

(12) 薄肉鋼管で横補強した 鉄骨コンクリート柱材の コンクリートの構成則に関する研究

大坪 朋未¹・川原 健輔²・倉富 洋³・田中 照久⁴・堺 純一⁵

¹正会員 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail: td134002@cis.fukuoka-u.ac.jp

²正会員 福岡大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail: td124005@cis.fukuoka-u.ac.jp

³正会員 福岡大学助教 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail: ykuratomi@fukuoka-u.ac.jp

⁴正会員 福岡大学助手 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail: sttanaka@fukuoka-u.ac.jp

⁵正会員 福岡大学教授 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈8-19-1)

E-mail: sakai.j@fukuoka-u.ac.jp

鉄骨鉄筋コンクリート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、主筋およびせん断補強筋を除き、薄肉鋼管で横補強した鉄骨コンクリート柱材を提案している。本研究では、60N/mm²級、90N/mm²級の高強度コンクリートを対象とし、中心圧縮実験を行い、十字鉄骨の寸法の違いが本合成柱材のコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べる。十字鉄骨のせい、幅、フランジとウェブの幅厚比とコンクリート強度を実験変数にとり、影響因子を明らかにした。また、実験結果をもとに、十字鉄骨と薄肉鋼管で横補強したコンクリートの構成則について検討した結果、本研究で提案する解析手法で評価できることを示す。

Key Words : thin steel, confined effect, axial compressive test, high strength concrete

1. 序論

鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRCと略記)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、SRC部材から主筋およびせん断補強筋を除き、幅厚比100程度の薄肉鋼管で横補強した鉄骨コンクリート柱材(以下SC柱材と略記)を提案している¹⁾。本柱材はコンクリートが十字鉄骨と薄肉鋼管により横拘束されており、コンクリートの最大耐力発揮後の耐力低下を抑えられるため、部材は優れた構造性能を発揮できる特徴を有する。

本研究では60N/mm²級、90N/mm²級の高強度コンクリートを対象とし、十字鉄骨の寸法の違いが本合成柱材のコンクリートの拘束効果に及ぼす影響を調べることを目的とする。

2. 実験概要

(1) 試験体

試験体を計22体制作し、中心圧縮実験を行った。試験体の断面寸法はBxD=200x200mm(図-1)とし、材長は600mmとした。表-1に試験体一覧を示す。実験変数は、十字鉄骨のせい、幅、フランジとウェブの幅厚比およびコンクリート強度である。

薄肉鋼管は、2.3mm厚の鋼板を用い、四隅を溶接して鋼管を製作した。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、4.5mm厚、2.3mm厚の鋼板を用い、溶接により形鋼を製作している。表-1にコンクリートのシリンドラ強度、表-2に使用材料の機械的性質を示す。

表-1 試験体一覧

No.	試験体	内蔵十字鉄骨				シリンダー強度	薄肉鋼管			
		断面寸法(mm)	鉄骨比(%)	幅厚比		$c\sigma_B$ (N/mm ²)	板厚(mm)	幅厚比		
				フランジ	ウェブ					
1	SC-11-30-44-87	CH-140×50×2.3×2.3	2.69	10.9	30.4	44.2	2.3	87.0		
2	SC-4-16-44-87	CH-140×50×4.5×6	5.83	4.2	15.6					
3	SC-11-35-44-87	CH-160×50×2.3×2.3	2.92	10.9	34.8					
4	SC-4-18-44-87	CH-160×50×4.5×6	6.28	4.2	17.8					
5	SC-14-35-44-87	CH-160×65×2.3×2.3	3.27	14.1	34.8					
6	SC-5-18-44-87	CH-160×65×4.5×6	7.18	5.4	17.8					
7	SC-17-35-44-87	CH-160×80×2.3×2.3	3.61	17.4	34.8					
8	SC-9-18-44-87	CH-160×80×4.5×4.5	6.95	8.9	17.8					
9	SC-6-18-44-87	CH-160×80×4.5×6	8.08	6.7	17.8					
10	SC-11-30-82-87	CH-140×50×2.3×2.3	2.69	10.9	30.4	82.3				
11	SC-4-16-82-87	CH-140×50×4.5×6	5.83	4.2	15.6					
12	SC-11-35-82-87	CH-160×50×2.3×2.3	2.92	10.9	34.8					
13	SC-4-18-82-87	CH-160×50×4.5×6	6.28	4.2	17.8					
14	SC-14-35-82-87	CH-160×65×2.3×2.3	3.27	14.1	34.8					
15	SC-5-18-82-87	CH-160×65×4.5×6	7.18	5.4	17.8					
16	SC-17-35-82-87	CH-160×80×2.3×2.3	3.61	17.4	34.8					
17	SC-9-18-82-87	CH-160×80×4.5×4.5	6.95	8.9	17.8					
18	SC-6-18-82-87	CH-160×80×4.5×6	8.08	6.7	17.8					
19	T-44-87	-	-	-	-	44.2				
20	T-82-87	-	-	-	-	82.3				
21	N-44	-	-	-	-	44.2	-	-		
22	N-82	-	-	-	-	82.3	-	-		

