

論文 ラッシングベルトで横拘束したせん断損傷RC柱に関する実験的研究

中田 幸造*1・新垣 辰二*2・Karwand Homayoon*3・Noori Mohammad Zahid*3

要旨: 本研究では、せん断損傷RC柱の応急補強にラッシングベルトの能動拘束を活用するが、柱の断面が大きくなるとベルトによる能動側圧は小さくなる。そこで、低緊張ラッシングベルトとエポキシ樹脂補修を組み合わせることでせん断損傷RC柱への応急補強の効果を検証した。本研究では、水平加力実験により応急補強RC柱の水平耐力と靱性を、万能試験機による圧縮試験により応急補強RC柱の鉛直荷重支持能力を検証する。水平加力実験の結果、低緊張ラッシングベルトとエポキシ樹脂補修を施したせん断損傷RC柱は曲げ破壊し、鉛直荷重支持能力は無損傷RC柱の64%まで回復することを明らかにした。

キーワード: プレストレス, 応急補強, ラッシングベルト, アラミド繊維, エポキシ樹脂

1. はじめに

RC柱を対象とした耐震補強法は、鋼板や連続繊維シート巻きなど補強材の受動的な補強効果に期待するものがほとんどである。その中で、緊張PC鋼棒による靱性型耐震補強法¹⁾は、RC柱を能動的に横拘束できる点が他の耐震補強法と異なる。これまでの実験によると、外帯筋状に設置したPC鋼棒によりRC柱を能動的に横拘束すれば圧縮強度が上昇し、圧縮靱性が改善され²⁾、また、PC鋼棒による能動拘束によりせん断強度も増大する³⁾。一方、PC鋼棒の緊張力がRC柱を外部から締め付けることに着目すれば、地震で被災したRC柱の斜めひび割れ等を閉じさせることも可能であり、この能動拘束はせん断損傷RC柱への応急補強にも活用できる⁴⁾。そこで、著者らは取り扱いやすいラッシングベルト(荷締め具)を損傷RC柱への応急補強材として選定し、せん断損傷RC柱に巻き付け、能動側圧を導入し、水平加力実験によりその応急補強の効果を検証してきた。実験の結果、せん断損傷RC柱にラッシングベルトを用いて大きな能動側圧を導入すると補強後のRC柱は曲げ降伏し、靱性に優れた履歴性状を示した⁵⁾。これは、せん断損傷によってバラバラになったコンクリートが能動拘束により再一体化に近づき、また、ラッシングベルトがせん断補強効果を発揮したためと考えられる。

本研究の目的は、実際の柱への適用を想定して、小さい緊張力を導入したラッシングベルトによる応急補強の効果(曲げせん断性能と圧縮性能)を検証することである。RC柱に導入される能動側圧は、柱断面サイズが大きくなれば小さくなる。能動側圧が小さくなると、RC柱の斜めひび割れ等が閉合しないため、補強後の鉛直荷重支持能力や水平耐力・靱性などが回復し難くなることが考

えられる。そのため、本応急補強法にエポキシ樹脂補修を併用することで、斜めひび割れ等をあらかじめ埋め、能動側圧の役割の一つであるコンクリートの再一体化を補うことを試みる。本論文の前段ではラッシングベルトで応急補強されたせん断損傷RC柱の水平加力実験の結果を、後段でその圧縮実験の結果について述べる。

2. 水平加力実験の計画

試験体一覧をTable 1に、試験体に用いた材料の機械的性質をTable 2にそれぞれ示す。試験体は1辺が250mmの正方形断面(1/2.4の縮尺)、柱高さ500mm、せん断スパン比1.0の極短柱である。主筋はD10を12本使用し($p_g=1.36\%$)、帯筋は 3.7ϕ を105mm間隔で配筋した($p_w=0.08\%$)。補強の方法は、せん断損傷した(あるいは

Table 1 Details of column specimens

Specimen	ER13S-6L	ER13S-6L	ER13S-6Le
Elevation and cross section			
Aramid fiber belt	$t=0.572\text{mm}, w=50\text{mm}, A_a=28.6\text{mm}^2$		
Damage level (Max crack width)	-	IV (4.0 mm)	IV (5.0 mm)
Initial strain of fiber reinf. (Initial force)	755 μ (5.1 kN)	744 μ (5.0 kN)	755 μ (5.1 kN)
σ_B	25.5MPa		
σ_r	0.65 MPa	0.64 MPa	0.65 MPa
With or without of epoxy resin	-	Without epoxy resin	With epoxy resin
Common details	$M/(VD)=1.0, N/(bD\sigma_B)=0.2$, Rebar: 12-D10 ($p_g=1.36\%$), Hoop: $3.7\phi@105$ ($p_w=0.08\%$).		

