

論文 八角形 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

有田 葵^{*1} 田中 照久^{*2} 倉富 洋^{*3} 堺 純一^{*4}

要旨： 十字鉄骨とコンクリートのみを使用した鋼・コンクリート合成柱材の柱梁接合部の開発を目的として水平ダイアフラムとバンドプレートを用いた柱梁接合部の部分試験体を製作し、引張実験を実施した。バンドプレートの有無と水平ダイアフラム幅別の接合部の耐力を調べたところ、バンドプレートを設け水平ダイアフラム幅を拡張すると耐力が上昇することを示した。さらに FEM 解析を行い、実験挙動を追跡できることと柱ウェブへの応力集中が課題であることを明らかとした。さらなる接合部の簡素化と課題の解決案として鉛直スチフナつき接合部を提案し、柱ウェブの応力集中を緩和させられることを解析によって明らかとした。

キーワード： 鋼・コンクリート合成柱材, 十字鉄骨, 引張実験, FEM 解析, 水平ダイアフラム, 鉛直スチフナ

1. はじめに

地震大国である日本において、建物の耐震性能は非常に重要である。優れた耐震性能を有する構造として鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造が挙げられるが、コスト・施工面で問題があり、この課題に対して、SRC 柱と同等以上の耐震性能を保持しつつ施工の簡素化を目指した鋼・コンクリート合成柱の開発を行っている。十字鉄骨とコンクリートからなる八角形断面を有する SC 柱が提案され、既往の研究では SC 柱が SRC 柱に劣らない耐震性能を示すことを明らかとした^(例えば1)。文献2)では水平ダイアフラムとバンドプレートを用いた八角形 SC 柱と鉄骨梁で構成された柱梁接合部の提案を行いその実用性について検討している。特に本研究では、梁フランジの応力を SC 柱に伝達するためのメカニズムを明らかにするために SC 柱と鉄骨フランジで構成された部分試験体を製作し、引張実験を行ったのでその実験結果を報告する。更に、FEM 解析を行い、FEM 解析で実験挙動を追跡できることを明らかとする。この検討を受けさらに SC 柱と鉄骨梁フランジ間の応力伝達メカニズムを見直し、力学的に合理的でさらに簡素化された柱梁接合部として、水平ダイアフラムを省略し鉛直スチフナを設けたディテールの設計法の提案を行った。

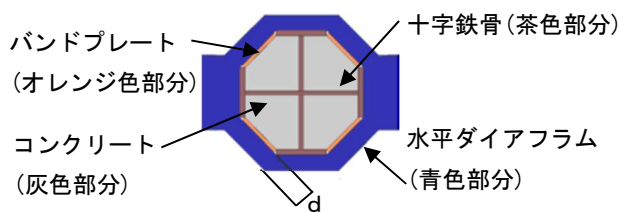


図-1 接合部詳細断面図

2. 八角形 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実験概要

2.1 実験計画

八角形 SC 柱と鉄骨梁フランジ間の応力伝達を調べるために部分試験体を製作し実験を行った。表-1 に試験体一覧を、図-1 と図-2 に接合部詳細断面図と部分試験体形状寸法を示す。鉄骨梁は梁フランジのみを再現し、十字鉄骨は CH-200×80×6×9, 高さ 200mm を用いる。バンドプレートは鋼材厚 6 mm, 高さを 25mm で統一した。試験体に用いた鋼材とコンクリートの機械的性質を表-2 と表-3 にそれぞれ示す。コンクリートの圧縮強度は 50.6N/mm² である。水平ダイアフラムと柱フランジ間は完全溶け込み溶接、バンドプレートと水平ダイアフラム間は隅肉溶接、柱フランジとバンドプレートは部分溶け込み溶接としている。図-3 に載荷方法の概略を示す。1000kN 万能試験機を用いて引張力を作用させた。柱フランジの面から 42.5mm 離れた 285mm を検長区間として伸びを変位計で測定している(図-2 の赤丸部分参照)。

