

(24) 軸方向力と二方向外力を受けるSRC柱の曲げ耐力

Strength of Steel Reinforced Concrete Column under the Biaxial Bending-Moment and Axial Force

筒井茂行*、西村泰志**
Shigeyuki Tsutsui, Yasushi Nishimura*株式会社日本設計プロジェクト統括本部 (〒163-1329 東京都新宿区西新宿 6-5-1)
**博士 (工学)、大阪工業大学教授、建築学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

To clarify the biaxial flexural strength of the SRC column with the cross shaped steel section, experimental studies were carried out. Parameters of these experiments were the loading angle(θ) between the principal axis of the column and the bending axis, and the constant axial load ratio to ultimate compression strength of column(N_0). These experiments were done under the monotonic loading and cyclic loading. Eighteen specimens were tested. Measured biaxial flexural strength was in close agreement with the ultimate theoretical strength obtained from the numerical analysis.

Key Words: SRC column, Biaxial Bending-Moment, Axial Force, ultimate strength

1. はじめに

従来、建築設計においては平面的に直交する骨組みの組合せとして構造物を捉え、直交するそれぞれの面を独立して設計することが多かった。このようなことから鉄筋コンクリート及び鉄骨鉄筋コンクリート柱の断面設計は、軸方向力と一方向の曲げモーメントおよびせん断力が作用する場合に対してのものが主となっている。

しかし、近年の構造物の大型化、形状の複雑化や、解析技術の進歩により、柱の断面設計においても軸方向力と二方向外力による曲げモーメントとせん断力を同時に受ける場合を考慮する必要性が増加してきた。

このようなことから、本研究では、一般的な建築構造物で頻繁に用いられる十字型鉄骨を内蔵する二軸対称正方形鉄骨鉄筋コンクリート断面柱 (以下 SRC 柱と呼ぶ) に着目し、軸方向力と二方向外力による曲げモーメントを同時に受ける場合の耐力を簡便な手法で算定するための実用設計に資する知見を得ることを目的に、実験的および解析的に検討するものである。

本報告は、まず断面の曲げ耐力に影響があると考えられるコンクリートの圧縮性状に対するフープおよび鉄骨の拘束効果を知ることとした中心圧縮実験、および軸方向力を受けながら断面の主軸から 0° 、 22.5° 、 45° 方向に等曲げモーメントを受ける柱部材の単調載荷ならびに繰返し載荷実験について報告する。次いで、これらの実験結果とメッシュ法による解析値を比較し、これらを元に軸方向力と二軸曲げモーメントを受ける柱部材に対する実用的な耐力評価法を提案する。

2. 中心圧縮実験¹⁾

ここでは、二軸対称十字型鉄骨を内蔵する SRC 柱の①

被りコンクリート部分、②せん断補強筋と鉄骨に囲まれた部分、および③鉄骨に囲まれた部分の圧縮特性を実験的に検討し、既往の研究と比較検討する。

計画された試験体を図-2.1 に示す。試験体(P)の断面寸法は実用断面の概ね $1/3$ 程度を想定し $250 \times 250 \text{mm}$ 、内蔵される十字型鉄骨の公称寸法は BH-175 $\times$ 60 $\times$ 6 $\times$ 9、主筋は D13 を断面の四隅に 3 本ずつ計 12 本、せん断補強筋は $\square$ -4.5 ϕ -@50 (溶接閉鎖型) とした。柱せいは 750mm とした。

SRC 柱では、コンクリートの圧縮性状は図-2.1 に示す三つの領域で異なると考えられる。そこで試験体(P)を基本とし、領域①の圧縮性状を明らかにするため試験体(P)より領域①を取り除いた試験体(Rc1)、領域②の圧縮性状を明らかにするため試験体(Rc1)より領域②を取り除いた試験体(Sc)、領域③の圧縮性状を明らかにするため試験体(Sc)より領域③を取り除いた試験体(S)がそれぞれ計画された。また領域②が領域③の圧縮性状に与える影響を明らかにするため試験体(Rc1)の領域②と領域③を分離させ、領域③のみ載荷する試験体(Rc2)が計画された。

材料強度を表-2.1 に示す。

表-2.1 使用材料の力学的特性

鋼材	材質	降伏応力度 kgf/cm ²	降伏ひずみ 度(%)
鉄骨フランジ	SM490A	3,700	0.17
鉄骨ウェブ	SM490A	3,670	0.17
主筋	SD295	3,660	0.19
フープ	SR235	5,620	0.30
コンクリート	設計強度 kgf/cm ²	圧縮強度 kgf/cm ²	割裂強度 kgf/cm ²
	210	277	28.9

