

論文 アラミド繊維成形管と芯筋を用いた合成柱の高軸力下の弾塑性挙動

大浜 綾子^{*1}・山川哲雄^{*2}・森下陽一^{*3}・Mehdi Banazadeh^{*4}

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繊維正方形成形管と芯筋をRC柱と組み合わせたハイブリッド柱を用いて，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るせん断補強，横拘束圧及び主筋の座屈防止効果の増大とカバーコンクリートの剥離・剥落防止，芯筋を配筋することによる柱の軸ひずみの進行抑制により，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，アラミド繊維成形管，ハイブリッドRC柱，横拘束，高軸力

1. はじめに

山川らは通常の正方形鋼管にかわって，打込み型枠兼横補強材としてアラミド繊維シートにエポキシ樹脂を含浸させて試作したアラミド繊維成形管（以後AFRP管と呼称する）と，RC柱を組み合わせたハイブリッドRC柱を提案してきた¹⁾。その中で，横補強効果を高めるためには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AFRP管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ことを述べた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。

本研究では芯筋としてD51の太径の鉄筋を1本，柱断面中央に配置し，かつこの芯筋を上下スタブに定着（定着長さは約500mm）したので，柱頭と柱脚部における芯筋の境界条件は固定に相当する。

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半分となっているアラミド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って試作した。試験体一覧をTable 2に示す。柱試

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	σ_y	359	ϵ_u	0.18	202
Steel bar (D6)	32 mm ²		466	ϵ_y	0.21	223
Steel bar (D51)	2042 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 = yield strength of steel, ϵ_u = tensile strain of AF sheet, ϵ_y = yield strain of steel, E = modulus of elasticity of steel or AF sheet.

*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 工学部環境建設工学科教授 工博（正会員）

*3 琉球大学 工学部環境建設工学科助教授 工博（正会員）

*4 琉球大学大学院 理工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修（正会員）

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3体である。柱試験体の主筋はD13を12本配筋し、主筋比は $p_g = 2.44\%$ （芯筋を加えると $p_g = 5.71\%$ ）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。

基準柱試験体H02M-A0CはAFRP管なしの通常のRC柱である。しかし、柱の正方形断面中心には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。H02M-A11Cは1層のAFRP管で横補強されており、基準柱試験体H02M-A0Cと同じ様に柱の正方形断面中心に芯筋が配筋されている。H02M-A11は1層のAFRP管で横補強されているが、芯筋は配筋されていない。

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（原理的には建研式加力装置に同じ）を用いて、一定軸圧縮力（軸力比0.5）下の正負繰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返しの水平変形制御で3%まで行った後、4、5%を目標に1サイクルずつ正負繰返した。

3. 実験結果

Table 3に実験結果の一覧を示し、Fig. 1にせん断力と部材角の関係である V - R 曲線と、柱中心軸上の平均伸縮ひずみと部材角の関係である ε_v - R 曲線をあわせて示す。柱の平均伸縮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 曲線中の点線は芯筋を無視し、 p - 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は考慮していない。Fig. 2に加力実験で得られたスケルトンカーブの比較を示す。

Table 2 Column specimens

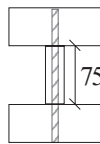
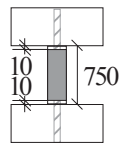
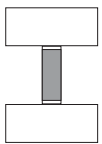
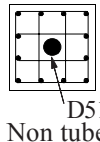
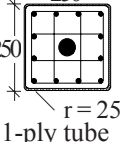
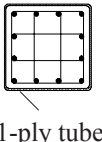
Specimen	H02M-A0C	H02M-A11C	H02M-A11
Elevation (mm)			
Cross section (mm)	 Non tube	 1-ply tube	 1-ply tube
Longitudinal reinforcement	12-D13 ($p_g = 2.44\%$) (Include core steel rod $p_g = 5.71\%$)		
Transverse reinforcement	Hoop	4-D6 @30 ($p_w = 1.71\%$)	
	Tube	$p_{wf} = 0\%$	$p_{wf} = 0.15\%$
Common details	$M/(VD) : 1.5$ $N/(bD\sigma_B) : 0.5$ $\sigma_B : 51.6 \text{ (MPa)}$		

Table 3 Summary of experimental results

Specimen	V_{max} (kN)	R_v (%)	R_f (%)
H02M-A0C	394.9	1.95	>5.00
H02M-A11C	415.9	2.46	>5.00
H02M-A11	435.9	1.45	4.26

Notes : V_{max} = experimental peak shear force in push loading direction, R_v = experimental drift angle corresponding to V_{max} , R_f = experimental ultimate drift angle corresponding to the shear force decreasing to 80 percent of the V_{max} .

