

論文 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性性状に関する研究

倉富 洋*1・堺 純一*2・田中 照久*3・河本 裕行*4

要旨: 著者らは, SRC断面から主筋と帯筋を除き, 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱が, 優れた耐震性能を発揮することを明らかにしている。その要因として, 内蔵十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果が高いことが考えられるため, 本合成柱材のコンクリートの構成則について検討し, その拘束効果を定量的に評価した。本論では, 十字鉄骨及び薄肉鋼管で囲まれたコンクリートの拘束効果を考慮して柱材の弾塑性解析を行うと, 軸力及び繰返し水平力を受ける柱の実験挙動をよく追跡できることを示した。さらに, 本柱材が安定した挙動を示す限界の軸力である安定限界軸力について検討した。

キーワード: SC柱, 中心圧縮, 横補強鋼管, 拘束効果

1. 序

著者らは, 鉄骨鉄筋コンクリート (以下SRCと略記) 構造に対する耐震性能の更なる向上と, 施工の簡素化を目指した鋼・コンクリート (以下SCと略記) 合成柱材の開発を目的として, SRC部材から主筋およびせん断補強筋を除き, 薄肉鋼管で横補強を行なった柱材の弾塑性変形状態について実験的に調べ, 高軸力でも大変形まで耐力が低下せず, 優れた構造性能を示すことを明らかとした^{1),2)}。特に, 内蔵十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果が大きくなることがその要因と考えられる。

著者らは, SC断面柱の中心圧縮実験を行い, 鋼管及び十字鉄骨で拘束されたコンクリートの構成則を検討した結果, 鉄骨で囲まれた部分とその外の鋼管で囲まれた部分に分けて解析すると, コンクリートの圧縮性状をよく評価することを明らかとした³⁾。しかし, 定量的に評価するには実験データが少なく, 回帰曲線の精度に不安が残った。そこで, 本研究では鉄骨の幅厚比をパラメータ

にとり, SC柱断面の中心圧縮実験を行い, 鉄骨によるコンクリートの拘束効果を定量的に評価する回帰曲線の精度を上げることを目的とした。さらに, 内蔵鉄骨及び鋼管で囲まれたコンクリートの拘束効果を考慮して, 軸力と繰返し水平力を受けるSC柱材の弾塑性解析を行った。

2. SC柱の中心圧縮実験

2.1 試験体

内蔵鉄骨のフランジ及びウェブの幅厚比の違いが, コンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べるためにスタブカラム試験体を製作し, 中心圧縮実験を行なった。実験変数は表-1に示すように, 鉄骨の有無を含めた内蔵鉄骨の幅厚比である。試験体の寸法は $b \times d = 200 \times 200$ (mm)とし, 柱材長を600(mm)とした。内蔵鉄骨はSS400材で, ウェブに6mm厚, 4.5mm厚, フランジに9mm厚, 6mm厚, 4.5mm厚の鋼板より切り出した鋼片を溶接して形鋼を製作している。表-2に使用鋼材の機械的性質を示す。な

表-1 試験体一覧

試験体	内蔵鉄骨形状	鉄骨幅厚比		3.2項の内蔵鉄骨による強度上昇分 $k' \cdot \sigma_2$ (N/mm ²)
		フランジ	ウェブ	
1-1	CH-160x80x4.5x4.5	17.8	35.6	7.6
1-2				5.8
2	CH-160x80x4.5x6	13.3	26.7	7.2
3-1	CH-160x80x4.5x9	8.9	35.6	14.7
3-2				12.6
4	CH-160x60x4.5x4.5	13.3	35.6	9.2
5-1	CH-160x60x6x6	10.0	26.7	10.1
5-2				9.6
6	無	無	無	(1.7)*

共通事項: 薄肉鋼管2.3mm (幅厚比87) *()は鉄骨がないので(2)式より算定

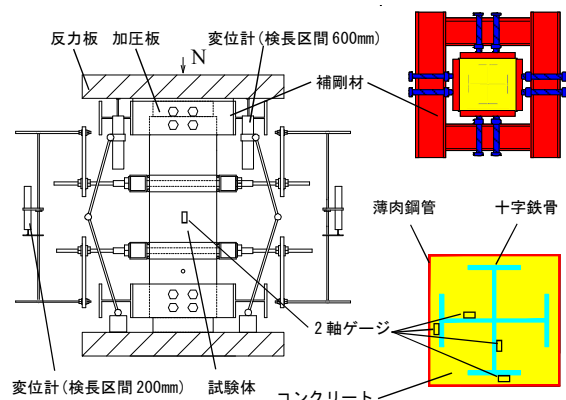


図-1 荷重装置とSC断面

*1 福岡大学 大学院工学研究科 (正会員)

