

論文 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の構造性能及び安定限界軸力に関する研究

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。その要因である内蔵十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を定量的に評価し, 本柱材のコンクリートの構成則を明らかとした。本論では, 本柱材の弾塑性性状に影響を及ぼすと考えられる影響因子を解析変数にとり, 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った。さらに, 安定限界軸力について検討した結果, SRC規準により規定されている軸力制限式を緩和できることを示した。

キーワード: 鋼・コンクリート合成柱, 横補強鋼管, 拘束効果, 弾塑性性状, 安定限界軸力

1. 序

著者らは, 鉄骨鉄筋コンクリート (以下SRCと略記) 柱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った鋼・コンクリート (以下SCと略記) 合成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)}。また, SC柱断面のコンクリートの構成則について検討し, 十字鉄骨によって拘束されたコンクリートの拘束効果を定量的に評価できる解析手法を提案した³⁾。

本論では, SC柱材の高い変形性能を活かした合理的な使用を目指すため, 内蔵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, 軸力と繰返し水平力を受けるSC柱材の弾塑性解析を行い, 既往の弾塑性実験結果¹⁾と比較した。また, 本柱材は十字鉄骨によるコンクリートの大きな拘束効果が発揮されることから, 一定軸力下で繰返し水平力を与える際, 高軸力下においても安定した挙動を示すことが考えられる。そこで, 本柱材が安定した挙動を示す限界の軸力を安定限界軸力と定

義し, 鉄骨寸法, 材料強度及び鋼管幅厚比がSC柱材に及ぼす影響を調べ, 鉛直荷重を保持できる制限式について検討を行った。

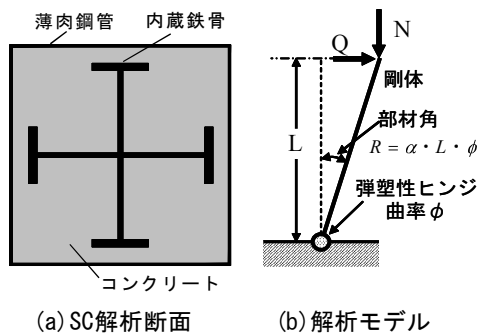
2. SC柱材の弾塑性解析

2.1 解析モデル

図-1(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-1(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。

2.2 材料の応力-歪関係

鋼材の応力-歪関係は図-2に示すモデルを, コンクリートの応力-歪関係は崎野・孫モデル⁴⁾をそれぞれ使用した。ただし, コンクリートの構成則はSC柱材の中心圧縮実験から得られた成果を元³⁾に, 十字鉄骨によるコ



(a) SC解析断面 (b) 解析モデル

図-1 弾塑性解析

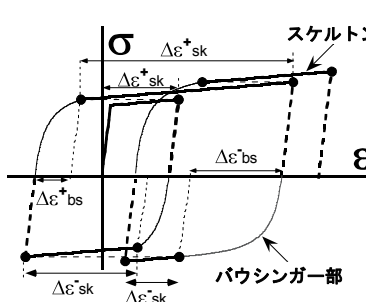


図-2 鋼材の応力-歪関係

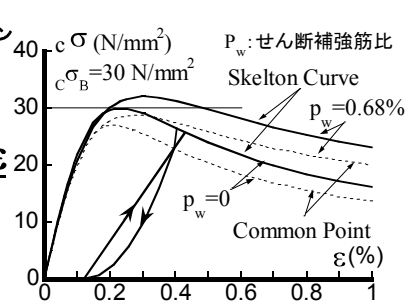


図-3 コンクリートの繰返し則

*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)

ンクリートの拘束効果を考慮し、十字鉄骨の内側と外側に分割して求めている。なお、繰返し則は渡辺らのモデル⁹⁾を用いた(図-3参照)。材料の応力-歪関係についての詳細は文献3)を参照されたい。

