

論文 鉄骨鉄筋コンクリート柱部材の構造性能に関する研究

檜垣 直也^{*1}・堺 純一^{*2}・田中 照久^{*3}

要旨：鉄骨鉄筋コンクリート（以下 SRC と略記）構造を力学的、合理的に設計するために、本研究では、SRC 規準第 5 版¹⁾に従い、既往の実験によって得られた荷重 - 変形関係から、各種耐力発揮時の変形量を読み取り、軸力比と、各種耐力発揮時の部材角及び計算耐力に対する上昇率、降伏耐力に対する許容耐力の比の関係を調べ、柱材の各種耐力と、SRC 規準の累加強度式で評価することの妥当性を明らかにした。そして、特に、SRC 規準では累加強度式で、RC 部分と S 部分の許容耐力を累加することの妥当性を検討しました。

キーワード：降伏，許容曲げ耐力，終局曲げ耐力，終局せん断耐力，変形

1. 序

鉄骨鉄筋コンクリート（以下 SRC と略記）構造を力学的に合理的に設計するためには、SRC 部材の挙動を精度良く評価できる性能評価法が必要である。しかし、SRC 部材の構造性能評価法に関する研究は少ないのが現状である。SRC 構造の性能を十分に発揮させることを考えた性能設計を行なう上で、稀に発生する地震動に対して構造物及び部材が損傷しない限界である損傷限界状態、極めて稀に発生する地震動に対して構造物及び部材が破壊しない限界である安全限界状態について検討しておくことが必要である。

本研究では、前者を SRC 規準¹⁾の短期許容耐力時、後者を終局耐力時に対応するものと考え、すでに行われた SRC 柱材の実験結果をもとに、これらの耐力及び変形性能について検討する。なお、SRC 規準¹⁾では各種部材の耐力式は示されているが、各耐力に対する変形性能に関する資料はほとんどないのが実情である。特に耐震性能に及ぼす影響が大きいと考えられる軸力比を主な影響因子と考え、鉄骨断面形状、材料強度などが耐力と変形性能に及ぼす影響を調べることを目的として、過去の実験で行われた試験体の諸元をもとに、

各種耐力を算定するとともに、各種耐力の発揮時の変形量を読み取り、耐力及び変形性能の検討を行った。特に短期許容曲げ耐力は、SRC 規準¹⁾では、内蔵鉄骨（以下 S と略記）と鉄筋コンクリート（以下 RC と略記）のそれぞれの降伏耐力を累加して求める強度式で算定することになっているが、累加強度は剛塑性材料を使用したときの耐力評価法としては妥当であるが、弾性状態の耐力評価が妥当であるかといった問題も指摘されているので、その妥当性を検討するために、短期許容曲げ耐力発揮時の変形量がどの程度であるかを検討する。

使用する実験データは、日本建築学会大会学術講演梗概集の SRC 柱材に関する文献 1972 ~ 2008 年^{2) ~ 25)}である。ただし、内蔵鉄骨の形状は、充腹形の十字鉄骨及び単一 H 形鋼を対象とする。各試験体の軸力比と材料強度との内訳を図-1に示す。軸力比は圧縮耐力（鋼材の降伏応力度とコンクリートの圧縮強度を用いて計算した圧縮軸力）に対する作用軸力の比として算定した。対象とした試験体数は 161 体である。その内、曲げ破壊と評価された試験体は 68 体（十字鉄骨 17 体、H 形鋼 51 体）、せん断破壊と評価された試験体は 93 体（十

