

論文 格子状の連続繊維補強筋を帯筋に用いた RC 柱の弾塑性挙動

岡敬人*1・山川哲雄*2・仲鵬*3・藤崎忠志*4

要旨：格子状の炭素繊維からなるCFRPメッシュ筋を帯筋に用いたRC柱試験体の一定軸圧縮力下の正負繰返し水平加力実験を行うと、柱のウェブ面の中子筋位置に相当する主筋に沿って、典型的な付着割裂ひび割れが発生する。このような特異な力学的現象がCFRPメッシュ筋の突起の有無、せん断スパン比または軸力比に依存するかどうかを検証するために、これらをパラメーターに採用して補充実験を行い、上記の付着割裂ひび割れの原因に関して検討を重ねた実験的研究である。

キーワード：連続繊維補強筋, CFRPメッシュ, 付着割裂ひび割れ, 帯筋, RC柱, 突起

1. 序

壁やスラブの補強筋として開発された格子状の連続炭素繊維補強筋（以後、CFRPメッシュ筋と呼称する）を中子筋付きの帯筋としてRC柱に利用して、一定軸圧縮力の正負繰返し水平加力実験を行った場合、その弾塑性挙動に特異な現象が観察された。それはRC柱のWEB面の中子筋位置に相当する主筋に沿って多数生じたクロス状の小さな付着割裂ひび割れである^{1,2,3)}。この付着割裂ひび割れが帯筋の外周筋と中子筋の交差部分に、その破断防止のために残した余長(約10mm)としての突起(図-1参照)が原因か、あるいはせん断スパン比または軸力比に起因しているかどうかを検証するために、突起を除去したCFRPメッシュ筋を帯筋に利用したRC柱を中心に、これらをパラメーターに一定軸圧縮力下の正負繰返し水平加力実験を行なった。本研究はCFRPメッシュ筋を帯筋に利用した場合、RC柱のウェブ面に生じる付着割裂ひび割れの原因を検討することにある。

2. 試験体

柱試験体は表-1に示すように、基準RC柱試験

体RCC-NNシリーズを中心に、CFRPメッシュ筋を帯筋に用いた合成RC柱試験体NFC-NNシリーズ(突起あり)とNFC-NPシリーズ(突起無し)の3種類、合計10体である(図-1参照)。その

表-1 試験体の一覧と材料の力学的性質

Specimen	帯筋 (mm)	M VD	N bD σ_B	σ_B (MPa)	fy (MPa)	
					D6/CFRP	D10
RCC-NN-6	⑥60	1.5	0.35	37.5	388	396
NFC-NN-3				31.8	1799	421
NFC-NP-3				36.9		389
RCC-NN-2	④40	1.5	0.22	26.0	388	409
NFC-NN-2				28.0	1799	389
NFC-NP-2				36.1		
RCC-NN-7	⑥60	2.0	0.02	40.3	388	396
NFC-NN-1				43.2	1799	389
RCC-NN-10				31.0	388	
NFC-NP-5				26.0	1799	

RCC-NN series

NFC-NN series

NFC-NP series

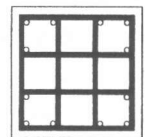
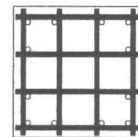
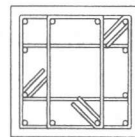
D6@60($p_w=0.85\%$)CFRP@60($p_w=0.83\%$)D6@40($p_w=1.28\%$)CFRP@40($p_w=1.25\%$)Longitudinal reinforcement : 12-D10($p_g=1.37\%$)

図-1 試験体の断面

*1 琉球大学大学院 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 琉球大学大学院 工学研究科生産エネルギー工学専攻 工修 (正会員)

*4 清水建設(株)技術研究所 (正会員)

