

論文 高強度鉄筋を用いた柱 RC-梁 S 架構の接合部せん断耐力に対する解析的検討

渋市 克彦*1・米澤 健次*2・穴吹 拓也*1・三井 達雄*3

要旨: 柱 RC 梁 S の混合構造架構において、S 梁が柱内を貫通せず高強度鉄筋によって接続される工法を考案した。本工法を用いた柱梁接合部の構造性能の評価法について、実験との比較により解析精度を検証した上で、非線形 FEM を用いた解析的検討を行った。解析により、以下の3点がわかった。①直交梁が取付くことで接合部せん断耐力が上昇する。②設計時の接合部入力せん断力の算定における応力中心間距離は、引張主筋の重心位置～圧縮フランジ芯間距離とすれば適切である。③柱内接合筋の設計用付着力は圧縮側接合筋の存在応力がほぼゼロとして算定できる。

キーワード: 混合構造架構, FEM 解析, 接合部せん断耐力, プレキャスト化工法

1. はじめに

近年、物流倉庫などの物件を中心に、柱を RC 造、梁を S 造とした混合構造架構（以後、RC-S 架構と称す）が用いられている。RC-S 架構では、S 梁が RC 柱内を貫通する納まりとするのが一般的であるが、この場合柱主筋の配置箇所が制限され、またプレキャスト化が困難であるなどの難点がある。そこで、S 梁を柱フェース位置で止める工法（以後、本工法と称す）を考案した。工法の納まりディテールを図-1に示す。本工法において、S 梁は接合筋と称する高強度鉄筋を介して柱と接続される。接合筋は、左右 S 梁のフランジに溶接したスリーブ内および柱内を貫通させ、空隙にグラウトを充填することにより柱梁を一体化する。また S 梁端部にはエンドプレートと称す鋼板を溶接し、RC 柱とエンドプレート間にコッターを設けてせん断伝達を行う。本工法を用いることにより、柱主筋の配筋自由度が向上し、またプレキャスト化が容易になる。

本工法を用いた場合、接合部せん断耐力の評価手法が課題となる。S 梁が柱内を貫通するディテールでは、既往の研究例も多く、接合部に対する評価手法が提案されている¹⁾。しかし、本工法ではふさぎ板や柱内を貫通するウェブがない。「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説（以後、靱性指針）」²⁾による RC 柱梁接合部の設計法に準じるとしても、S 梁断面の外側にスリーブやエンドプレートが取付く納まりであるため、接合部のせいや有効幅を定める根拠が乏しく、また直交梁が取付いた際の効果も不明である。そこで、本研究では、本工法による柱梁接合部の構造性能について、非線形 FEM 解析を用いて評価法を検討した。

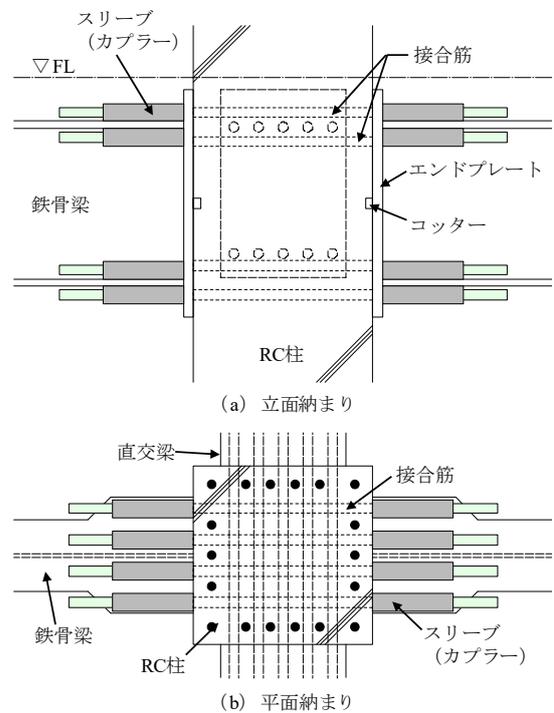


図-1 本工法のディテール

2. 解析モデル

2.1 モデル化条件

解析パラメータを表-1に示す。本解析では荷重を行う主架構は柱を RC 造、梁を S 造とし、直交梁がなしの場合 (Case1)、RC 造の直交梁が取り付く場合 (Case2)、S 造の梁が取り付く場合 (Case3) の3ケースの解析を行った。

