

論文 緊張ラッシングベルトと型枠合板で緊急補強されたせん断損傷 RC 柱の実験的研究

許田 昇^{*1}・中田 幸造^{*2}・山川 哲雄^{*3}・原口 貴臣^{*4}

要旨：山川らは、地震被災地におけるせん断損傷 RC 柱への簡便・迅速な応急補強法として、ポリプロピレン繊維ベルトとラチェットバックルで構成されるラッシングベルトに導入する緊張力で、柱表面に薄い鋼板を圧着する応急補強法を提案し、これまでの研究で本応急補強法の有効性を確認している。しかし、地震被災地においては、鋼板の調達・加工が困難であることが考えられるため、本研究では、より実用的な補強技術を確立するため、鋼板の代わりに型枠合板を用いた緊急補強を提案し、一定軸力下の正負繰り返し水平加力実験および鉛直荷重載荷実験を行い、これまでの実験結果と比較・検討を行った。

キーワード：せん断損傷 RC 柱, 緊急補強, ラッシングベルト, プレストレス, 軸耐力

1. 序

多種多様な耐震補強技術が研究・開発されている中、地震被災地における被災建築物への簡便・迅速な応急復旧技術の確立も、急務の課題であると考えられる。被災建築物への応急補強は、余震対策、地域住民の安全確保、ならびに救助活動の安全性向上など、二次被害抑制に直結していると考え、一時的ではあるが、恒久復旧まで建築物を安心して継続使用するためにも重要である。

これまで山川らは、既存 RC 柱に PC 鋼棒やアラミド繊維ベルトを用いて外部横補強を施し、それらを緊張することで柱にプレストレスを導入する補強法を、せん断柱への靱性型耐震補強技術の一つとして考案し、その耐震性能を明らかにすると共に、研究を進めてきた¹⁾²⁾。この補強法は、重機を用いない簡便・乾式工法であると共に、連続繊維シート補強や鋼板巻き立て補強にはない能動的横拘束効果が期待でき、せん断柱を靱性に富む破壊性状へと改善できる。さらに山川らは、RC 柱が地震でせん断損傷したことを想定し、柱のサイズに依存せず、補強自由度の高いラッシングベルト(荷締め具)と鋼板によるせん断損傷 RC 柱への応急補強法に関する研究を行い、曲げせん断性能と軸支持能力の大幅な回復が可能であることを明らかにしてきた³⁾⁴⁾。

しかしながら、2つの課題が残った。1つは横補強材として鋼板を使用していることである。ベルトに導入する緊張力で、せん断損傷 RC 柱の表面に鋼板を圧着すれば、優れた応急補強効果が得られるものの、地震被災地においては、鋼板の調達・加工が困難であることが考えられる。2つ目は、ラッシングベルトをせん断損傷 RC 柱に周回させるために、コーナーアングル(Fig. 1(a))を使用していることである。コーナーアングルは柱隅角部におい

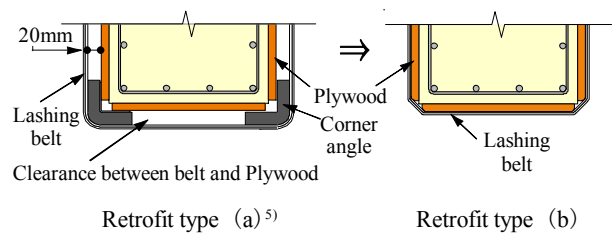


Fig. 1 Cross section of retored specimen

てベルトへの応力集中を緩和するが、実験室レベルの機材である。そこで文献5)では、鋼板の替わりに取り扱いが容易な型枠合板を用いることを提案し(Fig. 1(a))、合板でも十分代替可能であることを示した。型枠合板は入手し易いという点から、本補強法は地震被災地での急を要する事態における「緊急補強」としても有用であると考えられる。しかし、合板は鋼板に比べて曲げ剛性が低いこともあり、合板に亀裂が入り易く、さらにベルトと合板の間に20mmの隙間があるため、非拘束領域におけるコンクリートのはらみ出しを抑制し難いことも分かった。本研究では、これらの課題を解決するため、ベルトを巻きつける際に隅角部に使用していたコーナーアングル(Fig. 1(a))を使用せず、合板の角を削り、ベルトを合板に直接巻きつける新たな方法(緊急補強法)を提案する(Fig. 1(b))。本方法により、コーナーアングルを使用せずに済み、さらに、ベルトをせん断損傷 RC 柱に直接巻きつけることになるため、コンクリートのはらみ出しをベルトで直接拘束できる。

