

## (2) 実験データベースに基づくSRC柱の 終局曲げ耐力の検討

那良 幸太郎<sup>1</sup>・藤永 隆<sup>2</sup>・孫 玉平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 神戸大学大学院 大学院生 工学研究科建築学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail:ftaka@kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 神戸大学 准教授 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail:ftaka@kobe-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 神戸大学大学院 教授 工学研究科建築学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail:sunlili@people.kobe-u.ac.jp

本論では、我が国でこれまで行われたSRC柱の実験結果よりデータベースを作成し、実験値とSRC規準式、および拘束効果を考慮した曲げ耐力とを比較した。H形鋼内蔵SRC柱で強軸曲げの試験体115体、十字型鉄骨内蔵のSRC試験体84体について、さまざまなパラメータのもとで曲げ耐力の比較を行った。拘束効果を考慮した曲げ耐力は日本建築学会の終局耐力式によるものと比べ全体的なばらつきが小さく、高軸力下での評価が良好であった。

**Key Words :** SRC Beam-Columns, H-shaped Steel Bent in Strong Axis, Cruciform Steel, Confinement Effect, Strength Increase Factor for Concrete

### 1. はじめに

軸方向力と曲げモーメントを受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ耐力は、鋼柱とコンクリート柱の曲げ耐力の累加により算定することになっている。また、同規準では鉄骨鉄筋コンクリート計算規準・同解説（以下SRC規準）<sup>1)</sup>では、曲げ耐力を算定する際に、圧縮側の鉄骨比に応じてコンクリート強度を低減することとなっている。しかし、帯筋や内蔵鉄骨による拘束効果が曲げ耐力に考慮されていないため、拘束効果によるコンクリートの強度上昇分は曲げ耐力に盛り込まれていない。既往の研究では、南等が帯筋や十字形鉄骨による拘束効果を考慮したSRC柱のコンクリート強度増加係数を提案している<sup>2)</sup>。本論では、我が国でこれまで行われたSRC柱の実験結果よりデータベースを作成し、実験値とSRC規準式、および拘束効果を考慮した曲げ耐力とを比較する。

### 2. SRC柱の実験データベース

軸力と曲げを受ける SRC 柱の実験データベースを、

文献3を参考にして作成した<sup>3)~12)</sup>。本論では、内蔵鉄骨の断面形状が H 形鋼で強軸曲げのものと、十字型鉄骨のものを対象とし、H 形鋼内蔵で弱軸曲げの試験体や非充腹型鉄骨の試験体は除外している。実験データは日本建築学会構造系論文集、日本建築学会大会学術講演梗概集、日本コンクリート協会年次論文集より収集している。試験体数（レコード数）は、H 形鋼内蔵 SRC 柱強軸曲げ試験体が 289 体、十字型鉄骨内蔵 SRC 試験体が 166 体

表-1 実験条件の範囲

|                                  | H形鋼内蔵<br>(強軸曲げ) | 十字型鉄骨内蔵     |
|----------------------------------|-----------------|-------------|
| 断面せい・幅 (mm)                      | 200~331         | 200~650     |
| 軸力比                              | 0~0.693         | 0~0.731     |
| $s\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 223~842         | 223~808     |
| $m\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 267~547         | 314~566     |
| $h\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 241~1412        | 287~1439    |
| $c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 12.1~48.6       | 18.1~72.7   |
| せん断スパン比                          | 1.5~6           | 1.5~6       |
| $p_w$ (%)                        | 0.106~1.538     | 0.167~1.532 |

$s\sigma_y$ ,  $m\sigma_y$ ,  $h\sigma_y$ : 内蔵鉄骨, 主筋, 帯筋の降伏応力度,  
 $c\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度,  $p_w$ : 帯筋比