S 造の梁はいずれも本工法を用いて柱と接続される。解析モデルの一例を図-2に、各ケースの柱梁接合部拡大図を図-3に示す。RC の柱梁、S 梁のフランジ、スリー

*1 (株)大林組 技術研究所 修(工) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 工博 (正会員)

*3 (株)大林組 大阪本店 建築事業部構造設計部 修(工) (正会員)

ブは六面体要素でモデル化し、S 梁のウェブおよびエンドプレートには四辺形シェル要素、RC 造柱梁の主筋および接合筋にはトラス要素を用いた。RC 造柱梁のせん断補強筋については、六面体要素内の埋込鉄筋としてモデル化した。また、接合筋とスリーブ内グラウトの間はすべりを考慮しない完全付着としたが、接合筋と RC 柱コンクリートの間には接合要素を配して付着—すべりを考慮した。エンドプレートと RC 躯体の界面には面状の接合要素を配し、接触、剥離、摩擦を考慮した。ここで、摩擦係数を 0.4 と仮定した。なお、幾何学的な対称性を考慮し、荷重梁幅方向に半分のみをモデル化した。解析モデルの諸元を表-2 に示す。解析は所定の圧縮軸力を柱頭に載荷後、梁端をピンローラ支持として、柱頭の水平力を強制変位により加える単調荷重を行った。

2.2 材料強度および構成則

コンクリートの圧縮強度点までの応力—ひずみ関係には修正 Ahmad モデル³⁾を用い、軟化域では破壊エネルギーに基づく中村・楢貝モデル⁴⁾を用いた。また、テンションステイフニング特性として長沼・山口モデル⁵⁾、ひび割れ後のせん断伝達特性として長沼モデル⁶⁾を採用した。各種の鉄筋を含む鋼材については、本解析では柱梁接合部の構造性能に着目しているため、すべて弾性を仮定した。また、接合部内のコンクリートと接合筋の付着応力度は、靱性指針²⁾に準じて 12.9N/mm^2 とした。

3. 解析精度の妥当性検証

3.1 検証実験

解析の妥当性を検証するため、本工法を用いた RC-S 架構の縮小試験体による構造実験を実施し、解析結果と比較した。検証解析におけるモデル化の条件、材料構成則は前述の解析と同様である。試験体の諸元を表-3 に、試験体接合部の拡大図を図-4 に示す。試験体は解析 Case1 を約 1/2.5 に縮小したもので、直交梁はない。破壊

モードは、接合部せん断破壊が先行するように設計した。実験では柱頭および柱脚を面座によりピン固定した状

表-1 解析パラメータ

解析ケース	柱	荷重梁	直交梁
Case1	RC造	S造	なし
Case2			RC造
Case3			S造

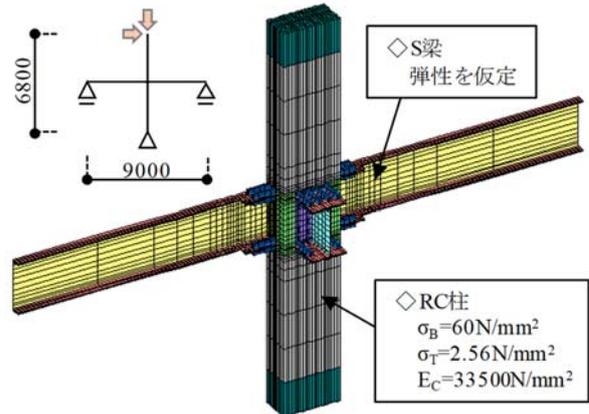


図-2 解析モデルの一例

表-2 解析モデルの諸元

RC柱	断面	1000mm×1000mm
	主筋	16-D38 (pg=1.82%)
	せん断補強筋	pw=0.2%
	軸力比	0.2
荷重S梁	断面	BH-900×600-300×16×28 (梁端部拡幅)
	接合筋	上下とも4-D41 + 2-D41
	スパン	9000mm
直交RC梁	断面	B×D=600mm×898mm
	主筋	上下とも5+1-D41
直交S梁	せん断補強筋	pw=0.77%
直交S梁	スパン以外荷重S梁と同様	

