

論文 アラミド成形管と芯筋を用いた合成柱の高軸力下での実験的研究

下濱 光太郎^{*1}・山川哲雄^{*2}・大浜 綾子^{*3}

要旨: 正方形鋼管に代わって, 打込み型枠兼横補強材として試作したアラミド成形管と, 柱部分にのみ配筋した芯筋をRC柱と組み合わせたハイブリッド柱を製作し, 高軸力(軸力比0.5)下の弾塑性挙動を検討するために正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果, 成形管を用いた上に帯筋を多量に配筋することによりカバーコンクリートの剥離・剥落が防止され, せん断補強, 横拘束圧及び主筋の座屈防止効果が増大した。芯筋はピン支持相当にもかかわらず, 付着の影響により曲げモーメントも負担し, 柱の軸ひずみの進行が抑制され, 高軸力下でも望ましい耐震性能を確保することができた。

キーワード: 芯筋, アラミド成形管, ハイブリッドRC柱, 横拘束, 高軸力

1. はじめに

横補強効果を高めるために中子筋付き帯筋を多用し, カバーコンクリートの剥離・剥落を防止することも可能なアラミド成形管(以後AFRP管と呼称する)を横補強材兼打込み型枠材として利用すれば, 効率的な耐震性能を期待できる¹⁾。しかし, 軸圧縮力が高くなると軸ひずみの増加や主筋の座屈発生などにより, 耐震性能もあまり期待できなくなる恐れがある。それゆえに, 軸力の負担が可能な芯筋を柱断面中央に配筋し, 高軸力下でも効果的なハイブリッドRC柱を目指して, 一定軸圧縮力(軸力比0.5)下の正負繰り返し水平加力実験を計画した。

本研究ではD51の太径の鉄筋を1本, 芯筋として柱断面中央に配置した。この芯筋は上下スタブに定着せず柱部分にのみ配筋しているため, 柱頭と柱脚部における芯筋の境界条件はピン支持に相当する。

本研究の目的はAFRP管と帯筋を組み合わせることで二重に横補強し, かつ芯筋をピン支持で配置することによって, 高軸力下でも望ましい耐震性能が確保できるかどうかを検証することにある。

2. 実験計画

使用材料の力学特性を Table 1 に示す。アラミド繊維シートはヤング率が鋼の約 1/2 に相当するアラミド 1 で作られており, 1 層あたり繊維目付量が 280g/m² である。AFRP管は断面隅角部の応力集中を緩和し, 横拘束効果を高めるために 25mm の曲率半径をとり, アラミド繊維シートをエポキシ樹脂で成形することにより試作した。試験体一覧を Table 2 に示す。柱試験体は 250mm × 250mm の正方形断面で, 柱高さ 750mm, せん断スパン比 M/(VD) が 1.5 の 4 体である。D6 を用いて外周帯筋の他に中子筋を配筋した。帯筋比は AIJ 上限値の $p_w=1.2\%$ ²⁾ を上回る $p_w=1.71\%$ である。AFRP管には直接軸圧縮力が伝達しないように, 柱頭・柱脚部に 10mm 程度のクリアランスを設けている。

Table 1 Properties of materials

Reinforcement	Thickness or section area	σ_u, σ_y (MPa)	ϵ_u, ϵ_y (%)	E (GPa)
Steel bar (D13)	127 mm ²	359	0.18	202
Steel bar (D6)	32 mm ²	σ_y 466	ϵ_y 0.21	223
Steel bar (D51)	2027 mm ²	367	0.21	173
AF sheet (1 ply)	0.193 mm	σ_u 2060	ϵ_u 1.80	118

Notes: σ_u = tensile strength of AF sheet, σ_y = yeild strength of steel, ϵ_u = tensile strain of AF sheet, ϵ_y = yeild strain of steel, E = modulus of elasticity of steel or AF sheet.