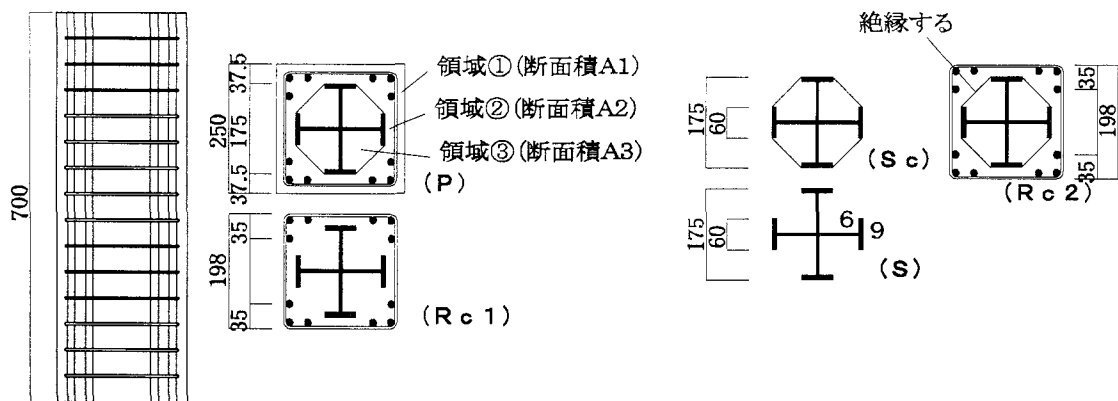


図-2.1 柱配筋詳細および断面

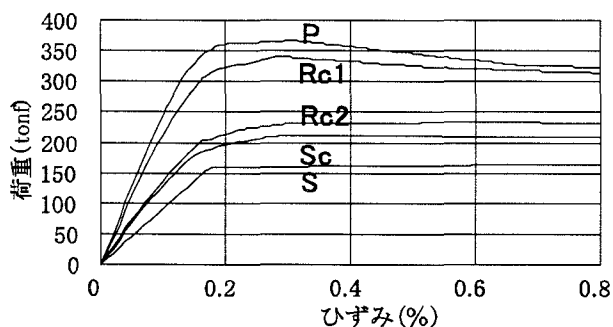


図-2.2 荷重-ひずみ度関係

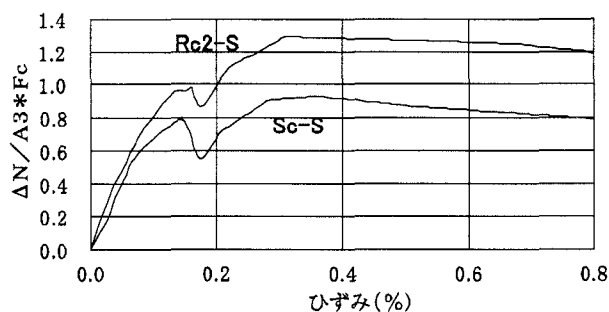


図-2.5 領域③の荷重-ひずみ度関係

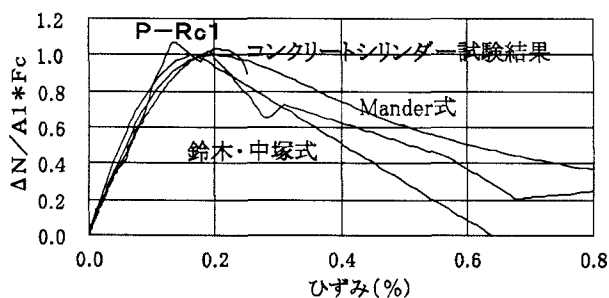


図-2.3 領域①の荷重-ひずみ度関係

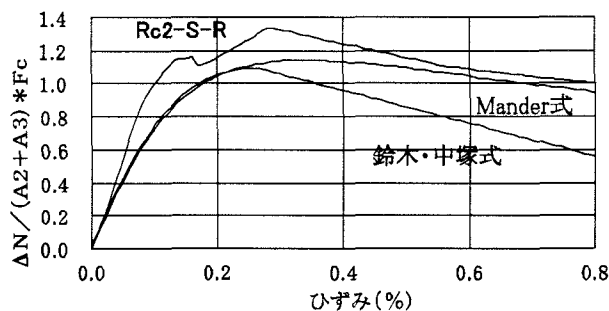


図-2.6 領域②+領域③の荷重-ひずみ度関係

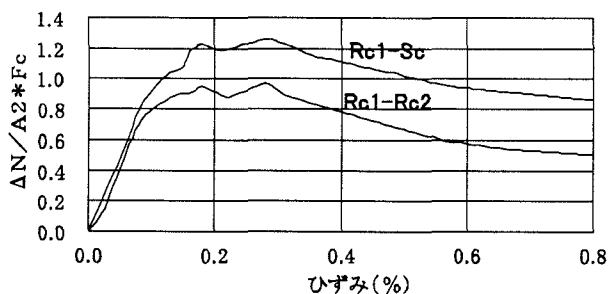


図-2.4 領域②の荷重-ひずみ度関係

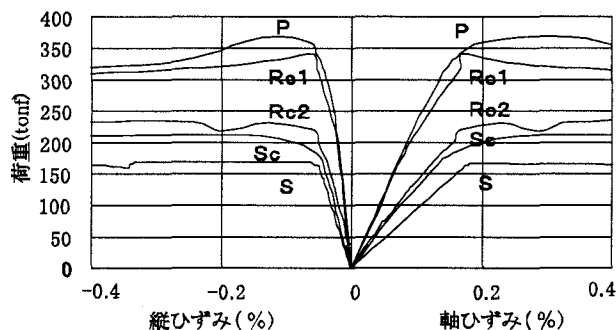


図-2.7 荷重-ひずみ度関係

図-2.2 に各試験体の荷重-ひずみ度関係を示す。縦軸は荷重、横軸は試験体中央の鉄骨フランジに貼付したひずみゲージより求められた軸ひずみ度を示す。(S)、(Sc)、(Rc2)、(Rc1)の順に耐力が増大し、(P)が最大となる。(P)は最大耐力発揮後試験体(Rc1)の荷重-ひずみ度曲線に漸近する。これは領域①(被りコンクリ

ート)が剥離するためである。しかしながら、他の試験体については、耐力低下はほとんど観察されない。

図-2.3 は(P)の荷重-ひずみ度曲線より(Rc1)を差し引いた領域①の荷重-ひずみ度関係を示す。縦軸は荷重の差 ΔN を $A1 \cdot Fc$ で無次元化した値、横軸は材軸方向のひずみ度を示す。なお $A1$ は領域①の断面積、 Fc は

コンクリートの圧縮強度を表す。P-Rc1 は軸ひずみが約 0.15%で最大耐力を発揮し、その後急激に耐力低下した。これはコンクリートシリンダー試験の応力度-ひずみ度曲線とほぼ同じであり、Mander²⁾、鈴木・中塚^{3) 4)} による提案式で算定される被りコンクリートの応力度-ひずみ度関係ともよく一致する。