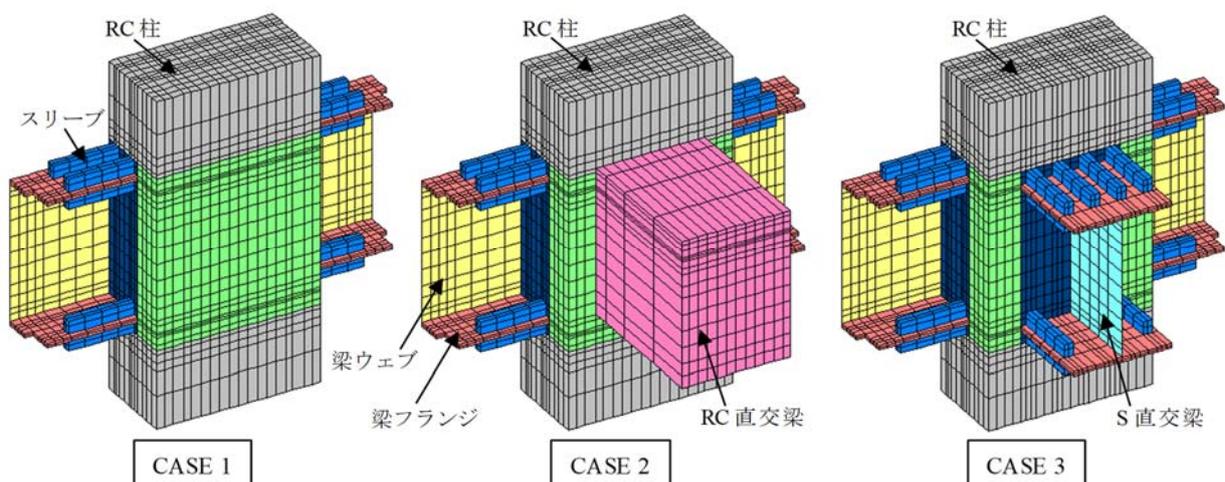


図-3 各ケースの柱梁接合部拡大図

態で軸力を加えたのち、梁端部のクレビスを接続し、それに連なる2台のジャッキにより荷重を行った。荷重は、層間変形角 $R=1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/33$ のサイクルそれぞれ正負2回ずつ繰り返したのち、正側に $R=1/20$ まで押し切った。

3.2 実験結果と解析結果の比較

実験および解析における層せん断力-層間変形角関係を図-5に示す。ここで、実験は繰り返し荷重を行っているが、既往の研究⁷⁾を参考とし、最大耐力に関しては繰り返し荷重の影響は小さいものと考え、単調荷重解析結果と比較した。解析は、最大耐力以降の変形性能を過小評価する傾向を示したが、最大耐力および最大耐力以前の挙動については、実験を良好な精度で再現できた。本稿では接合部せん断耐力の評価を目的としていることから、本解析を用いた検討が可能であると判断した。

4. 解析結果

4.1 直交梁の効果について

各解析ケースの柱せん断力-層間変形角関係を図-6に、接合部せん断力-接合部せん断変形角関係を図-7に、接合部せん断耐力の一覧を表-4に示す。ここで、解析における接合部せん断耐力は、接合部の高さ中心位置における各要素のせん断応力を累計することにより算定した。また接合部せん断変形角は、柱内部のコンクリート要素を構成する4節点の相対変位より算出した。靱性指針におけるRC造柱梁接合部のせん断耐力評価式では、直交梁の有無による補正係数 ϕ を用い、両側直交梁付き接合部以外の場合は0.85 ($1/0.85=1.18$)の係数を乗じ耐力を低減することとしている。本解析において、RC造の直交梁を有するCase2およびS造の直交梁を有するCase3は、直交梁がないCase1と比較して1.16~1.17倍の接合部せん断耐力を発揮しており、直交梁の効果については靱性指針の算定法とよく対応している。

