

論文 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

中田 幸造^{*1}・山川 哲雄^{*2}・原口 貴臣^{*3}・森下 陽一^{*4}

要旨：著者らが提案している緊張ラッシングベルトと型枠合板を用いた応急補強技術は、せん断損傷RC柱を能動的に横拘束できるため、せん断ひび割れが閉じ、せん断損傷により劣化した耐力や靱性、ならびに鉛直荷重支持能力を大きく回復させることができる。本研究ではこれまでの研究課題を踏まえ、ラッシングベルトに使用する連続繊維ベルトを引張剛性の大きなアラミド繊維ベルトに変更し、型枠合板の下に鋼板を挿入する。さらに、実際の被災状況を想定するため、一定軸力を保持し、かつ残留水平変位を残した状態で補強を施すことで、能動側圧が曲げせん断性能に与える影響を検証した。

キーワード：プレストレス、応急補強、拘束コンクリート、アラミド繊維、残留水平変位

1. はじめに

著者らは地震被災地における被災建築物への簡便・迅速な応急補強技術の開発を目指して実験的研究を続けてきた。これまでの研究では、補強自由度の高いラッシングベルト（荷締め具）と角を丸く削った型枠合板を用いてせん断損傷RC柱を能動的に横拘束し、補強後RC柱の軸支持能力や曲げせん断性能を鉛直荷重載荷実験および水平加力実験により検証してきた¹⁾。木材である合板を用いたのは、RC柱にラッシングベルトを直接巻き付けると、RC柱隅角部でベルトに応力集中が発生して破断の恐れがあるため、入手し易く加工し易い合板をRC柱隅角部への簡便な当てものとして、なおかつ柱全面に当てることでコンクリートの剥離剥落防止に活用するためである。さらに文献²⁾では、能動拘束されたせん断損傷RC柱の曲げせん断性能には、補強に使用する連続繊維ベルトの引張剛性も重要であることを明らかにした。

本研究では連続繊維ベルトを引張剛性の大きなアラミド繊維ベルトに変更し、さらに実験変数に能動側圧を設定するため、ラッシングベルトの連結器具にはラチェットバックルの他にひずみ管理が容易なカプラーも使用した。また、本研究では、地震被災地で鋼板が入手可能であることを想定し、せん断損傷RC柱に切り鋼板を当て、その上に角を削った合板を当て、その上からラッシングベルトを巻き付け、緊張力を導入し、能動拘束を行う

(Fig. 1)。鋼板を柱表面に圧着することの意味は、安全性や安心感の向上を図る補強の一つの選択肢を検証することにある。

本研究の目的は、せん断損傷実験後に残留水平変位を残し、軸力を載荷した状態でラッシングベルトと鋼板および合板で能動拘束を施し、導入する能動側圧が補強RC柱の曲げせん断性能に与える影響を検証することである。

2. 実験計画

試験体一覧をTable 1に、試験体に用いた材料の力学的特性をTable 2にそれぞれ示す。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。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($p_w=0.08%$)。ラッシングベルトを構成するのは、アラミド繊維ベルトとカプラーまたはラチェットバックルである(Fig. 2)。補強にカプラーを使用したのは、ラチェットバックルに比べてベルトに導入する緊張ひずみの管理が容易であること、および大きな緊張ひずみの導入が可能であることによる。ラチェットバックルによる補強では、アラミド繊維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転させることで緊張力を導入する。ベルトのひずみは、ベルトの両ウェブ面中央部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測定した。

補強詳細をFig. 2に示す。補強では、せん断損傷したRC柱試験体の表面に切り鋼板(厚さ3.2mm)と角を丸く削った合板(厚さ12mm)を当て、その上からラッシングベルトを63mm間隔で巻き付けて緊張力を導入した。試験体ER11S-AwLsc(以後ER11S-は省略)、AwMsc、AwHsc(Fig. 2(a))は、ベルトの連結器具にひずみ管理を行い

