

論文 十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート部材のコンクリートの拘束効果に関する研究

坂田 学*1・塚 純一*2・田中照久*3・檜垣直也*1

要旨:内蔵鉄骨及び補強筋で拘束されたコンクリートの構成則を調べるために、内蔵鉄骨の有無と寸法及び横補強筋比を実験変数とし、かぶりコンクリートを省いた鉄骨鉄筋コンクリート部材の中心圧縮実験を行った。この実験結果よりコンクリートの負担軸力と軸方向変形を求めた。さらに、コンクリートの構成則について実験結果から解析的に検討した結果、十字鉄骨によって拘束されたコンクリートは最大圧縮耐力発揮後の強度低下を抑制する効果があることを示し、鉄骨で囲まれたコンクリート部分とその外で横補強筋で囲まれた部分にそれぞれ分けて、鉄骨及び横補強筋による拘束効果を考えた解析結果が実験挙動をよく評価した。

キーワード: 中心圧縮実験, 軸力-変形関係, 拘束効果, 鉄骨幅厚比, 横補強筋比

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと略記)構造は鋼(以下Sと略記)構造と鉄筋コンクリート(以下RCと略記)構造による合成構造であり、それぞれの特徴を併せ持つため、地震力を受ける時の柱材の挙動は複雑化する。SRC構造を、力学的に合理的な設計が可能となる性能設計で行う上で、使用限界や損傷限界、さらに安全限界など各種の限界状態に対応した、部材の耐震性能を精度良く評価できる設計法や検定法を整備しておく必要がある。

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」¹⁾では、部材の許容曲げ耐力および終局曲げ耐力を算定する際のコンクリート強度は内蔵鉄骨量に応じて低減することになっているが、SRC柱材の構造性能を適切に評価する上で、内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束効果を明らかにしておくことは意義のあるものと考えられる。しかしながら、この拘束効果の定量的な評価法についてはSRC構造では十分に検討されているとはいえない現状である。

特に、十字鉄骨を内蔵させた場合には内蔵鉄骨によるコ

ンクリートの大きな拘束効果が期待できるため、今後、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上で、鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準に規定されている、コンクリートの許容圧縮応力度 f_c' および終局曲げ耐力を算定する際のコンクリート圧縮強度の低減率 r_f の値や、SRC柱の制限軸力についての検討の余地もある。さらに、SRC部材の復元力特性について検討する上でもコンクリートの構成則についての検討が必要であると考えられる。

単一H形鋼を内蔵した場合には、内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束効果は期待できないのに対し、十字鉄骨を内蔵した場合には、かぶりコンクリートの影響で材料強度を用いた計算耐力(累加強度)に対する耐力上昇は見られないが、変形能力の点で拘束効果が大きいことを既往の柱材のせん断曲げ実験で明らかにしている²⁾。

既に、著者らは既往の研究^{3),4)}で内蔵鉄骨の形状の違い(単一H形鋼, 十字鉄骨)がコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べ、コンクリートの構成則の評価法を提案し

表-1 実験条件

番号	内蔵鉄骨寸法		横補強筋	内蔵鉄骨長さ	3.2項の内蔵鉄骨による強度上昇分(N/mm ²)
1	2H-140x60x4.5x4.5	C1	2-D6@50mm	580	10.0
2			2-D6@100mm		11.0
3	2H-140x60x4.5x6	C2	2-D6@50mm		6.6
4			2-D6@100mm		4.4
5	2H-140x60x4.5x9	C3	2-D6@50mm		5.5
6			2-D6@100mm		23.9
7	2H-140x50x4.5x6	C4	2-D6@50mm		7.1
8			2-D6@100mm		13.8
9	なし	RC	2-D6@50mm		1.5
10			2-D6@100mm		0.6

*RCは内蔵鉄骨がないため(7)式より算定

*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)

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材		σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E(N/mm ²)	伸び(%)	降伏比
鋼板	PL-4.5	324	432	2.06	37.9	0.75
	PL-6	280	435	2.06	42.9	0.64
	PL-9	283	432	2.04	46.4	0.66
鉄筋	D6	350	521	1.94	17.8	0.70
	4φ	213	360	1.75	42.1	0.59