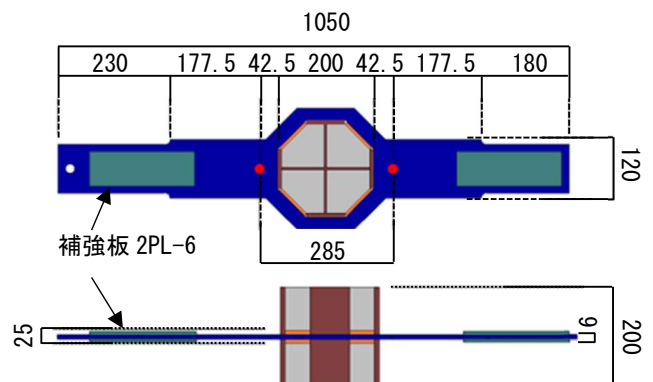


図-2 部分試験体形状寸法 (mm)

*1 福岡大学	工学部建築学科	(学生会員)
*2 福岡大学	工学部建築学科	准教授 博士(工学) (正会員)
*3 鹿児島大学大学院	理工学研究科	准教授 博士(工学) (正会員)
*4 福岡大学	工学部建築学科	教授 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体一覧

No.	試験体名	鉄骨寸法 mm	水平ダイアフラム幅mm	バンドプレート
1	B120-d25B	CH-200×80×6×9 梁断面 120×9	d=25	あり
2	B120-d30B		d=30	
3	B120-d45B		d=45	
4	B120-d30N		d=30	なし

※バンドプレート高さは 25 mm で統一

表-2 鋼材の機械的性質

使用箇所	鋼種	t (mm)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	E_s (N/mm ²)	Y.R.	ϵ_y (%)
柱ウェブ	SN490B	6	459	619	194,838	0.74	0.236
バンドプレート							
水平ダイアフラム		9	406	554	194,888	0.73	0.209
梁フランジ							
柱フランジ							

t: 板厚, σ_y : 降伏応力度, σ_u : 引張強さ, E_s : ヤング係数, Y.R.: 降伏比, ϵ_y : 降伏歪み

表-3 コンクリートの機械的性質

σ_b (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)
50.6	25,389

σ_b : 圧縮強度 E_c : ヤング係数

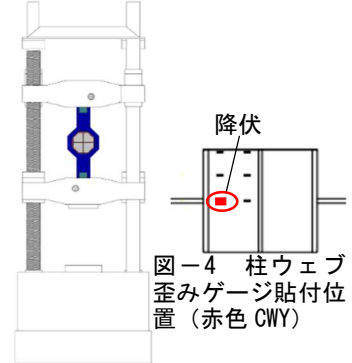
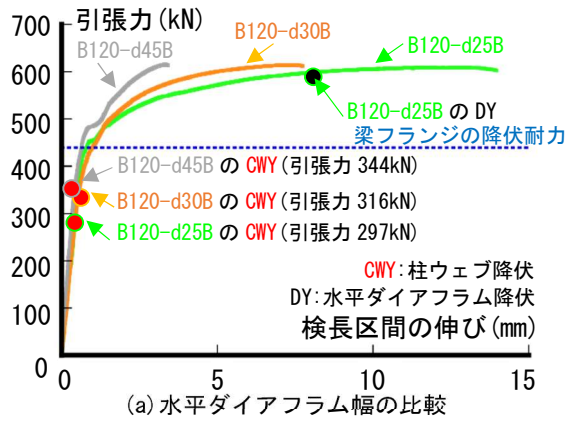
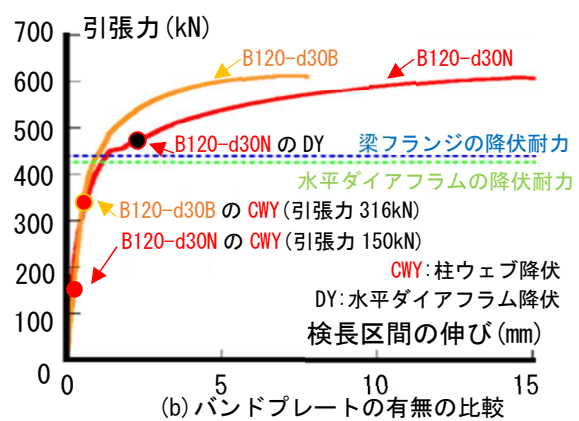


図-4 柱ウェブ歪みゲージ貼付位置 (赤色 CWY)