*2 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工) (正会員)

*3 福岡大学 工学部建築学科助手 (正会員)

*4 福岡建設専門学校 講師・工修 (正会員)

お、コンクリートは骨材の最大径13mmの普通コンクリートを縦打ちで打設し、空中養生後に加圧面を研磨した。シリンダー強度 σ_B は34.0N/mm²である。

2.2 荷重方法及び測定方法

鋼管はコンクリートを横拘束するためのものとし、鋼管に圧縮力を負担させないように加圧版を介してコンクリートだけに圧縮力を載荷した。また、内蔵鉄骨によるコンクリートの横拘束効果を調べるために、鉄骨表面にグリスを塗布し、スタブカラムの上部において内蔵鉄骨の上断面に10mmのスチレンボードを貼り付け、内蔵鉄骨にも圧縮軸力を負担させないようにした。圧縮力は5000kN万能試験機の荷重計で測定した。荷重方法を図-1に示す。測定は、測定装置を用いて、2軸ゲージを鉄骨ウェブに2箇所、鉄骨フランジに2箇所、薄肉鋼管中央に4箇所貼付し、鉄骨と鋼管の歪を測定した。軸変形は上下の加圧版間の全体変形600mmと試験体中央部200mmの変形を、それぞれ4箇所に設置した変位計で測定した。

2.3 実験結果とその考察

図-2(a)に実験により得られた荷重-変形関係の一例(試験体1-1)を示す。検長区間を200mmとした測定フレームでは変位を正確に測定できなかったため、実験結果の整理は600mmを検長区間とした測定フレームの変位計の測定値を用いた。図中の全体荷重scNは試験機で載荷した荷重と変形の関係である。鉄骨に圧縮軸力を負担させないようにしていたが、鉄骨の歪ゲージの測定値から内蔵鉄骨に軸力が作用していることがわかった。そこで、鉄骨の負担軸力sNを、内蔵鉄骨のフランジ、ウェブに貼付

した材長方向の歪の値をもとに、鉄骨全断面が一様に縮むものとして算定している。なお、引張試験の結果、フランジ、ウェブともに降伏後の耐力上昇が見られたことから、降伏後の勾配をE/100(E:ヤング係数)として、鉄骨の負担軸力を算出した。図中の実線は実験結果より鉄骨の負担軸力を除いたコンクリートだけの負担軸力cNである。3章、4章の実験と解析の比較では、このコンクリートだけの負担軸力で比較する。図-2(b)は試験体1-2、試験体3-1と試験体4の比較である。この図より、内蔵鉄骨の寸法による最大耐力(軸変形がおおよそ3mmとなる第1ピーク点とする)の違いは見られないが、内蔵鉄骨フランジの幅厚比が小さい試験体3-1は、最大耐力発揮後の耐力低下が抑えられることがわかる。

3. コンクリートの構成則の検討

3.1 既往のモデルのSC断面への適用

コンクリートの応力-歪関係式は多くのモデルが提案されているが、本研究では直線型横補強鋼材による強度上昇が見込まれている崎野・孫モデル⁴⁾を使用する。

崎野・孫モデルの応力-歪関係式の一部を以下に示す。記載していない式については、原著を参照されたい。

$${}_c\sigma_{cB} = {}_c\sigma_B + k_e \sigma_{re} \quad (1)$$

$$\sigma_{re} = 0.5 \rho_h \cdot \sigma_{hs} \cdot (d''/C) (1 - s/2D_c) \quad (2)$$

ここで、 ${}_c\sigma_{cB}$: 拘束されたコンクリートの強度、 σ_{re} : 有効側圧因子、 ${}_c\sigma_B$: コンクリート強度(シリンダー強度の