図-2.4 は荷重-ひずみ度曲線(R c 1)より(S c)と(R c 2)を差し引いた荷重-ひずみ度関係を示す。縦軸は荷重の差 ΔN を $A2 \cdot F_c$ で無次元化した値、横軸は材軸方向のひずみ度を示す。なお、 ΔN には、主筋の軸ひずみの測定結果に基づいて主筋の負担軸力(R)は差し引かれている。 $A2$ は領域②の断面積を示す。Rc1-Scは領域②、Rc1-Rc2は領域③の拘束効果の影響を含んだ領域②の荷重-ひずみ度曲線を示す。Rc1-Scによると領域②は軸ひずみが約 0.3%で約 1.3 F_c となり、その後ゆるやかに低下している。Rc1-Rc2では、軸ひずみが約 0.3%で最大耐力に達し、その後の耐力低下はRc1-Scの耐力低下とほぼ同じであるが、 F_c 以上の耐力は発揮していない。Rc1-ScとRc1-Rc2の耐力の差は、フープ筋の横拘束によるものであると考えられる。図-2.5 は荷重-ひずみ度曲線(R c 2)より(S)、(S c)より(S)を差し引いた荷重-ひずみ度関係を示す。縦軸は荷重の差 ΔN を $A3 \cdot F_c$ で無次元化した値、横軸は材軸方向のひずみ度を示す。 $A3$ は領域③の断面積を表す。Rc2-Sは領域②の横拘束効果を考慮した領域③、Sc-Sは領域③の荷重-ひずみ度曲線をそれぞれ表す。Sc-Sは軸ひずみが約 0.3%でコンクリート圧縮強度と同程度の耐力を発揮し、その後Rc1-Rc2よりもゆるやかに耐力が低下する。図-2.6 は荷重-ひずみ度曲線(R c 1)より(S)および(R)を差し引いた荷重-ひずみ度関係を示す。Mander²⁾、鈴木・中塚^{3) 4)} による提案式で算定されるコアコンクリートの応力度-ひずみ度関係とも近似した傾向を示す。図-2.7 に各試験体の鉄骨ウェブ中心の材軸方向とそれに直交する水平方向の荷重-ひずみ度関係を示す。縦軸は荷重、横軸の第1象限は軸ひずみ、第2象限は横ひずみを表す。この図によると軸ひずみが降伏すると同時に横ひずみも降伏しているのが観察される。このことがSc-Sによって求められる領域③の圧縮耐力がコンクリート圧縮強度よりも大きくならなかった理由と考えられる。

以上より、下記のことが明らかになった。

1. 領域①はコンクリートシリンダー試験とほぼ同じ圧縮性状を示す。
2. 領域②ではフープ筋の横拘束効果により耐力が増大するとともに、領域③を横拘束する。また最大耐力後の耐力低下は小さい。
3. 領域③では鉄骨の拘束効果による耐力の増大は見られないが、最大耐力後の耐力低下はほとんど観察されない。
4. フープ内コンクリートは、領域②③を合わせてRC部材とほぼ同等の横拘束効果を受けているとして圧縮

性状を評価できる。

3. 軸方向力と二方向等曲げを受ける単調載荷実験⁵⁾

中心圧縮実験に用いたのと同じ断面を柱部分に用い、柱断面に対し 0° 、 22.5° 、 45° 方向からの曲げ応力を加えるため図-3.1に示す形状の試験体を用い、図-3.2に示す方法で単調載荷を行う実験が計画された。

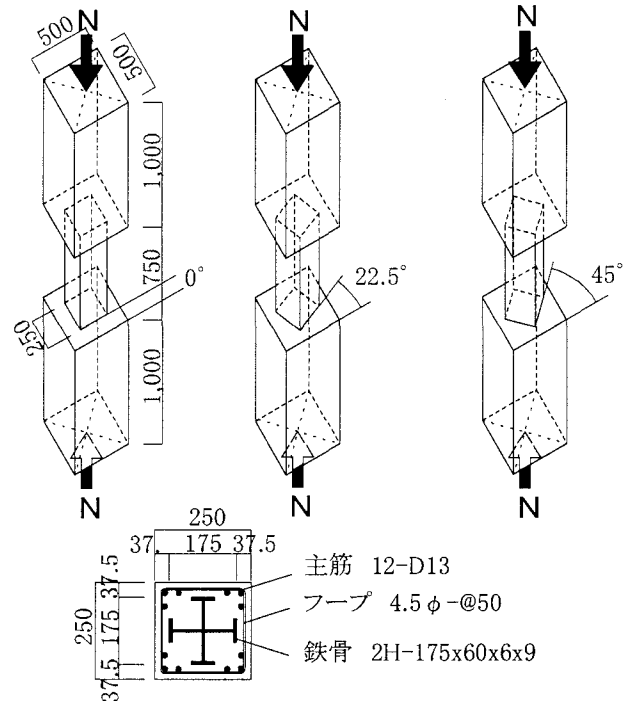


図-3.1 試験体形状

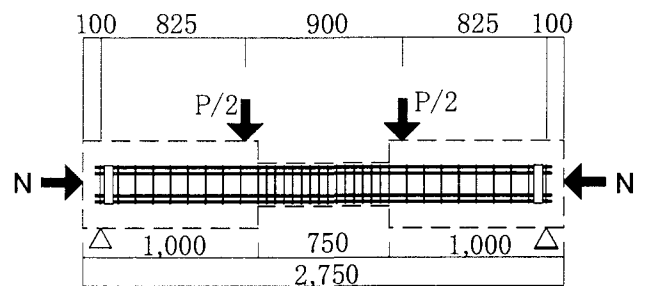


図-3.2 載荷方法

作用軸方向力は柱断面の中心圧縮耐力を N_0 とし、0、0.2 N_0 、0.4 N_0 の場合について行った。

試験体材料強度一覧を表-3.1に、実験結果一覧を表-3.2にそれぞれ示す。

表-3.1 試験体材料の力学特性 (単位: kgf/cm²)

