

論文 八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する解析的研究

倉富 洋^{*1}・堺 純一^{*2}・田中 照久^{*3}・川原 健輔^{*4}

要旨: 薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材から鋼管を取り除いた, 十字鉄骨とコンクリートからなる八角形断面の合成柱材が優れた構造性能を示すことは既往の実験的研究で明らかとしている。本論文では, 開断面である十字鉄骨のみで拘束されるコンクリートの拘束効果の評価法を示し, 断面解析と中心圧縮実験の実験挙動がよく一致することを確認した。また, 本論で提案した十字鉄骨で拘束されたコンクリートの評価法を考慮して弾塑性解析を行なうと, 鉄骨寸法, コンクリート強度および軸力比の違いに拘らず, 既往の曲げせん断実験挙動を精度よく追跡できることを明らかとした。

キーワード: 鋼・コンクリート合成柱材, 十字鉄骨, 拘束効果, 高強度コンクリート, 弾塑性解析

1. 序

著者らは, 鉄骨鉄筋コンクリート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性状について実験および解析的に検討し, 優れた構造性能を示すことを明らかとしている^{1), 2)}。また, 耐震性能を損なうことなく更なる環境負荷低減を目指すため, SC柱断面から薄肉鋼管を取り除き, 十字鉄骨とコンクリートのみで構成された八角形断面を有する鋼コンクリート合成柱材を考案した。中心圧縮実験および地震時応力を想定した曲げせん断実験を行ない, 本柱材がSC柱材に劣らない構造性能を示すことを実験的に明らかとした³⁾。簡素化したにも関わらず本柱材が優れた耐震性能を示したのは, 十字鉄骨を用いることで弱軸鉄骨の存在により軸縮みの累積を抑えられ, またコンクリートの拘束効果が発揮され, 変形能力が向上したためだと考えられる。

十字鉄骨により拘束されたコンクリートの応力-歪関係の評価法は文献1)にて示しているが, 鉄骨の外側にはコンクリートと薄肉鋼管で横補強されている断面を対象としている。本研究で提案する八角形のSC柱断面(図-1(a)参照)は十字鉄骨および拘束されたコンクリートの外周にコンクリートがないため, 文献1)で示した評価式を八角形断面を有する本SC断面にそのまま適用させることはできないものと考えた。そこで本論文では, まず既往の研究で行われた中心圧縮実験結果より十字鉄骨のみで拘束されたコンクリートの拘束効果の評価法を示し, 次いで, 十字鉄骨で拘束されたコンクリートの構成則を用いた弾塑性解析を行ない, 曲げせん断実験挙動と比較検討することで解析手法の妥当性を検証する。

2. 十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果の評価法

2.1 拘束コンクリートの応力-歪関係

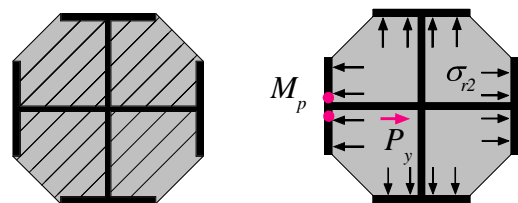
既往の研究では, 薄肉鋼管および十字鉄骨により拘束されたコンクリートの構成則を明らかにしたり。本SC柱断面はコンクリートを拘束するのは十字鉄骨のみであり, 鉄骨の外側にコンクリートがない。そのため, 十字鉄骨のみで拘束されたコンクリートの拘束効果の評価法を提案し, 中心圧縮実験の実験挙動と比較検討する。

2.2 拘束されたコンクリートの強度

十字鉄骨で拘束されたコンクリートの応力-歪関係は, 文献1)と同様に崎野・孫式⁴⁾を元に算定する。ここでは概略を記すに留め, 詳細は文献1)を参照されたい。

図-1に十字鉄骨によるコンクリートの拘束領域と鉄骨フランジに作用するコンクリートの側圧を示す。コンクリートの側圧は, フランジの付け根にかかるモーメントが全塑性モーメントに達するときの側圧とウェブが引張降伏するときの側圧のいずれか小さい方で決まると考えられ, その側圧 σ_{r2} は(1)式で表される。

$$\sigma_{r2} = \min \left(\frac{2t_f^2}{b^2} \sigma_y, \frac{t_w}{b'} \sigma_y \right) \quad (1)$$



