

[2122] 高圧縮力を受ける高強度コンクリートSRC柱の曲げ耐力と変形性能

宮内靖昌^{*1} • 木村 衛^{*2} • 西村泰志^{*3} • 南 宏一^{*4}

1. 序

コンクリート系超高層建物のより高層化、大スパン化を目的として、筆者らは、高強度コンクリート($F_c=450\sim630 \text{ kgf/cm}^2$)を用いた十字形鉄骨内蔵SRC柱の力学性状に関する研究を継続的に行ってきました[1]。その結果、曲げ破壊およびせん断破壊のいずれにおいても、(1) コンクリートを高強度にすると耐力は増大する、(2) 中心圧縮耐力に対する載荷軸力の比(軸力比)が同じ場合には、コンクリート強度が大きくなるに従い変形性能が低下する、(3) コンクリート強度にかかわらず、高圧縮力下では最大耐力後急激に耐力低下するぜい性的な性状を生ずるが、高強度帶筋(降伏応力度 $w\sigma_y=13000 \text{ kgf/cm}^2$ 程度)の使用により変形性能を改善できる、ことなどを明らかにした。一方、超高層建物に採用されるダブルチューブ架構の中柱では、鉄骨は十字形ではなく、H形鋼が内蔵されるが、H形鋼を内蔵した高強度コンクリートSRC柱の耐力と変形性能には不明な点が多い。本論では、高強度コンクリートと高強度帶筋を用いたH形鋼内蔵SRC柱の高圧縮力下での曲げ破壊性状を実験的に検討する。

2. 実験計画

2. 1 試験体

試験体の一覧を表1に示す。実験変数は、コンクリート強度($F_c=450, 630 \text{ kgf/cm}^2$)、軸力比($n=N/N_u=0.3, 0.5$)、帶筋比($P_w=0.45, 0.57\%$)、および帶筋の形状である。これらの変数を組み合わせて合計6体の実験を行った。

表1 試験体一覧

せん断 スパン比 M/QD	軸力比 N/N_u	コンクリート強度 F_c	
		450	630
3.6	0.3	MR45-453M	MR45-633M
		MU45-455M	MR57-635M
	0.5	MR57-455M	MC57-455M

N : 載荷軸力、 N_u : 中心圧縮耐力

記号は、試験体名を示す。

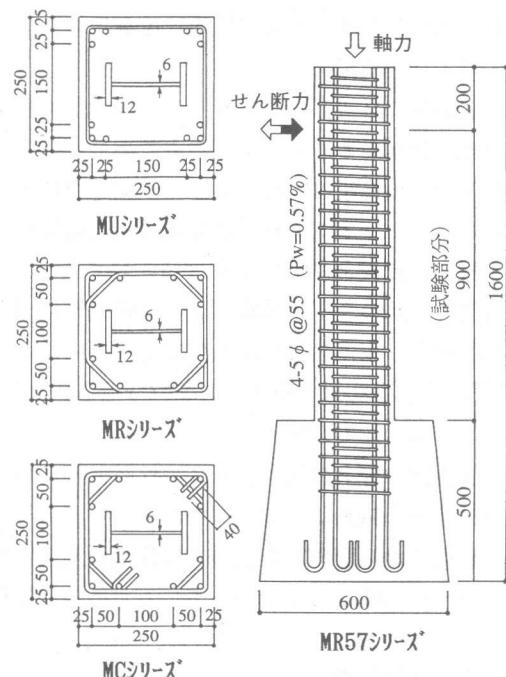


図1 試験体の形状、配筋

*1 竹中工務店 技術研究所 研究員（正会員）

*2 竹中工務店 技術研究所 主席研究員、工博

*3 大阪工業大学助教授 建築学科、工博（正会員）

*4 福山大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

試験体の形状、配筋を図1に示す。試験体は曲げ破壊性状を検討するために筆者らが行った一連の実験[1]と同じ形状(片持ち柱)および寸法とした。すなわち、柱断面は $B \times D = 25 \times 25 \text{cm}^2$ 、試験部分の柱長さは 90cm とし、せん断スパン比 $M/QD = 3.6$ である。鉄骨は H-150x80x6x12、主筋は 12-D10 ($P_t = 0.68\%$) である。帯筋は帯筋比と形状の組み合わせを 4 種類とし、外周のみの口型スパイラルの形状 (MU シリーズ) では $2-5\phi @ 35$ ($P_w = 0.45\%$)、口型外周筋と八角形中子筋を一筆書き的に一体化したスパイラル筋(以下、八角形スパイラルと略す、MR シリーズ) では $4-5\phi @ 70$ ($P_w = 0.45\%$)、および $4-5\phi @ 55$ ($P_w = 0.57\%$)、口型外周筋と八角形中子筋をそれぞれ 135° フックの閉鎖型したもの(以下、八角形フックと略す、MC シリーズ) では $4-5\phi @ 55$ ($P_w = 0.57\%$) とした。なお、八角形の帯筋は、従来の口型と同じ断面積と考えて帯筋比を算定した。