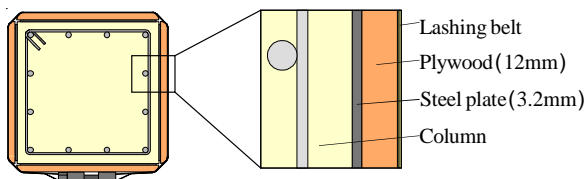


Fig. 1 Cross section of retrofitted specimen

*1 琉球大学 工学部環境建設工学科助教 博士(工学)(正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博(正会員)

*3 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻(正会員)

*4 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 工博(正会員)

Table 1 Details of column specimens

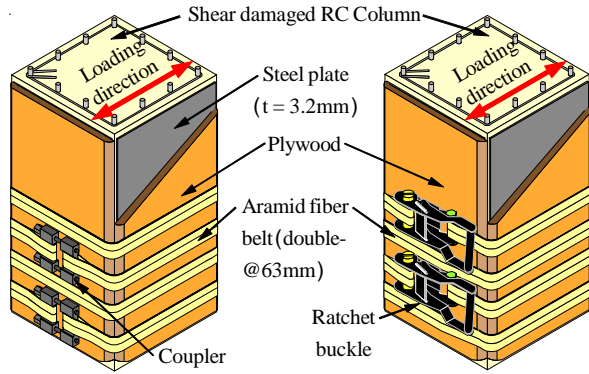
Specimen	ER11S-AwLsc	ER11S-AwMsc	ER11S-AwHsc	ER11S-AwMs
Elevation				
Fiber reinforcement	Aramid fiber belt (double-@63mm)			
Damage level (Max. crack width)	IV (2.0mm)	IV (2.2mm)	IV (3.0mm)	IV (2.0mm)
Initial strain of fiber reinf. (Initial force)	0.09% (3.7kN)	0.26% (10.8kN)	0.42% (17.4kN)	0.30% (12.5kN)
σ_B	23.9MPa			
Plywood	470 × 250 × 12mm	470 × 240 × 12mm	470 × 250 × 10mm	470 × 250 × 12mm
Steel plate	470 × 240 × 3.2mm			
Residual lateral displacement	3.10mm($R_r=0.62\%$)	-2.45mm($R_r=-0.49\%$)	2.55mm($R_r=0.51\%$)	2.10mm($R_r=0.42\%$)
Common details	M/(VD) = 1.0, N/(bD σ_B) = 0.2, Rebar : 12-D10($p_g = 1.36\%$), Hoop : 3.7 ϕ -@105($p_w = 0.08\%$).			

Notes : σ_B = cylinder strength, M/(VD) = shear span to depth ratio, N/(bD σ_B) = axial force ratio, R_r = residual drift angle.

Table 2 Mechanical properties of materials

Reinforcement	A (mm ²)	E (GPa)	P _u (kN)	σ_y, σ_u^* (MPa)	ϵ_u (%)
Rebar : D10	71	195	37.2	371	-
Hoop : 3.7 ϕ	11	184	7.2	618	-
Aramid 1 : t = 0.57mm	9.7	107	23.1	2381*	2.2
Steel plate : t = 3.2mm	-	204	-	287	-

Notes : A = cross sectional area, E = Young's modulus of elasticity, P_u = tensile strength, σ_y = yield strength of steel, σ_u = ultimate strength of fiber reinf., ϵ_u = ultimate strain of fiber reinf..



(a) ER11S-AwLsc, AwMsc, AwHsc (b) ER11S-AwMs
Fig. 2 Details of emergency retrofit

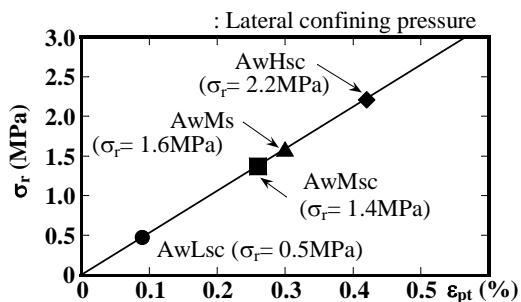
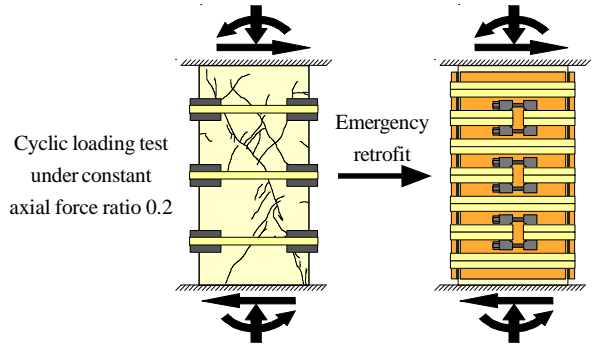


