

(25) 十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果が バーリングシアコネクタの力学的特性に 及ぼす影響

楠本 彩七¹・田中 照久²・宇賀村 太貴³・堺 純一⁴

¹ 正会員 福岡大学助手 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目19番1号)
E-mail:a-kusumoto@fukuoka-u.ac.jp

² 正会員 福岡大学准教授 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目19番1号)
E-mail:sttanaka@fukuoka-u.ac.jp

³ 正会員 福岡大学大学院 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目19番1号)
E-mail:td224002@cis.fukuoka-u.ac.jp

⁴ 正会員 福岡大学教授 工学部建築学科 (〒814-0180 福岡市城南区七隈八丁目19番1号)
E-mail:sakaij@fukuoka-u.ac.jp

著者らは、八角形断面の鋼コンクリート柱（以下、SC柱と略す）に十字鉄骨を用い、鉄骨梁と組み合わせた柱梁接合部の開発研究を行っている。これにより、バンドプレートや外ダイアフラムを介して鉄骨梁の曲げモーメントを柱梁接合部に伝達できることがすでに明らかになっている。一方、鋼とコンクリート間の付着力が小さいため、鉄骨梁のせん断力を柱材長区間でコンクリートに伝えるには機械的ずれ止めが必要となる。既往研究において、鋼とコンクリートの付着を切った状態の柱試験体にバーリングシアコネクタ鋼板（以下、BSC鋼板と略す）を配置することで、ずれ止めの効果を実験的に明らかにした。しかし、BSC鋼板の応力伝達力の定量的な検討はできていない。そこで、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果がBSC鋼板の伝達力に及ぼす影響を調べるために、圧縮実験を行い、BSC鋼板の既往終局耐力評価式との関係についても考察した。

Key Words : Mechanical shear connector, SC column, Stress transmission, Ultimate strength evaluation, Push-out test

1. 序論

著者らは、鉄骨鉄筋コンクリート（以下、SRCと略す）構造の特徴である高耐震性能のさらなる向上と建設工事における省力化・省人化を目指した、鋼・コンクリート合成柱を用いた構造システムを開発することを目的として、図-1のような十字鉄骨とコンクリートのみで構成された八角形断面を有する鋼コンクリート柱（以下、SC柱と略す）およびSC柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の開発研究を行っている。これにより、バンドプレートや外ダイアフラムを介して鉄骨梁の曲げモーメントを柱梁接合部に伝達できることがすでに明らかになっている¹⁾。一方、鋼とコンクリート間の付着力が小さいため、鉄骨梁のせん断力を柱材長区間でコンクリートに伝えるには機械的ずれ止めが必要となる。そこで文献2)では、鉄骨とコンクリートとの間の付着を切った状態の柱試験

体にバーリングシアコネクタ鋼板³⁾（以下、BSC鋼板と略す）をウェブ面に全周隅肉溶接で設置することで、そのずれ止め効果を実験的に明らかにした。文献2)で使用された試験体におけるBSC鋼板の抵抗機構は、バーリングの抵抗力（バーリング突起部によるコンクリートの支圧抵抗力とバーリング円孔に充填されたコンクリートの一面せん断抵抗力の和（以下、BSC抵抗と略す））

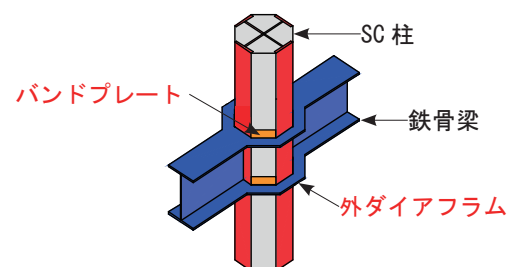


図-1 SC柱とS梁からなる柱梁接合部

と BSC 鋼板端部の支圧抵抗力 (以下, PL 支圧抵抗と略す) が考えられるが (図-2 参照), 十字鉄骨により拘束された場合の BSC 鋼板の応力伝達力の定量的な検討はできていない。文献4) では, 文献2) の配置に対応した BSC 鋼板のずれ止め基本特性を把握するために単純な押抜き試験を実施し, 既往の終局耐力評価式との対応も検討した。