Notes: t = thickness of belt, w = width of belt, A_a = cross section of belt, σ_B = compressive strength of concrete cylinder, σ_r = lateral confining pressure, $M/(VD)$ = shear span-to-depth ratio, $N/(bD\sigma_B)$ = axial force ratio.

*1 琉球大学 工学部環境建設工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 (株)構造FACTORY 修士(工学)

*3 国際協力機構PEACEプロジェクト元研修員 修士(工学)

Table 2 Mechanical properties of materials

Reinforcement		a (mm ²)	σ_y, σ_u^* (MPa)	E (GPa)
Rebar	D10	71	389	175
Hoop	3.7 ϕ	11	334	205
Hoop	D6	32	479	180
Aramid fiber belt	t = 0.572mm	28.6	2060*	118

Notes : a = cross sectional area, σ_y = yield strength of steel, σ_u = ultimate strength of fiber reinf., E = Young's modulus of elasticity.

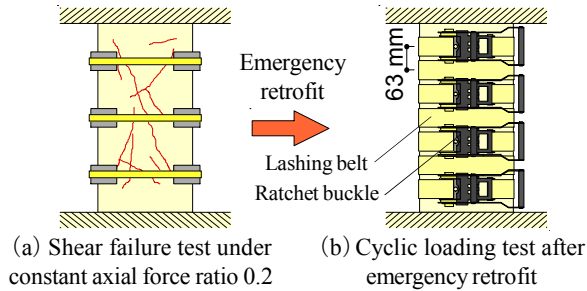


Fig. 1 Procedure of loading test

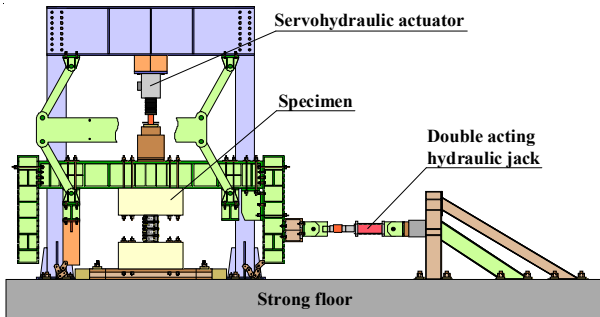


Fig. 2 Test setup

無損傷の) RC柱試験体の4隅を半径20mmで面取りを行い、グリースを塗布し、その上からラッシングベルトを巻き付けた。ラッシングベルトは、アラミド繊維ベルト(幅50mm)とラチェットバックルから構成され、ベルトの自由端をバックルに通してレバーを回転させることで張力が導入できる。柱のウェブ面に位置するベルトの長さ方向中央部にエポキシ樹脂硬化部を製作し、ひずみゲージを貼付することでベルトのひずみを測定した。

試験体総数は3体である。ER13S-6L' (以後、ER13S-は省略) は、ラッシングベルトのせん断補強効果を検証するために無損傷のRC柱に補強を施した試験体であり、補強間隔やラッシングベルトの緊張ひずみは6L, 6Leと同様である。試験体6Lはせん断損傷RC柱(最大残留ひび割れ幅:4.0mm, 損傷レベルIV⁶⁾)にラッシングベルトによる補強を施した試験体である。ラッシングベルトの補強間隔は63mm, 緊張ひずみを約700 μ とし、式(1)による能動側圧 σ_r が0.6MPa程度になるように調整した。

$$\sigma_r = (2_a a) / (b \cdot s) \cdot A E \cdot \varepsilon_{pt} \quad (1)$$

ここで、 a : アラミド繊維ベルトの断面積(2層, 57.2mm²), b : 柱幅, s : ラッシングベルトの間隔, $A E$: アラミド繊維のヤング係数, ε_{pt} : 初期緊張ひずみ。

