

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圧縮性状

倉富 洋*1・堺 純一*2・田中 照久*3・河本 裕行*4

要旨: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圧縮性状について調べるために中心圧縮実験を行い、コンクリートの構成則について検討した。中心圧縮実験では、内蔵鉄骨比、コンクリート強度を実験変数にとり、十字鉄骨及び薄肉鋼管によって拘束されたコンクリートの拘束効果に及ぼす影響因子について検討した。実験挙動と解析結果の比較より、本柱断面のコンクリートを十字鉄骨の内側と外側に分割して算定して解析を行うと実験挙動を精度よく評価した。また、内蔵する鉄骨比によってコンクリートの拘束効果の評価法が異なることを示し、鉄骨比に応じた評価法を提案した。

キーワード: 鋼・コンクリート合成柱材, 横補強鋼管, 拘束効果, 高強度コンクリート, 内蔵鉄骨比

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)合成柱材の構造性能を評価するため、弾塑性変形性状について実験的及び解析的に研究を行っている^{1)~3)}。本柱材の特徴として、鋼管に軸力と曲げを負担させないために柱頭柱脚に10mmの隙間を設けていること、また、コンクリートを薄肉鋼管と十字鉄骨で横補強するため、拘束効果によって耐力及び変形性能が向上することから、高軸力下でも優れた耐震性能を示すことが挙げられる。文献2)ではコンクリート強度30N/mm²級を使用した場合の十字鉄骨及び薄肉鋼管で拘束されたコンクリートの拘束効果について検討し、SC柱断面のコンクリートの構成則を明らかとした。

本柱材は、拘束効果によって高強度コンクリート特有

の最大耐力発揮後の耐力低下域における急激な耐力低下を抑えられることから、高強度コンクリートを効果的に使用できるものと考えられる。そこで、本研究では45N/mm²級、90N/mm²級のコンクリート強度を上昇させたSC柱材の圧縮性状を調べるために中心圧縮実験を行い、文献2)で示した解析手法が上述したコンクリート強度使用時にも適用可能であるか検討する。更に、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果は内蔵する鉄骨比によって大きく左右するものと考えられるため、鉄骨比の違いがコンクリートの構成則に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体断面を図-1に示す。柱断面は200x200(mm)で材長600mmである。コンクリート打設後、上部10mmに高

表-1 試験体一覧

試験体名	内蔵十字鉄骨		$c\sigma_B$ (N/mm ²)	薄肉鋼管		試験体名	内蔵十字鉄骨		$c\sigma_B$ (N/mm ²)	薄肉鋼管	
	寸法	鉄骨比(%)		板厚(mm)	幅厚比		寸法	鉄骨比(%)		板厚(mm)	幅厚比
SC(a1)45	CH-160x80x2.3x2.3	3.6	44.2	2.3	87	SC(a1)90	CH-160x80x2.3x2.3	3.6	82.3	2.3	87
SC(a2)45	CH-160x80x4.5x4.5	7.0				SC(a2)90	CH-160x80x4.5x4.5	7.0			
SC(a3)45	CH-160x80x4.5x6	8.1				SC(a3)90	CH-160x80x4.5x6	8.1			
SC(b1)45	CH-160x65x2.3x2.3	3.3				SC(b1)90	CH-160x65x2.3x2.3	3.3			
SC(b2)45	CH-160x65x4.5x6	7.2				SC(b2)90	CH-160x65x4.5x6	7.2			
SC(c1)45	CH-160x50x2.3x2.3	2.9				SC(c1)90	CH-160x50x2.3x2.3	2.9			
SC(c2)45	CH-160x50x4.5x6	6.3				SC(c2)90	CH-160x50x4.5x6	6.3			
SC(d1)45	CH-140x50x2.3x2.3	2.7				SC(d1)90	CH-140x50x2.3x2.3	2.7			
SC(d2)45	CH-140x50x4.5x6	5.8				SC(d2)90	CH-140x50x4.5x6	5.8			
T45	-	-				T90	-	-			
N45	-	-				N90	-	-			

$c\sigma_B$: シリンダー強度, 鉄骨比 = A/A_c , A_c : 鉄骨断面積, A : 柱断面積, 鋼管の幅厚比 = B/t , B : 柱断面幅, t : 鋼管の板厚

- *1 福岡大学 大学院工学研究科博士後期課程・工修 (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 福岡建設専門学校 講師・工修 (正会員)