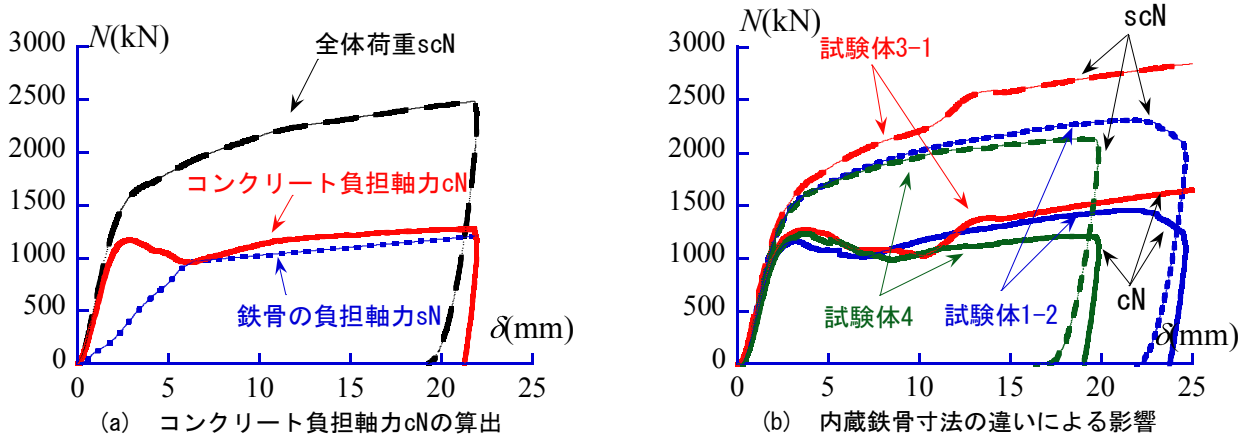


図-2 荷重-変形関係(検長600mm)

表-2 使用鋼材の機械的性質

部材名	t(mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E(N/mm ²)	伸び率(%)	降伏比
薄肉鋼管	2.3	280	425	2.05×10^5	41.7	0.66
十字鉄骨	4.5	324	432	2.06×10^5	37.9	0.75
	6	280	435	2.06×10^5	42.9	0.64
	9	283	432	2.04×10^5	46.4	0.66

t:板厚 σ_y :降伏点 σ_u :引張強さ E:ヤング係数

0.85 倍), k_c : 拘束係数 (=23), ρ_h : 横補強筋材の体積比, σ_{hs} : 横補強鋼材の降伏応力度, d'' , C : 鋼管の管厚と鋼管の内法幅, s , D_c : 横補強材の間隔 (鋼管の場合は0) と鋼管の内法幅である。

本研究では十字鉄骨を内蔵しているため, 拘束されたコンクリートによりウェブに引張力が働くことから, ウェブが中子筋と同等の役割を果たすものと考えられる。このことにより, 式(2)にウェブ体積を鋼管の体積に加算し, C の値を半分にするものとして評価する。なお, 鋼管で拘束されたコンクリートは鉄骨に囲まれた部分も含めて, 一様に応力が生じると仮定している。また, 単一H形鋼を内蔵する場合, 内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束効果はないものとする。

3.2 鉄骨内側のコンクリート

内蔵鉄骨により拘束された領域のコンクリート (図-3 (a)参照) の強度上昇を定量的に評価するため, 有効側圧因子に着目した。内蔵鉄骨がコンクリートを拘束するため, コンクリートは図-3 (b)に示すような側圧を受けていると考えられる。コンクリートの側圧はウェブの引張降伏, 又はフランジの面外方向の全塑性モーメントのいずれか小さいほうで決まり, その側圧 σ_{r2} は式(3)で表される。

$$\sigma_{r2} = \min \left(\frac{t_w}{b'} \cdot \sigma_y, \frac{2t_f^2}{b^2} \cdot f \cdot \sigma_y \right) \quad (3)$$

