

論文 十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート柱材の構造性能について

三輪 真弘^{*1}・堺 純一^{*2}・李 麗^{*3}

要旨:本研究では,十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)柱材の実験データベースを作成し,それを元に短期許容曲げ耐力・最大耐力・及びそれらの変形性能について調べ,単一H形鋼を内蔵したSRC柱材の性能と比較検討を行った。十字鉄骨を内蔵したSRC柱材は,十字鉄骨によるコンクリートへの高い拘束効果を持つと考えられるため,その結果よりSRC柱材の弾塑性解析を行い,コンクリートの内蔵鉄骨の形状の違いによる拘束効果に及ぼす影響について検討した。

キーワード:実験データベース,降伏曲げ耐力,最大曲げ耐力,限界変形,弾塑性解析

1. 序

SRC柱材の挙動に影響を及ぼす影響因子として柱軸力比,鉄骨比,鉄骨・鉄筋・コンクリートの材料強度,横補強筋比が考えられるが,これらの因子が柱材の挙動に及ぼす影響を定量的に評価した研究は少ない。そこで,構造部材の耐震性能を適切に評価することに基づく性能設計を検討する上で,使用限界および安全限界について調べておくことが必要である。SRC柱材においては前者を短期許容耐力,後者を終局耐力に対応するものと考え,これらの耐力および変形性能について検討しておくことが重要である。日本建築学会大会学術講演梗概集より,十字鉄骨を用いたSRC柱材の

短期許容曲げ耐力・終局曲げ耐力およびこれらの変形性能の実験データ^{1)~11)}を収集し,実験データベースを作り,変形性能について検討した¹²⁾。十字鉄骨を内蔵したSRC柱材は,単一H形鋼を内蔵させたSRC柱材の弾塑性挙動に比べ変形性能に優れていることが過去の実験的研究で明らかにさ

表 1 SRC 柱材の曲げ破壊試験体一覧

曲げ破壊試験体(36体)		繰返載荷(36体)
鋼材の降伏強度 (N/mm ²)	330 ~ 450	32
	450 ~ 600	1
	600 ~ 800	3
コンクリートの圧縮強度 (N/mm ²)	18.7 ~ 30.0	3
	30.0 ~ 35.0	12
	35.0 ~	21
せん断スパン比	3未満	9
	3	15
	3超	12
軸力	有	36
	無	0

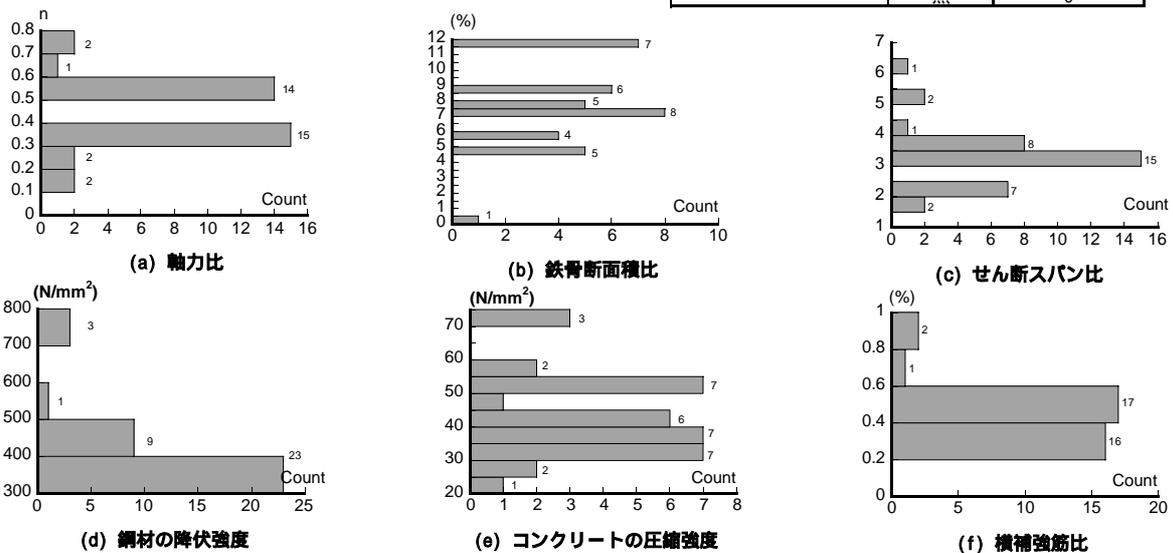


図 1 SRC 柱材の曲げ破壊試験体の各パラメータ

*1 九州共立大学大学院 都市システム工学専攻(修士課程)(正会員)