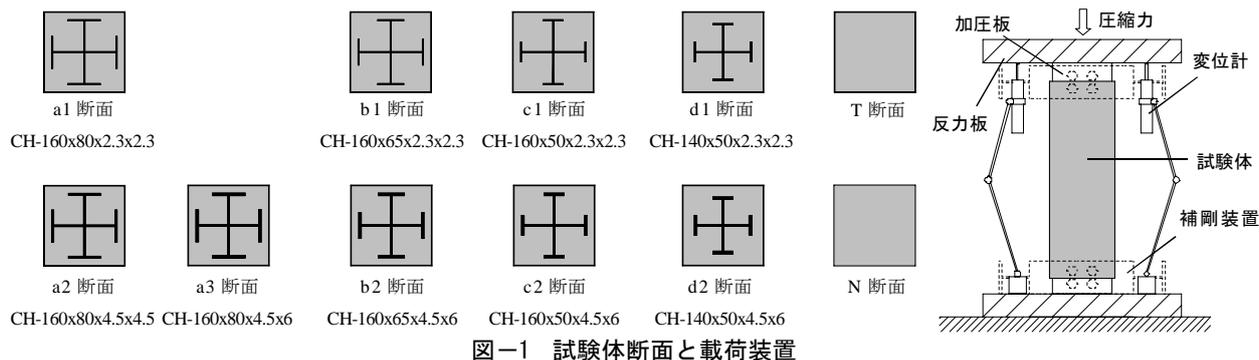


図-1 試験体断面と載荷装置

表-2 鋼材の機械的性質

t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Eln (%)	Y.R.	備考
2.3	285	412	2.08×10^5	39	0.69	十字鉄骨, 薄肉鋼管
4.5	301	435	2.08×10^5	34	0.69	十字鉄骨
6	333	419	2.05×10^5	41	0.79	十字鉄骨

t :板厚 σ_y :降伏点 σ_u :引張強さ E :ヤング係数 Eln :伸び率 Y.R.:降伏比

強度石膏を打設し、加圧面を平滑化した。試験体一覧を表-1示す。鉄骨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、実験変数にコンクリート強度(45N/mm²級, 90N/mm²級)と鉄骨比($=A_s/A_c$, A_s :鉄骨断面積, A_c :柱断面積, 2.7%~8.1%の9種類)をとった。

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十字形鋼を製作している。また、薄肉鋼管は2.3mm厚のSS400材を使用し、断面4隅を溶接することにより製作した。表-2に鋼材の機械的性質を示す。なお、コンクリートは最大骨材径13mmで、縦打ちで打設した。表-1にコンクリートのシリンダー強度を示す。

2.2 載荷方法

載荷装置を図-1に示す。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板を介してコンクリートだけに圧縮力を載荷した。圧縮力は5000kN 万能試験機の荷重計で測定した。

測定は、測定装置を用いて1軸ゲージを鉄骨フランジに2箇所、鋼管中央に2箇所、2軸ゲージを鉄骨ウェブに2箇所ずつ貼付し、鉄骨と鋼管の歪を測定した。軸変形は上下の加圧板間の全体変形600mmを、4箇所を設置した変位計で測定した。

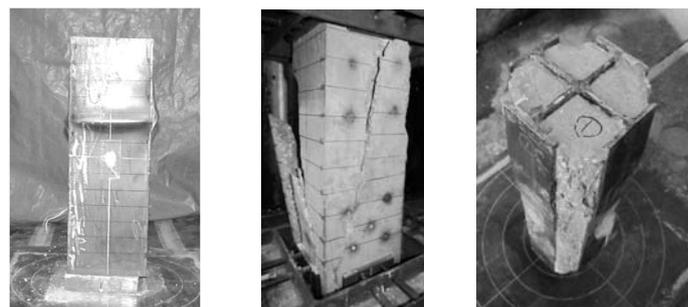
3. 実験結果と考察

3.1 崩壊性状

ほとんどの試験体において、試験体中央部に破壊が集中し、最大耐力発揮後の大変形時で薄肉鋼管の局部座屈或いは溶接部の破断が見られた(写真-1(a)参照)。コンクリートだけの試験体は、破壊時に縦割れが起こり(写真-1(b)参照)、急激な耐力低下が生じた。十字鉄骨を内蔵した試験体は、実験後に薄肉鋼管を切断して内部の状況を確認したところ、十字鉄骨の外側のコンクリートは比較的容易に研ることができたが、内蔵十字鉄骨で拘束されたコンクリートは鈍器を用いても砕くことができず、しっかりと拘束されていた(写真-1(c)参照)。

