

# 論文 アラミド繊維ベルトによりプレストレスを導入した極短柱の耐震・応急補強法

玉寄 幸直<sup>\*1</sup>・山川 哲雄<sup>\*2</sup>・佐藤 元<sup>\*3</sup>

要旨：せん断スパン比が1.0の極短柱で，せん断補強筋比が0.08%と少なく，脆性的なせん断破壊を起こしやすい柱に，アラミド繊維ベルトを外帯筋状に周回させ，カブラ - を介してプレストレスを導入して耐震補強加力実験を行った。高軸力下の曲げ挙動やせん断挙動，さらには応急補強に関する実験結果について取りまとめると共に，これらの解析も合わせて行い，本補強法の有効性を検証した。

キーワード：アラミド繊維ベルト，プレストレス，極短柱，耐震補強，応急補強，靱性

## 1. 序

山川らは既存RC柱の四隅に配置したコーナブロックを介して，アラミド繊維ベルト(以下アラミドベルト)を周回させ，カブラ - で連結しプレストレスを導入する耐震補強法を文献1)で発表した。この補強法は重機を必要としない簡便なドライ工法であるので，地震被災後の余震対策や2次災害を防ぐための応急補強法としても利用できることについて言及し，一部加力実験結果を呈示した。

一方，本補強法は従来のせん断補強効果と受動的横拘束効果に加え，能動的横拘束効果を利用することで，大きな補強効果を得ることができる。しかし，アラミドベルトは帯筋のように主筋を直接拘束していないため，座屈防止の役割を果たしていないと考えられる。そこで，本論で

は主筋が座屈しやすい高軸力下においても，本耐震補強法が靱性改善に有効であるかどうかについて検証する。

## 2. 実験計画

本実験に用いた鉄筋及びアラミドベルト(幅17mm，厚さ0.612mm)の力学特性をTable 1に，補強RC柱試験体の一覧をTable 2に示す。柱試験体の寸法は250×250×500mmであり，せん

Table 1 Mechanical properties of material

	a (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u, \sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_u, \epsilon_y$ (%)	E (GPa)
Aramid fiber belt	10.4	2065	1.75	118.0
Rebar(D10)	71.0	371	0.20	185.5
Hoop(3.7 $\phi$ )	11.0	390	0.19	205.0

$\sigma_u/\epsilon_u$ =fracture strength/strain of belt,  
 $\sigma_y/\epsilon_y$ =yield strength/strain of steel, a=cross section area.

Table 2 Column specimen

	ER01S-A65	R01S-A65	R01S-A65Nm	R01S-A65m	R01S-A65h	R01S-Aw65h
Specimen M/(VD)=1.0						
Aramid belt	—		2ply-@65			2ply-w-@65
Prestress	—	7000 $\mu$ (826MPa)		Non	7000 $\mu$ (826MPa)	
Axial force ratio	0.2		0.4		0.6	
$\sigma_B$	13.6MPa		17.1MPa			
Common details	Rebar: 12-D10( $p_g=1.38\%$ ) Hoop: 3.7 $\phi$ -@105( $p_w=0.08\%$ ) unit: mm					

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科 環境建設工学専攻 (正会員)

\*2 琉球大学教授 工学部 環境建設工学科 工博 (正会員)

\*3 横浜ゴム(株) MB事業開発部 (正会員)

断スパン比1.0の極短柱となっている。柱試験体の主筋比は $P_g=1.36\%$ で、帯筋比は $P_w=0.08\%$ である。極短柱で、しかもせん断補強量が極めて少なく、耐震補強を施さなければ既存RC柱として脆性的なせん断破壊を起こす試験体である。

応急補強や耐震補強に用いたアラミドベルトの幅は17mm(ダブル幅ベルトは $17 \times 2=34\text{mm}$ )である。なお、ベルトはアラミド繊維シートの端部どうしを接着して輪を作り、重ねた状態で柱の四隅に配置したコーナブロック(内法寸法 $50 \times 50\text{mm}$ で厚さ20mm)を介して柱の外側に周回させた。この際、緊張力が均一になるように、コーナブロックの外側に20mmの曲率半径を設け、かつフィルムを貼付した。輪になったベルトを重ねてできた両端を柱試験体の柱幅面(水平力と直交する面)に配置したカプラで連結し閉鎖形にした上で、ボルトとナットを用いてプレストレスを導入した(Fig. 1参照)。それに伴うベルトのひずみは、破断ひずみの約4割に相当する $7000\mu$ (応力度に換算して826MPaで、シングルベルト1本当たり17.2kN)前後であり、両柱せい面(水平力と平行な面)のベルトに貼付したひずみゲージによって緊張力を管理した。