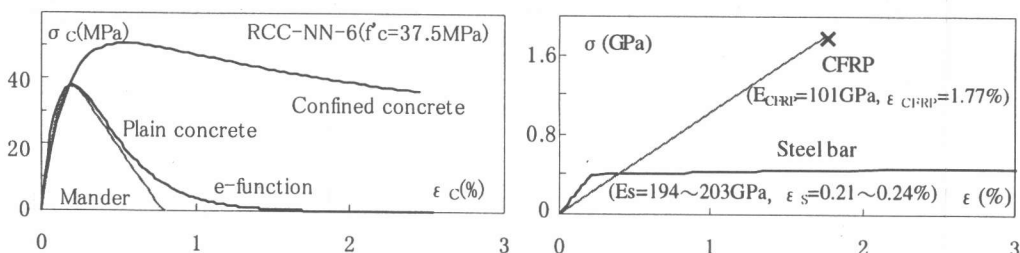


図-2 コンクリートの σ - ϵ 関係(計算結果)と鉄筋, CFRP の引張

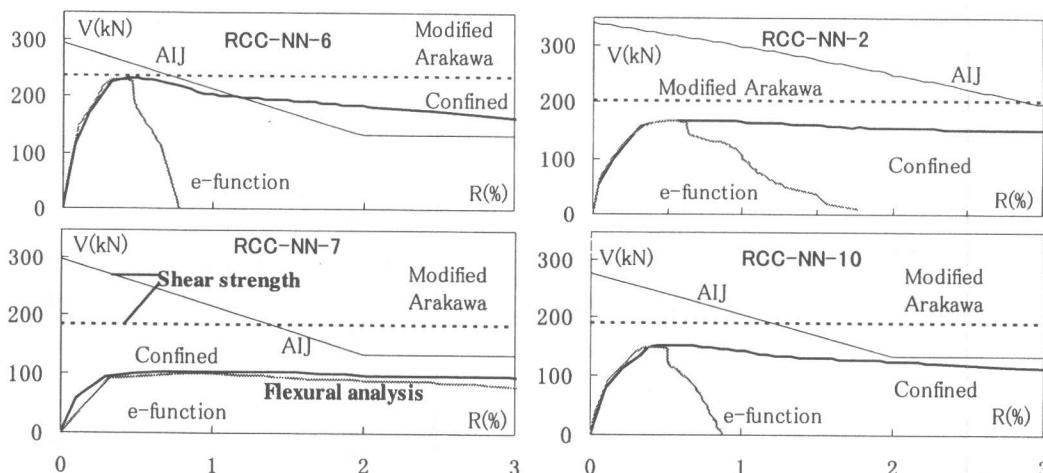


図-3 RC 柱試験体の計算による曲げ強度とせん断強度の比較

中で、主な変数はせん断スパン比1.5と2.0、軸力比0.35、0.22と0.02である。なお、CFRPメッシュ筋の断面積はD6の異形鉄筋とほぼ等しい(D6:0.32cm², CFRP:0.31cm²)。

柱の解析に用いるコンクリートの構成則に関しては、代表的な例として図-2にRCC-NN-6の例を示す⁴⁾。また、鉄筋とCFRPメッシュ筋の構成則も図-2に示す。RC柱試験体の力学的性質は図-3に示すとおりである。これらの計算方法に関しては文献5)、6)を参照されたい。図-3に示した曲げ強度とせん断強度に関する計算結果から、RC柱試験体RCC-NN-6を除き、曲げ破壊先行が保証されている。従来から慣用されてきたe関数解と、帯筋の横拘束効果を考慮した曲げ強度に関する計算結果は、軸力比が大きくなるとせん断スパン比のいかんに関わらず、靱性に顕著な差が生じている。これは軸力比がある程度大きくならないと横拘束効果が発揮されないからである⁵⁾。したがって、軸力