表-2 使用鋼材の機械的性質

板厚 t (mm)	降伏応力 σ_v (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	降伏歪 (%)	ヤング係数 E ($\times 10^5$ N/mm ²)	降伏比	伸び (%)
2.3	285	412	0.14	2.03	0.69	39.1
4.5	301	435	0.14	2.05	0.69	34.1
6	333	419	0.16	2.05	0.8	41.1

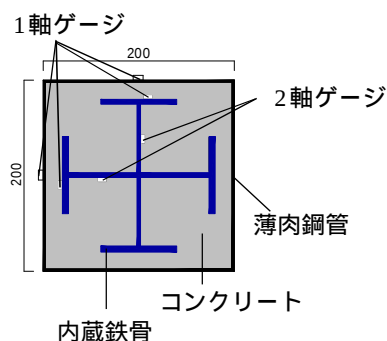


図-1 試験体断面

(2) 荷重方法および測定方法

荷重装置を図-2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、コンクリートのみに圧縮力を荷重した。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、薄肉鋼管中央に2箇所、2軸ゲージを鉄骨ウェブに2箇所貼付し(図-1)、鉄骨と鋼管の歪を測定した。軸変形は上下の加圧板間の相対変形を4箇所に設置した変位計で測定した。

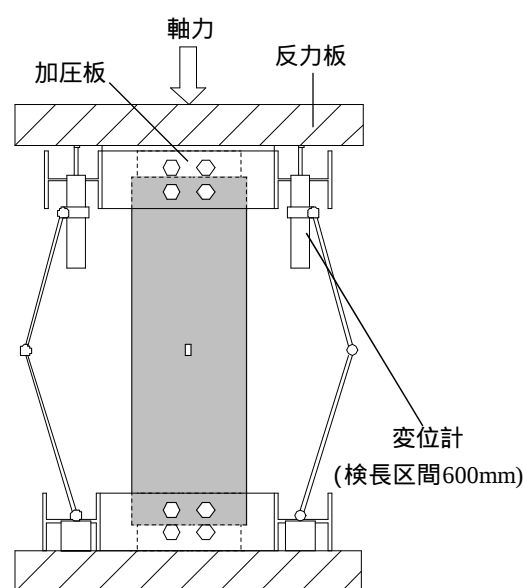


図-2 試験体荷重装置

3. 実験結果と考察

図-3に、実験より得られた荷重 - 変形関係の一例を示す。全体荷重は試験機で載荷した荷重 - 変形関係である。鉄骨負担軸力は、内蔵鉄骨に貼付した材長方向の歪の値をもとに鉄骨断面が一様に縮むものとして算定している。コンクリート負担軸力は、全体荷重から鉄骨負担軸力を引いたものである。

図-4はコンクリートの負担軸力と軸方向変形関係を示す。

(1) 鉄骨形状の違いによる影響

図-4(a)は、内蔵鉄骨のせいの違いによる影響を

調べたものである。最大耐力に大きな影響はないが、鉄骨せいを長くすることでコンクリートの拘束面積が大きくなるため、最大耐力発揮後のコンクリートの抵抗力が緩やかに低下していることがわかる。図-4(b)は、内蔵鉄骨のフランジ幅の違いによる影響を調べたものである。フランジ幅が変化することによるコンクリートの挙動の影響はほとんどないことがわかる。これは、鉄骨フランジに面していない、コンクリートにも側圧が作用することより、十分な拘束効果が期待できることを示すものである。図-4(c)は、内蔵鉄骨のフランジ厚とウェブ厚の違いによる影響を調べたものである。最大耐力に大きな違いは見られないが、フランジとウェブの幅厚比が大きくなると、最大耐力発揮