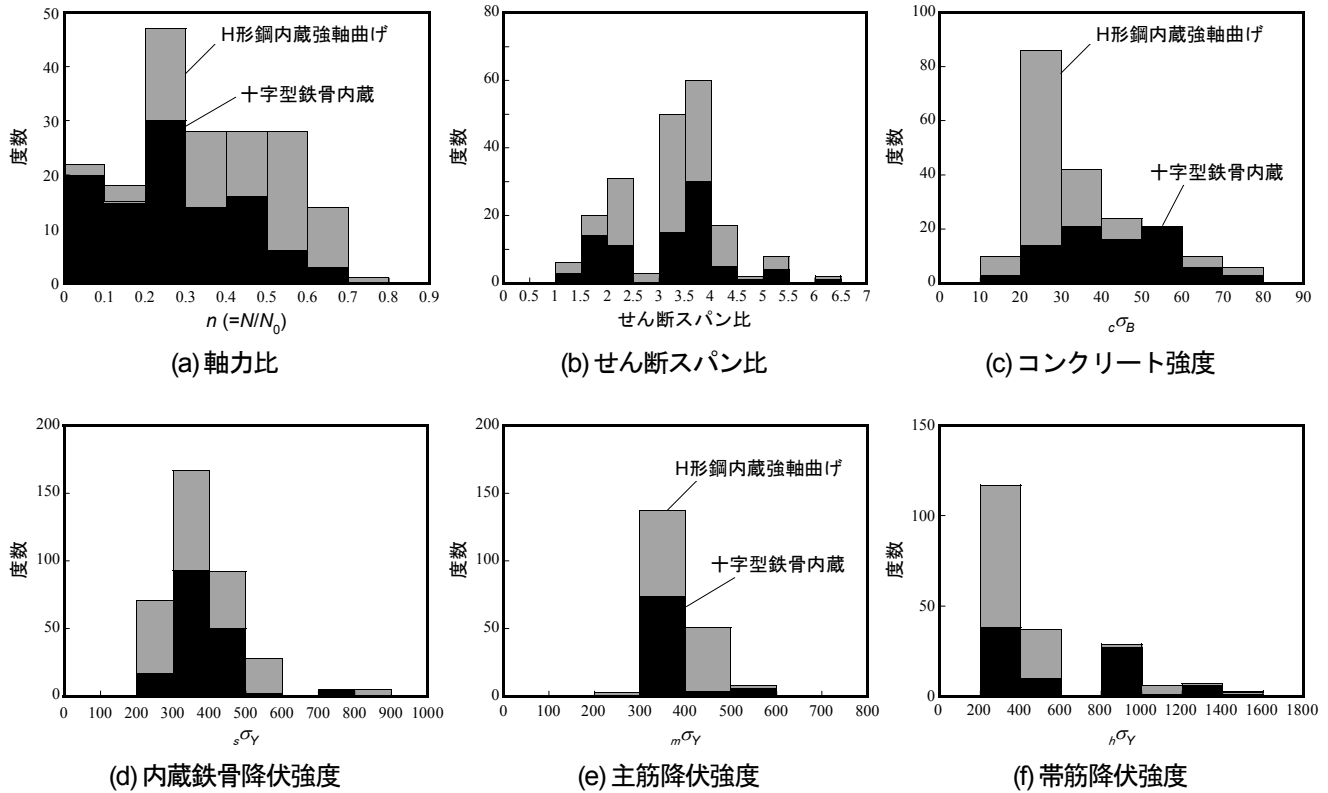


図-1 度数分布

で、そのうち、断面せい・幅が 200mm 以上の試験体、破壊モードが曲げ破壊の試験体もしくは文献中に破壊モードが示されていないが SRC 規準の終局耐力式でせん断余裕度が 1 以上である試験体（H 形鋼内蔵強軸曲げと十字型鉄骨内蔵それぞれ 115 体，84 体）を用いて検討する。比較検討した実験条件の範囲を表-1 に、度数分布を図-1 に示す。

H 形鋼内蔵強軸曲げ SRC 柱は比較的高軸力のもので実験されているが、十字型鉄骨内蔵 SRC 柱では軸力比の小さいものが多い。コンクリート強度は H 形鋼強軸曲げでは低強度のものがほとんどであるが、十字型鉄骨内蔵では高強度コンクリートを使用した試験体が多い。また、十字鉄骨内蔵では帯筋の降伏強度の大きい試験体の実験が多くなされているが、H 形鋼強軸曲げの試験体は少ない。

