

論文 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

倉富 洋*1・堺 純一*2・田中 照久*3・河本 裕行*4

要旨: SRC断面から主筋とせん断補強筋を除き, 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱の弾塑性変形性状を解析的に精度よく評価するには, 鋼材で囲まれたコンクリートの構成則を明らかにする必要がある。本研究では, 鋼・コンクリート合成柱材の中心圧縮実験を行い, 実験結果と解析結果により, 薄肉鋼管および内蔵鉄骨によって拘束されたコンクリートの構成則について検討した。その結果, 鉄骨で囲まれたコンクリート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, 実験結果をよく評価することがわかった。

キーワード: SC柱, 中心圧縮, 横補強鋼管, 幅厚比

1. 序

鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと略記)構造は, 優れた耐震性能を示すことは一般に知られている。しかし, 鉄筋の配筋作業や柱梁接合部の鉄骨・鉄筋の収まりが難しく, 実際の現場では敬遠されがちである。

著者らは, SRC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・コンクリート合成柱材の開発を目的とし, 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(以下SCと略記)の弾塑性変形状態を調べ, 高軸力でも大変形まで耐力が低下せず, 優れた構造性能があることを明らかにした^{1),2)}。薄肉鋼管と鉄骨で囲まれたコンクリートは横拘束されるため, SRC柱材のようにかぶりコンクリートが圧壊して抵抗力が低下することはないと考えられる。

そこで, 本研究では中心圧縮実験を行い, その実験データをもとに, 内蔵鉄骨及び薄肉鋼管で横補強された

コンクリートの構成則について解析的に検討を行った。

2. SC柱の中心圧縮実験

2.1 試験体

内蔵鉄骨の形状と鋼管の幅厚比の違いが, 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, 鉄骨の有無を含め内蔵鉄骨の形状と, 薄肉鋼管の厚さである。試験体の寸法は $b \times d = 200 \times 200(\text{mm})$ とし, 柱材長を $600(\text{mm})$ とした。内蔵鉄骨はSS400材で, ウェブに4.5mm厚, 2.3mm厚, フランジに6mm厚, 2.3mm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。なお, コンクリートは骨材の最大径15mmの普通コンクリートを縦打ちで打設しており, 打設後に加圧面を研磨した。シリンダー強度 σ_B は31.3N/mm²である。

表-1 試験体一覧³⁾

番号	内蔵鉄骨形状		薄肉鋼管		備考	材長		3.3項の内蔵鉄骨による強度上昇分 $k \cdot \sigma_t(\text{N/mm}^2)$			
			板厚(mm)	幅厚比		内蔵鉄骨	鋼管				
1	十字	CH-160×80×4.5×6	2.3	87	予備	580	600	101.0			
2			1.6	125				29.0			
3			2.3	87				20.7			
4			1.6	125	sN=0			34.6			
5			2.3	87	一体押し			600	23.1		
6			1.6	125					2.9		
7	十字	CH-160×80×2.3×2.3	2.3	87	sN=0	580	600	8.6			
8			1.6	125				2.8			
9			2.3	87				一体押し	600	11.1	
10			1.6	125	9.0						
11			無		2.3			87	無	無	(3.9)
12			無		1.6			125			(1.8)

()は鉄骨がないので(8)式で算定

*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)

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であり、鋼管に圧縮力を負担させないように載荷している。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、鉄骨表面にグリースを塗布し、スタブカラムの上部において内蔵鉄骨の上断面に10mm厚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製作した試験体(表-1で「sN=0」と表記)と、加圧版を介して内蔵鉄骨とコンクリートに圧縮力をかけた試験体(表-1で「一体押し」と表記)の2タイプを準備した。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³⁾。軸変形は上下の加圧版間の相対変形を2箇所を設置した変位計で測定し、2軸ゲージを鉄骨ウェブに2枚、薄肉鋼管中央に2枚ずつ貼付し、鉄骨と鋼管の歪を測定した。