* 1 琉球大学 工学部環境建設工学科 (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)

基準柱試験体 H03M-A0 は AFRP 管なしの通常の RC 柱である。H03M-A22 は H03M-A0 に 2 層の AFRP 管で横補強を行ったものである。H03M-A0C, H03M-A22C は H03M-A0, H03M-A22 の正方形断面中心に、軸ひずみの進行を抑えるために、D51 の鉄筋を芯筋として配筋した試験体となっている。

実験は 2 台のサーボアクチュエータにより、加力ビームをテストベッドに対して常に平行に維持する加力装置を用いて、一定軸圧縮力(軸力比 0.5)下の正負繰り返し水平加力実験を行った。部材角 R を 0.5% ずつ増分させながら、同一振幅で 3 サイクルずつ正負繰り返しの水平変形制御で 3% まで行った後、4.0, 5.0% を目標に 1 サイクルずつ正負繰り返した。

3. 実験結果

Fig. 1 にせん断力と部材角の関係である V-R 曲線と、柱中心軸上の平均軸ひずみと部材角の関係である ϵ_v -R 曲線を示す。軸ひずみは、柱の鉛直変位を柱高さで除した値である。なお、V-R 曲線中の点線による斜線は芯筋を無視し、

Table 2 Column specimens

Specimen	H03M-A0	H03M-A22	H03M-A0C	H03M-A22C
Elevation (mm)				
Cross section (mm)				
Core steel rod	Non		D51 (pin)	
AFRP tube	Non tube ($p_{wf} = 0\%$)	2-ply tube ($p_{wf} = 0.15\%$)	Non tube ($p_{wf} = 0\%$)	2-ply tube ($p_{wf} = 0.15\%$)
Common details	Longitudinal reinforcement : 12-D13 ($p_g = 2.44\%$) Transverse reinforcement : 4-D6 @30 ($p_w = 1.71\%$) $M/(VD) = 1.5$ $N/(bD\sigma_B) = 0.5$ $\sigma_B = 52.3$ (MPa)			

δ 効果を考慮した多段配筋柱の曲げ強度略算式²⁾である。ただし、帯筋や AFRP 管による横拘束効果や芯筋の軸力負担効果は、一切考慮していない。また H03M-A0 は、部材角 $R = -4.0\%$ に向かう途中でアクチュエータの不調により加力を一時中断したため、中断後の曲線は点線で示す。Fig. 2 に各試験体のひび割れ図を示す。AFRP 管がない試験体では各部材角ごとにひび割れの観察を行ったが、AFRP 管を使用した試験体に関しては加力実験終了後、AFRP 管を剥いでひび割れを観察した。