が小さいとe関数解と帯筋の横拘束効果を考慮した解はほぼ等しくなる。しかも、曲げ圧壊しにくくなるので靱性にとんだ弾塑性挙動を示すことになる(図-3参照)。

3. 実験結果と考察

建研式加力装置を用いて、一定軸圧縮力下のもとで柱の部材角Rを0.5%づつ、3%まで3サイクルづつの正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、観察されたひび割れ図を図-4.5に示す。基準RC柱試験体RCC-NN-6は図-3で予測したように、付着割裂ひび割れの状況を示している(図-4参照)。しかし、他の基準RC柱試験体RCC-NN-2,7,10は曲げひび割れが卓越し、かつ図-4.5に示した履歴曲線も曲げ挙動を示している。CFRPメッシュ筋を帯筋に利用したRC柱は軸力比が零に近い柱試験体NFC-NP-1を除いて、突起の有無、せん断スパン比の大小に関わらず、Web面で主筋に沿ったクロス状の小

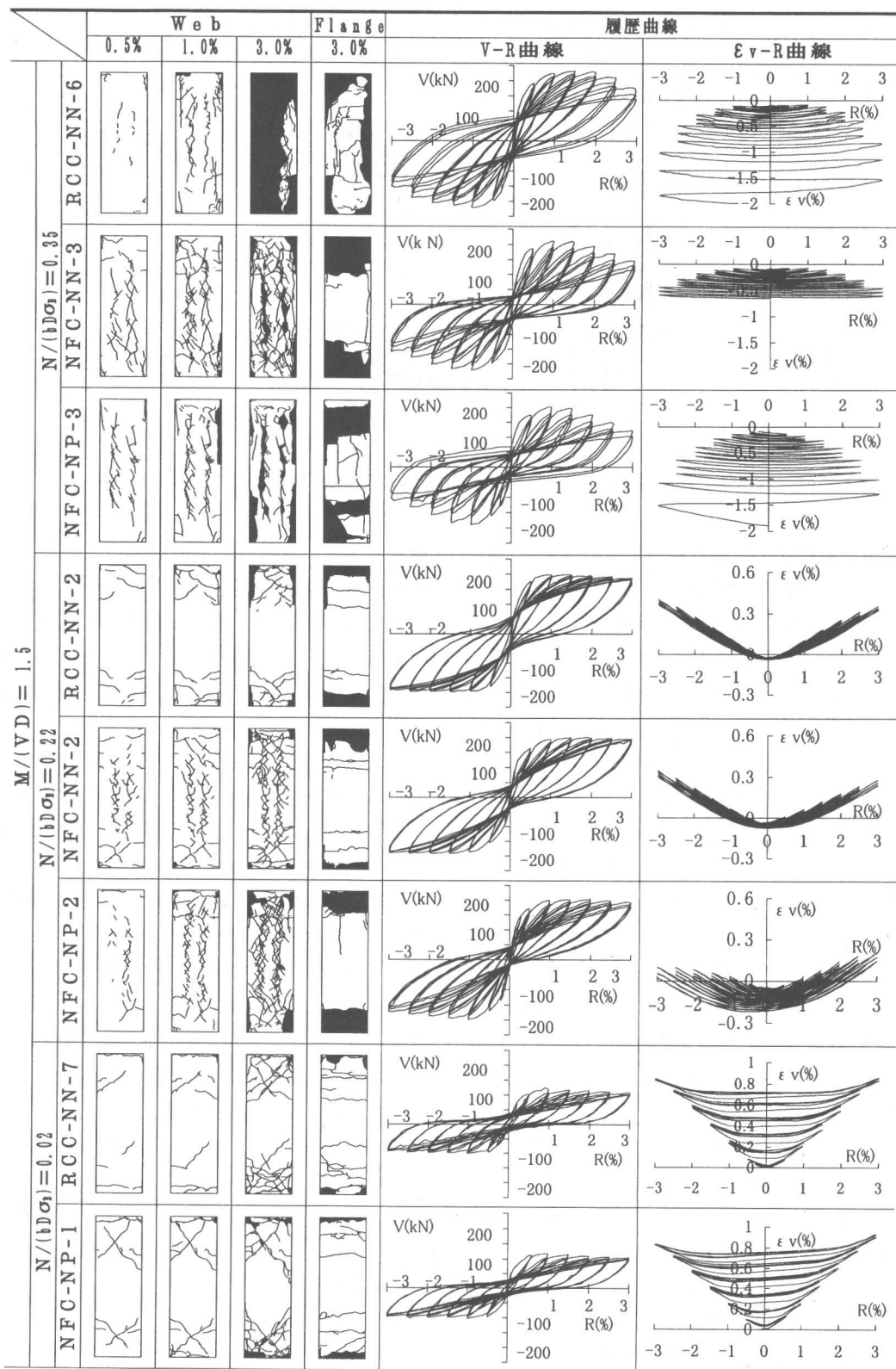


図-4 せん断スパン比1.5の柱試験体のひび割れ図と履歴曲線(実験値)