図-3 載荷装置



(a) 水平ダイアフラム幅の比較



(b) バンドプレートの有無の比較

図-5 荷重変形関係

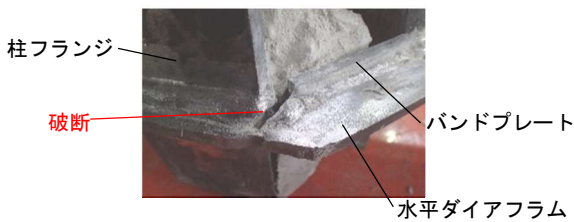


写真-1 No.1 試験体の水平ダイアフラムと溶接部破断



(a) No.4 全体 (横) (b) 柱ウェブ溶接部(コンクリートを研った後)

写真-2 No.4 試験体実験後

2.2 実験結果と考察

図-5 に引張力と検長区間の伸びの関係を示す。水平ダイアフラム幅が広がるほど検長区間の伸びを抑制することができる。写真-1 に No.1 の実験後の様子を示している。水平ダイアフラム幅 25mm は柱フランジとバンドプレートの溶接部が破断したことにより、バンドプレートの効果がなくなったため水平ダイアフラムで破断した。一方, No.2, No.3 の水平ダイアフラム幅 30mm と 45mm は柱ウェブ(図-4 梁フランジ高さ位置の柱ウェブ)が梁フランジ降伏より先に降伏したものの、水平ダイアフラムが破断することなく、梁フランジの破断

となった。図-5(b)からバンドプレートが無い場合、柱ウェブの降伏が全試験体の中で最も早く引張力が 150kN で降伏した。また、柱ウェブと柱フランジの溶接部分が大きく引張られたものの、破断はしなかった(写真-2 参照)。よって、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、水平ダイアフラム幅を広くすると検長区間の伸びを抑制することが可能であることがわかる。しかし、図-5 よりどの試験体も梁フランジの降伏よりも先に柱ウェブ(図-4 位置)が降伏し接合部の剛性低下が起きているため、柱ウェブに局所的な歪み集中を避けることが必要であると考えられる。

3 柱梁接合部の応力伝達に関する FEM 解析

3.1 解析モデル

実験に用いた試験体に対する解析モデルを作成した。実験結果より、水平ダイアフラムの破断が起きなかった水平ダイアフラム幅 30mm と 45mm を解析モデルの対象とし、コンクリートの影響と柱ウェブの応力負担状況を解析により明らかにする。柱の十字鉄骨にコンクリートを充填したモデル図-6 を「解析 SC」、コンクリートがない鉄骨のみのモデル図-7 を「解析 S」とする。コンクリート及び鋼材は 8 節点ソリッド要素を基本とし、溶接部、八角形のコンクリートの斜辺部分は 6 節点ソリッド要素としている。ソリッド要素の接触条件はコンクリートと鉄骨部分は摩擦ありの接触（摩擦係数 0.5）とし、同じ材料同士はモーメント伝達ありの接着接触とする。要素サイズは柱ウェブ厚を基本として分割数を決定した。梁端部の一端を XYZ 方向固定とし、他端に YZ 方向を固定する。

3.2 材料特性モデル

鋼材は材料試験から得られた応力-歪み関係を真応力-真歪み関係に換算したものを用いる。ヤング係数は 205000N/mm² とする。鉄骨の塑性域における構成則は von Mises の降伏条件、等方硬化則に基づいている。コンクリートの応力-歪み関係は、表-3 の材料特性を用いて、図-8 に示すように引張側はひび割れ発生後の歪み軟化を考慮し、圧縮側の圧縮強度に達した後の強度低下は修正 Ahmad モデル³⁾を用いた。ひび割れ後のせん断力保持率は 0.5 とする。コンクリートの塑性域における構成

則は線形 Mohr-Coulomb の破壊条件（内部摩擦角 30°⁴⁾、等方硬化則に基づいている。

3.3 解析条件

FEM 解析は、MSC.Marc2019⁵⁾を用いた。引張力は YZ 方向に固定した梁端部に最大変位を 30mm とし X 方向に強制変位を与え、各ステップの梁端部にかかる反力とする。収束計算の手法は Newton-Raphson 法を用いている。

4. 水平ダイアフラム付き接合部の解析結果

4.1 荷重変形関係

図-9 に水平ダイアフラム幅 30mm の実験、解析 SC、解析 S の荷重変形関係を示す。図-10 に、引張力と図-4 に示す柱ウェブ位置の歪みとの関係を示す。図-9 の解析 SC と実験の比較から、弾性域から塑性域にかけて整合性が取れていることが分かる。柱ウェブの降伏後、引張荷重が 400kN から 500kN にかけて解析 SC より実験の方が検長区間内の剛性低下が早いことが読み取れる。この部分に関しては、3 つのことが考えられる。