### 3. 実験値と計算耐力の比較

実験最大曲げ耐力  $M_{U,exp}$  は、軸力による付加曲げモーメントを考慮している。文献中に最大曲げ耐力が記述されていない場合は、荷重-変形関係より読み取った。計算終局耐力の算定は SRC 規準の終局曲げ耐力式により算定した<sup>1)</sup>。算定の際、鋼の降伏応力度は全て引張試験によるものを用い、またコンクリート強度低減係数、お

よび強度増加係数は以下の式を用いて算定した<sup>2)</sup>。

- i) 現行 SRC 規準のコンクリート強度低減係数  $c r_U (= \Lambda_1)$

$$\Lambda_1 = c r_U = 0.85 - 2.5 s p_c \quad (1)$$

ここに、 $s p_c$ ：圧縮側鉄骨比 ( $a_c / bD$ )， $s$ ：圧縮側鉄骨フランジの断面積， $b$ ：柱幅， $D$ ：柱せい

- ii) 帯筋によるコンクリート拘束効果における強度増加係数  $\Lambda_2$

$$\Lambda_2 = \left( 2.05 \frac{p_w \sigma_Y}{F_c} \right) \frac{A_{c0}}{A} \quad (2)$$

ここに、 $A_{c0}$ ：帯筋により囲まれた部分のコンクリートの断面積， $p_w$ ：帯筋比 ( $w a / b x$ )， $w \sigma_Y$ ：帯筋の降伏応力度

- iii) 鉄骨ウェブによるコンクリート拘束効果における強度増加係数  $\Lambda_3$ （十字形のみ）

$$\Lambda_3 = \left( 2.05 \frac{p_s \sigma_Y}{F_c} \right) \frac{A_{ft}}{A}, p_s = \min \left( \frac{t_{w1}}{D}, \frac{t_{w2}}{b} \right) \quad (3)$$

ここに、 $A_{ft}$ ：鉄骨ウェブで囲まれた部分のコンクリートの断面積， $t_{w1}$ ：一方向の鉄骨ウェブの厚さ， $t_{w2}$ ：それと直交する鉄骨ウェブの厚さ