本研究の目的は、本緊急補強を施したせん断損傷 RC 柱の水平加力実験と鉛直荷重載荷実験を行い、曲げせん断性能、軸支持能力をこれまでの応急補強実験結果⁵⁾⁶⁾と比較・検討することである。

*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 博士前期課程 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科助教 博士(工学) (正会員)

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博 (正会員)

*4 琉球大学 工学部環境建設工学科 学部生

Table 1 Details of column specimens

Specimen	Axial compression series			Cyclic loading series	
	ER08S-PV5	ER09S-P'V4	ER09S-P'V4m	ER08S-PH4	ER09S-P'H4
M/(VD) = 1.0					
Damage level (Max. crack width)	N (5mm)	N (4mm)	N (2mm)	N (3mm)	N (5mm)
PP belt	2ply-@65mm				
Initial strain (Initial force)	0.56% (10.3kN)	0.39% (7.1kN)	0.22% (4.1kN)	0.46% (8.4kN)	0.47% (8.6kN)
σ_B (MPa)	28.2	21.3	21.3	28.5	21.3
Common details	N/(bD σ_B) = 0.2, Rebar : 12-D10 (p_g = 1.36%), Hoop : 3.7 ϕ -@105 (p_w = 0.08%).				

Notes: ER08S-PV5 = ER08S-PPWV⁶⁾, ER08S-PH4 = ER08S-PPWH⁵⁾, M/(VD) = shear span to depth ratio, ply = a unit of numbering the layers of reinf. belt (cross sectional area : 2ply of polypropylene = 135.6mm²), σ_B = cylinder strength, N/(bD σ_B) = axial force ratio.

Table 2 Mechanical properties of materials

Reinforcement		A (mm ²)	E (GPa)	σ_y, σ_u^* (MPa)
Rebar	D10	71	201	355
Hoop	3.7 ϕ	11	208	650 ⁽¹⁾ 371 ⁽²⁾
Polypropylene	t = 3mm	67.8	13.5	459*
Aramid 1	t = 0.57mm	9.7	107	2381*

Notes: A = cross sectional area, E = Young's modulus of elasticity, σ_y = yield strength of steel, σ_u = ultimate strength of fiber reinf., ⁽¹⁾ for ER08S, ⁽²⁾ for ER09S.

2. 実験計画

試験体一覧を **Table 1** に示す。**Table 1** には、本緊急補強試験体と併せて、文献5), 6)の応急補強試験体も示されている。試験体は1辺が250mmの正方形断面で、柱高さ500mm、せん断スパン比1.0の極短柱である。試験体は主筋にD10を12本使用し(p_g =1.36%), 帯筋は3.7 ϕ を105mm間隔で配筋した(p_w =0.08%)。試験体に用いた材料の力学的特性を **Table 2** に示す。ラッシングベルトを構成するのは、ポリプロピレンベルト(以下、PPベルトと略称)とラチェットバックルである(引張耐力30kN)。**Fig. 2**に、PPベルト(1ply, ベルト断面積67.8mm²)およびアラミド繊維ベルト(1ply, ベルト断面積9.7mm²)の引張荷重Pと引張ひずみ ϵ の関係を示す。PPベルトは、アラミド繊維ベルトに比べヤング係数は小さいが(**Table 2**), 断面積を大きくすることで膜剛性が著者らがこれまで使用してきたアラミド繊維ベルトと同等になるよう開発したものである(**Fig. 2**)。(膜剛性: 曲げ剛性がなく、はらみ出した柱表面を直接拘束可能という状況から、材軸の概念も当てはまり難いので、膜剛性と呼称する。)PPベルトは端部をラップさせ、エポキシ樹脂を用いて接着し、リング状に製作した。このPPベルトにラチェットバックルを取り付け、ベルトの自由端をバックルに通してレバーを回