Fig. 3 Lateral confining pressure σ_r



(a) Shear failure test (b) Cyclic loading test
Fig. 4 Procedure of loading test

やすいカブラーを、試験体 AwMs (Fig. 2 (b)) ではラチェットバックルを使用した。合板はベルトの応力集中を緩和できるように角を削って面取りを行い、合板の角にグリスを満遍なく塗ることで、ベルトに均等に緊張ひずみが入るよう工夫した。試験体 AwHsc では、せん断損傷実験による柱の膨らみが大きく、補強に使用するアラミド繊維ベルトの長さが足りなくなったため、ほかの試験体よりも2.0mm薄い合板を使用した。緊張ひずみ ϵ_{pt} と導入した能動側圧 σ_r (式 (1)) の関係を Fig. 3 に示す。

$$\sigma_r = (2A_a)/(bA_s) \cdot A \cdot E \cdot \epsilon_{pt} \quad (1)$$

ここで、 A_a : アラミド繊維ベルトの断面積, b : 柱幅, A_s : ラッシングベルトの補強間隔, A : アラミドベルトのヤング係数。

Fig. 4 に実験手順を示す。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³⁾を制御するため、アラミド繊維ベルト (2ply-@150mm) で粗な外部横補強を施して水平加力を行い、目標の損傷レベルに達した時

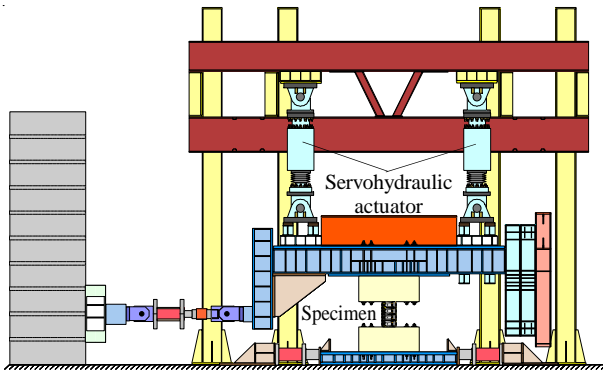


Fig. 5 Test setup

点で加力を終了した。せん断損傷実験後、全試験体とも残留水平変位を残し、軸力を載荷した状態でラッシングベルトと鋼板および合板で能動拘束を施した。その後、再び水平加力実験を行った (Fig. 4 (b))。軸力の載荷を維持し、かつせん断損傷実験の残留水平変位を残した状態で補強を施したのは、実際の被災状況を模擬するためである。水平加力実験は Fig. 5 に示す装置により、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で行った。

3. 実験結果

3.1 せん断損傷実験の結果

せん断損傷実験により得られた水平荷重 V -部材角 R 関係を Fig. 6 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、残留水平変位、残留水平変位を柱高さで除した残留部材角 R_r を Table 3 にそ

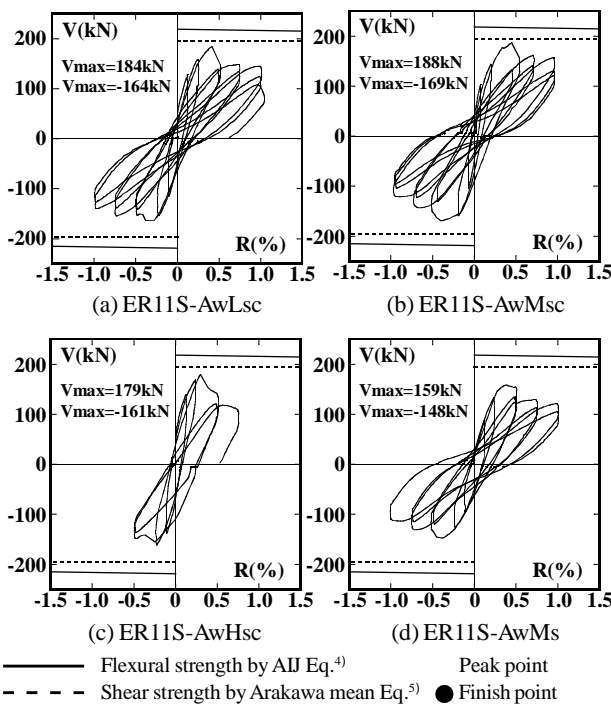


Fig. 6 Measured V-R relationships (Shear failure test)

