

令和元年6月18日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06570

研究課題名（和文）十字形鉄骨を内蔵したCES造柱梁接合部の応力伝達機構

研究課題名（英文）Stress Transfer Mechanism of CES Beam Column Joint with Cross-Shaped steel

研究代表者

松井 智哉（Matsui, Tomoya）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20402662

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：鉄骨と繊維補強コンクリートのみで構成されるCES構造における柱梁接合部のせん断耐力評価法の提案を行った。十字形鉄骨およびH形鉄骨を有する柱梁接合部の静的加力実験を実施し、その構造性能を明らかにした。また、既往の実験結果と併せてせん断耐力評価法の検討を行い、コンクリートパネルの圧縮ストラットに基づくせん断耐力評価手法を提案し、既往の評価手法と異なり内蔵鉄骨等の断面形状を考慮することができ、評価精度が向上することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CES構造は鉄骨を内蔵することから優れた耐震性を有する構造システムであり、本研究によって柱梁接合部の合理的な設計を構築することができた。現在、日本建築学会/CES構造性能評価指針検討小委員会ではCES構造設計指針を作成中であり、CES構造の実用化に向けて大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：Shear Strength evaluation of CES beam column joint in Concrete Encased Steel structure composed of steel and fiber reinforced concrete was examined. Static loading test on beam column joints with cross-shaped steel or H-shaped steel in joint panel was conducted and the structural performance was understood. Furthermore, test results including previous tests was analyzed, shear strength evaluation based on compression strut of concrete panel was proposed, and it was found that the proposed evaluation method could consider the effect of cross section of encased steel and the sensitivity of the evaluation method improved.

研究分野：建築耐震構造

キーワード：鋼コンクリート合成構造 CES構造 繊維補強コンクリート 柱梁接合部 せん断耐力

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

鉄骨鉄筋コンクリート構造(以下、SRC 構造)は、鉄骨構造と鉄筋コンクリート構造を合成した構造システムであり、優れた耐震性能を有する構造形式である。しかしながら、施工において鉄骨工事と鉄筋工事の両方を要するため、構造設計や施工が非常に複雑となり、それに伴う建設コストの上昇、工期の長期化といった問題点が生じてくる。しかし、1995 年の兵庫県南部地震において明らかにされたように、SRC 造建築物では柱脚部及び内蔵鉄骨の継手部の耐力不足等、施工の困難さに起因する被害が少なからず見られたものの、総合的な耐震性能は他の構造と比べても優れたものである。

一方で、都市部では中高層建物が一般的となった昨今、一度大規模な地震が発生するとその人的、物的な被害は多大なものになると考えられ、中高層建物の耐震性が都市部の防災性に与える影響は大きい。そのようなことから SRC 造のような高い耐震安全性を有する建物の普及は、地震時の経済的損失の低減につながる社会的要求の 1 つである。

そこで、SRC 構造の構造特性を生かしつつ施工を合理化するため、鉄筋を用いず、繊維補強コンクリート(FRC)と内蔵鉄骨のみで構成される合成構造(Concrete Encased Steel: 以下、CES 構造)(図 1)の開発研究を継続的に行ってきた。

これまでの CES 柱、CES 柱梁接合部、2 層 2 スパンフレームおよび CES 耐震壁を対象とした研究により、鉄筋を省略しても繊維補強コンクリートを用いることによって大変形時においてもコンクリートの損傷・剥落を抑制することが可能であること、CES 構造が SRC 構造と同等の優れた復元力特性および履歴特性を示し、高い耐震性能を有することが確認され、これらの構造性能に関して概ね把握するに至っている。しかしながら、本研究で対象としている CES 柱梁接合部については、2 層 2 スパンフレーム実験において、梁曲げ降伏を想定した試験体であったものの内柱梁接合部でせん断破壊した様相が見られたことから、柱・梁・仕口部で構成される柱梁接合部の構造性能は、多くの要因により影響され、未だに不明な点が多いと考える。