ここで, b' : フランジ長さ (=b-t_w), b : フランジ幅, t_w ,

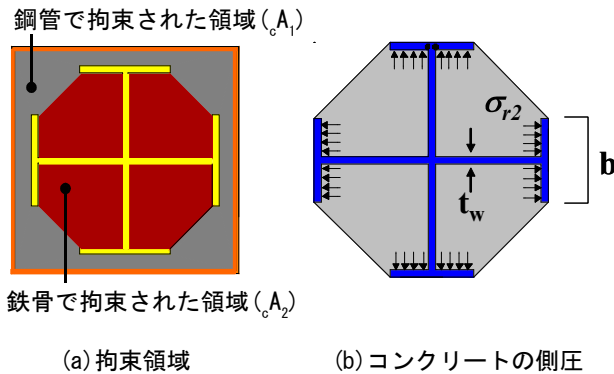


図-3 コンクリートの領域と鉄骨による側圧

t_f : それぞれ, ウェブとフランジの板厚, σ_y , $f \cdot \sigma_y$: それぞれ, ウェブとフランジの降伏点である。

鉄骨が開断面なので, 鉄骨に囲まれたコンクリートが一様に σ_{r2} の側圧を受けるとは考えにくい。有効拘束係数 k' を用いて, 鉄骨で拘束されたコンクリートの圧縮強度を式(4)で評価する。 $k' \cdot \sigma_{r2}$ は強度上昇分であり, 崎野・孫式の $k_c \cdot \sigma_{re}$ に対応する。

$$k' \cdot \sigma_{r2} = \sigma_{cb2} - \sigma_B \quad (4)$$

ここで, σ_{cb2} は内蔵鉄骨で拘束されたコンクリート強度であり, 式(5)にて算出する。

$$\sigma_{cb2} = \frac{N - c A_1 \cdot \sigma_{cb}}{c A_2} \quad (5)$$

ここで, N : コンクリートの最大圧縮強度, σ_{cb} : 鋼管で拘束されたコンクリートの強度 (崎野・孫式より算出), A_1 : 鋼管で拘束されたコンクリートの断面積, A_2 : 内蔵鉄骨で拘束されたコンクリートの断面積である (図-3 (a)参照)。以上の手順で求めた $k' \cdot \sigma_{r2}$ の値を表-1における強度上昇分の欄に示す。

実験耐力から k' と σ_{r2} を求めた結果を図-4に示す。前回の実験結果³⁾から更にプロットを増やし, これらのプロットを近似して, 式(6)の回帰曲線が得られた。

$$k' = 8.0 / \sigma_{r2}^{0.8} \quad (6)$$

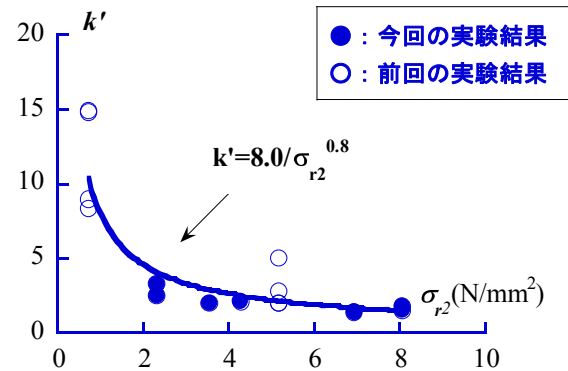


図-4 有効拘束係数

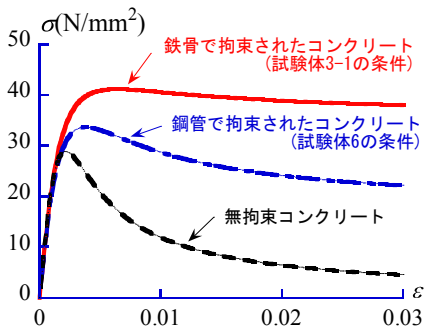


図-5 コンクリートの応力-歪関係

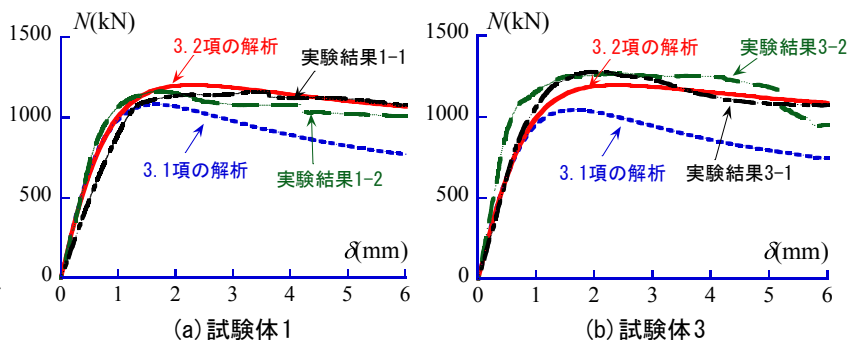


図-6 中心圧縮実験結果と解析結果の比較

本解析では、鉄骨で拘束されたコンクリートは(2)式を用いず、式(4)、(6)を用いて崎野・孫式で応力-歪関係を算定するものとし、鉄骨外の部分は式(2)を用いるものとする。