AFRP管を使用せず、柱の中心に芯筋を配筋した基準柱試験体H02M-A0Cでは $R=0.5\%$ 時に柱隅角部の主筋に沿ったひび割れと曲げひび割れが発生し、 $R=1.0\%$ 時に柱隅角部のカバークンクリートが剥がれ落ちた。 $R=0.25\%$ 時に隅角部の主筋が圧縮降伏し、 $R=1.9\%$ で水平耐力が最大となった。 $R=1.9\%$ を越えた後、実験終了時 ($R=5.0\%$) にも水平耐力は最大時の91%を維持し、 ε_v - R 曲線における圧縮ひずみも1.2%に抑えられた。しかし、AFRP管を使用していないため、柱頭・柱脚のカバークンクリートが剥がれ落ちるなど、AFRP管を使用している他の2体の試験体に比べ柱の損傷が激しかった。

1層のAFRP管を使用した上に柱の断面中心に芯筋を配筋した柱試験体H02M-A11Cでは、 $R=2.4\%$ で水平耐力が最大となった。水平耐力は実験終了時 ($R=5.0\%$) にも89%を維持した。

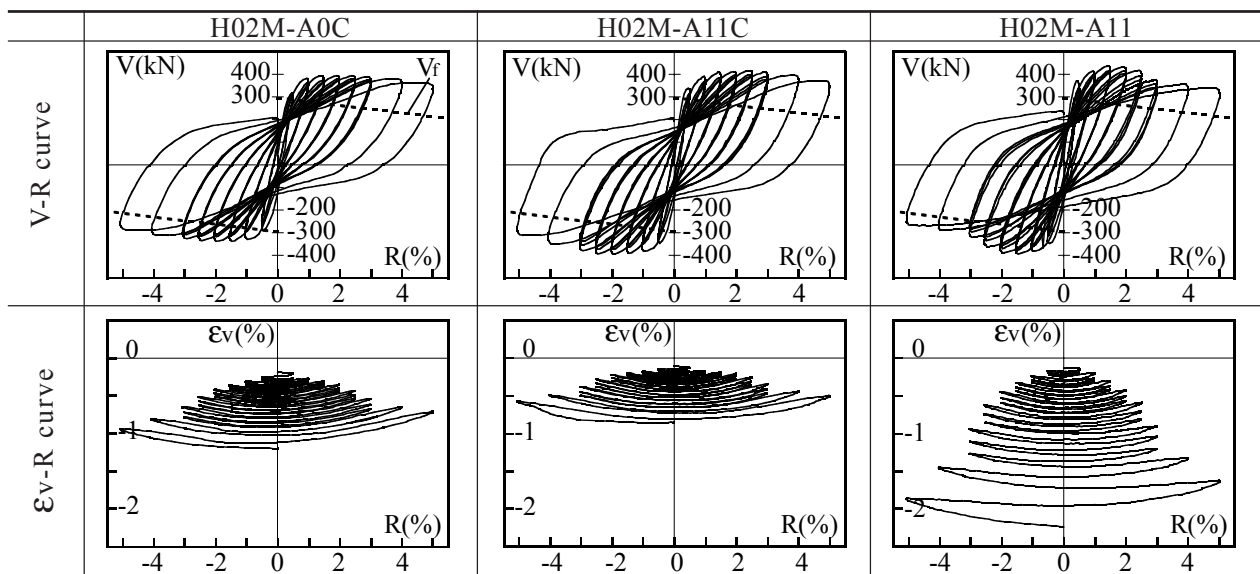


Fig. 1 Measured V-R and ϵ_v -R relationships

(Fig. 2 参照)。他の2体の試験体に比べ ϵ_v -R 曲線における圧縮ひずみの増加も少なく、AFRP管を使用し横補強効果を高めたために柱の損傷の度合いも小さいものとなった。柱試験体 H02M-A11C は H02M-A11 と比較すると最大水平耐力では劣っているが、実験終了時の水平耐力は H02M-A11 より大きく、耐力の低下も小さく、芯筋と AFRP 管の効果が発揮され十分な靱性を示している (Fig. 2 参照)。

