

(49) 八角形断面からなるSC柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の応力伝達に関する研究

大橋 桂二郎¹・田中 照久²・倉富 洋³・堺 純一⁴

¹正会員 株式会社駒井ハルテック (〒293-0011 千葉県富津市新富33-10)

E-mail: oohashik@komaihaltec.co.jp

²正会員 福岡大学助教授 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈8-19-1)

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

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

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

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

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

十字鉄骨とコンクリートからなる八角形断面の鋼・コンクリート合成柱SC柱と鉄骨梁の合理的な柱梁接合部の開発を目的とし、実験的研究を主として構造性能を調べてきた。本研究ではFEM解析を用いて、既往の研究より柱梁接合部の応力伝達機構の分析を行った。この解析結果を基に柱梁接合部のディテールの検討を行い、SC柱と鉄骨梁フランジの部分モデルの引張試験を実施し、解析の妥当性と柱梁接合部の提案ディテール性能確認を行った。

次に、一定軸力化で繰り返しせん断力を受けるSC柱と鉄骨梁で構成された混合構造十字形骨組において既往の研究をFEM解析により追跡を行った。その結果変形角2%までの最大耐力においては、解析で実験挙動を精度よく評価できることを示した。

Key Words : Steel and concrete composite columns, beam-to-column connections, Outside diaphragm, FEM analysis, Band plate,

1. はじめに

優れた耐震性能を保持しつつ省人化・省力化を目指した鋼・コンクリート合成柱材の開発を目的とし、十字鉄骨とコンクリートを用いた八角形断面を有する鋼・コンクリート合成柱材（以下、SC柱材と略記）に関する研究を行っている。既往の研究により、本SC柱材が高軸力下でも優れた変形性能を示し、柱梁接合ディテールの検討、弾塑性変形性状および耐力評価式を提案した^{1) 2)}。

本研究ではまずFEM解析により既往の研究²⁾の実験挙動の追跡を行う。この解析により挙動追跡を確認したのち、応力負担率を解析的に調べ、新たに柱ウェブと柱フ

ランジ間の溶接方法の違い、バンドプレートの有無、外ダイアフラム幅を変数とし、部分モデル引張実験を行う。今回行う実験についてもFEM解析を用いて実験挙動を追跡し、応力状況を調べた。

次にSC柱と鉄骨梁で構成された十字骨組の既往の実験挙動³⁾をFEM解析により追跡した。

2. SC柱と鉄骨梁フランジの接合部のFEM解析

(1) FEM解析概要

既往の実験²⁾と同様の条件で解析モデルを作成した。解析には非線形有限要素解析ソフト「Marc2019」を使用した。解析モデルの構成要素は、六面体要素として、モデル化の範囲は十字鉄骨柱と梁フランジとする。部分モデル引張実験を行う上でコンクリートの影響は微小であると考え、コンクリートのモデル化は省略とした。モデル形状・要素分割を図-2に示す。境界条件として、既往の研究²⁾では図-3に示す加力装置で実験を行っている為、梁端に強制変位を与えた。材料特性は、既往の実験²⁾に用いた鋼材より得られた応力-ひずみ度関係を真

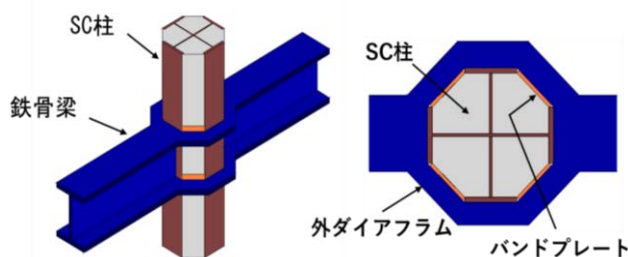


図-1 SC柱梁接合部・断面形状図

応力-真ひずみ度関係に変換した値（図-4），降伏条件はvon Mesesの降伏条件，ひずみ硬化則には等方硬化則を用いた．解析対象としてを表-1に示す．

(2) 既往の実験結果と解析結果の比較

図-5に各試験体の荷重変形関係を示す²⁾．B100-d15N, B100-d15B, B100-d30N, B120-d15B, B120-d30Bの比較については降伏耐力・最大耐力ともに精度よく追跡できている．B120-d30Nについては，解析で破断を再現できず