次に、直交梁の効果が発揮されるメカニズムについて考察した。Case1とCase2の接合部高さ中心位置における水平断面のせん断応力コンターを図-8に示す。図より、Case2では直交梁にもせん断応力が生じていることが確認できる。すなわち、RC造の直交梁が取付くことにより接合部のせん断耐力が上昇するのは、せん断応力を伝達する断面積が拡大するためであると考えられる。一方で、S造の梁が直交梁として取付く場合は、せん断応力の上昇分は直交梁のエンドプレートが負担するものと推察される。柱とエンドプレート間の接合要素の法線方向応力コンターを図-9に、エンドプレートのせん断応力コンターを図-10に示す。図-9より、直交梁エンドプレートの接合筋を配した位置において、柱界面に対する法線方向応力が大きくなっていることから、柱梁接合

表-3 試験体の諸元

RC柱	断面	400mm×400mm
	主筋	16-D38 (pg=1.82%)
	せん断補強筋	目-D6@50 (pw=0.64%)
	軸力比	0.2
	階高	2700mm
荷重S梁	コンクリート圧縮強度	36N/mm ²
	断面	BH-360×280×9×16 (SM490A)
	接合筋	上下とも3-D22 + 2-D22
	スパン	4000mm

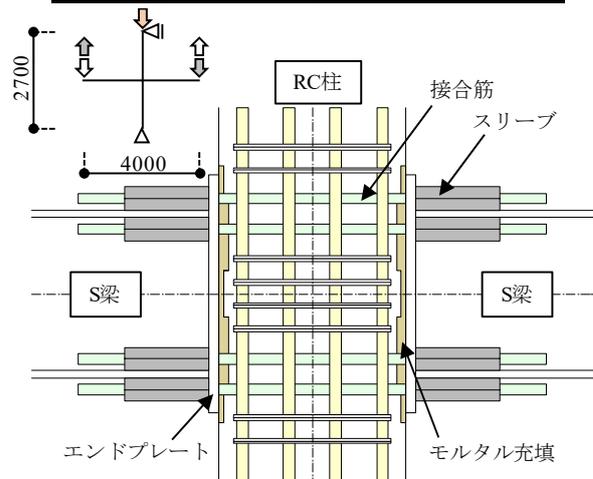


図-4 試験体接合部の拡大図

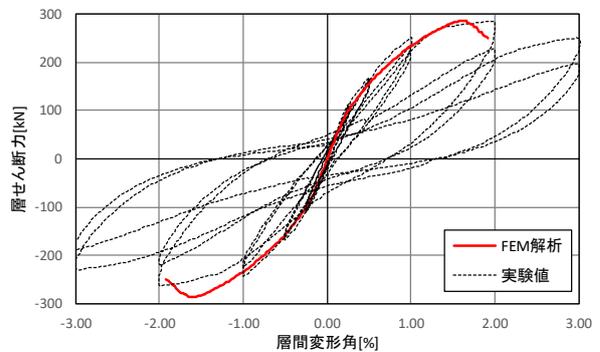


図-5 検証実験の層せん断力-層間変形角関係

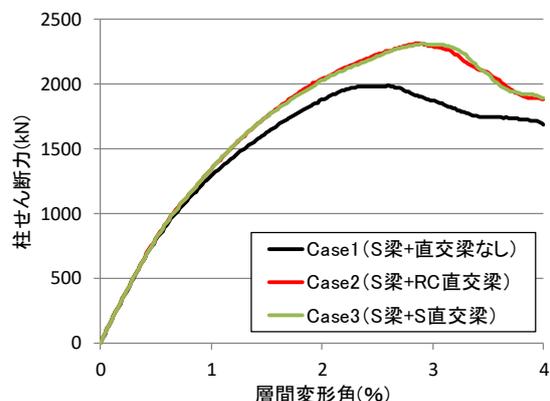


図-6 解析における層せん断力-層間変形角関係

部が損傷することによる膨張を接合筋が拘束していることがわかる。また図-10より、接合筋がシアキーとなり、接合部コンクリートの変形が直交梁エンドプレートに伝達されせん断応力を負担していることがわかる。これらの効果により、接合部せん断耐力が向上したものと考えられる。