1 層の AFRP 管を使用し、芯筋を配筋していない柱試験体 H02M-A11 では、 $R=1.4\%$ で水平耐力が最大となり、3 体の試験体の中で最も大きな耐力を示した (Fig. 2 参照)。しかし耐力は次第に低下し、実験終了時 ($R=+5.0\%$) には 77% に低下した。また、芯筋を配筋した他の 2 体の試験体に比べ ϵ_v -R 曲線における圧縮ひずみの増加も、加力実験終了時で 2.2% と多くなっている。柱試験体 H02M-A11 は AFRP 管を使用し、さらに芯筋を使用している試験体 H02M-A11C に比べると、圧縮ひずみの増加が大きいので柱の損傷は大きかった。しかし、芯筋を使用しているが AFRP 管を使用していない基準柱試験体 H02M-A0C に比べると、圧縮ひずみの進行は大きいですが、AFRP 管を使用したために横補強効果が高まり、カバコンクリートの剥離・剥落が抑制されたので柱の損傷は小さくなった。

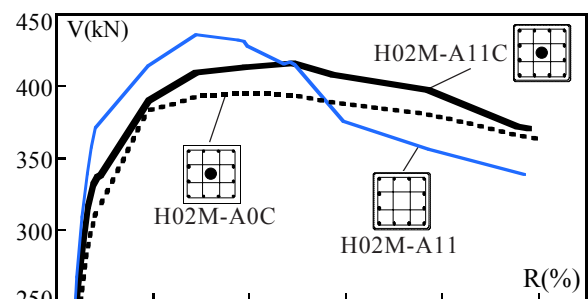


Fig. 2 Measured skeleton curves

H02M-A11C は芯筋が入っているにも関わらず H02M-A11 より耐力の低い実験結果を示した理由として、コンクリートに作用する軸力を柱の中心にある芯筋が一部負担したことが考えられる。軸力が高いと横拘束効果によって曲げ強度が増大するというよく知られた観点からは、芯筋が軸力を一部負担することにより、コンクリートの負担軸力が減少し、横拘束効果による曲げ強度の増大があまり期待できないことになる。その結果、Fig. 2 に示すように、芯筋が配筋された H02M-A11C と同じ横拘束効果が期待できる芯筋の無い H02M-A11の方が曲げ強度は大きくなる。あるいは、芯筋が配筋されるとコンクリートの軸力負担がその分減少する。作用軸力がつり合い軸力以下であれば軸力が大きいほど曲げ強度は大きくなる。成形管柱においては芯筋の有無に関わらず軸力はつり合い軸力よりわずかに下回っており、この意味では、芯筋

の無いH02M-A11の曲げ強度が高い実験結果を得たことは整合性を有している。しかし、Fig. 1の ε_v -R曲線に見られるように柱試験体H02M-A11は芯筋が配筋されていないので、高軸力によって柱の軸ひずみが圧縮ひずみとして部材角の増大とともに増加し、水平耐力も次第に減少している。

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. 3に示す。AFRP管で横補強量を大きくした試験体H02M-A11Cのエネルギー吸収量がAFRP管を用いていない試験体H02M-A0Cより大きくなっている。また試験体H02M-A11はH02M-A0CやH02M-A11Cに比べ残留変形が大きく、履歴曲線が膨らんだためエネルギー吸収量が最も大きくなった。