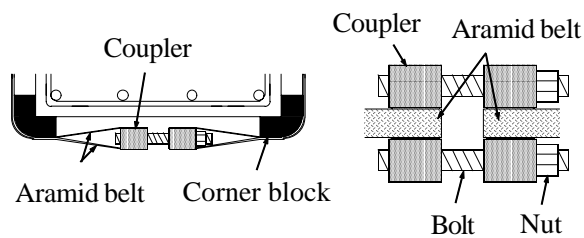


Fig. 1 Detail of seismic retrofit technique

ベルトピッチはすべて65mmである。また、コンクリートのはらみ出しを抑えるために柱表面(コーナブロックの間)に4面とも厚さ3mmの亚克力板(140×480mm)を、ベルトと亚克力板の間には木片(140×17×17mm)をそれぞれ設置する。その結果、コンクリートがはらみ出せば亚克力板を介して木片が外に押し出され、アラミドベルトに横分布力が作用する。この分布力はアラミドベルトに引張力を増加させ、受動的横拘束効果がさらに期待できる。

ER01S-A65は応急補強試験体である。補強前の基準試験体をせん断破壊させた後、時間をおいて応急補強を施し、再度加力実験を行った。この応急補強によって回復した柱の水平耐力がどの程度であるかを把握するために、恒久的耐震補強として健全なRC柱試験体に最初から補強したR01S-A65を用意した。

高軸力の試験体は4体で、その内2体は軸力比0.4のもとでシングルベルトにプレストレスを導入したR01S-A65mと、ノンプレストレスのR01S-A65Nmである。軸力比0.6のもとではシングルベルトを用いたR01S-A65hと、ダブル幅ベルトを用いたR01S-Aw65hの2体である。

載荷は建研式加力装置を用いて行った。加力は部材角Rを0.5%ずつ増加させ、同一振幅で3サイクルずつ繰り返し、3.0%まで行った。また、部材角が3.0%まで至っても、実験の継続が可能であれば、部材角4%及び5%で正負1回繰り返し、耐震性能の確認を行った。

### 3. 実験結果と考察

試験体のせん断力Vと部材角Rに関する履歴曲線、及び柱の平均伸縮ひずみ $\epsilon_v$ と部材角Rの関係をFig. 2に示す。応急補強試験体ER01S-A65の履歴曲線に関して、黒色は補強前を示し、灰色は補強後を示す。なお、V-R曲線中の点線は多段配筋柱の曲げ強度略算式に、P- $\delta$ 効果を考慮したものである。

応急補強を施す前の柱試験体ER01S-A65は、部材角が正側の $R=0.2\%$ 前後で比較的大きなせん断ひび割れが発生し、耐力が急激に低下するとともに変形が一気に $R=0.5\%$ 近くまで進行した。次いで負側では $R=0.45\%$ で大きなせん断ひび割れ(最大ひび割れ幅2.5mm)が発生し、耐力が大幅に低下するとともに変形が一気に $R=0.9\%$ まで進展した。その後、 $R=0.5\%$ で正負2回繰り返した後、 $R=1\%$ で正負1回繰り返した。その結果、せん断ひび割れ幅が正負とも約4mmに拡大した。そこで、水平力を零にもどすと損傷したRC柱試験体の部材角が $R=-0.77\%$ 残留した。この残

留変形を残したまま、軸力を軸力比にして0.2のまま約25時間載荷し続けた。その間の変動は柱中心軸上の平均伸縮ひずみが圧縮側に $50\mu$ 程度増加し、 $1230\mu$ の圧縮ひずみが生じていた。しかし、残留水平変位に関しては変動は見られなかった。その後、アラミドベルト(幅17mmのシングル)を65mm間隔で巻き付け、プレストレス導入に伴うひずみを約 $7000\mu$ にして応急補強を施した。この時点で残留変形が $R=-0.1\%$ 前後に戻るとともに、柱中心軸上の平均伸縮ひずみも