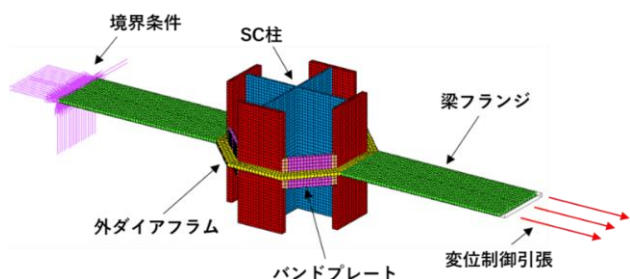


図-2 解析モデル形状・要素分割図

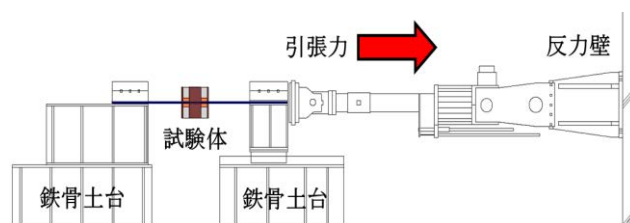


図-3 既往の実験²⁾ 荷重装置

表-1 既往の実験²⁾ 試験体一覧

試験体名	梁フランジ寸法	外ダイアフラム幅	バンドプレート
B100-d15B	PL-100×6	d=15mm	有り
B100-d15N		d=15mm	無し
B100-d30N		d=30mm	
B120-d15B	PL-120×9	d=15mm	有り
B120-d30B		d=30mm	無し
B120-d30N		d=30mm	

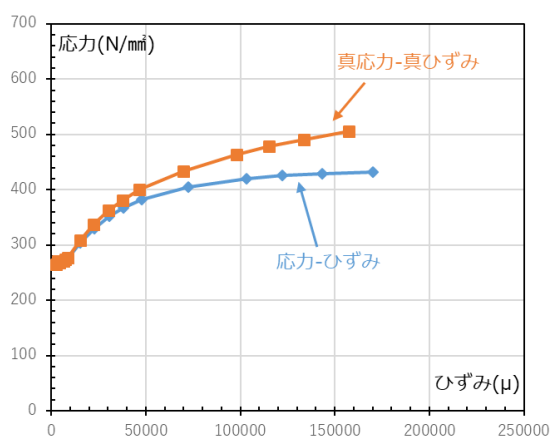
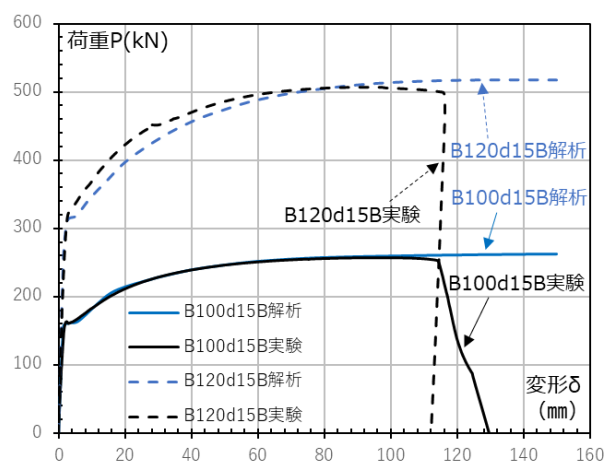


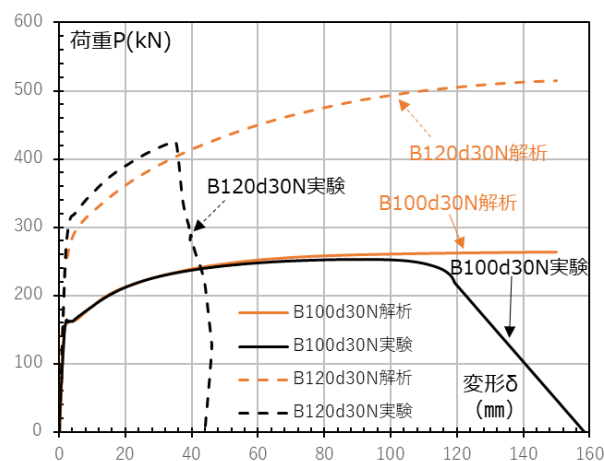
図-4 応力-ひずみ度関係と真応力-真ひずみ度関係

耐力が上昇し続けているが，耐力上昇勾配は追跡できていることが分かる．

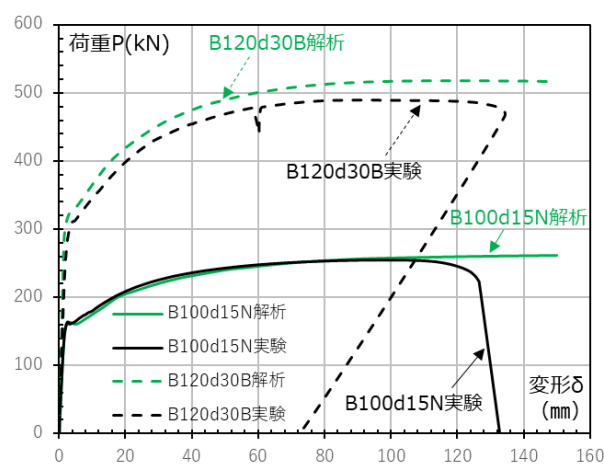
解析結果は実験結果を精度よく追跡できているので，解析により，弾性時の梁フランジの引張力から柱ウェブ



(a) B100-d15B, B120-d15B の比較



(b) B100-d30N, B120-d30N の比較



(c) B100d15N, B120d30B の比較

図-5 既往の実験結果²⁾ と解析結果の比較

とダイアフラム及びバンドプレートへ流れる引張応力の負担率を算出した。解析で得られた算出結果の一例を表-2に示す。表-2に示すように、外ダイアフラム幅によっても柱ウェブの負担率を変えることができることが確認できる。またバンドプレートを設けることで、柱ウェブと外ダイアフラムが負担する力を小さくすることができることが分かる。