AFRP管の周方向の引張ひずみに関する測定結果をFig. 4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、そして柱頭と柱中央の間の計6ヶ所に貼付した。周方向のひずみは柱中央に比べ柱頭付近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。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度は 7000μ である³⁾。試験体H02M-A11の周方向のひずみの最大がゲージ貼付面(A),(E)では 7000μ を越え、その2倍近くになっている。H02M-A11は芯筋が配筋されていないので柱の軸ひずみが増し、周方向のひずみがH02M-A11Cに比べ、AFRP管のどの位置においても大きくなっている。有効ひずみ度である 7000μ を越え破断ひずみ直前まで到達したことが受動的横拘束効果の増大をもたらし、H02M-A11Cより大きな耐力を示した要因の1つではないかと推定される。

4. 解析的検討

Fig. 5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⁵⁾による横拘束効果が考慮されている。帯筋の内側と外側では拘束の条件が異なっている。すなわち試験体H02M-A11CとH02M-A11における帯筋内部のコンクリートは帯筋とAFRP管で二重に横拘束されているが、帯筋とAFRP管の間はAFRP管のみで横拘束されていることになる。同じようにH02M-A0Cの帯筋内部は帯筋のみで横拘束され、カバーコンクリートは無拘束の状態である。AFRP管ではFig. 4より、同じ高さにおける周方向のひずみが柱せい面と幅面でほぼ等しいものと見なし、AFRP管の横拘束効果の計算にあたっては、せん断強度時の有

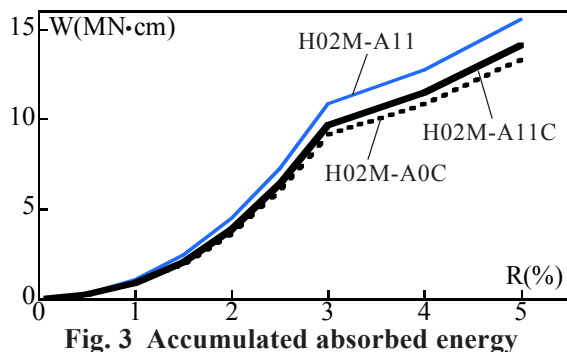


Fig. 3 Accumulated absorbed energy

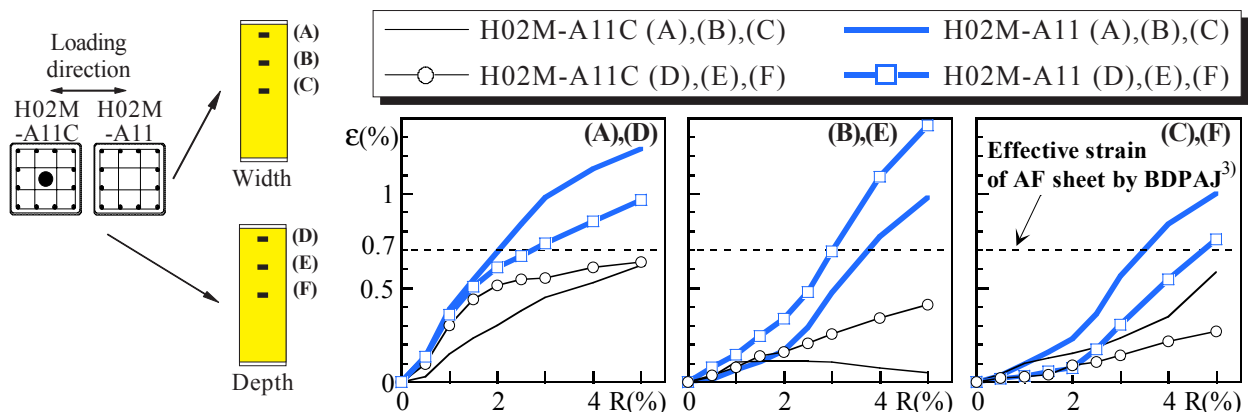


Fig. 4 Measured strain of AFRP tube versus drift angle relationships

効ひずみである0.7%時の応力を用いた。AFRP管が1層と薄いためAFRP管の横拘束効果は帯筋と比べてとても小さく、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AFRP管で横拘束されたコンクリートは、無拘束コンクリートに比べ強度低下が緩やかである。