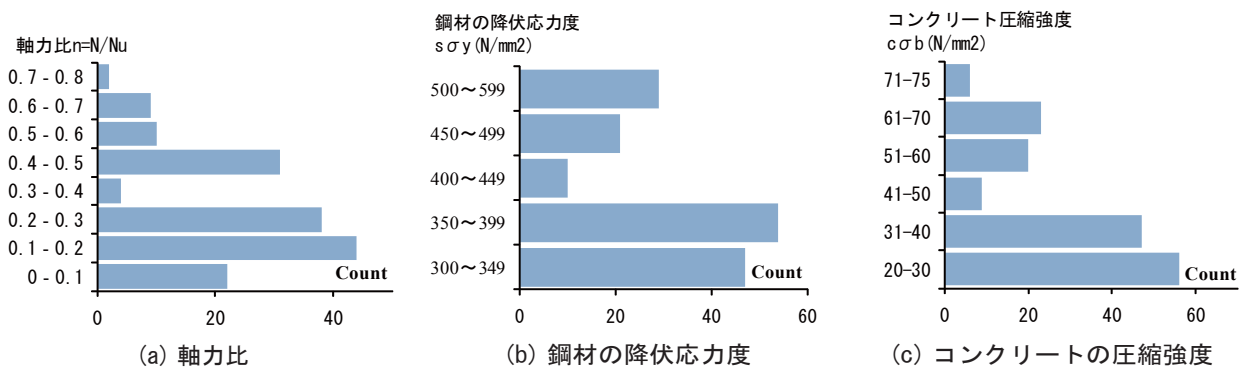


図-1 各試験体の軸力比と材料強度の内訳

*1 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）
 *2 福岡大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）
 *3 福岡大学助手 工学部建築学科（正会員）

字形鉄骨 56 体, H 形鋼 37 体) である。

2. 各種耐力の算定

柱断面の短期許容曲げ耐力, 降伏曲げ耐力および, 終局曲げ耐力を求める際に用いた断面の応力分布を図-2 に示す。

2.1 短期許容曲げ耐力 (単純累加)

SRC 規準¹⁾ の短期許容曲げ耐力式に従い, RC 及び S 部分のそれぞれの許容耐力を単純累加して算定した。

RC の短期許容曲げ耐力は平面保持の仮定のもと, コンクリートあるいは, 主筋が許容応力度に達する時の曲げ耐力として算定している。コンクリートの許容圧縮応力度を (1) 式に示す。(圧縮側鉄骨比に応じて低減させて算定した強度 (以下 SRC 規準¹⁾ に従う f'_c と略記) と低減させていない強度の 2 種類を検討した。

$$f'_c = f_c \left(1 - 15 s p_c \right) \quad (1)$$

ここに, $s p_c$ は圧縮側鉄骨比で, $s p_c = \frac{s a_c}{b D}$ とする

$s a_c$: 圧縮側鉄骨フランジの断面積

b, D : 長方形断面の幅とせい

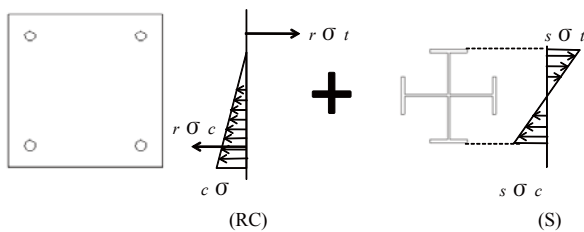
$$f_c = \frac{2}{3} c \sigma_B \quad (2)$$

$$E_C = 3.35 \times 10^4 \times \left(\frac{c r}{24} \right) \times \left(\frac{c \sigma_B}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

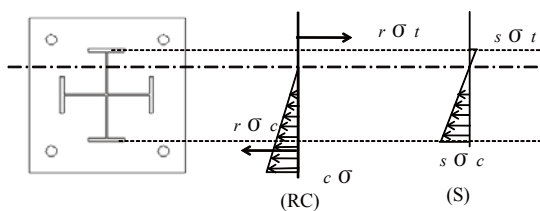
$c r$: コンクリート単位容積重量

$c \sigma_B$: コンクリートの圧縮強度

鉄骨の許容曲げモーメントは平面保持の仮定のもと, 圧縮縁あるいは引張縁の応力が鋼材の降伏点に



(a) 短期許容曲げ耐力



(b) 降伏曲げ耐力

達した時の曲げ耐力として求めている。鋼材の許容応力度は試験体に用いた鋼材の降伏点を用いた。

2.2 降伏曲げ耐力 (平面保持)