能動側圧 σ_r は、実際の柱断面への補強を想定し、小さ

な値を設定している(柱断面600×600mm, 補強間隔63mm, 緊張ひずみ1800 μ)。試験体6Leは、せん断損傷RC柱(最大残留ひび割れ幅:5.0mm, 損傷レベルIV⁶⁾)に試験体6Lと同様の補強を施しているが、エポキシ樹脂補修を併用している点が異なる。能動側圧が小さいとせん断ひび割れが閉合し難く、換言すればせん断損傷でバラバラになったコンクリートの再一体化が難しく、ひび割れ閉合効果を補うためエポキシ樹脂注入を行っている。試験体6Lと6Leの実験手順をFig. 1に示す。実験では、RC柱が地震でせん断損傷したことを想定するため、健全なRC柱試験体を軸力比0.2の一定軸力下でせん断損傷させた(Fig. 1(a))。せん断損傷実験では、RC柱に与える損傷レベルを制御するため、アラミド繊維ベルト(2ply)を150mm間隔(3段)で配置して水平加力を行い、目標の損傷レベルIV⁶⁾に達した時点で加力を終了した。この際、残留水平変位と軸力はゼロに戻した。RC柱隅角部の面取り後、試験体6Lはラッシングベルトで補強を施し、軸力比0.2の下で再び水平加力実験を行った。試験体6Leについては、2液混合型の低粘度エポキシ樹脂を低圧注入し、約2日後にラッシングベルトで補強を施し、6Lと同様に水平加力実験を行った。水平加力実験は、Fig. 2に示す装置により、一定軸力の下(軸力比0.2)、部材角 $R=0.125\%$, 0.25% 、を各1回、 $0.5\% \sim 3.0\%$ を0.5%の増分で各2回繰り返した。

3. 水平加力実験の結果

3.1 ER13S-6L' の実験結果

Fig. 3に試験体6L'の水平荷重 V -部材角 R 関係、実験終了後のひび割れ図(ウェブ面)を示す。Fig. 3にはシリンダー強度による多段配筋柱の曲げ強度計算値⁷⁾を破線で、アラミドベルトを考慮した修正荒川mean式によるせん断強度計算値⁸⁾を実線で示した。Fig. 3より、試験体6L'は、 $R=1.5\%$ で隅主筋が引張降伏した。 $R=1.5\%$ の負側1回目で負側の最大水平耐力228kN、 $R=2.0\%$ の1回目で正側の最大水平耐力232kNに到達した。Fig. 3のように、正負最大水平耐力ともにシリンダー強度による曲げ強度計算値に達したことから、試験体6L'は曲げ破壊し、ラッ

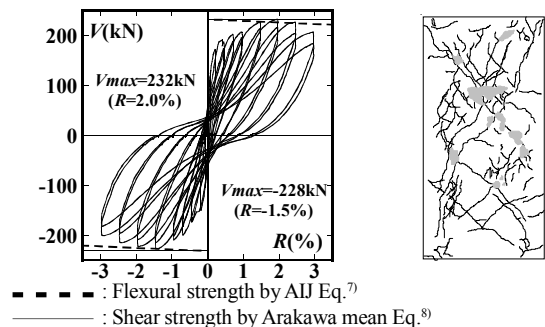
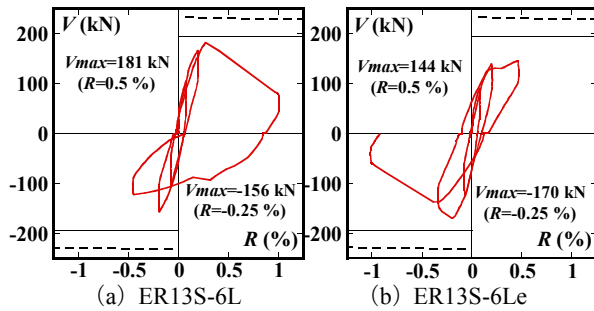


Fig. 3 V-R relationship and crack pattern after test

シングベルトのせん断補強効果を確認できたと言える。

3.2 6L および 6Le のせん断損傷実験の結果

せん断損傷実験による水平荷重 V -部材角 R 関係を Fig. 4 に、実験終了後のひび割れ図 (ウェブ面)、損傷レベル、最大残留ひび割れ幅を Table 3 に示す。Fig. 4 には、シリンダー強度による多段配筋柱の曲げ強度計算値⁷⁾ を破線で、アラミド繊維ベルトを考慮した修正荒川mean式によるせん断強度計算値⁸⁾ を実線で示した。2 試験体とも部材角 0.5% までに大きな耐力低下を伴うせん断ひび割れが発生した。6L 試験体の最大水平耐力はせん断強度計算値の 93%、6Le 試験体は 87% であった。損傷レベルは日本建築防災協会の判定基準⁶⁾ に基づき、柱せん断面の斜めひび割れ幅等により総合的に評価した。その結果、2 試験体とも損傷レベル IV に該当するが、損傷程度は必ずしも同等ではない。なお、2 試験体とも主筋の座屈は確認されなかった。