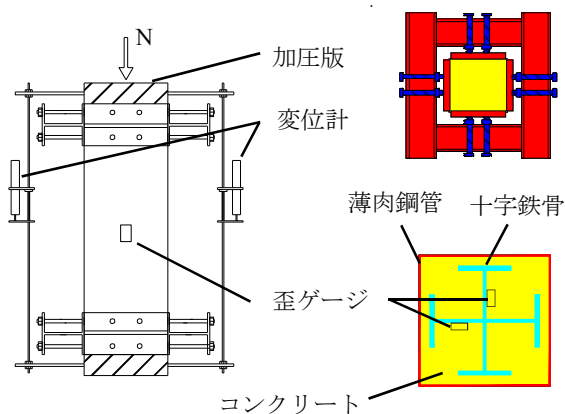
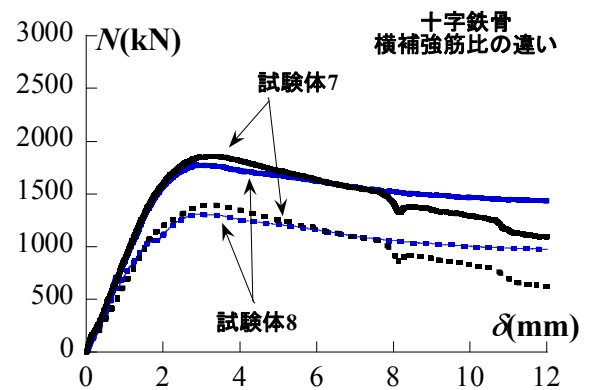


図-1 荷重装置と断面

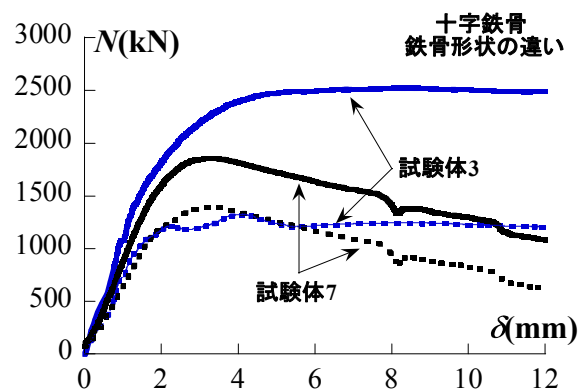
2.3 実験結果とその考察

図-2に実験により得られた荷重-変形関係の一例を示す。図中の実線は試験機で荷重Nと試験体の検長区間(600mm)の縮み δ の関係を示している。中心圧縮実験を行った結果、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。鉄骨の負担軸力は、内蔵鉄骨のウェブに貼付した材長方向の歪の値をもとに、鉄骨全断面が一樣に縮むものとして、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

降伏棚があるため、降伏後はそれぞれの負担軸力は降伏軸力を保持するものとしている。図中の点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のみの負担軸力である。3章以降の実験と解析の比較では、このコンクリートのみの負担軸力で比較する。図-2(a)は試験体7と試験体8の比較である。この図より、鋼管の幅厚比の違いはコンクリートの最大耐力の大きさ、最大耐力発揮後の耐力低下にはあまり影響がみられないことがわかる。図-2(b)は、試験体3と試験体7の比較である。この図より、内蔵鉄骨の鉄骨寸法の違いはコンクリートの最大耐力に影響は見られないが、最大耐力発揮後の耐力低下は、内蔵鉄骨のフランジ、ウェブの幅厚比が小さい試験体3は耐力が維持されるのに対して、内蔵鉄骨の幅厚比が大きい試験体7は耐力が低下している。



(a) 横補強筋比の違いによる影響



(b) 内蔵鉄骨形状の違いによる影響

図-2 荷重-変形関係

表-2 使用鋼材の機械的性質³⁾

部材名	t(mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	伸び率(%)	降伏比
フランジ	6.0	407	473	31	0.86
ウェブ	4.5	379	469	31	0.81
フランジ・ウェブ・横補強鋼管	2.3	322	435	39	0.74
横補強鋼管	1.6	307	394	30	0.78

t:板厚 σ_y :降伏応力度 σ_u :引張強度

3. 解析計画

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-歪関係式は以下に示す通りである。なお、各式の応力の単位はN/mm²としている。

$$Y = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \quad (1)$$

$$X = \varepsilon_c / \varepsilon_{co}, \quad Y = \sigma_c / \sigma_{cB} \quad (2), (3)$$