3.2 荷重-変形関係

実験で得られた荷重-変形関係の一例を図-2に示す。図中の点線で示した全体荷重 N_c は試験機で載荷した荷重-変形関係である。文献2)と同様に、歪ゲージの値から十字鉄骨にも圧縮力が作用していることがわかったため、十字鉄骨の負担軸力 N_s 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た。全ての試験体で十字鉄骨は降伏歪に達したため、降伏後は降伏点を保持するものとして計算した。図中実線で示したコンクリートの負担



(a) 試験体SC(a3)45 (b) 試験体N45 (c) (a)の鋼管切断後

写真-1 実験終了後の写真

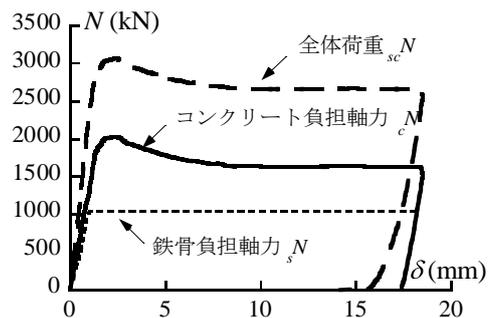


図-2 コンクリートの負担圧縮力の算出方法

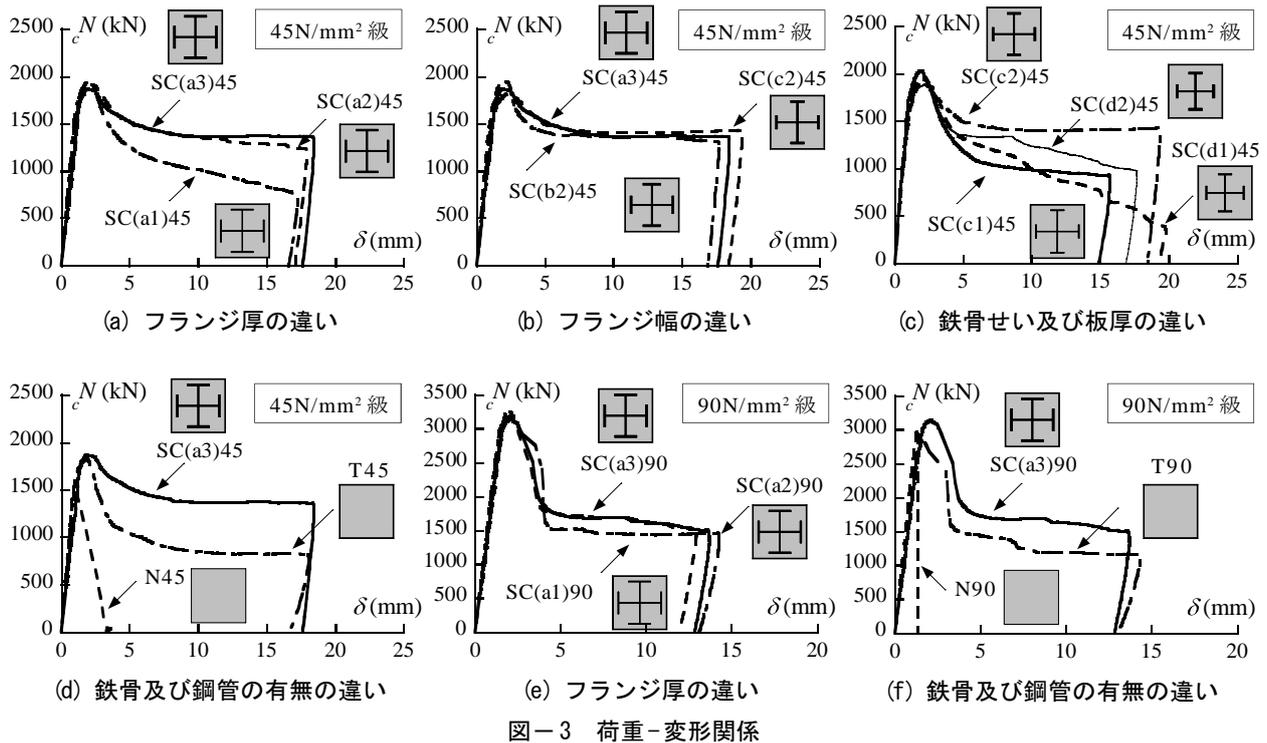


図-3 荷重-変形関係

軸力 N_c は N_{sc} から N_s を差し引くことによって求めている。以降、実験結果の考察や実験挙動と解析結果の比較では、コンクリートのみの負担軸力で比較する。

