

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構成則に関する研究

塚 純一*1・田中照久*2・倉富 洋*3

要旨:内蔵鉄骨および帯筋で拘束されたコンクリートの構成則について調べるために、内蔵鉄骨の形状と寸法および帯筋比を実験変数に選び、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解析的に検討を行い、十字鉄骨によって拘束されたコンクリートは大きな歪で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帯筋で囲まれた部分にそれぞれ分けて、鉄骨および帯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することを明らかとした。

キーワード: 中心圧縮実験, 応力-歪関係, 拘束効果, 鉄骨幅厚比

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（以下SRCと略記）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・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、文献1)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 α_c 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が、十字鉄骨を内蔵した場合にはこの効果は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（例えば2）。

本研究では、十字鉄骨を内蔵したSRC部材の内蔵鉄骨によるコンクリートの拘束効果について検討するため、かぶ

りコンクリートを省いたSRC断面のスタブカラムの中心圧縮実験を行った。本報では、実験結果とともに、実験結果を基に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に示す一辺が200mmのSRC断面のスタブカラムの試験体をRC断面の試験体を含め計15体制作した。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。本実験では内蔵鉄骨に圧縮力を負担させないことを目的に、鉄骨表面にグリースを塗布するとともに、試験体の上部の鉄骨断面に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

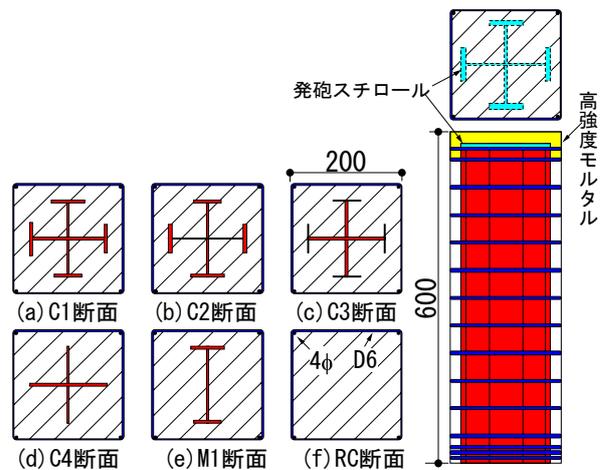


図-1 試験体

*1 福岡大学 工学部建築学科教授 博士（工）（正会員）

*2 福岡大学 工学部建築学科助手 （正会員）

*3 福岡大学 大学院工学研究科 （正会員）

表-1 実験条件

No.	試験体名	内蔵鉄骨の形状および寸法	載荷条件	横補強筋	解析結果 コンクリートの強度上昇(N/mm ²)			備考
					3.3項	3.4項	3.5項	
1	C1-50	2H-140x50x4.5x6 (C1断面)	コンクリートのみ	2-D6@50	9.87	22.43	9.31	標準
2	C1-100			2-D6@100	7.14	0(-5.87)	9.31	
3	C1-50SC			一体押し	2-D6@50	9.87	11.79	
4	M1-50	H-140x50x4.5x6 (M1断面)	コンクリートのみ	2-D6@50	1.54			内蔵鉄骨形状の違いによる影響
5	M1-100			2-D6@100	0.66			
6	M1-50SC			一体押し	2-D6@50	1.54		
7	C2-50	2H-140x50x2.3x6 (C2断面)	コンクリートのみ	2-D6@50	6.58	8.28	9.21	ウェブ厚の違いによる影響
8	C2-100			2-D6@100	4.32	0(-4.95)	9.21	
9	C2-50SC			一体押し	2-D6@50	6.58	3.21	
10	C3-50	2H-140x50x4.5x2.3 (C3断面)	コンクリートのみ	2-D6@50	10.27	9.09	7.40	フランジ幅の違いによる影響
11	C3-100			2-D6@100	7.48	6.33	7.40	
12	C3-50SC			一体押し	2-D6@50	10.27	17.96	
13	C4-50	2PL-140x4.5(C4)	コンクリートのみ	2-D6@50	1.54			フランジ無し
14	N-50	無	コンクリートのみ	2-D6@50	1.54	5.75	1.54	内蔵鉄骨無し
15	N-100			2-D6@100	0.66	4.32	0.66	