$$A = E_c \cdot \varepsilon_{co} / \sigma_{cB} \quad (4)$$

$$D = 1.50 - 1.71 \cdot 10^{-2} \sigma_{cB} + 1.6 \sqrt{\sigma_{re}} \quad (5)$$

$$E_c = (0.689 + 0.332 \sqrt{\sigma_{cB}}) \times 10^4 \quad (6)$$

$$\sigma_{cB} = \sigma_{cB} + k_e \sigma_{re} \quad (7)$$

$$\sigma_{re} = 0.5 \rho_h \cdot \sigma_{hs} \cdot (d''/C) (1 - s/2D_c) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{co} = \varepsilon_0 [1 + 5(K-1)] \quad (9)$$

ここで、 σ_c : コンクリートの応力、 ε_c : コンクリートのひずみ、 σ_{cB} : 拘束されたコンクリートの強度、 ε_{co} : 拘束されたコンクリートの強度時の歪、 E_c : 拘束されたコンクリートの始源剛性、 D : 応力-歪関係の応力下降域の下り勾配係数、 σ_{re} : 有効側圧因子、 σ_{cB} : シリンダー強度、 k_e : 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 : 横補強材の公称直径(鋼管の場合は管厚)と有効支持長さ(鋼管の場合は内法幅)、 s , D_c : 横補強材の間隔(鋼管の場合は0)と外周横補強筋の芯々間距離(鋼管の場合は内法幅)、 K : 拘束コンクリートの強度上昇率である。なお、(5)、(6)式の各係数は各応力度をSI単位に換算している。

本研究では、十字鉄骨を内蔵させているため、拘束されたコンクリートは鉄骨フランジを押すことによりウェブに引張力が働くため、ウェブが中子筋の役割を果たすと考えられる。このことにより、有効支持長さ C を外周横補強筋間距離 D_c の1/2にした。また、ウェブに引張力が働くことでコンクリートを拘束する効果があると考え、横補強筋体積比 ρ_h にウェブの体積を加算した。この検討では、ウェブの体積を含めて(8)式で求めた σ_{re} を用いて(1)式でコンクリートの応力-歪関係を求めた。なお、横補強筋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。

3.2 最大耐力発揮後のひずみの調整

横補強筋により横拘束されたコンクリートの応力-歪関係のモデル化に際しては、試験に採用されている歪測定の見長区間が、測定されるコンクリートの応力-歪関係に大きく影響されることに注意する必要がある。

そこで、本研究では降伏後の歪の調整を行うにあたり、除荷モデルを作成するために渡辺モデル⁵⁾を採用した。試験体の中心部分 a は降伏後も破壊が進行するものとし、中心から離れた部分 b は、降伏後は歪が減少するものと考えた(図-3参照)。本論では、試験体の損傷が試験体の中心部(断面せいと同じ長さの領域)に集中していることを考慮し、これを a 域として断面せいの200mmとした。図-3に最大耐力発揮後の歪の移行を示す。

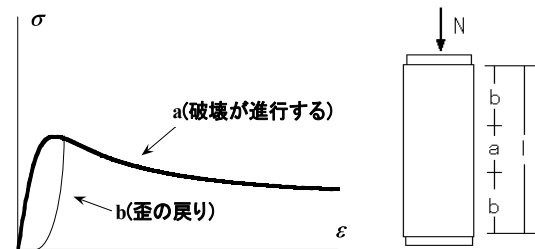


図-3 最大耐力発揮後の歪みの移行

この歪から、(10)式より軸力-変形関係に示す変形 δ を求める。

$$\delta = \varepsilon_a \cdot a + \varepsilon_b \cdot (l - a) \quad (10)$$

ここで、 ε_a : 破壊が進行すると考えた歪み、 ε_b : 歪みが減少すると考えた歪み(渡辺モデル⁵⁾に従う)である。

3.3 内蔵十字鉄骨による σ_{cB2} の検討

鋼管と十字鉄骨で拘束されたコンクリートの強度はそれぞれ違いがあると考え、拘束されたコンクリートの強度上昇がどれ程見込まれるのかを明確にするために、有効側圧因子に着目した。以下、 σ_{cB2} を求める過程を記す。鉄骨で拘束されたコンクリートの強度 σ_{cB2} を求める。

$$\sigma_{cB2} = \frac{cN - (cA_1 \cdot \sigma_{ct})}{cA_2} \quad (11)$$

ここで、 N : コンクリートの最大圧縮強度、 σ_{ct} : 鋼管で拘束されたコンクリートの応力、 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-5参照)。