以上、3.1項、3.2項で述べた手法で求めたコンクリートの応力-歪関係の一例を図-5に示す。

4. 解析結果の考察

実験結果と解析結果から得られたコンクリートの軸力-変形関係の比較を図-6に示す。図中の3.1項の解析及び3.2項の解析は、それぞれ、3.1項、3.2項で示した解析手法を用いた曲線である。これらの結果より、内蔵鉄骨による拘束領域を考慮せずコンクリートを一様な応力状態と仮定した3.1項の解析では、実験結果を安全側に評価することがわかる。一方で、十字鉄骨による拘束効果を考慮した3.2項の解析では、実験結果の最大耐力、最大耐力発揮後の下り勾配をよく評価した。このことから、図-4で示した鉄骨による強度上昇を定量的に評価した回帰曲線の精度は、妥当であるといえる。また、フランジの幅厚比が小さい試験体3は、解析結果を上回っており、コンクリートの耐力低下を抑えられていることがわかる。

5. SC柱材の弾塑性解析

5.1 解析モデル

図-7(a)に示す断面を持つSC柱材の弾塑性解析を行うため、解析モデルを図-7(b)に示すような弾塑性ヒンジ部と剛体からなるものと考え、柱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-曲率関係を求め、力の釣合を満足させることにより、柱の挙動を解析した。弾塑性ヒンジ部での断面のモーメント-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。弾塑性ヒンジ部での曲率 ϕ と柱部材角 R の間に式(7)、(8)が成立つと仮定している。式(8)の α は、せん断スパン比と軸力比をパラメータとしたSRC柱材の載荷実験と弾塑性解析を比較して、実験と解析の初期剛性を合わせることで求められた式である。

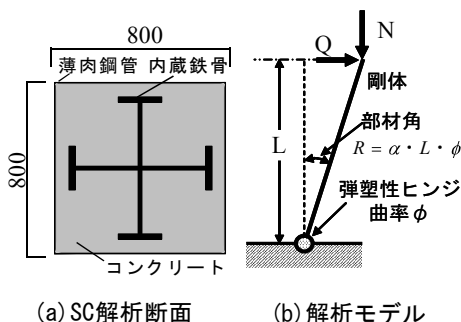


図-7 弾塑性解析

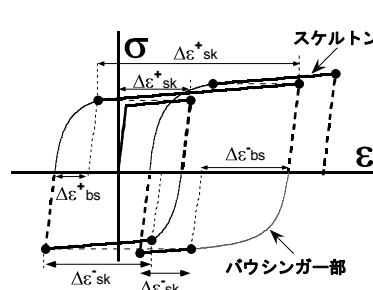


図-8 鋼材の応力-歪関係

$$R = \alpha \cdot L \cdot \phi \quad (7)$$

$$\alpha = 0.1 + 1.3 \frac{D}{L} \quad (8)$$

ここで、 L ：柱材長、 D ：断面せいである。

5.2 鉄骨の応力-歪関係

鋼材の応力-歪関係は図-8に示すモデルを用いた。鋼材の骨格曲線は、弾性域をヤング係数 $E=2.05 \times 10^5$ (N/mm²)を勾配とした線形関係で、降伏後はヤング係数 E の1/100の勾配を持たせるバイリニア-型のモデルとした。繰返しに伴う除荷後の挙動については、バウシンガー部の構成則に加藤らの双曲線のモデル⁵⁾を用い、バウシンガー部の終点のひずみは山田らの提案式⁶⁾を用いた。

5.3 コンクリートの応力-歪関係

コンクリートの応力-歪関係は崎野・孫モデルを用いた。ただし、コンクリートの構成則は3項で示したように内蔵鉄骨による拘束効果を考慮したものである。繰返し則は渡辺らのモデル⁷⁾を用いた(図-9参照)。