その一方で、現時点では SRC 造部も含めて CES 接合部のせん断強度式は、コンクリート強度が最も支配的な要因とされており、今後、性能評価型の設計を構築することを鑑みると改善の余地があると考えられる。主な影響因子として軸力、柱と梁の曲げ耐力比、柱幅、梁幅、接合部内の鉄骨フランジ幅、柱シアスパン比などが挙げられ、実験的・解析的な検討を行い報告してきた。しかしながら、これまでの成果は、H 形鉄骨を内蔵した接合部に限ったものであり、当然、建物の設計において十字形鉄骨や T 字形鉄骨を用いた方が合理的である場合もあることから、それらの性能の把握が重要である。よって、これまでの成果に加え、十字形鉄骨を用いた CES 柱梁接合部を包含した性能評価法へ発展させることが CES 構造の実用化に向けた次なる課題の 1 つである。

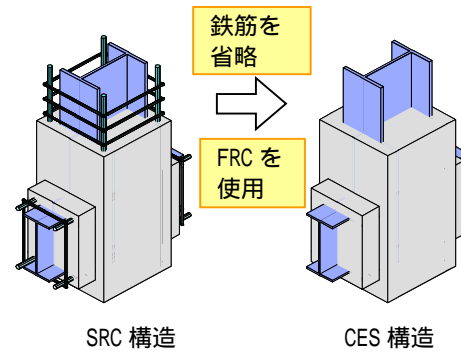


図 1 CES 構造システム

### 2. 研究の目的

本研究では、鉄骨と繊維補強コンクリートのみで構成される CES 構造における柱梁接合部、その設計手法を構築することを目的として、以下の研究に取り組む。特に、これまでの研究で扱っていなかった十字形鉄骨を内蔵した柱梁接合部を対象としている。

- ・CES 柱梁接合部の強度、変形性能、損傷と変形の実験的に明らかにする。
- ・CES 造接合部のせん断強度式の改善を目指し、既往のせん断強度式の適用性について分析を行う。また、FEM 解析により実験結果をシミュレートすることにより、解析モデルの有効性を確認し、各種構造因子が CES 造接合部の強度および応力伝達メカニズムに及ぼす影響を明らかにする。
- ・上記の分析結果に基づき、CES 柱梁接合部の構造性能評価手法を構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 試験体概要

表 1 に試験体一覧を、図 2 に試験体形状、接合部パネルの断面図を示す。試験体は、約 1/2.7 縮尺モデルの十字型柱梁接合部 5 体であり、部材反曲点を模擬するために柱上下端部および梁左右端部にそれぞれピン支承を設けている。柱のピン支承間の距離は 1300mm、梁のピン支承間の距離は 2250mm とする。

試験体の破壊形式は、試験体 JB-3 が梁降伏先行型、JP-7、JP-8、JP-9、JP-10 が接合部せん断破壊型を想定して計画した。梁断面は 300 × 400mm とし、梁の内蔵鉄骨には試験体 JB-3 では RH-300 × 150 × 6.5 × 9 を用い、試験体 JP-7、JP-8、JP-9、JP-10 では BH-300 × 150 × 12 × 25 を用いる。試験体 JB-3 の柱断面は 400 × 400mm、内蔵鉄骨は 2-BH-300 × 150 × 9 × 12 である。

接合部破壊型の試験体は、断面形状が接合部パネルの耐力性能に及ぼす影響を把握するために、接合部とそれに伴い柱の断面を実験変数としている。試験体 JP-7 は、柱断面を 400 × 400mm

表 1 試験体一覧

試験体	JB-3	JP-7	JP-8	JP-9	JP-10
破壊形式	梁曲げ降伏	接合部せん断破壊			
柱	内蔵鉄骨形状	十字形			H形
	内蔵鉄骨(強軸)	H-300×150×9×12			
	内蔵鉄骨(弱軸)	H-300×150×9×12	H-300×150×4.5×9		
	柱高さ	1300			
	断面 b×D	400×400		300×400	
梁	内蔵鉄骨	H-300×150×6.5×9	H-300×150×12×25		
	梁長さ	2250			
	断面 b×D	300×400			
パネル	ウェブ	9	4.5		
	フランジ	12			
	スチフナ	12	28		
	縦スチフナ			PL-4.5	
柱軸力 (kN)	1161	1095	893	771	771