3. 実験計画

1) 試験体概要

解析結果を基に、表-3に示す試験体6体を製作し、実験を行った。試験体寸法の一例を図-6に示す。

試験体は、梁が破断するときに接合部（外ダイアフラム、バンドプレート）が弾性状態を保つことを設計の基本とした。図-7に示すように梁フランジにかかる引張力(P)を柱ウェブ(P_w)、外ダイアフラム(P_d)、バンドプレート(P_b)で伝達することを想定している(式1)。

$$P = P_w + \sqrt{2}P_d + \sqrt{2}P_b \quad (1)$$

試験体は、外ダイアフラムの有無、幅、柱ウェブとフランジ間の溶接方法の違い、バンドプレートの有無を変数としている。なお、バンドプレート高さは25mmで統一している。試験体端部には、荷重装置に合わせ幅を狭くしたため、補強板を設けた。

(3) 荷重・計測方法

荷重装置を図-8に示す。1000kN万能試験機を用いて引張力を作用させた。変位は柱フランジ面から42.5mmの位置で離れた区間（検長長さ：285mm）の接合部の伸びを測定した（図-7参照）。

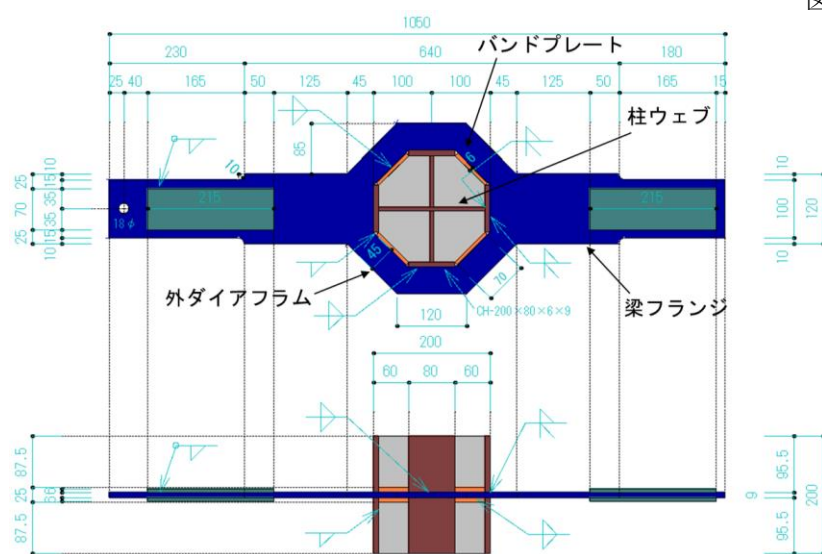


図-6 試験体寸法一例

表-2 解析による各要素の応力負担率(%)一例

	柱ウェブ	外ダイアフラム	バンドプレート
B120-d30N-1	71	29	-
B120-d30N-2	71	29	-
B100-d25B	61	25	14
B120-d30B	59	28	13
B120-d45B	53	38	9

表-3 部分モデル引張実験試験体一覧

試験体名	梁フランジ幅	十字鉄骨ウェブ+フランジ溶接	外ダイアフラム幅	バンドプレート有無
No.1	80mm	部分溶込み	-	-
No.2	120mm	部分溶込み	d=30mm	-
No.3		隅肉溶接	d=30mm	-
No.4		部分溶込み	d=25mm	○
No.5		部分溶込み	d=30mm	○
No.6		部分溶込み	d=45mm	○

表-4 鋼材の材料特性

使用箇所	鋼種	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Y.R.
c_w, b_{pl}	SN490B	6.0	451	619	1.83×10^5	0.73
c_{tr}, b_{tr}		9.0	406	554	1.70×10^5	0.73

c_w : 柱ウェブ, c_{tr} : 柱フランジ, b_{tr} : 梁フランジ, b_{pl} : バンドプレート
t: 板厚, σ_y : 降伏応力度, σ_u : 引張強さ, E: ヤング係数, Y.R.: 降伏比