--- : Flexural strength by AIJ Eq.⁷⁾
 — : Shear strength by Arakawa mean Eq.⁸⁾

Fig. 4 Measured V - R relationships of shear-damaged RC columns

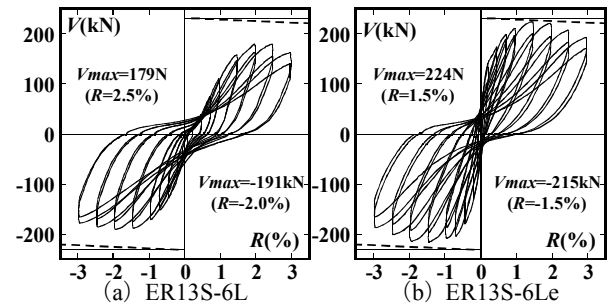
3.3 応急補強した RC 柱の水平加力実験結果

せん断損傷 RC 柱をラッシングベルトで応急補強した試験体 6L と 6Le の水平荷重 V -部材角 R 関係を Fig. 5 に、実験終了後のひび割れ図を Table 3 に示す。Fig. 5 (a) より、試験体 6L の初期剛性は低く、最大水平耐力はシリンダー強度による曲げ強度計算値よりかなり低い。試験体 6L の水平耐力が小さくなったのは、ベルトによる能動側圧が小さく、せん断損傷 RC 柱の斜めひび割れが閉じていないためである。なお、図示していないが、柱の平均軸ひずみは圧縮側に進行していた。ベルトでの補強により変形能力はあるが、試験体 6L は斜めひび割れが閉じていないため、破壊モードはせん断であると言える。Fig. 5 (b) より、エポキシ樹脂補修を併用した試験体 6Le は、6L に比べて初期剛性は大きく改善し、かつ、最大水平耐力は正側 224kN、負側 215kN を記録した。柱脚の隅主筋が引張降伏を示しており、最大水平耐力はシリンダー強度による曲げ強度計算値近傍まで回復した。試験体 6Le は曲げ破壊したと考えられる。このことから、低緊張力ラッシングベルトは「せん断補強効果」、エポキシ樹脂補

Table 3 Observed cracking patterns after test

ER13S-6L		ER13S-6Le	
After shear failure test	After EMG retrofit test	After shear failure test	After EMG retrofit test
IV (4.0 mm)		IV (5.0mm)	

Notes: EMG = Emergency, IV = damage level⁶⁾, () = max. crack width (depth side).



--- : Flexural strength by AIJ Eq.⁷⁾
 — : Shear strength by Arakawa mean Eq.⁸⁾

Fig. 5 Measured V - R relationships of emergency retrofitted specimens

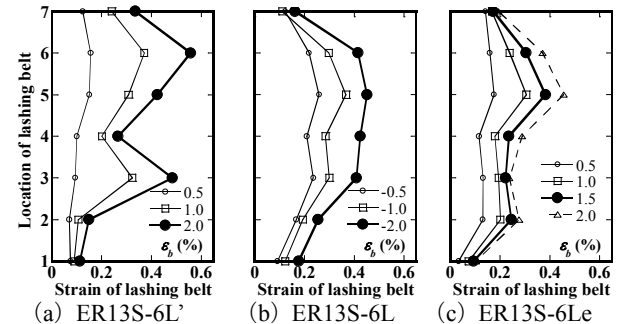


Fig. 6 Strain of lashing belt

修は「コンクリートの再一体化」という役割分担を確認できたと考ええる。

Fig. 6 はベルトのひずみであり、応急補強試験体 6L、6Le に加えて、比較のために無損傷補強試験体 6L' も示した。最大水平耐力を記録した加力方向のみを示しており、また、図中の黒丸と太線が最大水平耐力時のベルトのひずみである。Fig. 6 より、試験体 6L' のベルトひずみ増分は主にせん断補強効果であり、6L では柱の平均軸ひずみが圧縮側に大きく進行していたことから、主に横拘束効果が表れていると考える。一方、曲げ破壊した試験体 6Le のベルトひずみは、無損傷柱 6L' よりやや小さい。これは注入したエポキシ樹脂が引張抵抗に寄与したことも考えられるが、検証は今後の課題である。