(a) 拘束領域 (b) コンクリートの側圧
図-1 十字鉄骨で拘束される領域と作用する側圧

*1 福岡大学 工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)
*2 福岡大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)
*3 福岡大学 工学部建築学科助手 (正会員)
*4 福岡大学大学院 工学研究科博士課程前期

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、 σ_w 、 σ_f :それぞれウェブとフランジの降伏点である。

崎野・孫式ではコンクリートの側圧に乗じる拘束係数を $k_c=23$ と置いている。しかしながら、本論における鉄骨は開断面なので、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。よって、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(2)式で評価することとした。

$${}_c\sigma_{CB2} = {}_c\sigma_B + k' \cdot \sigma_{r2} \quad (2)$$

ここで、 ${}_c\sigma_{CB2}$: 十字鉄骨で拘束されたコンクリート強度、 ${}_c\sigma_B$: シリンダー強度である。 ${}_c\sigma_{CB2}$ は実験結果から(3)式で算出する。

$${}_c\sigma_{CB2} = \frac{{}_cN}{{}_cA} \quad (3)$$

ここで、 ${}_cN$: コンクリートの最大圧縮強度、 ${}_cA$: 十字鉄骨で拘束されたコンクリートの断面積である。

実験耐力から k' と σ_{r2} の関係を求めた結果を図-2に示す。実験から得られた k' と σ_{r2} の関係をプロットで示す。このプロットを近似して、(4)式の回帰曲線が得られた。

$$k' = \frac{2.3}{\sigma_{r2}^{0.65}} \quad (4)$$

同図中には、薄肉鋼管で横補強した場合の十字鉄骨で拘束されたコンクリートの強度を算定する回帰曲線を示している。本論で算定した回帰式は、十字鉄骨の外側にコンクリートがないことから薄肉鋼管で横補強したSC断面の拘束効果より本柱断面の方が小さな値をとることになる。

2.3 最大耐力発揮後の降り勾配

崎野・孫式では、最大耐力発揮後の降り勾配係数 D を(5)式で評価している。

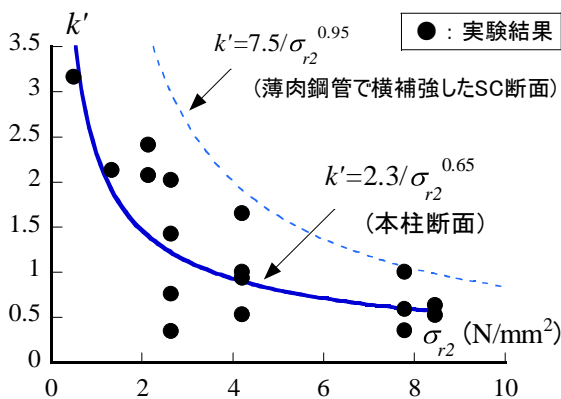


図-2 有効拘束係数の回帰曲線

$$D = 1.50 - 1.68 \times 10^{-3} {}_c\sigma_B + \gamma \sqrt{{}_c\sigma_{re}} \quad (5)$$

ここで式中 γ の値は、鋼管で拘束された場合は0.75を、従来型補強筋(フープ)で拘束された場合は0.50を取ることになっている。本SC断面の十字鉄骨は開断面であり、一樣な拘束効果を受けないことを考慮して、 γ の値を実験挙動に対して降り勾配を合わせることで算出することとした。各試験体の実験挙動と最も整合するように設定した γ の値を表-1に示す。表中の試験体番号は文献3)に対応している。コンクリート強度が上昇すると最大耐力発揮後の耐力低下も大きくなるため、降り勾配の傾きを決定づける γ の値も小さくなっている。