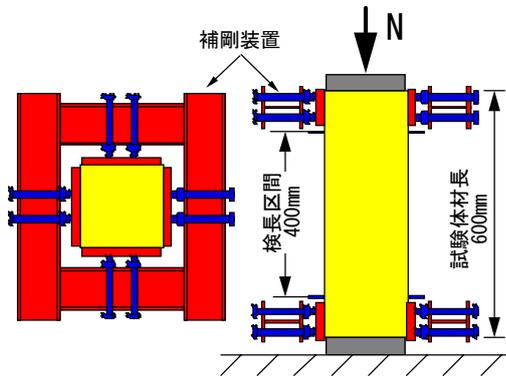


図-2 載荷装置

縦打ちとし、空中養生とした。実験変数は表-1および図-1に示すように、鉄骨の有無を含め内蔵鉄骨の形状(十字鉄骨と単一H形鋼)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)である。十字鉄骨を内蔵したSRC断面のフランジとウェブの幅厚比は、図-1に示すように、幅、せいを一定とし、フランジ厚およびウェブ厚を変化させることで調整している。さらに、鉄骨とコンクリートを一体的に押した場合の挙動とコンクリートのみを圧縮した時の挙動の違いを見るために、鉄骨上部部に発泡スチロールを貼付していない試験体も製作している。

内蔵鉄骨は6mm, 4.5mmおよび2.3mmの鋼板より切り出し

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材	σ_y	σ_u	E	伸び(%)	降伏比	
鋼板	PL 2.3	322	435	2.08	39.1	0.74
	PL 4.5	379	469	2.07	31.0	0.81
	PL 6	407	473	2.06	31.0	0.86
鉄筋	D6	215	312	2.05	46.7	0.69
	4φ	382	570	2.05	13.5	0.67

σ_y, σ_u : それぞれ降伏点および引張強度(N/mm²)

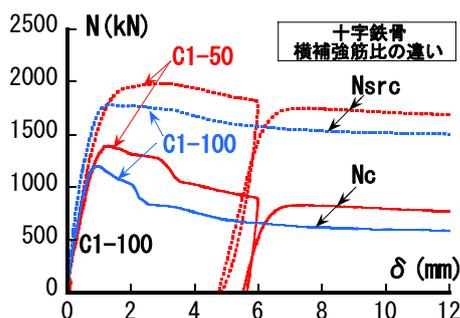
E : ヤング係数($\times 10^5$)(N/mm²)

(鋼板はJIS-5号試験片の引張試験の結果である)

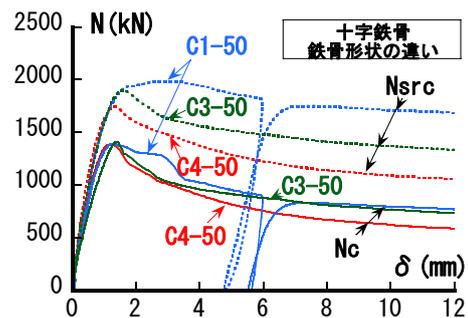
た鋼片を溶接して形鋼を製作している。なお、2.3mm鋼板の溶接はTIG溶接で行った。鋼材の機械的性質を表-2に示す。コンクリートは骨材の最大粒径が15mmで早強セメントを用い、打設後28~30日に実験を行った。実験時のシリンダー圧縮強度 σ_b の平均は30.8N/mm²であった。

2.2 載荷方法および測定方法

図-2に加力装置を示す。試験体の上下の加圧版を介し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。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400mm間の縮み量および鉄骨ウェブに貼付した2軸ゲージにより材長方向とそれに直交する方向の歪を測定している。



(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-3 荷重-変形関係

2.3 実験結果とその考察

図-3に実験の結果得られた荷重軸力と縮みの関係の一例を示す。図中の点線は試験機で荷重Nと試験体の検長区間の縮み δ の関係を示している。実線は、荷重荷重Nから鉄骨負担軸力を差し引いたコンクリート断面の負担圧縮力 N_c である。コンクリートのみを圧縮する試験体では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、鉄骨全断面が一様に歪むものとして、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-3(a)はC1-50とC1-100試験体の比較を示している。この図より、横補強筋の間隔の違いはコンクリートの最大圧縮耐力の大きさに影響するが、最大耐力発揮後の耐力低下にはあまり影響を及ぼさないことがわかる。図-3(b)はC1-50、C3-50とC4-50の試験体の比較を示している。この図より、C1断面に対して、フランジの幅厚比を大きくしたり、フランジをつけない場合、コンクリートの最大圧縮強度はあまり変わらないが、最大耐力発揮後の耐力低下域で違いが見られる。図には示していないが、コンクリートのみを荷重する場合と一体押しの場合の挙動については有意差はほとんど認められなかった。