2.3 鋼管の境界幅厚比

十字鉄骨で拘束されたコンクリート部分(図-4参照)は、本解析において鋼管の幅厚比の影響を受けないため、鋼管の幅厚比が小さくなると鋼管で拘束されたコンクリートの強度が上昇し、十字鉄骨内のコンクリートより計算上強くなる場合がある。実際には、十字鉄骨内のコンクリートが十字鉄骨外の鋼管で拘束されたコンクリートより先に破壊するとは考えにくい。文献3)においてSC柱材の弾塑性解析は実験結果を精度よく評価できることを明らかとしているが、本柱材のより高精度の弾塑性解析を行うために、鋼管で拘束されたコンクリートの強度が十字鉄骨内のコンクリートの強度より大きくなる鋼管の幅厚比を境界幅厚比とし、そのときの弾塑性解析手法を検討した。ここで、鋼管によるコンクリートの拘束効果は文献3)の3.1項で示した解析手法による。

検討に用いた解析変数を表-1に示す。検討を行った結果、十字鉄骨の寸法、コンクリート圧縮強度、鉄骨降伏点による違いはほとんど見られず、鋼管の境界幅厚比に大きな影響を及ぼすのは鋼管降伏点であることがわかった。境界幅厚比について検討した結果の一例を図-5(a)に、境界幅厚比の鋼管を用いたときのコンクリートの応力-歪関係を図-5(b)に、それぞれ示す。十字鉄骨外側のコンクリートの拘束効果は鋼管の影響を大きく受けるので、鋼管降伏点が大きくなるほど拘束効果が発揮

され境界幅厚比が大きくなっていることがわかる。なお、本研究で想定している鋼管は幅厚比が100程度の薄肉のもので、境界幅厚比を下回るような厚さの鋼管は基本的には対象としない。

2.4 弾塑性解析と実験挙動の比較

図-6に、2.3項で示した境界幅厚比を下回る鋼管を使用した試験体の実験挙動と解析結果の比較を示す。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。図-6(a)に示したコンクリートの応力-歪関係からわかるように、鋼管幅厚比44を使用した場合、十字鉄骨外の鋼管で拘束されたコンクリートは、十字鉄骨で拘束されたコンクリートより大きい強度を示している。従って、境界幅厚比未満の鋼管を使用するときは、文献3)の3.1項で示した解析手法により、十字鉄骨の内側と外側にコンクリートを分けることはせず、一様に応力が作用するものとして解析を行った。図-6(b)に文献3)の3.1項で示した鋼管と鉄骨ウェブによるコンクリートの拘束効果を考慮して解析を行った結果を、図-6(c)に文献3)の3.2項で示した十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を使用して解析した結果をそれぞれ示す。図-6(b)では、図-6(c)と比較して部材角4%の変形まで精度よく実験挙動を追跡できていることから、2.3項で示した境界幅厚比以下の鋼管を使用した場合の解析手法は、鋼管によって一様にコンクリートが拘束されるものとして評価する。一方で、図-7に示した境界幅厚比以上の鋼管を使用した試験体の実験挙動と解析結果の比較では、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮して解析を行うと実験結果を精度よく評価できている。