*2 九州共立大学 教授・博士(工学)(正会員)

*3 熊本県立大学 環境共生学部居住環境専攻助教授・博士(工学)

れている。本データベースではこのことについて検証する。この違いは内蔵鉄骨によるコンクリートへの拘束効果に及ぼす影響が大きいものと考えられるので、柱材の弾塑性解析を行いコンクリートの拘束効果による影響を検討した。

2. SRC 柱材の実験データベース

2.1 概要

著者らは、SRC 柱材の骨格曲線が図 2 に示す 4 折点で表現できるものと考え、構造性能評価法について検討している²⁾。本研究では、十字鉄骨を内蔵した SRC 柱材を対象として、特に降伏点を SRC 規準の許容曲げ耐力と捉え、最大耐力とともにそれぞれの耐力と変形性能について実験データベースをもとに検討した。文献 14) で得られた単一 H 形鋼を内蔵した SRC 柱材の結果も合わせて示すことで両者の比較を行う。本データベースで扱っている SRC 柱材は試験体総数 84 体であり、本研究ではその中でも曲げ破壊した 36 体の試験体を対象とした¹⁾⁻¹¹⁾。収集された試験体の軸力比、鉄骨断面積比、せん断スパン比、鋼材の降伏強度、コンクリートの圧縮強度、及び横補強筋比の分布を

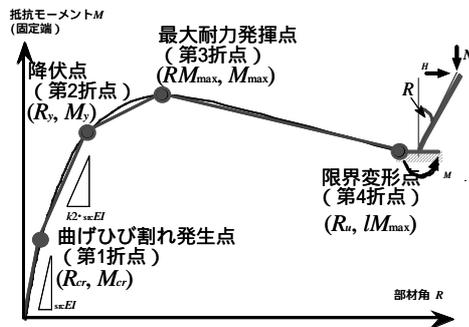


図 2 スケルトンカーブのモデル

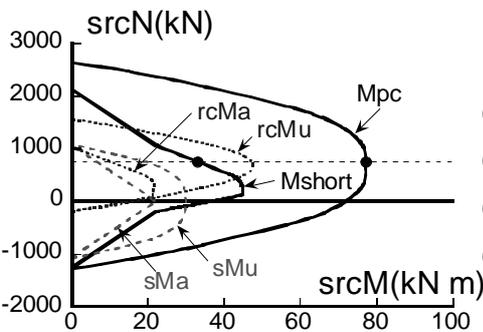
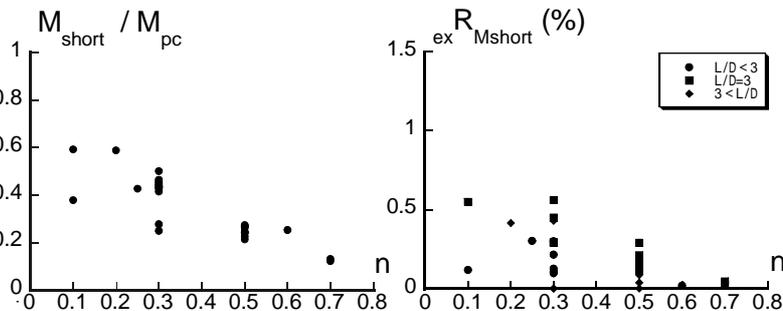
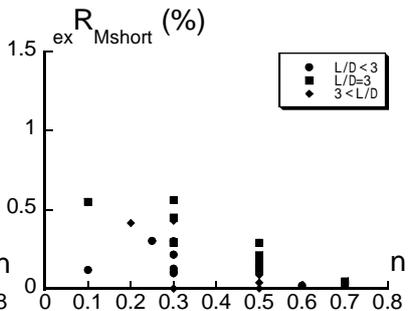