3. コンクリートの構成則に関する検討

3.1 コンクリートの応力-歪関係のモデル

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⁴⁾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(文献4)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。

3.2 RC及び単一H形鋼内蔵SRCのコンクリートの構成則

試験体の破壊状況を見ると、試験体の材長方向の中心部に損傷が集中しており、その領域の材長長さは全ての試験体で断面せいとほぼ同じ200mm程度であった。部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-4に示すように歪が進行する損傷集中部と、歪の戻りを考慮したそれ以外の部分に分け試験体の軸縮み δ を算定している。ここで、図-4中の損傷集中部の長さを a とし、歪の戻りは渡辺らの除荷モデル⁵⁾を用いた。

$$\delta = \varepsilon_D \cdot a + \varepsilon_N \cdot (l - a) \quad (8)$$

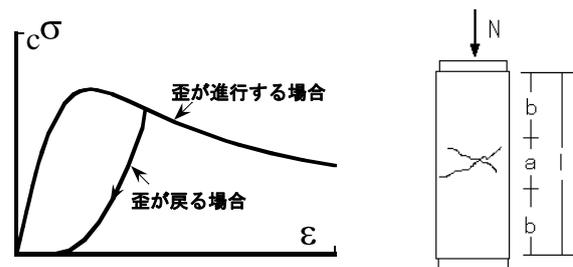


図-4 解析によるコンクリートの耐力発揮後の挙動

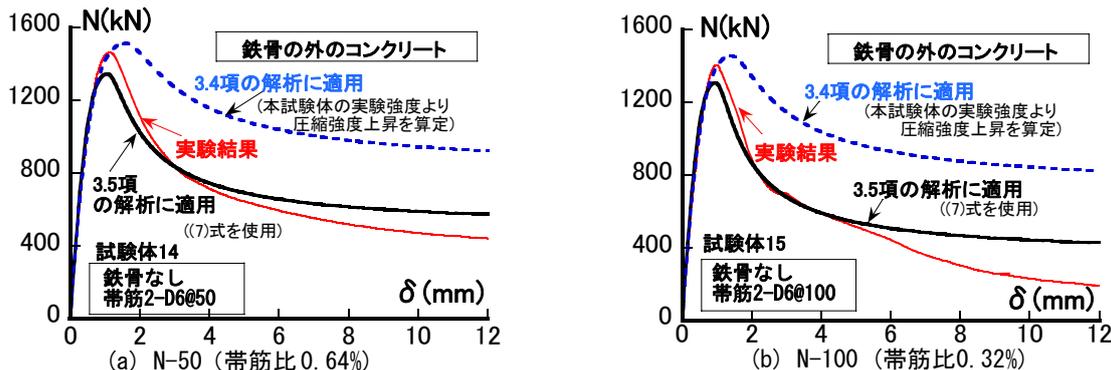


図-5 RC試験体の実験挙動と解析の比較

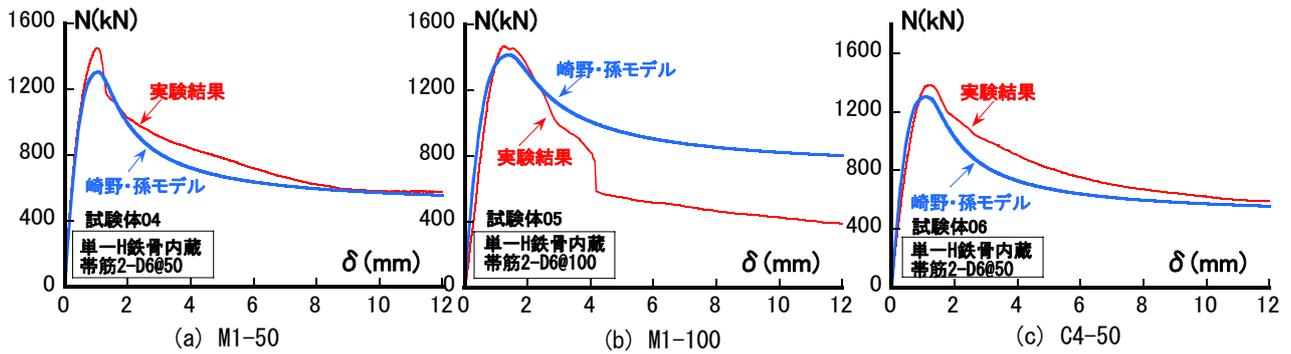


図-6 単一H形鋼あるいは鉄骨フランジが無いSRC試験体のコンクリートの軸力-変形関係

ここで、 ε_D 、 ε_N ：それぞれ、損傷集中領域とそれ以外の領域の歪、 l 、 a ：それぞれ、検長区間長さと損傷集中領域の材長（200mmとしている）である。