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⁴⁾と、Fig. 5に示したコンクリートの構成則によりファイバーモデルで計算した曲げ強度曲線をFig. 6で比較する。曲げ強度については通常の多段配筋柱の略算式と、Manderらの提案式⁵⁾による横拘束効果を考慮し、コンクリート強度を増大させて適用した曲げ強度略算式の2通りの計算を行った。ファイバーモデルでは帯筋の内側と外側での拘束条件の違いにより異なったコンクリート強度を用いたが、多段配筋柱の略算式では帯筋の内側のコンクリート強度を一様に用いて計算を行った。また、芯筋の軸力負担効果を比較するためにH02M-A0CとH02M-A11Cには、芯筋の負担する分の軸力を差し引いて計算した略算式も併せて示す。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、日本建築防災協会の耐震改修設計指針によって有効ひずみである0.7%時の応力を用いて算定した³⁾。

横拘束効果を考慮したことによりコンクリート強度が増大し、曲げ強度、せん断強度ともに増加した。しかしAFRP管は1層と薄かったため、横拘束効果によるコンクリート強度の増大は多量に用いた帯筋による影響が大部分を占めた。各試験体ともせん断強度が曲げ強度を大幅に上回った。Fig. 1の ε_v -R曲線より芯筋が配筋されているH02M-A0CとH02M-A11Cは高軸力にも関わらず軸ひずみの増加が少ないので、柱の損傷が少なく耐力の低下が小さい。H02M-A0CとH02M-A11Cでは芯筋が軸力の一部を負担しているため、H02M-A11に比べると耐力は