2.2 使用材料

試験体に打設したコンクリートは、最大粗骨材径 15mm の普通コンクリートである。コンクリートの打設は縦打ちとした。実験におけるコンクリートの材料試験結果(現場封かん養生)を表2に示す。また、コンクリート強度にかかわらず全試験体とも、鉄骨には SM490A 材を、主筋には SD295A 材を、帯筋には、SBPD1275/1420 材(降伏応力度 $w\sigma_y = 13000 \text{kgf/cm}^2$ 程度) を用いた。引張試験結果を表3に示す。

2.3 加力方法

実験は、図2に示すように、片持ち柱の加力方法とした。いずれの試験体も、所定の軸力を載荷した後、軸力を一定に保持しつつ、正負くり返しの水平力を加えた。変位制御は、柱脚に対する柱頭の水平変位 δ を柱長さで除した変形部材角 R により行った。なお、計測された水平力には、ローラーの摩擦力が加わっているため、柱に作用するせん断力の検討にはこれを補正した。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

部材角 $R=1/100\text{rad}$ 時のひび割れ状況の一例を写真1に示す。破壊経過は、各試験体とも大きな違いはなく、 $R=0.25 \sim 0.5/100\text{rad}$ で曲げひび割れが発生し、 $R=0.5 \sim 0.75/100\text{rad}$ で柱脚部のコンクリートの圧壊が開始した。軸力比が大きい試験体ほど、圧壊開始時の部材角は小さかった。 $R=0.75/100\text{rad}$ で柱脚部の主筋に沿った縦ひび割れが顕著に発生し、その後、かぶりコンク

表2 コンクリートの力学的性質
(単位: kgf/cm^2)

試験体	設計強度	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
MU	450	496	3.06×10^5	33.7
MR	450	445	2.58×10^5	35.1
MC	630	674	3.19×10^5	45.0

(注) 実験開始から終了までの平均値である。

ヤング係数は、 $1/3$ 強度時の割線剛性である。

表3 鋼材の力学的性質

試験体	種類	使用箇所	降伏応力度 (kgf/cm^2)	ヤング係数 (kgf/cm^2)
MU シリーズ*	PL12	フランジ	3634	2.00×10^6
	PL6	ウェブ	3819	1.92×10^6
	D10	主筋	3790	1.85×10^6
	5φ	帯筋	14073	1.95×10^6
MR シリーズ*	PL12	フランジ	3555	2.16×10^6
	PL9	ウェブ	3802	2.09×10^6
	D10	主筋	3621	1.89×10^6
MC シリーズ*	5φ	帯筋	11872	1.72×10^6

(注) 各 3 本の平均値である。

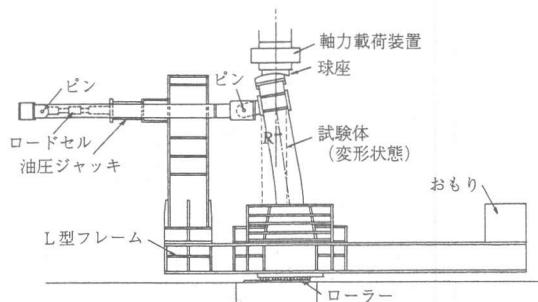


図2 加力方法の概要

リートのはく落、主筋の座屈が生じた。最終的には全試験体とも柱脚部の曲げ圧縮破壊であった。一部の試験体では、帶筋の破断とともに急激な耐力低下が見られた。

3.2 荷重-変位曲線

各試験体の荷重-変位曲線を図3に、荷重-変位曲線の正荷重時の包絡線と柱長さに対する材軸方向の平均軸ひずみの推移状況を図4に示す。縦軸はせん断力Q(tf)あるいは軸ひずみ $\varepsilon_v(%)$ を、横軸は部材角Rを示す。これらの図より以下のことが示された。