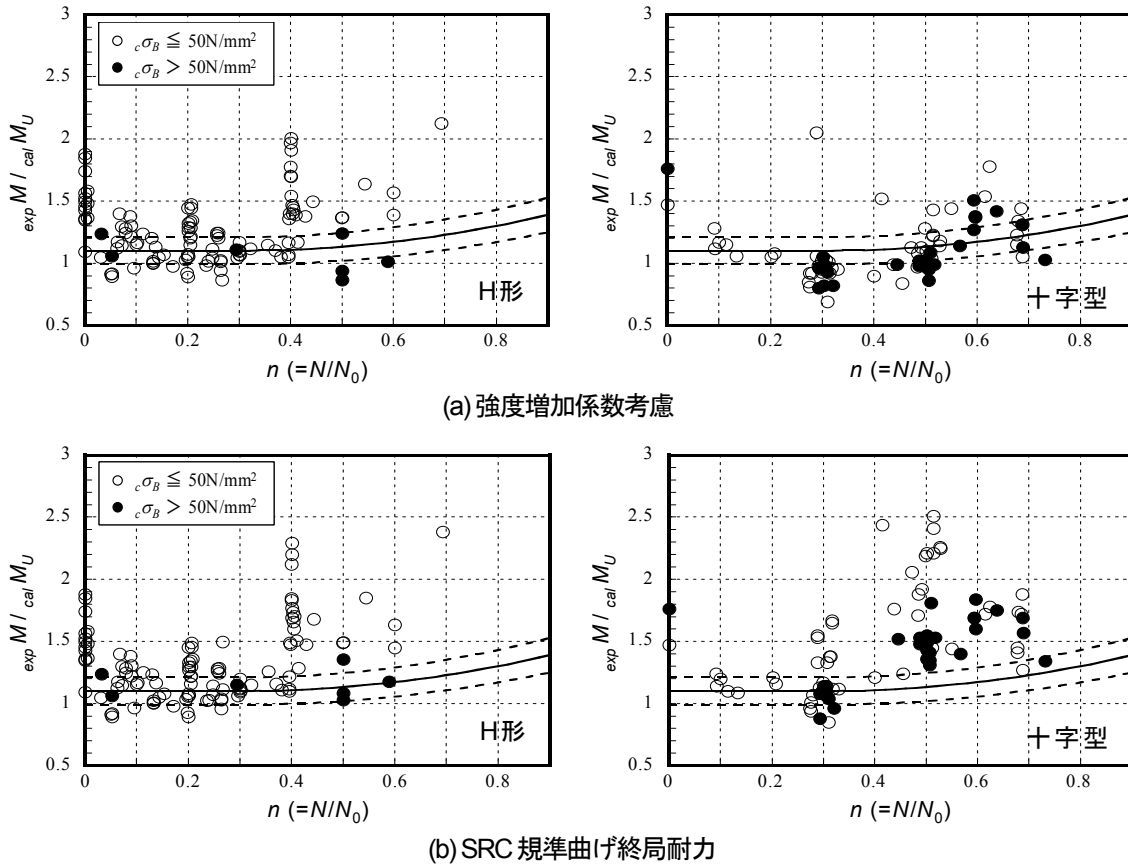


図-2 曲げ耐力比－軸力比関係

iv) SRC 柱のコンクリート強度増加係数 $\Lambda$

$$(\text{H形}) \quad \Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 \quad (4-1)$$

$$(\text{十字型}) \quad \Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 \quad (4-2)$$

実験値と計算耐力との曲げ耐力比と軸力比の関係を図-2に示す。図中○、●印は各データの曲げ耐力比の算定値をプロットしたもので、○印はコンクリート強度 $50\text{N/mm}^2$ 以下で、●印は $50\text{N/mm}^2$ より大きい実験データを表している。実線は孫等がRC柱に対して提案している(5)式<sup>13)</sup>の関係式を示しており、破線で $\pm 10\%$ の誤差範囲を表している。

$$\frac{M_{\text{exp}}}{M_{\text{cal}}} = \begin{cases} 1.10, & n \leq 0.3 \\ 1.10 + 0.8(n - 0.3)^2, & n > 0.3 \end{cases} \quad (5)$$

図より、SRC 規準のコンクリート強度低減係数を用いた時の曲げ耐力では、H形鋼強軸配置、十時鉄骨内蔵ともに曲げ耐力比が1.0を下回る試験体は少ないが全体的な曲げ耐力比のばらつきが大きくなっている。特に、軸力比が大きくなると曲げ耐力比が大きくなる傾向があり、ばらつきも大きい。また、高軸力域でコンクリート

強度が $50\text{N/mm}^2$ 以下のもので実験値を小さめに見積もっている。これはコンクリートの拘束効果による強度上昇の影響が大きく、かつ拘束領域が曲げ耐力分担に大きく寄与している試験体であるためである。

一方、コンクリートの強度増加係数を考慮した曲げ耐力では、SRC 規準の耐力式よりは全体のばらつきが小さく、高軸力領域では比較的良好の評価をしており、コンクリートの圧縮強度による影響も小さくなっている。曲げ耐力比の平均値も1.10であり標準偏差も減少しており、(5)式との対応関係も良好となる。しかし、十字型鉄骨内蔵SRC柱では、低軸力の領域ではコンクリート部の曲げ耐力の影響が大きく現れる部分であるため、コンクリート強度増加係数の影響が大きく、曲げ耐力比が1.0を下回るものが増加している。これは、鉄骨で囲まれる部分と帯筋で囲まれている部分で強度増加係数を二重に見積もっている影響も考えられる。

図-3に曲げ耐力比に関する度数分布を示す。強度増加係数を考慮した時の曲げ耐力比のほうが、SRC 規準式を用いた時よりばらつきが小さいことがわかる。また、H形鋼強軸配置と十字型鉄骨内蔵の試験体では、H形鋼強軸配置試験体の方が強度増加係数考慮によるバラツキの変化が小さい。これは、H形鋼内蔵の試験体ではコンクリート強度増加係数にH形鋼によるコンクリートの