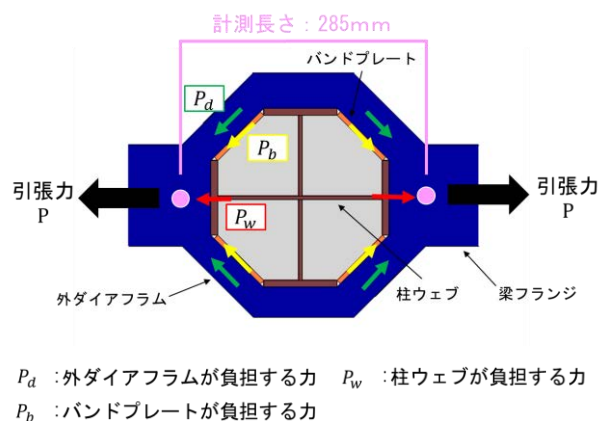


図-7 応力伝達図・変位計測図

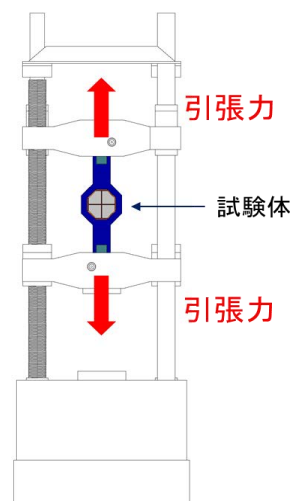


図-8 荷重装置

4. 実験結果

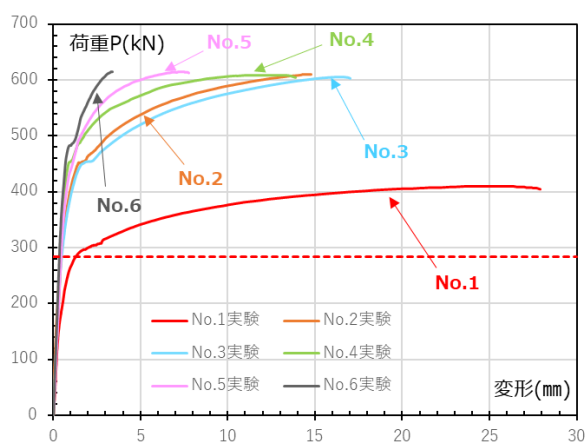
(1) 実験挙動と破壊状況

図-9に実験より得られた荷重-変形関係を示す。図中の赤破線は梁幅80mm, 青破線は梁幅120mmの降伏引張力, 緑破線は外ダイアフラムの降伏引張力を示している。CWY, DYは、それぞれ柱ウェブ, 外ダイアフラムの降伏時点を示している。

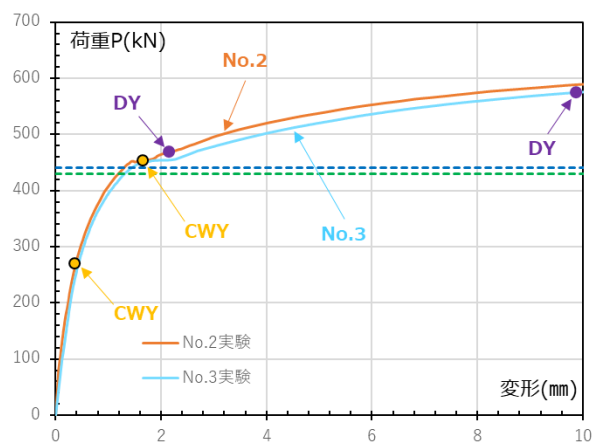
外ダイアフラムとバンドプレートをしていないNo.1は耐力が低く、接合部の変形が大きいことが分かる(図-9(a), 写真-1(a))。この試験体は、柱梁接合部の変形が大きかったが、最終的には梁フランジで破断した。

柱ウェブとフランジの溶接の違いで荷重-変形関係の挙動に大きな違いは見られなかった(図-9(b))。こ

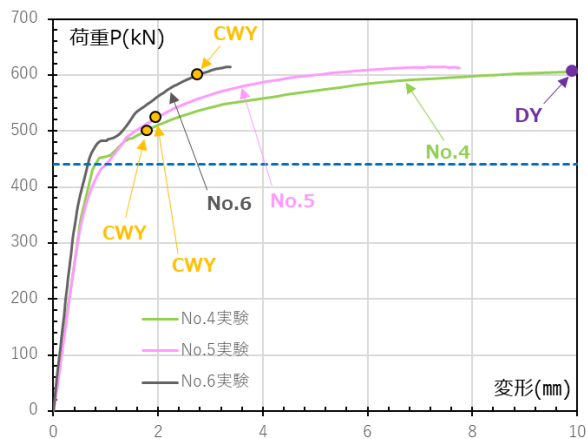
れらの試験体は、バンドプレートを設けておらず外ダイアフラムの破断を想定していたが、梁で破断した(写真-1(b))。バンドプレートを設けていない為、柱ウェブが変形し、コンクリートとの隙間が確認された。外ダイアフラム幅の比較においては、幅が広くなる程、接合部の変形を抑制できることが分かる(写真-1(d))。No.4はバンドプレートを設けているが、柱フランジとバンドプレート間の溶接部が破断し、バンドプレートの効果がなくなり、外ダイアフラムに応力が集中し破断したと考えられる。(写真-1(c))。No.5, 6は梁フランジで破断し、かつ接合部の変形が抑制されていた(写真-1(d))。図-9(d)からは、バンドプレートを設けることで、柱ウェブの降伏を遅らせることができ、接合部の変形を抑制させることができることが分かる。