図-3に各試験体の実験挙動の比較を示す。同図(a)～(d)はコンクリート45N/mm²級、同図(e), (f)は90N/mm²級を使用した結果である。同図(a)ではフランジ厚の影響を調べた比較であり、フランジ厚2.3mm(SC(a1)45)を使用した試験体では最大耐力発揮後に緩やかに耐力が低下していくが、4.5mm厚(SC(a2)45)、6mm厚(SC(a3)45)のフランジを使用すると耐力低下が抑えられ靱性に富んだ挙動を示すことがわかる。同図(b)はフランジ幅の影響を見たものであるが、何れの試験体においても挙動に明確な差異は現れていない。同図(c)は鉄骨せい及びフランジ厚の違いを調べたものである。鉄骨せい160mm、フランジ厚6mmを有するSC(c2)45と比較して、残りの三体は最大耐力発揮後の耐力低下が大きいことがわかる。このことより、フランジ厚4.5mm以上であり、かつ鉄骨せいが160mmあれば、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果が大きく発揮され、変形能力に優れた挙動を示すことがわかる。以上より、十字鉄骨比の違いはコンクリートの拘束効果に影響を及ぼし、特にフランジ厚が厚くなるほど、コンクリートの耐力低下を抑える役割を果たすものと考えられる。

同図(e)に示す90N/mm²級のコンクリートを使用した試験体では、何れの試験体においても最大耐力発揮後に一度急激な耐力低下が見られ、その後耐力を一定値に保持した。これは、十字鉄骨の外側の鋼管で拘束されたコ

ンクリートが圧壊したためだと考えられる。コンクリート強度45N/mm²級を使用した試験体では幅厚比87の鋼管で拘束できるが、90N/mm²級では幅厚比87の鋼管による拘束では十分でないものと考えられる。同図(d)と(f)に鉄骨及び鋼管の有無の違いを比較した図を示す。45N/mm²級、90N/mm²級ともにコンクリートのみの試験体は最大耐力発揮と同時に荷重を保持できなくなったが、鋼管で横補強し、更に鉄骨を内蔵することで、コンクリートの圧縮耐力及び変形能力が向上していることが分かる。

4. 解析計画

4.1 拘束コンクリートの応力-歪関係

薄肉鋼管及び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2)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2)を参照されたい。

図-4に十字鉄骨及び薄肉鋼管によるコンクリートの拘束領域を示す。鋼管で拘束されたコンクリートの圧縮強度は式(1)、式(2)より求められ、十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧縮強度は式(3)、式(4)より算出する。

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

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

$${}_c\sigma_{cB2} = {}_c\sigma_B + k' \cdot \sigma_{r2} \quad (3)$$

$$\sigma_{r2} = \min \left(\frac{2t_f^2}{b'^2} \cdot \sigma_y, \frac{t_w}{b'} \cdot \sigma_y \right) \quad (4)$$

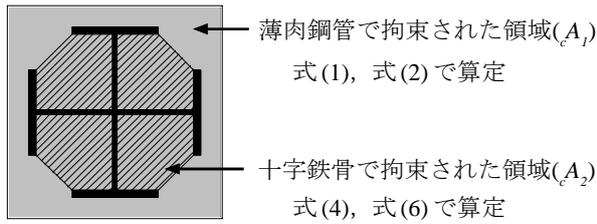


図-4 十字鉄骨で拘束された領域

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、 ${}_c\sigma_B$: 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 : 鋼管の管厚と鋼管の内法幅、 t_f : フランジ厚、 $\sigma_{y,w}$ 、 $\sigma_{y,w}$: それぞれ、フランジとウェブの降伏点、 ${}_c\sigma_{cB2}$: 十字鉄骨で拘束されたコンクリート強度、 σ_{r2} : 鉄骨に作用する側圧、 k' : 有効拘束係数である。

十字鉄骨で拘束されたコンクリート強度 ${}_c\sigma_{cB2}$ は実験結果から求め、式(5)による。

$${}_c\sigma_{cB2} = \frac{{}_cN - {}_cA_1 \cdot {}_c\sigma_{cB}(\epsilon_0)}{{}_cA_2} \quad (5)$$