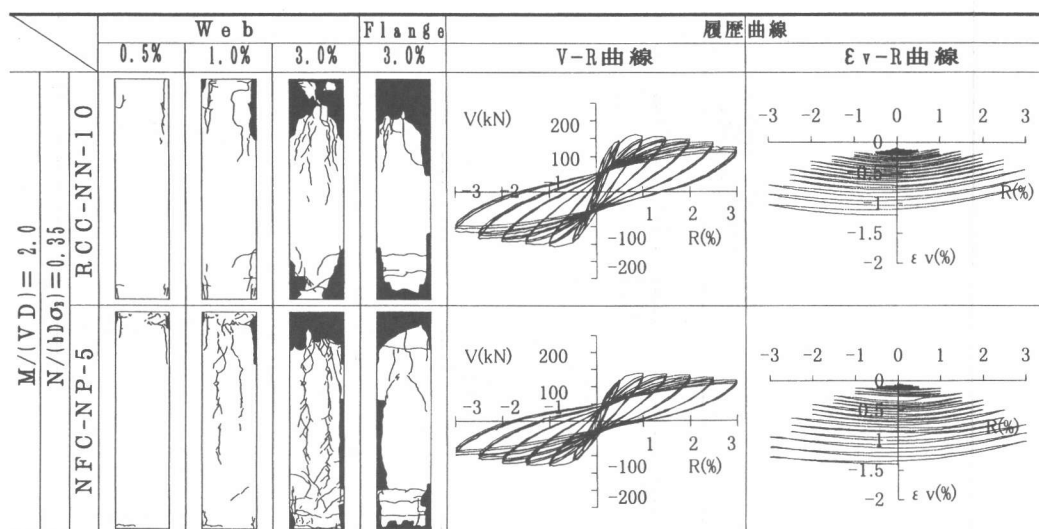


図-5 セン断スパン比2の柱試験体のひび割れ図と履歴曲線(実験値)

さな付着割裂ひび割れが多数生じている(図-4.5参照)。特に、帯筋ピッチが40mmと最も小さいNFC-NN-2とNFC-NP-2は突起の有無にかかわらず、より細かいクロス状の付着割裂ひび割れがウェブの中子筋位置に配筋された主筋に沿って多数生じている。しかも、せん断スパン比が小さくなり、かつ軸力比が大きくなると付着割裂ひび割れが進行し、かぶりコンクリートが突起の有無にかかわらず剥離、剥落していく。

軸力が零に近い $N/(bD\sigma_1)=0.02$ になると、図-4に示すように突起無しのCFRPメッシュ筋を帯筋に利用しても、鉄筋を用いた通常の帯筋と同様に付着割裂ひび割れは生じなかった。その時柱試験体に作用するせん断力は軸力比0.35の柱試験体の約半分であり、作用せん断力が小さいのでし突起があっても付着割裂ひび割れは生じなかったものと思われる。したがって、この原因はCFRPメッシュ筋の突起の有無ではないように思われる。