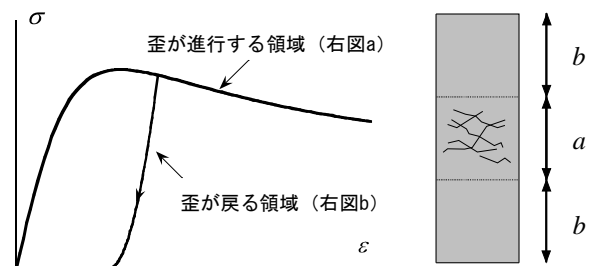
また、実験後の試験体の破壊状況を見ると、試験体の材長方向の中心部200mm区間に損傷が集中していることが確認された。特に高強度コンクリートになるほど、損傷を受けた領域の耐力低下が顕著になるため、200mm区間外のコンクリートの損傷はそれ程進展していなかった。そこで、柱材の損傷が大きい部分のコンクリートの構成則を検討するため、図-3に示すように試験体中心部は圧壊後も破壊が進行するものとし、200mm区間以外の領域は歪が戻るものと考えた。歪の戻りについては渡辺らの除荷モデル⁹⁾を採用した。

2.4 実験挙動と解析結果の比較

中心圧縮実験で得られた実験挙動と解析結果の比較の一例を図-4に示す。中心圧縮実験の詳細は文献3)を参照されたい。図中の「解析結果」は表-1に示すコンクリート強度毎の γ の平均値を用いて求めたものである。「無拘

表-1 実験結果から算定した γ の値

コンクリート強度					
28.4N/mm ²		44.2N/mm ²		82.3N/mm ²	
試験体番号	γ	試験体番号	γ	試験体番号	γ
1	0.25	8	0.05	15	0.05
2	0.16	9	0.05	16	0.04
3	0.12	10	0.05	17	0.04
4	0.16	11	0.05	平均値	0.04
5	0.19	12	0.05		
6	0.25	13	0.06		
7	0.13	14	0.04		
平均値	0.18	平均値	0.05		