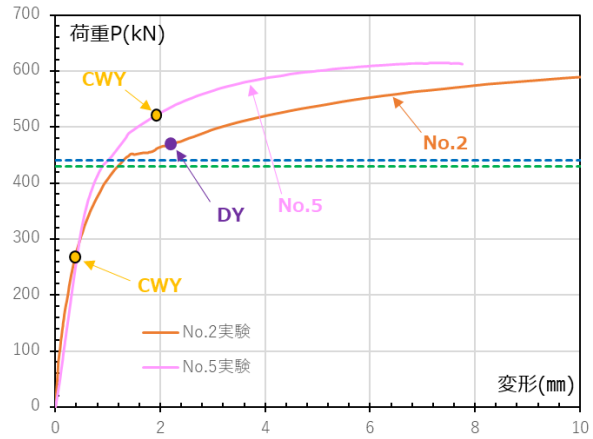
(a) 全試験体比較



(b) 柱溶接の比較

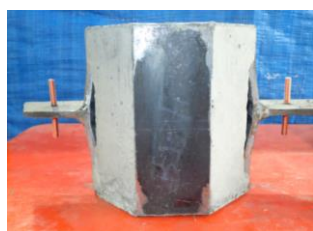


(c) 外ダイアフラム幅の比較



(d) バンドプレート有無の比較

図-9 荷重-変形関係



(a) 試験体 No.1



(b) 試験体 No.2



(c) 試験体 No.4



(d) 試験体 No.6

写真-1 実験後試験体破壊状況一例

5.実験結果と解析結果の比較

(1) 解析概要

本実験で得られた結果とFEM解析結果の比較を行う。解析モデルの要素形状・境界条件などの基本設定、また材料特性、降伏条件などの設定も2章と同様の設定とする。モデル化範囲については、図-11のように端部の補強PLを境としモデル化を行い、コンクリートのモデル化については今回は省略した。材料特性については実験に使用した鋼材の材料特性を用いる（表-4参照）。

(2) 実験結果と解析結果の比較

実験結果と解析結果の荷重－変形関係の比較を図-12に示す。No.1, No.2, No.3, No.4については、降伏耐力・最大耐力ともに解析で実験を精度良く追跡できていることが確認できる。No.5とNo.6では実験と解析で降伏耐力に差異があるが、耐力上昇勾配、最大耐力を追跡できていることが確認できる。

解析により実験を追跡できているので、弾性時の柱ウェブ、外ダイアフラム、バンドプレートの応力負担率を解析により算出する。算出結果を表-5に示す。

No.2とNo.3から、柱ウェブと柱フランジ間の溶接方法の違いでは、荷重－変形関係に影響が見られなかったように、柱ウェブと外ダイアフラムの応力負担率の値は同じとなり影響は見られなかった（表-5参照）。

またNo.4, No.5, No.6から、バンドプレート高さが25mmの場合では、弾性時のバンドプレートの応力負担率は小さいが、確実に柱ウェブの負担率を小さくする効果があることが確認できる。外ダイアフラムの幅を大きくすることで、外ダイアフラムの応力負担率を大きくすることができ、柱ウェブの応力負担率を小さくすることができるが、バンドプレートの応力負担率も小さくなっていることが分かる。そのため、外ダイアフラム幅が45mm以上になると25mm, 30mmと比較するとバンドプレートの効果が十分に発揮出来ていない可能性がある。

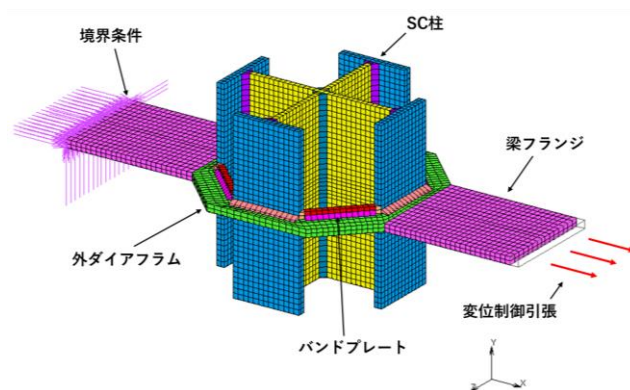
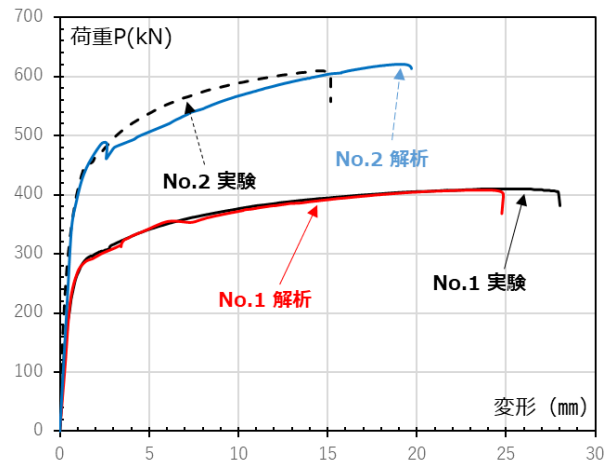
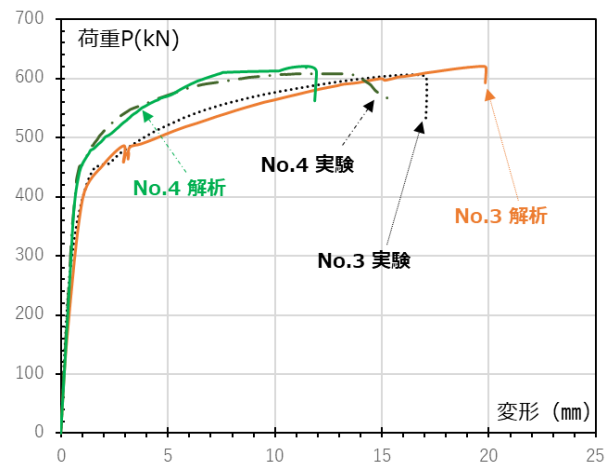