SRC 断面に対して, 平面保持の仮定のもと, 各材料が弾性状態で, 圧縮縁のコンクリートあるいは鉄筋及び鉄骨のいずれかが, それぞれの許容応力度に達したときの断面の曲げ耐力を降伏曲げ耐力として算定した。鉄筋および鉄骨については引張あるいは圧縮応力が許容応力度に達したときとする。コンクリートの許容圧縮応力度 f'_c 及びヤング係数 E_C は (2) ~ (3) 式を用いる。なお, f'_c の低減については, (1) 式によるものとし, コンクリート強度を低減したものとしていないものを求めた。

2.3 終局曲げ耐力

SRC 断面の終局曲げ耐力を一般化累加強度で算定した。 M_{pc1} : 鋼材の降伏点とコンクリート圧縮強度を用いて計算した一般化累加強度である。 M_{pc2} : 鋼材の降伏点とコンクリート強度として, SRC 規準¹⁾ に基づき低減した強度を用いて計算した一般化累加強度で算定したものである。ここでは, コンクリート強度を低減させるための係数として SRC 規準に従い $c r_U$ を用いた。

$$c r_U = 0.85 - 2.5 s p_c \quad (4)$$

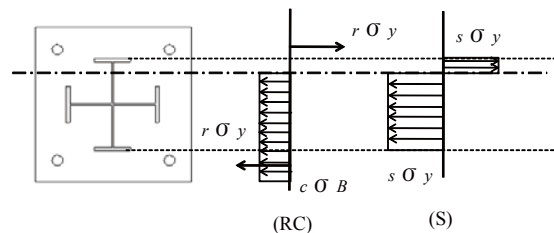
2.4 終局せん断耐力

SRC 規準¹⁾ の終局せん断耐力式に従い, RC 部分, S 部分において, それぞれ曲げで決まるせん断耐力と, せん断で決まる耐力のいずれか小さいほうの耐力を求めた。その後に, それらの耐力の累加を行うことにより算定した。