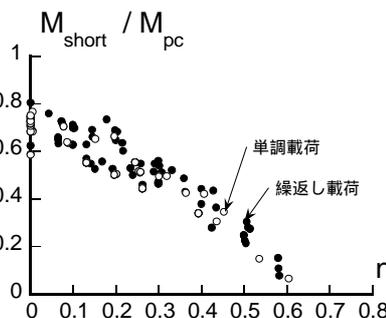
図 3 短期許容曲げ耐力と一般化累加強度の関係



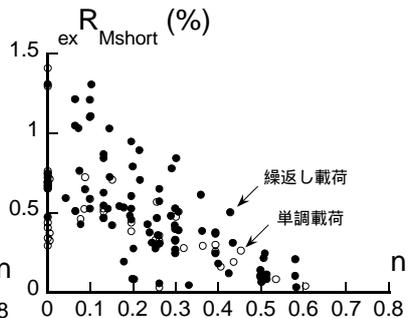
(a) 十字鉄骨内蔵 SRC 柱



(a) 十字鉄骨内蔵 SRC 柱



(b) 単一 H 形鋼内蔵 SRC 柱



(b) 単一 H 形鋼内蔵 SRC 柱
図 5 短期許容曲げ耐力発揮時の変形

表 1 及び図 1 に示す。

2.2 短期許容曲げ耐力発揮時の変形性能

図 3 に柱試験体の SRC 規準¹⁵⁾ に基づく短期許容曲げ耐力 M_{short} と終局曲げ耐力 M_{pc} の一例を示す。 M_{short} は鉄骨の降伏強度 s_y と、コンクリートの圧縮強度 c_b の $2/3$ 倍を短期許容応力度として、鉄骨と RC 断面の許容耐力を累加して求めている。 M_{pc} は s_y と c_b を用いて計算した一般化累加強度である。図 4(a) に十字鉄骨を内蔵した柱材、図 4(b) に比較のために単一 H 形鋼を内蔵した柱材の短期許容曲げ耐力 M_{short} を一般化累加強度 M_{pc} で除して無次元化したものを示している。図 4(a) と図 4(b) から軸力比 n (断面の圧縮耐力 N_u に対する作用軸力 N の比) が高くなると M_{pc} に対する M_{short} が小さくなるのが分かる。

図 5 に短期許容曲げ耐力発揮時の部材角 $ex R_{Mshort}$ (既往の実験の荷重変形関係から読み取った変形) を示している。ともに軸力比 n が 0.3 を越えている場合には大きな違いは見られないが、軸力比 n が 0.3 以下になると、十字鉄骨を内蔵した SRC 柱材の方が単一 H 形鋼を内蔵した SRC 柱材に比べて小さい変形となっていることがわか

る。これは小さな変形で許容曲げ耐力を発揮できることを示すものである。

2.3 最大曲げ耐力発揮時の変形性能

実験データベースの各試験体の最大耐力 $M_{ex,max}$ を下式により求めている。

$$M_{ex,max} = \max(Q \cdot H + N \cdot \dots) \dots (1)$$

ここで、 Q : 水平力, H : 部材長さ, N : 作用軸力, \dots : 柱の水平変位である。

図 6 に柱材の最大耐力 $M_{ex,max}$ を一般化累加強度 M_{pc} で除して無次元化したものを示している。単一H形鋼を内蔵したSRC柱材の場合、平均値と標準偏差は繰返し載荷で 1.09 と 0.146 であり、十字鉄骨を内蔵したSRC柱材は 1.01 と 0.11 となっており、両者とも柱材の曲げ耐力を累加強度で十分に評価できると考えられる。単一H形鋼を内蔵したSRC柱材の方が耐力が大きくなる結果となっているが、十字鉄骨は単一H形鋼と違い、弱軸にも鋼材があるためコンクリートの圧縮縁が圧壊する時期に、弱軸鉄骨は降伏していない状況にあり、累加強度を発揮しづらいことによるものと考えられる。

図 7 は柱材の最大耐力時の部材角 $R_{ex,Mmax}$ (実験

値から読み取った変形)と軸力比 n の関係を示している。この値はどちらもばらついているが、軸力比 n が高くなると部材角 $R_{ex,Mmax}$ は小さくなる傾向にあることがわかる。