(11)式で用いる応力 σ_{ct} を、図-4を用いて説明する。図中の記号 σ_{max} , ε_0 は、それぞれ実験結果の十字鉄骨内蔵試験体のコンクリートの最大応力度とこの応力度を發揮するときの歪である。十字鉄骨を内蔵していない試験体が歪 ε_0 時に發揮するコンクリートの応力を σ_{ct} とする。

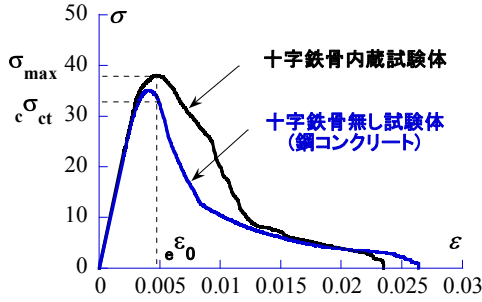


図-4 鉄骨外のコンクリートの圧縮応力 $c\sigma_{cb}$ の算定

十字鉄骨で拘束されたコンクリートの有効側圧因子 σ_{re} を求めるため、(12)式を提案する。

$$\sigma_{re} = k \cdot \sigma_r / k_e \quad (12)$$

ここで、 $k \cdot \sigma_r$ を求めるにあたって崎野・孫モデルの $c\sigma_{cb}$ を求める(7)式を参考にした。

$$c\sigma_{cb2} = c\sigma_B + k \cdot \sigma_r \quad (13)$$

ここで、 $k \cdot \sigma_r$: 十字鉄骨で拘束されたコンクリートの強度上昇分である。以上の手順で求めた $k \cdot \sigma_r$ の値を、表-1における強度上昇分の欄に示すが、鉄骨を内蔵していない試験体は(8)式から求めた値である。

(1)式を元に応力-歪関係を求めるが、鋼管と十字鉄骨で拘束されたコンクリートの応力状態は異なるため、解析結果は軸力-変形関係で表す。軸力は(14)式を用いる。

$$N = \sigma_1 \cdot cA_1 + \sigma_2 \cdot cA_2 \quad (14)$$

ここで、 σ_1 : (1)式から求めたコンクリートの応力度、 σ_2 : (11)式と(1)式から求めたコンクリートの応力度である。

この検討では、十字鉄骨で囲まれたコンクリートは(11)式で求め、応力-歪関係は(1)式で求めるものとする。十字鉄骨外のコンクリートは(8)式を用いて、応力-歪関係は(1)式で求めるものとした。以上のようにして求めた解析結果の一例を図-6に示す。また、図-5に内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束領域を示す。

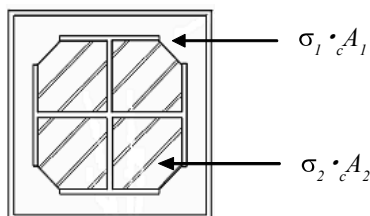


図-5 内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束領域

3.4 有効拘束係数 k'

ここでは、内蔵十字鉄骨により拘束されたコンクリートの強度上昇を求める手法について検討する。

内蔵鉄骨のフランジがコンクリートを拘束するので、コ

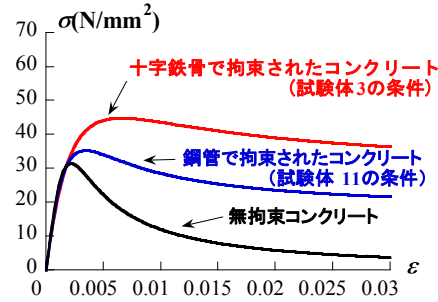


図-6 3.3項による解析結果の一例

ンクリートの側圧により十字鉄骨のウェブには材長方向に対して垂直方向に引張力がかかると同時に、フランジに面外方向の応力が作用することになる(図-7参照)。コンクリートの側圧はウェブの引張降伏と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、本実験で使用した鉄骨形状の場合、側圧が最大となるのは(15)式に示すフランジの付け根にかかるモーメントが(16)式に示す全塑性モーメントに達したときと考えられるので、側圧 σ_{r2} は式(17)で表される。