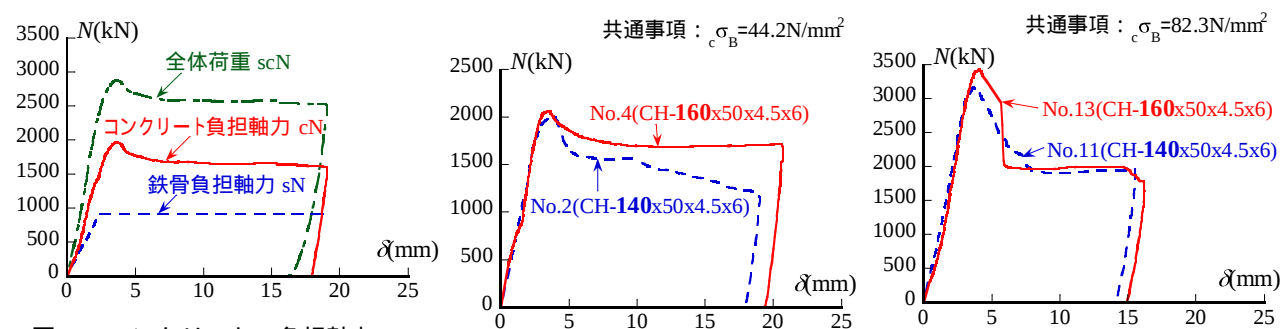
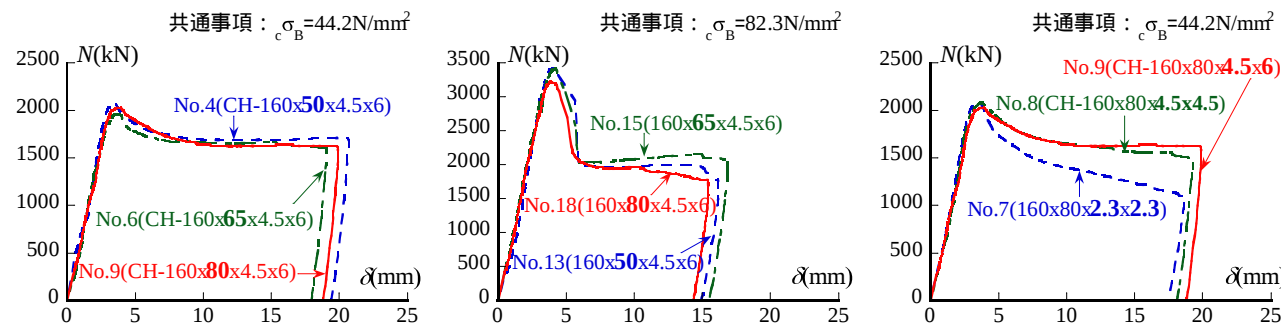