(a) 応力-歪関係 (b) 損傷領域
図-3 損傷集中領域の歪を考慮したモデル

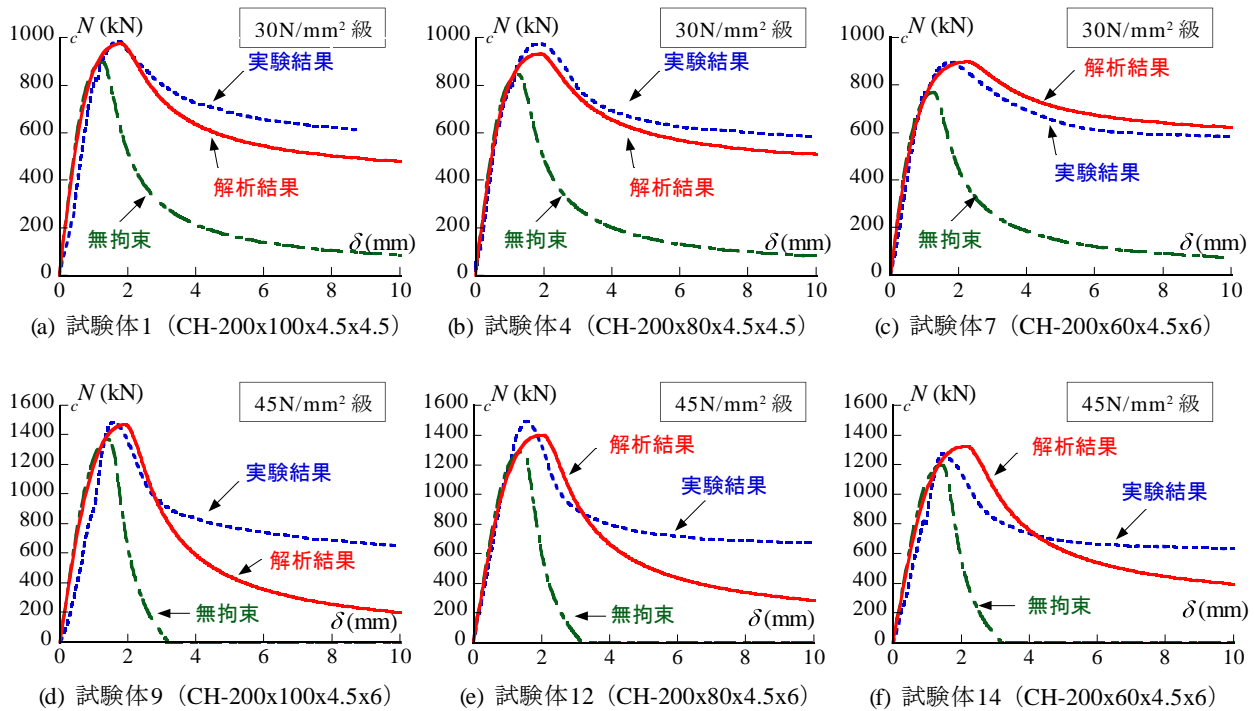


図-4 中心圧縮実験の実験挙動と解析結果の比較

束」は十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮せず求めた解析結果である。コンクリート強度 30N/mm^2 級の試験体は 6mm （軸歪にして 1.0% ）を超える変形まで精度よく追跡できている。また、 45N/mm^2 級の試験体は軸変形が大きくなるほど安全側に評価する傾向があるが、最大耐力発揮時の耐力と変形および軸変形 3mm （軸歪にして 0.5% ）程度までの降り勾配はよく一致している。総じて、十字鉄骨の寸法、コンクリート強度に拘らず、本章で提案した解析手法は実験挙動を概ね精度よく追跡できている。

3. 軸力と曲げせん断を受ける柱材の弾塑性解析

3.1 解析モデル

軸力と曲げせん断を受けるSC柱材の弾塑性解析を行うため、解析モデルを図-5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

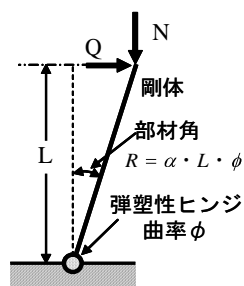


図-5 解析モデル

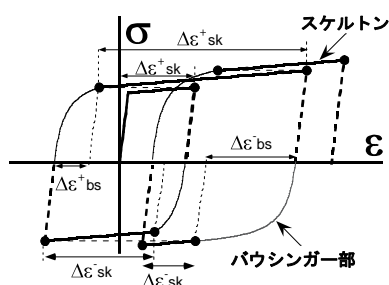


図-6 鋼材の応力-歪関係

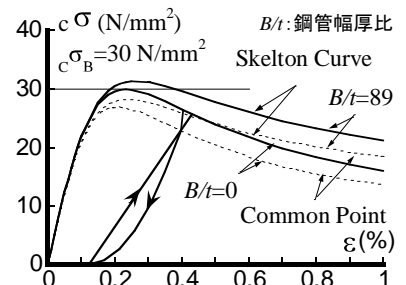


図-7 コンクリートの繰返し則

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)が成立つと仮定している。式(8)中の α はSRC柱材の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⁶⁾。なお、式(7)、(8)を用いることで、断面曲率と部材角の関係においてせん断スパン比の違いによる影響を考慮している。

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

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

ここで、 D ：断面せいである。

3.2 鉄骨の応力-歪関係

鋼材の応力-歪関係は図-6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 $E=2.05 \times 10^5 (\text{N/mm}^2)$ 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は、バウシंगाー部の構成則に加藤らの双曲線のモデル⁷⁾を用い、バウシंगाー部の終点の歪は山田らの提案式⁸⁾を用いた。ここで、図中の $\Delta\varepsilon_{sk}$:鋼材の塑性歪の増分、 $\Delta\varepsilon_{bs}$:鋼材のバウシंगाー部における塑性歪の増分である。