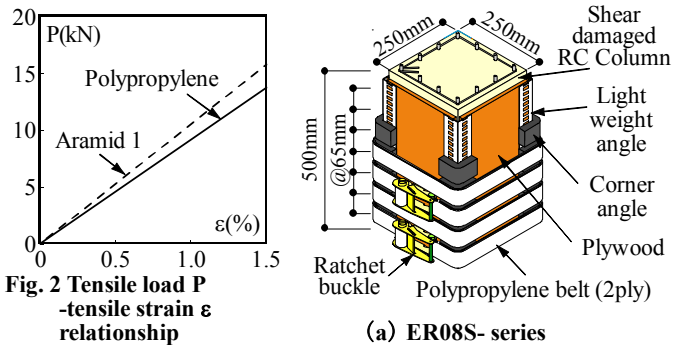


Fig. 2 Tensile load P-tensile strain ϵ relationship

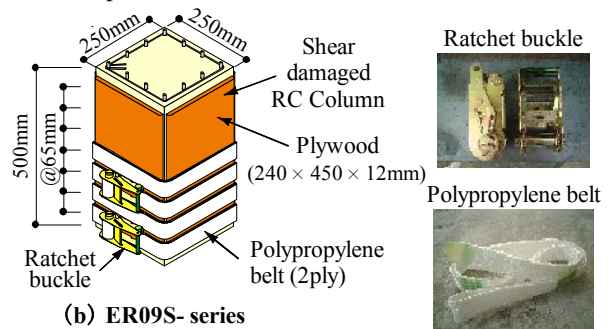


Fig. 3 Details of emergency retrofit

転させることで、緊張力を導入する。ラチェットバックルはラチェット機構を有するため、緊張力の導入は比較的容易に行える。PPベルトのひずみは、両ウェブ面ベルト中央のエポキシ樹脂硬化部にひずみゲージを貼付することで管理した。なお、PPベルトと合板の摩擦がベルトひずみ測定値に与える影響は顕著でない。

文献5), 6)の応急補強の詳細を **Fig. 3(a)**に、本緊急補強の詳細を **Fig. 3(b)**に示す。せん断損傷した試験体に、ラッシングベルトを65mm間隔で配置し、導入する緊張力で柱表面(4面)に型枠合板を圧着した。なお、合板の端は鉋(かんな)で削り、角を落とすことでベルトの応力集中を緩和し、コーナーアングルの代替品ともなるよう工夫した。**Table 1**に示すように、PPベルトに導入した初

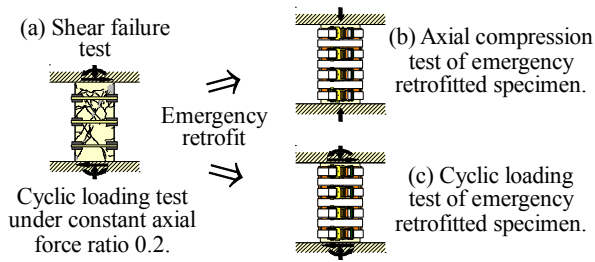


Fig. 4 Procedure of loading test

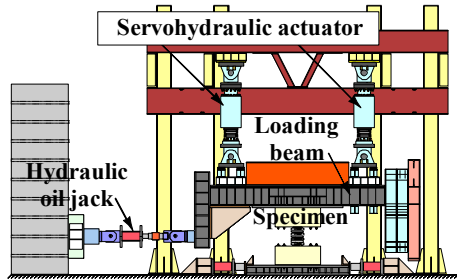


Fig. 5 Test setup

期緊張ひずみは0.39～0.56%と少しばらついているが(ER09S-P'V4mを除く)、これは、ラチェットバックルの逆転防止突起により、緊張ひずみの微調整が困難だったためである。緊急補強は、残留水平変位をゼロに戻し、安全のために軸力を除荷して行った。

Fig. 4に実験手順を示す。緊急補強実験に先行して、RC柱が地震でせん断損傷したことを想定し、健全な柱試験体を軸力比0.2の一定軸力下でせん断損傷させた(Fig. 4(a))。せん断損傷実験では、与える損傷レベル⁷⁾を制御するために、アラミド繊維ベルト(2ply-@150mm)で粗な外部横補強を施し、水平加力を行った。せん断損傷したRC柱試験体への緊急あるいは応急補強後、試験体ER08S-PV5(以下、ER08S-、ER09S-は省略)、P'V4、P'V4mは補強後の修復軸支持能力を確認するため、水平方向の拘束をフリーとし、中心圧縮による軸耐力実験を行った。なお、試験体P'V4mは、低い緊張力でも緊急補強効果が得られるかを確認するため、他の試験体に比べ、導入緊張力が低い試験体となっている。試験体PH4、P'H4は、補強後に一定軸力下で正負繰り返し水平加力実験を行った(Fig. 4(c))。水平加力実験は、部材角 $R=0.125\%$ 、 0.25% を各1回、 $R=0.5\%$ 、 0.75% を各2回、 $R=1.0\% \sim 3.0\%$ を0.5%の増分で各2回、 $R=4.0$ 、 5.0% を各1回繰り返す加力プログラムとした(せん断損傷実験では、目標の損傷レベルに達した時点で加力を終了した)。実験では、Fig. 5に示す加力装置を用い、2台のサーボアクチュエータ(合計2,000kN)によって、加力ビームがテストベッドに対して常に平行を保つよう制御した。