CFRPメッシュ筋に突起が無い試験体NFC-NP-3,5において、中子筋に相当するところと外周筋に相当するところの交差部の破断は皆無であったが、外周筋と外周筋の交差部、すなわち隅角部で柱頭に限って破断が一部見られた。それゆえに、CFRPメッシュ筋を帯筋に利

用する場合には外周筋と外周筋の交差部である隅角部の余長は必要である。

柱ウェブ面でしかも中子筋位置に配筋された主筋に沿って、特色のある明確な付着割裂ひび割れが軸力比0.02を除いてCFRPメッシュ筋を帯筋に利用したすべての柱に生じていることは、柱ウェブ面に生じているせん断応力にも注目する必要がある。せん断応力は帯筋に鉄筋を利用した場合にも同様に生じているにもかかわらず、主筋に沿った付着割裂ひび割れがみられるのは、せん断スパン比1.5で高軸力比0.35を受けた基準RC柱試験体RCC-NN-6のみである。したがって、残りの要因としては横拘束効果の差異が考えられる。CFRPメッシュ筋は図-2に示すようにヤング係数が鉄筋の約半分しかないで、同じ横拘束を受けてもひずみやすい。このことが主な原因であるかどうかは定かではないが、図-4.5に示すように、軸力比が大きく、せん断スパン比が小さくなるほど、部材角Rが小さい0.5%からすでに付着割裂ひび割れが現れ、R=1%になると明白な付着割裂ひび割れが形成されている。

以上の結果、図-6.7に示したスケルトンカーブや累積エネルギー吸収量の比較からも、CFRPメッシュ筋を帯筋に用いた合成RC柱の弾

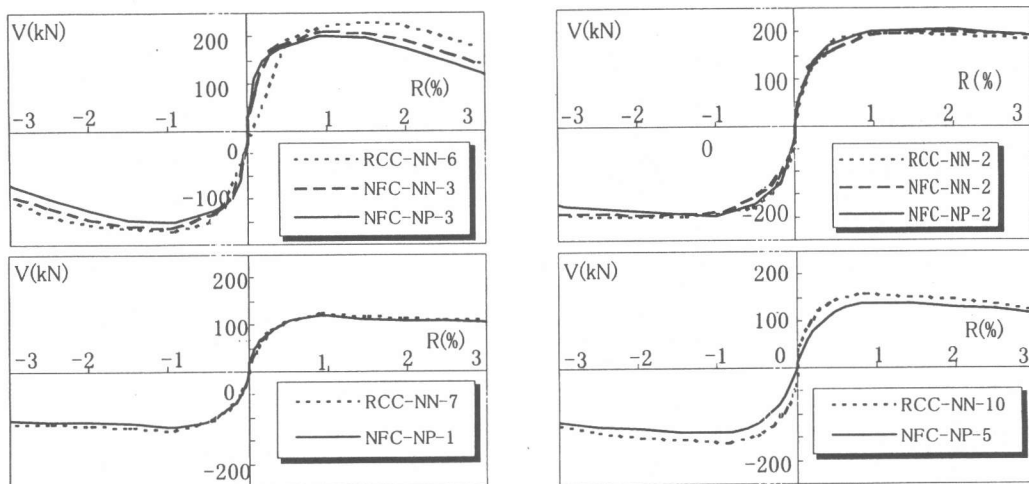


図-6 スケルトンカーブの比較 (実験結果)