ここで、 N : 中心圧縮実験のコンクリートの最大圧縮強度、 ϵ_0 : 十字鉄骨内蔵試験体のコンクリートが最大強度を発揮するときの歪、 ${}_c\sigma_{cB}(\epsilon_0)$: 鋼管で拘束されたコンクリートが歪 ϵ_0 に発揮している応力、 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(図-4参照)である。

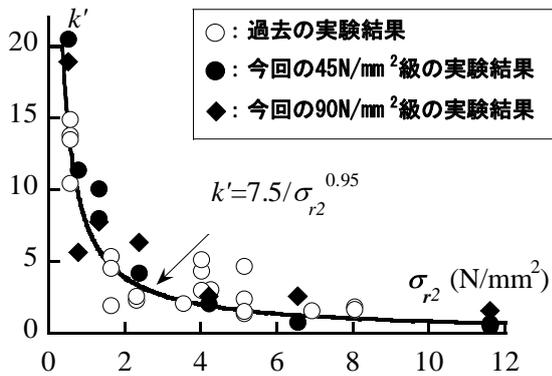
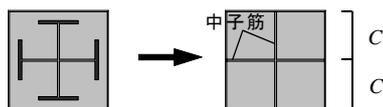


図-5 有効拘束係数の回帰曲線

内蔵する鉄骨比が大きい場合 (case I)



内蔵する鉄骨比が小さい場合 (case II)



図-6 十字鉄骨の外の鋼管で拘束されたコンクリートの拘束効果

実験耐力から k' と σ_{r2} を求めた結果を図-5に示す。これらのプロットを近似して、式(6)の回帰曲線を得た。

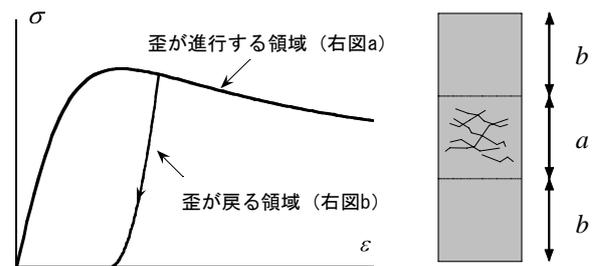
$$k' = \frac{7.5}{\sigma_{r2}^{0.95}} \quad (6)$$

同図に今回得られたプロットを黒塗りで示す。図-5で示した回帰曲線は圧縮耐力時の強度上昇分を算定するためのものであるため、コンクリート強度の違いは拘束係数に影響を与えないことが分かる。本解析手法では、十字鉄骨で拘束されたコンクリートの拘束効果を式(1)を用いずに、式(4)、式(6)で評価する。また、十字鉄骨の外側の鋼管で囲まれたコンクリートは、図-6に示すように内蔵十字鉄骨のウェブが中子筋と同等の役割を果たすものと考え、ウェブの体積を鋼管の体積に加算し、更に式(2)中の支持長さCを半分にするものとして評価する。ここで、本柱材の拘束効果は十字鉄骨比に大きな影響を受けるため、内蔵する鉄骨比によっては拘束効果の評価法が異なることが予想される。即ち、内蔵する鉄骨が大きければ、上述したようにウェブが中子筋の役割を発揮できるものと考えられる(以下、この解析手法をcase Iとする)が、一方で内蔵する鉄骨が小さければ、図-6に示すようにウェブが中子筋の役割を果たすに十分ではないと考えられる(以下、case II)。5章の実験挙動と解析結果の比較では、鉄骨比の違いによるcase Iとcase IIの適用範囲について検討する。

4.2 歪の戻りを考慮した除荷モデル

2.2節で述べ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-7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。軸縮み δ への変換は式(7)で計算している。

$$\delta = \epsilon_a \cdot a + \epsilon_b \cdot (l - a) \quad (7)$$



(a) 応力-歪関係

(b) 損傷領域

図-7 損傷集中領域の歪を考慮したモデル

ここで、 ε_a : 損傷集中領域の歪、 ε_b : 歪が戻るものとした領域の歪、 l : 検長区間長さ、 a : 損傷破壊集中領域の長さである。

5 実験挙動と解析結果の比較

図-8に実験挙動と解析結果の比較を示す。解析結果は4章で示したcase I と case II の結果を載せている。また、鋼管のみでコンクリートを拘束した試験体 (図-8(k),