図-3 コンクリートの負担軸力 cN の算出

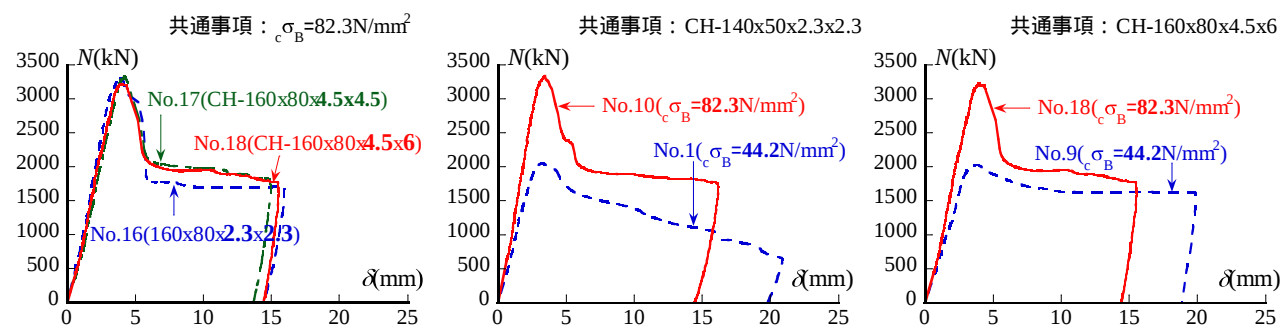
空白部分



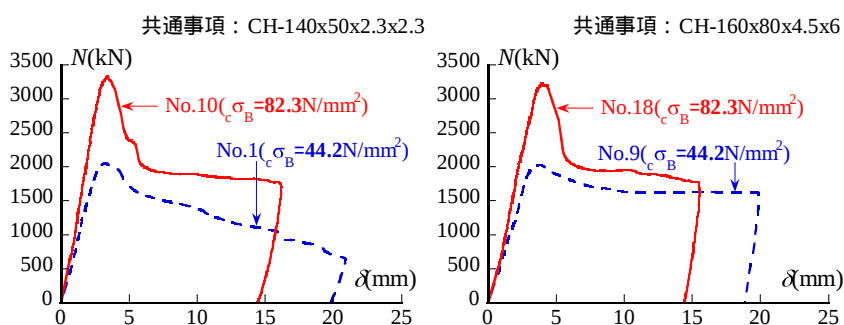
(a)内蔵鉄骨のせいの違いによる影響



(b)内蔵鉄骨のフランジ幅の違いによる影響



(c)内蔵鉄骨のフランジ厚とウェブ厚の違いによる影響



(d)コンクリート強度の違いによる影響

図-4 実験結果の荷重 - 変形関係

後の耐力低下が大きい。

(2) コンクリート強度の違いによる影響

図-4(d)は、コンクリート強度の違いによる影響を調べたものである。 $\sigma_B = 44.2 \text{ N/mm}^2$ に比べ、 $\sigma_B = 82.3 \text{ N/mm}^2$ では最大耐力発揮後の耐力低下が大きなものとなっている。

また、コンクリート強度が 60 N/mm^2 級の試験体は、内蔵鉄骨の寸法が大きい場合は小さい場合に比べ、最大耐力発揮後の耐力低下が緩やかになっている。コンクリート強度が 90 N/mm^2 級の試験体では、いずれの試験体においても最大耐力発揮後に急激な耐力低下が見られ、その後耐力を一定値に保持している。これは、コンクリート強度 60 N/mm^2 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、 90 N/mm^2 級では幅厚比 87 の鋼管による拘束では不十分であるものと考えられる。

4. コンクリートの拘束に対する解析

(1) 十字鉄骨内のコンクリートの拘束効果の評価法

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拘束効果が見込まれている崎野・孫モデル²⁾を元に鉄骨により拘束されたコンクリートの応力 - 歪関係を算定する。

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-5参照)。フランジの付け根部分が全塑性モーメントを発揮するとき、あるいは、ウェブの引張で降伏するときに、側圧 σ_{r2} の最大値であると考え、その側圧 σ_{r2} は式(1)で表される。

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

ここで、 b' : フランジ長さ($=b-t_w$)、 b : フランジ幅、 t_w : それぞれウェブとフランジの板厚、 σ_y : それぞれのウェブとフランジの降伏点である。

鉄骨が開断面であるため、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式(2)で評価する。 $k' \cdot \sigma_{r2}$ 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。

$$k' \cdot \sigma_{r2} = \sigma_{cB2} - \sigma_B \quad (2)$$

ここで、 σ_{r2} : コンクリートの側圧、 σ_{cB2} : 内蔵鉄骨で拘束されたコンクリート強度(実験から得られたコンクリートの最大軸力に対する応力度)、 σ_B : シリンダー強度である。 σ_{cB2} は実験結果から算出し、式(3)による。

$$\sigma_{cB2} = \frac{N_{max} - A_1 \sigma_{cB}(\epsilon_0)}{A_2} \quad (3)$$

ここで、 N_{max} : コンクリートの最大軸力、 ϵ_0 : 十字鉄骨内蔵試験体のコンクリートが最大強度 N_{max} を発揮するときの歪、 $\sigma_{cB}(\epsilon_0)$: 鋼管で拘束されたコンクリートが歪 ϵ_0 のとき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-6参照)である。

ここで、 $\sigma_{cB}(\epsilon_0)$ の算定は以下の様にして求めた。十字鉄骨外のコンクリート全断面が一樣な応力状態となることを想定し、鋼管による拘束効果と中子筋を考慮することで、有効横支持長さが断面せい・幅の半分になると考えて算定した応力度(図-7参照)である。