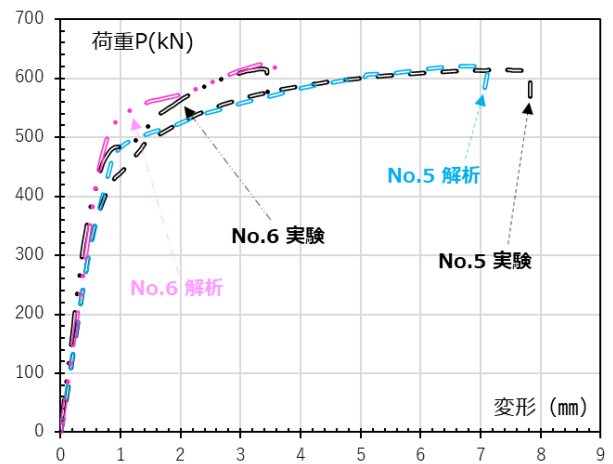
図-12 解析モデル形状・要素分割図



(a) No.1とNo.2の実験と解析の比較



(b) No.3とNo.4の実験と解析の比較



(c) No.5とNo.6の実験と解析の比較

図-12 荷重－変形関係

表-5 解析による各要素の応力負担率（％）

	柱ウェブ	外ダイアフラム	バンドプレート
No.2	71	29	-
No.3	71	29	-
No.4	61	25	14
No.5	59	28	13
No.6	53	38	9

6.十字骨組の解析

(1) 解析概要

既往の十字骨組の弾塑性挙動³⁾をFEM解析で追跡した。解析には非線形有限要素解析ソフト「Marc2019」を使用した。解析対象は、表－6に示す一覧中の試験体SC-B-Nとし、試験体寸法一例を図－13に示す。

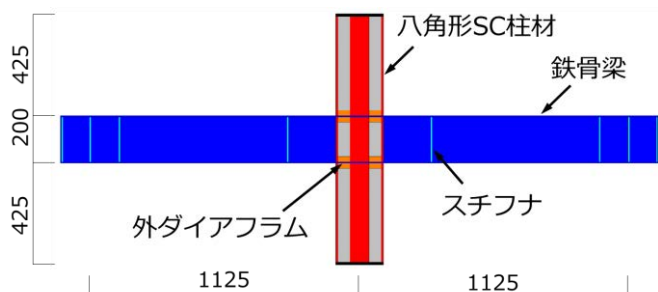
解析モデルの作成範囲は、鉄骨柱・鉄骨梁・コンクリートすべて六面体要素にてモデル化を行い、図－14に示すように、試験体同様の形状とした。境界条件として、既往の実験³⁾と同様に柱頭部に一定軸力を与え、正負繰り返しで強制変位を与えた（図－14、15参照）。解析における強制変位のサイクルは、既往の実験³⁾と同様に0.5%ずつ漸増させ、各変位振幅とも2サイクルずつ繰り返した。ただし、本研究では変形角については $R=2\%$ ま

でを解析対象とした。

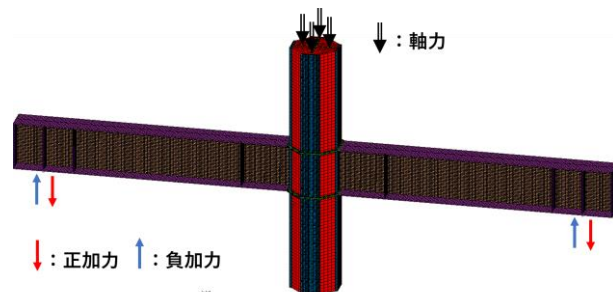
鉄骨およびコンクリートの材料特性は、既往の研究により得られた材料試験値を用いる³⁾。鉄骨にはvon Misesの降伏条件、ひずみ硬化則には移動硬化則を用いた。降伏応力以降は、応力-ひずみ度関係を真応力-真ひずみ度関係へ変換した値を用いた。鉄骨とコンクリートの接触に関しては、摩擦係数の設定は行わず、それぞれの要素が接触した場合にのみ応力伝達を行う設定とした。なお解析には幾何学的非線形を考慮している。