軸力比	フランジ	ウェブ	主筋	コンクリート	
				圧縮	引張
0				274	27
0.2	3,730	3,780	3,620	334	31
0.4				285	27

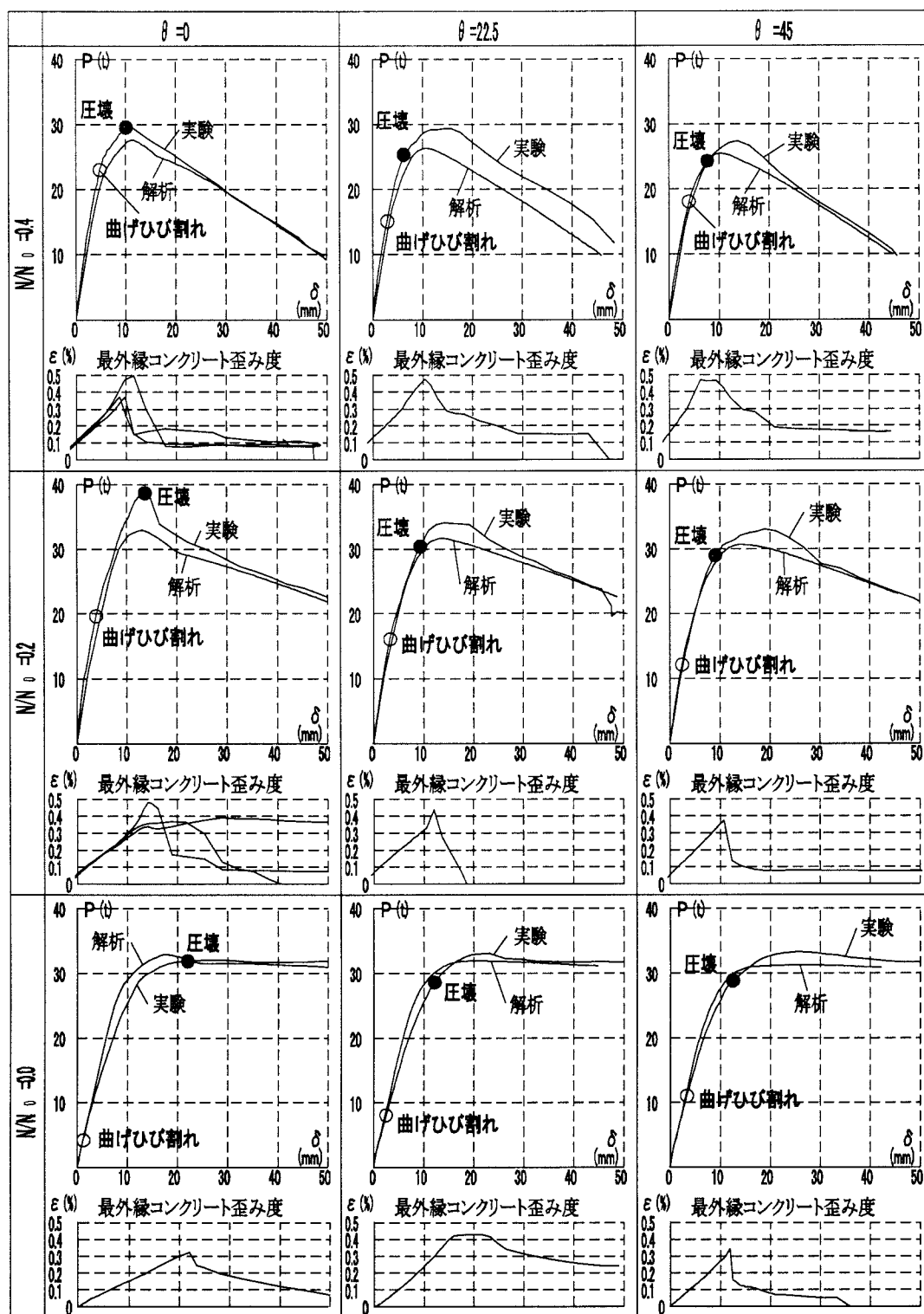


図-3.3 単調載荷実験における荷重-変形曲線およびコンクリート圧縮縁ひずみ度

表-3.2 実験結果一覧(P-δ 効果補正後の荷重を示す)

軸力 比	圧壊荷重 (tf)			最大荷重 (tf)		
	0°	22.5°	45°	0°	22.5°	45°
0	32.0	28.6	28.8	32.1	33.1	33.3
0.2	38.5	30.5	29.0	38.5	34.1	33.1
0.4	29.5	26.0	24.3	29.6	29.4	27.4

図-3.3 に荷重-変形曲線を示す。図-3.3 中の○印は曲げひび割れが、●は圧縮縁コンクリートの圧壊が認められた点を示す。載荷角度が大きくなるにしたがって、圧壊荷重は小さくなる傾向がある。また、作用軸力が 0 の場合は最大耐力以降の耐力低下は見られないが、作用軸力が大きくなると、最大耐力以降の耐力低下が大きくなっている。