- 一つ目は、試験体製作に伴う初期不整により初期の段階では曲げの力が加わっており、梁の降伏が早まった。
- 二つ目は、梁フランジは溶接加工がされているため、その溶接の熱により梁フランジの降伏が早まった。
- 三つ目は、接合部のコンクリート内部にひび割れが発生してしまった。この理由に関しては、コンクリート内部にひび割れが発生していたかどうかを実験の際に確認していないため具体的な断言はできない。

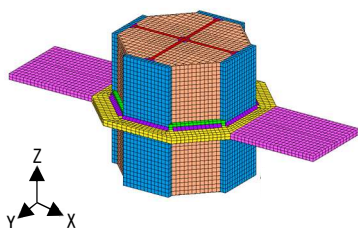


図-6 解析 SC モデル

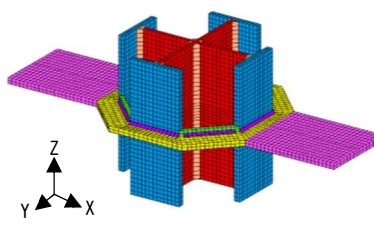


図-7 解析 S モデル

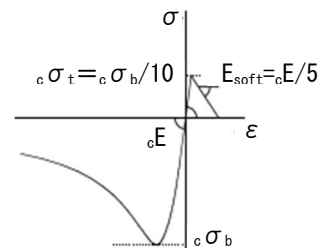


図-8 コンクリート応力-歪み関係

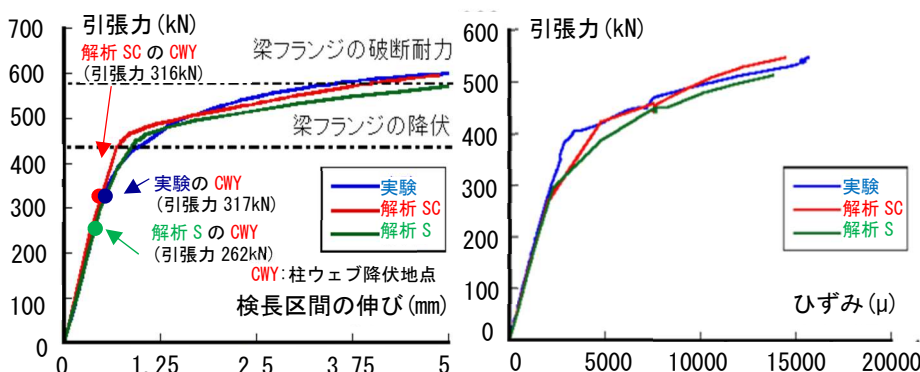


図-9 荷重変形関係

図-10 柱ウェブ荷重歪み関係

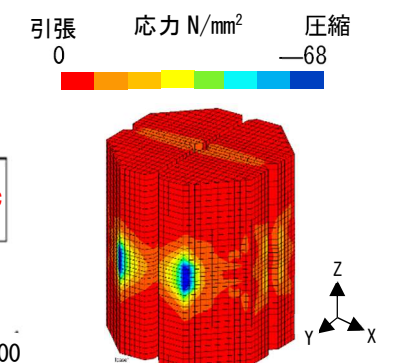


図-11 コンクリート応力 (Y 方向)

(水平ダイアフラム幅 30 mm 実験と解析比較) (図-4 位置)

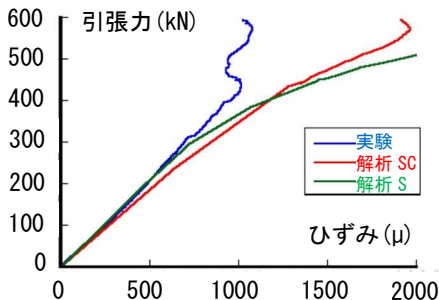


図-12 バンドプレート荷重歪み関係

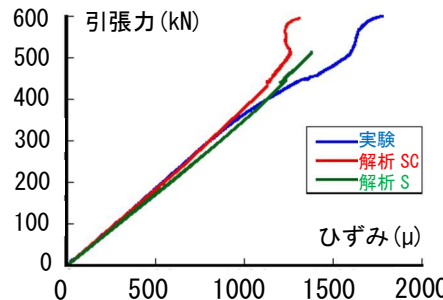


図-13 水平ダイアフラム荷重歪み関係

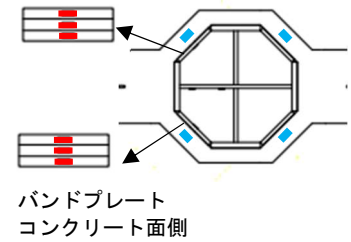


図-14 水平ダイアフラムとバンドプレートの歪み計測位置(図-12, 13)