(2) 解析結果

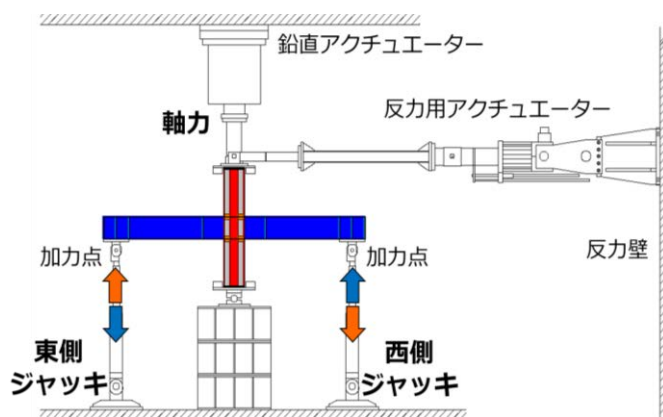
図－16に荷重-変形角関係を示す。既往の実験結果³⁾を青実線、解析結果を赤破線で示した。縦軸は柱せん断力 Q (kN)，横軸は鉄骨梁の変形角 R (%)とし、最大耐力時の $R=2\%$ までの表示とした。



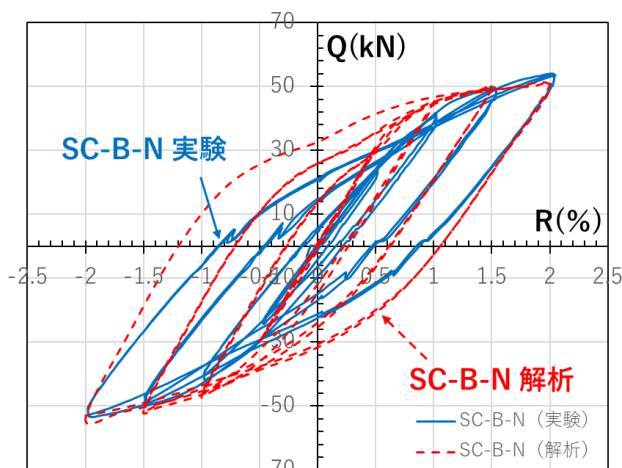
図－13 試験体寸法一例



図－14 解析モデル範囲・要素分割図



図－15 既往の実験³⁾ 荷重装置



図－16 SC-B-N 荷重-変形角関係の比較

表－6 既往の研究試験体一覧³⁾と解析対象

試験体名	柱十字鉄骨	梁鉄骨	外ダイアフラム幅	バンドプレート	崩壊形式	コンクリート強度 $c\sigma_B$ (N/mm ²)
SC-B-B	CH-200×80×6×9	H-200×100×4.5×6	d=15mm	有り	梁曲げ崩壊型	32.6
○SC-B-N			d=15mm	無し		36.1
SC-P-B	CH-200×80×4.5×9	H-200×120×4.5×9	d=25mm	有り	仕口パネル	33.6
SC-P-N			d=60mm	無し	せん断崩壊型	33.3
SC-S-B	CH-200×80×6×9	H-200×100×6×9	d=15mm	有り	同時崩壊型	32.6

SC-B-Nの解析結果は実験結果を、 $R=\pm 2\%$ までの最大耐力は精度よく追跡できている。剛性は解析値のほうが高くなっており、その影響がループ形状にも見られる。

(3) 変形性状の比較

写真-2に既往の十字骨組実験³⁾の載荷後の状況をの一例を示す。また、図-17に解析の載荷後の状況を示す。実験で鉄骨梁上フランジに座屈による変形が見られる。この変形については、解析モデル梁フランジにも座屈による変形方向は逆ではあるが、表現できていることが確認できる。しかし、解析では鉄骨とコンクリートの接触関係として摩擦、付着については設定を行っていないため、実験では見られなかった乖離が鉄骨とコンクリートの間に見られる。

7. 結論

(1) 部分モデル実験と解析結果

八角形SC柱と梁鉄骨フランジで構成された部分モデル引張実験とFEM解析を行った結果、以下の知見を得た。

1) 柱フランジに鉄骨梁フランジを直接溶接したNo. 1は、

梁フランジの引張耐力を柱ウェブに伝達し梁フランジで破断した。

2) 柱ウェブと柱フランジの溶接条件の違い（部分溶込溶接、隅肉溶接）が挙動に及ぼす影響は見られなかった。

3) バンドプレート設けることで、柱ウェブの降伏を遅らせることができ、接合部の変形を抑制できた。更に、バンドプレート高さ25mmの場合、外ダイアフラム幅30mm以上で接合部の変形を抑制することができる。