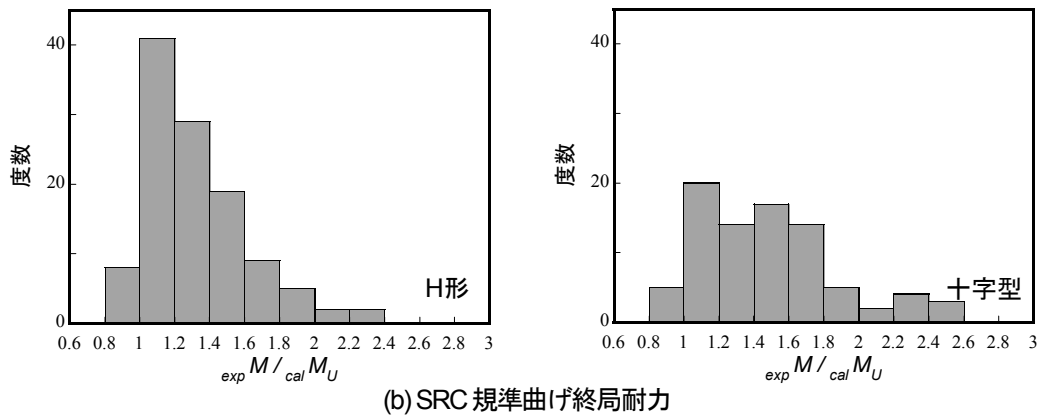
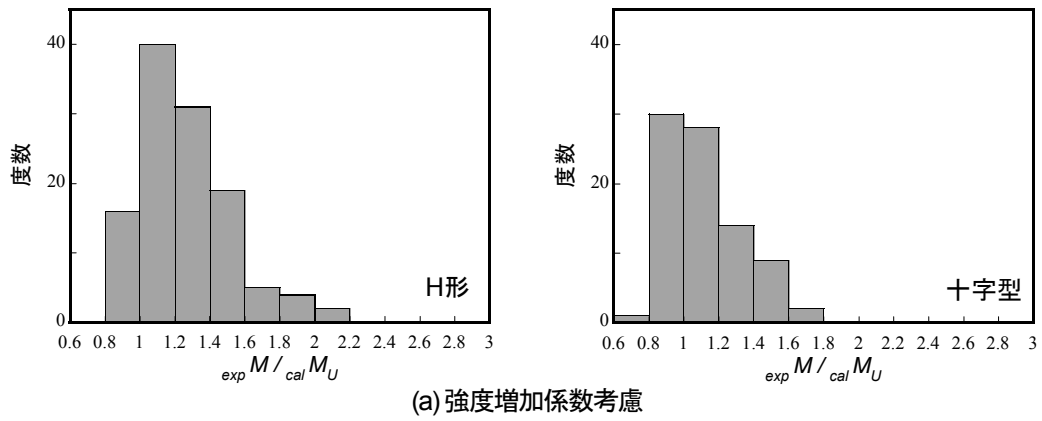