3.3 コンクリートの応力-歪関係

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に、2章で述べた十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮したモデルを用いた。コンクリートの応力-歪関係は崎野・孫モデル⁴⁾を使用している。繰返し則は渡辺らのモデル⁹⁾を用いた(図-7参照)。

3.4 実験結果と解析結果の比較及び考察

著者らが行なった本柱材の曲げせん断実験の試験体と載荷装置を図-8および図-9に示す。載荷方法の詳細および実験結果については文献³⁾を参照されたい。表-2に示す10体の試験体に対して、2章で述べた十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮した弾塑性解析を行

なった。

図-10に実験挙動と解析結果の比較を、表-3に実験結果と解析結果の初期剛性並びに最大曲げ耐力の比較をそれぞれ示す。初期剛性は部材角 $R=0.20\%$ 、 $R=0.50\%$ 時における割線剛性とし、最大曲げ耐力は $P\delta$ 効果を考慮した柱脚位置での抵抗モーメントである。同表よりフランジ幅厚比5.0, 21.7の試験体の初期剛性は概ね一致しているが、フランジ幅厚比8.3の試験体は危険側の評価となっている。また、最大曲げモーメントの対応は何れの試験体においても良好である。

図-10より、軸力比が0.3の試験体では概ね解析結果が実験挙動を最大耐力、耐力低下、除荷剛性を含め高精度で追跡できていることが分かる。一方で、軸力比が0.5もしくは0.6の高軸力比の試験体においては、解析の方が先に軸力保持不能となっているが、コンクリート強度 30N/mm^2 級の同図(b)および 75N/mm^2 級の同図(g), (i)は部材角2.0%までの挙動は追跡できており、総じて安全側