そこで本論では, 十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果が BSC 鋼板の応力伝達力に及ぼす影響を調べるために, 圧縮実験を行い, 既往の終局耐力評価式⁴⁾との関係についても考察した。

2. 実験計画

十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果が BSC 鋼板の応力伝達力に及ぼす影響を調べるために, 図-3 に示す試験体を製作し, 圧縮実験を行った。表-1 に試験体一覧を, 表-2 に BSC 鋼板の形状寸法を, 表-3 に材料特性を示す。実験変数は, BSC 鋼板の有無および PL 支圧抵抗の有無とし, 試験体は計3体である。

使用した BSC 鋼板の形状寸法は, 板厚 6mm, パーリング孔径 50mm, 突起高さ 15mm とし, 鋼板サイズ ($B \times H$) は 100mm \times 100mm とした。コンクリートの種類は普通コンクリートであり, 呼び強度 21N/mm², 粗骨材の最大寸法は 20mm とした。

(1) 試験体の概要

試験体 No.1 は, BSC 鋼板をウェブの両面に四周隅肉溶接で取り付けることとし1試験体あたり8個取り付けられている。なお, BSC 鋼板を取り付ける位置にはウェブに 50 ϕ の孔を設けている。また, 試験体の上部のコンクリートに 25mm の空隙を設け, 下部にはコンクリートのみの部分を 25mm 設ける (図-3(a) 参照) ことによって, 圧縮力を鉄骨から BSC 鋼板に, BSC 鋼板からコンクリートに伝達させる試験体である。コンクリートと十字鉄骨が接する部分は, アセトンで不純物を除去した状態とした。なお, ウェブの直下にコンクリートが回らないよう

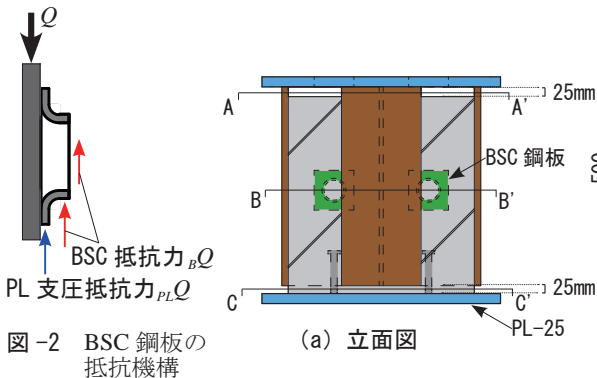


図-2 BSC 鋼板の抵抗機構

に 25mm 厚のスチレンボードを設けている。下部のコンクリートのみの部分 (図-3(d) 参照) は, 鉄骨下端面のフランジおよび一部のウェブからなる T 形鋼を 4 個配置し, コンクリート打設後にこの T 形鋼を引き抜いている。

試験体 No.2 は, 試験体 No.1 と同様の形状で, BSC 鋼板の PL 支圧抵抗をなくするため鋼板の下に発泡材を取り付けている。

試験体 No.3 は, ウェブに孔を設けず, BSC 鋼板を取り付けていない試験体である。

(2) 荷重方法と計測方法

荷重方法および変位計測位置を図-4 に示す。荷重は, 5000kN 試験機を用い一方向に中心圧縮力を作用させた。ずれ変位は, 試験体の上下ベースプレート間に設置した4点の変位計で計測した縮み量の平均で値とする。なお, 試験機の荷重能力が限界に到達した時点で実験を終了した。

表-1 試験体一覧

試験体No.	鉄骨形状	BSC鋼板	PL端部支圧
1	CH-500 \times 200 \times 10 \times 16	有	有
2	CH-500 \times 200 \times 10 \times 16	有	無
3	CH-500 \times 200 \times 10 \times 16	無	無

表-2 BSC 鋼板の形状寸法

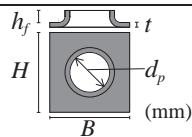
BSC鋼板	鋼板厚さ t (mm)	パーリング孔径 d_p (mm)	突起高さ h_f (mm)
	6	50	15