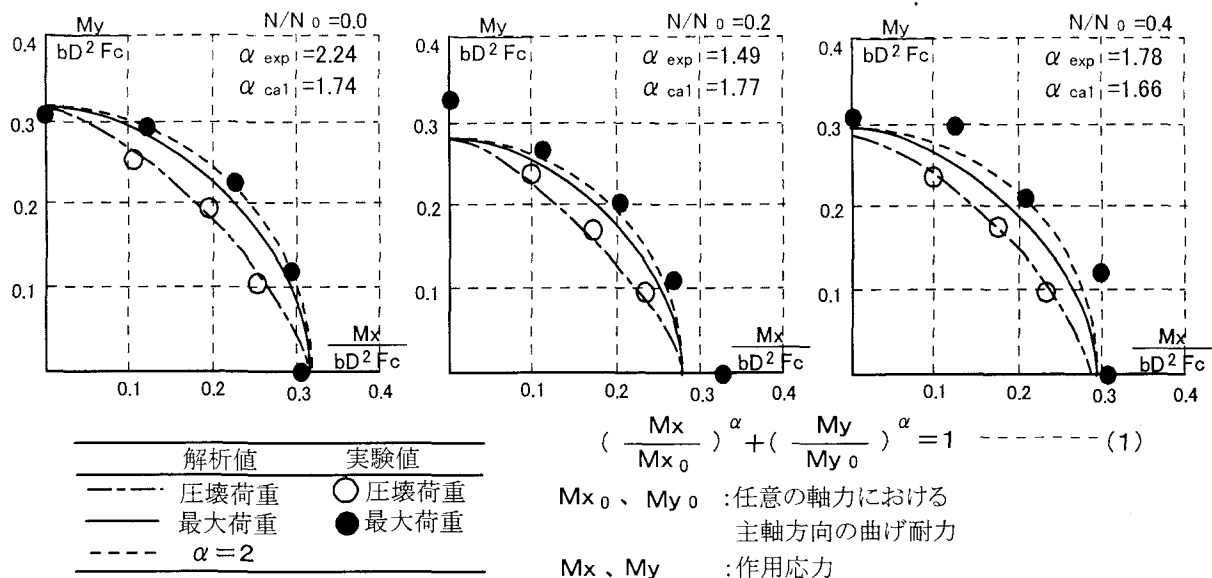


図-3.4 Mx-My 破壊曲線

図-3.4 に Mx-My 破壊相関曲線を示す。縦軸及び横軸は、y 軸回りのモーメント M_y/bD^2F_c 及び x 軸回りのモーメント M_x/bD^2F_c (b : 断面の幅、 D : 断面のせい、 F_c : コンクリートの圧縮強度) である。●及び○は実験値で最大荷重及び最外縁コンクリートの圧壊荷重を示す。なお、最大荷重及び圧壊荷重とも、たわみによる付加モーメントの影響が考慮されている。実験値は、断面が対角線に対して対称であるので $M_y/M_x \geq 1$ の範囲は $M_y/M_x \leq 1$ の値を用いて表示されている。

図中の破線は、主軸方向曲げ耐力の解析値を規準とし、図中 (1) 式の α を 2 として描いたものである。図中の一点鎖線および実線は解析の項で述べる。

α_{exp} は、図中 (1) 式において、 M_{x0}, M_{y0} の値として載荷角度が 0° の場合の実験値より求められた最大荷重を代入し、かつ 0° と 45° の最大荷重から逆算して求められた値である。一方、 α_{cal} は、 α_{exp} を求めるのと同様の手法で最大荷重の解析値より求められた値である。

実験値をみると作用軸力 $0.2N_0$ の場合は載荷角度が大きくなるにしたがって耐力が小さくなる傾向がみられるが、作用軸力 0 の場合は載荷角度が大きくなっても耐力は小さくならない。実験から求められた α の値は、作用軸力比によって異なり 1.49~2.24 の範囲にあるが、作用軸力が存在する場合は 2 よりも小さな値となっている。

本研究の結果以下のことが明らかになった。

1. 載荷角度が大きくなるにしたがって、コンクリートの圧壊荷重は小さくなるが、最大耐力に達する変形量は大きくなる。
2. 作用軸力比が大きくなるにしたがって、最大耐力以後の耐力低下の割合は大きくなる。
3. 実験結果より求められる (1) 式の α の値は 1.49~2.24 の範囲にあるが、作用軸力が存在する場合は 2 よりも小さくなる。

4. 軸方向力と二方向等曲げを受ける繰返し載荷実験⁶⁾

繰返し載荷による耐力低下が発生するかどうかを確かめるための、前節で用いたとまったく同じ試験体による繰返し載荷による実験が計画された。

試験体材料強度一覧を表-4.1 に示す。

表-4.1 試験体材料の力学特性 (単位: kgf/cm²)

軸力比	フランジ	ウェブ	主筋	コンクリート	
				圧縮	引張
0				262	22
0.2	3,730	3,780	3,620	273	23
0.4				216	20

図-4.1 に、繰返し載荷時の荷重-変形曲線を、図-4.2 に繰返し載荷時の Mx-My 破壊相関曲線をそれぞれ示す。図中の□及び○は実験値で最大荷重及び最外縁コンクリートの圧壊荷重を示す。図中の破線および実線は解析の項で述べる。

図-4.1 を見る限り、繰返し載荷時の荷重-変形曲線の包絡線は、単調載荷時の荷重-変形曲線とほぼ同じであり、繰返し載荷による著しい耐力低下は見られない。

また、図-4.2 に示す繰返し載荷時の Mx-My 破壊相関曲線を見ると、図-3.4 に示した単調載荷時の Mx-My 破壊相関曲線とほとんど変わらない。

本研究の結果、以下のことが明らかになった。

1. 軸力比、載荷角度にかかわらず、破壊性状は単調載荷の場合とほぼ同じである。
2. 軸方向力が大きくなるにしたがって、最大耐力は早い載荷サイクルで発揮されるが、載荷角度による相違はほとんど見られない。