$-325\mu$ 程度になり、元に戻る傾向があった。即ち、損傷した柱にプレストレスを導入して応急補強を施すと、開いたひび割れが閉じて、復元力と鉛直支持能力がかなり回復することを意味する。

上記の状況を確認後、応急補強を施したまま軸力を加力装置の自重である $60.3\text{kN}$ (軸力比で0.07)まで戻した。それから約15時間後に応急補強柱試験体ER01S-A65として、軸力比0.2まで再載荷し、プレストレス導入に伴うアラミドベルトのひずみを $7000\mu$ に再調整し、加力実験を行った。この結果得られたV-R曲線と $\varepsilon_v$ -R曲線から、応急補強によって耐震性能がかなり回復していることがわかる。しかし、せん断破壊によってかなり損傷した柱試験体にドライ応急補強(ひび割れ面にエポキシ樹脂等を一切注入していない)を施しているの、水平耐力が曲げ強度略算値に達していない。これを検証するために、損傷のない柱試験体に恒久的な耐震補強として、同一の耐震補強を施したR01S-A65のV-R曲線と $\varepsilon_v$ -R曲線をFig. 2に示す。これらの図によると、水平耐力の実験値は曲げ強度略算値に到達し、 $\varepsilon_v$ -R曲線はシャープな形状になり、伸びひずみ $\varepsilon_v$ が部材角Rの増大とともに大きく立ち上がっている。ER01S-A65とR01S-A65に見られるこれらの差異は、耐震補強前の柱試験体の損傷の有無によるものである。両者にこの程度の差異しかないことから、本論で提案する応急補強が地震被災直後の損傷建築物に十分適用可能であると判断できる。ただし、応急補強が適用できる損傷限界や、エポキシ樹脂等の注入によるひび割れ面の修復後の恒久補強に関しては、まだ十分な検討が必要であり、今後の研究課題である。

高軸力シリーズではプレストレスを導入していない柱試験体R01S-A65Nmは、 $R=0.2\%$ 前後で柱せい面に顕著なせん断ひび割れが入り、水平耐力の増大に歯止めがかかった。せん断ひび割れが生じると、柱が膨張しアラミドベルトの横補強効果を期待できる。正負繰り返し回数と部材角の増大に伴い、せん断ひび割れ幅や数が拡大し、柱の損傷が一段と進展した。しかし、アラ