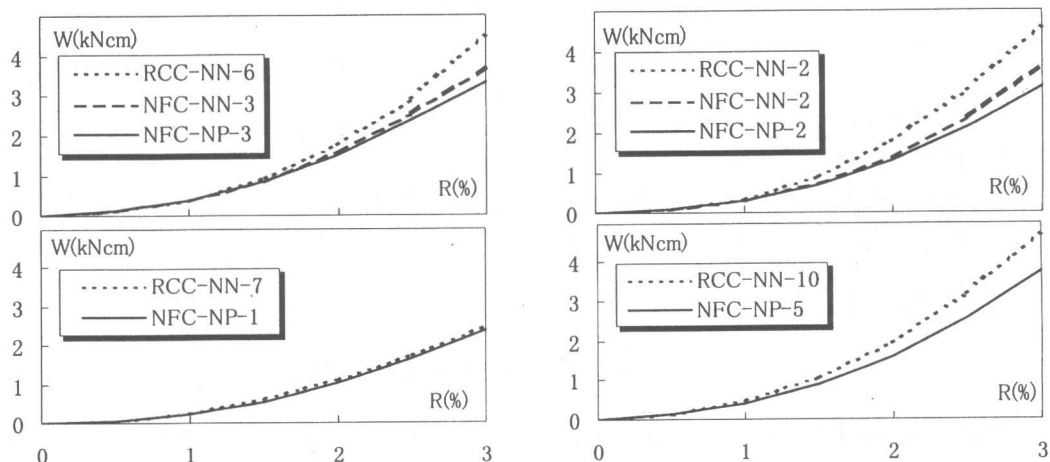


図-7 累積エネルギー吸収量の比較 (実験結果)

塑性挙動は、鉄筋を帯筋に用いた通常のRC柱のそれより若干耐震性能が低下する傾向にあることは否定できない。このことはコンクリート強度のばらつきがあるにせよ、図-8に示した計算によるN-M相関曲線と実験値の比較からも理解できる。

RC柱試験体RCC-NN-6の材料、構造データを利用し、せん断スパン比1.5と2.0について部材角が3%時の水平耐力 $V_{R=3}$ と、最大水平耐力 V_u の比と軸力比の関係を図-9に示す。図-9は一種の靱性を表現し、 $V_{R=3}/V_u$ が小さくなるほど粘りに欠けた柱といえる。軸力比が高くなるにつれて靱性が次第に低下していくことが図-9よりわかる。実験結果は正、負側加力ともほぼ

これらの計算ライン上に近いところにある。図-9より、靱性の観点からは同じ帯筋の配筋量であれば在来の鉄筋とCFRPメッシュ筋による帯筋による差異は図-6,7に見られるほどには生じていない。図-9には基準RC柱試験体の一つであるRCC-NN-6をモデルに帯筋間隔が60mmで計算されているので、帯筋間隔が40mmである柱基準試験体(軸力比0.22)RCC-NN-2,NFC-NN-2,NFC-NP-2の実験値は正、負側加力とも計算ラインより上にある。このことは鉄筋およびCFRPメッシュ筋を問わず、帯筋間隔が小さくなれば靱性が改善されていることを意味する。