H03M-A0 は、部材角 $R = 0.4\%$ 時に柱隅角部の

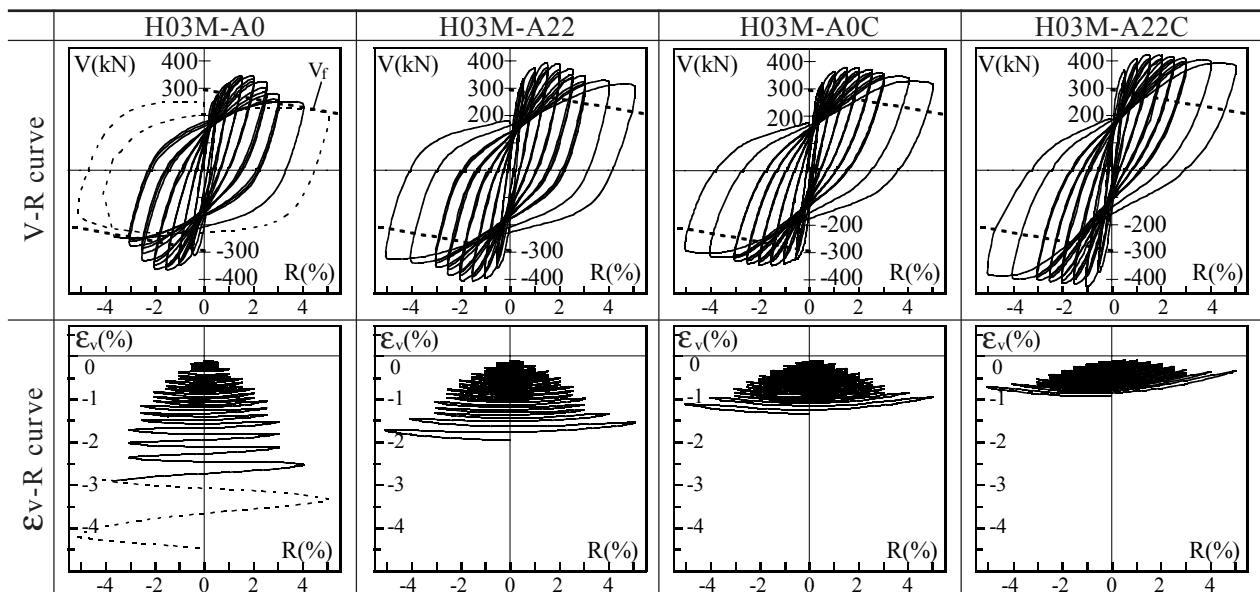


Fig. 1 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

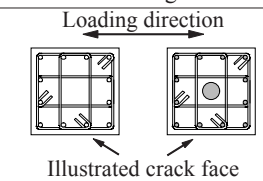
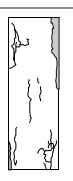
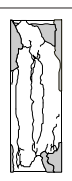
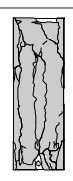





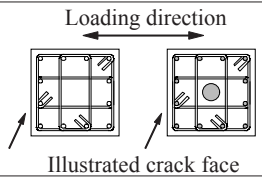
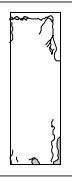

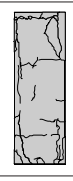

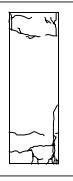

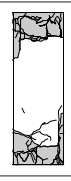

Specimen	H03M-A0			H03M-A22	H03M-A0C			H03M-A22C
Drift angle	0.5%	1.5%	5.0%	5.0%	0.5%	1.5%	5.0%	5.0%
								
								

Fig. 2 Observed cracking patterns

主筋に沿ったひび割れと曲げひび割れが発生し、2サイクル目の $R=-0.3\%$ 時に柱隅角部のカバーコンクリートが剥がれ落ちた。 $R=-1.5\%$ で耐力が最大となった。その後低下し、実験終了時には耐力は最大時の64%にまで低下した。また残留変形が大きく、エネルギー吸収の大きい紡錘形状になっている。 ϵ_v-R 曲線における軸ひずみ増加も、加力実験終了時で約4.5%と多くなっている。AFRP管を使用していないため、柱頭・柱脚のカバーコンクリートが剥がれ落ちるなどの損傷が激しく、実験終了時にはほぼ全面的にカバーコンクリートが剥がれ落ちた。

2層のAFRP管で横補強をしたH03M-A22では、 $R=-1.5\%$ で耐力が最大となった。カバーコンクリートがAFRP管で抑えられるので、実験時にカバーコンクリートが剥落したH03M-A0に比べ耐力は大きくなり、実験終了時にも最大耐力の80%を維持した。AFRP管で横補強効果を高めたため、 ϵ_v-R 曲線における圧縮ひずみの増加も、H03M-A0に比べ少なくなっている。

H03M-A0に芯筋を配筋したH03M-A0Cは $R=1.4\%$ 時に耐力が最大となり、実験終了時にも最大耐力の86%を維持した。H03M-A0と比べ、芯筋を配筋したため柱の損傷は小さく、カバーコンクリートの剥落は柱端部に集中した。 ϵ_v-R 曲線における圧縮ひずみの増加も少なく、若干立ち上がった曲線を描いている。

H03M-A22に芯筋を配筋したH03M-A22Cは、4体の試験体の中で最も大きな耐力を発揮した。

実験終了時にも最大時の91%を維持し、十分な靱性を発揮している。芯筋を配筋したため柱の損傷も小さく、 ϵ_v-R 曲線における軸ひずみの増加も4体中最も小さい値を示している。芯筋を配筋していない試験体は、ひび割れが全体的に大きく伸びているが、芯筋を配筋した試験体は、柱幅面の柱端部に集中している。