- (1) 軸力比nが同じ試験体では、コンクリート強度Fc=450の試験体に比べて、Fc=630の試験体は最大耐力が増大した（ただし、口型スパイラルの試験体MU45-455Mは、材料強度が大きいため、他の試験体より最大荷重は大きくなつた）。
- (2) 軸力比n=0.3、コンクリート強度Fc=450の試験体MR45-453Mは、部材角R=1.3/100rad.で最大耐力に達した。その後、軸力による付加曲げを考慮するとR=5/100rad.まで耐力低下もなく、すぐれた変形性能を示した。同一軸力比でFc=630の試験体MR45-633Mも同様に、R=1.0/100rad.で最大耐力に達し、すぐれた変形性能を示したが、R=4/100rad.で若干耐力低下した。
- (3) 軸力比n=0.5の試験体はいずれも、約R=1/100rad.で最大耐力に達した。その後、Fc=450の試験体MR57-455M、MC57-455MおよびMU45-455MはR=2.5~3/100rad.で、またFc=630の試験体MR57-635MはR=2.0/100rad.で急激に耐力低下し、コンクリート強度が大きくなるに従い、同一軸力比でも同じ変形性能を

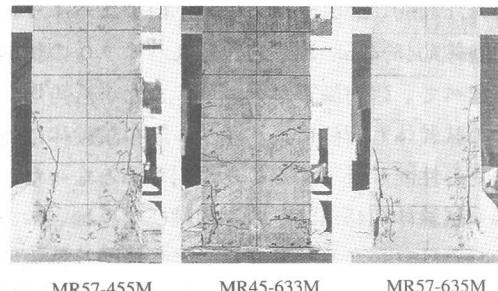


写真1 ひび割れ状況 (R=1/100rad.時)