Table 3 Observed cracking patterns after shear failure test

AwLsc	AwMsc	AwHsc	AwMs
IV (2.0mm)	IV (2.2mm)	IV (3.0mm)	IV (2.0mm)
3.10mm* ($R_r=0.62\%$)	-2.45mm* ($R_r=0.49\%$)	2.55mm* ($R_r=0.51\%$)	2.10mm* ($R_r=0.42\%$)

N = damage level, () = max. crack width (depth side),
* = residual lateral displacement, R_r = residual drift angle.

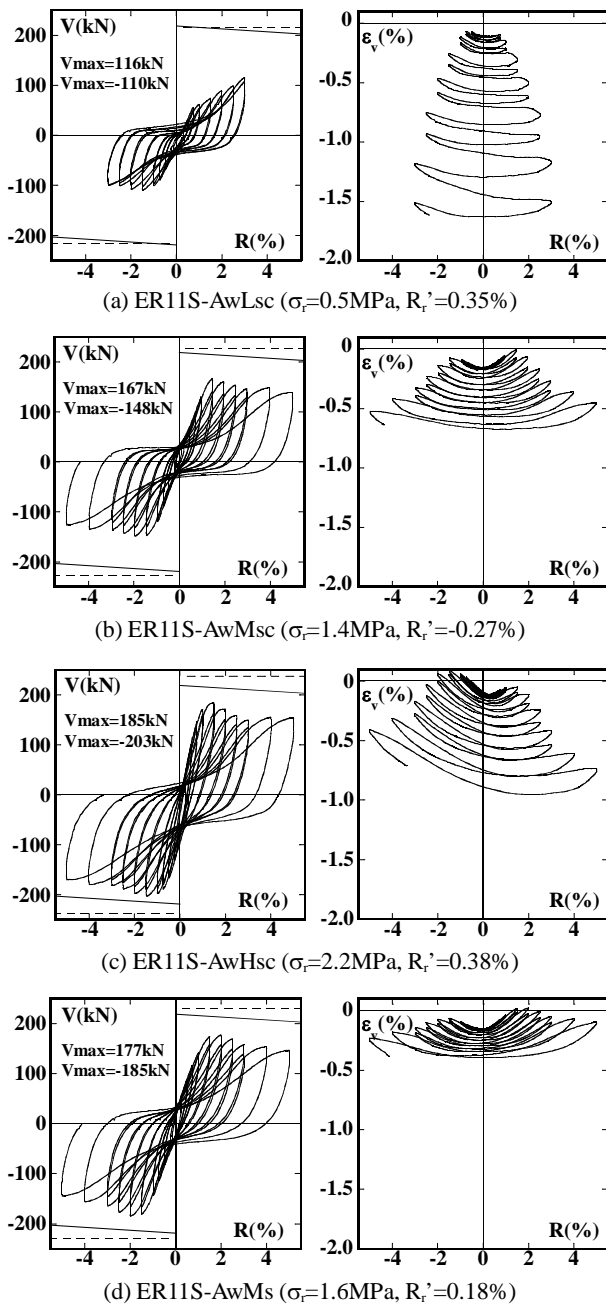
れぞれ示す。Fig. 6には、せん断損傷実験前に測定したシリンドラ強度 σ_B による多段配筋柱の曲げ強度計算値⁴⁾を実線で、アラミド繊維ベルトを考慮した修正荒川mean式によるせん断強度計算値⁵⁾を破線で示している。どの試験体も部材角 $R=0.5\%$ までにせん断破壊し、その後、目標とする損傷レベルに到達するまでそれぞれ加力を行った。損傷レベルは日本建築防災協会の判定基準に基づき、ひび割れ幅等により総合的に評価している。その結果、どの試験体も損傷レベルIVに該当するが、損傷程度は必ずしも同等とはならない。なお、せん断損傷実験において、全ての試験体のせん断面上における柱頭の帯筋は降伏していなかったが、柱高さ方向中央部の帯筋は降伏していた。また、どの試験体でも主筋の座屈は確認されなかった。