帯筋を用いた鉄筋はD6の異形鉄筋であるが、CFRPメッシュ筋はD6(断面積 0.32cm^2)とほぼ

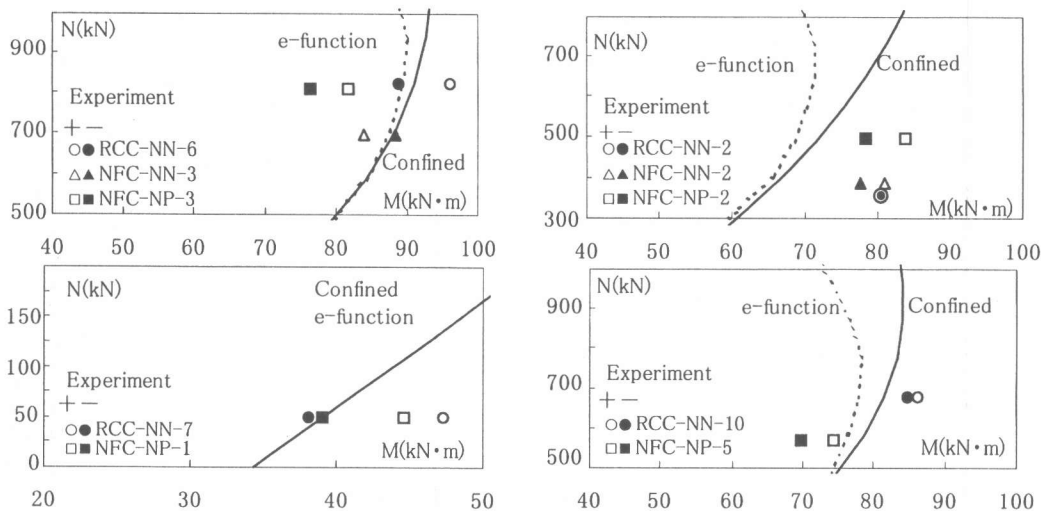


図-8 計算による N-M 相関曲線と実験値の比較

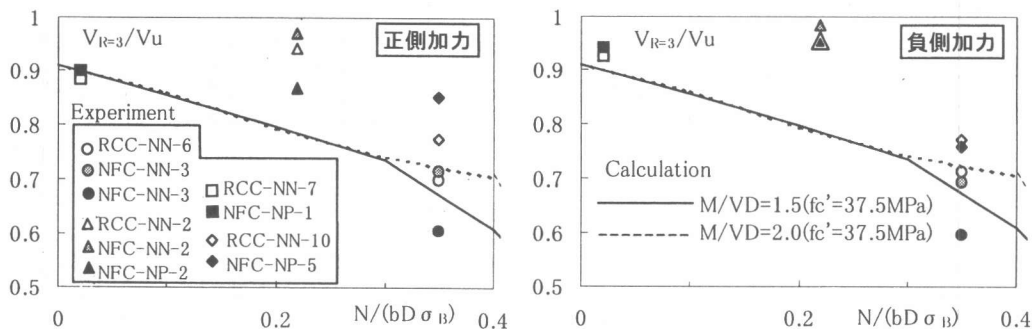


図-9 水平耐力の低下率と軸力比の関係

同じ断面積の 0.31cm^2 を有する。平べったい長方形断面で、かつ表面が光沢するほどなめらかである。これらの断面形状や表面の材料特性が付着割裂ひび割れに関与しているかどうか今後検討しなければならない。いづれにしても、CFRPメッシュ筋を帯筋としてその配筋間隔を小さくとり、多量に配筋すれば耐震性能をさらに改善することが可能ではないと思われる。

4. 結論

CFRPメッシュ筋の突起の有無が合成RC柱の付着割裂ひび割れに影響を与えることはなかった。ただし、CFRPメッシュ筋を帯筋として利用した場合、外周筋と外周筋が直交する隅角部での破断をさけるために隅角部には少なくとも余長、すなわち突起が必要であることがわかった。

CFRPメッシュ筋を利用した場合の付着割裂ひび割れの原因に関しては、本研究でも十分な

説明ができず、これは今後の検討課題として継続した研究を展開していく予定である。

参考文献

- 1) 山川哲雄, 仲鵬, 藤崎忠志: Elastoplastic Behavior of Hybrid R/C Columns with CFRP Grids, Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Vol.2, pp.607-614, 1997.10
- 2) 知念秀起, 山川哲雄, 藤崎忠志: 格子状FRP筋を帯筋に用いたRC柱の弾塑性挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.995-1000, 1995.6
- 3) 玉城康哉, 山川哲雄, 藤崎忠志: 連続繊維補強筋を帯筋に用いたRC柱の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.16, No.2, pp.1045-1050, 1994.6
- 4) Mander, J.B., Priestley, M.J.N., and Park, R.: Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.144, No.8, pp.1804-1826, Aug.1988
- 5) 中山耕一, 山川哲雄: FIBERモデルを用いたRC柱の弾塑性解析に関する検討: 日本建築学会大会学術講演梗概集C(東海), pp.337-338, 1994.9
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説, pp.13-14, 1990年11月