

論文 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部のせん断耐力に関する解析的研究

入澤 尚人*1・柏崎 隆志*2・野口 博*3・高津 比呂人*4

要旨：鋼繊維混入超高強度コンクリート(Fc150)を用いた柱・梁接合部について、鋼繊維混入量と梁幅を変数とした三次元 FEM 解析を行った。その結果、コンクリートに鋼繊維を混入した場合、靱性保証型指針を基にした柱・梁接合部の有効幅 b_j とせん断強度 τ_j が向上し、柱・梁接合部せん断耐力が向上するのを確認した。また、鋼繊維混入により梁危険断面位置での応力度分布が変化し、梁主筋の付着力によって接合部に入力されるせん断力の割合が減少したのを確認した。

キーワード：超高強度コンクリート、鋼繊維、柱・梁接合部、有限要素法、三次元解析

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート(以下、RC) 造建物では設計基準強度が $100\text{N/mm}^2(\text{Fc}100)$ のコンクリートが実用化されているが、設計クライテリアを満足するためには多大な横補強筋量が必要となり、現実的には配筋が不可能となる場合が考えられる。そこで、補強筋の低減、コンクリートのひび割れ損傷制御をねらいとして、鋼繊維(SF)を混入した超高強度コンクリートの開発が進められており、実際の設計に採用されている。本研究では、鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部についての高津ら¹⁾、高橋ら²⁾、坂下ら³⁾の研究で確認されている鋼繊維混入による柱・梁接合部のせん断耐力の向上の原因等について三次元 FEM 解析を行い検討した。

対象とした試験体は高津らによる実験¹⁾での試験体である。図-1に実験試験体図を示す。実験における試験体の加力は梁両端に設置したジャッキによる変位制御とし、柱には圧縮軸力比 0.01 の一定軸力を導入した。

実験では梁幅 250mm の試験体について鋼繊維混入率 (0.0%, 0.5%, 1.0%) の変動因子を与えている。本研究では梁幅 (152.5mm, 250mm), SF 混入量 (0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%) のように変動因子を増やし解析を行った。本研究での試験体一覧を表-1に示す。まず、実験で行われている試験体を対象としてコンクリートの材料特性等を実験値に合わせ後述するモデルで解析を行い、実験と解析の最大耐力と初期剛性の整合性を確かめた上で、本論文では鋼繊維混入効果のみを確認するためにコンクリートの材料特性等を実験での試験体 J150-0.0(鋼繊維無混入)に統一して解析を行いその結果を示す。また、仮想試験体である 152.5-N シリーズについては、主筋量や補強筋量を 250-N シリーズと同等にして解析を行った。表-2に全試験体共通事項を示す。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

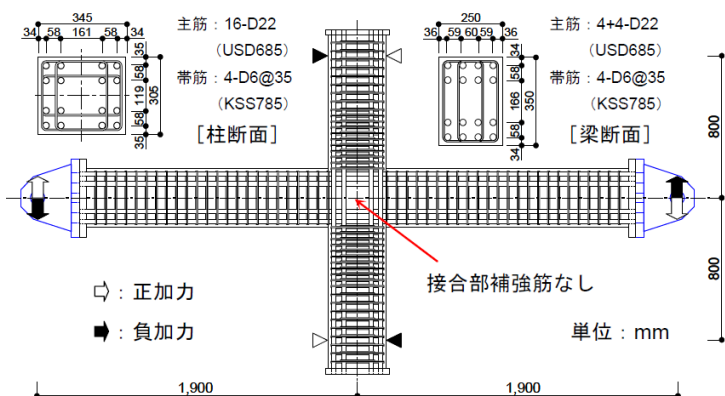


図 - 1 実験試験体

表 - 2 全試験体共通事項

コンクリート圧縮強度(N/mm ²)	144.6
コンクリートヤング係数(N/mm ²)	4.09×10^4
主筋降伏強度(N/mm ²)	714.4
主筋ヤング係数(N/mm ²)	1.96×10^5
補強筋降伏強度(N/mm ²)	984.8
補強筋ヤング係数(N/mm ²)	1.96×10^5
梁柱主筋配筋	4+4-D22(USD685)
梁柱補強筋配筋	4-D6@35(KSS785)