$$M = \sigma_{r2} \cdot b' \cdot b' / 2 \quad (15)$$

$$M_p = t_f^2 / 4 \times f \sigma_y \quad (16)$$

$$\sigma_{r2} = \frac{2t_f^2}{b'^2} f \sigma_y \quad (17)$$

ここで、 b' : フランジ長さ(=b- t_w)、 b : フランジ幅、 t_w 、 t_f : それぞれ、ウェブとフランジの板厚、 $f\sigma_y$: フランジの降伏応力度である。

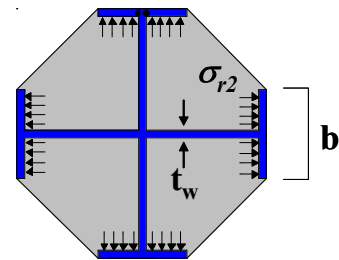


図-7 内蔵鉄骨による側圧

鉄骨が断断面なので、鉄骨に囲まれたコンクリートが一樣に σ_{r2} の側圧を受けるとは考えにくい。この領域のコンクリートの応力を一樣と考えるために、有効係数 k' を考慮した。この 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(18)式で評価する。 $k' \sigma_{r2}$ は強度上昇分であり、崎野・孫モデルの $k_e \cdot \sigma_{re}$ に対応する。

$$c\sigma_{cb2} = c\sigma_B + k' \cdot \sigma_{r2} \quad (18)$$

実験耐力から k' と σ_{r2} の関係を求めた結果を図-8に示す。実験から得られたシリンダー強度に対する応力上昇による k' をプロットで示す。このプロットを近似して、(19)式の回帰曲線が得られた。

$$k' = 8.8 / \sigma_{r2}^{0.6} \quad (19)$$

この検討では、鉄骨で拘束されたコンクリートは(8)式を用いず、(18)、(19)式を用いて(1)式で応力-歪関係を算定するものとし、鉄骨外の部分は(8)式を用いるものとする。

4. 解析結果の考察

4.1 実験結果と解析結果の比較

表-1の試験体に関して、実験結果と解析結果から得られた軸力-変形関係の比較を図-9に示す。解析結果3.1は3.1項で示した解析手法を用いた曲線である(以下同じ)。解析結果3.3, 3.4は内蔵十字鉄骨による拘束効果 σ_{re} を考慮したものである。

4.2 考察

図-9に実験結果と解析結果を比較した結果から、解析結果3.1では、実験結果を安全側に評価することがわ

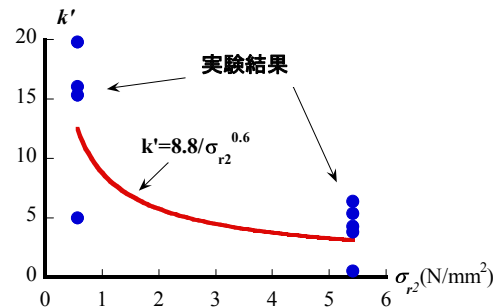
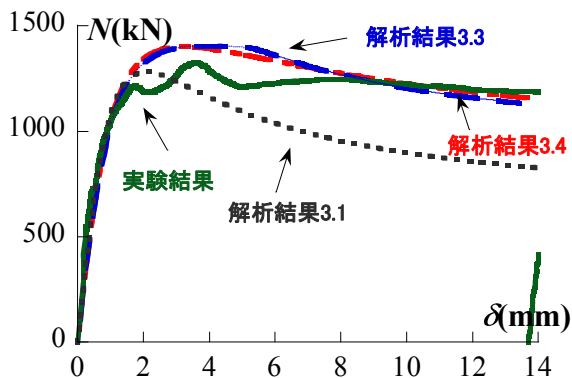
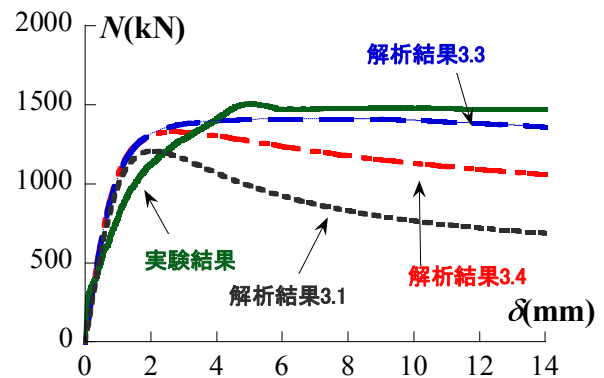