3. 各種耐力及び変形に関する考察

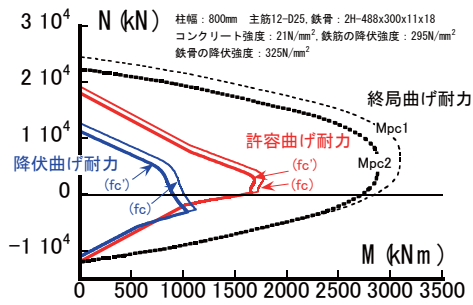
3.1 許容曲げ耐力と降伏曲げ耐力の算定

十字鉄骨を内蔵した SRC 断面の許容曲げ耐力と降伏曲げ耐力の算定例を図-3 に示す。同図の a) はコンク

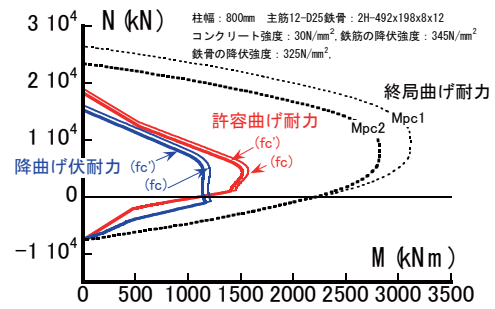


(c) 終局曲げ耐力

図-2 各耐力を求める際に用いた断面の応力分布



a) コンクリートの耐力が鉄骨に比べて小さい場合



b) コンクリートの耐力が鉄骨に比べて大きい場合

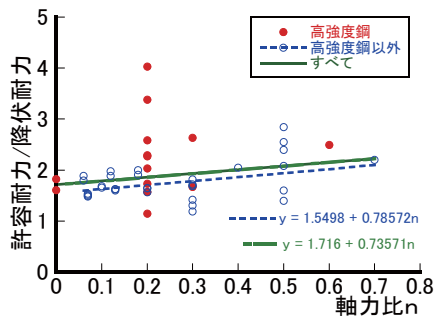
図-3 許容曲げ耐力と降伏曲げ耐力の算定例

リート強度が低く、RCの抵抗モーメントが内蔵鉄骨の抵抗モーメントに比べて、小さい場合の例であり、同図の**b)**はコンクリート強度が大きい場合の例である。両図より、コンクリートの抵抗力が低い場合に、許容曲げ耐力と降伏曲げ耐力の差が大きくなる傾向にあることがわかる。実験データベースの中で、曲げによって耐力が決まる68体の試験体の断面寸法および材料強度を用いて、降伏曲げ強度と許容曲げ耐力を計算した。降伏曲げ耐力に対する許容曲げ耐力の比（以下曲げ耐力比と略記）と軸力比の関係（曲げ耐力比が著しく高い値を除いたもの）を図-4に示す。同図より許容曲げ耐力が降伏曲げ耐力に比べて2倍程度以上となっていることが分かる。これは図-3で説明したように降伏曲げ耐力が小さく評価されるためである。特に高軸力になると2つの強度の差が大きくなり、曲げ耐力比は大きくなる傾向にある。また、内蔵鉄骨に高強度鋼を用

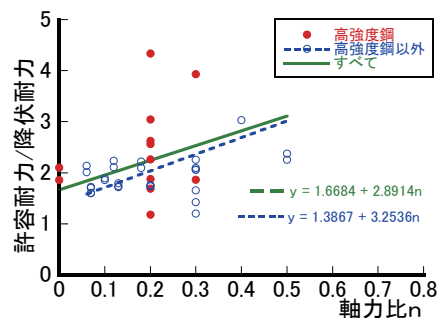
いた場合には曲げ耐力比が高くなる傾向にあることがわかる（図中に高強度鋼を用いた場合を・で示している。）。高軸力下では許容曲げ耐力が非常に小さな値となるか0と評価されるため、曲げ耐力比が5以上と大きくなる試験体が2体あるが、近似化に際しても、これらのデータは含めていない。図中の直線は近似直線を示したものであるが、コンクリート強度として f_c を用いた場合、強度を低減した f'_c （式(2)参照）で算定した場合の方の軸力比が小さいほど曲げ耐力比は小さく、軸力比が大きいほど曲げ耐力比は大きくなる。

3.2 許容曲げ耐力及び降伏曲げ耐力発揮時の変形

既往の実験結果における、各試験体の材料強度を用いて許容曲げ耐力及び降伏曲げ耐力を算定した。実験結果から得られた荷重-変形関係図より、降伏曲げ耐力及び許容曲げ耐力発揮時の部材角を読み取ったものと軸力比の関係を図-5に示す。高強度鋼を用いた試

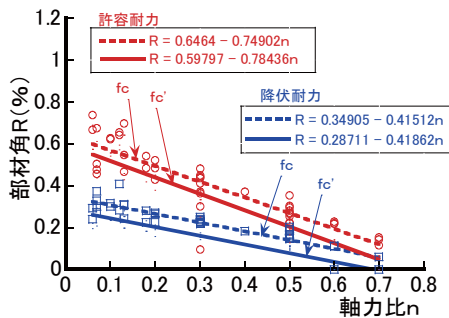


a) 曲げ耐力比 f_c で検討

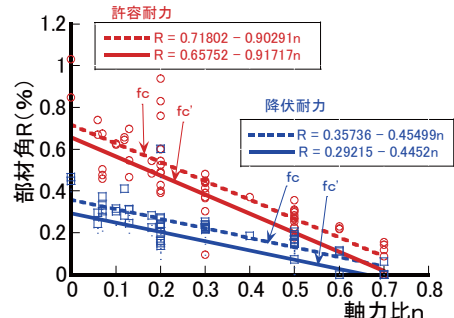


b) 曲げ耐力比 f'_c で検討

図-4 曲げ耐力比と軸力比の関係（曲げ耐力比が著しく高い値を除いたもの）



a) 高強度鋼除く



b) 高強度鋼含む

図-5 許容耐力および降伏耐力発揮時の部材角

験体の実験データを除いたもの（同図の a）と含んだもの（同図の b）とに分けて示す。両図から以下のことがわかる。すべての試験体において、許容耐力を發揮するときの部材角は $1/120$ rad 以下であることがわかる。また、図 - 6 は文献²³⁾の荷重 - 変形曲線図である。今回調査した文献のすべての荷重 - 変形関係において、許容曲げ耐力を發揮する点は初期剛性を保持している状態であり、残留変形を生じていないと思われる。