4. 圧縮実験の計画

せん断損傷RC柱に補修・補強を行うことで鉛直荷重支持能力がどの程度回復するのかを検証するため、圧縮実験を計画した。Table 4 に試験体一覧と実験結果、Fig. 7 に柱試験体を示す。本研究ではRC柱へのせん断損傷導入後、万能試験機で圧縮試験を行うため、RCの加力スタブとRC柱試験体を分離できるようにこれらを別々に製作した。柱試験体は1辺が250mmの正方形断面で(1/2.4の縮尺)、RC柱の全高さは900mmである。柱の試験区間は500mm(せん断スパン比1.0)とし、試験区間以外の上下それぞれ200mmには帯筋(D6)を密に配筋した(Fig. 7)。RC柱にはD10主筋を12本使用し($p_g=1.36\%$)、試験区間(500mm)には 3.7ϕ の帯筋を105mm間隔で配筋した($p_w=0.08\%$)。材料の機械的性質はTable 2 に示されている。Fig. 8 に加力方法と実験手順を示す。全高さ900mmのRC柱試験体の上下に幅250mm×せい250mm×高さ300mmの鉄骨ブロックを連結し、加力スタブとともに建研式加力装置にセットした(Fig. 8)。鉄骨ブロックを取付けたのは、万能試験機に設置可能な試験体最大高さは1100mmであり、一方で建研式加力装置にセットするには1500mmの全高さが必要だったためである。建研式加力装置への取付けでは、鉄骨ブロックと柱試験体表面のスタブ接触面にエポキシ樹脂を塗布し、さらに鉄骨ブロックと柱試験体、および加力スタブを直径26mmのPC鋼棒で緊結し、スタブと柱試験体の一体性を図った(Fig. 8 (b))。建研式加力装置を用いたせん断損傷実験(軸力比0.2)では、RC柱のせん断破壊を制御するため、アラミド繊維ベルト(2ply)を4段配置して水平加力を行った。導入した損傷レベルは、2章で述べた試験体と同じIVである。せん断損傷後、残留水平変位はできるだけゼロに戻したが、損傷が大きく、水平変位が残留した(Table 4)。せん断損傷実験後、低粘度エポキシ樹脂補修を3体に適用した。

実験に際し、試験体の端部は試験区間と同様にベルトで補強した。補強では、柱の隅角部を半径20mmで削り、油を塗布してラッシングベルトを柱表面に直接巻きつけ

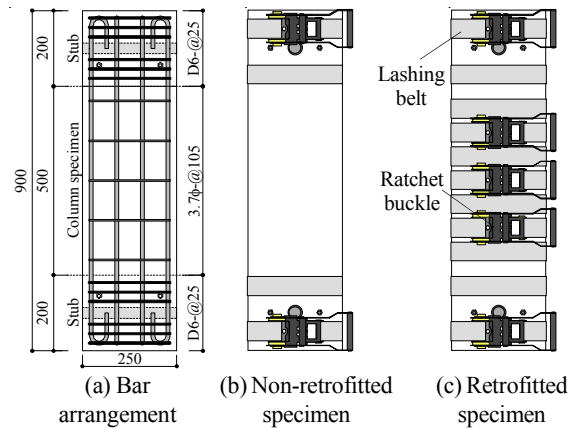
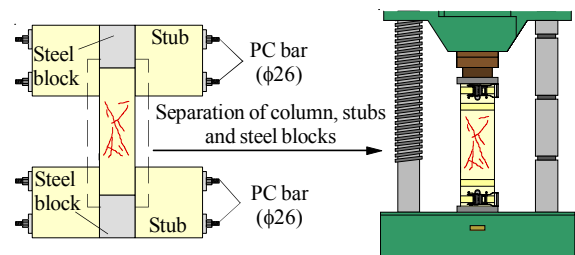
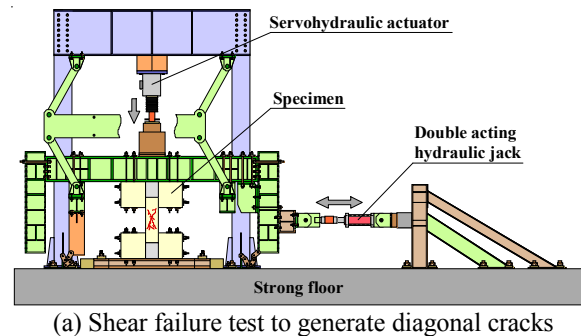


Fig. 7 Column specimen [unit: mm]



(b) Arrangement of parts (c) Axial compression test
Fig. 8 Test setup and loading procedure

た。ラッシングベルトは2章で述べたものと同じである。実験変数は、エポキシ樹脂補修の有無、ラッシングベルトでの横拘束の有無である。柱試験体に導入した能動側圧は、2章の試験体とほぼ同様である。圧縮ひずみは、載荷板間(900mm)とスタブ間(700mm)の2か所を計8本の変位計で測定した(Fig. 9)。

Table 4 Details of axial compressive specimens

No.	Specimen (AC13-)	σ_B (MPa)	Damage level	W_{cr} (mm)	R_r (%)	Epoxy resin	A^S (mm)	ϵ_{pt} (μ)	σ_r (MPa)	N_{max} (kN)	N_{max}/N_0
1	D4-1	21.2	IV	5.0	0.50	-	-	-	-	384	0.25
2	D4-2			3.5	0.75					455	0.30
3	D4e-1			3.5	0.55					apply	1011
4	N1	26.5	-	-	-	-	63	800	0.69	1849	-
5	N2									1785	-
6	6L'									1930	1.06
7	6LD4									1319	0.73
8	6LD4e									1167	0.64
9	D4e-2									1613	0.89

Notes: W_{cr} = residual crack width after shear failure test, R_r = residual drift angle, A^S = interval of lashing belt, ϵ_{pt} =initial strain of lashing belt, σ_r = lateral confining pressure, N_{max} = max. axial load, N_0 = max. axial load of non-damaged RC column.