図-3 曲げ耐力比に関する度数分布

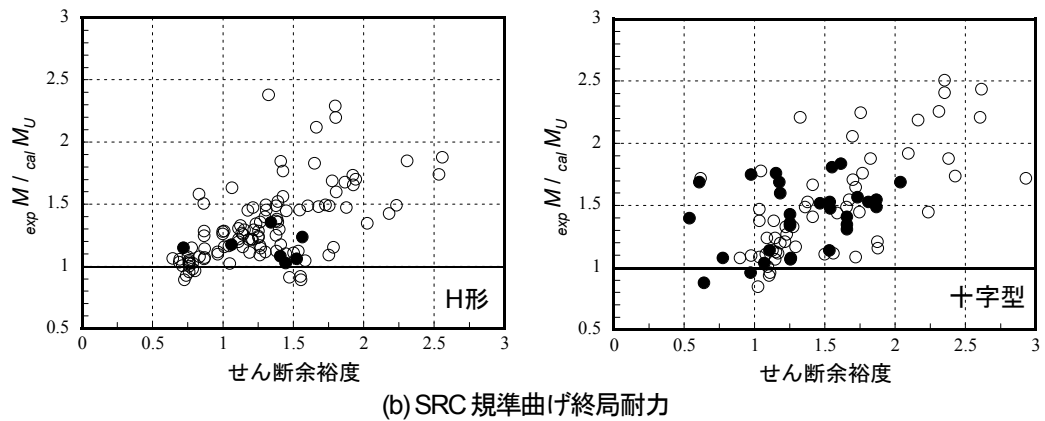
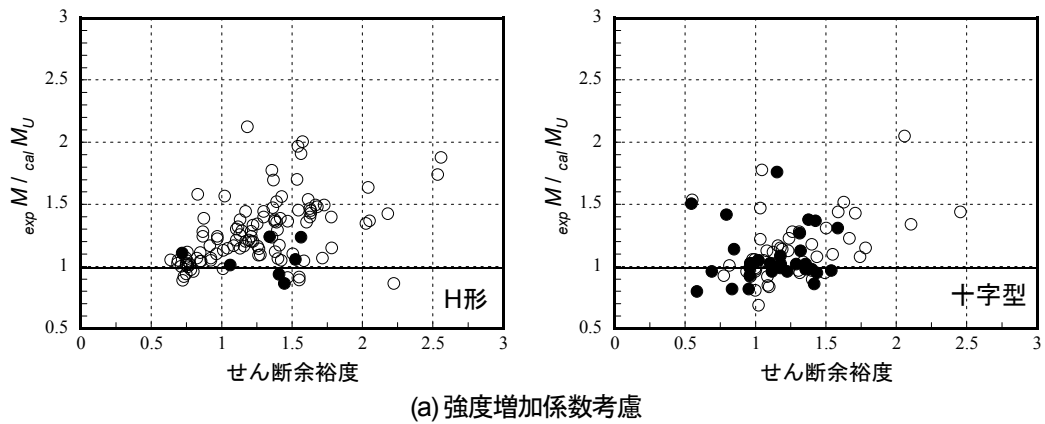


図-4 曲げ耐力比—せん断余裕度関係

拘束効果を考慮せず、帯筋によるもののみ考慮しているためである。

図4に曲げ耐力比とせん断余裕度の関係を示す。図中○印はコンクリート強度  $50\text{N/mm}^2$  以下で、●印は  $50\text{N/mm}^2$  より大きい実験データを表している。コンクリート強度増加係数を考慮した曲げ耐力比の方が全体のばらつきを抑え、比較的良い評価をしていることが分かる。

図5に曲げ耐力比と帯筋の降伏応力度の関係を示す。図より、帯筋の降伏応力度が大きい時に曲げ耐力比が1.0を下回るものが多いことがわかる。特に軸力比の小さいもので顕著である。帯筋による拘束力は内部のコンクリートの膨張性と関係する為、帯筋の降伏応力度の上昇をそのまま強度増加係数に見込むと、効果を過剰に見積もる可能性がある。

#### 4. まとめ

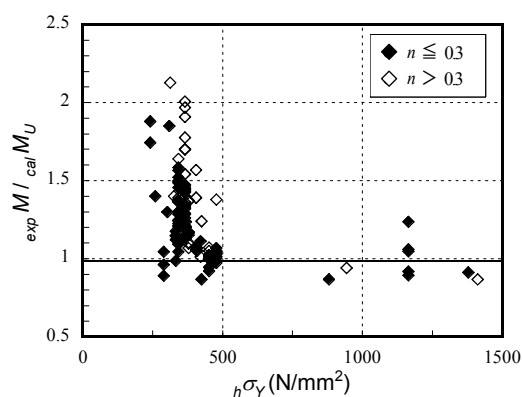
H形鋼内蔵で強軸配置のSRC柱と、十字形鉄骨を内蔵したSRC柱の実験データベースを作成し、帯筋や内蔵鉄骨の拘束効果を考慮した強度増加係数を用いて算定した曲げ耐力の耐力比と種々のパラメータとの対応関係の比較を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) H形鋼内蔵で強軸配置のSRC柱，十字形鉄骨内蔵SRC柱ともに，コンクリートの強度増加係数を考慮した曲げ耐力の方が全体のばらつきが少なく，計算耐力が実験値をよく予測する。
- 2) 高強度の鉄筋を用いた試験体において，帯筋の降伏応力度の上昇をそのまま強度増加係数に見込むと，効果を過剰に見積もる可能性がある。