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 k' と σ_{r2} の関係をブ

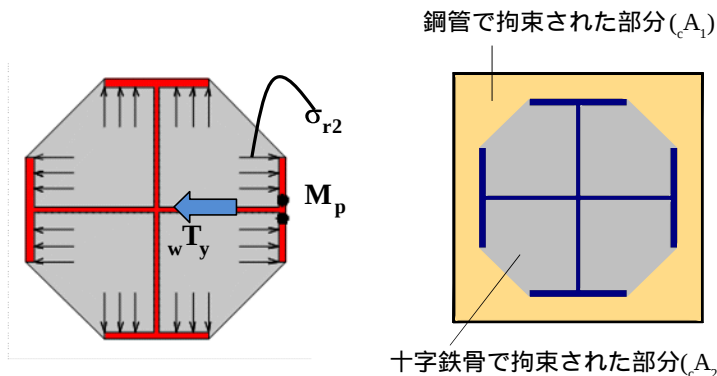


図-5 コンクリートの側圧

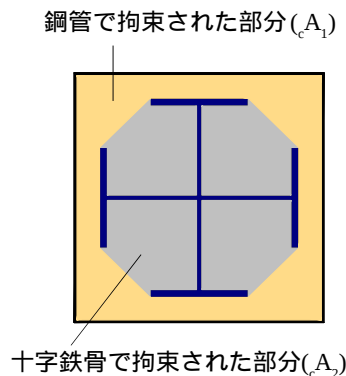


図-6 拘束領域

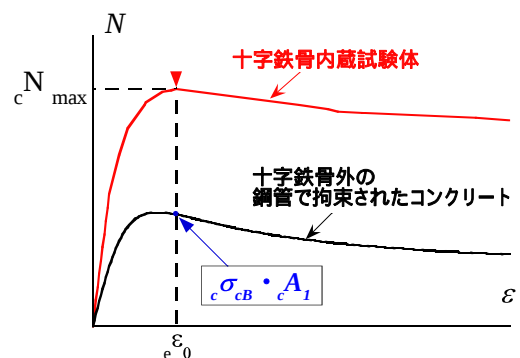


図-7 σ_{cB} の算定法

ロットで示す。このプロットを近似して、式(4)の回帰曲線が得られた。

$$k' = 7.5 / \sigma_{r2}^{0.95} \quad (4)$$

(2) 最大耐力発揮後の歪の調整

最大耐力発揮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³⁾を採用した。試験体の中心区間aは破壊が進行する領域とし、中心から離れた区間bは最大耐力後は歪が減少するものと考えた(図-9参照)。本論では、試験体の損傷が試験体中心部(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、aの長さを断面せいとした。

(3) 解析方法

薄肉鋼管及び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として、2つの解析手法を提案した。

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)、式(4)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-10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、有効支持長さCを半分にでき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、

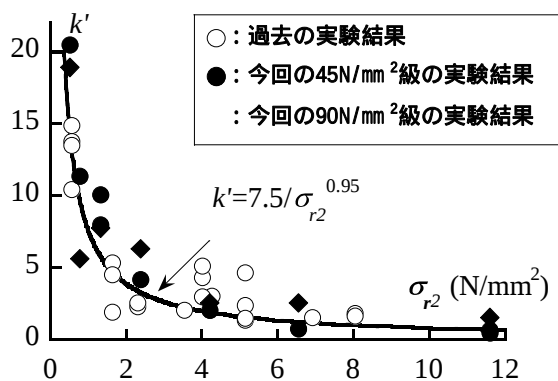


図-8 有効拘束係数の回帰曲線

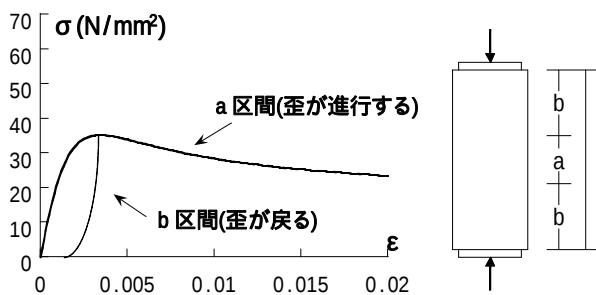


図-9 最大耐力発揮後の歪の移行

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發揮できるものと考えられる。この解析手法を case とする。一方で、内蔵する鉄骨が小さければ、図-10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。この解析手法を case とする。概略を表-3に示す。