3.2 能動拘束したせん断損傷 RC 柱の水平加力実験結果

せん断損傷実験終了後、残留水平変位を残し、一定軸力を保持した状態でラッシングベルトと鋼板および合板でせん断損傷 RC 柱の能動拘束を行った。なお、軸力と残留水平変位を残した状態での補強作業中においては、軸ひずみの進行はほとんど無かった (補強に要した時間は 3 ~ 6 時間、軸ひずみ増分量は $-0.011\% \sim -0.034\%$)。一方で、せん断損傷実験後の残留水平変位は能動拘束により減少した。せん断損傷実験後の残留水平変位と部材角は Table 3 に示す通りであり、ラッシングベルトと鋼板および合板で能動拘束した後の残留水平変位と部材角は、AwLscでは 1.75mm ($R_r=0.35\%$)、AwMscでは -1.35mm ($R_r=0.27\%$)、AwHscでは 1.9mm ($R_r=0.38\%$)、AwMsでは 0.9mm ($R_r=0.18\%$) となった。

Fig. 7 に補強後の水平加力実験より得られた水平荷重 V -部材角 R 関係、および柱の軸ひずみ ϵ_c -部材角 R 関係をそれぞれ示す。V-R グラフ中には、せん断損傷実験前に測定したシリンドラ強度 σ_B による多段配筋柱の曲げ強度計算値⁴⁾を実線で、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⁵⁾を破線で示している。Fig. 7 (a) より、試験体 AwLsc は部材角 $R=1.5\%$ で負側最大耐力に達し、その後、加力に伴い軸ひずみの進行が大きくなり、 $R=3.0\%$ に鋼板がスタブに接触したため

実験を終了した。正側耐力が加力に伴い上昇しているのも、鋼板がスタブに接触したことが原因であると考えられる。Fig. 7 (b) より、試験体 AwMsc は $R=1.5\%$ で正側最大耐力に達し、その後、急激な耐力低下や軸ひずみの進行は見られず、 $R=5.0\%$ まで耐力低下が少ない履歴性状を示した。Fig. 7 (c) より、試験体 AwHsc は $R=1.5\%$ で負側最大耐力がシリンダー強度 σ_B による多段配筋柱の曲げ強度計算値に近づき、その後、急激な耐力低下は見られず、 $R=5.0\%$ まで最大耐力の 80% を維持した。本試験体の軸ひずみの進行が正側加力で大きいのは、せん断損傷実験



— Flexural strength by AIJ Eq.⁴⁾
 - - - Shear strength by Arakawa mean Eq.⁵⁾
 Peak point, R_r' = residual drift angle after emergency retrofit.

Fig. 7 Measured V-R and ϵ_v -R relationships after emergency retrofit

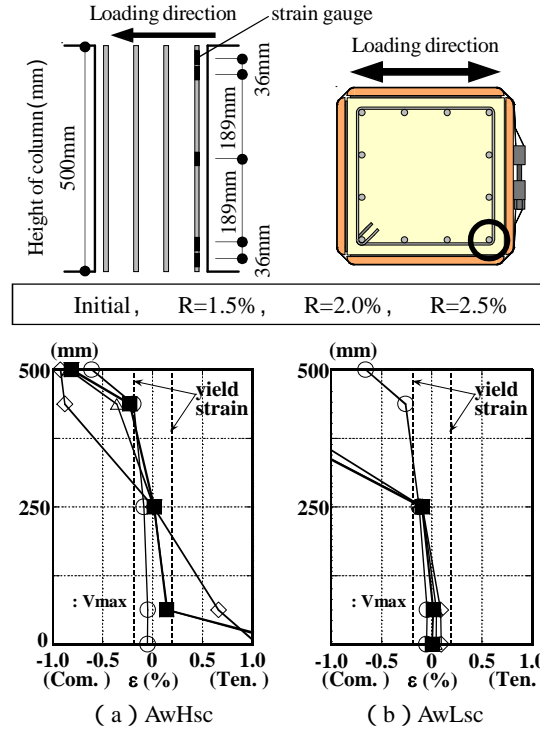


Fig. 8 Strain distribution of longitudinal reinforcement along the height of column