σ_y :降伏点 σ_u :引張強度 E:ヤング係数($\times 10^5$)

た。本研究は、内蔵した十字鉄骨の寸法の違いがコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べ、さらに評価法の精度を上げることを目的としている。そこで、十字鉄骨の有無・十字鉄骨寸法の違い・横補強筋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、10体のスタブコラムの中心圧縮実験を行った。本報では、実験の結果とともに、その実験結果を基にしたを用い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ので報告する。

2. 載荷実験

2.1 試験体

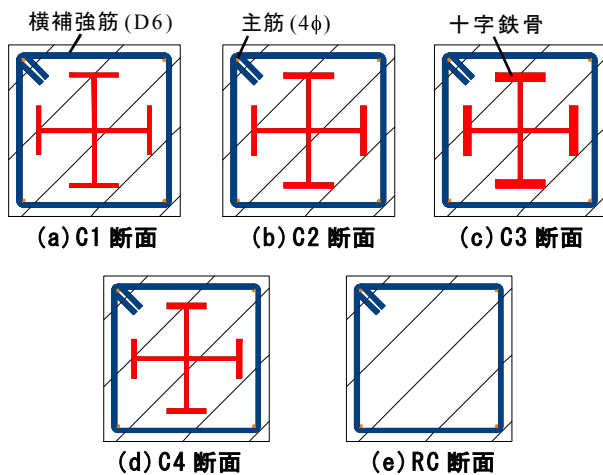


図-1 試験体断面

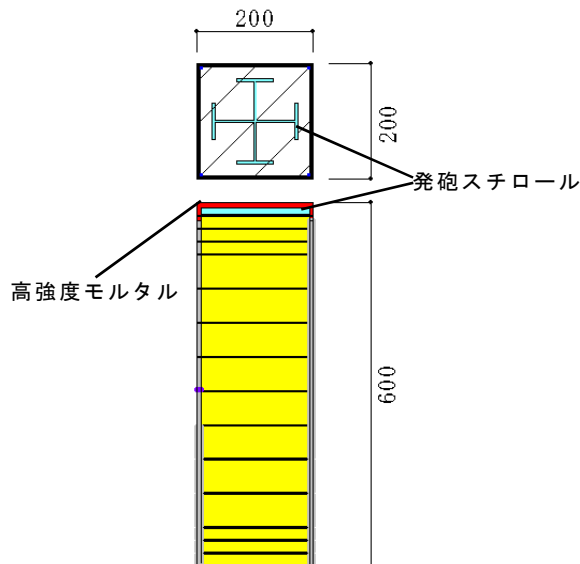


図-2 試験体

図-1に示す一辺が200mmのSRC断面のスタブコラムの試験体をRC断面の試験体を含め計10体製作した。横補強筋で囲まれた部分のみのコンクリートの性状を把握するために、かぶり厚を0としている。横補強筋(D6)を配筋するためのものとして、主筋に4φの鉄筋を使用している。本実験では十字鉄骨に圧縮力を負担させないことを目的に、図-2に示すように鉄骨断面に10mm厚の発泡スチロールを貼付け、その回りに高強度モルタルを打設している。なお、コンクリートは縦打ちとし、空中養生とした。実験変数は表-1及び図-1に示すように、十字鉄骨の有無を含め十字鉄骨の寸法と、フランジとウェブの幅厚比、および横補強筋比(0.64%と0.32%の2種類、それぞれ補強筋間隔が50mmと100mm)である。十字鉄骨は4.5mm、6mm及び9mm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。鋼材の機械的性質を表-2に示す。コンクリートは骨材の最大粒径が13mmの普通コンクリートを用い、打設後35~37日に実験を行った。コンクリートのシリンダー強度は27.0N/mm²であった。