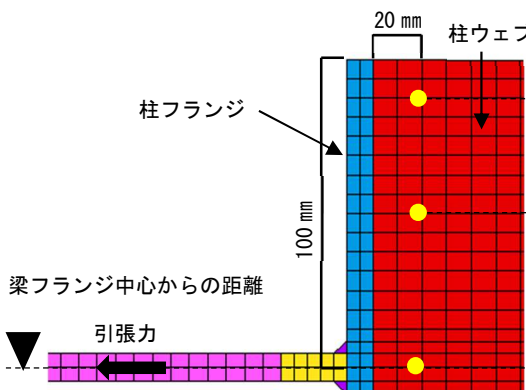


図-15 柱ウェブ断面図(黄色丸が歪みゲージ貼付位置)

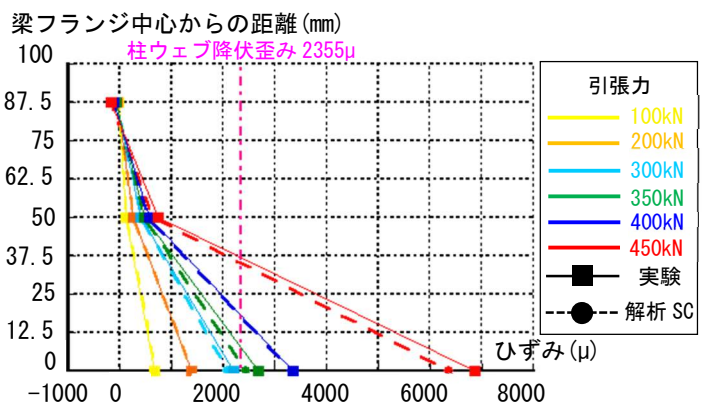


図-16 柱ウェブ歪み分布比較(実験と解析 SC)

4.2 コンクリートの有無による応力伝達性能の違い

図-9 より解析 S と実験の比較から柱ウェブの降伏まではグラフが一致していることからコンクリートの効果はまだなく力は柱ウェブに集中していると考えられる。図-11 はコンクリートに働く圧縮応力をコンター図で表している。同図より直交柱フランジからの応力をコンクリートが受けることで、コンクリートが直交柱フランジの面外変形を抑えていると考えられる。図-12 は図-14 のコンクリート側面のバンドプレートの歪み(赤色部分 6 か所)の平均を表している。同図より解析 SC は、バンドプレートの引張歪みが大きく出ている。これは直交柱フランジの面内変形が抑えられることによりバンドプレートが引張力に抵抗しているからである。しかし、実験は歪みが伸びておらずこれについては原因が分からないため今後検討する。図-13 は図-14 の水平ダイアフラムの歪み(水色部分 4 か所)の平均を表している。解析 SC では引張力 500kN 程度で水平ダイアフラムの歪みが進行していないのは、水平ダイアフラムの力がバンドプレートに流れているからである。コンクリートの存在でバンドプレートと水平ダイアフラムの面内変形が抑制される効果が出たものと考えられる。図-9, 10 から解析 S は柱ウェブが引張力 296.5kN で降伏しているのに対し、解析 SC は引張力 375kN で降伏しており、コンクリートを充填することにより柱ウェブの局所的な歪みを多少抑えられていることが分かる。

4.3 柱ウェブの荷重歪み関係

図-16 は梁フランジ端部にかかる引張力の大きさに

よって歪みゲージ貼付位置(図-15 参照)の歪みがどのくらい出ているのかを実験と解析 SC で比較したものである。縦軸に梁フランジ中心位置からの距離、横軸に歪みを示している。柱ウェブの降伏歪みを一点鎖線で示している。梁フランジ高さ位置は引張力が 300kN を超えた段階で降伏し、さらに梁フランジが降伏後の 450kN 時点で梁フランジ中心から 37.5mm 上がった箇所まで降伏している。梁フランジ高さの位置で柱ウェブの局所的な歪みが大きくなるため柱フランジと柱ウェブの溶接位置での破断が危惧される。また、87.5mm 上がった箇所までは圧縮歪みを受けている。このことから、柱ウェブが引張力を負担する有効高さは、梁フランジ中心から 87.5mm だと考えられる。本解析では柱高さを 200mm のものしか行っていないため今後柱ウェブの有効高さについては検討していく必要がある。解析と実験結果の柱ウェブの歪み分布からも水平ダイアフラム付きの接合部では柱ウェブへの歪み集中を避ける必要があることが課題であることがより明らかとなった。