十字鉄骨を内蔵した柱材は軸力比 n が 0.3 未満の時、 $R_{ex,Mmax}$ が概ね 1.5% 以上になっていることに對し、単一H形鋼を内蔵した柱材は軸力比 n が 0.3 未満の時 $R_{ex,Mmax}$ が 1.0% 以上になっていることがわかる。しかし、どちらも軸力比 n が 0.3 を越えると大きな差は見られなかった。これは圧縮軸力が大きくなると被りコンクリートの圧壊により最大耐力が決まるので内蔵鉄骨の形状には差がないことによるものと考えられる。また、十字鉄骨を内蔵したSRC柱材に対して横補強筋比 p_w の違いによる影響を調べた結果 p_w が大きくなれば変形も大きくなっていることが分かる。

2.4 限界変形時の変形性能

最大曲げ耐力発揮後、85% まで耐力が低下した時の変形角を限界変形角 $R_{ex,85}$ としている。実験データベースの検討の結果得られた $R_{ex,85}$ と軸力比 n の関係を図 8 に示している。また限界変形は耐力が 85% まで低下する前に実験終了している

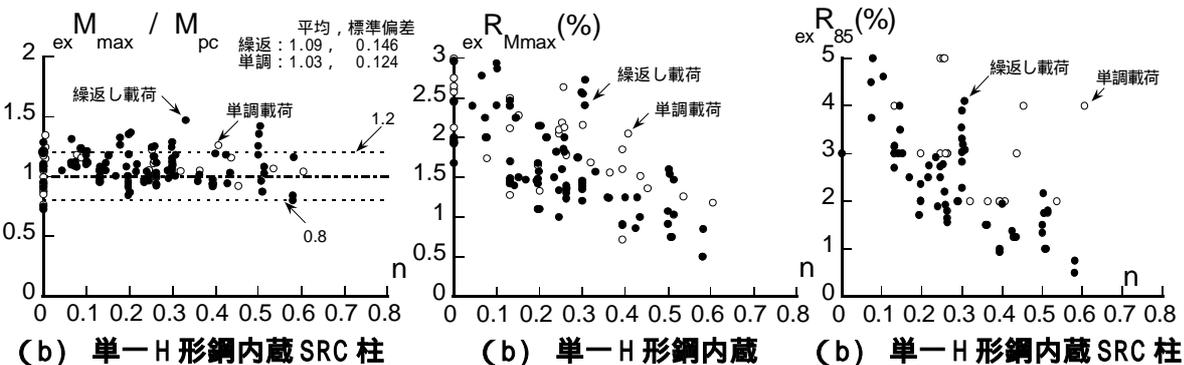
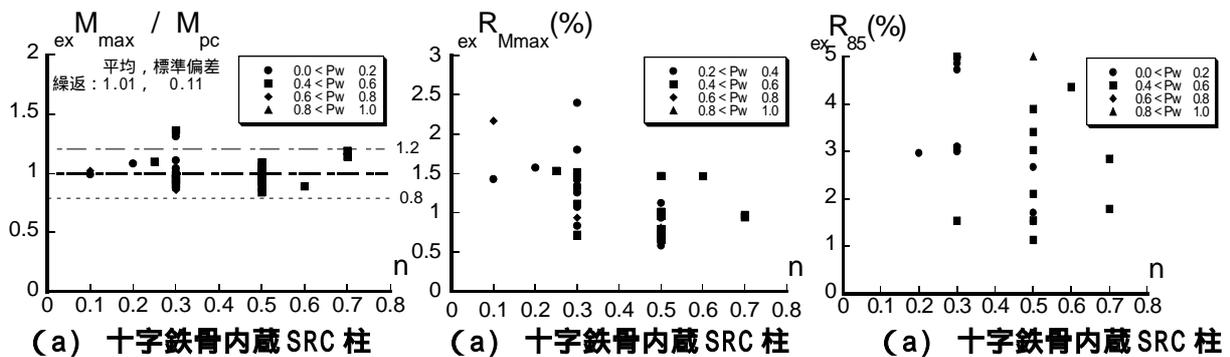