許容耐力および降伏耐力は軸力比が高くなるにつれて耐力發揮時の変形が小さくなっている。高強度鋼を用いた試験体には、変形に大きなばつぎがみられた。短期許容曲げ耐力および降伏曲げ耐力發揮時の部材角と軸力比の関係は以下のように評価できる。

コンクリート強度を低減した場合の短期許容曲げ耐力時の部材は下式で近似化できている。

$$R = 0.6 - 0.78n \quad (\text{高強度鋼を除く}) \quad (5)$$

$$R = 0.6 - 0.91n \quad (\text{高強度鋼を含む}) \quad (6)$$

降伏曲げ耐力時は、

$$R = 0.29 - 0.42n \quad (\text{高強度鋼を除く}) \quad (7)$$

$$R = 0.29 - 0.44n \quad (\text{高強度鋼を含む}) \quad (8)$$

コンクリート強度を低減しない場合の短期許容曲げ耐力時の部材は下式で近似化できている。

$$R = 0.65 - 0.75n \quad (\text{高強度鋼を除く}) \quad (9)$$

$$R = 0.71 - 0.88n \quad (\text{高強度鋼を含む}) \quad (10)$$

降伏曲げ耐力時は、

$$R = 0.35 - 0.42n \quad (\text{高強度鋼を除く}) \quad (11)$$

$$R = 0.35 - 0.43n \quad (\text{高強度鋼を含む}) \quad (12)$$

上記の近似式から判断すると、短期許容曲げ耐力發揮時の部材角は降伏曲げ耐力發揮時の部材角の2倍程度の値を示すことがわかる。

3.3 終局曲げ耐力

曲げ破壊と判定された試験体で、計算耐力 M_{pc1} 、 M_{pc2} に対する実験耐力の比と軸力比の関係を十字形鉄骨・H形鋼に分けて図-7に示す。計算耐力は鋼材の降伏点とコンクリート圧縮強度を用いて計算した値を使用し、実験耐力には荷重 - 変形関係から読み取った最

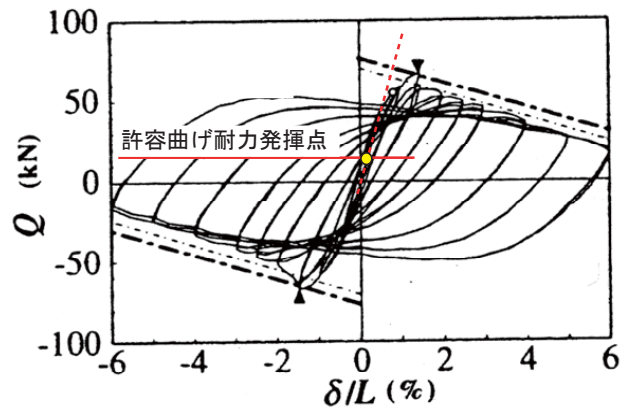
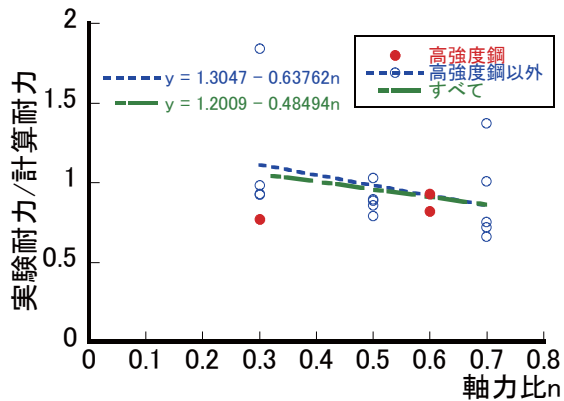
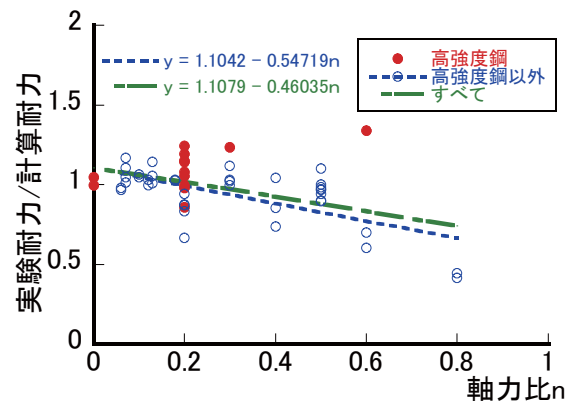