表 - 1 試験体一覧

試験体名称	250-N-0.0	250-N-0.5	250-N-1.0	250-N-1.5	152.5-N-0.0	152.5-N-0.5	152.5-N-1.0	152.5-N-1.5
	250(mm)				152.5(mm)			
梁幅	250(mm)				152.5(mm)			
鋼繊維混入率	0.0%	0.5%	1.0%	1.5%	0.0%	0.5%	1.0%	1.5%
(引張軟化域)	1.00	0.23	0.14	0.01	1.00	0.23	0.14	0.01
森田・角モデルのパラメータ α	1.00	0.23	0.14	0.01	1.00	0.23	0.14	0.01

*1 株式会社 大林組 (前千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 建築学コース) 工修 (正会員)
 *2 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 建築学コース 助教 工修 (正会員)
 *3 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 建築学コース 教授 工博 (正会員)
 *4 株式会社 竹中工務店 技術研究所 建設技術研究部 研究員 工修 (正会員)

2.2 解析モデル

(1) コンクリート

本研究では、余・野口らにより開発され⁴⁾、洪⁵⁾により改良された三次元 FEM 解析プログラムを用いた。コンクリート要素には、アイソパラメトリック 8 節点ソリッド要素を用いた。構成則には、Darwin-Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性弾塑性モデルを 3 次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面には、Kupfer らの実験に基づく Willam-Warnke の 5 パラメータモデルを仮定した。応力-ひずみ関係は、圧縮側の上昇域では本研究で使用する高強度コンクリートに対応した Fafitis-Shah 式を用い、下降域では横補強筋の拘束効果を考慮した Kent-Park 式を用いた。コンクリートの材料特性を図-2 に示す。圧縮強度低減係数には、ひび割れ直交方向ひずみが增大すると圧縮強度を低減する飯塚式を用いた。ひび割れモデルは、直交固定ひび割れモデルを用い、ひび割れ方向のせん断伝達特性には、Al-Mahaidi モデルを用いた。引張軟化域のモデル化については、鋼繊維無混入試験体には白井式を用い、鋼繊維混入試験体には、既往の研究⁶⁾と筆者らが実施した鋼繊維混入超高強度コンクリートの鉄筋引抜き実験の結果から引張軟化域を推定し、それを森田・角モデルによって鋼繊維混入の影響を考慮した。Fc150 での森田・角モデルのパラメータ c は、鋼繊維混入率 0.5% で 0.23、1.0% で 0.14、1.5% で 0.01 となった。引張軟化域のモデル化を図-3 に示す。上記モデルの文献は文献 7) を参照されたい。

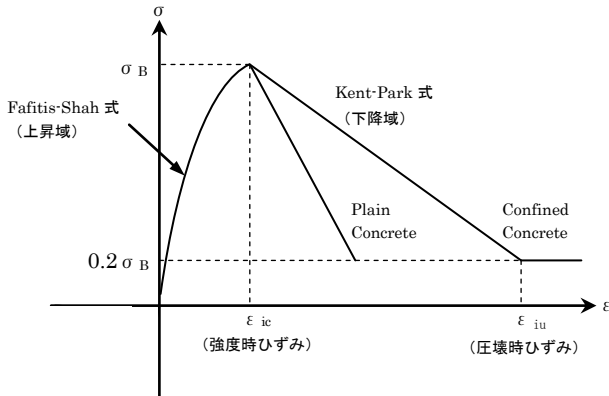


図 - 2 コンクリートの材料特性

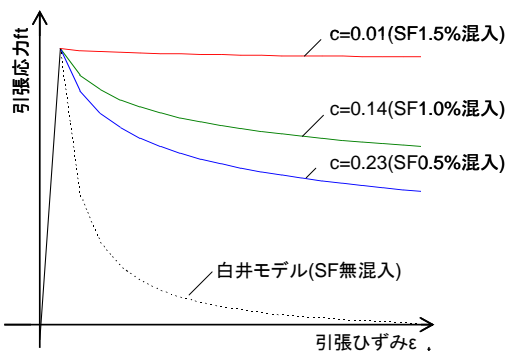


図 - 3 引張軟化域のモデル化

(2) 鉄筋

軸方向剛性のみを考慮した 2 節点線材要素を用い、応力-ひずみ関係には修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。