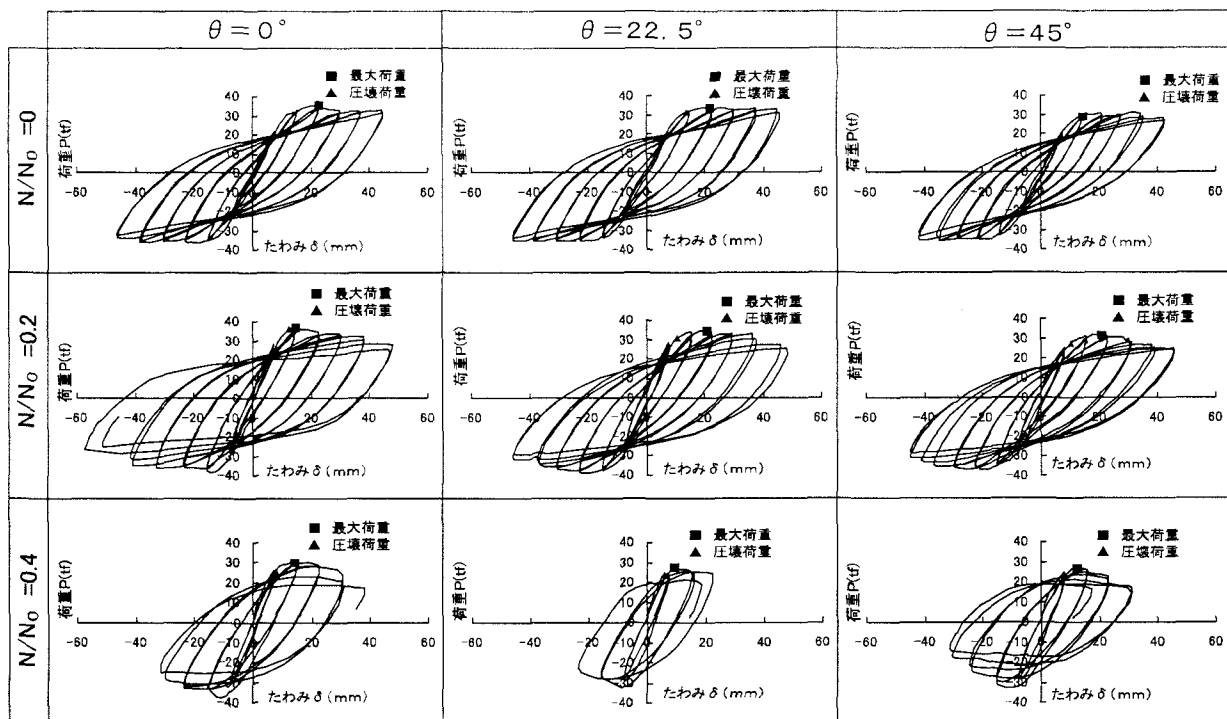


図-4.1 繰返し載荷実験における荷重-変形曲線

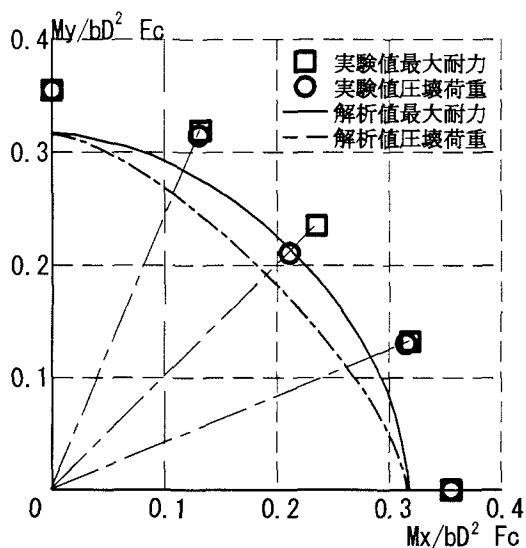


図-4.2 $M_x - M_y$ 破壊曲線

5. 軸方向力と二方向曲げを受ける柱の解析⁷⁾

断面の軸方向力と曲げモーメントの相互作用の算定は、図-5.1 に示すように断面を細分した計算モデルを用いたメッシュ法によった。

断面各部のひずみ度は、平面保持の仮定をおき圧縮最外縁コンクリートのひずみ度および中立軸角度と位置を設定することにより、幾何学的関係から算出する。算出された断面各部のひずみ度に別途設定する材料ごとの応力度-ひずみ度関係から各部の応力度を求め、これに各部に断面積を乗ずることにより各部の応力を求める。この応力を全断面にわたって合計したものを断面の軸方向

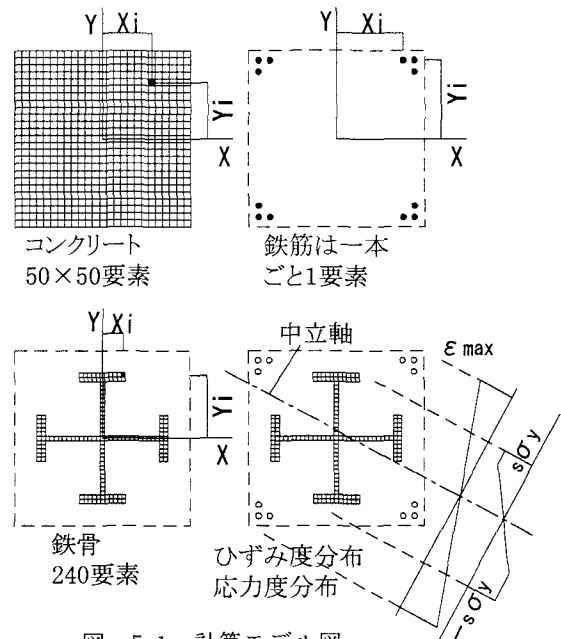


図-5.1 計算モデル図

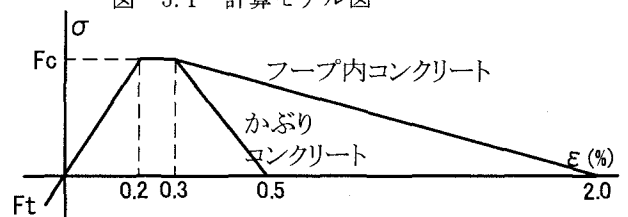


図-5.2 仮定したコンクリートの応力度-ひずみ度関係

力に、各部の応力に、 XY それぞれの断面のせいの中心からの距離を乗じて合計したものをそれぞれの方向に対する曲げモーメントとする。

算定に際して用いる材料ごとの応力度－ひずみ度関係は、鉄筋および鉄骨については完全弾塑性型、コンクリートについては、中心圧縮柱の実験結果を参考に図－5.2 のように定められた。なお、材料強度は実験結果に合わせてそれぞれ設定された。