(u)) は、崎野・孫式で計算した結果を示す。

45N/mm²級のコンクリート強度を使用した場合、フランジ厚6.0mmと2.3mmの試験体を比較すると最大耐力発揮後の耐力低下が、フランジ板厚が厚いほど緩やかになっていることが分かる(例えば、同図(a)と(c)、(f)と(g)の比較)。これは、前述したようにフランジの板厚はコンクリートの拘束効果に大きな影響を及ぼすことから、特に最大耐力発揮後の耐力低下が著しくなる高強度コンク

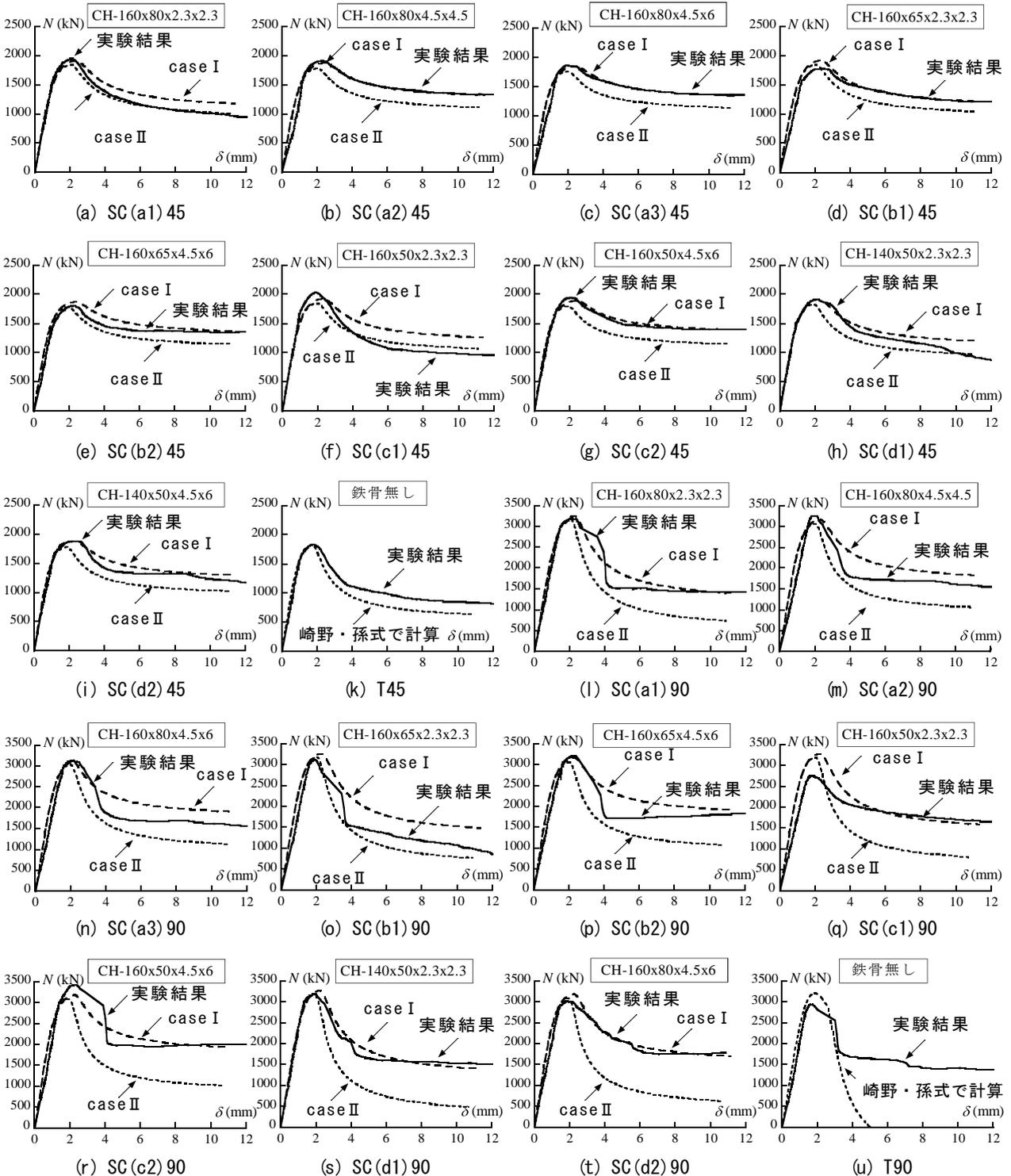


図-8 実験挙動と解析結果の比較

リートを使用する場合には、コンクリートの構成則の評価法を適切に選定すべきであると考えられる。解析結果との比較より、フランジ板厚4.5mm以上を有する試験体はcase I で概ね実験挙動を追跡できていることがわかる(図-8(b), (c), (g)参照)。図-8(e)のフランジ幅65mmの試験体は解析結果case I が実験結果をやや危険側に評価しているが、フランジ幅80mmと50mmを使用した試験体はcase I で精度よく評価できていることから、何らかの理由で実験挙動が低くなったものと考えられる。一方で、2.3mm厚ではフランジによる拘束効果が小さくなるため、ウェブが中子筋の役割を果たさないと考えるcase II で評価することが妥当であるものと考えられる(図-8(a), (d), (f), (h)参照)。また、実験後に鋼管を切断しコンクリートを研ったところ、全ての試験体において十字鉄骨で拘束された八角形領域のコンクリートは鈍器を用いても砕くことができずしっかりと拘束されていたことから、フランジ厚が2.3mmであっても十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果は発揮されているものと考えられる。ここで、同図(i)に着目すると、フランジ厚6.0mmを用いているにも関わらず、鉄骨せいが140mmと小さいため、最大耐力発揮後の耐力低下をcase I では危険側に評価している。図-3(c)で実験結果の比較でも示したように、試験体SC(c2)45(鉄骨せいが160mm)と試験体SC(d2)45(鉄骨せいが140mm)では最大耐力発揮後の耐力低下に違いが見られることが分かる。このことはウェブが中子筋の役割を果たすには鉄骨せいが小さすぎること示唆しており、この場合は6.0mmの厚いフランジを使用してもcase I で評価すると危険側の評価となる。

また、コンクリート強度90N/mm²の場合、ほとんどの試験体で軸変形4mm手前で一度急激な耐力低下を生じている。90N/mm²のような高強度コンクリートになると最大耐力発揮後の耐力低下が大きくなるため、急激に耐力が低下する前の3mm程度の変形(軸歪にして0.5%)まで評価できれば良いものと考え、フランジ厚4.5mm以上を用いた試験体は最大圧縮耐力及びその後の変形において概ねcase I で追跡可能であることが分かる。