(3) 付着

付着特性を図-4 に示す。付着特性は、参考文献 8) から求めた付着応力を第 2 折れ点での付着応力と設定した。

2.3 要素分割および境界条件

250-N シリーズの要素分割及び層せん断力載荷時の境界条件を図-5 に示す。要素分割は試験体の対称性から Y 方向を 1/2 にし、切断面を Y 方向拘束とした。層せん断力を与える際の境界条件は実験と同様に梁端加力とし、梁端中央列を変位制御により加力した。層せん断力を求める際の柱の拘束は、柱の回転を考慮し、上側反力点は中央列を X 方向拘束(切断面は XY 方向拘束)、下側反力点は同じく中央列に XZ 方向拘束(切断面は XYZ 方向拘束)としている。152.5-N シリーズも同様である。

3. 解析結果

3.1 層せん断力-層間変形角関係

図-6 に層せん断力-層間変形角関係を示す。上段はコンクリートの材料特性等を実験値とした実験値と解析値の比較である。250-N-0.0 で解析値の剛性が低く、250-N-1.0 で解析値の最大耐力が低い。しかし、履歴ループの傾向が実験と解析で良好に対応していることから、引張軟化域を向上させることで良好に鋼繊維効果を再現できたとと言える。下段は材料特性等を表-2 に統一した解析同士の比較である。表-3 に層せん断耐力の比較を示す。250-N シリーズでは最大で 1.23%、152.5-N シリーズ

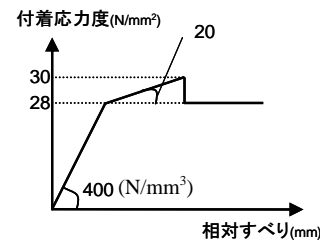


図 - 4 付着特性

で最大で 1.53% 層せん断耐力が向上する(共に鋼繊維 1.5% 混入時)。152.5-N シリーズのほうが 250-N シリーズよりも耐力の向上が大きい。

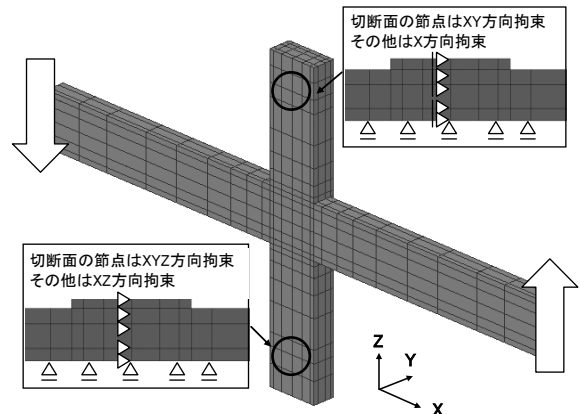


図 - 5 要素分割及び層せん断力載荷時の境界条件

3.2 接合部入力せん断力-接合部せん断変形角関係

図-7 に接合部入力せん断力-接合部せん断変形角関係を示す。接合部せん断変形角は接合部パネルの4隅の節点の変位から算出し、接合部入力せん断力は靱性保証型指針⁹⁾により計算した。同図に靱性保証型指針から求めた接合部せん断強度($\phi=1.0, 0.85$)を示す。両シリーズの鋼繊維無混入時では靱性保証指針の設計式では危険側の評価となるが、鋼繊維を混入することによって安全側の評価となる。また、鋼繊維を混入することによって接合部のせん断変形が抑えられる。これは152.5-Nシリーズで特に顕著である。