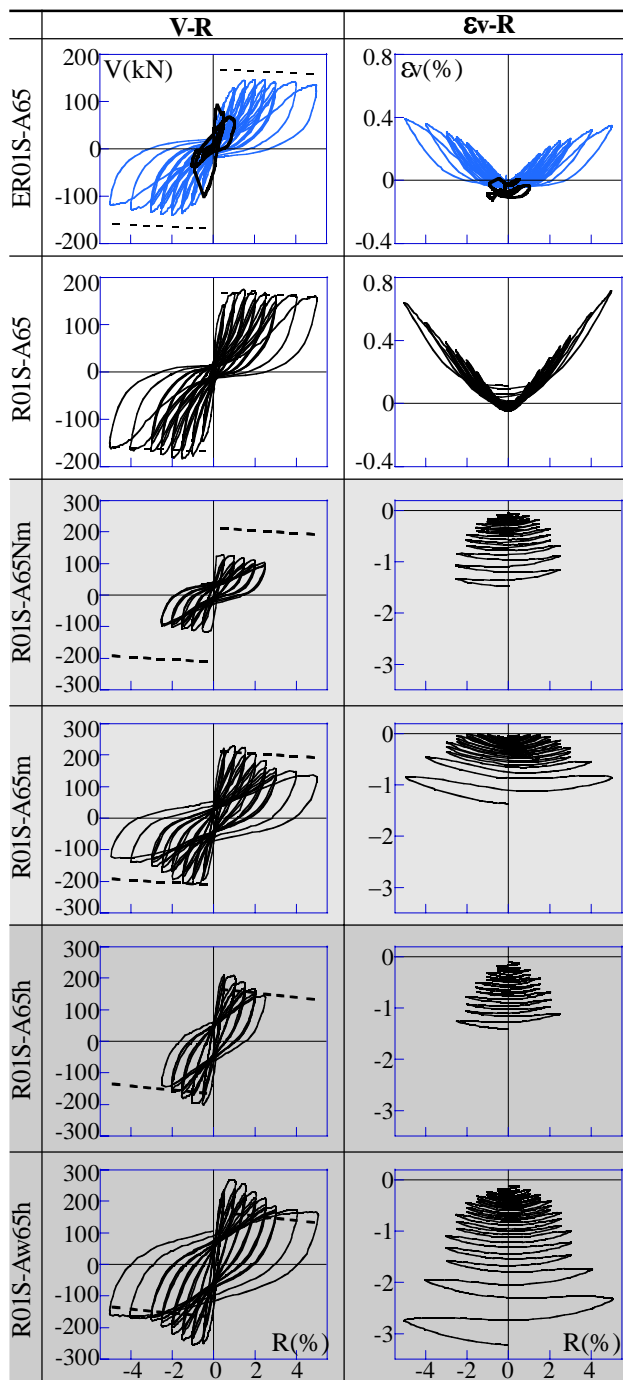


Fig. 2 Measured V-R and  $\varepsilon_v$ -R

ミドベルトによる横補強効果のため、水平耐力の低下は緩やかである。軸力比が0.4と大きく、柱の損傷も大きいので柱中心軸上での平均伸縮ひずみは圧縮ひずみが進行している。

一方、プレストレスを導入した補強RC柱試験体 R01S-A65m においては、水平耐力が  $R=0.5\%$  で曲げ強度略算値に到達している。 $R=1.0\%$  で柱せい面に×印のせん断ひび割れが目立ちはじめ、 $R=1.5\%$  から水平耐力が下降に転じた。 $R=3\%$  まで水平耐力は少しずつ下降していったが、 $R=4\%$  と  $5\%$  では目立つような水平耐力の低下は観察されなかった。また、柱中心軸上の伸縮ひずみの進行も小さく、耐震性能の改善は明らかである。このように柱試験体 R01S-A65Nm と比較して、プレストレスの効果は明白である。

軸力比を 0.6 に上げた補強 RC 柱試験体 R01S-A65h は、高軸力に見あったアラミドベルト補強量不足のため、大変形域までの加力実験が不可能であった。高軸力のため、 $P-\delta$  効果による耐力低下も大きく、また  $R=1.5\%$  前後から曲げ圧縮破壊の傾向も顕著になり、主筋の座屈も始まった。

上記の実験結果を受けて、ベルト幅をダブル幅にしてプレストレスを前回同様に  $7000\mu$  導入した柱試験体 R01S-Aw65h の加力実験結果を Fig. 2 に示す。軸力比 0.6 という高軸力下にあっても、高い耐震性能を確保している。大変形域の  $R=4\sim 5\%$  では、アクリル板が4面ともすべて破損した。これは、コーナブロックで押えた以外の領域で、高軸力のためコンクリートがはらみ出し、その圧力でたわみが大きくなりアクリル板が破損したものと推定される。また、部材角が大きくなると、柱中心軸上の伸縮ひずみにおける圧縮ひずみの進行も大きくなっている。アラミドベルトは初期プレストレスが大きいので、部材角が小さい範囲では効果的であるが、いったんひび割れが生じ、柱の損傷が拡大してくると膜剛性が比較的小さいので、横補強材としての伸縮剛性に依存する受動的横拘束効果を大きくは期待できない。この点では、軸剛性の大きい PC 鋼棒がやや有利である。

アラミドベルトの繊維方向におけるひずみゲージの測定結果を Fig. 3 に示す。ER01S-A65 では、応急補強を施した柱試験体が既に損傷しているので、補強後に再度加力実験を行うと、ベルトがいったん少しゆるむ。しかし、部材角が増大してくると、ベルトのひずみも初期ひずみの  $7000\mu$  を少し超えるようになる。一方、健全な柱に恒久的な補強を施した R01S-A65 は、柱頭でアラミドベルトが補強効果を発揮している。