2.2 載荷方法および測定方法

図-3に加力装置を示す。試験体の上下の加圧板を介し

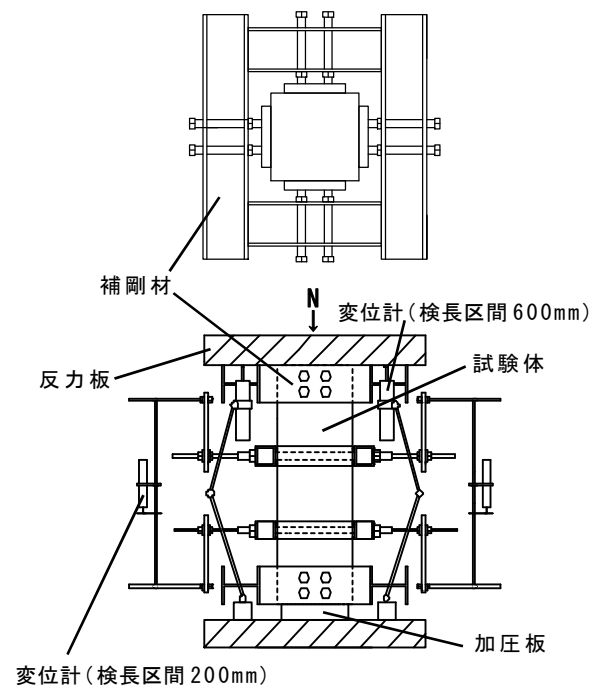


図-3 載荷装置

て圧縮力を載荷している。試験体の端部で局部的に壊れないように上下端部に補剛装置をつけて載荷している。加力はアムスラー型5000kN万能試験機で柱頭ピン、柱脚固定の境界条件で準静的に、単調圧縮軸力を載荷した。荷重は試験機の測定部で測定した。軸縮みの測定は試験体に取り付けた4本の変位計により検長区間600mm間の縮み量を計測した。また、十字鉄骨の応力状態を調べるために、十字鉄骨のウェブとフランジに2軸ゲージを貼付し、材長方向とそれに直交する方向の歪を測定している。

2.3 実験結果とその考察

図-4は、十字鉄骨の負担軸力を除いた圧縮力 N_c と縮み δ の関係を示している。図-4(a)に関しては、全体荷重を点線、十字鉄骨の負担軸力を一点鎖線で示している。鉄骨に圧縮軸力を負担させないようにしていたが、十字鉄骨の歪ゲージの測定値から、十字鉄骨にも軸力が作用していることが分かった。十字鉄骨の負担軸力は、十字鉄骨に貼付した材長方向の歪の値をもとに、十字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-4(a), (b)では、横補強筋間隔の違いが軸力-変形関係に及ぼす影響を示している。横補強筋間隔の違いによって最大圧縮耐力発揮後の耐力低下域に影響が出ることが分かる。

図-4(c), (d)では、十字鉄骨の幅厚比の違いが軸力-変形関係に及ぼす影響を示している。試験体6は最大耐力が大きく出たが、幅厚比の違いによる影響はあまりないと考えられる。

3. コンクリートの構成則に関する検討

解析では文献⁴⁾に従い、コンクリートの損傷が激しい中心部分と補剛装置によって横拘束された部分の二つに分けて、それぞれの区間における歪を考えている。中心部分の区間長さとして断面せい200mmをとった。この区間は最大耐力発揮後も歪が進行すると考えている。横拘束された部分の区間長さとして、検長長さから中心部分の区間長さを除いた長さをとった。この区間は最大耐力発揮後は歪が戻ることを考えている。二つの区間の歪はそれぞれの区間内において均等に分布するものと考え、この仮定に従って解析を行っている。