3.3 接合部内最小主ひずみ分布

図-8 に最小主ひずみ測定要素を示す。(a)垂直断面で示した圧縮ストラット域内にある要素で測定した値を(b)水平断面で示すように柱幅方向の分布で示す。図-9 に層間変形角20/1000rad.時と30/1000rad.時の接合部内最

小主ひずみ分布を示す。層間変形角20/1000rad.時について、両シリーズの鋼繊維無混入試験体ではかぶりコンクリート付近で最小主ひずみが進行していない。鋼繊維混入試験体では、かぶりコンクリートでの最小主ひずみが他の要素と同様に進行している。つまり、鋼繊維を混入することによって圧縮ストラットとして伝達される圧縮変形が接合部柱幅方向全域で変形するようになる。また、後に示す最大主ひずみが進行している要素で最小主ひずみの進行が著しい。250-Nシリーズの鋼繊維混入率1.0%以上では、その効果は大きくならない。

層間変形角

表 - 3 層せん断耐力の比較

30/1000rad.時につ

250-N シリーズ

鋼繊維混入率(%)	0	0.5	1	1.5
Vc max(kN)	500	552	572	614
Vc上昇率	1.00	1.10	1.14	1.23

いて、全試験体で最小主ひずみがコンクリート圧縮強度時ひずみ($\epsilon_c =$

152.5-N シリーズ

鋼繊維混入率(%)	0	0.5	1	1.5
Vc max(kN)	334	413	456	510
Vc上昇率	1.00	1.24	1.37	1.53

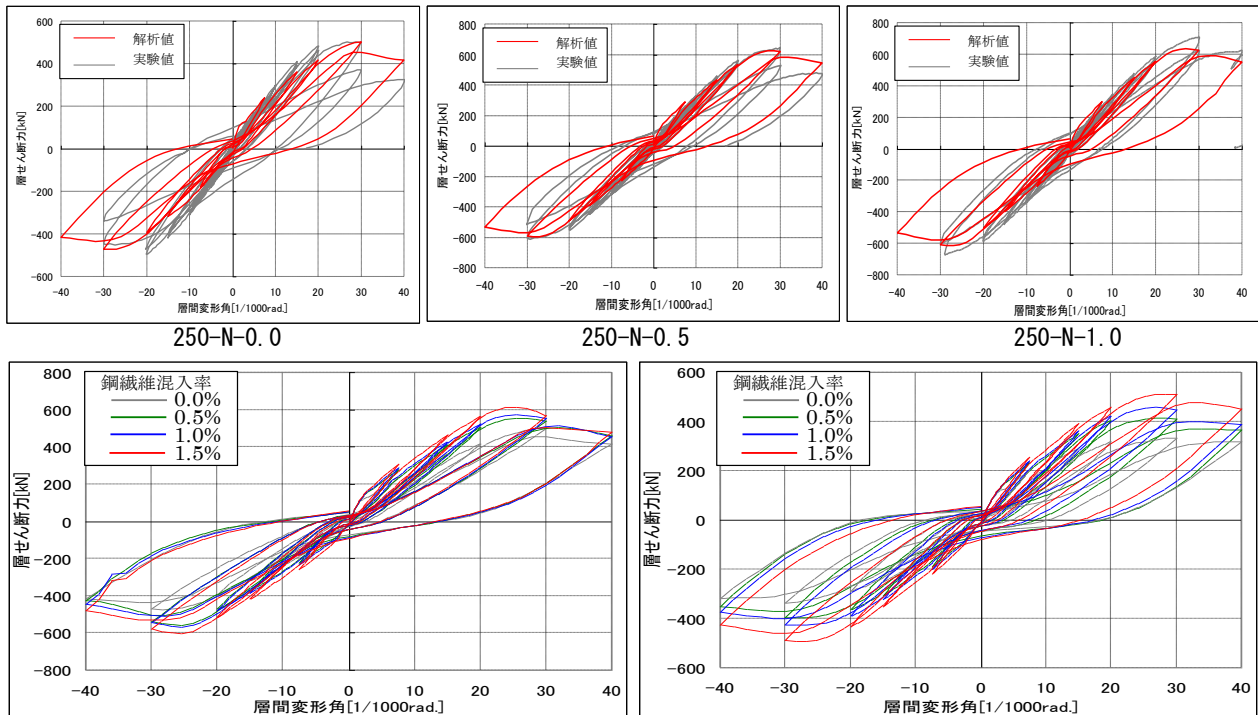


図 - 6 層せん断力-層間変形角関係(左 : 250-N シリーズ, 右 : 152.5-N シリーズ)