直交梁エンドプレートの厚さが接合部せん断耐力に与える影響を検証するため、Case3の直交梁エンドプレート厚さを半分の14mmとしたCase3-および倍の56mmとしたCase3+との比較を行った。各ケースの接合部せん断力-接合部せん断変形角関係を図-11に示す。図には、直交梁エンドプレートの負担せん断力も併せて示す。直交梁エンドプレートの厚さを半分あるいは倍にしても、接合部せん断耐力およびエンドプレートの負担せん断力に大きな差は生じない結果となった。ここで、柱とエンドプレート界面の相対ずれを確認するため、直交エンドプレートの負担せん断力と接合部外側のコンクリート節点変位から算出した接合部せん断変形角の関係を図-12に、直交エンドプレートの高さ方向中心位置での平均せん断ひずみと接合部外側のコンクリート節点変位から算出した接合部せん断変形角の関係を図-13に、図-12および図-13にプロットした点における柱外側コンクリートの損傷状況を図-14に示す。図-12より、いずれのケースも直交エンドプレートの負担せん断力が

1400kN程度で頭打ちとなっているにも関わらず、コンクリートのせん断変形が進展していることがわかる。一方で図-13を見ると、エンドプレートのせん断変形はある程度のところ頭打ちとなるがコンクリートのせん断変形は進展しており、図-14より頭打ちとなる以前に接合筋周囲のコンクリートが圧縮軟化に至っていることがわかる。以上より、接合部が破壊に至るときには、直交エンドプレートにせん断力を伝達する直交接合筋周囲のコ

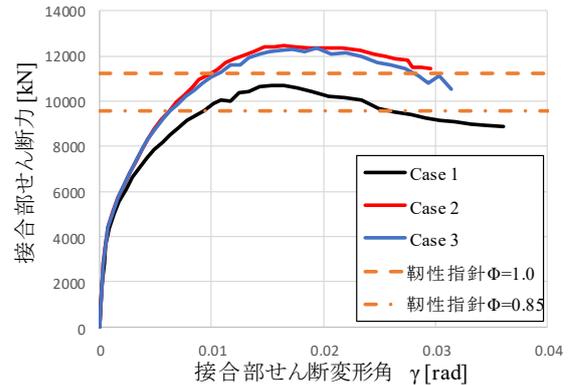


図-7 接合部せん断力-接合部せん断変形角関係

表-4 接合部せん断耐力の一覧

解析ケース	Case1	Case2	Case3
接合部せん断耐力[kN]	10673	12448	12360
Case1との比(直交梁効果)	1.00	1.17	1.16
靱性指針による計算値	9557	11243	11243