AFRP管を使用した2体の試験体の、AFRP管の周方向の引張ひずみに関する測定結果をFig. 3に示す。測定値は各部材角の1サイクル目のAFRP管のひずみである。測定に用いたひずみゲージは柱せい面と幅面の柱頭、柱中央、そしてその間の計6ヶ所に貼付した。連続繊維補強材のせん断設計用引張強度算定に使用されている有効ひずみは 7000μ である³⁾。試験体H03M-A22、H03M-A22Cの周方向のひずみの最大がゲージ貼付面(A)では 7000μ を越えている。周方向のひずみは柱中央に比べ、柱頭のひずみが大きくなる傾向がある。柱端部はせん断力に加えて曲げモーメントが加わり、コアコンクリートの損傷と膨張が生じやすいからと思われる。

Fig. 4に芯筋のひずみを示す。ひずみゲージは柱幅面の柱頭、中央に対になるように貼付した。ピン支持配筋の芯筋の役割が軸力を負担するだけなら、軸力比0.5の軸力で芯筋は降伏しない。因みに、その場合の芯筋の軸ひずみは約0.05%である。しかし、芯筋はコンクリートの内部で付着の影響を受け、芯筋の断面端部近傍は曲げ降伏している。このことから芯筋は軸力

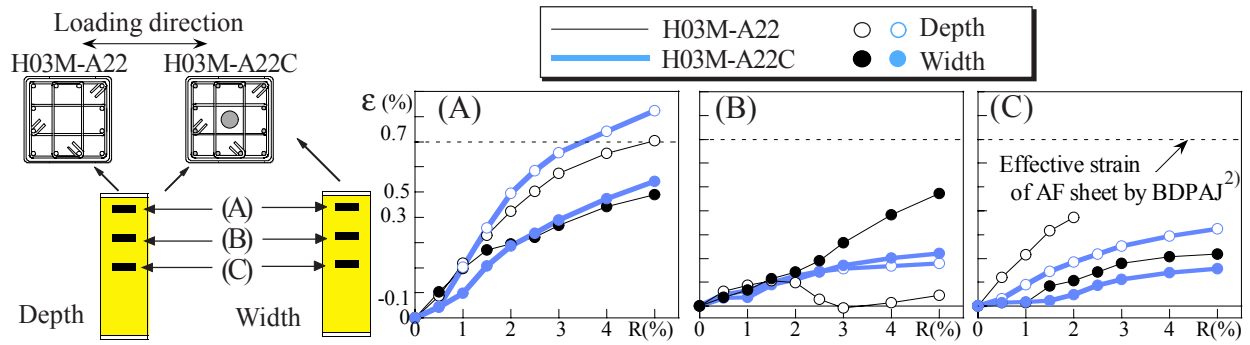


Fig. 3 Measured strain of AFRP tube versus drift angle relationships

負担だけでなく、曲げ強度にも寄与していることがわかる。

Fig. 1のV-R曲線より得られた累積エネルギー吸収量の比較をFig. 5に示す。芯筋を用いていない試験体は残留変形が大きく、特にR=4.0,5.0%で膨らんだ履歴曲線を描いたため、芯筋を用いた試験体に比べエネルギー吸収量が大きくなっている。また、AFRP管で横拘束した試験体のエネルギー吸収量は、AFRP管を用いていない試験体より大きい。

4. 解析的検討

Fig. 6にコンクリートの構成則を示す。無拘束コンクリート以外の曲線にはManderらの提案式⁴⁾による横拘束効果が考慮されている。AFRP管の横拘束効果の計算にあたっては、Fig. 3より、最大耐力時でAFRP管の周方向の引張ひずみが約3500 μ 程度であったので、そのときの応力を用いた。帯筋の内側と外側では横拘束条件が異なっている。例えば、AFRP管を使用しているH03M-A22、H03M-A22Cの帯筋内部におけるコンクリートは帯筋とAFRP管で二重に横補強されているが、帯筋の外側はAFRP管のみで補強されている。同様にAFRP管を使用していないH03M-A0、H03M-A0Cの帯筋内部は帯筋で横拘束されているが、カバーコンクリートは無拘束の状態となっている。