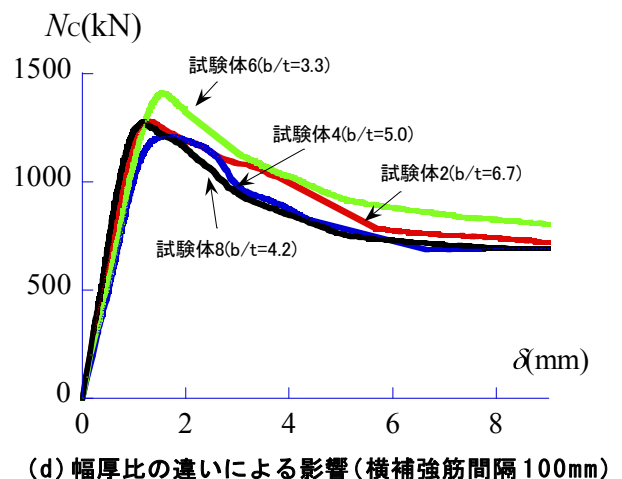
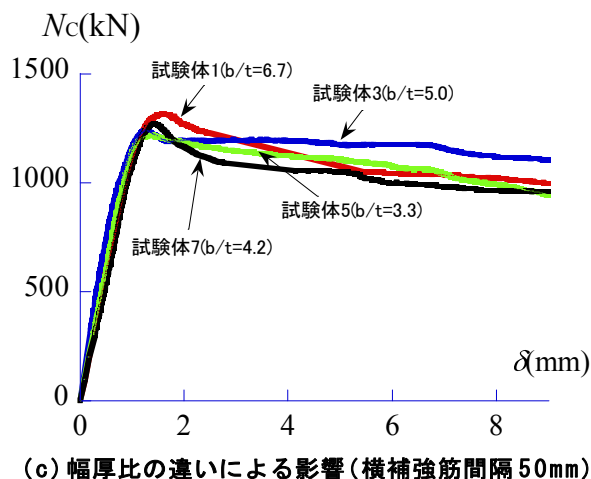
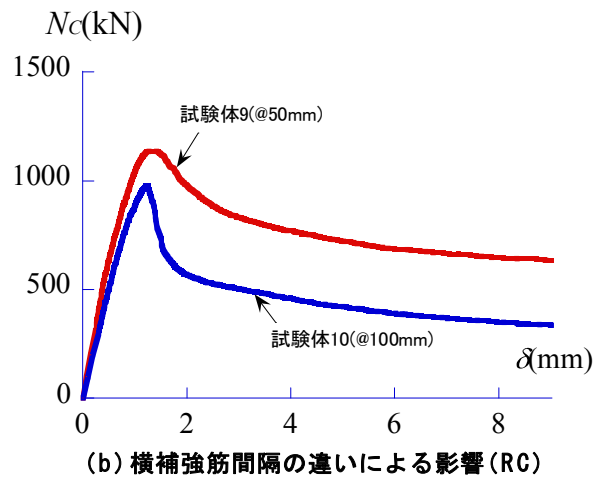
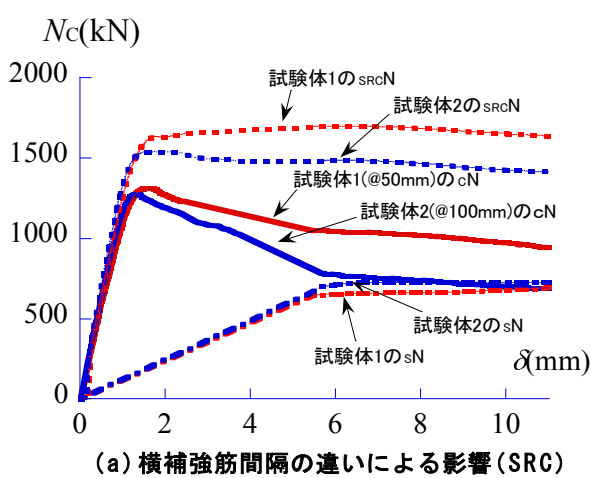