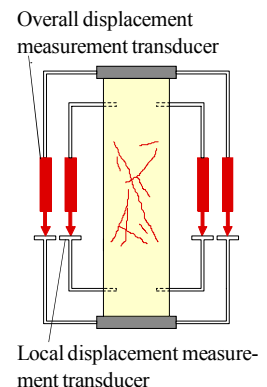


Fig. 9 Axial strain measurement setup


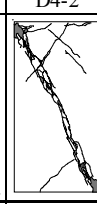


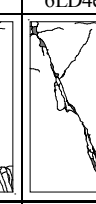

5. 圧縮実験の結果

5.1 セン断損傷 RC 柱の圧縮軸力 - 圧縮ひずみ関係

せん断損傷実験で得られた試験区間のひび割れ図, 最大残留ひび割れ幅, 損傷レベルを **Table 5** に示す。せん断損傷実験では損傷の導入には成功したが, 水平変位の計測に課題が残ったため, せん断損傷実験の結果は **Table 5** のみを示した。実験終了時に主筋の座屈は確認されなかった。 **Fig. 10** はせん断損傷 RC 柱, エポキシ樹脂で補修したせん断損傷 RC 柱, および無損傷 RC 柱の圧縮軸力 - 圧縮ひずみ関係である。 **Fig. 10** において, 無損傷 RC 柱 N1 の軸力は, それ自身の最大圧縮軸力 N_0 で無次元化した。 D4-1, D4-2, D4e-1, および D4e-2 の軸力は, N_0 を $N_0 = N_s + N_c$ (N_s : 主筋の降伏軸力, N_c : $0.89\sigma_b^0$) によるコンクリートの負担軸力) で求め, これで無次元化した。試験体 D4-1, D4-2 は, 斜めひび割れに沿って圧縮ひずみが進行した。ゲージから判断すると, $0.2N_0$ (330kN 前後) での剛性低下は斜めひび割れ部の柱頭柱脚の主筋が降伏し (主筋の降伏軸力 331kN), 座屈したからと考える。最大圧縮軸力は $0.25 \sim 0.3N_0$ であり, その後, 軸力は緩やかに低下した。実験終了後には斜めひび割れ部の主筋が座屈していた。

エポキシ樹脂補修を行った D4e-1, D4e-2 より, 圧縮軸力は $0.67N_0$, $0.89N_0$ まで回復し, せん断損傷 RC 柱の残存軸耐力に比べて 2.7 ~ 3.0 倍となった。加えて, 軸剛性も大きく回復した。試験体 D4e-1 では, 一度軸力が低下した後, 再び軸力が増加した。これは, 最初のピークでエポキシ樹脂接着が一部壊れ, 主筋が降伏し 2 回目のピーク時では座屈したことが考えられる。それに対し, 圧縮

Table 5 Observed cracking patterns after shear failure test

After shear failure test					
D4-1	D4-2	D4e-1	6LD4	6LD4e	D4e-2
					
IV (5.0mm)	IV (3.5mm)	IV (3.5mm)	IV (4.0mm)	IV (5.0mm)	IV (5.0mm)

Notes: IV = damage level⁶⁾, () = max. crack width (depth side).

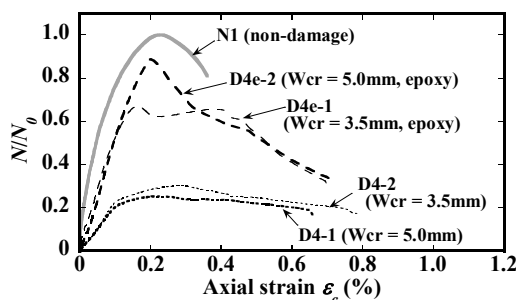


Fig. 10 N/N_0 versus ϵ_c of damaged columns

軸力が大きい D4e-2 (D4e-2 の最大残留ひび割れ幅は 5mm, D4e-1 のそれは 3.5mm であり, D4e-2 の損傷度がやや大きい) は最大圧縮軸力時に柱頭柱脚のゲージが一樣に圧縮降伏を示していた。このことから, エポキシ樹脂の充填が良好だったために大きな圧縮軸力を発揮できたと考えられる。