Fig. 7 (a)(b)(c)にN-M相関曲線を示す。(a)は無筋コンクリート柱と主筋、芯筋のN-M相関曲線である。コンクリートは帯筋の内外で拘束条

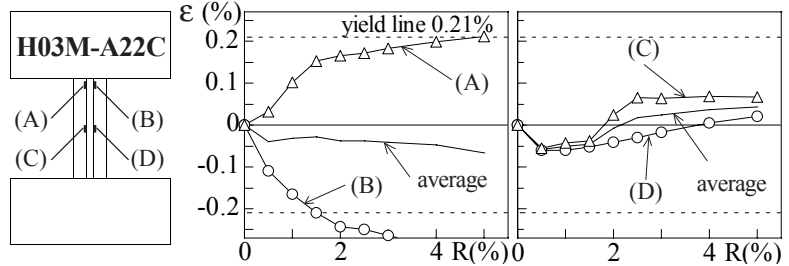


Fig. 4 Measured strain of a core steel rod

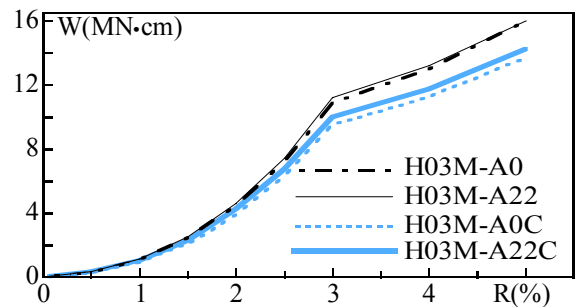


Fig. 5 Accumulated absorbed energy

件が異なるため、コア部分とカバーコンクリート部分に分けて計算を行った。(b)はRC断面柱として、(a)の主筋や芯筋を無筋コンクリート柱に単純累加したものである。AFRP管を使用していない試験体H03M-A0とH03M-A0Cは、最大耐力時に柱頭・柱脚のカバーコンクリートが剥離していたので、(b)ではコアコンクリートの断面を用いた。(c)はファイバーモデルで計算し

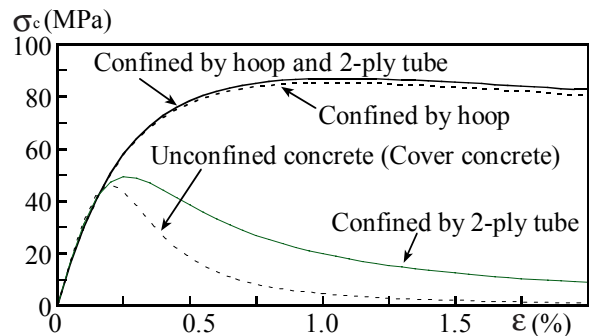


Fig. 6 σ_c - ϵ curves for concrete

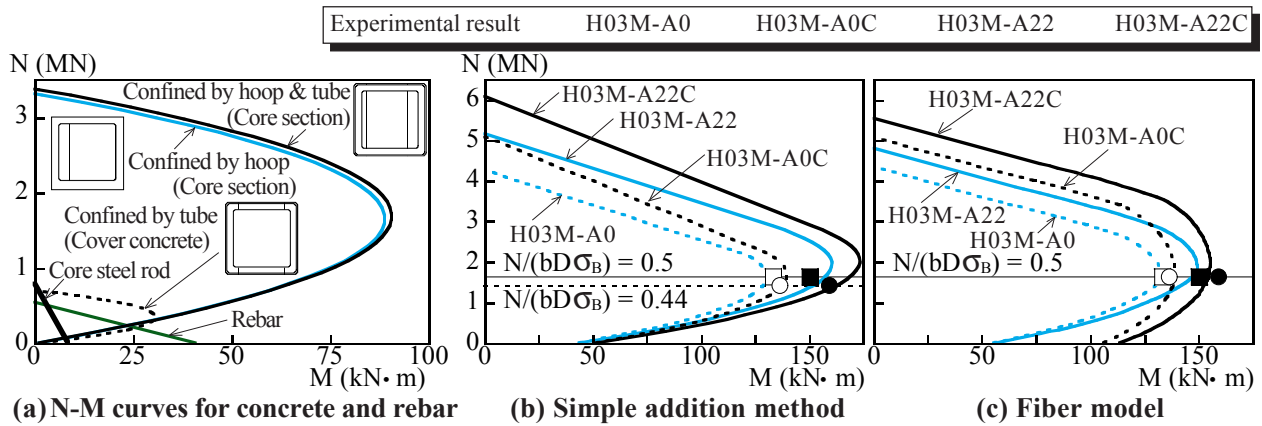


Fig. 7 N-M interaction curves

たものである。(a), (b)は, Fig. 6の構成則の最大値を用いて計算したが, (c)は断面の圧縮部分に Fig. 6の構成則を用えており, AFRP管を用いていない試験体のカバーコンクリートは無拘束コンクリートの強度を用いた。(b), (c)に示した各印は実験で得られた最大水平耐力値である。