図-4 荷重-変形関係

3.1 既往モデルの適用

横補強筋, 十字鉄骨によって拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係を定量的に評価するために, 直線型横補強鋼材による強度上昇を見込んだ崎野・孫モデル⁵⁾を元に検討を行った。

$$\frac{{}_c\sigma}{{}_c\sigma_{cB}} = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \quad (1)$$

$$X = \varepsilon_c / \varepsilon_{c0}, \quad A = {}_cE \cdot \varepsilon_{c0} / {}_c\sigma_{cB} \quad (2), (3)$$

$$D = 1.50 - 1.71 \cdot 10^{-2} \cdot {}_c\sigma_B + 1.6 \sqrt{{}_c\sigma_{re}} \quad (4)$$

$${}_cE = (0.689 + 0.332 \sqrt{{}_c\sigma_B}) \cdot 10^4 \quad (5)$$

$${}_c\sigma_{cB} = {}_c\sigma_B + k_e \cdot \sigma_{re} \quad (6)$$

$$\sigma_{re} = \frac{1}{2} \rho_h \cdot \sigma_{hs} \cdot \left(\frac{d''}{C} \right) \left(1 - \frac{s}{2D_c} \right) \quad (7)$$

ここで, ${}_c\sigma_B$: シリンダー強度, ${}_c\sigma$, ε_c : コンクリートの応力と歪, ${}_c\sigma_{cB}$, ε_{c0} : 拘束されたコンクリートの強度と強度発揮時の歪, ${}_cE$: コンクリートの始源剛性, D : 応力下降域の形状因子, σ_{re} : 有効側圧因子, k_e : 拘束係数 (本研究では23を採用), 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と有効支持長さ, s , D_c : 横補強材の間隔と外周横補強筋の芯々間距離, である。なお, (4), (5)式の各係数は各応力度をSI単位に換算している。

十字鉄骨の場合, 拘束されたコンクリートは十字鉄骨フランジを押すことにより, その結果ウェブに引張力が働くためウェブを図-5に示す中子筋と同様の効果があると仮定することができる。このことにより, 直交ウェブとフランジがある十字鉄骨の場合, 有効支持長さCを外周横補

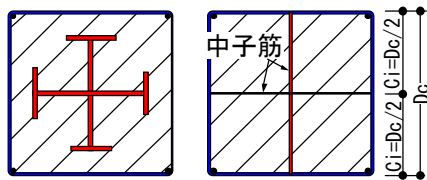


図-5 内蔵鉄骨の拘束効果 (3.1項の解析)

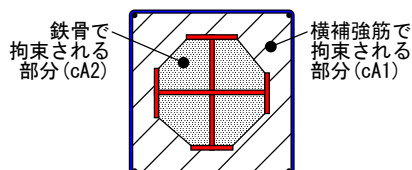


図-6 コンクリートの拘束領域 (3.2項の解析)

強筋間距離Dcの1/2に半減させる効果があると考えられる。さらにウェブに働く引張力でコンクリートが拘束されることを考えると, (7)式の横補強筋の体積比 ρ_h にウェブ体積も含めることが可能と考えられる。そこで, 本検討では, ウェブの体積を含めて(7)式で求めた σ_{re} を用いて(6)式でコンクリート強度 ${}_c\sigma_B$ を求めている。なお, この解析では, 横補強筋で囲まれたコンクリートは十字鉄骨に囲まれた部分も含めて一様に同じ応力が分布するものと仮定している。

3.2 十字鉄骨で拘束されたコンクリートの評価

十字鉄骨で拘束された部分とそれ以外で横補強筋で拘束された部分のコンクリートの拘束状態は異なると考え (図-6), 十字鉄骨により拘束されたコンクリートの圧縮強度 ${}_c\sigma_{cB2}$ を, 下記の仮定に従い検討した。

仮定1: コンクリートは図-6に示す2つの領域でそれぞれ一様な矩形分布の応力状態と考える。

仮定2: 図-6に示す横補強筋で拘束された部分(A_1)のコンクリートの応力-歪関係は, 崎野・孫モデルを用いる。

仮定3: 鉄骨内蔵試験体が最大軸圧縮力を発揮する時に, 十字鉄骨で拘束されたコンクリートが最大圧縮強度を発揮する。

以上の仮定のもと, (8)式で鉄骨で拘束されたコンクリートの強度 ${}_c\sigma_{cB2}$ を算定する (図-7)。

$${}_c\sigma_{cB2} = \frac{{}_{SRC}N_{max} - \frac{{}_{RC}N({}_e\varepsilon_0)}{({}_cA_1 + {}_cA_2)} \cdot {}_cA_1}{{}_cA_2} = {}_c\sigma_B + \Delta\sigma \quad (8)$$