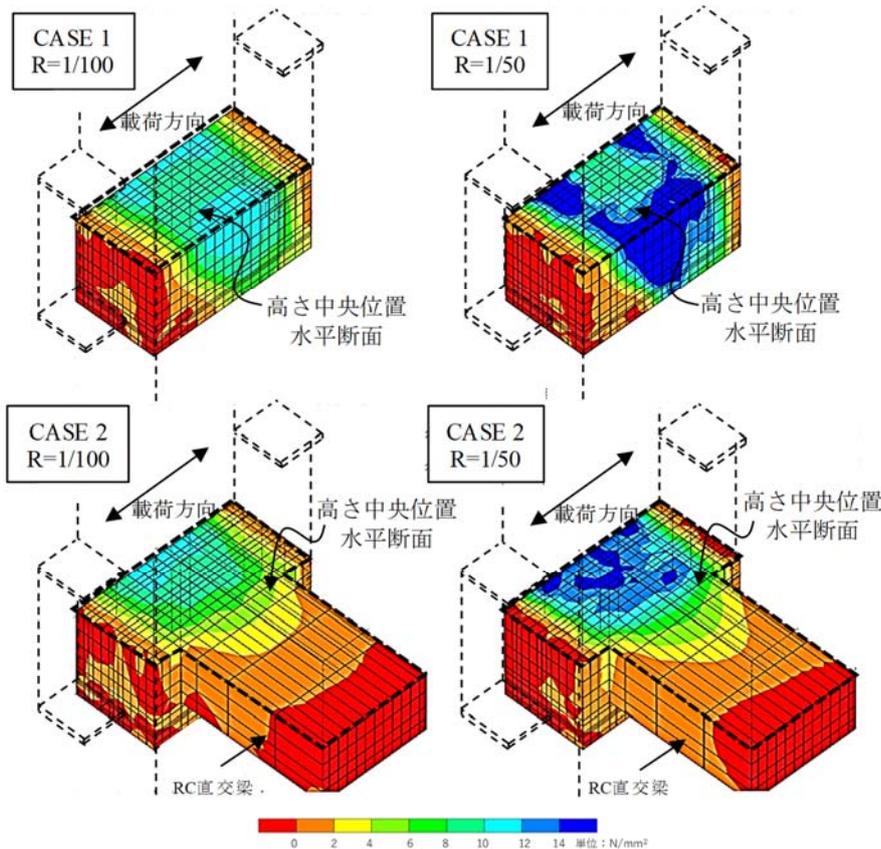


図-8 接合部コンクリートの水平断面せん断応力コンター

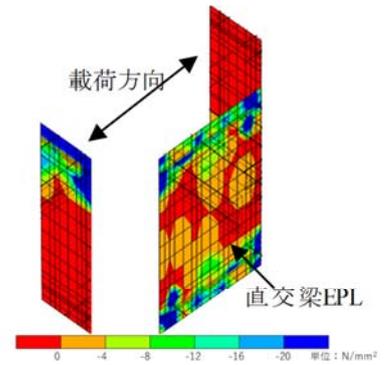


図-9 接合要素の法線方向応力コンター

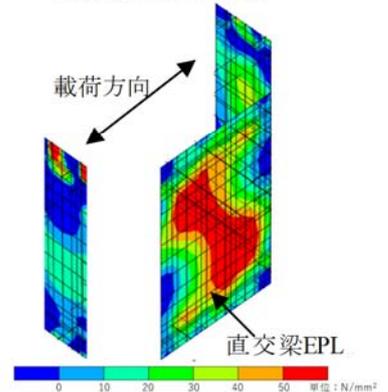


図-10 エンドプレートのせん断応力コンター

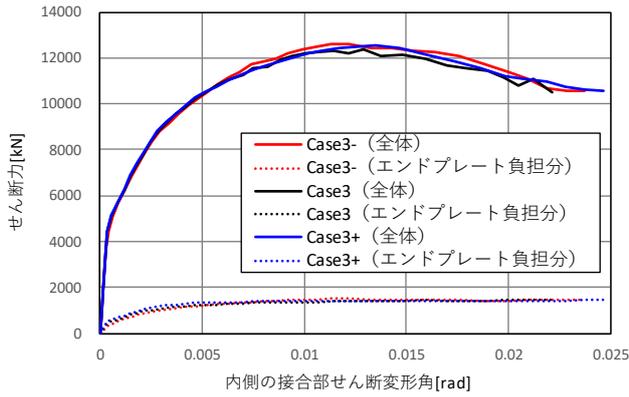


図-11 接合部せん断力-接合部せん断変形角関係

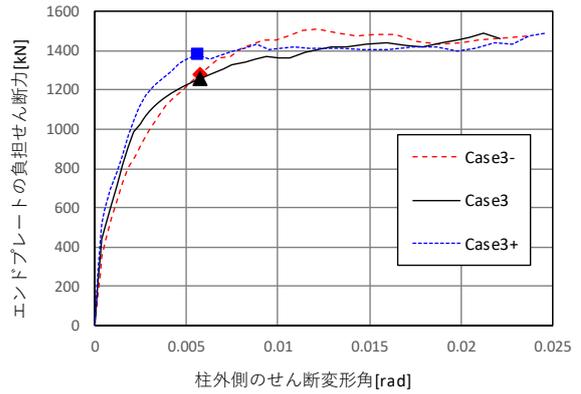


図-12 エンドプレート負担せん断力-接合部せん断変形角関係

ンクリートが破壊するため、直交エンドプレートの厚さを増しても、接合部せん断耐力は上昇しないことがわかった。

4.2 接合部せん断耐力の評価法

一般の設計法において、接合部に生じるせん断力 Q_p は、柱せん断力 Q_c および梁せん断力 Q_b と梁せん断スパン l より式(1)によって算出する。ただし、本工法の納まりにおいて応力中心間距離 j_l をどう設定するかが課題である。

$$Q_p = \frac{2 \cdot Q_b \cdot l}{j_l} - Q_c \quad (1)$$