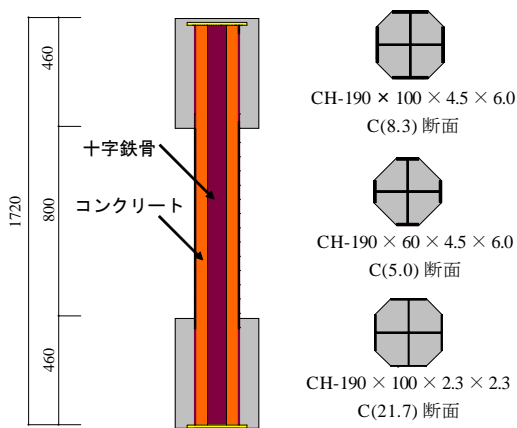


図-8 八角形SC柱試験体³⁾

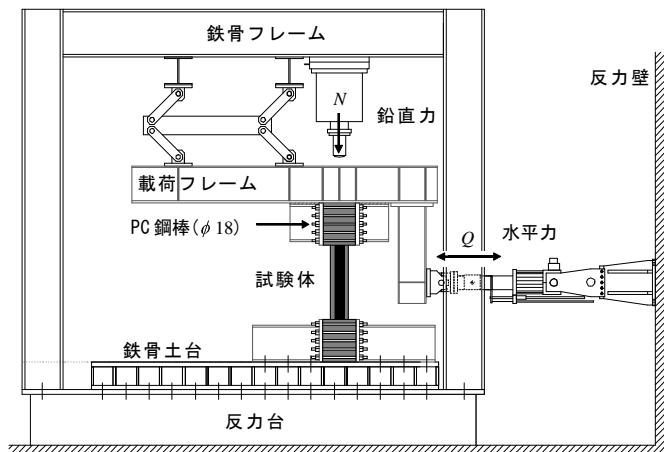


図-9 載荷装置

表-2 試験体一覧

試験体名	十字鉄骨			コンクリート強度 $c\sigma_B$ (N/mm ²)	軸力比 n	載荷軸力 N (kN)
	寸法	フランジ幅厚比	鉄骨比 (%)			
C(8.3)30-0.30	CH-190x100x4.5x6	8.3	12.4	26.7	0.3	647
C(8.3)30-0.60				27.6	0.6	1308
C(5.0)30-0.30	CH-190x60x4.5x6	5.0	10.9	27.6	0.3	522
C(5.0)30-0.60				28.5	0.6	1058
C(21.7)30-0.30	CH-190x100x2.3x2.3	21.7	5.51	27.4	0.3	391
C(8.3)75-0.30	CH-190x100x4.5x6	8.3	12.4	76.4	0.3	1065
C(8.3)75-0.50				74.2	0.5	1744
C(5.0)75-0.30	CH-190x60x4.5x6	5.0	10.9	77.2	0.3	889
C(5.0)75-0.50				75.1	0.5	1455
C(21.7)75-0.30	CH-190x100x2.3x2.3	21.7	5.51	73.5	0.3	810

試験体名凡例
 C(8.3)30-0.30
 ↓
 軸力比
 ↓
 コンクリート強度
 30 : 30N/mm² 級
 75 : 75N/mm² 級
 ↓
 十字鉄骨寸法
 C(8.3): フランジ幅厚比 8.3
 C(5.0): フランジ幅厚比 5.0
 C(21.7): フランジ幅厚比 21.7

鉄骨比 $=A_s/A$, A_s : 十字鉄骨断面積, A : 柱断面積, $A_c = A_s + A_c$, A_c : コンクリート断面積, A_s : 鉄骨断面積, 軸力比 $n = N / N_{sc}$,
 N : 作用軸力, N_{sc} : SC柱断面の圧縮耐力, $N_{sc} = A_c \cdot c\sigma_B + A_s \cdot \sigma_s$, $c\sigma_B$: コンクリートの圧縮強度, σ_s : 鉄骨の降伏点