表-3 材料特性

使用材料	鋼種	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	Y.R.	E_s (N/mm ²)
BSC鋼板 PL-6	SS400	265	428	0.62	2.12×10^5
十字鉄骨 ウェブ CH-500 \times 200 \times 10 \times 16	SS400	337	483	0.70	2.02×10^5
十字鉄骨 フランジ CH-500 \times 200 \times 10 \times 16	SS400	295	470	0.63	2.01×10^5
使用材料		σ_B (N/mm ²)	E_C (N/mm ²)		
コンクリート		30.85	29177		

σ_y : 鋼材の降伏点, σ_u : 鋼材の引張強さ, Y.R.: 降伏比, E_s : 鋼材のヤング係数, σ_B : コンクリートの圧縮強度, E_C : コンクリートのヤング係数

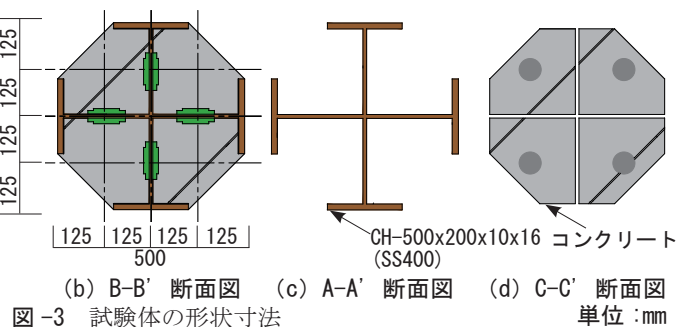


図-3 試験体の形状寸法

単位: mm

3. 実験結果

(1) 十字鉄骨とコンクリートの付着応力度

図-5に、十字鉄骨とコンクリートとの間の付着応力度-ずれ変位関係を示す。付着応力度は、試験体 No.3 の圧縮軸力をコンクリートと鋼材の接触面積で除して算定している。グラフの中にはSRC 規準⁵⁾に示された形鋼・鋼板の外側と鋼管の内側における短期許容付着応力度を示している。十字鉄骨とコンクリートの付着応力度は鋼管の内側の付着応力度以上、形鋼・鋼板の外側の付着応力度以下となった。

(2) 荷重-ずれ変位関係

図-6(a)～(d)に、荷重-ずれ変位関係を示す。図-6(a)より各試験体のずれ挙動に明確な違いがあることから、BSC 鋼板の応力伝達能力は明らかである。鋼とコンクリート間の付着のみで応力を伝達する試験体(図中の No.3)は、ずれ変位 $\delta=0.1\text{mm}$ を超えるあたりで剛性低下し、一定になったことが確認できる。これは十字鉄骨とコンクリートとの間の接着作用が消滅し、摩擦作用に移行したことが要因であると考えられる。

図-6(b)は、付着力を除いた BSC 鋼板に作用する各抵抗力の荷重-ずれ変位関係である。図中の No.1' は、試験体 No.1 より試験体 No.3 の付着力を除いたものであり、BSC 鋼板に作用する全体の抵抗力 (BSC 抵抗力+PL 支圧抵抗力) を示している。図中の No.2' は、試験体 No.2 より試験体 No.3 の付着力を除いたものであり、BSC 抵抗力

を示している。PL 支圧抵抗力は、No.1' から No.2' を差し引いて算定している。図-2に示した BSC 鋼板の抵抗力は、2400kN の軸力を載荷した状態でも弾性剛性を保持できていることが確認できた。

図-6(c)は、付着力を除いた BSC 鋼板 1 個あたりの荷重-ずれ変位関係である。ずれ変位 $\delta=1.0\text{mm}$ 時の BSC 鋼板に作用する全体の抵抗力は $P=145\text{kN}$ であった。

図-7に、BSC 鋼板に作用するそれぞれの力の荷重-ずれ変位関係を示す。図-7(b)から読み取れるように、 $\delta=0.13\text{mm}$ (図中青●印) のところで付着力の剛性が低下している。したがって、付着力が一定になって、それ以降は BSC 抵抗力と PL 支圧抵抗力がそれぞれ増大して応力が伝達されることが読み取れる。

(3) 抵抗力の割合

抵抗力の割合を図-8に示す。付着力の剛性が低下し始めたずれ変位 $\delta=0.13\text{mm}$ 時における試験体に作用する抵抗力の割合は、BSC 抵抗力が 16%、PL 支圧抵抗力が 6%、付着力が 78%である。