5.4 弾塑性解析と実験挙動の比較

著者らが行ったSC柱の実験条件¹⁾で解析を行ったときの実験と解析の比較を行う。図-10にSC柱の試験体と載荷装置を示す。載荷は、一定軸力を保持した状態で、繰返し水平力を載荷した。図-11に柱材の弾塑性解析結果とSC柱の実験結果¹⁾の水平力-部材角関係の比較を示す。ここで、 b/t は鋼管の幅厚比、 n は軸力比、 σ_B はコンクリート強度である。試験体(a)、(b)、(c)は実験結果及び解析結果ともに安定した挙動を示した。高強度コンクリートを使用した試験体(d)、(e)では、部材角2%以降耐力が低下している。試験体(d)では、本解析は実験挙動を安全側に追跡しているが、その他の試験体に対しては、本解析は実験挙動をよく追跡できている。試験体(d)と(e)の実験及び解析結果より、60N/mm²級の高強度コンクリートを使用する場合、幅厚比100程度の鋼管で横補強した場合には不十分となる可能性がある。

5.5 安定限界軸力の算定

前述した解析プログラムを用いてSC柱の弾塑性解析を行った。本解析では、部材角 R が3%の時点で、計算

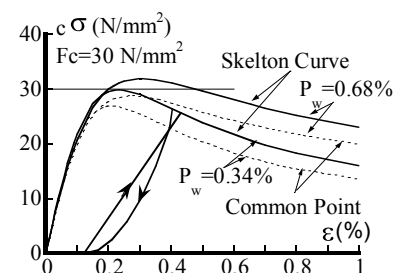


図-9 コンクリートの繰返し則

耐力の95%の耐力を保持している状態を安定と定義し、安定した挙動を示す最大の軸力である安定限界軸力を検討した。十字鉄骨と単一H形鋼のコンクリートの拘束効果の違い、鋼材とコンクリートの材料強度の組み合わせ及び軸力比の違いが、SC柱材の弾塑性挙動に及ぼす影響を調べるため、表-3に示す解析変数をとった。内蔵鉄骨の寸法は、フランジ幅厚比がコンクリートの拘束効果に影響するものと考えられることから((3)式参照)、2種類の鉄骨を用意した。図-12に、3項で示した解析手法により算出したコンクリートの骨格曲線を示す。なお、

解析断面は $b \times d=800 \times 800$ (mm)とした。

安定限界軸力について検討した結果を図-13に示す。縦軸に安定限界軸力比 n を、横軸に鋼材強度 σ_y をとった。なお、図中に解析条件をSC-a-bの2つの識別記号で表記した(a:表-3に示す断面番号,b:コンクリート強度)。図-13(a),(b)より、内蔵鉄骨に十字鉄骨を用いた場合は単一H形鋼に比べて高軸力を維持できることがわかる。これは、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果が大きく見込まれるためだと考えられる。CH1とCH2を比較すると、フランジ幅厚比の小さいCH1の方が高い安定軸力