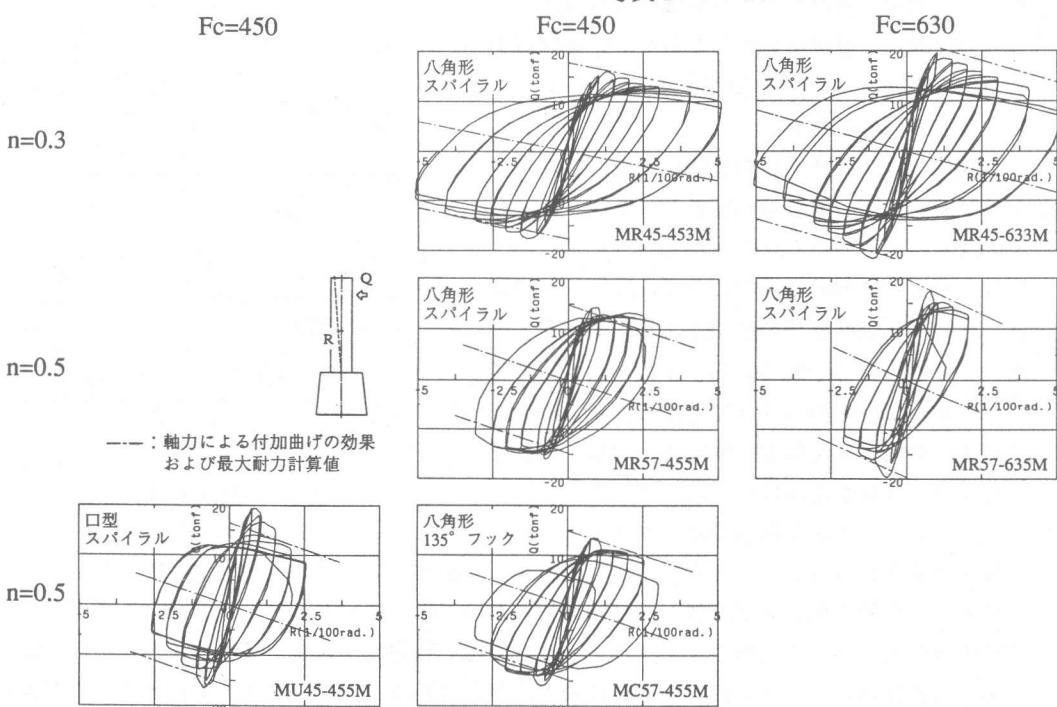


図3 荷重-変位曲線

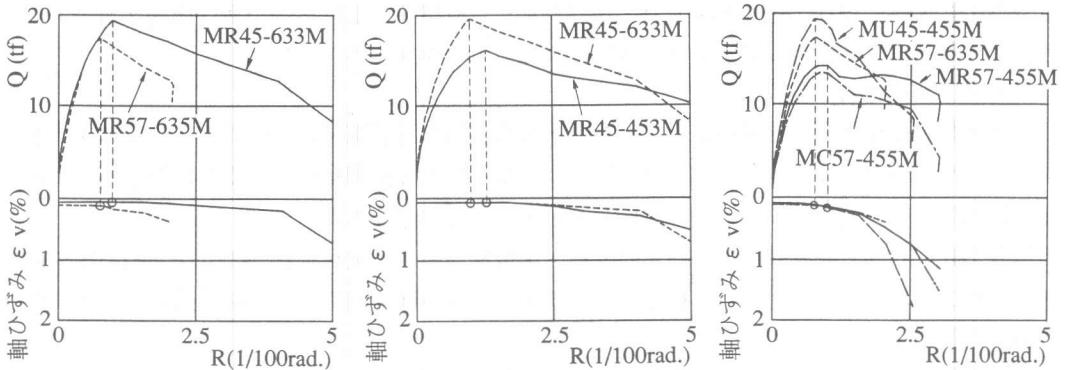


図4 包絡線の比較と軸ひずみの推移状況

得るために多くの帯筋量が必要となることが示唆される。

(4) $F_c=450$ 、 $n=0.5$ において、口型スパイラルの試験体MU45-455Mは、八角形スパイラルの試験体に比べて、耐力低下が大きい。また、八角形フックの試験体も同様にスパイラル筋の試験体に比べて変形性能が低下することが明らかとなった。

(5) 試験体MU45-455Mの平均軸ひずみは、軸力比 n およびコンクリート強度 F_c とともに同じ試験体MR57-455Mに比べて、部材角 $R=1.5/100\text{rad}$ 以降に急増した。また八角形フックの試験体MC57-455Mも $R=2.5/100\text{rad}$ 以降に急増しており、急激な耐力低下と平均軸ひずみの急増には関連がある。

3.3 帯筋のひずみ

各試験体の帯筋のひずみの推移状況を図5に示す。縦軸はひずみ ε を、横軸は柱部材角 R を示す。これらの図より、以下のことが明らかとなった。

(1) 最大耐力時における帯筋のひずみは $500\sim800\mu$ と小さく、高強度帯筋の使用により、曲げ耐力を増大させることは困難である。また、最大耐力時以降において帯筋のひずみは急増したが、降伏ひずみ ε_y の大きい高強度帯筋であるため、一部を除き、ひずみはまだ弾性内であった。

(2) 八角形スパイラルの帯筋では、コーナーの斜め部分のひずみがもっとも大きく、帯筋の破断がこの位置で生じたことと一致している。

(3) 軸力比と帯筋の比および形状が同じ試験体においては、コンクリート強度が大きいほど帯筋のひずみは大きい。また同じコンクリート強度では、軸力比が大きいほどひずみの増加は急である。これはコンクリート強度あるいは軸力比が大きいほど、コンクリートの軸力負担が大きいためである。