5.2 横拘束損傷 RC 柱の圧縮軸力 - 圧縮ひずみ関係

Fig. 11 は, ラッシングベルトで横拘束したせん断損傷 RC 柱の実験結果である。試験体 6LD4 はラッシングベルトによる横拘束のみ, 6LD4e はラッシングベルトによる横拘束に加えて斜めひび割れをエポキシ樹脂補修した。6L' は無損傷 RC 柱にラッシングベルトを適用した。なお, 安全のため, 圧縮荷重はバックルの破断が発生する前に終了した。 **Fig. 11** より, 試験体 6LD4 は圧縮ひずみの進行とともにラッシングベルトのひずみが増加し, 受動的な横拘束効果によって軸力が漸増した。 **Fig. 5** (a) において, 試験体 6L (**Fig. 11** では 6LD4 に対応) の初期剛性が低く, 最大水平耐力時部材角が大きいのは, **Fig. 11** に示す試験体 6LD4 (**Fig. 5** では 6L に対応) の軸力漸増型の圧縮性状によるものと類推できる。一方, 6LD4e は軸剛性が大きく回復し, D4e-1 と同様に一旦圧縮軸力が低下したものの, ラッシングベルトの受動的横拘束効果により軸力が漸増したが, 圧縮ひずみ 0.6% 以降は軸力増加と低下を繰り返した。ラッシングベルトのひずみも同様の傾向にあったため, ラチェットバックルに何らかの損傷が発生したことが考えられる。6LD4e の能動側圧は小さく, かつ最大圧縮軸力時のベルトひずみ増分も小さいため, 最大圧縮軸力には主にエポキシ樹脂補修効果が表れたものと考えられる。ラッシングベルトによる能動側圧が小さい場合は, エポキシ樹脂補修を併用することで軸剛性や最大圧縮軸力, および最大圧縮軸力発揮時の圧縮ひずみを改善できると言える。

5.3 補修補強されたコンクリートの圧縮強度

せん断損傷 RC 柱や補修・補強された RC 柱の見かけのコンクリート強度を検証するため, 実験で得られた最大軸力を用いて圧縮試験体のコンクリート強度を推定した。ただし, 試験体 6LD4 の圧縮軸力は漸増していることから (**Fig. 11**), 6LD4 では, 無損傷 RC 柱 N1, N2 の最大軸

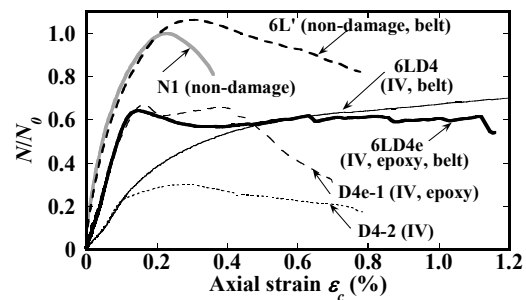


Fig. 11 N/N_0 versus ϵ_c of retrofitted-damaged columns

Table 6 Compressive stress of axial compression specimens

No.	Specimen (AC13-)	σ_B (MPa)	DL	N_{max} (kN)	N_s (kN)	N_c (kN)	$\frac{N_s}{N_{max}}$	σ_B' (MPa)	$\frac{\sigma_B'}{\sigma_B}$
1	D4-1	21.2	IV	384	331	53	0.86	0.8	0.04
2	D4-2			455	331	124	0.73	2.0	0.09
3	D4e-1			1011	331	680	0.33	10.9	0.51
4	N1	26.5	-	1849	331	1518	0.18	24.3	0.92
5	N2			1785	331	1454	0.19	23.3	0.88
6	6L'			1930	331	1599	0.17	25.6	0.97
7	6LD4			736	331	405	0.45	6.5	0.24
8	6LD4e			1167	331	836	0.28	13.4	0.50
9	D4e-2			1613	331	1282	0.21	20.5	0.77

Notes: DL = damage level, N_s = yield load of steel reinf., N_c = axial load capacity of concrete, σ_B' = compressive strength of damaged or recovered concrete.

Table 7 Comparison of test and calculated lateral strength

No.	Specimen (ER13S-)	σ_B (MPa)	$\frac{\sigma_B'}{\sigma_B}$	σ_B (MPa)	V_{max} (kN)	Q_{mu} (kN)	Q_{su} (kN)	$\frac{V_{max}}{Q_{cal}}$
1	6L'	25.5	0.97	24.6	232	231	-	1.00
2	6L		0.24	6.2	191	-	169	1.13
3	6Le		0.50	12.9	224	191	-	1.17

Notes: Q_{mu} = flexural strength⁷⁾, Q_{su} = shear strength⁸⁾, Q_{cal} = Q_{mu} or Q_{su} .