時の $R=0.75\%$ の 1 回目でせん断損傷が拡大し、負側の加力をせずに実験を終了したため、正側の損傷程度が負側より大きくなっているからだと考える。補強後の残留水平変位がほぼ同じで能動側圧が小さい AwLsc (Fig. 7 (a)) と比べると、AwHsc の剛性は大きくなっており、これは大きな能動側圧によりせん断ひび割れが AwLsc に比べてより閉塞したことに起因すると考えられる。Fig. 7 (d) より、試験体 AwMs は $R=2.0\%$ で最大耐力に達し、その後 $R=4.0\%$ でフランジ面の合板にひび割れが生じたものの、軸ひずみの進行は小さく、 $R=5.0\%$ まで耐力低下の少ない履歴性状を示した。

Fig. 8 に補強試験体 AwHsc, AwLsc の水平加力実験により得られた柱高さ方向における隅主筋のひずみ分布を示す。黒塗りは最大耐力時のひずみである。Fig. 8 (a) より、試験体 AwHsc は AwLsc に比べて主筋のひずみ勾配が大きいことが分かる。このことから、柱に導入する能動側圧が大きければ、せん断強度が増大するだけでなく、せん断損傷実験で劣化したと考えられる主筋の付着性状は改善され⁶⁾、主筋は引張降伏しやすくなるため、能動拘束されたせん断損傷 RC 柱の耐力と靱性が大きく回復するものと考えられる。

3.3 残留水平変位の影響

Fig. 9 に補強後の水平加力実験開始時からの柱の軸ひずみ増分 $\Delta\epsilon_v$ - 補強後の水平加力実験開始時の残留部材角 R_r' (%) 関係を示す。白抜きのプロットは、補強後実験開始時の軸ひずみの値、また、各試験体の最大耐力時と実験終了時サイクルにおいては、除荷後の軸ひずみの値

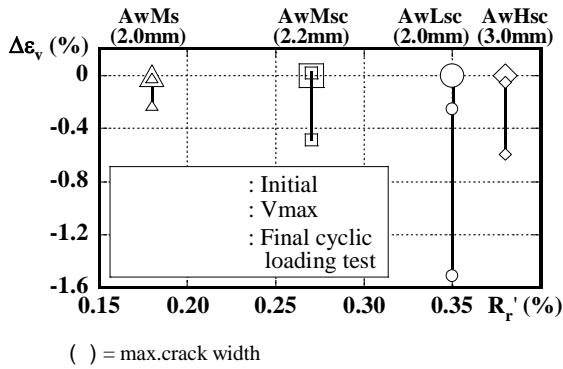


Fig. 9 Measured $\Delta\varepsilon_v$ - R relationships during emergency retrofit test

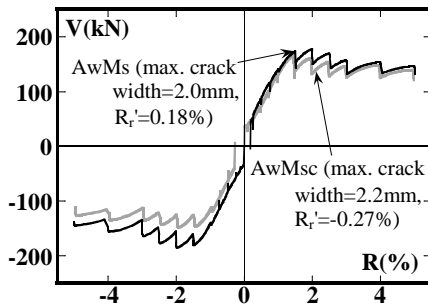


Fig. 10 Skeleton curves

を灰色と黒色でそれぞれ示した。各試験体名の下には、せん断損傷実験時の最大残留ひび割れ幅も示している。Fig. 9より、試験体AwLscは柱に導入した能動側圧が他の試験体に比べて低いため、軸ひずみの増分は大きい。他の3体の試験体は、 σ_r が大きくても残留部材角の大きい試験体ほど軸ひずみの増分が大きくなる傾向にあり、このことから柱の軸ひずみには、柱に導入する能動側圧だけではなく、補強後の柱の残留部材角の大きさも影響することが分かる。