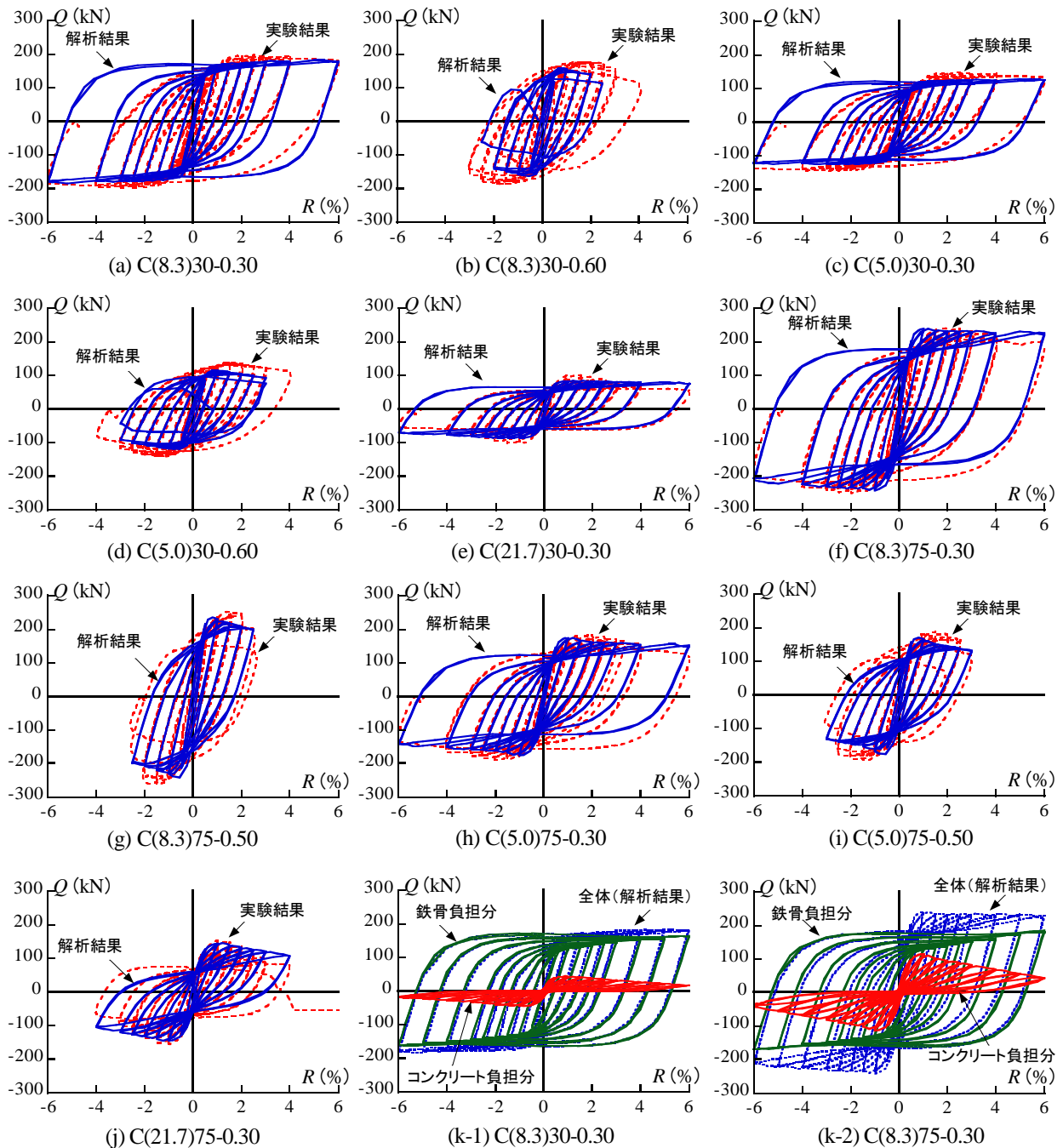
に評価されている。

最大耐力発揮後の降り勾配に着目すると、同図(e), (j)は危険側の評価となっている。これらの試験体はフランジ幅厚比が21.7であるため、実験では早期にフランジの局部座屈が見られ耐力低下につながったが、本解析では鉄骨の座屈を考慮してないため、このような差異が見られたものと推察される。また、コンクリート強度75N/mm²級の試験体では、解析値の方が最大耐力発揮時の変形を早期に発揮する傾向が見られた(同図(f), (g)参照)。これは初期剛性のずれに起因するものと考えられる。

また、同図(a)~(d)は除荷剛性および内蔵鉄骨による

ループの膨らみを危険側に評価している。同図(k)に解析による鉄骨とコンクリートのモーメントの負担割合を示しているが、30N/mm²級のコンクリートを使用すると、殆ど鉄骨で曲げ抵抗していることが分かる。同図(e)やコンクリート強度75N/mm²級の(f)~(i)は概ね内蔵鉄骨によるループの膨らみを追跡できていることを鑑みると、鉄骨とコンクリートの強度差が大きいことが要因の一つと考えられる。