(4) 解析結果

図-11に、荷重-変形関係の実験挙動と解析結果との比較を示す。

解析結果との比較より、コンクリート強度 60N/mm² 級の場合、フランジ板厚 4.5mm 以上を有する試験体は case で概ね実験挙動を追跡できていることがわかる。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 で評価することが妥当であると考えられる。ここで、試験体2は、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 では危険側に評価している。図-3(a)の実験結果との比較でも示したように、鉄骨せいが 160mm と 140mm では最大耐力発揮後の耐力低下に違いが見られる。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を示し

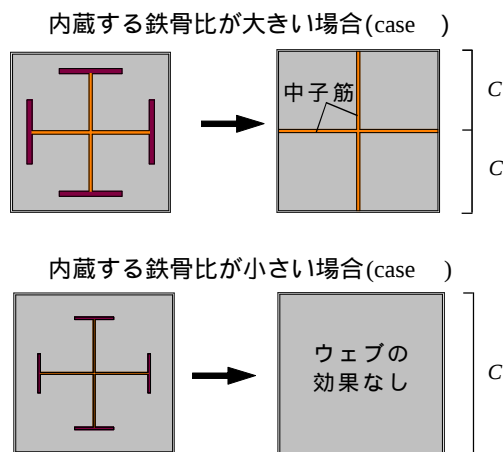


図-10 十字鉄骨の外側の鋼管で拘束されたコンクリートの拘束効果

表-3 薄肉鋼管及び十字鉄骨で拘束されたコンクリートの拘束条件

	拘束状態	内側	外側
case	コンクリートを十字鉄骨の内と外に分割 ・十字鉄骨による拘束を考慮(十字鉄骨内) ・十字鉄骨ウェブが中子筋と同等の効果を發揮(十字鉄骨外)		
case	コンクリートを十字鉄骨の内と外に分割 ・十字鉄骨による拘束を考慮(十字鉄骨内) ・鋼管のみで拘束(十字鉄骨外)		