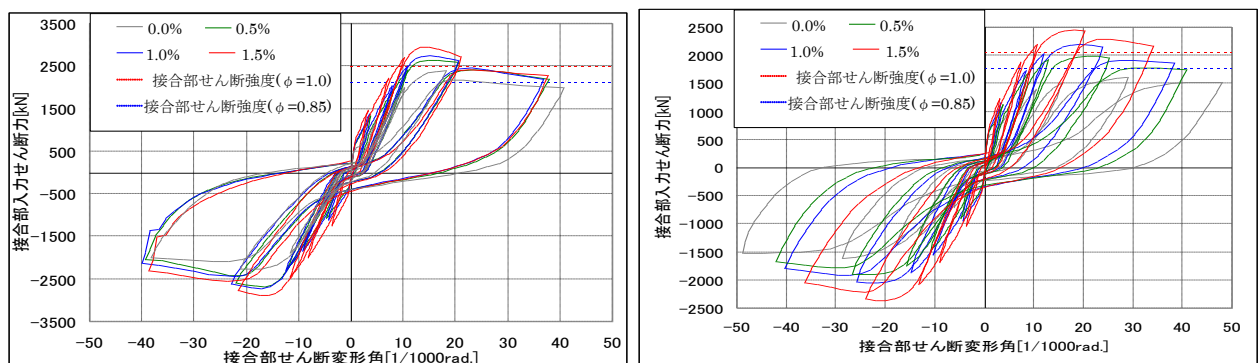


図 - 7 接合部入力せん断力-接合部せん断変形角関係(左 : 250-N シリーズ, 右 : 152.5-N シリーズ)

-4400[μ]を上回っている。よって、全試験体を接合部せん断破壊と判断する。

3.4 接合部内最大主ひずみ分布

最大主ひずみ測定要素と分布方向は接合部内圧縮主ひずみと同様である(図-8)。層間変形角 20/1000rad. 時の接合部内最大主ひずみ分布を図-10 に示す。両シリーズの鋼繊維無混入試験体では最大主ひずみが局所的に増大している要素があるが、鋼繊維混入試験体ではそれが抑制される。つまり、鋼繊維を混入することによってコンクリートのひび割れによる圧縮特性の劣化の局所化が抑制されることが認められる。

3.5 接合部内圧縮主応力分布

圧縮主応力測定要素と分布方向は接合部内圧縮主ひずみと同様である(図-8)。層間変形角 20/1000rad. 時の接合部内圧縮主応力分布を図-11 に示す。両シリーズで、鋼繊維を混入することによって接合部柱幅方向全域で均等に圧縮応力を負担するようになる。これは、鋼繊維を混入し最小主ひずみが均等かされることによって 3.3 で示した圧縮ストラットとして伝達される圧縮変形が接合部柱幅方向全域で変形することと、3.4 で示したコンクリートのひび割れによる圧縮特性の劣化の局所化が抑制されるためである。よって、鋼繊維を混入することによって圧縮ストラットの有効断面積が柱幅方向に増大したと言える。

3.6 接合部有効幅 b_j と接合部せん断強度 τ_j

図-12(a) 垂直断面で示した接合部中心軸位置で測定したせん断応力から (b) 水平断面で示した各層が負担するせん断応力を求め、最大耐力時の柱幅方向の分布を図-13 に示す。同図に靱性保証型指針から求めた接合部有効幅位置を紫色の一点鎖線で示す。