付着力を除いた抵抗力の割合を図-9に示す。ずれ変位が $\delta=1.0\text{mm}$ 以下であれば BSC 抵抗力の割合が大きいが、ずれ変位 $\delta=2.0\text{mm}$ 以降は BSC 抵抗力と PL 支圧抵抗力はほぼ同等の割合であることが確認できた。

以上のことから、BSC 鋼板を用いた十字鉄骨とコンクリートの応力伝達は、ずれ変位 $\delta=1.0\text{mm}$ 程度までは付着力が全体の約 8 割を占め、接着作用の消失後は、BSC 抵抗力と PL 支圧抵抗力に移行していく。BSC 抵抗力は、

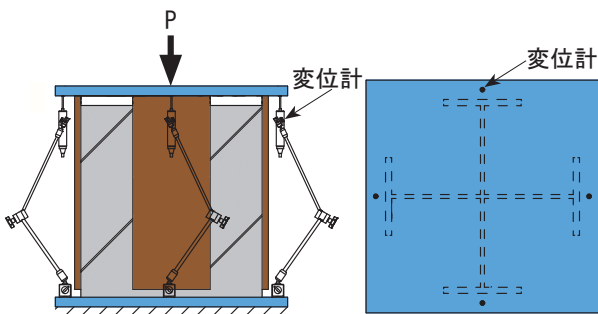


図-4 載荷装置および変位計測位置

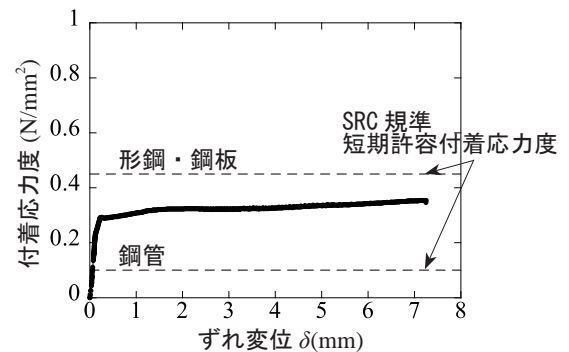
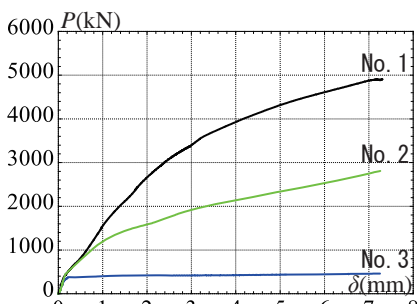
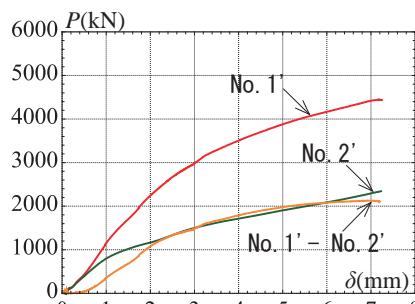