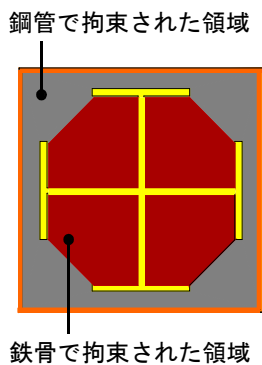


図-4 コンクリートの拘束領域

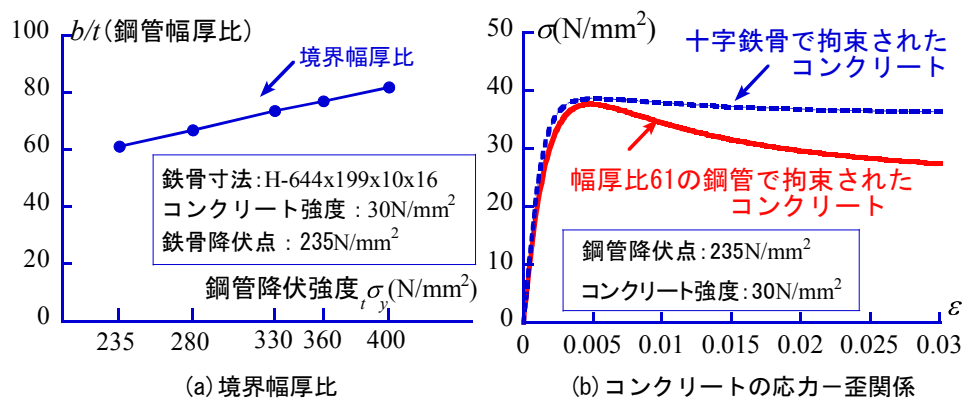


図-5 鋼管の境界幅厚比

表-1 解析変数一覧

断面寸法	内蔵鉄骨		材料強度		
	形状	寸法	σ_B (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)
800x800	十字鉄骨	H-644x199x10x16	30, 45, 60, 75, 90	235, 280, 330, 360, 400	235, 280, 330, 360, 400
		H-656x201x12x22			
		H-668x203x14x28			