Fig. 10には補強後の残留部材角が補強後の耐力と靱性に与える影響を検証するため、能動側圧がほぼ同じAwMscとAwMsのスケルトンカーブの比較を示した。AwMscとAwMsはベルトの結合にカブラーとラチェットバックルを用いた点が異なっているが、これらのデバイスは壊れていないため、デバイスの差異は耐力と靱性に影響していないと考える。Fig. 10には試験体名と併せて最大残留ひび割れ幅と補強後の残留部材角 R_r' (%) も示した。三角のプロットは水平耐力が最大水平耐力の80%を下回った部材角を示している。Fig. 10より、AwMsに比べて最大残留ひび割れ幅と残留部材角が大きなAwMscの耐力と靱性はAwMsのそれより劣っており、残留部材角が大きいと耐力と靱性が低下することが分かる。

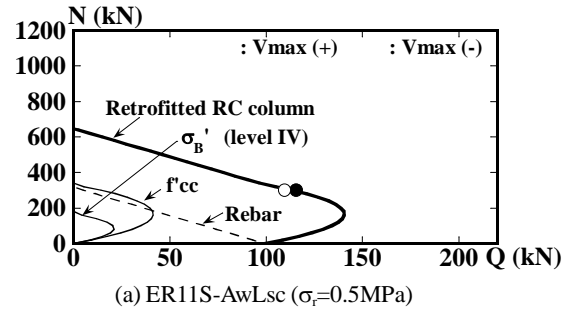
3.4 能動側圧の影響

能動側圧の影響を検証するため、補強後の実験で得られた正負の最大水平耐力実験値の平均値を用いて能動拘

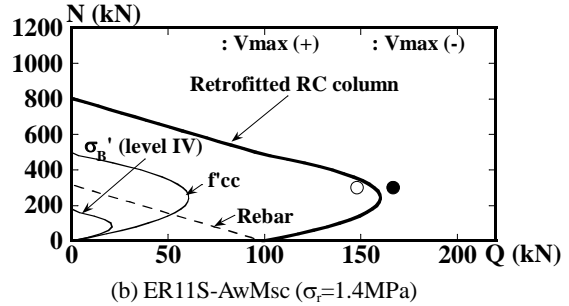
Table 4 Estimated compressive strength of confined concrete after emergency retrofit

	AwLsc	AwMsc	AwHsc	AwMs
σ_B (MPa)	23.9			
σ_r (MPa)	0.5	1.4	2.2	1.6
f'_{cc} (MPa)	5.3	8	13.5	10.5
σ_B' (MPa)	2.4 (0.1 σ_B)			
K_{exp} ($=f'_{cc}/\sigma_B'$)	2.2	3.3	5.6	4.4

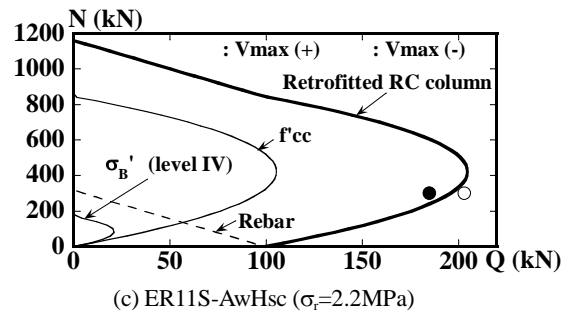
Notes: K_{exp} = strength enhancement of confined concrete.



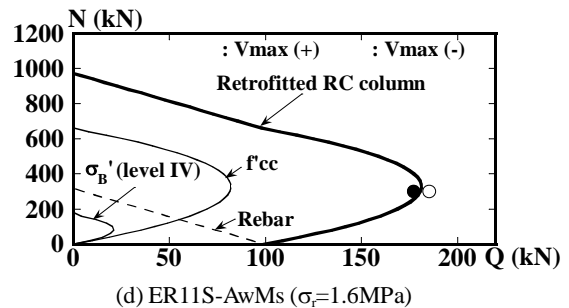
(a) ER11S-AwLsc ($\sigma_r=0.5$ MPa)



(b) ER11S-AwMsc ($\sigma_r=1.4$ MPa)