鋼繊維無混入の試験体について、靱性保証型指針から求めた接合部有効幅位置でのせん断応力(以下、 τ_j)を求め、 τ_j 以上の箇所では有効にせん断力を負担していると考え、鋼繊維混入試験体について、

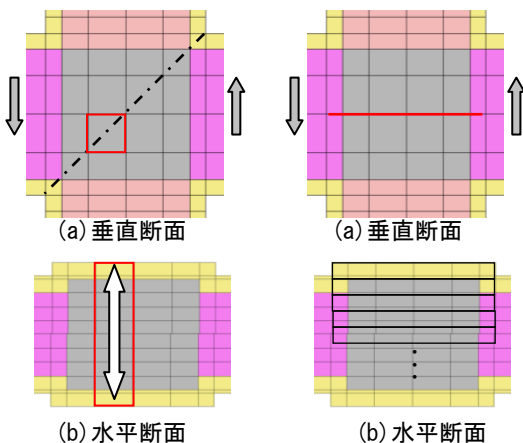
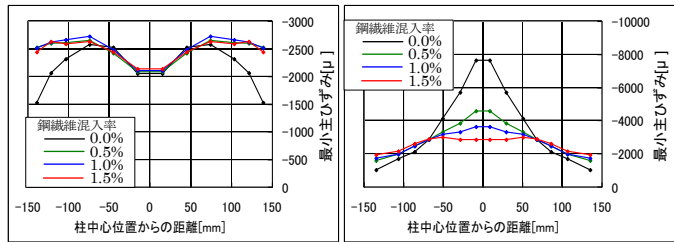
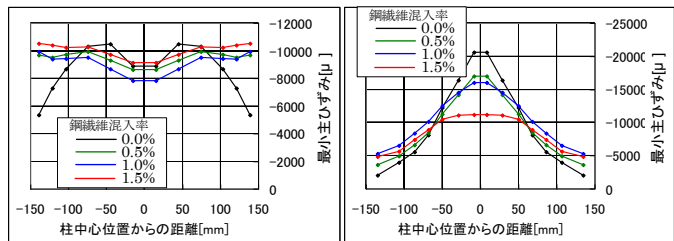


図-8 測定要素(赤枠)

τ_j 以上となる区間を接合部有効幅として求め、鋼繊維無混入試験体を基準とする上昇率として図-14 に示す。接合部有効幅が柱幅を超えた場合に接合部有効幅を柱幅としたものを「制限有」、柱幅を考慮しないものを「制限無」とする。次に、接合部中心軸における接合部水平せん断力(以下、 V_j)を求め、これを接合部有効幅「制限有」と柱せいで除したものを接合部せん断強度として求

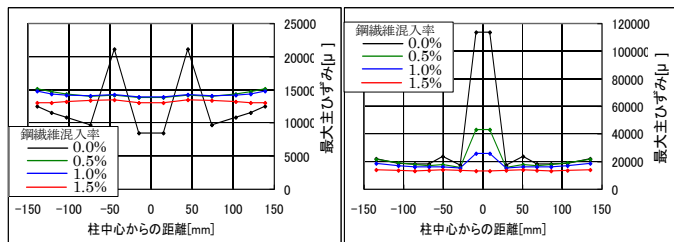


層間変形角 20/1000rad. 時



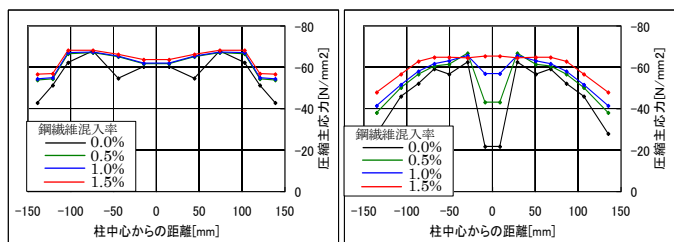
層間変形角 30/1000rad. 時

図-9 圧縮主ひずみ分布(左:250-N シリーズ,右:152.5-N シリーズ)