σ_B : コンクリート圧縮強度, σ_y : 鉄骨降伏点, σ_y : 鋼管降伏点

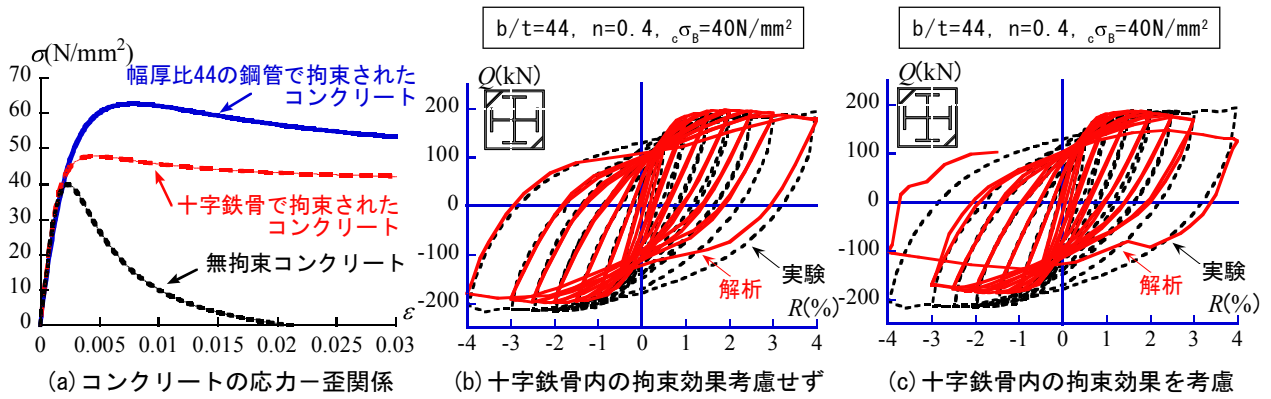


図-6 幅厚比44を用いた試験体(境界幅厚比未満)の弾塑性実験結果と解析結果の比較

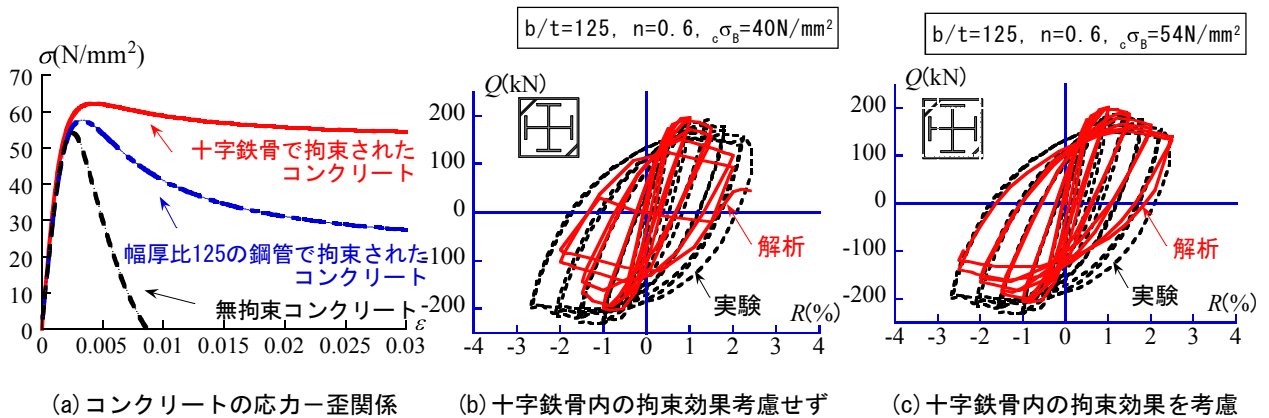


図-7 幅厚比125を用いた試験体(境界幅厚比以上)の弾塑性実験結果と解析結果の比較

3. SC柱材の安定限界軸力

3.1 安定限界軸力の算定

前述した解析手法を用いてSC柱の弾塑性解析を行った。本解析では、安定した挙動を示す最大の軸力である安定限界軸力の検討について、文献3)から再考を行い、本研究では一定軸力下で定変位振幅10回の正負交番繰返し水平力を加え、軸縮み量も考慮した上で最終的に最大耐力の90%の耐力を保持している状態を安定と定義した。十字鉄骨の寸法、薄肉鋼管の幅厚比、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-2に示す解析変数をとった。薄肉鋼管の板厚の違いは2.4項において弾塑性解析を行った結果、SC柱材の弾塑性挙動に大きく影響したことから、幅厚比100前後の板厚を3種類選定した。なお、薄肉鋼管の降伏点については、薄肉鋼管はコンクリートを横拘束するためだけであるもの

とし、 235N/mm^2 で統一している。

図-8に、十字鉄骨を内蔵した柱が安定した挙動と不安定な挙動を示すときの例を示す。図-8(a-1)では、軸力比 $n=0.65$ のとき10回の繰返し水平力を与え終えた時点で最大耐力の90%以上を保持できているので、定義に従い安定であるとみなしている。一方で、図-8(a-2)のように軸力比 $n=0.66$ の軸力を載荷させると、10回目での耐力が最大耐力の90%を下回っていることから不安定とした。図-8(b)より、コンクリート強度 $\sigma_b=90\text{N/mm}^2$ を使用したときには、軸縮みの発散が抑えられるとともに、コンクリートの最外縁を鋼管で拘束しているため、不安定時になっても高強度コンクリート特有の急激な耐力低下は見られなかった。