力時ひずみの平均値0.22%時の軸力(736kN)を用いることとした。なお、試験体6LD4のような圧縮性状における軸力の評価は、今後の検討課題である。コンクリートの負担軸力を求める際には、最大圧縮軸力時に主筋は圧縮降伏しているものと仮定した。コンクリートの圧縮応力度は、コンクリートの負担軸力を柱の全断面積で除して求めた。その結果を **Table 6** に示す。せん断損傷 RC 柱 (D4-1, D4-2) では、最大圧縮軸力 N_{max} に占める主筋の負担軸力 (N_s/N_{max}) が大きく、コンクリートの負担圧縮応力度 (σ_B'/σ_B) はシリンダー強度の 4~9% である。補修試験体 (D4e-1, D4e-2) のコンクリート圧縮応力度は、シリンダー強度の 51~77% となり、補強のみの試験体 6LD4 のそれは 24% と小さく、補修・補強を施した 6LD4e では 50% まで回復する結果が本実験では得られた。次に、**Table 6** に示す圧縮試験体 6L', 6LD4, 6LD4e の圧縮応力度の比 σ_B'/σ_B を用いて、これらの試験体に対応する曲げせん断試験体 (**Table 1**) の終局強度の計算を試みた。その結果を **Table 7** に示す。曲げ強度計算値 Q_{mu} は多段配筋柱の略算式⁷⁾ を用い、せん断強度計算値 Q_{su} については、今後の検証が必要であるが、修正荒川 mean 式⁸⁾ を準用した。**Table 7** より、無損傷柱試験体 6L' の V_{max}/Q_{cal} は 1.00、応急補強試験体 6L と 6Le は 1.13, 1.17 となり、計算結果は実験結果を安全側に評価する結果を得た。

6. 結論

- (1) ラッシングベルトによる低い能動側圧で応急補強を行う場合、エポキシ樹脂補修を併用してひび割れを埋めておくことで、応急補強後の RC 柱は曲げ挙動を示した。
- (2) せん断損傷 RC 柱の圧縮実験の結果、損傷レベル IV のコンクリート負担圧縮応力度はシリンダー強度の 10%

以下となり、エポキシ樹脂補修を行うとコンクリート負担圧縮応力度は 51~77% まで回復した。

- (3) せん断損傷 RC 柱を低緊張ラッシングベルトのみで補強した場合は、ベルトの受動的な横拘束効果により圧縮ひずみの進行とともに軸力が漸増する結果となったが、エポキシ樹脂補修を併用すると、軸剛性が大きく回復し、鉛直荷重支持能力は無損傷 RC 柱の 64%、コンクリートの負担圧縮応力度はシリンダー強度の 50% まで回復する結果が得られた。

謝辞

本研究では、砂川恒雄 琉球大学技術職員、大学院生 幸地優明の尽力を頂いた。また、アラミド繊維ベルトはファイベックス (株) に提供頂いた。ここに記して深く感謝致します。

参考文献

- (1) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: PC 鋼棒にプレストレスを導入して外帯筋状に耐震補強した RC 柱の性能と設計, 日本建築学会構造系論文集, 第 537 号, pp.107-113, 2000.
- (2) 中田幸造, 日高桃子, 古川照, 山川哲雄, 崎野健治: 緊張力を導入した PC 鋼棒により外部横補強された鉄筋コンクリート柱の応力ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 600 号, pp.147-153, 2006.2
- (3) 中田幸造, 山川哲雄, 船木裕之, 森下陽一: 緊張 PC 鋼棒で能動拘束された RC 柱のせん断強度に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 133-138, 2009.7
- (4) 山川哲雄, 宮城敏明: 緊張力を導入した PC 鋼棒と鋼板を用いたせん断損傷 RC 柱の応急補強法, 日本建築学会構造系論文集, 第 586 号, pp.171-178, 2004-12
- (5) 中田幸造, 山川哲雄, 原口貴臣, 森下陽一: ラッシングベルトで能動拘束したせん断損傷 RC 柱の水平加力実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 2, pp. 139-144, 2012.7
- (6) 日本建築防災協会: 震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2001
- (7) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, 1990
- (8) 前田興輝, 山川哲雄, 新城良大, 中田幸造: 緊張アラミド繊維ベルトで横補強した RC 柱の正負繰返しせん断実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No. 2, pp.1147-1152, 2006
- (9) 崎野健治, 山口達也, 中原浩之, 向井昭義: コンクリート充填円形鋼管短柱の中心圧縮耐力, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp.231-236, 2002