水平ダイアフラム幅 45mm も同様の解析を行ったが荷重変形関係、荷重歪み関係は水平ダイアフラム幅 30mm と同様の傾向になった。水平ダイアフラムの幅を広くすることで、梁からの力を水平ダイアフラムに流し柱ウェブの負担を減らすことはできるものの、柱ウェブの局所的な歪み集中は緩和されなかった。本解析方法は荷重変形関係や荷重歪み関係が実験と解析 SC ではほぼ同じ傾向にあることから本解析結果は実験挙動を追跡できていると考えられる。

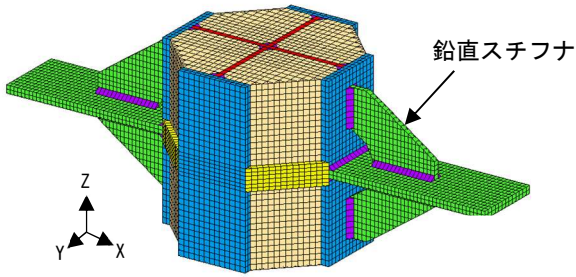


図-17 鉛直スチフナ付き接合部

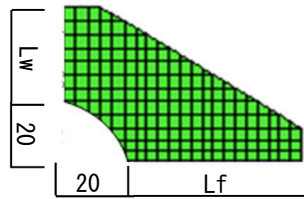


図-18 鉛直スチフナ寸法 (mm)

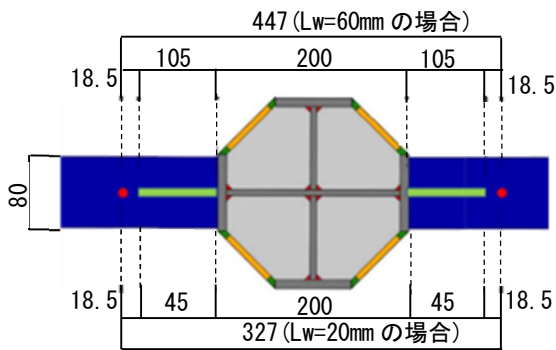


図-19 検長区間 (mm)

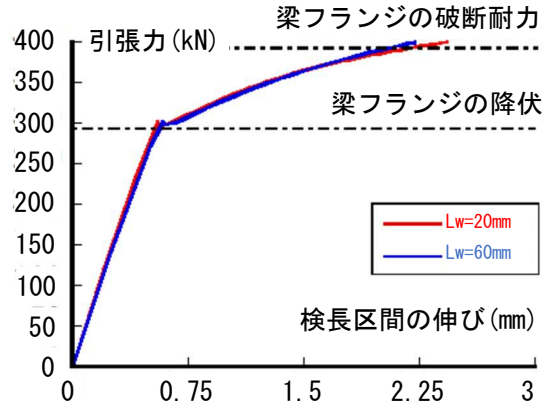


図-20 荷重変形関係 (鉛直スチフナ)

梁フランジ中心からの距離 (mm)

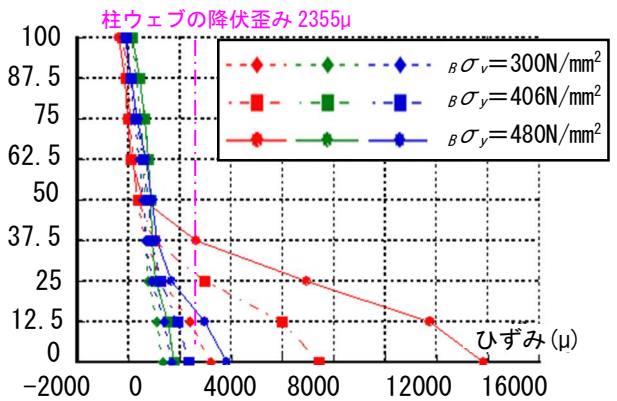


図-21 柱ウェブ歪み分布 (水平ダイアフラムと鉛直スチフナ比較)