図-8(l)はcase I, 同図(o)はcase II とよく合っており、同図(o), (p)は下り勾配こそcase I で良好に評価しているが最大圧縮強度は危険側になっている等、実験結果により一概には言えないが、フランジ厚2.3mmを用いた場合は安全側となるcase II で評価することが妥当であるものと考えられる。なお、同図(q)のSC(c1)90の試験体は補剛装置をつけずに载荷したため試験体端部が破壊してしまい、所定の強度が発揮できなかった。

以上より、本SC柱材のコンクリートの構成則として、フランジ厚が4.5mm ($D/t_f=44.4$ 程度, D :断面せい, t_f :フランジ厚)以上を有し、かつ鉄骨せいが160mm ($H/D=0.8$

程度, H :鉄骨せい, D :断面せい)であればcase I で実験挙動を精度よく追跡できる。また、上記以外の鉄骨を内蔵する場合は、case II で評価するものとする。

6. 結論

薄肉鋼管で横補強した鋼・コンクリート合成柱材の中心圧縮実験を行った結果、以下のことを明らかとした。

- 1) コンクリート強度45N/mm²を使用した試験体では、十字鉄骨を内蔵することで、脆性材料であるコンクリートの強度及び変形能力を向上することができる。コンクリート強度90N/mm²では、圧壊後に一度急激な耐力低下が見られた。
- 2) コンクリート強度を上昇させた場合でも、文献2)で提案した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た解析手法で良好に実験挙動を評価した。
- 3) 実験挙動と解析結果の比較より、フランジ厚が4.5mm ($D/t_f=44.4$ 程度, D :断面せい, t_f :フランジ厚)以上を有し、かつ鉄骨せいが160mm ($H/D=0.8$ 程度, H :鉄骨せい, D :断面せい)であればcase I で、上記以外の鉄骨を内蔵する場合はcase II で評価できる。

謝辞

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高岸幸成氏をはじめとする平成24年度福岡大学堺研究室の大学院生及び卒研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

- 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, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.53, pp.383-388, 2007.3
- 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
- 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
- 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