3. 実験結果

3.1 せん断損傷実験

せん断損傷実験より得られた水平荷重 V -部材角 R 関係

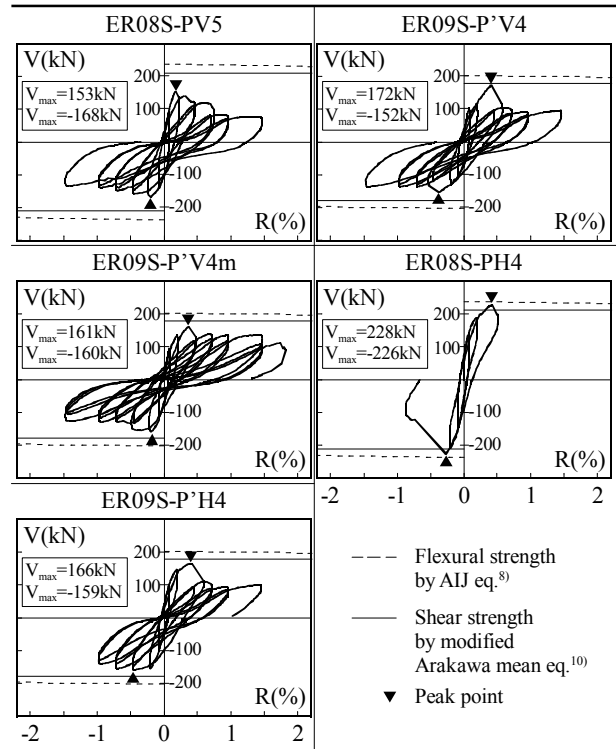
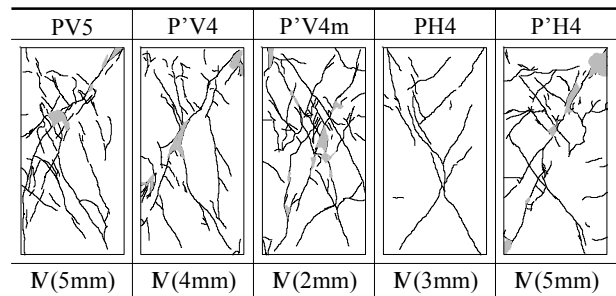


Fig. 6 Measured V-R relationships (shear failure test)



N: Damage level⁷⁾, (): Max crack width (depth side).

Fig. 7 Observed cracking patterns after shear failure test

をFig. 6に、実験終了後のひび割れ図(ウェブ面)、損傷レベルおよび最大残留ひび割れ幅をFig. 7に示す。V-Rグラフ中の破線は、シリンダー強度 σ_B による多段配筋柱の曲げ強度計算値⁸⁾であり、実線は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¹⁰⁾である。どの試験体も部材角 $R=0.5\%$ までにせん断破壊し、その後、目標とする損傷レベルに到達するまでそれぞれ加力を行った。損傷レベルは日本建築防災協会の判定基準⁷⁾に基づき、ひび割れ幅等により総合的に評価した。その結果、どの試験体も損傷レベル N に該当するが、同じ損傷レベルであっても損傷程度は必ずしも同一とはならず、従って補強後の実験結果に影響を与える可能性があることに留意する必要がある。なお、せん断損傷実験において主筋の座屈は生じていない。

3.2 修復軸耐力確認実験

せん断損傷したRC柱試験体に緊急補強を施し、中心圧縮による軸耐力実験を行った。修復軸耐力確認実験から得られた軸力 N と軸ひずみ ϵ_c の関係をFig. 8に、各段