5. 力学的合理性と簡素化を目指した柱梁接合部の提案

5.1 解析モデル

梁フランジから柱ウェブへの応力伝達において局所的な応力集中を緩和し、かつより簡素化した柱梁接合部とした図-17に示す接合部を提案する。水平ダイアフラムの代わりに柱ウェブの広い範囲に直接応力を流す役割として鉛直スチフナを設ける。梁フランジ下の鉛直スチフナは梁ウェブがその効果を発揮すると考えている。梁幅が柱フランジ幅よりも小さい条件では水平ダイアフラムが省略することができると考え、その条件下で解析を行うため梁幅をSC柱と同じ幅80mmとした。鉛直スチフナの寸法を図-18に示す。鉛直スチフナの寸法及び溶接長さは次のようにして算出した。施工面も考慮し、スカラップは20mm取るものとした。

$$(B_f \times t_f \times \sigma_{fy} - P_0) \div 2 = P_s \quad (1)$$

$$L_w \geq \frac{P_s}{t_s \times \sigma_{sy}} \quad (2)$$

$$L_f \geq \frac{P_s}{0.7 \times s \times \sigma_{sy} \times 2} + 2 \times s \quad (3)$$

ここで、 B_f : 梁フランジ幅、 t_f : 梁フランジ厚、 σ_{fy} : 梁フランジの降伏応力度、 P_0 : 梁フランジから柱ウェブに直

接流れる力(鉛直スチフナと梁フランジの剛性により決まる)、 P_s : 鉛直スチフナ1枚が負担する力、 L_w : 柱フランジに溶接する鉛直スチフナの完全溶け込み溶接長さ、 t_s : 鉛直スチフナ厚、 σ_{sy} : 鉛直スチフナの降伏応力度、 s : 隅肉溶接サイズ、 L_f : 梁フランジに溶接する鉛直スチフナの隅肉溶接長さとする。

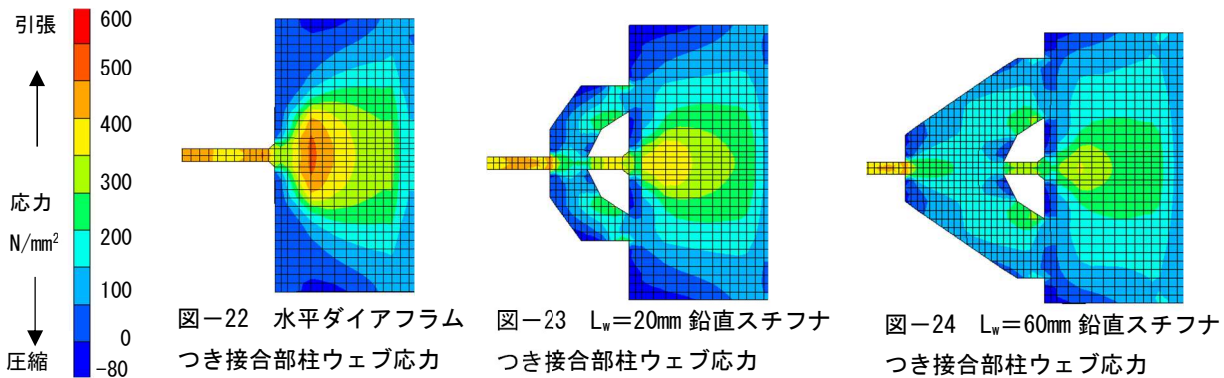
本解析では梁からの力のすべてが鉛直スチフナを通り柱ウェブに流れる $P_0=0$ の場合 ($L_w=60\text{mm}$, $L_f=85\text{mm}$) と梁フランジからの力の1/2が鉛直スチフナを通り柱ウェブに流れる P_0 が梁フランジの抵抗力の1/2の場合 ($L_w=20\text{mm}$, $L_f=25\text{mm}$) の2つを解析寸法とした。また、梁フランジ厚 (B_f) を9mm、鉛直スチフナ厚 (t_s) は柱ウェブ厚と同じ6mmとした。要素サイズ、接触条件、支持条件は第3章と同様とする。