図-9に繰返し回数毎における軸縮みの進行度合を示す。安定時では回数が増えていくと軸縮みの進行が緩やかになっているが、不安定時では軸縮みが進行し続けて

表-2 解析変数一覧

断面寸法	内蔵鉄骨		薄肉鋼管 板厚(mm) *()内は幅厚比	材料強度		部材角(%)	せん断 スパン比
	形状	寸法		$c\sigma_B(\text{N/mm}^2)$	$s\sigma_Y(\text{N/mm}^2)$		
800x800	十字鉄骨	H-644x199x10x16	6(133), 9(89), 12(67)	30, 45, 60, 75, 90	235, 330, 400	1.0, 1.5, 2.0	2
		H-656x201x12x22					
		H-668x203x14x28					

いくことがわかる。また、コンクリート強度 30N/mm^2 を使用し、 $R=2.0\%$ の部材角まで変形させると軸縮みが 1.0% を超えたが、その他の解析条件においては、安定時における挙動では軸縮みが 1.0% 以内に抑えられていることを確認した。

安定限界軸力について検討した結果を図-10に、本解析変数におけるコンクリートの応力-歪関係の例を図-11にそれぞれ示す。図-10では、縦軸に安定限界軸力比 n_l を、横軸に(a)コンクリート強度 σ_c 、(b)鋼管板厚、(c)鉄骨降伏点 σ_s をとり、安定限界軸力比に影響を及ぼす因子について検討した。内蔵鉄骨寸法による安定限界軸力比の違いはほとんど見られなかったことから、内蔵鉄骨寸法を H-644x199x10x16 とした場合のみ載せている。図-10(a)より、コンクリート強度が大きくなるほど安定限界軸力比が低下していることが分かる。これは高強度になるほど最大耐力発揮後の耐力低下が著しくなるため