図-5に鉄骨を内蔵していない試験体の実験結果と解析結果の比較を示す。(7)式でコンクリートの圧縮強度を評価した崎野・孫モデルを用いて計算した解析結果は実験挙動をよく評価している。3.4項で後述するように(7)式を用いず、実験耐力よりコンクリートの強度上昇分を算出した結果を用いると、解析結果は実験挙動を危険側に評価する結果となっている。

図-6に単一H形鋼あるいはフランジ無し十字鉄骨を内蔵したSRC断面のコンクリートの負担軸力と軸縮みの関係を示している。それぞれのグラフで実験挙動と、鉄骨による拘束効果を考慮していない崎野・孫モデルの比較しているが、本モデルで実験挙動をおおむね評価していることから、単一H形鋼を内蔵しても鉄骨による拘束効果は期待できないことがわかる。

3.3 十字鉄骨内蔵SRCのコンクリートの構成則の検討1

十字鉄骨の場合、拘束されたコンクリートは鉄骨フランジを押し出すことにより、その結果ウェブに引張力が働くためウェブを図-7に示す中子筋と同様の効果があると捉えることができる。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_i を外周横補筋間距離 D_c の1/2に半減させる効果があると考えられる。

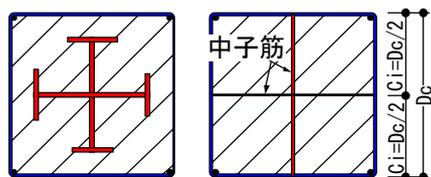


図-7 内蔵鉄骨の拘束効果 (3.3項の解析)

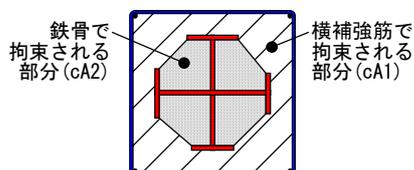


図-8 コンクリートの拘束領域 (3.4.3.5項の解析)

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1では、ウェブの体積を含めて(7)式で求めた σ_{re} を用いて(1)式でコンクリートの応力-歪関係を求めている。なお、この解析では、横補筋で囲ま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同じ応力が分布するものと考えている。シリンダー強度に対するコンクリート強度の上昇分を表-1に示す。

3.4 十字鉄骨内蔵SRCのコンクリートの構成則の検討2

内蔵鉄骨で拘束された部分とそれ以外で横補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-8参照)、内蔵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-8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-8に示す横補筋で拘束された部分(cA1)のコンクリートの応力-歪関係は、内蔵鉄骨がない試験体の横補筋で拘束されたコンクリートの実験結果(応力-歪関係)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、(9)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-9参照)。

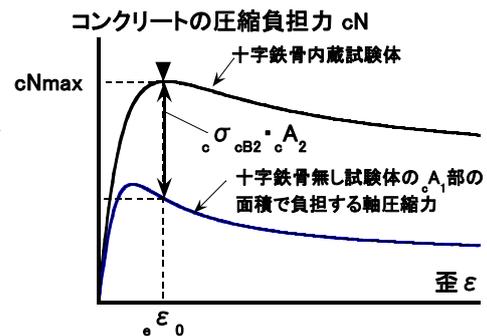


図-9 鉄骨による拘束コンクリートの圧縮強度の算定法

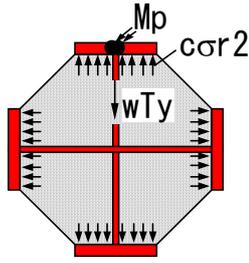


図-10 コンクリートに作用する側圧

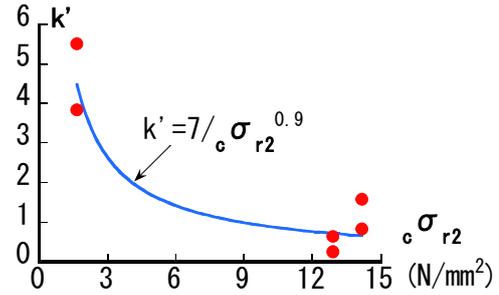


図-11 有効拘束係数

$${}_c\sigma_{cB2} = \frac{{}_{SRC}N_{max} - \frac{{}_{RC}N(\epsilon_0)}{({}_cA_1 + {}_cA_2)} \cdot {}_cA_1}{{}_cA_2} = {}_c\sigma_B + \Delta\sigma \quad (9)$$