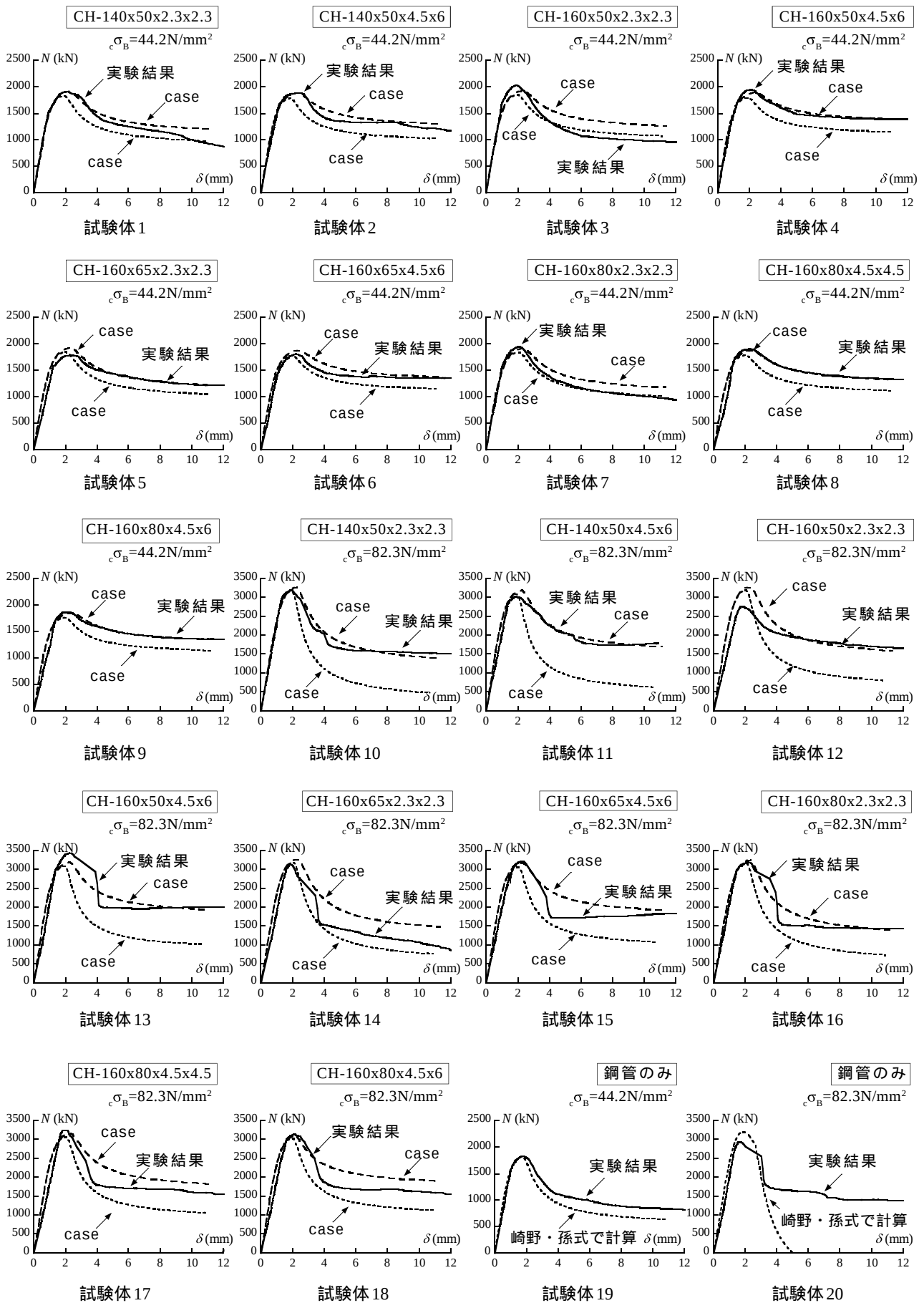


図 - 11 実験挙動と解析結果の比較

ており、この場合は6.0mmの厚いフランジを使用してもcase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級の場合、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が生じている。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で追跡可能であることが分かる。試験体16はcase、試験体14はcaseとよく合っており、試験体10、11は下り勾配はcase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、鉄骨せい140mmを用いた場合は安全側となるcaseで評価することが妥当であると考えられる。なお、試験体12は補剛装置をつけずに載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以上を有し、かつ鉄骨せいが160mmであればcase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で評価するものとする。

5. 結論

薄肉鋼管で横補強したSC柱材の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) コンクリート強度60N/mm²級の場合、内蔵鉄骨のフランジ幅の違いは、コンクリートの拘束効果に影響を及ぼさない。
- 2) コンクリート強度60N/mm²級の場合、内蔵鉄骨のせい140mmと160mm、ウェブ厚とフランジ厚2.3x2.3mmと4.5x6mmの違いでは、最大耐力には大きな影響はないが、最大耐力後の耐力低下に影響している。
- 3) コンクリート強度90N/mm²級の場合、鉄骨比、幅厚比の違いは、コンクリートの拘束効果に影響を及ぼさない。
- 4) コンクリート強度を上昇させた場合でも、本研究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。
- 5) 実験挙動と解析結果の比較より、フランジ厚が4.5mm以上を有し、かつ鉄骨せいが160mmであればcaseで、上記以外の鉄骨を内蔵する場合はcaseで評価できる。

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.77、No.673、pp.491-498,2012.3
- 2) 崎野 健治・孫 玉平：直線型横補強筋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
- 3) 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、pp.505-506,1991.

STUDY ON STRESS-STRAIN RELATIONSHIP OF CONCRETE ON STEEL CONCRETE COMPOSITE COLUMN

Tomomi OOTSUBO, Kensuke KAWAHARA, Yo KURATOMI, Teruhisa TANAKA and Junichi SAKAI

Aiming at the further improvement of the earthquake-resistant performance and simplification of construction for the steel-reinforced concrete structure, suggest the steel and concrete composite columns covered by thin steel tube except a main reinforcement and a shear reinforcement. In this study, intend for high-strength concrete, axial compressive test, and check the influence that the difference of the dimensions of the cross steel frame gives to a confined effect of the concrete of this composite column. Took height, breadth, the width thickness ratio of the flange and web of the cross steel frame, and concrete strength in an experiment variable and did an influence factor if clear. In addition, as a result of having examined relationship of concrete of this composite column based on an experimental result, show what can evaluate by analytical technique to suggest in this study.