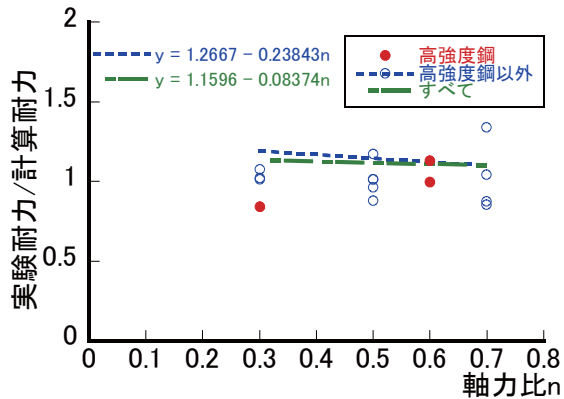
図-6 荷重 - 変形関係曲線の一例



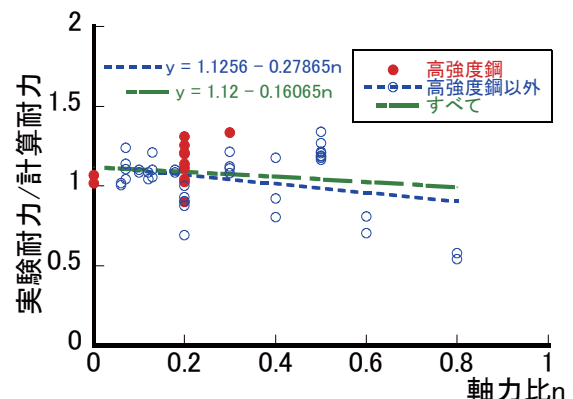
a) 曲げ破壊 M_{pc1} 十字形鉄骨



b) 曲げ破壊 M_{pc1} H形鋼



c) 曲げ破壊 M_{pc2} 十字形鉄骨



d) 曲げ破壊 M_{pc2} H形鋼

図-7 終局曲げ耐力比

大耐力に、軸力による P- δ 効果を加えた値としている。同図より、軸力比と終局曲げ耐力比は傾きは小さいものの、軸力比が大きくなるにつれて終局曲げ耐力比は小さくなっていることがわかる。

3.4 終局曲げ耐力発揮時の部材角

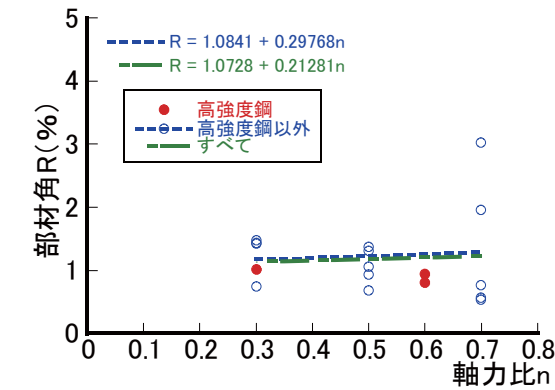
曲げ破壊と判定された試験体で、最大耐力発揮時の部材角と軸力比の関係を内蔵鉄骨が十字形と H 形に分けて図-8 に示す。同図 b) より、H 形鋼を内蔵させた SRC 部材は軸力比が大きくなるにつれて終局曲げ耐力発揮時の部材角は小さくなる傾向がある。一方、同図 a) より、十字形鉄骨を内蔵させた場合には、この変形は軸力比による影響が小さい傾向にあることがわかる。終局曲げ耐力時は、以下の式で表わすことができる。

$${}_m R_u = 2.0 - 1.7n \quad (\text{高強度鋼を含む}) \quad (13)$$

$${}_m R_u = 2.3 - 2.2n \quad (\text{高強度鋼を除く}) \quad (14)$$

3.5 終局せん断耐力の検討

せん断破壊と判定された試験体で、SRC 規準¹⁾の終局せん断耐力式により算定した計算耐力に対する最大耐力の比を図-9 に示す。図より、終局せん断耐力比は、軸力比が大きくなるにつれて大きくなる傾向にある。



a) 十字形鉄骨

終局せん断耐力発揮時の部材角と軸力比の関係を図-10 に示す。近似直線より軸力比が大きくなると、この変形は小さくなる傾向にある。多少ばらつきはあるものの終局せん断耐力発揮時の部材角は 2/100 rad 程度に収まっている。