図 6 最大曲げ耐力

図 7 最大耐力発揮時の変形

図 8 限界変形 (85% 耐力低下時)

試験体も十字鉄骨を内蔵したSRC柱材では多く、その場合には実験終了時の最大部材角の値を採っているが、そのほとんどは部材角5%以上となっている。軸力比 n が0.3以下の条件では、内蔵鉄骨の形状による大きな違いはないが、軸力比 n が0.3を越えると違いが現れている。特に0.5以上での軸力比では最大耐力発揮後、十字鉄骨によるコンクリートへの高い拘束効果が得られるため、単一H形鋼を内蔵したSRC柱材の変形に比べて変形性能が大きくなっていることによるものと考えられる。また、十字鉄骨を内蔵したSRC柱材に対して横補強筋比 p_w の違いによる影響を調べた結果 p_w が大きくなれば変形も大きくなっていることが分かる。

3. 弾塑性解析

3.1 解析方法

柱軸力比、鉄骨比、鉄骨・鉄筋・コンクリートの材料強度、横補強筋比をもとに弾塑性解析を行い、コンクリートの拘束効果に及ぼす影響について検討した。解析モデルを図9に示すように弾塑性ヒンジ部と剛体からなるモデルと考え、柱部

材の変形を弾塑性ヒンジ部に集中させ、その点での断面のモーメントと曲率関係を元に、力の釣り合いを満足させることにより、柱の挙動が説明できるものと考えている。弾塑性ヒンジ部での断面モーメント-曲率関係は平面保持の仮定のもとで断面区分法により求めた。解析に使用した材料の応力-歪関係は図10に示すモデルを用いた。鋼材は降伏後、バウシinger効果により軟化する現象を考慮している。コンクリートは包絡線に崎野・孫モデル¹⁶⁾を用い、繰り返し則は渡辺らのモデル¹⁷⁾を用いた。さらに弾塑性ヒンジ部での曲率と柱部材角 R との間に次式が成り立つものと仮定した。

$$R = \frac{1}{L} \cdot \dots (2)$$

$$= 0.1 + 1.3D/L \dots (3)$$

ここで L は固定端から柱頭までの片持ち柱の長さである。

(2)式中、 $\frac{1}{L}$ の値を解析で得られた水平力-部材角関係の初期剛性と実験結果のそれが等しくなるようにした。 $\frac{1}{L}$ の値は軸力がない片持ち柱の曲げ変形の弾性理論解では $1/3$ となるが、以下の事柄を考えせん断変形、及び鉄骨・鉄筋の抜け出しによ

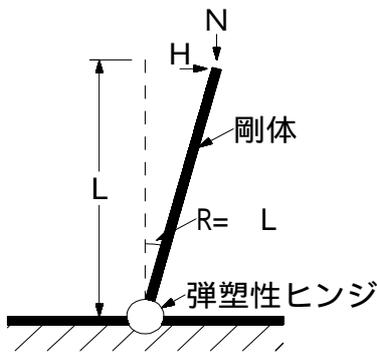


図9 解析モデル

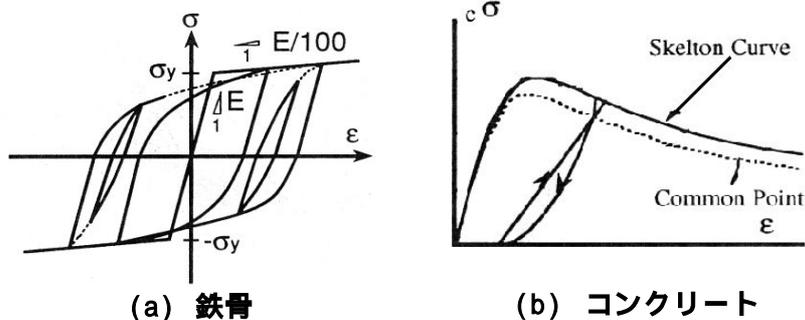
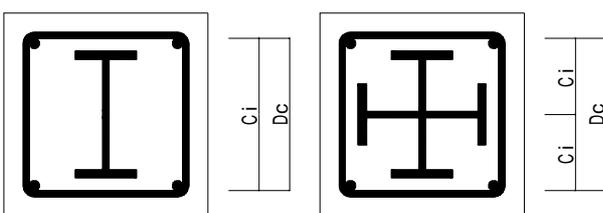