だと考えられ(図-11(a), (b)参照)、部材角が大きくなるほどその傾向は顕著に表れている。また、鋼管の板厚を厚くするとコンクリートの拘束効果が上昇し最大耐力発揮後の下り勾配が緩やかになることから(図-11(a), (b)参照)、安定限界軸力比は上昇している。鉄骨降伏点及び内蔵鉄骨寸法による安定限界軸力比の違いは見られず、安定限界軸力はコンクリート強度及び鋼管幅厚に大きく依存しているものと考えられる。本柱材はコンクリートの最外縁を鋼管で補強しているため、図-11(c)に示すようにコンクリートの圧壊歪が上昇し、 400N/mm^2 といった高強度鋼を使用した場合でも先に鉄骨が降伏することから、鉄骨降伏点に拘らず軸力を保持できる。

3.2 制限軸力への適用

高軸力を受ける柱に対して十分な靱性を確保するため、現行のSRC規準⁶⁾では、軸力と繰返し水平力を受ける柱材が部材角 1.0% の変形で軸力を保持できる制限値と

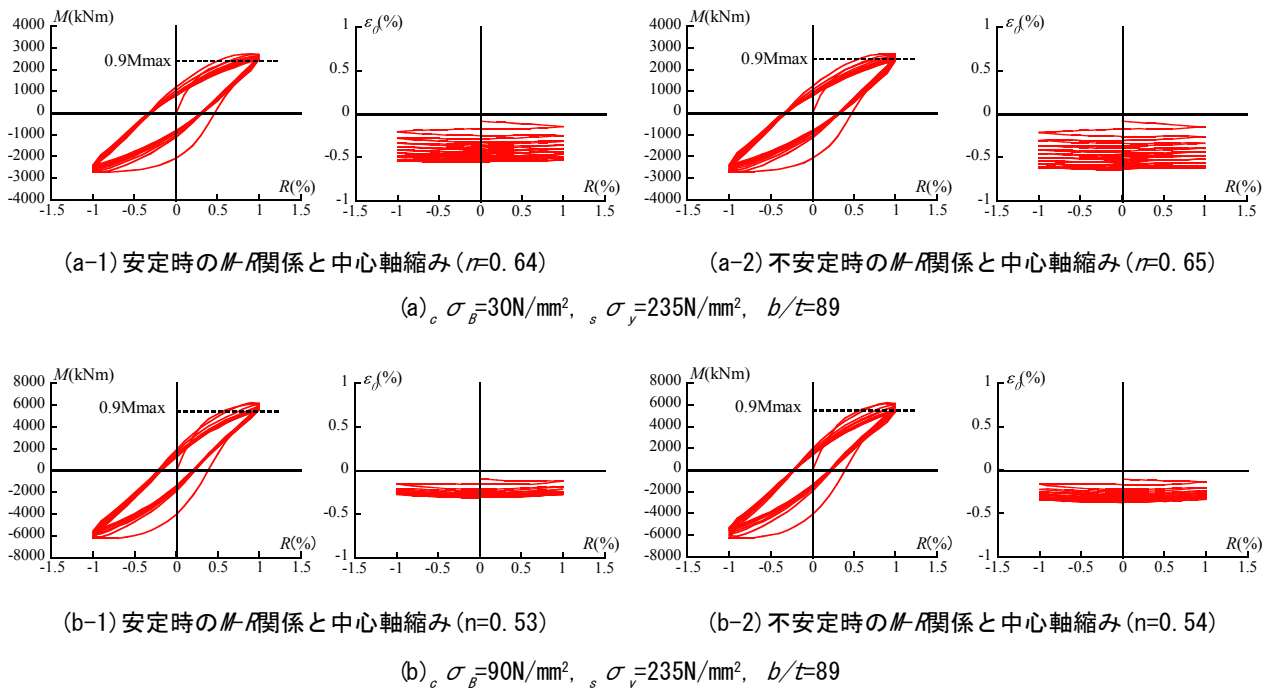