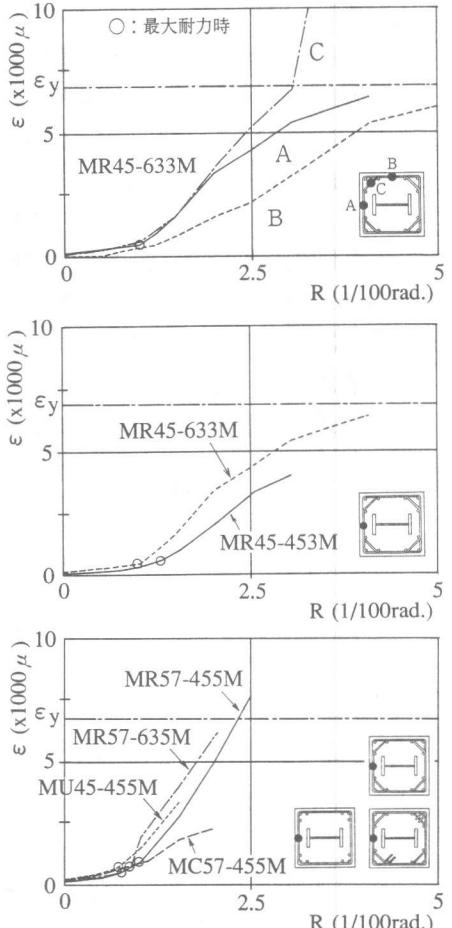


図5 帯筋のひずみ状況

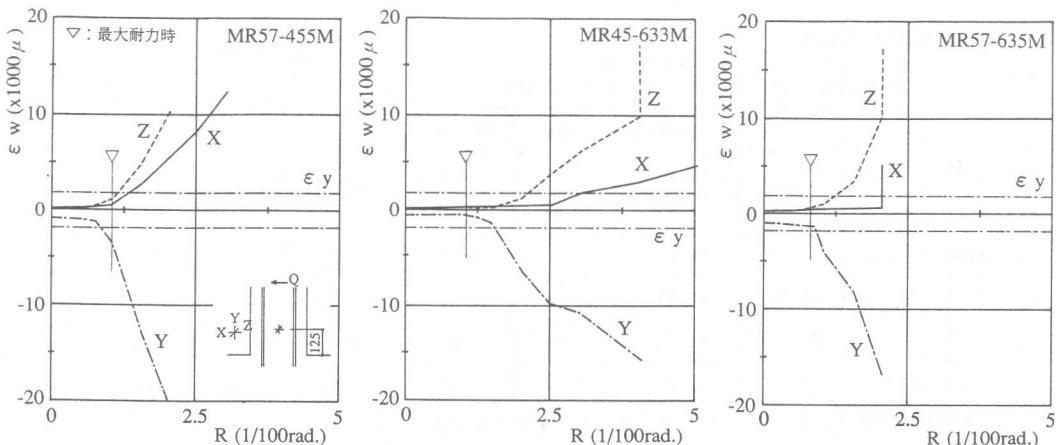


図6 鉄骨ウェブのひずみ状況

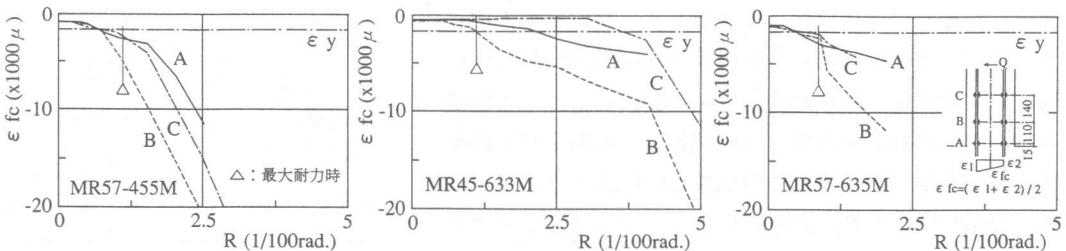


図7 鉄骨の軸ひずみ分布

(4) 八角形フックの試験体MC57-455Mは、口型あるいは八角形スパイラルの試験体に比べて、帯筋のひずみが小さい。これはフックの抜け出し等によるものと思われる。

3.4 鉄骨のひずみ

図6に柱脚よりD/2(D:柱せい)柱内にあがった位置でのウェブ中心部のひずみ状況を、柱軸と直交方向(X)、材軸方向(Y)、および斜め45°方向(Z)それぞれ別々に示す。縦軸はひずみ ε_w (引張ひずみが正)を、横軸は部材角Rを示す。これらの図より以下のことが明らかとなった。

- (1) 材軸方向(Y)のひずみは最大耐力時以降急増し、その増加の割合は、軸力比の大きい試験体ほど大きい。これはコンクリートの圧壊により、コンクリートが負担していた軸力が鉄骨に移行したことを示している。
 - (2) 材軸と直交方向(X)のひずみは、部材角の増大に伴い徐々に引張側に推移した。これは鉄骨フランジ内のコアコンクリートの圧壊による体積膨張をフランジで拘束したことを見ている。
 - (3) 斜め方向(Z)のひずみは、引張降伏ひずみを大きく越え急増した。このことより、ウェブはX、Y方向の複合応力により、せん断降伏しているものと推測される。
- また、図7にフランジに貼付したゲージより求めた鉄骨中心部の材軸方向のひずみ状況(ε_{fc})を示す。B位置でのひずみは図6におけるY方向のひずみとほぼ一致するが、柱脚よりD/2あがった位置Bでのひずみ(圧縮ひずみ)が、柱脚部(A)より大きいことが認められた。