図-8 有効拘束係数

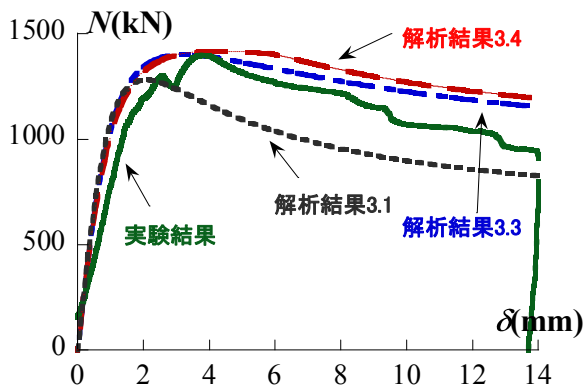
かった。内蔵鉄骨による拘束効果を考慮した解析結果3.3の方が、解析結果3.1より実験結果をよく評価できる結果となった。このことから、鋼管で拘束されたコンクリートと、内蔵鉄骨で拘束されたコンクリートの強度上昇には違いがあり、これらの部分をそれぞれ分けて算定することにより精度の高い解析結果が得られることがわかった。内蔵十字鉄骨の寸法が大きい方が、最大耐力発揮後のコンクリートの耐力低下が抑えられている。図-9(a), (b), (h)より試験体3, 4, 10は解析結果が実験結果をよく評価しており、降伏後の降り勾配は解析結果3.3が実験の挙動をよく示した。実験結果と解析結果が