部材の変形は、仮定した中立軸位置と最外縁圧縮ひずみ度から曲率 ϕ を定め、これを部材長にわたり数値積分することにより算定された。

単調載荷実験で得られた最大耐力と、解析で得られた最大耐力の対比を表－5.1 に示す。実験値と解析値はよく対応している。

表－5.1 単調載荷実験結果と解析値の比較

軸力比	角度	実験値 (tfm)	解析値 (tfm)	実験値 / 解析値
N/N ₀ =0	0	13.22	13.60	0.97
	22.5	13.65	13.17	1.04
	45	13.74	12.91	1.06
N/N ₀ =0.2	0	17.01	14.65	1.16
	22.5	15.41	14.23	1.08
	45	15.20	13.99	1.09
N/N ₀ =0.4	0	13.87	13.13	1.06
	22.5	14.46	12.59	1.15
	45	13.17	12.21	1.08

図－3.4 および図－4.2 に示した一点鎖線は、解析により求められた圧壊荷重、実線は解析によって求められた最大荷重をそれぞれ示している。なお、圧壊荷重は実験結果から最外縁コンクリートのひずみ度が 0.4 前後の時に観察されたので、解析においても最外縁コンクリートのひずみ度が 0.4 の時点を押壊荷重とした。

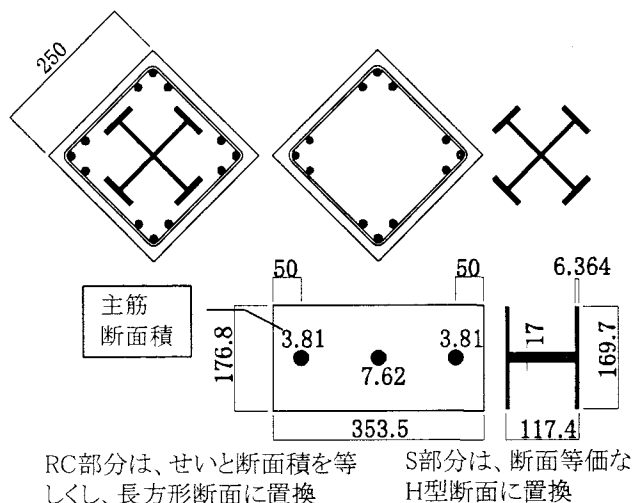
図－3.3 に実験結果と解析結果が合わせて示されているが、両者はよく対応していると考えられる。

6. 設計式の提案

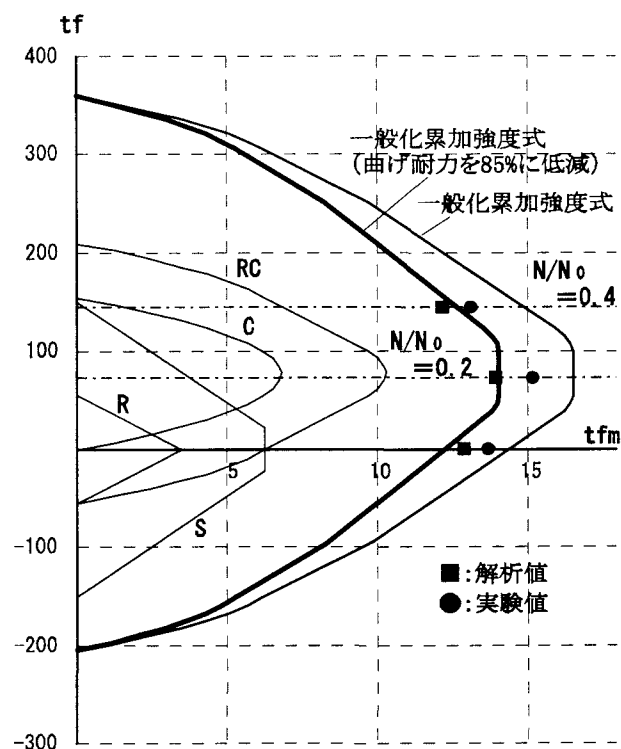
実用設計では、一定の精度でなるべく簡便に耐力評価ができることが望ましい。

そこでここでは、実用的に最も簡便に断面の 45° 方向曲げ耐力を計算することを考え、断面を図－6.1 に示すように単純化する。

すなわち、RC 部分は一辺の長さが正方形断面の対角線寸法と等しく、かつ断面積も等しい長方形に置き換える。主筋は、圧縮縁および引張縁の主筋群のみが置換長方形断面の主筋位置にあるものとみなすが、断面の外面から主筋群重心までの距離は実情に合わせて設定するものとする。断面のせいの中心付近に位置する直交方向主筋は、断面積は考慮するが、曲げ耐力には考慮しないものとする。



図－6.1 等価な長方形断面への置換



図－6.2 提案法、実験値、精算値それぞれの曲げ耐力の比較

十字型鉄骨は、断面積が等しく、かつ 45° 方向の塑性断面係数とほぼ等しい塑性断面係数をもつ H 型断面に置換するものとする。

このようにして断面各部の軸方向力と曲げモーメントの相互作用を算定し、一般化累加強度式を適用し SRC 断面としての軸方向力と曲げモーメントの相互作用を得ることとする。このようにして得られた断面の 45° 方向に対する曲げ耐力に低減係数－ここでは 0.85 を提案する－を乗じることにより、断面の 45° 方向に対する曲げ耐力を推計することができる。