(c) ER11S-AwHsc ($\sigma_r=2.2$ MPa)



(d) ER11S-AwMs ($\sigma_r=1.6$ MPa)

Fig. 11 N-Q interaction curves

束されたせん断損傷RC柱のコンクリート強度を逆算する。前節のように、最大水平耐力には残留部材角の影響もあるが、この影響を除くことは出来ないため、本節では実験で得られた最大水平耐力をそのまま用いる。本研

究ではせん断損傷 RC 柱を能動拘束して得られた拘束コンクリート強度を「拘束損傷コンクリート強度」と呼ぶ。逆算においては、鉄筋の強度曲線とコンクリートの強度曲線の単純累加曲線が正負の最大水平耐力実験値の平均を通過するようなコンクリート強度を求めた（具体的には単純累加曲線が Fig. 11 に示す太実線となるようなコンクリート強度を求めた）。このようにして求めた軸力 N とせん断力 Q の関係を Fig. 11 に示す。Table 4 には逆算で得られた拘束損傷コンクリート強度 f'_{cc} と損傷レベル IV における損傷コンクリート強度 $\sigma'_B (0.1\sigma_B)^{7)}$ 、および強度上昇率 $K_{exp} (=f'_{cc}/\sigma'_B)$ を示す。なお、損傷レベル IV における損傷コンクリート強度 $\sigma'_B (0.1\sigma_B)$ は、5 体のせん断損傷 RC 柱の鉛直荷重載荷実験で得られたバラつきのある値の平均値である⁷⁾。Fig. 11 より、能動側圧が大きい試験体ほどコンクリートの強度曲線は大きくなるのがわかる。補強 RC 柱には鋼板が圧着されており、フランジ面鋼板の柱頭柱脚には柱周方向にひずみゲージを添付していたが、最大水平耐力時の測定値は 500μ 以下で非常に小さく、従って、コンクリートの強度曲線には鋼板の受動的な横拘束効果はほとんど含まれていない。Table 4 より、損傷コンクリート強度 σ'_B からの強度上昇率 K_{exp} を見ると、能動側圧が大きくなると K_{exp} も増大し、せん断損傷 RC 柱への能動側圧の影響は非常に大きいことが分かる。また、Fig. 11 において、能動側圧が大きい AwHsc 試験体 (Fig. 11 (c)) の実験値は釣合い軸力より下側の曲げの引張領域に位置しており、このことは主筋が引張降伏した実験結果と整合している。

4. 結論

- (1) せん断損傷 RC 柱に導入する能動側圧が大きいほど主筋の付着性状は改善されるため、隅主筋が引張降伏し、優れた履歴性状が得られる。
- (2) 軸ひずみの進行には導入する能動側圧だけではなく、残留水平変位の大きさも影響する。
- (3) 残留水平変位が大きいと、能動拘束されたせん断損傷 RC 柱の耐力と靱性は低下する。

(4) せん断損傷により低下したコンクリート強度は、ラッシングベルトによる能動拘束により見かけ上大きく回復する。

謝辞

本研究は日本学術振興会の平成23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。実験では砂川恒雄 琉球大学技術職員の尽力を頂いた。また、アラミド繊維ベルトはファイベックス（株）から提供を受けた。

参考文献

- (1) 許田昇, 中田幸造, 山川哲雄, 原口貴臣: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No. 2, pp.1027-1032, 2010
- (2) 原口貴臣, 中田幸造, 山川哲雄, 許田昇: 緊張ラッシングベルトと型枠合板で緊急補強を施したせん断損傷 RC 柱の水平加力実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No. 2, pp.1063-1068, 2011
- (3) 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
- (4) 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
- (5) 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
- (6) 許勝雄, 菊池健児, 黒木正幸, 古里勇貴: 外部 PC 鋼棒応急補強 RC 柱の主筋付着性状に関する実験的研究 (その1) 研究目的および損傷度と補強量をパラメータとした実験, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 48 号, pp.569-572, 2009
- (7) 上松茂, 山川哲雄, 吉井大輔, 中田幸造: せん断損傷 RC 極短柱の残存軸耐力と応急補強実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 2, pp. 1123-1128, 2006