4) バンドプレート25mmの場合、弾性時のバンドプレートの応力負担率は小さいが、確実に柱ウェブの負担率を小さくできる。

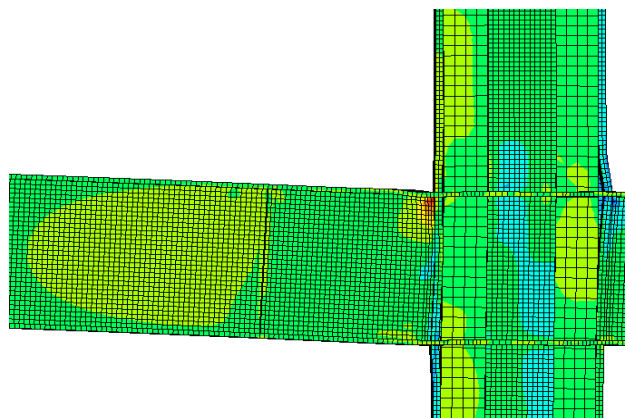
5) 外ダイアフラム45mmの場合、外ダイアフラムの応力負担率を大きくすることができるが、バンドプレート of 応力負担率が小さくなった。

(2) 十字骨組の解析結果と実験結果

既往の実験結果とFEM解析の比較を行った結果、試験体SC-B-Nについて、解析では $R=\pm 2\%$ まで最大耐力は精度よく追跡できているが、剛性を大きく評価しており、ループ形状に影響していることを確認した。



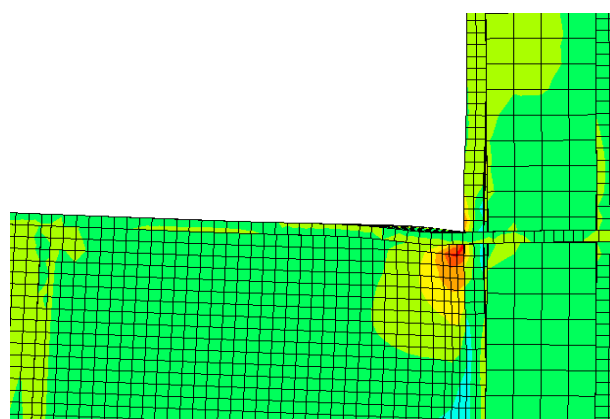
(a) 既往の実験³⁾ 載荷後の状況



(a) 解析モデル載荷後の状況



(b) (a) の上フランジ部拡大
写真-2 既往の実験³⁾ 載荷後の状況一例



(b) (a) の上フランジ部拡大
図-17 解析モデル載荷後の状況

今後の課題

- 1) 本研究では、十字形骨組のFEM解析の比較が1体にとどまった。解析の妥当性を確認するため、残りの試験体5体（表-6参照）全てを確認する。
- 2) 本研究では、実験結果との追跡を $R=\pm 2\%$ としたが、実験では $R=\pm 4\%$ まで加力を行っているので、解析でも $R=\pm 4\%$ まで追跡を行う。
- 3) 鉄骨とコンクリートの付着・摩擦については本研究では考慮していない為、荷重-変形角関係と変形状にどのような影響をもたらすか、確認を行う。
- 4) 柱断面・梁幅などを解析変数として追加し、柱梁接合部の提案ディテールの妥当性を証明することとする。

謝辞：本研究は福岡大学堺研究室令和3年3月卒業 彌永楓氏（現：鹿島建設株式会社）、福田葉音氏（現：株式会社駒井ハルテック）をはじめとする同大学堺研究室の

卒研生に実験・解析でお世話になりました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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鋼・コンクリート合成柱材の弾塑性変形状，日本建築学会構造系論文集，No.780，pp.331-341,2021.2
- 2) 倉富洋，堺純一，田中照久，洲上大貴：バンドプレートに着目した鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の構造性能に関する実験的研究，コンクリート工学会，コンクリート工学年次論文集 Vol.39，No.2，pp.1057-1062,2017.7
- 3) 倉富洋，堺純一，田中照久，洲上大貴：鋼・コンクリート合成柱材と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性変形状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.40，No.2，pp.1117-1122,2018.7
- 4) 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 2014.1

(Received September 10, 2021)

STUDY ON STRESS TRANSFER AT COLUMN-BEAM JOINTS COMPOSED OF STEEL AND CONCRETE COMPOSITE COLUMN AND STEEL BEAMS

Keijiro OOHASHI, Teruhisa TANAKA, Yo KURATOMI and Juniti SAKAI

The authors have investigated the elastic-plastic behavior of the steel and concrete composite columns (SC column) and the beam-to-column connections composed SC columns and wide flange beams against severe earthquakes. The SC column is an octagonal sectional column composed of cross-shaped steel and concrete. A pulling experiment of connection for SC columns and steel flanges was carried out in order to make clear the difference of welded connection details on the behaviors of connection between a column flange and a beam flange with outer diaphragms and band-plates. And also an experiment of cross-shaped frameworks composed of SC columns and wide flange beams was performed in order to study the behavior of frameworks under earthquake loading. The authors have performed FEM analysis and performed a comparison with the experiment behavior, and have made clear the difference of connection details on the behavior of frameworks quantitatively by performing numerical analysis. From these results of research, we will discuss the design method for beam-to-column connection composed of SC columns and wide flange beam where stress transmission mechanism is clear, and construction is simple.