低くなっている。したがって、芯筋が負担している軸力を差し引いて横拘束効果を考慮した略算式による計算結果(軸力比0.5→0.41)は、実験結果にほぼ一致している。

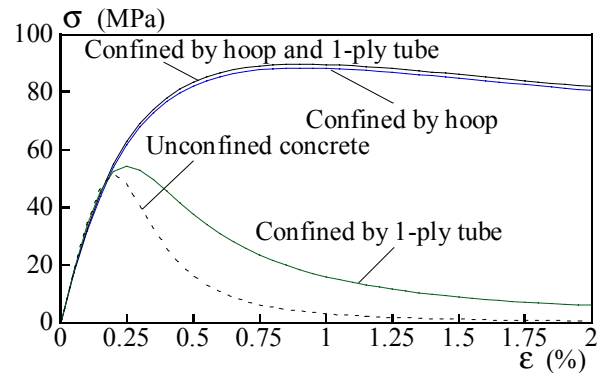


Fig. 5 σ - ε curves for concrete

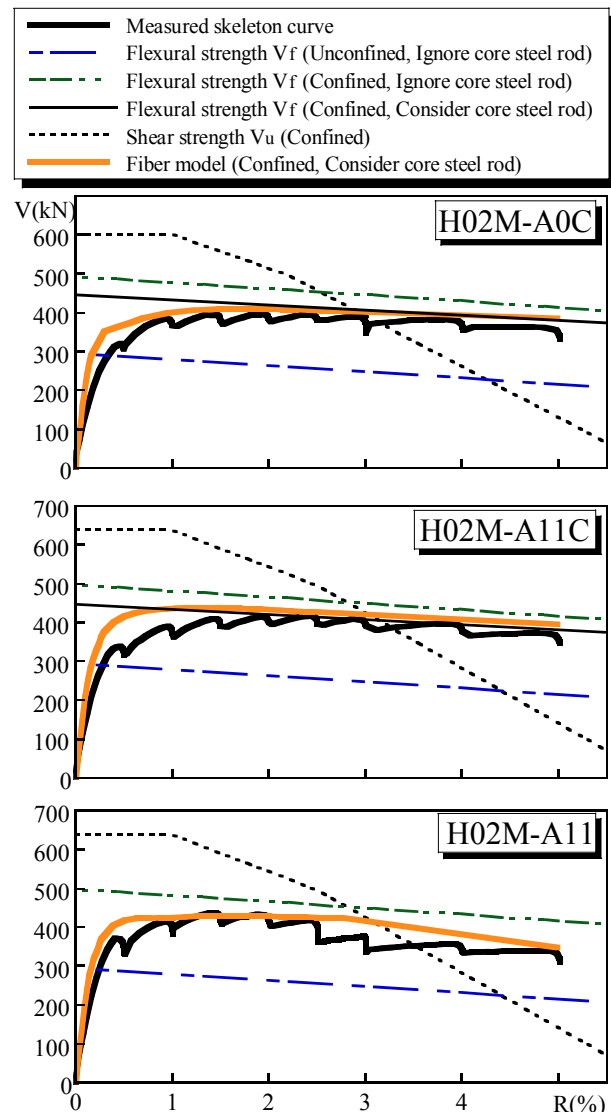


Fig. 6 Comparison between experimental and calculated results

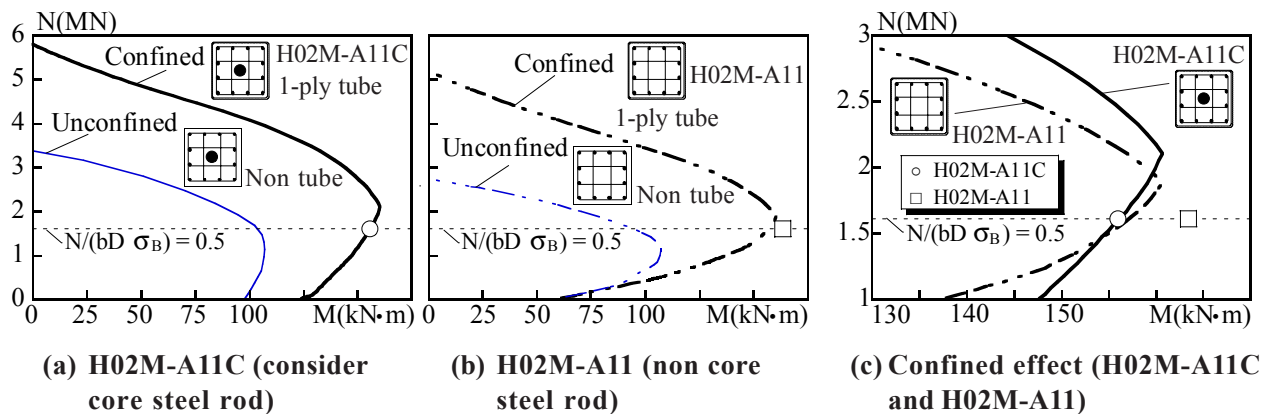


Fig. 7 N-M interaction curves

ファイバーモデルで計算した N-M 相関曲線を Fig. 7 に示す。Fig. 7 中の (a) の曲線は柱の断面に芯筋が配筋されており，(b) の曲線には芯筋が配筋されてない。(c) は (a)，(b) のつり合い軸力付近を拡大した図である。Fig. 7 中の太線は Fig. 5 の構成則において帯筋と AFRP 管それぞれの横拘束効果を考慮したもので，細線は無拘束コンクリートを全断面に用いて計算を行った。N-M 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。Fig. 7(a)，(b) より横拘束効果が增大すると N-M 曲線が外に向かって広がっていくことがわかる。しかし，軸力が低いとその効果は小さい。Fig. 7(c) より芯筋はつり合い軸力近傍を除いて曲げ強度筋としても働いている。Fig. 7(c) より軸力比が 0.5 付近からつり合い軸力にかけて，芯筋の曲げ強度への寄与は小さく，むしろコンクリートに作用する圧縮力が大きい方が曲げ強度は大きい。実験結果もそのことを示している。

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) 芯筋は軸力の一部負担のみならず，軸力の大小により曲げ強度も負担し，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は寄与するが，耐力の増大に寄与するとは限らない。

3) 多量の帯筋と成形管で二重に横補強した柱試験体の曲げ強度はその横拘束効果を考慮し，さらに芯筋を配筋した試験体においては芯筋が負担する分の軸力を差し引けば，実験結果を略算式でもおおむね評価できることがわかった。

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) 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
- 5) 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