両図の近似直線より、高強度鋼を用いているか否かの影響を受けないことがわかる。

終局せん断耐力時は以下の式で表わせる。

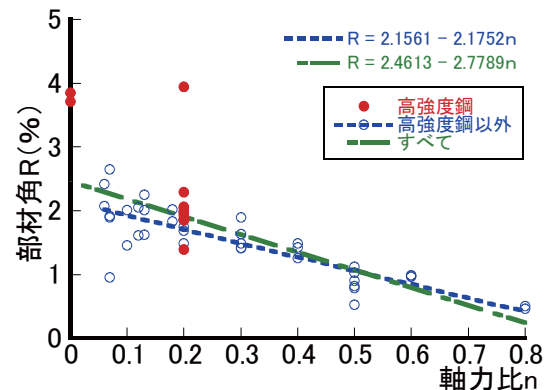
$${}_s R_u = 1.7 - 1.2n \quad (\text{高強度鋼を含む}) \quad (15)$$

$${}_s R_u = 1.7 - 0.9n \quad (\text{高強度鋼を除く}) \quad (16)$$

4. 結論

過去の実験より得られた荷重 - 変形関係をもとに、終局曲げ耐力及び終局せん断耐力、短期許容曲げ耐力、降伏曲げ耐力の耐力発揮時の変形量を検討した結果、以下のことがわかった。

- 1) 許容耐力発揮時の部材角が、荷重 - 変形曲線図において、許容曲げ耐力を発揮する点は初期剛性を保持している状態で、弾性剛性上の点である。また、許容耐力発揮時の部材角は 1/120 rad 程度に収まっている。



b) H 形鋼

図-8 最大耐力発揮時の部材角

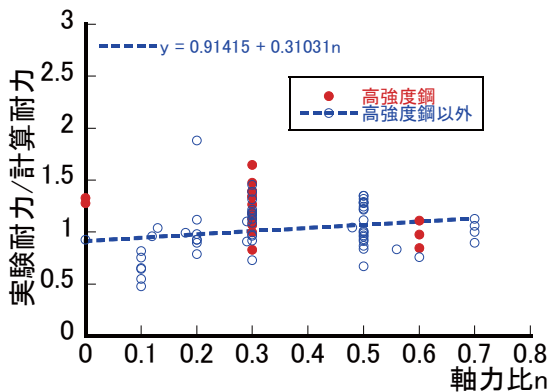


図-9 終局せん断耐力比

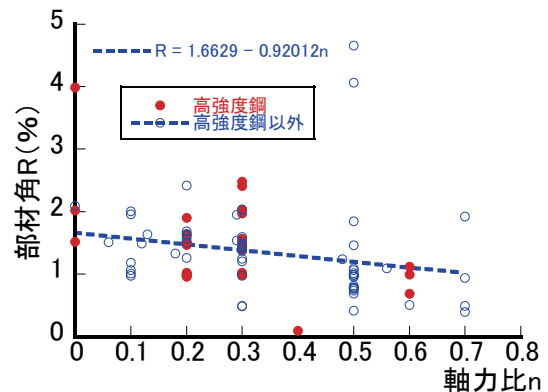


図-10 せん断破壊時の部材角

- 2) 最大曲げ耐力は、鋼材の降伏点とコンクリート圧縮強度を用いて計算した一般化累加強度で評価できる。
- 3) 終局せん断耐力は、SRC 規準¹⁾の耐力式を用いて精度よく評価できる。
- 4) 終局耐力発揮時の変形は (13), (14), (15), (16) 式で評価できる。