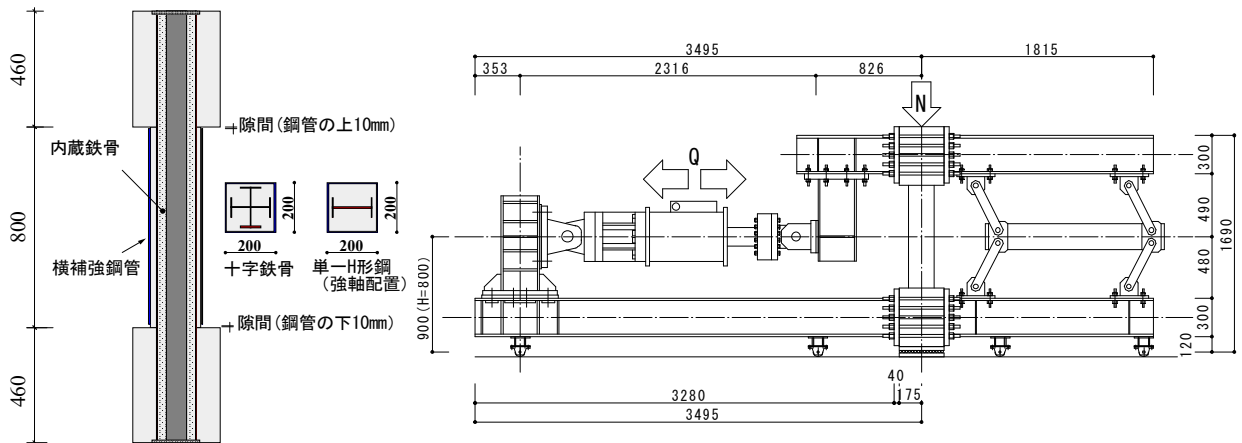


図-10 SC柱の試験体と荷重装置¹⁾

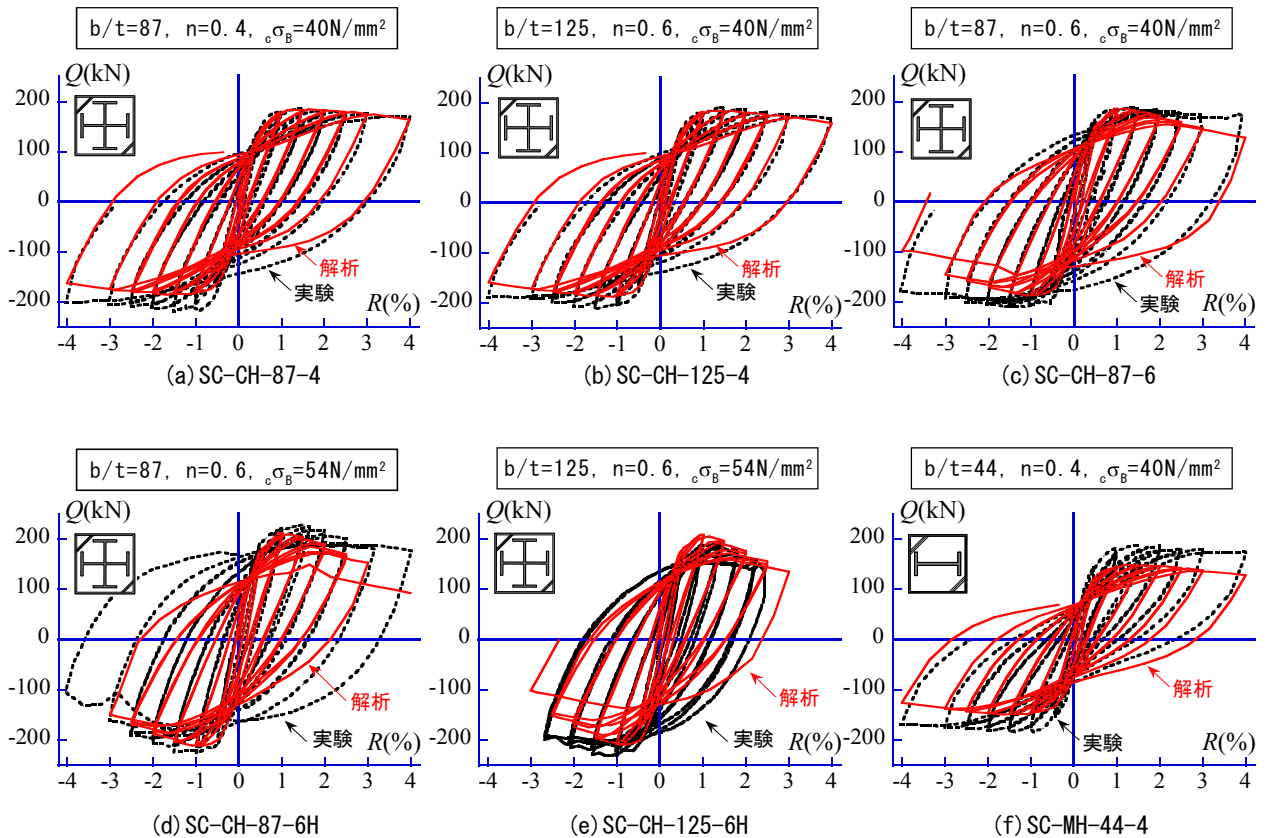


図-11 弾塑性実験結果と解析結果の比較

表-3 解析変数一覧

断面番号	内蔵鉄骨		薄肉鋼管 板厚(mm)	材料強度		軸力比	せん断 スパン比
	形状	寸法		$c\sigma_B(N/mm^2)$	$s\sigma_y(N/mm^2)$		
CH1	十字鉄骨	H-668x203x14x28	9	30,60,90	235,330,400	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	2
MH1	単一H形鋼						
CH2	十字鉄骨	H-644x199x10x16					
MH2	単一H形鋼						

