3}\text{rad}$ から $R_u=50\times 10^{-3}\text{rad}$ と大幅な増大を示した。テープを巻き付けた試験体のみで比較すると、補剛指標が増すに従い R_u がゆるやかに増大する傾向がみられる。また、損傷後にテープを巻き付けた試験体も損傷前に予め同じ p_{rw} だけ巻き付けたもの以上の R_u となり、損傷後のテープ補強についても有効であることが示された。次に、吸収エネルギー量 E_n と複合補剛指標との関係を Fig. 7 に示す。同図でも同一グループにおけるテープ無補強試験体と補強試験体とをテープの巻き付け量の増大順に直線で結んでいる。同図より、 $p_{rw}=0.097\%$ だけテープを巻き付けることによってグループ 2 では約 7 倍、グループ 1 とグループ 3 の $p_w=0.15\%$ では約 2 倍エネルギーが増大し、この補剛指標によって各グループ（同一曲げ耐力計算値）別に着目すると補剛指標と共にエネルギーも増大する傾向にあることが示された。以上より、テープと既存の帯筋量を複合したこのような補剛指標が靱性能の評価に有効であると考えられる。

5. まとめ

既存 RC 柱に対してアラミド繊維テープを巻き付け接着することにより靱性能を向上させる効果を実験的に検討し、本研究の範囲で以下の知見が得られた。

- (1) シアスパン比 1.5 の柱ではテープで補強することにより曲げ降伏を先行させ柱の靱性能を大幅に改善できる。
- (2) シアスパン比 1.0 の極短柱では、結果的に曲げ降伏先行

に至らない場合でも、テープを巻き付けることにより急激なせん断耐力の低下が抑制されて、変形能力のある靱性的な破壊モードとすることが可能である。また、本実験の範囲では、巻き付け量をさらに増すことにより曲げ降伏を先行させることができることも示された。

(3) 損傷後にテープを巻き付けた試験体も損傷前に予め同じだけテープを巻き付けたものと同等の靱性能を示した。

(4) テープは被りコンクリートの剥落防止に有効である。

(5) テープを巻き付けた柱のせん断耐力や靱性能は本論によって提示された帯筋とテープからなる複合指標によって評価することができる。

謝辞 本研究に御協力頂いた三井建設㈱、ショーボンド建設㈱、および平成 8、9、10 年度東海大学永坂研究室卒業研究生、同大学院生に対し深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 永坂具也ほか：連続繊維テープによる既存 RC 柱のせん断補強に関する実験的研究（その 1）（その 2），日本建築学会学術講演梗概集 C 2 構造 IV，pp. 287-290，1996.9
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説，1990
- 3) 日本建築学会・新素材ファイバー補強構造小委員会：連続繊維補強材のコンクリート構造への応用，日本建築学会大会構造部門・パネルディスカッション資料，1998.9
- 4) 日本コンクリート工学協会・連続繊維補強コンクリート研究委員会：連続繊維補強コンクリートに関するシンポジウム論文集，1998.5