一方、高軸力シリーズに関してプレストレスを導入していない R01S-A65Nm は、部材角の増

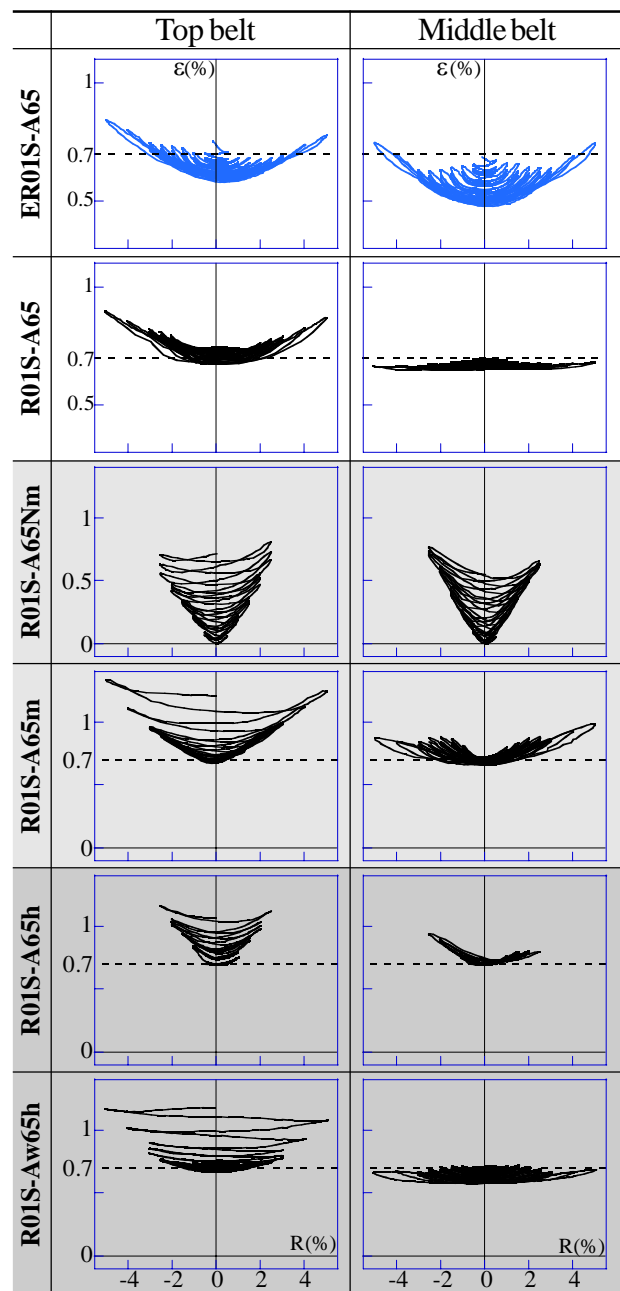


Fig. 3 Measured strain of aramid fiber belt of column specimens

大とともにアラミドベルトの引張りひずみが着実に増大している。しかも、アラミドベルトの配置位置とは無関係にほぼ一様にひずみが増大している。しかし、他の3体は柱頭部近傍のひずみが柱中央部のそれより大きく、柱頭部の横補強が重要であることを示唆している。これは、軸圧縮力が大きいので柱頭が曲げ降伏後主筋が座屈し始め、曲げ圧縮破壊の傾向が強くなってきたためと考えられる。

#### 4. 2000年度の実験結果との比較

本年度(2001年)の試験体の特色はアラミドベルトによる横拘束効果の増大をはかるために、コーナブロック間の隙間(480×140mm)に厚さ3mmのアクリル板を配置し、さらにアクリル板とアラミドベルトとの間に木片を挿入したことである。これはコーナブロックの厚さが本試験体では、前年度と同様に20mmもあるため、その上を周回するアラミドベルトと柱表面との間に20mmの隙間ができるので、ベルトがコンクリートのはらみ出しを直接押さえることができず、主筋の座屈防止に寄与していないからである。

比較する補強RC柱試験体はアクリル板を用いていないR00S-A65h/2と、アクリル板を4面とも用いたR01S-A65mの2体である。両試験体の軸力比は共に0.4であるが、コンクリート強度が19.8MPaと17.1MPaである。それ以外の配筋、形状、補強法などはすべて同一である。ただし、ア