図-8 安定限界軸力による安定時と不安定時の挙動

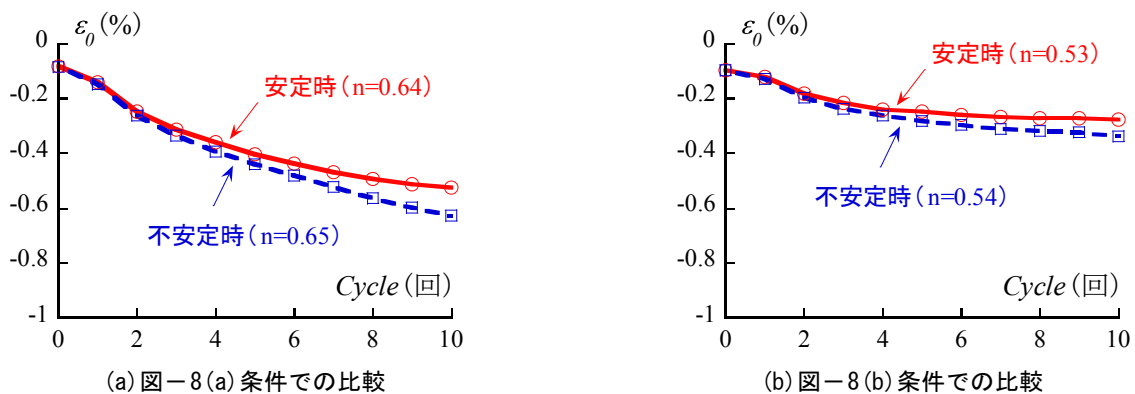


図-9 安定時・不安定時におけるサイクル毎の軸縮みの進行具合

して、式(1)に示す制限軸力が規定されている。

$$N_l = \frac{1}{3} b \cdot D \cdot F_c + \frac{2}{3} sA \cdot sfc \quad (1)$$

ここで、 b, D : 柱断面のコンクリート断面の幅とせい、
 F_c : コンクリートの設計基準強度、 sA, sfc : それぞれ、内
 蔵鉄骨の断面積と短期許容圧縮強度である。

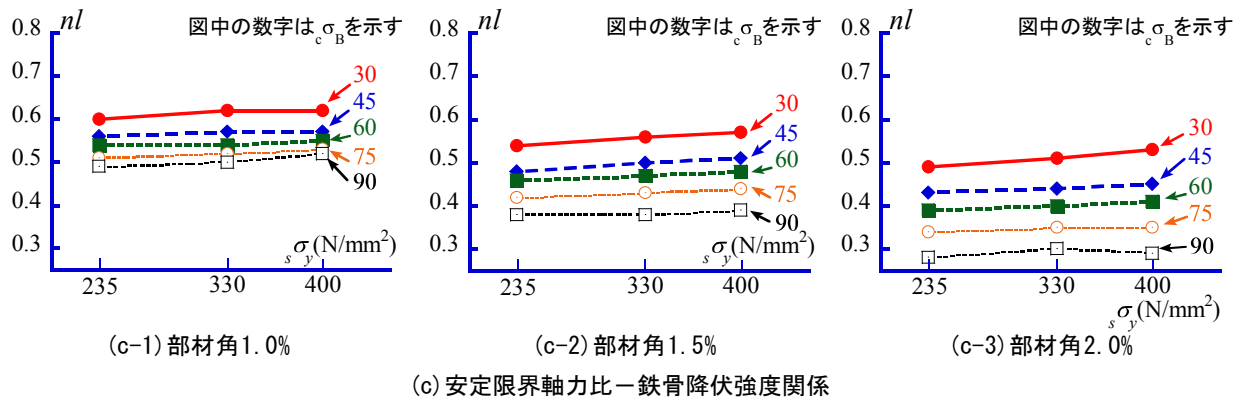
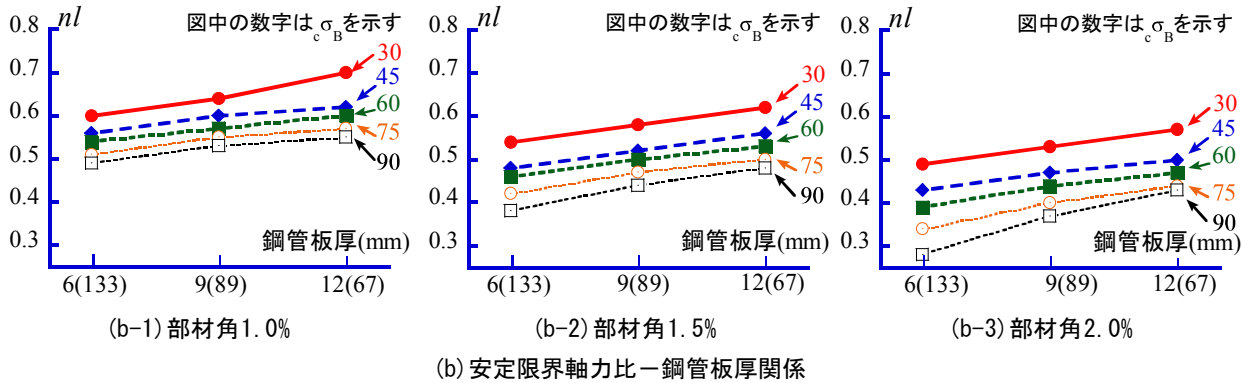
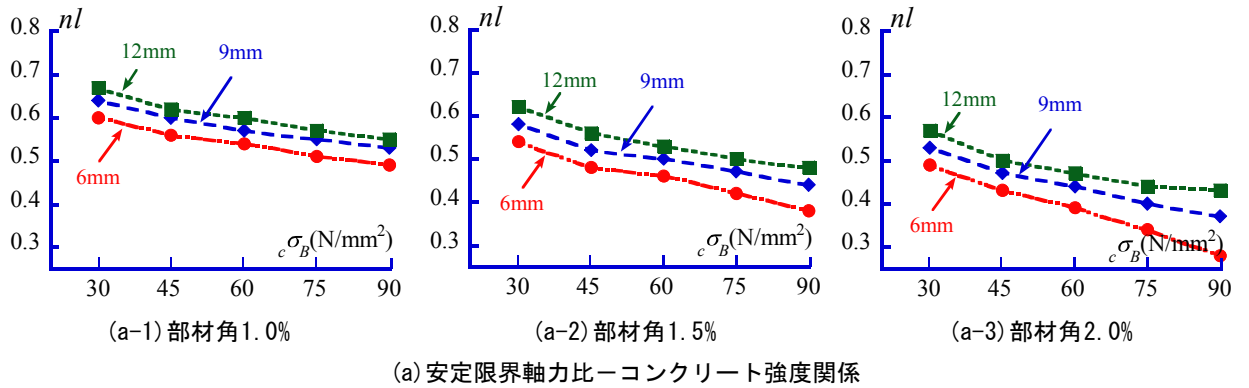