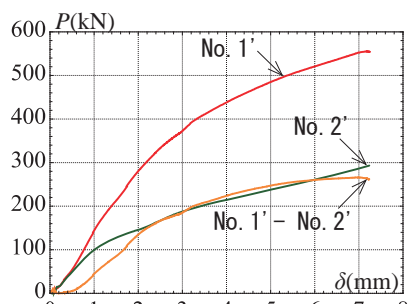
図-5 付着応力度-ずれ変位関係



(a) 各試験体

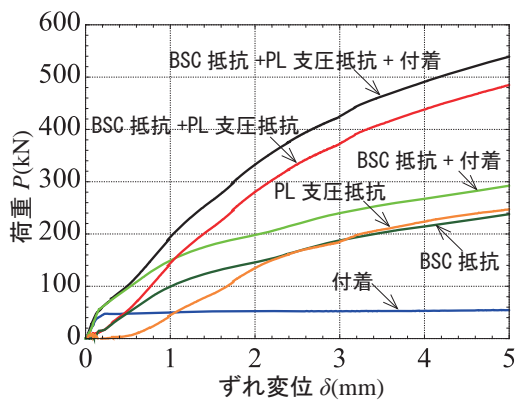


(b) 付着を除いた各抵抗力のずれ挙動

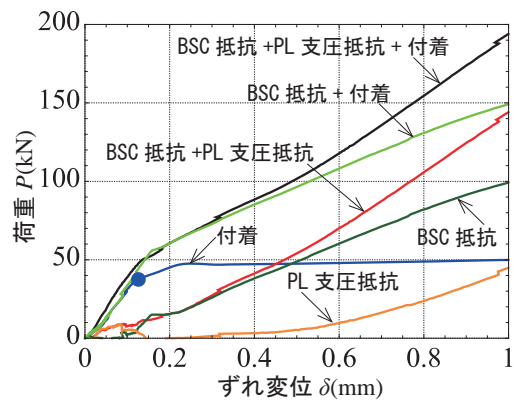


(c) BSC 鋼板 1 個あたりのずれ挙動

図-6 荷重-ずれ変位関係



(a) ずれ変位 5.0mm まで



(b) ずれ変位 1.0mm まで

図-7 BSC 鋼板に作用するそれぞれの力の荷重-ずれ変位関係 (BSC 鋼板 1 個あたり)

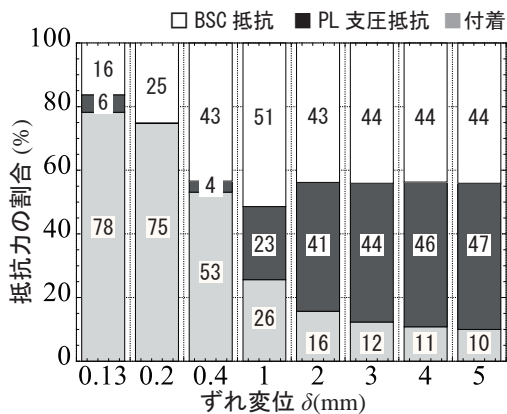


図-8 抵抗力の割合

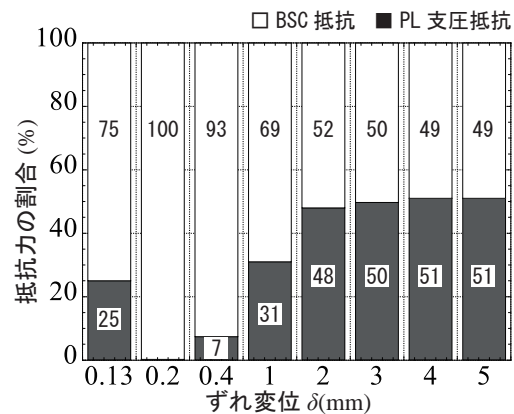


図-9 付着を除いた抵抗力の割合

BSC 鋼板によるコンクリートのせん断抵抗の剛性は大きいため小さなずれ変位から効いてくるが、PL 支圧抵抗は、0.4mm のずれを超えたあたりから効きはじめる。

4. 耐力評価

(1) BSC 抵抗の終局耐力評価式

式 (1) は BSC 抵抗の終局耐力評価式であり、文献 4) を参考に、孔部コンクリートの一面せん断強度式 q_s の式 (2) とバーリング突起部のコンクリートによる支圧強度式 q_c の式 (3) の単純和で評価している。ただし、鋼板とコンクリート界面の付着・摩擦力は、式 (2) に含む。

$${}_B Q_u = q_s + q_c / 2 \quad (1)$$

$$q_s = \alpha \cdot \pi d_p^2 / 4 \cdot \sigma_B \quad (2)$$

ここに、 α : 実験定数 (Leonhardt⁶⁾ の場合: $\alpha=1.08$), d_p : バーリング孔径, σ_B : コンクリートシリンダーの圧縮強度

$$q_c = A_p \cdot f_b \quad (3)$$

ここに、 A_p : バーリング突起部の投影面積 ($= (d_p + 2t) \cdot h_p$), h_p : 突起高さ, f_b : コンクリートの支圧強度 ($= \sigma_B \cdot \sqrt{A_c / A_p}$), A_c : コンクリートの支承面積 (図-10 参照)