単位：mm

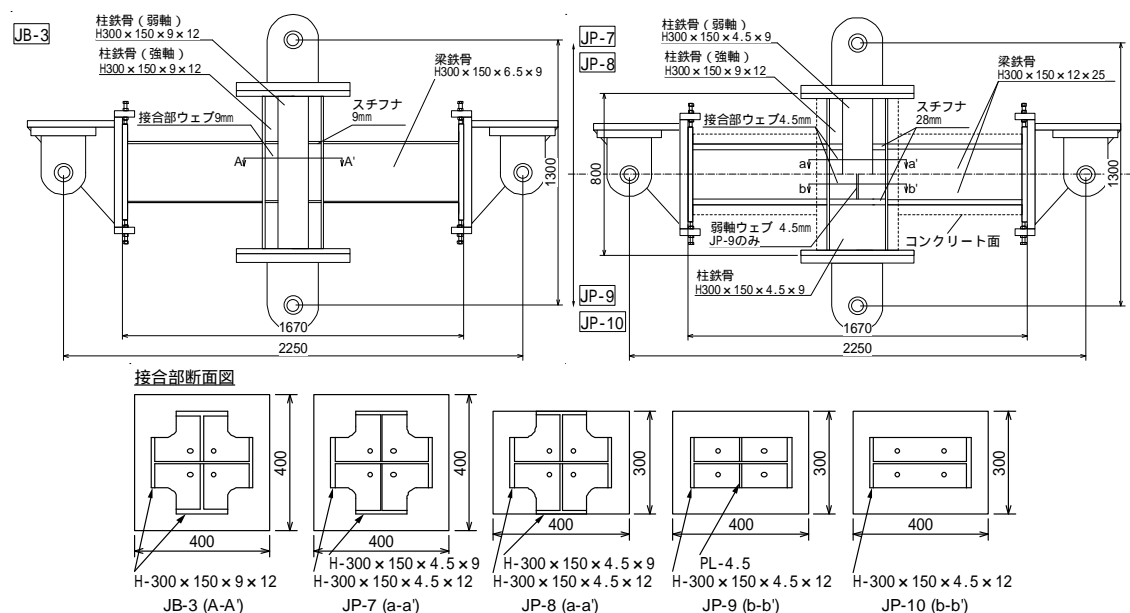


図 2 試験体形状および断面図

とし、内蔵鉄骨にはBH-300×150×9×12(加力方向に対して強軸。以下、強軸方向鉄骨)およびBH-300×150×4.5×9(加力方向に対して弱軸。以下、弱軸方向鉄骨)を用いる。ただし、接合部せん断破壊型とするために加力方向の接合部パネルウェブは、PL-4.5としている。試験体JP-8は、試験体JP-7の柱断面を300×400mmに変更した試験体である。試験体JP-9は、試験体JP-8の柱および接合部の加力直交方向鉄骨を省いた試験体である。ただし、接合部パネル内の弱軸方向のウェブを残している。試験体JP-10は、試験体JP-9から弱軸方向のウェブを取り除いた試験体であり、柱、接合部ともにH形鉄骨を内蔵した試験体となる。なお、柱に作用させる軸力は、鉄骨断面を含む柱の軸圧縮耐力比で0.1とした。

(2) 載荷方法

載荷は、図3に示す載荷装置を用いて行った。試験体は柱上下端部および梁左右端部にそれぞれ取付けられたピン支承を介して載荷装置に設置し、試験体に柱部材軸と平行に作用させた軸力下で静的漸増繰り返し水平力載荷を行った。作用させた軸力は、SRC規準に従って算定したCES柱の終局圧縮耐力 $N_0$ に対する軸力比 $N/N_0$ でほぼ0.1とした。水平力載荷は変形制御とし、柱上下端に取付けたピン支承間の相対水平変位と上下ピン支承間距離 $h$ で与えられる相対部

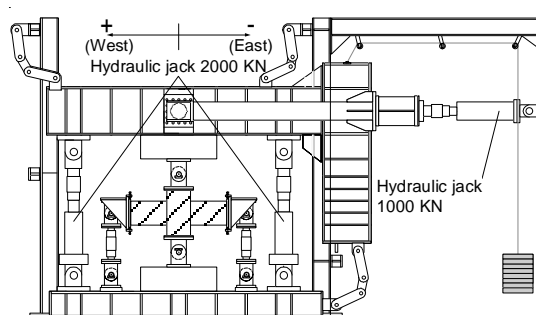


図 3 載荷装置

材角  $R (= \delta / h)$  で、0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.03rad. および 0.04rad. を 2 サイクルずつ繰り返した後 0.05rad. まで荷重を行い、実験を終了した。