謝辞

本研究は平成 21 年度福岡大学工学部建築学科 4 年生の浜地絵文さんの多大な協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 2) 以下は日本建築学会大会学術講演梗概集なので、誌名を略す。
 - 1) 日本建築会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，丸善株式会社，2001.3.
 - 2) 若林實ほか：繰返し荷重を受ける鉄骨鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状に関する実験的研究（その 1），構造系，49, pp. 1103-1104, 1972.10.
 - 3) 佐々木哲也ほか：H 形鋼を用いた SRC 部材の力学的性状に関する実験的研究，pp. 1203-1204, 1975.10.
 - 4) 仲威雄ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱のせん断耐力に関する研究（その 3），構造系，51, pp. 1525-1526, 1976.10.
 - 5) 佐々木哲也ほか：H 型鋼を弱軸方向に配した SRC 部材の耐震性向上に関する実験的研究，構造系，51, pp. 1529-1530, 1976.10.
 - 6) 鈴谷二郎ほか：高強度鉄筋を用いた鉄骨鉄筋コンクリート部材に関する実験的研究（その 1～その 3），構造系，56, pp. 2115-2116, 1981.9.
 - 7) 鈴谷二郎ほか：SRC 柱の耐力と破壊性状に関する実験的研究，pp. 1291-1292, 1986.8.
 - 8) 小西昌治ほか：高張力鋼を用いた SRC 構造の開発研究 No13・No14 高張力鋼を用いた SRC 柱の終局曲げ耐力と変形性能（その 1，その 2）C，構造 II，pp. 1339-1342, 1986.8.
 - 9) 鈴谷二郎ほか：SRC 柱の耐力と破壊性状に関する実験的研究，C，構造 II，pp. 1279-1280, 1988.10.
 - 10) 津田和征ほか：高張力鋼を用いた SRC 構造の開発研究 No45・No46 高張力鋼を用いた SRC 柱のせん断破壊性状（その 4，その 5），C，構造 II，pp. 1541-1544, 1989.10.

- 11) 宮内靖昌ほか：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，その 2），C，構造 II，pp. 1123-1126, 1990.10.
- 12) 長嶋俊雄ほか：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），C，構造 II，pp. 1691-1692, 1991.9.
- 13) 岩田成人ほか：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 3，その 4），C，構造 II，pp. 1715-1718, 1991.9.
- 14) 西岡雅明ほか：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～その 7），pp. 1721-1726, 1992.8.
- 15) 松峯吉史ほか：高強度のコンクリートと鉄骨を用いた SRC 柱のせん断破壊性状（その 1）（その 2），C，構造 II，pp. 1689-1692, 1993.9.
- 16) 滝口克己ほか：高強度材料を用いた小鉄骨 SRC 柱のせん断性状に関する実験的研究（その 3），C，構造 II，pp. 1763-1764, 1994.9.
- 17) 日笠英之ほか：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 2），C，構造 II，pp. 1745-1746, 1994.9.
- 18) 森川勇鉄ほか：高強度のコンクリートと鉄骨を用いた SRC 柱のせん断破壊性状（その 3，その 4），C，構造 II，pp. 1757-1760, 1994.9.
- 19) 李麗ほか：軸圧縮力と繰返し曲げを受ける SRC 柱材の変形能力に関する実験的研究，C-1，構造 III，pp. 985-986, 1997.9.
- 20) 東端泰夫ほか：高強度鉄筋を用いた SRC 柱の耐力および破壊性状に関する研究（その 1，その 2），C-1，構造 III，pp. 1035-1038, 1998.9.
- 21) 山下靖彦ほか：高強度鉄筋を用いた SRC 柱の耐力および破壊性状に関する研究（その 3）C-1，構造 III，pp. 1115-1116, 1999.9.
- 22) 池田俊也ほか：鉄骨コンクリート部材の復元力特性に関する研究（その 2），pp. 1107-1108, 1999.9.
- 23) 犬丸啓一郎ほか：鉄骨鉄筋コンクリート柱材の弾塑性挙動に関する実験的研究，pp. 1079-1080, 2000.9.
- 24) 中村信行ほか：高強度低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，その 2），pp. 1047-1050, 2003.9.
- 25) 藤沢清二ほか：高強度低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 5，その 6），pp. 1047-1050, 2005.9.