一方FEM解析においては、図-7などに示したように要素に生じるせん断応力を累計することによって、接合部せん断力を算出でき、これを Q_{p_ELM} とする。ここで、 j_l を引張側接合筋重心位置～圧縮側フランジ芯間距離と仮定した場合 (Q_{p1}) と、引張側一段目接合筋～圧縮フランジ芯間距離と仮定した場合 (Q_{p2}) において、それぞれ式(1)より接合部せん断力を求め、 Q_{p_ELM} との比較を行った。比較の一例として、Case1の接合部せん断力-層間変形角関係を図-15に、各ケースの最大せん断力の比較を表-5に示す。図より、引張側は一段目接合筋位置とすると Q_{p_ELM} とよく対応することがわかる。ただし設計の際には、引張側を接合筋重心位置とすると安全側に評価できるものと考えられる。

4.3 接合筋の付着力の算定法

柱内接合筋の応力分布の一例として、Case1の接合部せん断耐力が最大となったステップにおける応力分布を図-16に示す。図より、最大耐力時においても、圧縮側の接合筋応力がほぼゼロであることがわかる。これは、本工法においては圧縮力がほとんど梁フランジによって伝達されるため、接合筋には圧縮応力が生じないものと推察される。

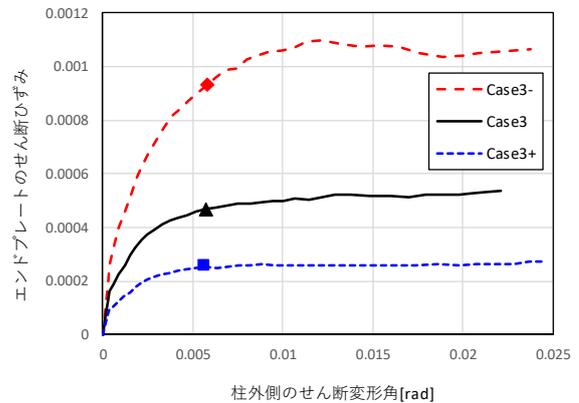
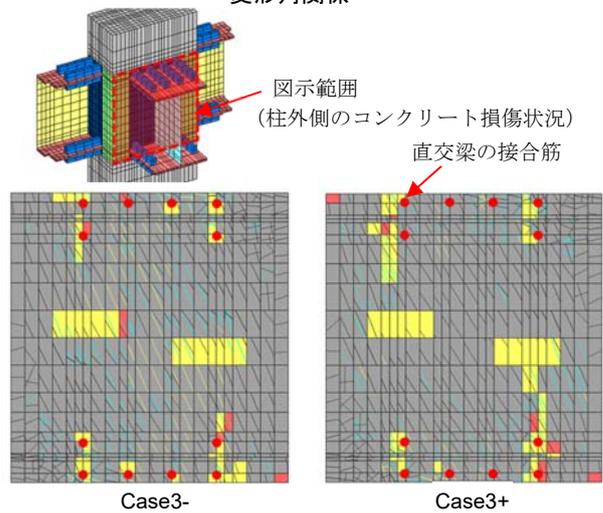