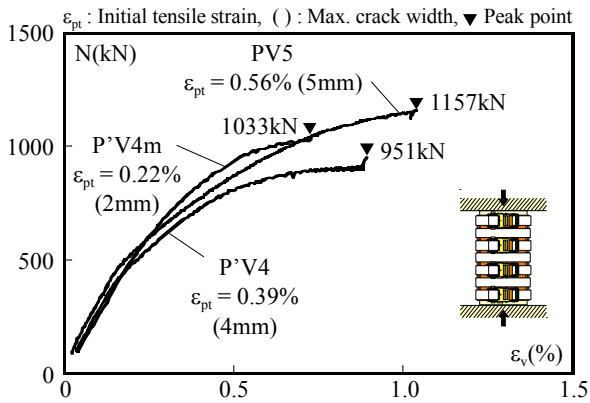


Fig. 8 N- ϵ , relationships after emergency retrofit

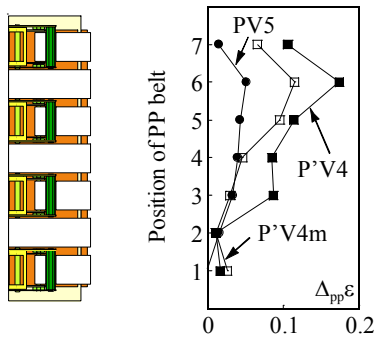


Fig. 9 Measured incremental strain of PP belt

ごとに最大軸耐力時から実験開始時のひずみを差し引くことで求めた、柱高さ方向におけるPPベルトの受動ひずみ増分を Fig. 9 に示す。Figs. 8, 9 には、比較のために応急補強試験体 PV5 も示した。試験体 PV5, P'V4, P'V4m の修復軸耐力はそれぞれ $N=1157\text{kN}$, 951kN , 1033kN であった。3 試験体とも初期軸剛性に差はないものの、PV5 の軸耐力がより高いことが伺える。これは、補強の際に導入した初期緊張力が、他の試験体に比べて大きいこともあり、本補強法の特徴の一つである能動的横拘束がより効果的に作用した結果であるといえる。P'V4m は、初期緊張力による補強効果の有無を確認するため、他の試験体よりも低い緊張力を導入し軸耐力実験を行った試験体であるが、軸耐力が P'V4 よりも高く、ベルトの受動ひずみ増分は P'V4 に比べて少ないことが分かる (Fig. 9)。せん断損傷実験では、試験体 P'V4m の繰り返し回数は P'V4 より多いにも関わらず、ひび割れ幅が小さく、しかも最大耐力後の耐力低下も小さいことから (Fig. 6)、P'V4m の損傷程度が低かったことが理由として考えられる。Fig. 9 に示すベルトの受動ひずみ増分を見ると、コーナーアングルを有する試験体 PV5 に比べて、コーナーアングルを省略した緊急補強試験体 P'V4, P'V4m のひずみ増分が大きいことが分かる。これは、コーナーアングルを使用せず、柱をベルトで直接拘束したことでベルトが横拘束効果を発揮しやすくなり、その結果コンクリートのはらみ出しを抑制し、受動的横拘束効果に伴った軸耐力が得られたことが分かる。

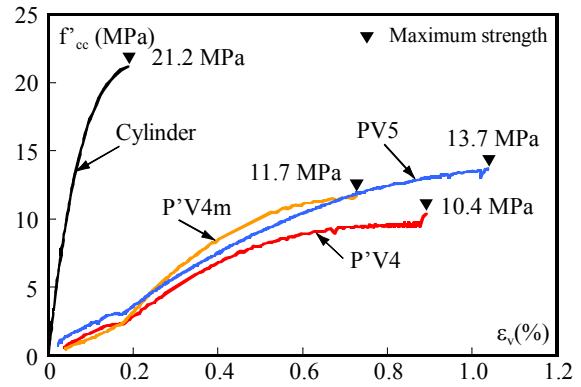


Fig. 10 Comparison of concrete strength

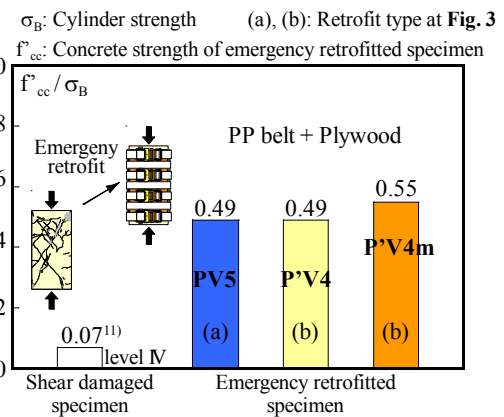


Fig. 11 Damaged concrete strength and concrete strength of emergency retrofitted specimen