(3) 計測計画

計測変位は、制御変位となる水平変位、接合部パネル及び梁端部の変形とした。また、鉄骨フランジ及びウェブのひずみをひずみゲージにより計測した。また、繰り返し荷重における第 1 サイクルのピーク時と除荷時においてクラックスケールを用いてひび割れ幅を計測した。

4. 研究成果

(1) 破壊性状と水平荷重-層間変形角関係

図 4 に各試験体の荷重 - 変形角関係を示す。

梁曲げ降伏型の試験体 JB-3 では、 $R=0.01\text{rad.}$  のサイクルで、パネルゾーンにおいてせん断ひび割れが発生し、梁危険断面位置(梁フェース位置)の鉄骨フランジの引張降伏を確認した。 $R=0.04\text{rad.}$  のサイクルで最大耐力 552kN に達した。最終変形角  $R=0.05\text{rad.}$  における耐力は 547kN と耐力低下はなく、試験体 JB-3 は高い靱性能を発揮し、紡錘型の履歴性状を示した。

試験体 JP-7 および JP-8 では  $R=0.03\text{rad.}$  時にそれぞれ最大耐力 +725kN, -712kN を記録した。正負最大耐力の平均値で比較するとカバーコンクリート(弱軸鉄骨フランジの外側のコンクリート)がない試験体 JP-8 は試験体 JP-7 よりも 22kN 小さい程度であった。試験体 JP-7 では  $R=0.04\text{rad.}$  の 2 サイクル目の正荷重時に梁フランジ溶接部破断のため著しい耐力低下が生じ実験を終了した。また、試験体 JP-8 においても同様な破断が生じたと考えられる。両試験体ともに類似した履歴形状となり、内蔵鉄骨に十字形鉄骨を用いた場合のかぶりコンクリートの有無による水平荷重の差異は小さかった。

試験体 JP-8 および JP-9 では、正負最大耐力の平均値で比較すると、弱軸鉄骨がある試験体 JP-8 は、試験体 JP-9 よりも 143kN ほど大きくなる結果となった。

試験体 JP-9 および JP-10 では、正負最大耐力の平均値で比較すると、パネルゾーンに弱軸ウェブがある試験体 JP-9 は、試験体 JP-10 よりも 29kN (最大耐力に対して 5%) ほど小さくなる結果となった。

(2) 鉄骨のせん断応力

各試験体の接合部の強軸鉄骨ウェブおよび弱軸鉄骨フランジの  $R=0.02\text{rad.}$  までのせん断応力度と変形角の関係を図 5 に示す。せん断応力度は鉄骨に貼付したロゼットゲージの歪測定値からロゼット解析より求めた。鉄骨の一軸応力 - ひずみ関係はバイリニアモデルとした。図中の破線はせん断降伏応力度 ( $\sigma_y / \sqrt{3}$ :  $\sigma_y$  は鋼材の降伏応力度) を示す。