4. 最大耐力の検討

最大耐力の実験値と計算値を比較して表4に、また一般化累加強度式[2]によるN-M相関曲線を図8に示す。縦軸は軸力N(tf、圧縮力が正)を、横軸は曲げモーメントM(tf·m)を示し、

表4 最大耐力の検討

試験体	載荷 軸力 (tf)	最大荷重 実験値 (tf) (1)	最大耐力 (tf)		
			実験値(2)	計算値	実/計
MR45-453M	119.7	16.89	18.29	17.54	1.04
MU45-455M	206.0	17.96	19.64	16.22	1.21
MR57-455M	199.6	15.18	16.95	14.80	1.15
MC57-455M	199.1	14.70	16.43	14.84	1.11
MR45-633M	184.4	20.59	22.35	21.81	1.02
MR57-635M	268.9	18.61	20.52	19.48	1.05

(1) 実験値は正負荷重の平均値、(2) 軸力による付加曲げを考慮

図中には実験値および累加強度式におけるRC部分とS部分それぞれの応力分担状況を示した。なお、最大曲げモーメント実験値には、各試験体とも部材角R=1/100rad。付近において示された最大荷重に、軸力による付加曲げを加えた最大耐力の正負平均値(Q)に、柱長さ(90cm)を掛けた値を用いた。また一般化累加強度式による最大耐力計算値には、SRC規準に従い、コンクリート強度を低減した。これらの図表より、実験値と計算値は良く一致しており、H形鋼を内蔵した高強度コンクリートSRC柱の最大曲げ耐力は一般化累加強度式により算定できることが明らかとなった。

5. 結語

H形鋼を内蔵した高強度コンクリートSRC柱の曲げ耐力と変形性能を検討した結果、以下の知見が得られた。

(1) H形鋼内蔵SRC柱においても、コンクリート強度

Fc=450の試験体に比べて、Fc=630の試験体は曲げ耐力

が増大した。曲げ耐力は、一般化累加強度式を用いて精度良く算定できる。

(2) 高強度帯筋を使用しても曲げ耐力はさほど増大しない。しかしながら、コンクリートの拘束による変形性能の改善には有効である。

(3) 帯筋および鉄骨がコンクリートの圧壊による体積膨張を拘束したことが明確となった。

【謝辞】

本研究の遂行に際し、株竹中工務店、東端泰夫氏、長嶋俊雄氏、沢村牧人氏、山本正幸氏、勝野潤氏、西岡雅明氏の御指導、御協力をいただきました。また川鉄テクノワイヤ㈱には高強度帯筋の製作に御協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 宮内、木村、東端、沢村、山本、南、西村：高強度コンクリートを用いたSRC柱の力学性状に関する研究（その5～7）、日本建築学会大会構造C、pp.1721-1726、1992年8月
- 鋼材倶楽部：SRC構造用H形鋼デザインマニュアル、pp.287-292、1984年

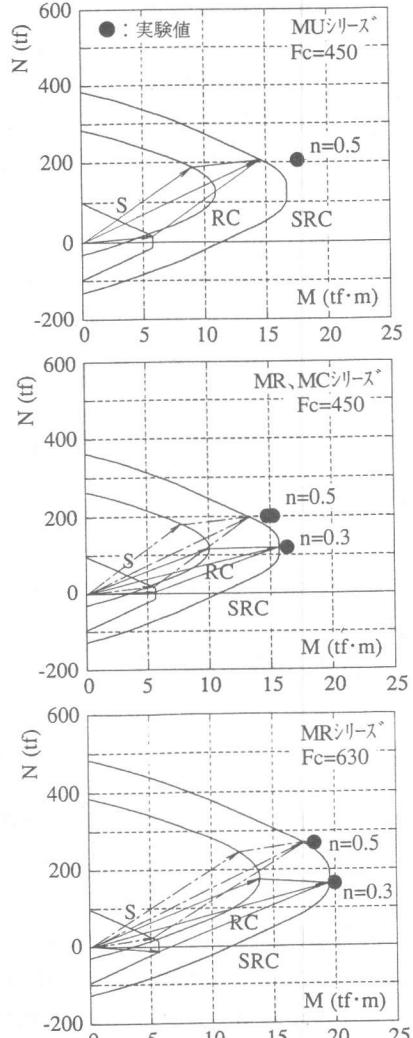


図8 N-M相関曲線