ここで、 ${}_{SRC}N_{max}$ 、 ϵ_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發揮するときの歪、 ${}_{RC}N(\epsilon_0)$ ：十字鉄骨を内蔵していない試験体が歪 ϵ_0 時に發揮しているコンクリートの軸圧縮力、 ${}_cA_1$ 、 ${}_cA_2$ ：横補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-8参照）、である。

本検討2では、内蔵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(9)式で求め、応力-歪関係は(1)式で求めるものとする。また、鉄骨の外のコンクリートについては、(7)式を用いず、鉄骨を内蔵していない試験体のコンクリートの最大圧縮強度を用いて、(1)式で求められるコンクリートの応力-歪関係で求めるものとする。十字鉄骨で拘束されたコンクリートのシリンダー強度に対する強度上昇を表-1に示す。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(9)式を用いて算定しているため、表-1に示す載荷条件の違いで拘束コンクリートの算定強度が異なる結果となっているが、鉄骨とコンクリートの一体押しの場合の方がコンクリート強度の上昇が低い傾向にある。

3.5 十字鉄骨内蔵SRCのコンクリートの構成則の検討3

内蔵鉄骨によって囲まれたコンクリートは図-10に示すような側圧を受けていると考えられる。つまり、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 ${}_c\sigma_{r2}$ （(10)式）がコンクリートに作用すると考える。

$${}_c\sigma_{r2} = \min\left(\frac{t_w}{b'} \cdot {}_w\sigma_y, \frac{2t_f^2}{b'^2} f\sigma_y\right) \quad (10)$$

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。

コンクリートが内蔵鉄骨フランジあるいはウェブに面し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 ${}_cA_2$ の領域内のコンクリートが一樣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、鉄骨により拘束されたコンクリートの圧縮強度を(11)式で評価する。ただし、 $k'{}_c\sigma_{r2}$ は3.4項の解析で求めた $\Delta\sigma$ 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-11に示す。実験データが少ないが、 k' は実験値より(12)式の回帰曲線が得られた。この回帰曲線に関しては今後実験データを増やしてさらに検討していく予定である。

$${}_c\sigma_{cB2} = {}_c\sigma_B + k'{}_c\sigma_{r2} \quad (11)$$

$$k' = \frac{7.0}{{}_c\sigma_{r2}^{0.9}} \quad (12)$$

本解析では、鉄骨で拘束されたコンクリートは(7)式を用いず、(11)、(12)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(7)式を用いるものとする。鉄骨で拘束されたコンクリートのシリ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と変形の関係を図-12に示す。この図で、実験結果の曲線はコンクリートが負担している軸力である。これらの結果より、3.3項の解析手法（検討1）では実験結果を過大評価する傾向にあることがわかる。3.4項の解析（検討2）では実験耐力をほぼよく評価している試験体が多いが、下り勾配の領域で実験結果を過大評価する傾向にある。3.5項の解析結果（検討3）は最大耐力を多少安全側に評価する傾向にあるが、耐力低下領域において中心圧縮の実験挙動を精度良く評価していると云える。図中に内蔵鉄骨なしの試験体の実験結果を併せて示しているが、十字鉄骨を内蔵した試験体と比較してみると、最大強度の点では、鉄骨の効果はあまり見られないが、歪が圧壊歪を超えて、さらに大きくなると、コンクリートの耐