5.2 材料特性モデル

材料特性モデルは第3章と同様のものを用いる。鉛直スチフナの材料特性は、梁フランジと同じとする。

5.3 解析条件

解析条件は第3章と同様とする。図-19より鉛直スチフナから18.5mm離れた位置で $L_w=60\text{mm}$ の場合は447mm、 $L_w=20\text{mm}$ の場合は327mmを検長区間とする。



6. 鉛直スチフナ付きの解析結果

6.1 荷重変形関係

図-20 に引張力と検長区間の伸びの関係を示す。L_w=60mm と L_w=20mm は、どちらも梁フランジの降伏までは弾性を保っており弾性領域では大きな差がない。鉛直スチフナの寸法に差があるにも関わらず梁フランジ降伏後の荷重変形関係が一致しているのは、測定している梁フランジの位置で降伏しており、梁フランジの変形が含まれているからである。

6.2 柱ウェブの荷重歪み関係

鉛直スチフナ付きの柱梁接合部の柱ウェブ(L_w=60mm と L_w=20mm) と水平ダイアフラム付きの接合部の柱ウェブの歪みの比較を図-21 に示す。縦横軸は第4章と同様、柱ウェブ位置は図-15 の梁フランジ中心から 12.5mm 間隔で取る。梁フランジの幅が異なるため、梁フランジの応力で比較を行った。色ごとに接合部の種類を分け、さらに実線が 480N/mm² 一点破線が梁フランジの降伏応力 406N/mm²、破線が 300 N/mm² と梁フランジに流れる応力 ($\beta\sigma_y$) ごとに分けて示している。鉛直スチフナ付きの接合部は、柱ウェブに均一に引張歪みが出ている。溶接 L_w=60mm が L_w=20mm よりもより柱ウェブの歪みを抑制している。さらに梁フランジが降伏した後も柱ウェブが降伏していない。また図-22, 23, 24 は梁フランジ降伏応力 406N/mm² 時の柱ウェブの応力コンター図であり、これらからも鉛直スチフナつき接合部は梁フランジからの力を柱ウェブの広範囲に流していることがわかる。これらのことから鉛直スチフナを設けることにより柱ウェブの局所的な応力集中を防ぐことができ、それにより柱フランジと柱ウェブの溶接部の歪みを緩和させ、この部分での溶接破断の危惧を緩和できると考えられる。さらに、接合部の耐力を上昇させ梁降伏を先行させることができると考えられる。

7. 結論

SC 柱と鉄骨梁から構成された柱梁接合部の引張実験及び FEM 解析を行った結果、今回の実験及び解析条件では以下のことが明らかとなった。

- 1) 高さ 25mm のバンドプレートが付いていても水平ダイアフラム幅 25mm では梁フランジの降伏まで耐力を発揮しているが、検長区間の伸びが大きくなるため水平ダイアフラム幅は 30mm 程度必要である。
- 2) 水平ダイアフラム幅 30mm でバンドプレートが無かった場合、梁フランジ降伏後早期に検長区間内の剛性が低下することが分かった。
- 3) コンクリートの存在により柱直交フランジの面外剛性が上がり、検長区間の剛性を上昇させられるが、水平ダイアフラムの拡張では柱ウェブの歪み集中を緩和させることはできない。
- 4) 梁フランジの降伏応力の半分を鉛直スチフナで負担させる設計とすれば、柱ウェブの中心部の歪みを緩和でき、柱ウェブを弾性に留めることができる。
- 5) 鉛直スチフナを設けることでより力学的に合理的で、より簡素化した柱梁接合部の設計が可能となる。また、鉛直スチフナが梁端ヒンジロケーションにも役立ち、梁端溶接部での破断の危惧を避けることができる。鉛直スチフナの最適寸法や応力負担状況といった詳細な部分は今後研究していく必要がある。

参考文献

- 1) 倉富洋, 堀純一, 田中照久: 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性状, 日本建築学会構造系論文集, Vol.86, No.780, 331-341, Feb.2021
- 2) 倉富洋, 堀純一, 田中照久, 淵上大貴: 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研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp. 1057~1062, 2017.7
- 3) 長沼一洋: 三軸圧縮下の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 474 号, pp163-170, 1995.8
- 4) 吉田幸夫, 水野英二, 畑中重光: 異なる形状比を有する円柱コンクリートの三次元 FEM 一軸圧縮解析, コンクリート工学年次論文集 vol26, No.2, pp19-24, 2004
- 5) MSC Software: Marc Mentat 2019.1.0