芯筋は実験計画ではピン支持になるように配筋したが, 実際はコンクリート内で芯筋に付着が生じるために個材モーメントが生じ, せん断力を負担するものと考えた。軸力比0.44は芯筋が負担する軸力を差し引いた値であるが, ファイバーモデルでは芯筋の負担分は自動的に計算されている。その結果, 単純累加計算では, AFRP管を使用していない2体は, コアコンクリートの断面を用いて行った計算結果と実験結果が概ね一致している。AFRP管を使用している2体も実験結果とほぼ一致している。AFRP管が2プライと薄く, そのひずみも小さいため AFRP管の横拘束効果は, 帯筋と比べると非常に小さく, コンクリート強度の増大もわずかである。しかし, AFRP管がコンクリートの剥離・剥落を防止するため, 軸ひずみが抑えられ, 水平耐力が増大した。よって, AFRP管を使用した試験体は, AFRP管を使用しなかった試験体に比べ累加強度, ファイバーモデルともにより大きな曲げ及び軸圧縮強度を示した。

単純累加強度式とファイバーモデルでは Fig. 7(b), (c)に示すように, 軸力が零の場合, 芯筋があると曲げ強度に大きな差異が生じている。

この場合の力学モデルを Fig. 8に示す。無筋コンクリート柱ではコンクリートのみで引張り力を負担できないので, 軸力が零の場合曲げ強度は零になる。主筋が対称に配筋されると軸力が零の場合, コンクリートに生じる圧縮応力は小さく, かつそれによる曲げ強度は小さいので, 単純累加強度式とファイバーモデルの解に大きな差異は生じない。しかし, 芯筋が配筋され中立軸が芯筋の中心から少しでもずれると, それに釣り合うようにコンクリートに圧縮応力が生じ, この応力が軸力が零の場合でも, 主筋とともに曲げ強度を生み出すことになる。したがって軸力が零の場合, コンクリートの曲げ強度が零である単純累加強度式による解は, ファイバーモデルの解に合わなくなり誤差を生じる。

次に加力実験で得られたスケルトンカーブと AIJ 靱性指針式による各強度算定式⁵⁾, ファイバーモデルで計算した曲げ強度曲線を比較する (Fig. 9参照)。曲げ強度については芯筋や横拘束効果を見捨てた多段配筋柱の曲げ強度略算式と, Fig. 7(c)で得た値を併せて示す。芯筋を使

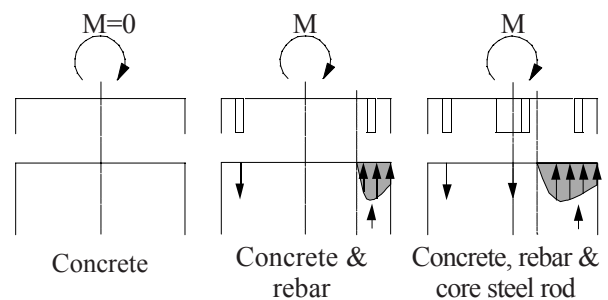


Fig. 8 Mechanical model of flexural strength at zero axial force

用している試験体に関しては、芯筋が負担する軸力を差し引いた。せん断強度にも横拘束効果により増大したコンクリート強度を算入した。アラミド繊維がせん断強度に寄与する影響については、文献3)による0.7%時の応力を用いた。横拘束効果を考慮したことによりコンクリートの強度が増大し、曲げ強度、せん断強度ともに増加した。これよりせん断破壊しにくいことや、横拘束効果を考慮しなければ曲げ強度略算式では、実験値を表現できないことがわかる。