図10 応力-歪関係



(a) 単一H形鋼内蔵 (b) 十字鉄骨内蔵

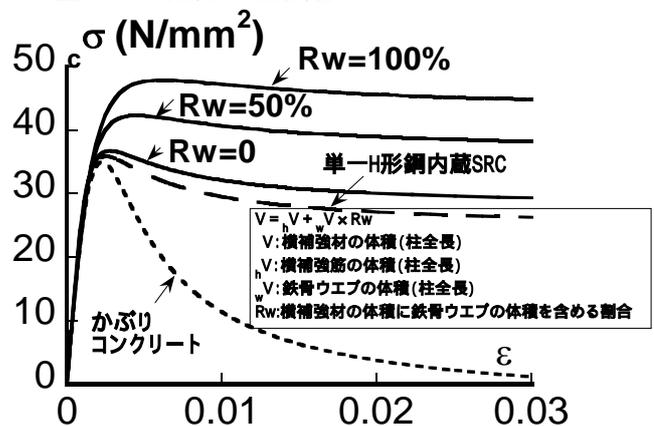


図11 コンクリートの拘束条件 図12 拘束効果を考慮したコンクリートの骨格曲線

る付加変形を弾塑性ヒンジ部の曲率の一部に含める形でこのような仮定を設けた。鋼構造部材では座屈等、不安定現象が無ければ材端での抵抗力の上昇に伴い、塑性域(2)式の n と L の積に対応する長さ)が材長方向に広がり(2)式の n の値は刻々異なるが、コンクリート系の部材では最大耐力発揮後のコンクリートの圧壊により材端での抵抗力は減少し、それに伴い塑性域以外の部分は弾性に留まるため、塑性域に限定された区間となり、柱部材角は材端での曲率が塑性域に対応する長さ内で一様に分布した状態での変形で表されるものと考え、解析の簡便さと実験挙動との比較の妥当性により、弾性剛性を合わせることで弾性、塑性の状態に拘わらず(2)式が成り立つものとした。

3.2 コンクリートの拘束効果

十字鉄骨を内蔵したSRC柱材は単一H形鋼を内蔵したSRC柱材に比べ、変形性能が高くなるのが多くの既往の研究結果で明らかにされているが、これを定量的に検討した研究例は少ない。変形能力の増大は鉄骨によるコンクリートの拘束効

果が大きいことによるものと考えられるので、その影響について解析的に検討した。単一H形鋼の場合、内蔵鉄骨が一定方向のみであるため、内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束効果はないものとした。十字鉄骨を内蔵させたSRC柱の場合、鉄骨フランジに囲まれているコンクリート部分が拘束されるので、フランジ間を繋いだウェブを図11(c)に示すような中子筋と同様なものと捉えることができ、コンクリートの拘束効果に寄与する有効支持長さ C_i を外周横補強筋間距離 D_c の1/2に半減させることが可能である。さらに、横補強材の体積に鉄骨ウェブの体積をある程度含めることが可能と考えられるため、その含める割合を R_w としている。図12にコンクリートの応力-歪関係を示す。

3.3 SRC柱材の挙動

図12に示すコンクリートの応力-歪関係を使用して解析を行い、既往の実験データと比較した水平力-部材角関係グラフの一例を図13に示す。図中の2本の直線は危険断面で一般化累加強度を