図-10 に、支圧強度式 q_c を算出する際の、コンクリー

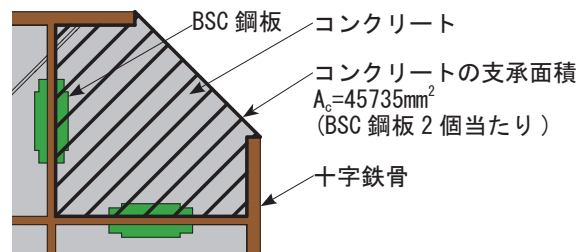


図-10 コンクリートの支承面積 A_c

トの支承面積 A_c を斜線で示す。BSC 鋼板 2 個当たりの A_c は、十字鉄骨で囲われている 1 区画を支承面積とした。式 (1) では、BSC 鋼板 1 個分の終局耐力を算出するために支圧強度は 2 で除している。

(2) PL 支圧抵抗の終局耐力評価式

PL 支圧抵抗の終局耐力評価式は、式 (3) におけるコンクリートの支圧強度 f_b を、鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構⁷⁾ で提示されている評価法に準じて (4) 式により、算定した。

$${}_{PL} Q_u = ({}_{PL} A_p \cdot {}_{PL} f_b) / 2 \quad (4)$$

ここに、 ${}_{PL} A_p$: BSC 鋼板端部の投影面積 ($= B \cdot t$), ${}_{PL} f_b$: コンクリートの支圧強度 ($= \beta' \cdot \sigma_B^{\alpha'} \cdot \sqrt{A_c / {}_{PL} A_p}$), α' : 実験定数 ($\alpha'=1.0$), β' : 実験定数 ($\beta'=1.0$)⁷⁾

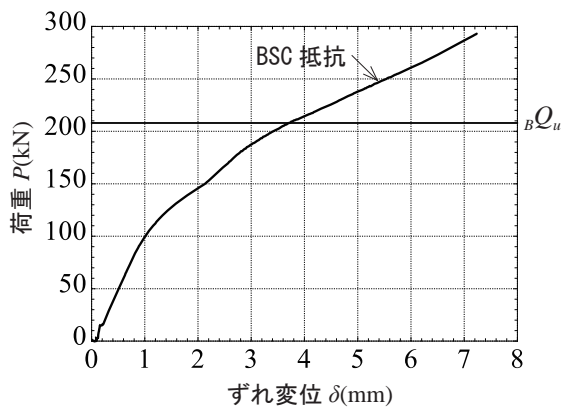


図-11 BSC 抵抗の計算値との対応

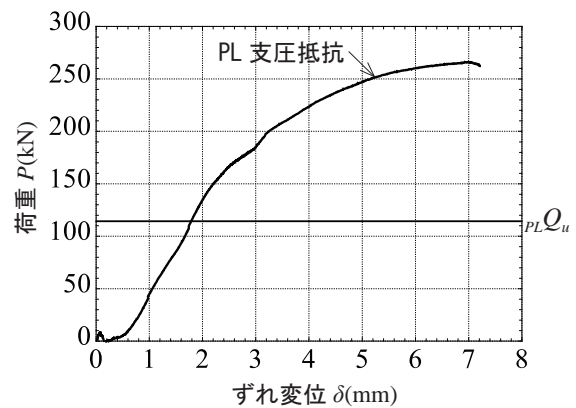


図-12 PL 支圧抵抗の計算値との対応

また、BSC 鋼板の終局耐力評価式の支圧強度式と同様の理由により、BSC 鋼板 1 個分の終局耐力を算出するために 2 で除している。

(3) 実験値と計算値の対応

図-11 は BSC 抵抗、図-12 は PL 支圧抵抗それぞれの荷重-ずれ変位関係に式 (1) および式 (4) で求めた終局耐力計算値を示したものである。BSC 抵抗は、ずれ変位約 $\delta=3.8\text{mm}$ 時に計算耐力を発揮し、PL 支圧抵抗は、ずれ変位約 $\delta=1.7\text{mm}$ 時に計算耐力を発揮することを把握した。いずれの伝達要素においても、実験値は計算値を上回っており、その要因は、十字鉄骨の拘束効果による支圧強度の上昇が考えられる。