強軸鉄骨ウェブ (G2) はせん断降伏に至っている。弱軸鉄骨フランジ (G1) のせん断応力度は、

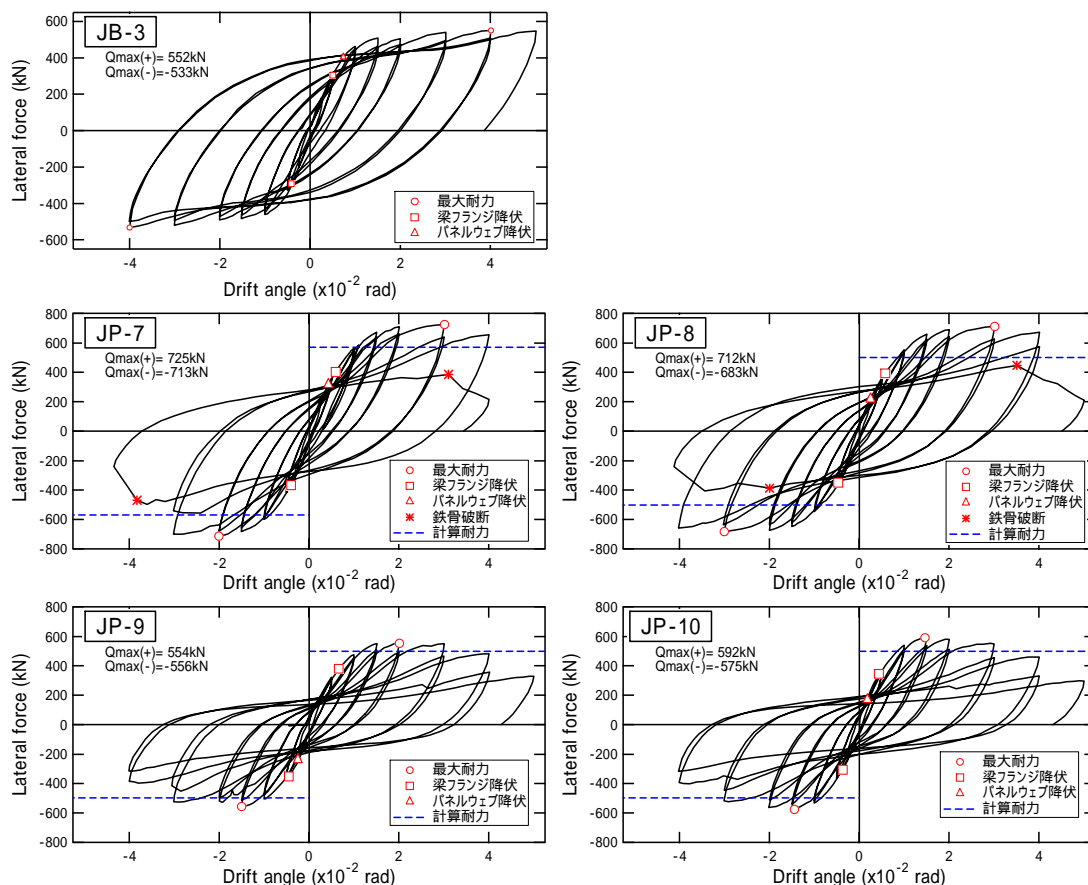


図 4 水平荷重 - 変形角関係

せん断降伏応力度には達していないが、 $R=0.02\text{rad}$ ではせん断降伏応力度の75%程度の応力が生じていることが確認できる。

### (3) 接合部パネルせん断耐力の評価

CES 接合部のせん断耐力算定式は SRC 規準に基づく式として(1),(2)式が提案されている[雑誌論文]。本式は接合部のコンクリートの負担せん断力を有効面積とせん断応力を掛け合わせることで簡便な式としている。なお、(2)式のコンクリートのせん断応力は既往の実験結果のおよそ平均値を与えられるように設定している。しかしながら、実験結果では試験体 JP-9 と JP-10 のようにパネルゾーンの鉄骨形状によって最大耐力に差異がみられる。そのため、引用文献 1) では(3)~(5)式による接合部のコンクリートのストラット機構に基づくせん断耐力評価について検討がされている。ここでは、既出および今回の実験試験体を含めてせん断耐力の算定手法の検討を行う。

$$Q_{pu} = j F_s \cdot j \delta \cdot c A_e + \frac{1.2 \cdot s_w \sigma_y \cdot s_w A}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

$$j F_s = 0.018 F_c + 3.2 \quad (2)$$

ここで、 $Q_{pu}$ : 接合部のせん断耐力、 $F_c$ : コンクリートの圧縮強度、 $j F_s$ : コンクリートのせん断強度、 $j \delta$ : 接合部の形状係数(十字形は3)、 $c A_e$ : 接合部コンクリートの有効面積( $=c_b \cdot c_{de}$ )、 $c_b$ : 接合部コンクリートの有効幅(柱幅と梁幅の平均値)、 $c_{de}$ : 接合部コンクリートの有効せい(柱せいと柱鉄骨せいの平均値)、 $s_w \sigma_y$ : 接合部鉄骨ウェブの降伏応力、 $s_w A$ : 接合部鉄骨ウェブの断面積、 $j_b$ 、 $j_c$ : 梁および柱の有効せい(梁および柱鉄骨フランジ重心間距離)とした。