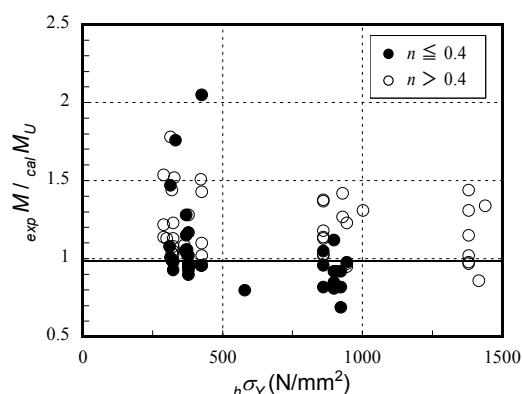
**謝辞：**本研究を行うにあたり，多くの研究者の貴重な実験結果を参照させていただきました。またSRC構造運営委員会の「SRC柱データベース」を参照させていただきました。ここに記して深く感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート計算規準・同解説，2001年1月
- 2) 日本鉄鋼連盟：鋼とコンクリートの複合化研究会中間報告，pp.31-32，2007年3月
- 3) 日本建築学会鉄骨鉄筋コンクリート構造運営委員会SRC構造特性小委員会：SRC構造の終局耐力と変形性能に関する検討とデータベース，pp.2-18，1992年10月
- 4) 宮内靖昌等：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1～7)，日本建築学会大会



(a)H形鋼内蔵強軸曲げ



(b)十字型鉄骨内蔵

図-5 曲げ耐力比-帯筋降伏応力度関係  
(強度増加係数考慮)

- 学術講演梗概集，1990年10月，1991年9月，1992年8月
- 5) 長嶋俊雄等：鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ性状に関する研究(その1，2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1691-1694，1991年9月
  - 6) 平尾元章等：軸力と繰返し曲げを受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の復元力特性(その2，3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1735-1738，1992年8月
  - 7) 古池秀等：高強度のコンクリートと鉄骨を用いたSRC柱の曲げ破壊性状(その1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1685-1686，1993年9月
  - 8) 岡本達雄等：高強度鉄筋を用いたSRC柱の耐力と破壊性状に関する研究(その1～4)，日本建築学会大会学術講演梗概集，1998年9月，1999年9月
  - 9) 土井希祐：変動軸力を受けるSRC柱部材の変形性能とエネルギー吸収性能の評価：コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1633-1638，2003年9月
  - 10) 中村信行等：高強度抵降伏比の鋼材を用いたSRC柱の弾塑性挙動に関する実験的研究(その1～10)，日本建築学会大会学術講演梗概集，2003年9月，2005年9月，2006年9月
  - 11) 李麗，堺純一，松井千秋：軸力と繰返し曲げを受ける十字形鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性挙動，日本建築学会構造系論文集，第596号，

pp.151-157, 2005 年 10 月  
13) 南宏一等：SRC 柱材のコンクリート圧縮設計基準強度の低減係数に関する一考察(その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1159-1162, 2008 年 9 月

12) Yuping SUN, Kenji SAKINO and Tomokazu YOSHIOKA:  
Flexural Behavior of High Strength RC Columns Confined by Rectilinear Reinforcement, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.486, pp.95-106, Aug., 1996

## STUDY OF ULTIMATE FLEXURAL STRENGTH OF ENCASED STEEL REINFORCED CONCRETE BEAM-COLUMNS BASED ON DATABASE

Kotaro NARA, Takashi FUJINAGA and Yuping SUN

A lot of encased steel reinforced concrete (SRC) beam-columns subjected axial load and bending moment have been tested in Japan. Database for maximum bending strength  $M_{max}$  are produced on the basis of experimental works which were performed in Japan. Theoretical strength  $M_U$  is calculated assuming full plastic stress distribution. The nondimensional strength  $M_{max}/M_U$  are examined and discussed in accordance with several parameters such as axial load ratio, margin of shear strength, and yield stress of stirrup.