軸耐力実験から得られたピーク値より、完全弾塑性を仮定した主筋の軸力負担分を差し引き、コンクリートの軸力負担分を算出し、柱断面積で除して求めた拘束損傷コンクリート強度は、 $f'_{cc}=13.7\text{MPa}$ (PV5), 10.4MPa (P'V4), 11.7MPa (P'V4m) であった。Fig. 10 に、拘束損傷コンクリート強度 f'_{cc} およびシリンダーの圧縮試験から得られた圧縮強度 σ_B と圧縮ひずみ ϵ_v の関係を示す。シリンダーの応力-ひずみ曲線は、Table 1 に示すシリンダー強度 σ_B を平均する際に用いたものを代表して一つ示す。通常、コンクリートはひずみ度 0.2% 程度で最大強度に達するが、補強後の拘束損傷コンクリート強度は強度時ひずみが大きく、勾配も低いことが分かる。

Fig. 11 に、拘束損傷コンクリート強度 f'_{cc} をシリンダー強度 σ_B で基準化した値を示す。損傷レベル IV の損傷コンクリート強度が約 $0.07\sigma_B^{(11)}$ であるのに対して、3 試験体とも PP ベルトと型枠合板による能動的な横拘束効果により、拘束損傷コンクリート強度 f'_{cc} が大幅に増大していることが分かる。損傷が同程度の場合、コーナーアングルの有無による補強法の違いが、軸支持能力に与える影響は少ないと考えられ、今回の緊急補強法でも、十分に補強効果が得られることを確認できた。

3. 3 緊急補強後の水平加力実験

Fig. 12 に緊急補強後の水平加力実験より得られた P'H4

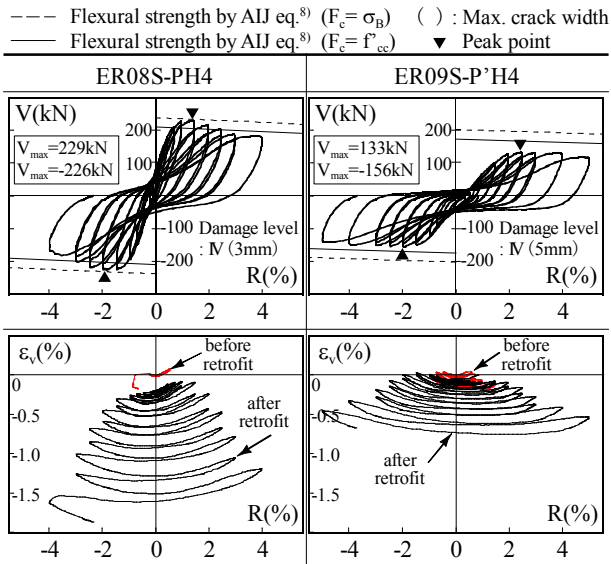


Fig. 12 Measured V-R and ϵ_v -R relationships after emergency retrofit

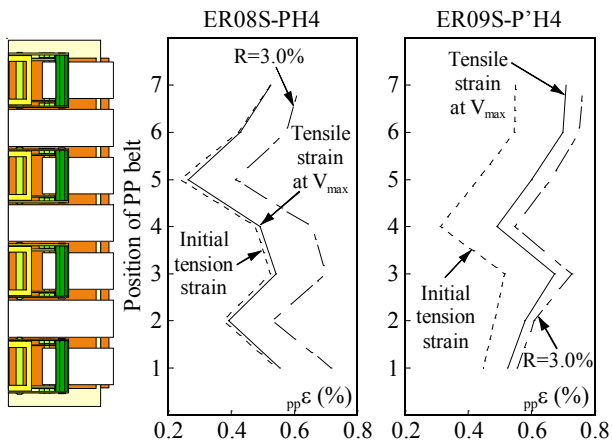


Fig. 13 Distribution of PP belt strain along the height of column

の V-R 曲線および、 ϵ_v -R 曲線を示す。Fig. 12 には、比較のために応急補強試験体 PH4 も示した。V-R グラフ中には、シリンダー強度 σ_B および拘束損傷コンクリート強度 f'_{cc} による多段配筋柱の曲げ強度計算値も合わせて示す。コーナーアングルを使用している試験体 PH4 は、部材角 $R=0.6\%$ で拘束損傷コンクリート強度による曲げ強度計算値に到達し、最大水平耐力はシリンダー強度による曲げ強度計算値付近まで回復・増大している。部材角 $R=1.5\%$ から型枠合板が割れる音が聞こえ始め、 $R=3.0\%$ で型枠合板に亀裂が確認できたため、 $R = \pm 4.0\%$ を加力して実験を終了した。ラッシングベルトと型枠合板のみを使用した緊急補強試験体 P'H4 は、せん断損傷前以上の水平耐力の増大には及ばなかったが (Fig. 6)、負側の最大水平耐力はせん断損傷前まで回復している。PH4 と P'H4 の履歴性状に差があるのは、(1) 損傷レベルは共に N で同じであるが、PH4 のひび割れ幅が 3mm と P'H4 (5mm) に比べて小さかった (Fig. 7)。(2) せん断損傷実験において、PH4 は部材角 $R=0.5\%$ で一気に損傷が拡大し、実験を終了した