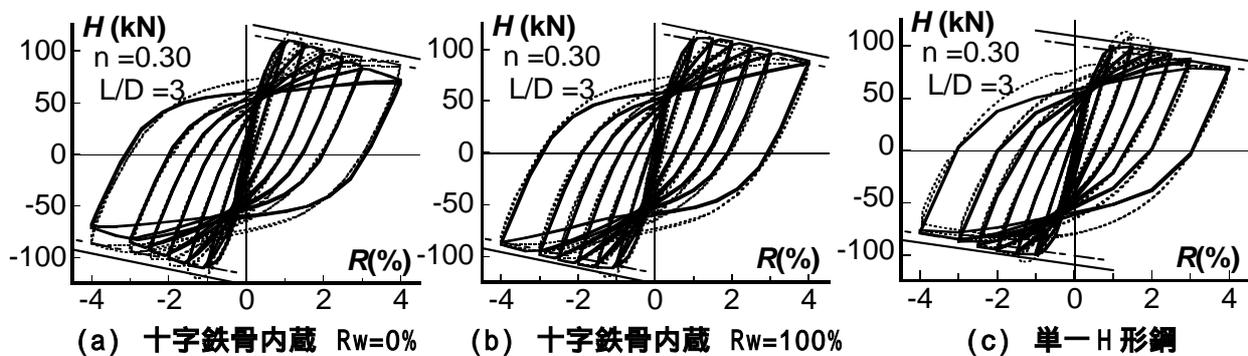


図 13 実験結果と解析結果との比較：軸力比 0.3
(解析結果は実線、実験結果は破線)

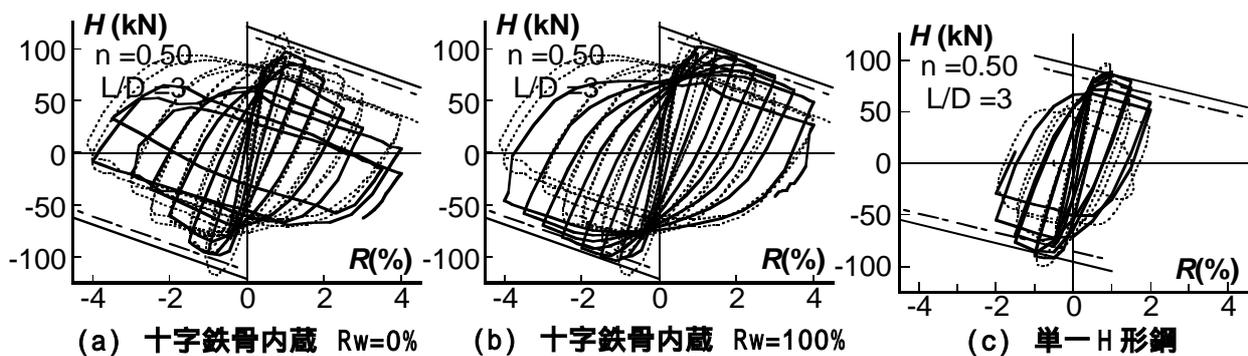


図 14 実験結果と解析結果との比較：軸力比 0.5
(解析結果は実線、実験結果は破線)

発揮するときの耐力を示したもので、実線は鋼材の実降伏強度とコンクリートのシリンダー強度を用いて求めた一般化累加強度であり、一点鎖線は鋼材の実降伏強度とSRC規準¹⁵⁾に従ってコンクリート強度を低減した圧縮強度を用いて求めた一般化累加強度である。解析結果を実線、既往の実験結果を破線で表している。図13(a)は横補強材の体積にウェブの体積を全く含まない場合($R_w=0\%$)、図13(b)は横補強材の体積にウェブの体積を全て含んだ場合($R_w=100\%$)、図13(c)は単一H形鋼の場合で、それぞれの軸力比 n が0.3の時を示している。十字鉄骨を内蔵したSRC柱材は、単一H形鋼を内蔵したSRC柱材に比べ最大耐力発揮後の耐力低下が少なくなっている。また同じ十字鉄骨を内蔵したSRC柱材でも $R_w=100\%$ とした方が解析結果が実験結果をよく評価できており、十字鉄骨によるコンクリートへの拘束効果は大きくとれることが分かる。図14(a)は $R_w=0\%$ 、図14(b)は $R_w=100\%$ 、図14(c)は単一H形鋼の場合で、それぞれの軸力比 n は0.5である。軸力比 $n=0.5$ の条件では、 $R=2/100$ まではよく評価できている。しかし、高軸力になると、横補強材の体積に鉄骨ウェブの体積を含める割合を低下させる必要があると考えられる。