図-10 安定限界軸力に影響を及ぼす因子

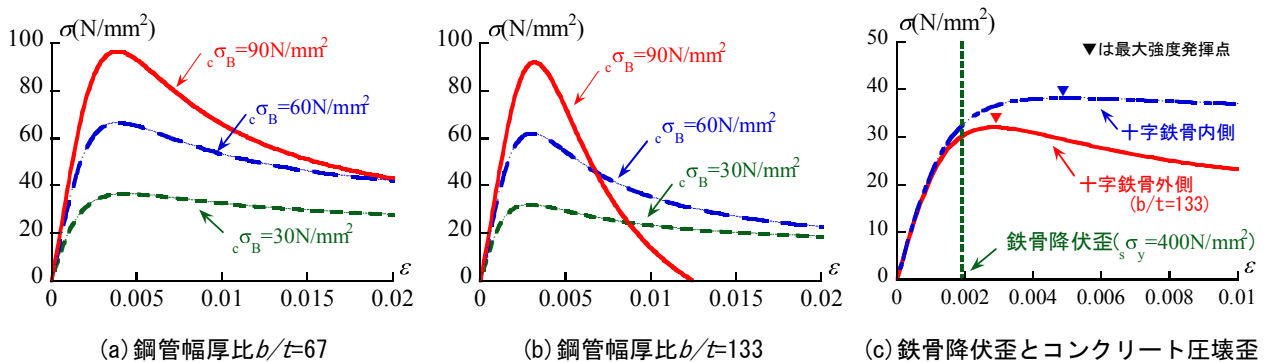


図-11 コンクリートの応力-歪関係

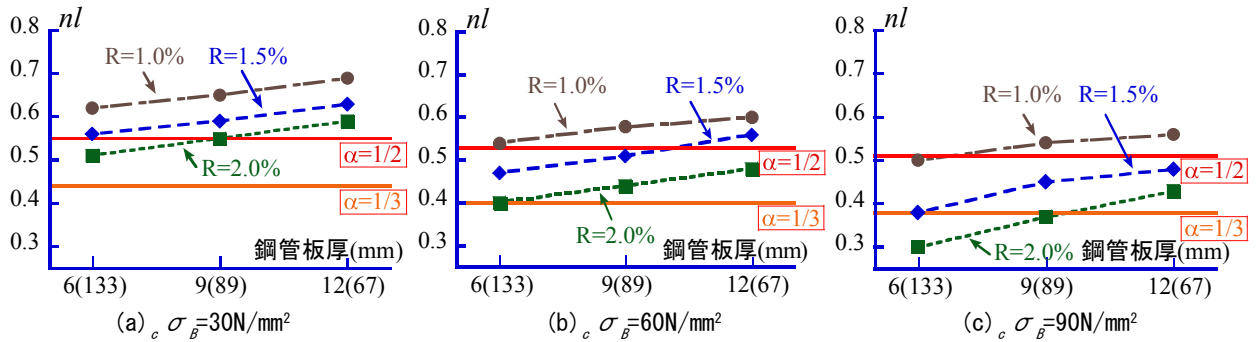


図-12 SC柱材の安定限界軸力比の検討

本研究で提案しているSC柱断面には、鉄骨が内蔵されていることから、SRC規準による制限軸力をSC柱材にも適用できるものと考えた。式(1)は、内蔵鉄骨に単一H形鋼を使用したSRC断面を対象としているが、十字鉄骨を内蔵した場合にはコンクリートの拘束効果が大きく見込まれることから、この制限軸力を緩和することが可能であると考えられる。SC柱材への適用を図るため安定限界軸力を制限軸力と見なし、式(2)を制限式として提案した。また、式(3)にて安定限界軸力比を算出した。

$${}_s N_l = \alpha \cdot b \cdot D \cdot {}_c \sigma_b + \frac{2}{3} {}_s A \cdot {}_s \sigma_y \quad (2)$$

$$nl = \frac{{}_s N_l}{{}_{sc} N} \quad (3)$$

ここで、 ${}_c \sigma_b$ ：コンクリートのシリンダー強度、 ${}_s \sigma_y$ ：内蔵鉄骨の降伏点、 nl ：安定限界軸力比、 ${}_{sc} N$ ：SC柱断面の圧縮耐力である。

図-12に安定限界軸力比を示す。ここで、 α の値は式(2)に示す安定限界軸力 ${}_s N_l$ を算定する式における、コンクリートの圧縮耐力に対する係数、 R は部材角である。鉄骨降伏点は 330N/mm^2 で、内蔵鉄骨寸法はH-644x199x10x16で、それぞれ統一している。この図から、部材角 $R=1.0\%$ までの変形を許容するとした場合、コンクリート圧縮強度に拘らず概ね $\alpha=1/2$ で評価でき、SRC規準で規定されている制限軸力を緩和できることがわかる。部材角 $R=1.5\%$ 及び 2.0% とした場合、コンクリート強度と鋼管幅厚比の組み合わせにより α を取れる値が異なるが、 ${}_c \sigma_b=90\text{N/mm}^2$ といった高強度コンクリートを使用する際は鋼管幅厚比を100以下に抑える必要があり、適切な組み合わせを選択することが重要である。

6. 結論

鋼・コンクリート合成柱材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い、安定限界軸力について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

1) コンクリートの拘束状態を、十字鉄骨の内側と外側に分割して評価する解析手法は、弾塑性実験をよく追跡

できたことから、SC柱材のコンクリートの構成則を精度よく評価できている。

- 安定限界軸力比について検討した結果、変形を部材角にして1.0%までを許容するとした場合、式(2)の α を1/2として安定限界軸力を評価できることを明らかにした。
- 本柱材の挙動はコンクリート強度と鋼管幅厚比に大きく左右されるため、適切な組み合わせを検討する必要がある。

謝辞

本研究は北島雅泰氏をはじめとする平成22年度福岡大学堺研究室の大学院生及び卒業生にお世話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 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
- 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
- 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弾塑性性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No2, pp.1153-1158, 2010.7
- 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
- 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
- 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, 2001.1