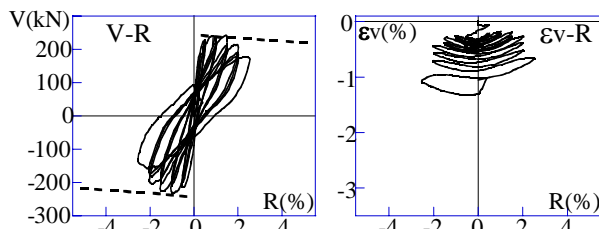


Fig. 4 Measured V-R and  $\epsilon_v$ -R of R00S-A65h/2

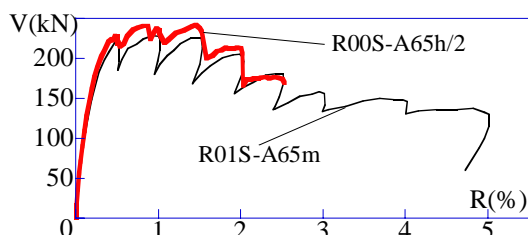


Fig. 5 Measured skeleton curve

ラミドベルトに導入されたプレストレスのひずみレベルがR00S-A65h/2は約8000 $\mu$ に対して、R01S-A65mは約7000 $\mu$ である。Fig. 4にR00S-A65h/2のV-R曲線と $\epsilon_v$ -R曲線を、文献1)から転記する。Fig. 2のR01S-A65mと比較すれば、アクリル板の配置により横拘束効果が増大し、V-R曲線や $\epsilon_v$ -R曲線が改善されていることがわかる。このことは、Fig. 5に示したスケルトンカーブの比較からも靱性の改善が見られる。

#### 5. 解析的検討

崎野・孫式<sup>2)</sup>にプレストレスによる能動的横拘束圧として、Richart<sup>3)</sup>らの静水圧に基づくコンクリート強度の増大効果をファイバーモデルに適用して計算したN-M相関曲線をFig. 6に示す。N-M相関曲線中に示した各点は実験で得られた最大水平耐力値である。軸力比が大きくなるほど横拘束効果の影響が大きいことがわかる。

AIJ靱性設計指針式<sup>4)</sup>に基づき、せん断破壊時と付着割裂破壊時のせん断強度 $V_u$ と $V_{bu}$ を計算した。また、曲げ強度は多段配筋柱の略算式 $V_f$ と、前述の構成則を適用したファイバーモデルの2通りで計算した(Fig. 7参照)。その結果、耐震補強前の応急補強試験体ER01S-A65は、せん断強度 $V_u$ と実験結果がほぼ一致している。応急補強後はファイバーモデルによる曲げ強度と実験値が一致するようにコンクリート強度をおきかえて計算したところ、6.5MPaで一致した。ただし、付着割裂時のせん断強度 $V_{bu}$ (小谷・前田式<sup>5)</sup>)が計算上最も小さい。これは、柱試験体R01S-A65においても同様である。また、高軸力