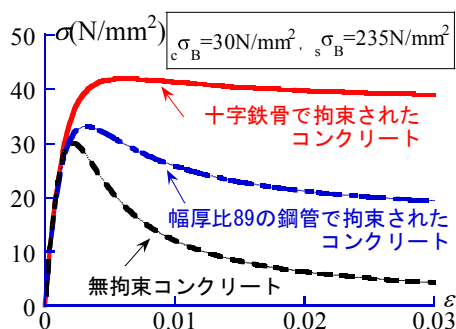


図-12 コンクリートの骨格曲線

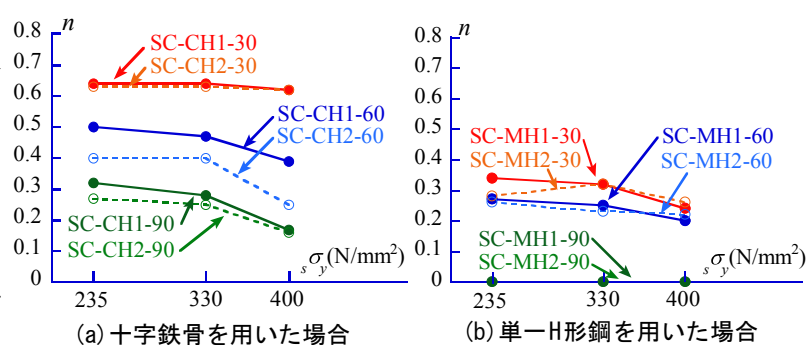


図-13 安定限界軸力

を示していることから、十字鉄骨を使用した場合のフランジ幅厚比はコンクリートの拘束効果に大きな影響があることがわかる。また、 $s\sigma_y$ が大きくなると安定限界軸力比が小さくなるのは、高強度鋼を使用すると結果としてコンクリートが大きな圧縮力を負担し、先にコンクリートが圧縮破壊し、耐力を維持できなくなることによるものと考えられる。また、単一H形鋼を用いた場合、コンクリート強度90N/mm²を使用すると、コンクリートの十分な横拘束が得られず安定した挙動は得られなかった。

6. 結論

鋼・コンクリート合成柱材の中心圧縮実験及びSC断面のコンクリートの構成則を考慮して弾塑性解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) コンクリートの応力状態を、十字鉄骨の内側と外側に分割して評価する解析手法は、中心圧縮実験結果をよく追跡できたことから、回帰曲線の精度は高いものと考えられる。
- 2) 安定限界軸力比について検討した結果、十字鉄骨を内蔵し薄肉鋼管で横補強した柱材は、高軸力下においても優れた耐震性能を発揮することを明らかとした。

謝辞

2.3mm厚の鋼管は九州共立大学技師永岡忠光氏により製作して頂いた。試験体の製作及び載荷実験にあたり、福岡大学工学部建築学科技師の平國久雄氏及び田代峰一氏をはじめとする平成21年度福岡大学堺研究室の大学院生及び卒研究生ならびに、材料実験室の本田悟助教にお世

話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 堺 純一, 河本 裕行, 松原 佳毅: 横補強鋼管を用いた鋼コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的研究, 構造工学論文集, pp.383-388, 2007.3
- 2) 河本 裕行, 堺 純一, 松原 佳毅: 横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材の中心圧縮試験, コンクリート工学年次論文集, 第29巻, 第3号, pp.97-102, 2007
- 3) 倉富 洋, 堺 純一, 田中照久, 河本裕行: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材のコンクリートの構成則に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No2, pp.1201-1206, 2009.7
- 4) 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-ひずみ関係 日本建築学会構造系論文集, pp.95-104, 1994.7
- 5) 加藤 勉, 秋山 宏, 山内泰之: 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験則, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.937-938, 1973.10
- 6) 山田 哲, 今枝知子, 岡田 健: バウシンガー効果を考慮した構造用鋼材の簡潔な履歴モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第559号, pp.225-232, 2002.9
- 7) 鎌田圭次郎, 大住和正, 渡辺史夫, 六車 照: 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(東北), 構造II B, pp.505-506, 1991.9