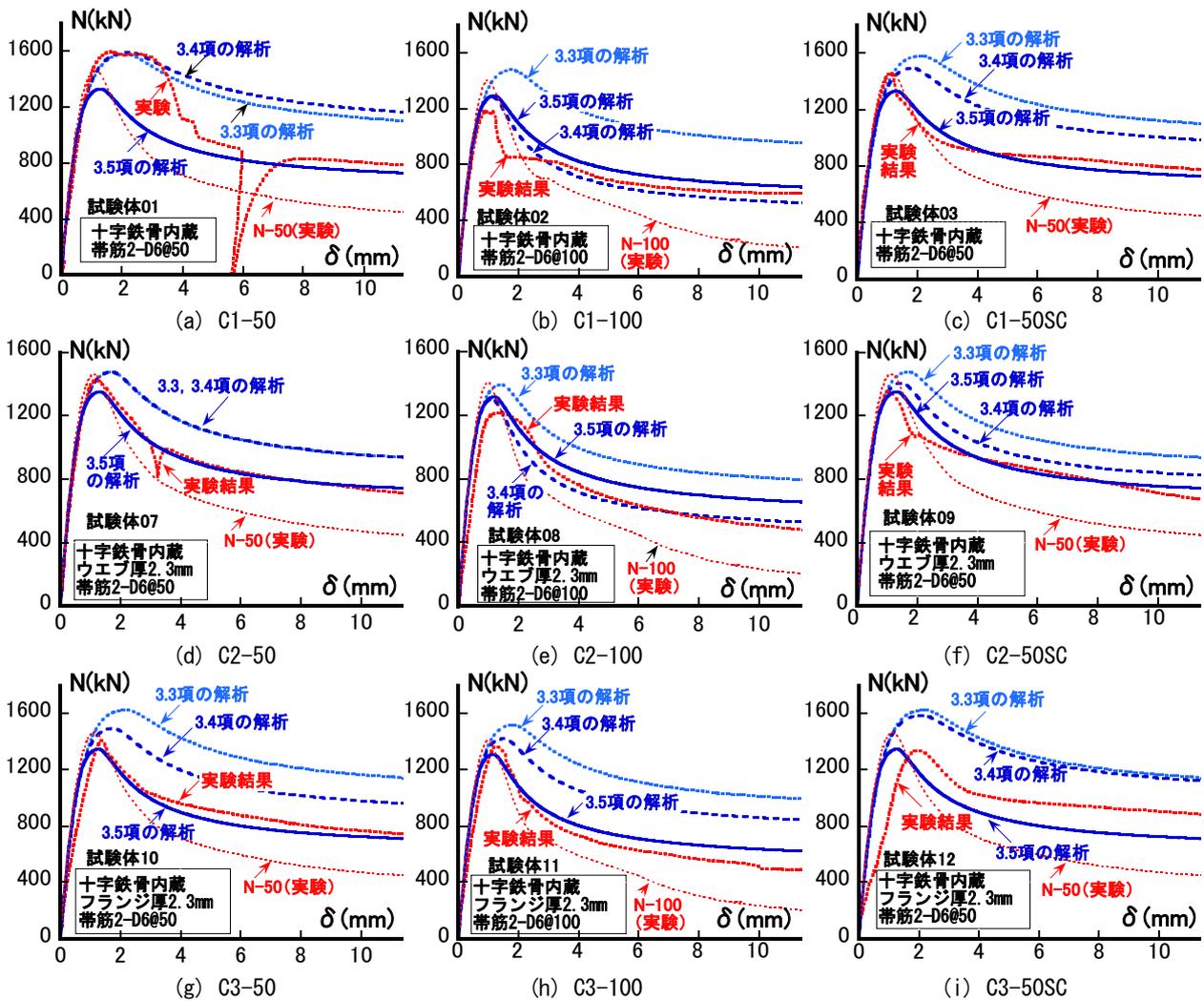


図-12 十字鉄骨を内蔵したSRC試験体のコンクリートの軸力-変形関係

力低下を抑える効果があることがわかる。

5. 結論

十字鉄骨を内蔵したSRC部材の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結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 十字鉄骨によってコンクリートは拘束され、圧壊歪後のコンクリートの耐力低下を抑制する効果がある。
- 2) 十字鉄骨を内蔵したSRC柱材のコンクリートの構成則は鉄骨で拘束される部分と横補強筋で拘束される部分に分けて、3.5項に示した解析手法で評価することで実験挙動を精度よく評価できる。

なお、軸力と曲げを受ける柱材への適用についての検討および鋼材とコンクリートのポアソン比の違いによる影響についての検討は今後の課題である。

謝辞

本研究は平成19年度日本鉄鋼連盟「鋼とコンクリートの複合化WG」(主査:南宏一)の補助を受けて行った。ま

た、本研究は平成20年度卒研生の吉川祐亮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) 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) 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.
- 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，日本建築学会大会梗概集，構造II，B，pp.505-506，1991.9.