ここで, ${}_{SRC}N_{max}$, ${}_e\varepsilon_0$: 十字鉄骨内蔵試験体のコンクリートの最大軸圧縮力とこの強度を発揮するときの歪, ${}_{RC}N({}_e\varepsilon_0)$: 十字鉄骨を内蔵していない試験体が歪 ${}_e\varepsilon_0$ 時に発揮しているコンクリートの軸圧縮力, ${}_cA_1$, ${}_cA_2$: 横補

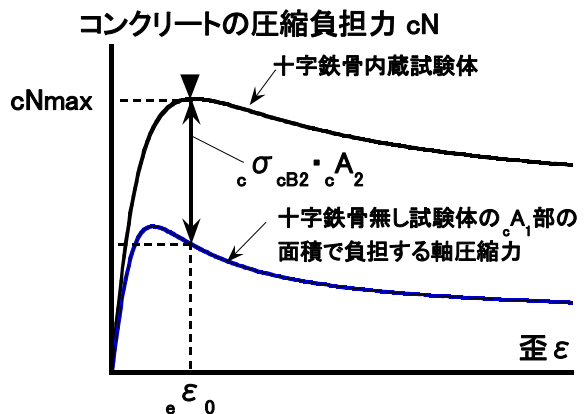


図-7 鉄骨で拘束されたコンクリートの圧縮強度の算定法

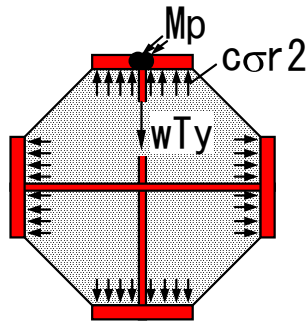


図-8 コンクリートに作用する側圧

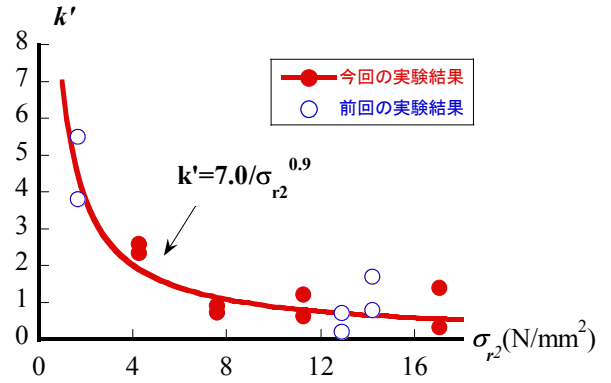


図-9 有効拘束係数

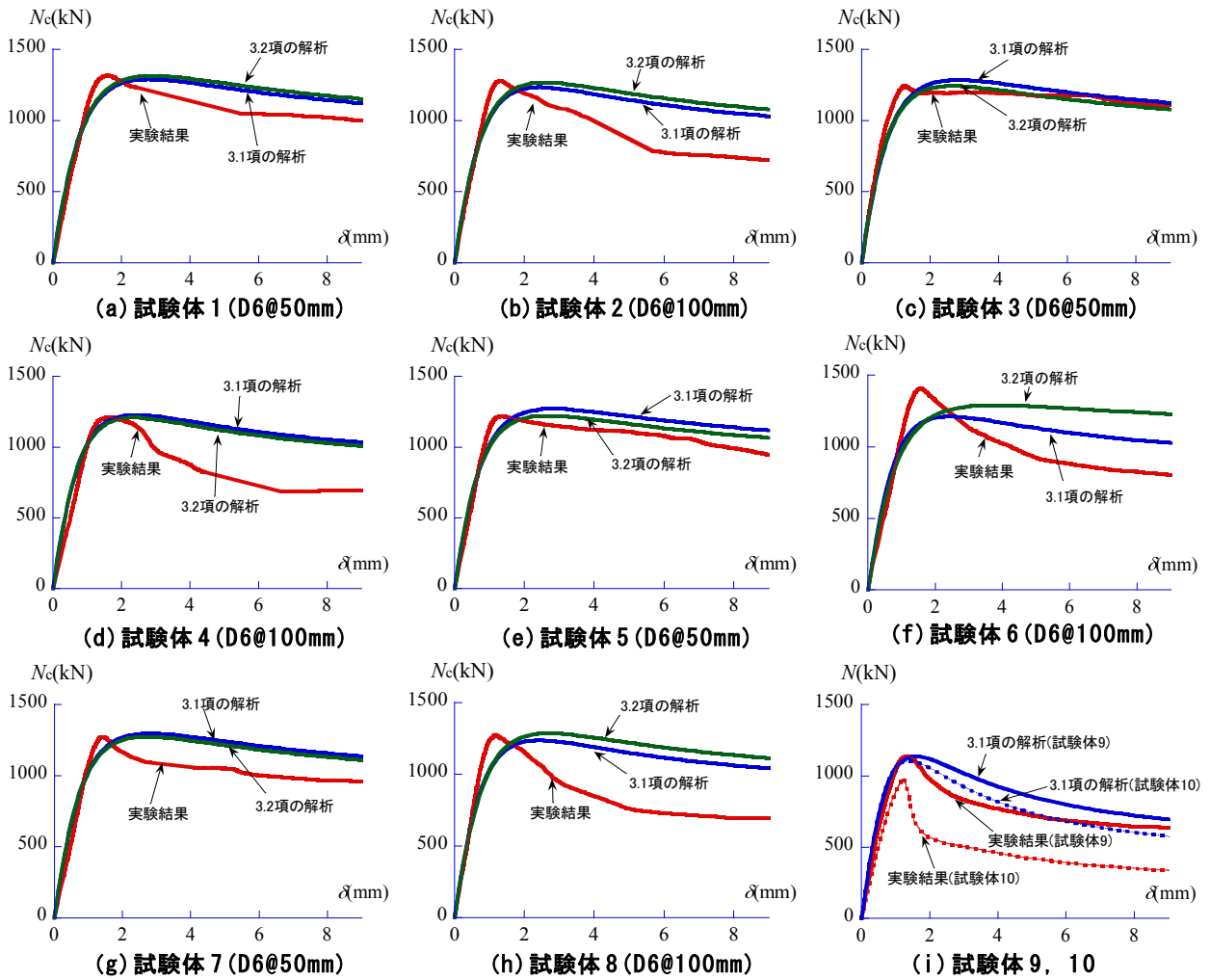


図-10 実験結果と解析結果の比較

強筋で拘束される部分と十字鉄骨で拘束される部分のコンクリートの断面積 (図-6) である。

本検討では、十字鉄骨で拘束されたコンクリートの圧縮強度は、(7)式を用いず(8)式で求め、応力-歪関係は(1)式で求めるものとする。また、十字鉄骨の外のコンクリートについては、十字鉄骨がないものとして(6)、(7)式を用いている。本項で検討したコンクリート強度は試験体個々の実験結果から(8)式を用いて算定している。

また、十字鉄骨によって囲まれたコンクリートは図-8に示すような側圧を受けていると考えられ、コンクリートの側圧によりウェブが引張降伏するか、あるいはフランジの付け根が全塑性モーメントに達するか、どちらか小さい方で決まる側圧 $c\sigma_{r2}$ (9)式がコンクリートに作用すると考える。

$$c\sigma_{r2} = \min\left(\frac{t_w}{b'} \cdot w\sigma_y, \frac{2t_f^2}{b'^2} f\sigma_y\right) \quad (9)$$

ここで、 t_w, t_f : ウェブとフランジの板厚、 b' : フランジ幅 b からウェブ厚さ t_w を除いた長さ、 ${}_w\sigma_y, {}_f\sigma_y$: ウェブとフランジの降伏点である。