図-13 エンドプレートせん断ひずみ-接合部せん断変形角関係



※黄色および赤色：圧縮軟化したコンクリート要素

図-14 コンクリート損傷状況

柱内通し主筋の設計用付着応力度 τ_j を求める際には、式(2)のように複筋比 γ により圧縮側鉄筋の存在応力を引張側と同等と仮定することが一般的である。

$$\tau_j = \frac{(1 + \gamma) \cdot \sigma_{yu} \cdot d_b}{4D} \quad (2)$$

ここに、 σ_{yu} ：鉄筋の存在応力、 d_b ：鉄筋径、 D ：柱せい

表-5 Qp と Qp_ELM の比較
(最大せん断力の比較)

解析ケース	Qp_ELM	Qp1	Qp2
Case1	10673	11656	11000
Case2	13421	13569	12806
Case3	12360	13575	12812

単位:kN

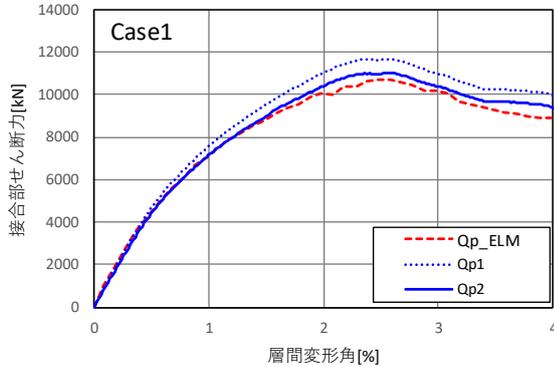


図-15 Qp と Qp_ELM の比較

(接合部せん断力-層間変形角関係の一例)

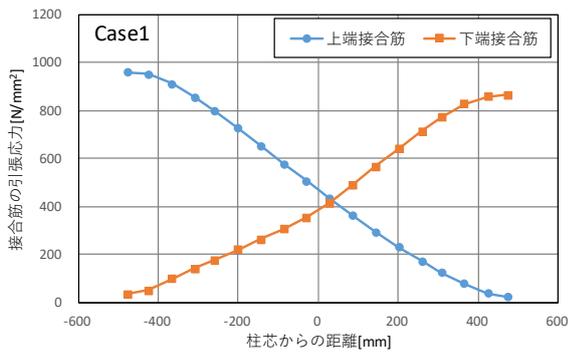


図-16 柱内接合筋の応力分布

しかしながら本工法を用いる場合、柱内接合筋の設計用付着応力度を設定する際には、引張側を降伏強度、圧縮側をゼロとして応力勾配を定める(すなわち式(2)の $\gamma=0$ とする)ことができるものと考えられる。

5. まとめ

接合筋を用いて柱梁を接続した RC-S 架構柱梁接合部の構造性能に対する評価法について、非線形 FEM 解析を用いて検討した。本検討により得られた知見を以下にまとめる。

(1) 本工法を用いた架構に RC 造の直交梁が取付いた場

合、せん断応力を負担する断面積が増えることにより、接合部せん断強度が上昇する。

- (2) 本工法を用いた架構に S 造の直交梁が取付いた場合、直交梁の接合筋を介してエンドプレートに応力伝達され、接合部せん断強度が上昇する。なお、エンドプレートが負担できる応力はコンクリート側で決まる場合、エンドプレート厚さは増しても接合部せん断強度は上昇しない。
- (3) 本工法を用いた架構の直交梁付き接合部せん断強度は、靱性指針に準じた算定値と概ね整合した。
- (4) 本工法を用いた架構における設計用の接合部入力せん断力は、応力中心間距離を引張側接合筋重心位置～圧縮側フランジ芯とすると安全側に設計できる。
- (5) 柱内接合筋の設計用付着応力度を設定する際には、引張側を降伏強度、圧縮側をゼロとして応力勾配を定められるものと考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造の設計と施工, 2001 年
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999 年
- 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, pp.163-170, 1995.8
- 4) H.Nakamura and T.Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 5) 長沼一洋, 山口恒雄：面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.649-650, 1990.10
- 6) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-48, 1991.3
- 7) 柏崎隆志, 野口博：超高強度鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部のせん断性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol.13, No.2, 1991