このような考えに基づき、単調載荷実験で用いた断面

について軸方向力と曲げモーメントの相互作用を計算し、 45° 方向載荷実験結果ならびにメッシュ法を適用し精算した結果の比較を図-6.2に示す。

なお、一般化累加強度式の適用にあたってコンクリート圧縮強度は、表-3.1に示した各試験体圧縮強度を平均した値を用いた。

ここで提案している一般化累加強度式で得られた曲げ耐力に対する低減係数は、次のような考えに基づいている。図-6.2によると、図-6.1に基づき簡便に長方形に置換した断面寸法を用い、一般化累加強度式を適用して得られた曲げ耐力は、全般的にやや過大となる傾向があるが、これは以下の理由と考えられる。①RC部分に関しては、圧縮コンクリートのストレスブロック平面形状が三角形になるため、応力中心間距離がストレスブロック平面形状が四角形の場合より少し短くなること、また②鉄骨部分は相対的にかぶり厚さが大きくなるため降伏範囲が広がりにくいこと。上記②については、図-6.3に示す本研究で用いた断面をそのままメッシュ解析を行った結果より得られた最大曲げ耐力時のひずみ度分布から推定される、断面の降伏範囲からも明らかである。すなわち、通常の軸方向力の範囲では断面の最大耐力時であっても鉄骨ウェブ部分はほとんど降伏せず、かつ直交主筋もほとんど曲げ耐力に寄与するほどにはひずみ度が大きくならないことがわかる。

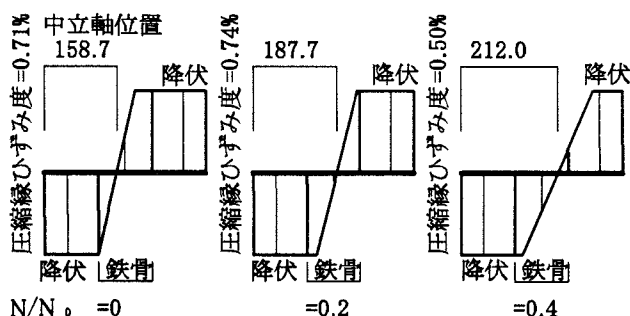


図-6.3 解析による最大耐力時の降伏範囲

一方、実際の構造物で多く用いられる鉄骨断面の場合、塑性断面係数の構成比は、おおむねフランジが70%、ウェブが30%程度が多い。図-6.3によればウェブは最大耐力時にも降伏せずば弾性的であるため、耐力評価用の塑性断面係数を考える場合は、ウェブはおおむね半分程度しかないとみなすことが現実的であろう。このようなことから、鉄骨部分の耐力を「フランジ部分耐力」+「ウェブ部分耐力の半分」と考え、 $70+30/2=85$ より85%に低減すれば実情に近い値が得られる。RC部分はストレスブロックの平面形状の違いが原因であるが、簡便のため鉄骨に対する低減率をそのまま流用し、SRC断面全体として挙げ耐力を85%に低減することにより、簡便に、かつ比較的精度良く二対称軸SRC柱の 45° 方向の曲げ耐力を算定できる。

7. おわりに

本報に示した一連の研究で、二軸対称断面をもつSRC柱の中心圧縮実験から、SRC柱においてもフープ筋の拘束効果は有効に作用するが、鉄骨による拘束効果では強度上昇は期待できないものの変形能力の増大は期待できることが示された。また、軸方向力と二方向曲げモーメントを受けるSRC柱の耐力は圧縮軸方向力が作用している場合、 45° 方向の曲げ耐力は、 0° 方向の曲げ耐力より小さくなることが明らかにされた。また、軸方向力と二方向曲げモーメントを受けるSRC柱の変形性状は、載荷方向にかかわらず大差ないことも明らかになった。

さらに、メッシュ法による解析は断面の耐力を精度よく算定できることが確かめられた。

これに基づき簡便で実用的な 45° 方向耐力の算定手法を提案した。

なお、筆者らは本研究に引き続き、軸方向力と二方向曲げせん断力を受けるSRC柱の耐力及び変形性状を明らかにするための研究を行っており、さらに図-7.1に示す建築構造物で比較的頻繁に使用されるT型鉄骨を用いたSRC柱の耐力と変形性状についての研究を継続しているところである。

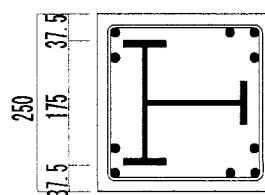


図-7.1 T型鉄骨内臓SRC柱

参考文献

- 1) 足立、筒井、西村他：鉄骨鉄筋コンクリート柱の圧縮破壊性状、日本建築学会大会梗概集、1997年9月、pp.961-962
- 2) J.B.Mander, M.J.N.Priestley, R.Park :THEORETICAL STRESS-STRAIN MODEL FOR CONFINED CONCRETE, Journal of Structural Engineering. Vol.114, No.8, 1988, ASCE, pp.1804-1826
- 3) 鈴木、中塚、菅田：角型補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性、JCI 年次大会、1989、pp.449-454
- 4) 鈴木、中塚、岸本：RC柱部材の曲げ靱性確保のための横補強筋量に関する解析的考察、JCI 年次大会、1990、pp.139-146
- 5) 筒井、世良、西村他：二軸曲げを受けるSRC部材の耐力と変形（その1）～（その3）
日本建築学会大会梗概集、1993年9月、pp.1681-1682
日本建築学会大会梗概集、1994年9月、pp.1747-1748
日本建築学会大会梗概集、1994年9月、pp.1749-1750
- 6) 筒井、世良、西村他：二軸曲げを受けるSRC部材の耐力と変形（その4）～（その5）
日本建築学会大会梗概集、1995年9月、pp.691-692
日本建築学会大会梗概集、1996年9月、pp.885-886
- 7) 筒井、世良：軸方向力と二軸曲げモーメントを受けるSRC柱の終局曲げ耐力、日本建築学会大会梗概集、1992年8月、pp.1733-1734