コンクリートが十字鉄骨フランジあるいはウェブに面していない領域ではこの側圧 ${}_c\sigma_{r2}$ は期待できないので、**図-8**に示す A_2 の領域内のコンクリートが一様にこの側圧を受けているとは考えられない。そこで、有効拘束係数 k' を用いて、十字鉄骨により拘束されたコンクリートの圧縮強度を(10)式で評価する。ただし、 $k'{}_c\sigma_{r2}$ は(8)式で求めた $\Delta\sigma$ である。実験耐力から k' と ${}_c\sigma_{r2}$ の関係を求めた結果を**図-9**に示す。実験データが少ないが、 k' は実験値より(11)式の回帰曲線が得られた。

$${}_c\sigma_{cB2} = {}_c\sigma_B + k'{}_c\sigma_{r2} \quad (10)$$

$$k' = 7/{}_c\sigma_{r2}^{0.9} \quad (11)$$

本解析では、十字鉄骨で拘束されたコンクリートは(7)式を用いず、(10)、(11)式を用いて、(1)式で応力-歪関係を算定するものとし、十字鉄骨外の部分は(7)式を用いるものとする。十字鉄骨で拘束されたコンクリートのシンダー強度に対する強度上昇を**表-1**に示す。

4. 解析結果の考察

3.で述べた各解析手法でそれぞれ算定したコンクリートの軸力-変形関係を**図-10**に示す。この図で示す軸力はコンクリートが負担している軸力である。3.1項と3.2項の手法での解析結果に大きな差は出ない。本解析結果は、横補強筋間隔が50mm(試験体1,3,5,7,9)の試験体については実験結果の最大圧縮耐力と耐力発揮後の下り勾配をよく評価している。横補強筋間隔が100mm(試験体2,4,6,8,10)の試験体は、実験において鉄骨外のコンクリートの剥落が激しかったことが影響して、最大圧縮耐力発揮後は解析が実験結果を過大評価している。試験体7と8はフランジ幅が小さいため、側圧 ${}_c\sigma_{r2}$ は大きな値と算定されるが、開断面が大きくなるため拘束効果はあまり期待できないと考えられる。本解析と実験挙動の差を見るとその傾向があることが確認される。また、十字鉄骨を内蔵した試験体と内蔵していない試験体の実験結果を比較すると、十字鉄骨を内蔵することによって最大耐力発揮後の耐力低下が抑えられることが分かる。十字鉄骨のない横補強筋間隔が50mmの試験体9は崎野・孫モデルで評価できるが、試

験体10は実験耐力が出ておらず、解析結果と大きく差が出ている結果となっている。

5. 結論

十字鉄骨を内蔵したSRC柱材の中心圧縮実験の結果からコンクリートの構成則を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 横補強筋間隔の違いによって最大圧縮耐力発揮後の耐力低下域に違いが生じ、間隔の狭い試験体の方が最大圧縮耐力発揮後の耐力低下を抑えられるため、強度上昇及び拘束効果が見込まれる。
- 2) 十字鉄骨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はあまりないと考えられる。
- 3) 横補強筋間隔が50mmの試験体については解析結果が実験結果をよく追跡しているが、間隔が100mmの試験体では最大耐力発揮後、解析が実験結果を過大評価する傾向にある。過大評価することに関しては、今後検討する予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 三輪真弘，堺 純一，李 麗：十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート柱材の構造性能について，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1291-1296,2006.7.
- 3) 堺 純一，田中照久：十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート部材のコンクリートの構成則に関する実験的研究，日本建築学会大会梗概集，C-1分冊，pp.1157-1158,2008.9.
- 4) 堺 純一，田中照久，倉富 洋：十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート部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.27，pp.1135-1140,2009.7
- 5) 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，第461号，pp.95-104,1994.7.

謝辞

本研究は試験体の製作及び載荷実験において、福岡大学工学部建築学科技師の平國久雄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、福岡大学材料実験室の本田悟助教の多大な協力を得た。ここに記して、感謝の意を表します。