また、 V_f と V_u のプロットが交わるころでは、せん断破壊は生じていない。これは、AIJ靱性指針式が曲げによる塑性ヒンジ部のせん断強度を低めに評価していることと、本論文の合成RC柱は多量の帯筋に加えて、アラミド成形管で二重に高横補強されているからである。した

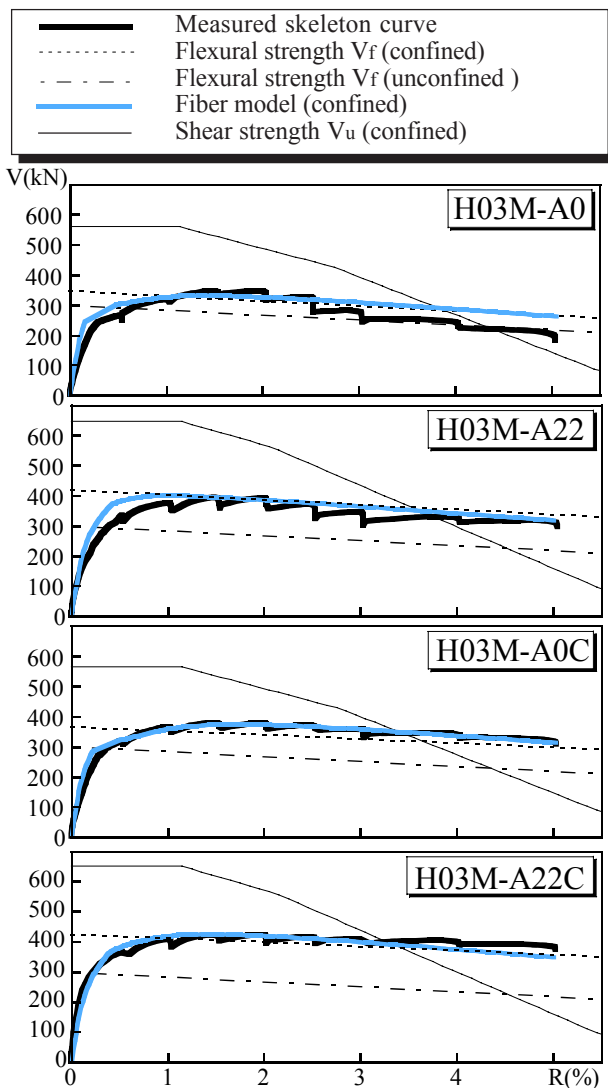


Fig. 9 Comparison between experimental and calculated results

がって、カバーコンクリートが剥離・剥落しない上に、コアコンクリートは高横拘束されていることになる。よって、本論文の合成RC柱は通常のRC柱と比較して、塑性ヒンジ部のせん断強度が低下しにくいと考えられる。

5. 結論

- 1) 高軸力下では芯筋を配筋することによって柱の軸ひずみの進行が抑えられ、十分な靱性を発揮し、芯筋の効果が示された。
- 2) 芯筋はピン支持相当にもかかわらず、付着の影響で曲げ強度も負担し、柱の水平耐力にも影響を与える。芯筋は高軸力下の柱において靱性の増大に寄与する。
- 3) 多量の帯筋とアラミド成形管で二重に横補強したRC柱試験体の曲げ強度は、その横拘束効果を考慮すれば、単純累加強度式でも概ね評価できることがわかった。しかし、芯筋が配筋されている試験体で軸力が零または小さい場合には、単純累加強度式では曲げ強度を過小評価する傾向が強くなる。

謝辞：アラミド成形管に関しては横浜ゴム株式会社、鉄筋D51は拓南製鐵株式会社から提供していただいた。

参考文献：

- 1) 仲鵬, 山川哲雄, 佐藤元, 山内智博: アラミド正形成形管を用いたハイブリッドRC柱の耐震性能と設計, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 1, pp. 667-672, 2001
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999, 日本建築学会, pp.154-155, 52-57, 1999.11
- 3) 日本建築防災協会: 連続繊維補強材を用いた既存鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造建築物の耐震改修設計・施工指針, 日本建築防災協会, pp.43-45, 1999.9
- 4) Mander, J. B., Priestley, M. J. N. and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, J. of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, Aug. 1988
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, pp.142-162, 175-192, 1999.8