コンクリートのストラット機構による水平せん断力  $V_{cp}$  を式(3)に示す。式(3)は、仮定する圧縮ストラットに生じる圧縮力の水平成分として表されるものである(図6)。

$$V_{cp} = \mu \cdot \sigma_B \cdot t \cdot l_s \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \quad (3)$$

$$\mu = \begin{cases} 1.0 & (\sigma_B < 25) \\ -0.022\sigma_B + 1.55 & (25 \leq \sigma_B \leq 45) \\ 0.56 & (45 < \sigma_B) \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{pu} = \sum V_{cp,i} + \frac{1.2 \cdot s_w \sigma_y \cdot s_w A}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

ここで、 $\mu$ : コンクリートの圧縮強度有効係数、 $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )、 $t$ : 圧縮ストラットの幅、 $l_s$ : 圧縮ストラットの長さ、 $\theta$ : 圧縮ストラットの角度である。コンクリートのパネルゾーンのせん断抵抗要素のせん断力  $V_{cp,i}$  ( $i=1 \sim n$ ,  $n$  は仮定するストラットの総数)と鉄骨のせん断耐力をそれぞれ足し合わせて CES 造柱梁接合部のせん断強度  $V_{pu}$  とし、式(5)のように表される。

式(1)および式(5)による接合部のせん断耐力の計算値と実験値の比較を図7に示す。十字形鉄骨を有する試験体のせん断耐力については、図5の結果を踏まえて弱軸鉄骨フランジの負担せん断力をせん断降伏耐力の0.7倍と仮定して式(1)および式(5)に足し合わせて検討することとした。

式(1)による計算値は実験値の $\pm 20\%$ 以内になっていることが確認できる。試験体 JP-9 と JP-10 の計算値に対する実験値の比はそれぞれ 1.12, 1.19 であるが、式(5)によって接合部パネルの圧縮ストラットの形状を考慮して評価した場合には 1.07 となり 評価精度の向上が確認できる。ただし、試験体 JP-5 は実験値に対する計算値の比が式(1)では 1.01, 式(5)では 0.9 となり評価精度が低下する試験体も見られる。試験体 JP-5 は試験体 JP-4 と鉄骨フランジの寸法が異なる試験体であるが、実験における最大耐力はほぼ同等であったのに対して式(5)ではパ