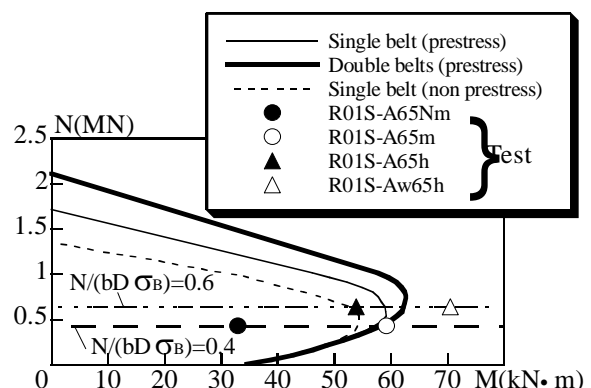


Fig. 6 N-M curve

シリーズにおいても曲げ降伏が先行した試験体はすべてファイバーモデルによる計算値と実験

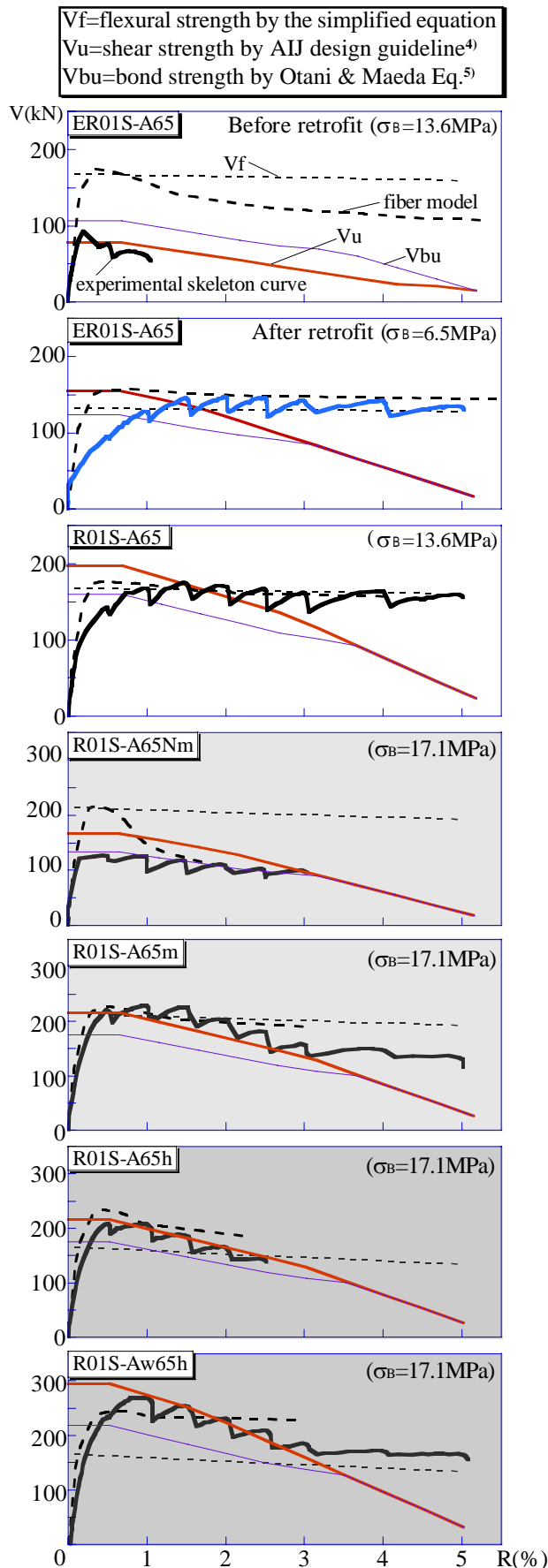


Fig. 7 Measured skeleton curve and calculated strength

結果がほぼ一致している。しかし、軸力が高く、横拘束効果が大きいほど曲げ強度略算値とファイバーモデルとの差異が大きくなっていることは、 $N$ - $M$ 相関曲線と同じである。R01S-A65Nmのように、プレストレスが導入されないと付着劣化を起こし、耐力が増大しないこともFig. 7からわかる。しかし、アラミドベルトのおかげで変形が進んでも耐力の低下はほとんどない。

## 6. 結論

- 1) 本補強法は応急補強法としても活用できる見通しを得た。しかし、応急補強可能な損傷限界や、エポキシ樹脂等を損傷ひび割れ面に注入後の本補強法の適用に関しては、さらなる検討が必要である。
- 2) 本補強法は、コンクリートのはらみ出しをアクリル板と木片の利用により防止することで、高軸力下においても主筋の座屈を防止し、有効に活用できる見通しを得た。
- 3) 高軸力下ではアラミドベルトにプレストレスを導入したほうがはるかに有利である。
- 4) AIJの靱性型設計指針式で破壊形式をほぼ予測できそうである。

謝辞: 本研究は平成13年度科学研究費補助金(基盤研究(B) 研究代表者 山川哲雄)を受けた。

## 参考文献

- 1) 佐藤元, 山川哲雄, 稲葉はるか, Koorosh N. Nesheli: アラミドベルトとコーナブロックを用いた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, 2001.7
- 2) 崎野健治, 孫玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No. 461, pp. 95-104, 1994.7
- 3) Richart, F.E. et al.: A study of the Failure of Concrete under Compressive Stress, University of Illinois, Engineering Experimental Station Bulletin, No. 185, 1928
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1999.8
- 5) 小谷俊介, 前田匡樹: 異形鉄筋とコンクリートの付着応力伝達機構に基づいた付着割裂強度式(その1,2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C構造II, pp. 655-658, 1994.9