め、P'H4 に比べ繰り返し回数が少なく (Fig. 6)、損傷程度が小さかったことが考えられる。ここで、柱高さ方向における PP ベルトのひずみ分布を Fig. 13 に示す。グラフ中には、初期緊張ひずみを破線で、正側最大水平耐力時の緊張ひずみを実線でそれぞれ示しているが、最大水平耐力時の部材角はそれぞれ異なる。文献 12) では、損傷が小さい程、応急補強後の最大水平耐力時部材角も小さくなることが明らかにされているが、本実験では PH4 の損傷が P'H4 に比べて小さいため、最大耐力時部材角も小さくなっている (PH4 の正側最大水平耐力時部材角は $R=1.5\%$ 、P'H4 は $R=2.5\%$)。緊急補強試験体 P'H4 は最大水平耐力時にベルトのひずみが増加しているが、PH4 はひずみ増分が少ない。コーナーアングルと型枠合板を用いた PH4 は、最大水平耐力を迎えるまでは PP ベルトのひずみは少ないが、最大水平耐力以降、型枠合板が割れることにより、コンクリートのはらみ出しを抑制することが出来ず、結果的に Fig. 12 に示す ϵ_v -R 曲線のように軸ひずみが進行することとなった。一方、緊急補強試験体 P'H4 は、PH4 に比べて軸ひずみが大きく改善された。

Fig. 14 に、本実験で得られた水平耐力 V_{exp} をシリンダー強度 σ_B による多段配筋柱の曲げ強度計算値 Q_{mu} で基準化したスケルトンカーブの比較を示す。応急・緊急補強は、せん断損傷実験における残留水平変位をゼロに戻して行うが (2 章参照)、損傷が大きいと完全にゼロには出来ないため、V-R 関係はやや非対称となる。試験体 PH4 と P'H4 では水平耐力、および水平剛性に差が見られ、また、最大耐力時の部材角が異なる。最大耐力後、PH4 よりせん断ひび割れ幅の大きい P'H4 の耐力低下が小さいのは、PH4 は最大耐力後に型枠合板に亀裂が生じるとともに柱の軸ひずみが進行し耐力低下を生じたのに対し、P'H4 はベルトが合板を直接拘束し、高い受動的横拘束効果が発揮されたため、軸ひずみの進行が抑制されたことが理由として考えられる。

Fig. 15 に、柱高さ方向における主筋ひずみの分布を示す。グラフには、負側加力時の各部位材角第 1 サイクルのピーク強度時をプロットしており、最大水平耐力時ひずみは太線で示している。Fig. 15 より、コーナーアングル有りの試験体 PH4 は部材角の進行に伴い、主筋のひずみ

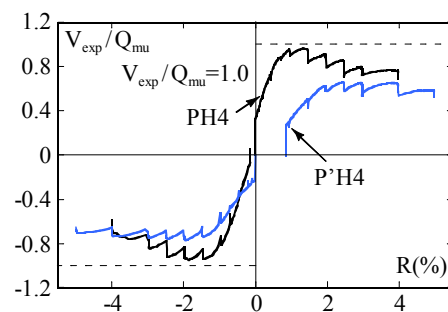


Fig. 14 Skeleton curves

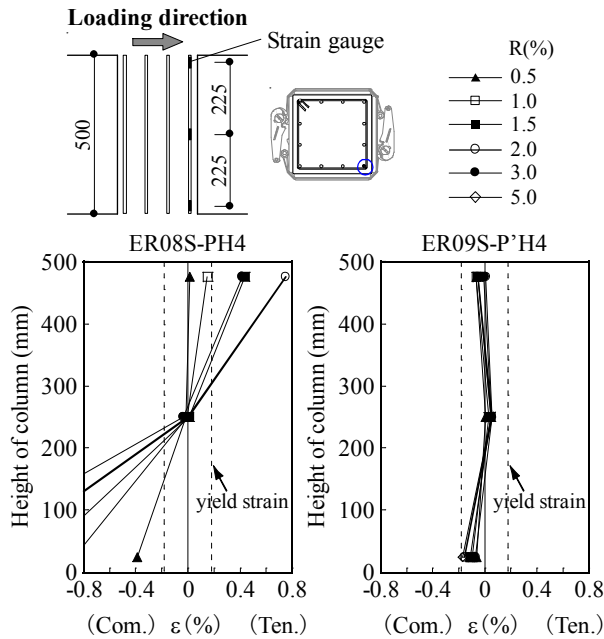


Fig. 15 Strain distribution of longitudinal reinforcement along the height of column