4. 結論

- 1) 十字鉄骨を内蔵したSRC柱材の実験データベースを作成して検討し、以下の知見を得た。
 - 1-1) 短期許容曲げ耐力発揮時の変形は、軸力比 n が0.3以下の場合、単一H形鋼を内蔵したSRC柱材よりも十字鉄骨を内蔵したSRC柱材の方が変形が小さくなっている。せん断スパン比が小さい場合、この変形は小さくなる傾向にある。
 - 1-2) 最大耐力発揮時の変形は、十字鉄骨あるいは単一H形鋼を内蔵したSRC柱材の両者に大きな差は見られなかった。十字鉄骨を内蔵したSRC柱材に対するこの変形は、横補強筋比、及び軸力比の影響を大きく受けている。
 - 1-3) 限界変形については、十字鉄骨を内蔵したSRC柱材の方が単一H形鋼を内蔵したSRC柱材

に比べ、コンクリートの拘束効果が高く、変形性能に優れている結果になった。

- 2) 弾塑性解析の結果、単一H形鋼を内蔵したSRC柱材に比べ十字鉄骨を内蔵したSRC柱材のコンクリート拘束効果は大きくとれる。また、十字鉄骨を横補強材の体積に含めることが可能であり、図12に示すようにコンクリートの拘束効果がさらに大きくとれると考えられる。

参考文献

- 1) 堺 純一, 李 麗: 十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート柱材構造性能評価法に関する研究, 日本建築学会2004年大会学術講演梗概集, pp.1147-1148, 2004.8
- 2) 堺 純一, 松井 千秋: 鉄骨鉄筋コンクリート柱部材の復元力特性に関する研究 単一H形鋼を内蔵したSRC柱の骨格曲線の定式化, 日本建築学会構造系論文集第534号, pp.183-190, 2000.8
- 3) 長嶋 俊雄, 他: 鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ性状に関する研究, 日本建築学会1991年大会学術講演梗概集, pp.1691-1692, 1991.9
- 4) 平尾 元章, 他: 軸力と繰り返し2方向の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), 日本建築学会1992年大会学術講演梗概集, pp.1735-1736, 1992.8
- 5) 古池 秀, 他: 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, 日本建築学会1993年大会学術講演梗概集, pp.1685-1686, 1993.9
- 6) 岡本 達雄, 他: 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, 日本建築学会1998年大会学術講演梗概集, pp.1035-1036, 1115-1116, 1998.9
- 7) 山下 晴彦, 他: 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) 鉄骨量およびコア面積を変えた曲げ破壊性状, 日本建築学会1999年大会学術講演梗概集, pp.1115-1116, 1999.9
- 8) 犬丸 啓一郎, 他: 鉄骨鉄筋コンクリートの弾塑性挙動に関する実験的研究, 日本建築学会2000年大会学術講演梗概集, pp.1079-1080, 2000.9
- 9) 土井 希祐, 他: 変動軸力を受けるSRC柱材静加力実験, 日本建築学会2000年大会学術講演梗概集, pp.1089-1090, 2000.9
- 10) 片寄 哲務, 他: 変動軸力と斜め横力を受けるSRC柱部材の静加力実験, 日本建築学会2001年大会学術講演梗概集, pp.1041-1042, 2001.9
- 11) 中村 信行, 他: 高強度降伏比の鋼材を用いたSRC柱材の弾塑性挙動に関する実験的研究(その1)(その2), 日本建築学会2003年大会学術講演梗概集, pp.1047-1048, 1049-1050, 2003.9
- 12) 三輪 真弘, 堺 純一, 他: 十字鉄骨を内蔵したSRC柱材の変形性能に関する研究, 日本建築学会2005年大会学術講演梗概集, pp.1045-1046, 2005.9
- 13) 堺 純一, 李 麗: 十字鉄骨を内蔵したSRC柱材の構造性能評価法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.27, No.2, 2005, pp.1213-1218, 2005.7
- 14) 李 麗, 津田 恵吾, 松井千秋: 実験データベースに基づく鉄骨鉄筋コンクリート柱材の構造性能, 鋼構造年次論文報告集, 第7巻, pp.263-268, 1999.1
- 15) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2001.8
- 16) 崎野 健治, 孫 玉平: 直線型横補強材により拘束されたコンクリートの応力歪関係, 日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp.95-104, 1994.7
- 17) 渡辺 史夫, 六車 照, 他: 各種強度の鉄筋混使用によるRC断面曲げ性能の制御, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, B, pp.505-506, 1991.9