そこで、実験で得られた最大耐力から逆算して支圧係数を求めると、BSC 抵抗は 7.82、PL 支圧抵抗は 14.4 であり、計算値の支圧係数より BSC 抵抗は 1.58 倍、PL 支圧抵抗は 2.33 倍高い傾向にあることが分かった。

5. 結論

本論は、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果がパーリングシアコネクタ (BSC) 鋼板の応力伝達力に及ぼす影響を調べるために、圧縮実験を行った。本実験から得られた知見を以下にまとめる。

- 1) ずれ止め 1 セット (BSC 鋼板 8 個) で 2400kN (BSC 鋼板 1 個あたり 300kN) の軸力を載荷した状態でも弾性剛性を保持できている。高いずれ止め抵抗力が得られたのは、十字鉄骨に囲まれることによりコンクリートの割裂破壊が防止できたことによると考えられる。
- 2) BSC 鋼板の抵抗機構は、パーリングの抵抗力 (パーリング突起部によるコンクリートの支圧抵抗力とパーリング円孔に充填されたコンクリートの一面せん断抵抗力の和) と BSC 鋼板端部の支圧抵抗力といえ、ずれ変位 $\delta=2.0\text{mm}$ まで弾性剛性を保持する。そ

れ以降の BSC 抵抗と PL 支圧抵抗の割合はほぼ同等である。

- 3) 終局耐力評価式は、いずれの伝達要素においても、実験値を安全側に評価できる。なお、実験耐力は、十字鉄骨によるコンクリートの拘束効果により、BSC 抵抗は計算耐力の 1.58 倍、PL 支圧抵抗は 2.33 倍高い傾向にある。今後の課題として、各ずれ変位時における支圧強度の評価について更なる検討を行う必要がある。

謝辞：本研究は、JSPS 科研費 JP20K04785 による助成を受けて実施した。実験の実施にあたっては、福岡大学工学部建築学科技術職員の石橋宏一郎氏、大野敦氏、ならびに当時学部 4 年生の山田一志氏にご助力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 洲上大貴, 倉富洋, 田中照久, 塚純一: 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弾塑性変形性状に関する研究, 構造工学論文集, pp.419-425, Vol.64B, 2018
- 2) 倉富洋, 松山礼佳, 田中照久, 塚純一: 機械的ずれ止めによる影響を考慮した鋼・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, コンクリート工学年次論集, pp.937-942, Vol.42, No.2, 2020
- 3) 田中照久, 塚純一, 河野昭彦: パーリング加工を活用した新しい機械的ずれ止めの開発, 日本建築学会構造系論文集, Vol.78, No.694, pp.2237-2246, 2013
- 4) 楠本彩七, 田中照久, 塚純一: パーリングシアコネクタの設置方法がずれ止め特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論集, pp.697-702, Vol.45, No.2, 2023
- 5) 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, 2015
- 6) Leonhardt, F et al: Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, Beton und Stahlbeton, 82 Heft 12, pp.325-331, 1987.
- 7) 日本建築学会: 鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構, 2011

(Received August 25, 2023)

INFLUENCE OF CONFINING EFFECT OF CONCRETE BY CRUCIFORMED STEEL MEMBER ON MECHANICAL PROPERTIES OF BURRING SHEAR CONNECTORS

Ayana KUSUMOTO, Teruhisa TANAKA, Taiki Ugamura and Junichi SAKAI

The authors are conducting research on the development of beam-to-column joints that combine octagonal cross-section steel concrete columns (hereinafter referred to as SC columns) with cross steel frames and steel beams. It has already been clarified that the bending moment of the steel frame beam can be transmitted to the column-to-beam joint through the band plate and the outer diaphragm. On the other hand, since the adhesion force between steel and concrete is small, a mechanical anti-slip mechanism is required to transmit the shear force of the steel beam to the concrete in the long section of the column material. In previous research, we experimentally clarified the anti-slip effect by placing a burring shear connector steel plate (hereinafter abbreviated as BSC steel plate) on a column specimen in which the adhesion of steel and concrete was cut. However, the stress transfer force of BSC steel sheets has not been quantitatively investigated. Therefore, in order to investigate the effect of concrete restraint by the cross steel frame on the transmitted force of the BSC steel plate, a compression experiment was conducted and the relationship with the existing ultimate strength evaluation formula of the BSC steel plate was also discussed.