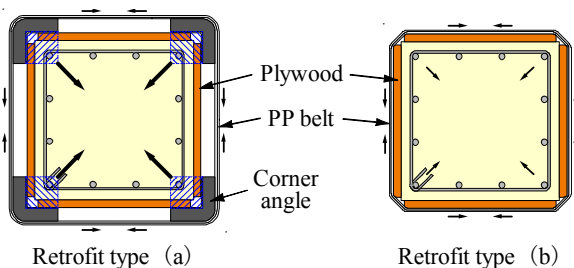


Fig. 16 Comparison of retrofit method

も増加しているが、コーナーアングルを用いない試験体 P'H4 はひずみ増分が少ないことが分かる。なお、せん断損傷実験での PH4 と P'H4 の主筋ひずみ分布は大差がないことから、Fig. 15 に現れた差異には Fig. 16 に示す柱の拘束方法の違いが影響したものと考えられる。コーナーアングルを用いた補強法は、隅角部からの集中荷重がより大きく、柱の隅筋を効果的に拘束しており、主筋の付着に有利な状態でより曲げ耐力を発揮しやすいと考えられる。従って、水平耐力の回復および増大には、効果的に隅筋を拘束し、主筋の付着を確保することが必要であり、これらが柱の曲げせん断性能に与える影響は大きいと考える。一方、今回の緊急補強法は、Fig. 16(a) に比べて隅角部からの集中荷重は小さいものの、ベルトで柱を直接横拘束しているため、コンクリートのはらみ出しを抑える受動的な横拘束効果が高く、軸ひずみ抑制に効果的であるといえる (Fig. 12)。

4. 結論

(1) コーナーアングルと鋼板に替わり、型枠合板を工夫して使用することで、より実用的な緊急・応急補強法を提案した。

(2) 本緊急補強法は、ベルトが型枠合板に直接接触しているため、受動的な横拘束効果が高く、軸ひずみの抑制に効果的である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会の平成 21 年度科学研究費補助金(基盤研究(A), 課題番号:20246091, 代表者:山川哲雄)により行われた。また、ラチェットバックルとポリプロピレンベルトを萩原工業(株)から、そしてアラミド繊維ベルトをファイベックス(株)からそれぞれ提供していただいた。また、実験に際し、砂川恒雄琉球大学技術職員には尽力頂きました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 山川哲雄, 鴨川茂義, 倉重正義: プレストレスを導入した PC 鋼棒で外帯筋状に横補強した RC 柱の耐震補強法に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 526 号, pp.141-145, 1999
- 2) 佐藤元ほか: アラミドベルトとコーナーブロックを用いた RC 柱のプレストレス耐震・応急補強法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp.919-924, 2001
- 3) 中田幸造, 山川哲雄ほか: ラッシングベルトを用いた損傷極脆性柱の応急補強法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp.1123-1128, 2007
- 4) 長濱温子, 山川哲雄ほか: せん断損傷 RC 柱に緊張ラッシングベルトを利用した応急補強法, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 3, pp.175-180, 2008
- 5) 許田昇ほか: 緊張ラッシングベルトで型枠合板を圧着したせん断損傷 RC 柱の応急補強実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol. C-2, pp.225-226, 2009
- 6) 許田昇ほか: 緊張ラッシングベルトと型枠合板によるせん断損傷 RC 柱の応急補強実験, 日本建築学会研究報告 九州支部, 第 48 号, pp.565-568, 2009
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 1999
- 10) 前田興輝ほか: 緊張アラミド繊維ベルトで横補強した RC 柱の正負繰り返しせん断実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 2, pp.1147-1152, 2006
- 11) 長濱温子ほか: 損傷 RC 柱の圧縮強度と応急補強実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 29, No. 3, pp.61-66, 2007
- 12) 許田昇, 長濱温子ほか: 緊張ラッシングベルトによるせん断損傷 RC 柱の応急補強実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp.109-114, 2009