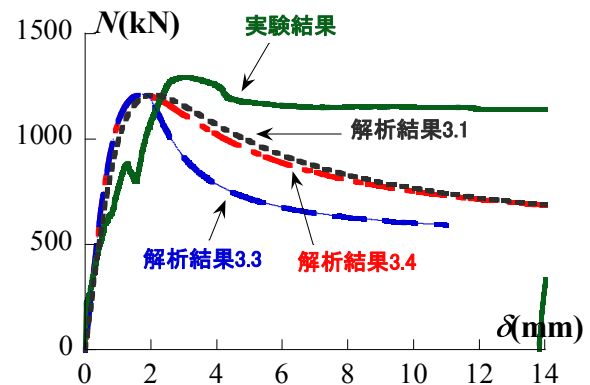
(a) 試験体3



(b) 試験体4



(c) 試験体5



(d) 試験体6

図-9 実験結果と解析結果の比較

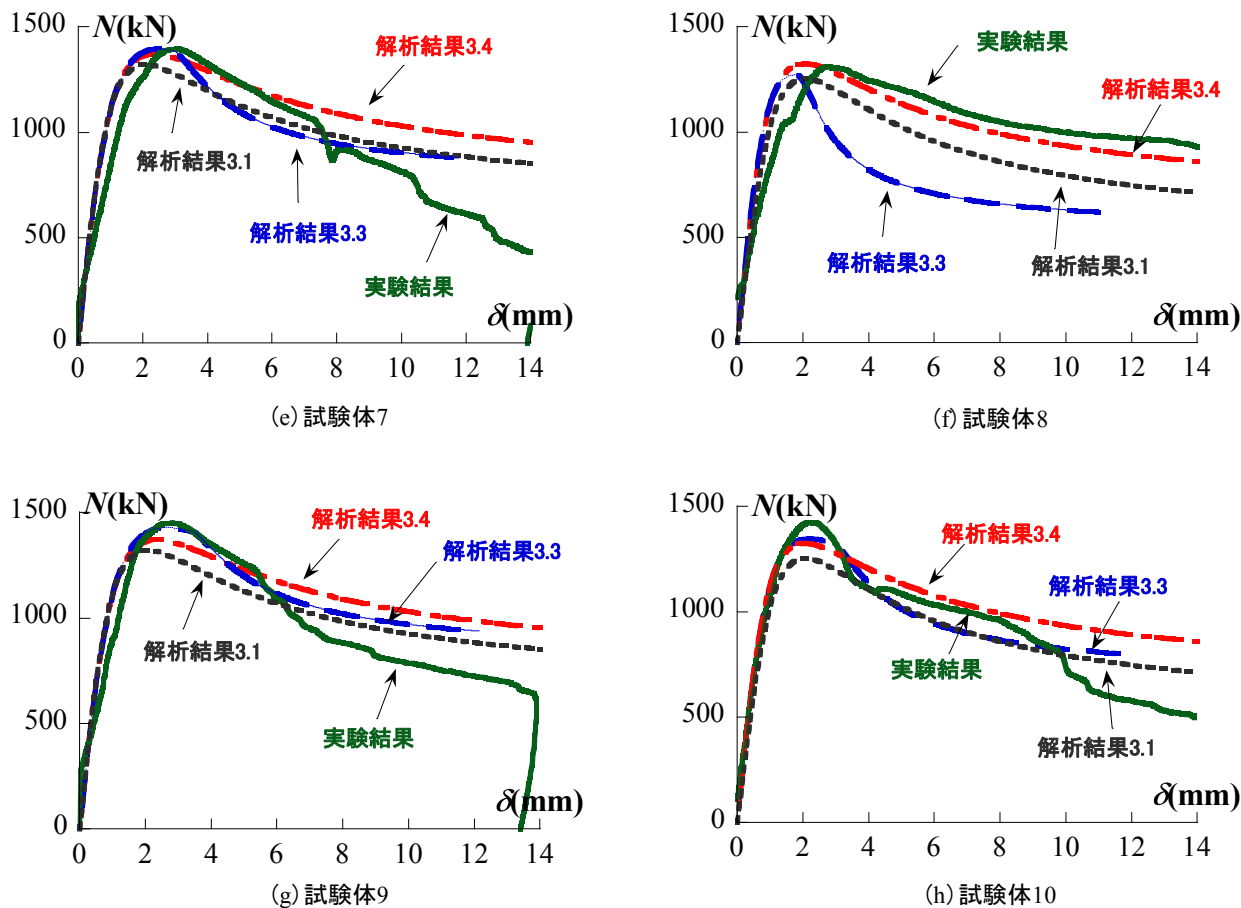


図-9 実験結果と解析結果の比較(つづき)

合わなかった試験体6(図-9(d)), 試験体8(図-9(f))は、鉄骨の歪みゲージの値が何らかの原因で正確に測定されず、解析結果における $k_e \cdot \sigma_{re}$ の値が小さくなり、拘束効果が十分に発揮されなかったものと考えられる。また、これらの試験体は図-8においてのプロット点の集団と少し離れた2点である。実験結果を見る限り、これらの試験体に拘束効果はあるものと考えられる。

5. 結論

鋼・コンクリート合成柱材の中心圧縮試験を行い、コンクリートの構成則について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 3.1項に示す、文献4)をSC断面に対応させて求めた手法では、実験結果を安全側に評価する。
- (2) 試験体6と試験体8を除いて、3.3項及び3.4項に示す解析手法によれば、薄肉鋼管で横補強されたコンクリートの応力-ひずみ関係を精度よく追跡できる。3.4項については、今後実験データを増やして回帰曲線の精度を上げていくことで、より正確に実験挙動が追跡できるものと考えられる。
- (3) 今回の実験の範囲において、薄肉鋼管で拘束されたSC柱のコンクリートと、内蔵十字形鉄骨で拘束され

たコンクリートの拘束効果には違いがあり、内蔵鉄骨による拘束効果の方が大きいことがわかった。

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) 河本 裕行, 堺 純一, 田中 照久, 堤 洋樹: 薄肉鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材の中心圧縮試験, 日本建築学会九州支部研究報告第47号 I, 構造系, pp.605-608, 2008.3
- 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) 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 II, pp.505-506, 1991.9