図-11に中心軸縮み挙動の比較を示す。軸力比が0.3の試験体では乖離したものも見られたが、高軸力の試験体はよく追跡できており、概ね傾向は捉えられている。



(k) 解析における鉄骨とコンクリートの負担分

図-10 弾塑性挙動の実験結果と解析結果の比較

表-3 実験挙動と解析結果の比較

試験体名	実験結果			解析結果			実験結果/解析結果		
	exK _{0.2}	exK _{0.5}	exM _{max}	anK _{0.2}	anK _{0.5}	anM _{max}	exK _{0.2}	exK _{0.5}	exM _{max}
	(kN)	(kN)	(kNm)	(kN)	(kN)	(kNm)	anK _{0.2}	anK _{0.5}	anM _{max}
C(8.3)30-0.30	27324	20337	87.9	36042	28118	87.7	0.76	0.72	1.00
C(8.3)30-0.60	25100	15524	83.2	36331	23578	75.0	0.69	0.66	1.11
C(5.0)30-0.30	25003	17239	66.3	25870	19980	63.0	0.97	0.86	1.05
C(5.0)30-0.60	22455	16921	73.0	26127	17156	58.2	0.86	0.99	1.25
C(21.7)30-0.30	25425	15840	43.2	23420	15495	40.7	1.09	1.02	1.06
C(8.3)75-0.30	31948	26932	106.7	54221	39620	116.6	0.59	0.68	0.91
C(8.3)75-0.50	47325	31944	113.2	57507	38608	103.6	0.82	0.83	1.09
C(5.0)75-0.30	33378	24470	80.3	39553	28616	82.4	0.84	0.86	0.97
C(5.0)75-0.50	39873	26790	84.3	41753	28382	73.3	0.95	0.94	1.15
C(21.7)75-0.30	39890	24079	64.8	38948	25194	62.1	1.02	0.96	1.04

K_{0.2}: R=0.2% 時の割線剛性, K_{0.5}: R=0.5% 時の割線剛性, M_{max}: 最大曲げモーメント, ex: 実験結果, an: 解析結果

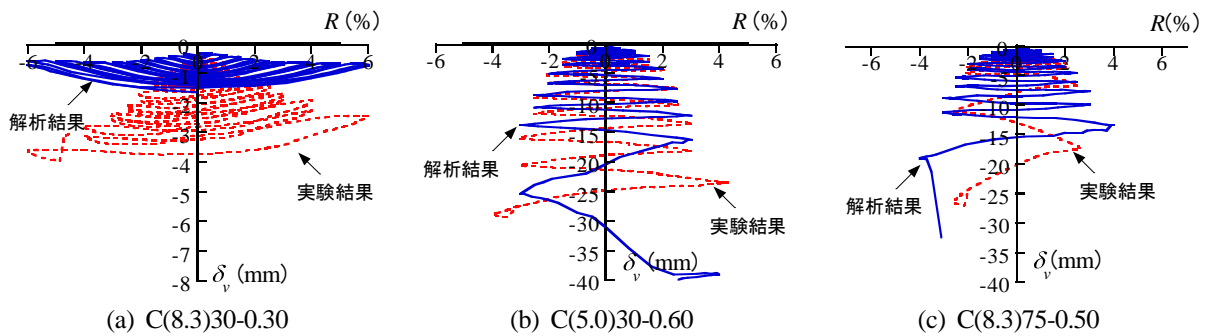


図-11 中心軸縮み挙動の実験結果と解析結果の比較

4. 結論

十字鉄骨とコンクリートで構成された鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性解析を行った結果,以下のことを明らかとした。

- 1) 本論で提案した十字鉄骨で拘束されたコンクリートの拘束効果の評価法を用いて断面解析を行なうと,中心圧縮実験の実験挙動がよく一致することを確認した。
- 2) 十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果を考慮して弾塑性解析を行なうと,初期剛性等の整合性についての検討の余地もあるが,大変形域までの柱材の弾塑性挙動を概ね評価できることを示した。

謝辞

解析の実施にあたり,平成25年度福岡大学堺研究室の布施野頌子氏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

- 1) 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, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.57, pp.527-534, 2011.3
- 2) 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復元力特性-

骨格曲線の定式化-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.673, pp.491-498, 2012.3

- 3) 川原健輔, 倉富洋, 田中照久, 堺純一: 十字鉄骨とコンクリートで構成された合成柱材の弾塑性性状に関する実験的研究, 日本建築学会複合・合成構造の活用に関するシンポジウム, 第10回, 2013.11
- 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, Vol.461, pp.95-104, 1994.7
- 5) 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
- 6) 堺純一, 松井千秋: 鉄骨鉄筋コンクリート柱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, Vol.534, pp.183-190, 2000.8
- 7) 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
- 8) 山田 哲, 今枝知子, 岡田 健: バウシinger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