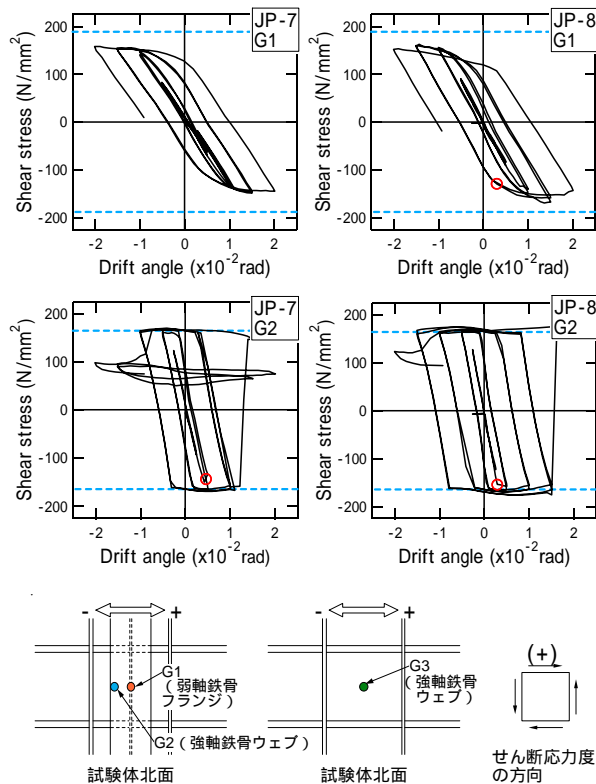


図5 接合部鉄骨のせん断応力度

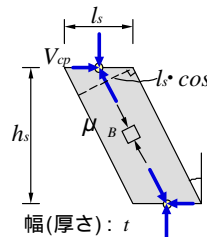


図6 ストラット機構による水平せん断力

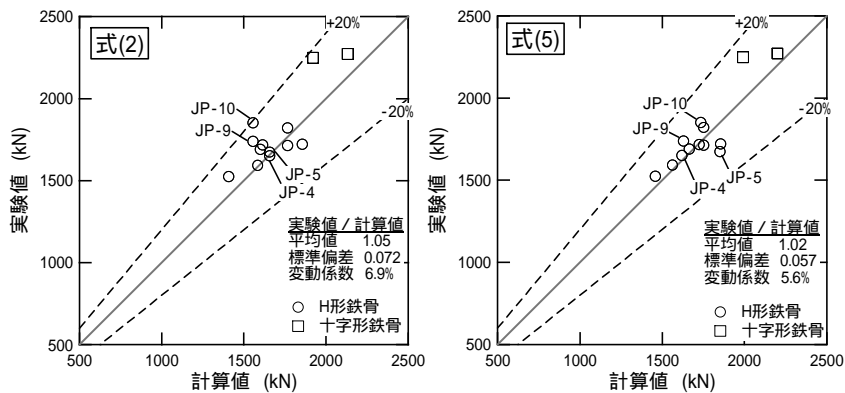


図7 せん断耐力の計算値と実験値の比較

ネルの形状を考慮しているため計算値に差異が生じ、結果として試験体 JP-5 は過小評価となる結果になったと考えられる。しかしながら、全体的にみて式(5)の評価方法で、式(2)に比べて、若干ではあるが評価精度に改善がみられる。

#### (4) まとめ

- 1) 接合部パネルにおける鉄骨形状が、せん断耐力に影響を及ぼすことが確認された。
  - 2) 弱軸鉄骨フランジは、CES 接合部のせん断耐力時にせん断降伏耐力計算値の7割程度のせん断力を負担していることが確認された。
  - 3) 接合部パネルコンクリートの圧縮ストラットに基づくせん断耐力評価について検討し、既往の計算式より評価精度が向上することを示した。
- なお、限られた試験体に対する検討であることから、せん断耐力の評価法についてさらに検討が必要であり、コンクリートの有効幅の妥当性については実験に基づくものであることから FEM 解析による検討を実施している。

#### (引用文献)

- 1) 小島佑太, 吉野貴紀, 小山勉, 松井智哉: CES 造柱梁接合部のせん断抵抗機構に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1219-1224, 2013.7

#### 5. 主な発表論文等

##### [雑誌論文](計3件)

- 松井智哉, 渡辺一葵: 圧縮ストラット機構に基づく CES 造柱梁接合部のせん断耐力評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, 2019.7 (査読有 2019年4月採択)
- 渡辺一葵, 松井智哉: 十字形鉄骨を内蔵した CES 造柱梁接合部の構造特性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.1087-1092, 2018.7 (査読有)
- 松井智哉: H 形鉄骨を用いた CES 内柱梁接合部の終局せん断強度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.737, pp.1125-1135, 2017.7 (査読有)

##### [学会発表](計4件)

- 松井智哉, 渡辺一葵, 前川茜音: 内蔵鉄骨形状の異なる CES 造柱梁接合部の静的加力実験 その1 実験概要と破壊性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.1347-1348, 2018.9
- 前川茜音, 渡辺一葵, 松井智哉: 内蔵鉄骨形状の異なる CES 造柱梁接合部の静的加力実験 その2 荷重-変形特性とパネルゾーンの挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.1349-1350, 2018.9
- 渡辺一葵, 前川茜音, 松井智哉: 内蔵鉄骨形状の異なる CES 造柱梁接合部の静的加力実験 その3 パネルゾーンの負担せん断力と終局耐力の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 III, pp.1351-1352, 2018.9
- 金澤 優樹, 渡辺一葵, 前川茜音, 松井智哉: 十字形鉄骨を内蔵した CES 柱梁接合部の静的加力実験, 日本建築学会東海支部研究報告集, pp.201-204, 2018.2