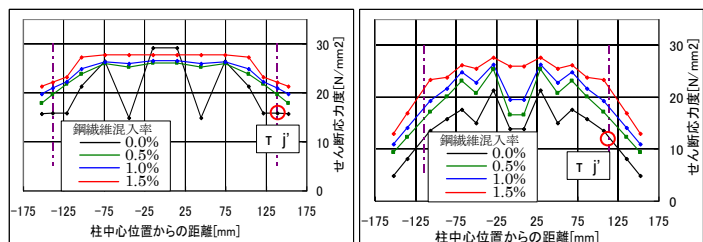
層間変形角 20/1000rad. 時

図-10 引張主ひずみ分布(左:250-N シリーズ,右:152.5-N シリーズ)



層間変形角 20/1000rad. 時

図-11 圧縮主応力分布(左:250-N シリーズ,右:152.5-N シリーズ)



最大耐力時

図-13 せん断応力分布(左:250-N シリーズ,右:152.5-N シリーズ)

め、鋼繊維無混入試験体を基準とする上昇率として図-15に示す。

(1) 接合部有効幅の上昇について

鋼繊維混入率が上がると有効幅も上昇するのが分かる。また、250-N シリーズでは鋼繊維 0.5% 混入時ですですに接合部有効幅が柱幅となってしまう、十分に鋼繊維効果を発揮できていない。

(2) 接合部せん断強度の上昇について

鋼繊維混入率が上がるとせん断強度が上昇しているのが分かる。250-N シリーズと 152.5-N シリーズでせん断強度の上昇率が違う理由は、250-N シリーズでは鋼繊維混入率 0.5% 混入時ですですに接合部内の引張主ひずみ限界近くまで均等化されたためだと考えられる。

(3) 柱・梁接合部せん断耐力における鋼繊維の有効性

コンクリートに鋼繊維を混入した場合に有効と考えられる柱・梁接合部は、柱幅に対して梁幅(接合部有効幅)が小さく、鋼繊維混入によって接合部有効幅の拡大が見込めるもの、またコンクリートのひび割れによる圧縮特

性の劣化が局所化するものである。例えとして、梁が柱に完全に偏心して接合する柱・梁接合部では、コンクリートのひび割れによる圧縮特性の劣化は局所化すると考えられるが、完全に偏心して接合しているために接合部有効幅の拡大は片面のみとなるので、鋼繊維効果によるせん断耐力の向上は偏心無しのものよりも劣ると想定できる。

3.7 梁危険断面位置での応力分布

等 V_j' 時と最大耐力時での梁危険断面位置での応力分布を図-16に示す。また、梁中心位置から上部を圧縮側、下部を引張側とする。両シリーズで鋼繊維無混入試験体では、中立軸が完全に下にあり梁危険断面全域で圧縮応力となる。鋼繊維混入試験体では、中立軸がある程度梁中心に保たれ引張側では引張応力となっているが、最大耐力時では中立軸が下がりほとんど圧縮応力となっている。しかし、鋼繊維無混入試験体よりも引張側での圧縮力は小さい。また圧縮側では、鋼繊維混入試験体のほうが圧縮応力は大きい。

3.8 接合部に入力されるせん断力の割合

図-17に接合部周辺の応力状態を示す。鋼繊維混入によるコンクリートの引張力負担が3.7から確認されたのでコンクリートの引張力負担も考慮した。次に、この応力状態での V_j' は式(1)となる。下線部 A の項は梁端部と柱端部のコンクリートによる入力せん断力で、下線部 B の項は梁主筋の付着力による入力せん断力である。

$$V_j' = \underbrace{[bCc(\text{圧縮側}) + bTc - bCc(\text{引張側}) - Vc]}_A + \underbrace{[bTs - bCs]}_B \quad (1)$$

A
B
 Vc : 柱のせん断力, bCc (圧縮側、引張側): 圧縮側または引張側での梁端部コンクリート圧縮合力, bTc : 引張側での梁端部コンクリート引張合力, bCs : 圧縮側での鉄筋力, bTs : 引張側での鉄筋力

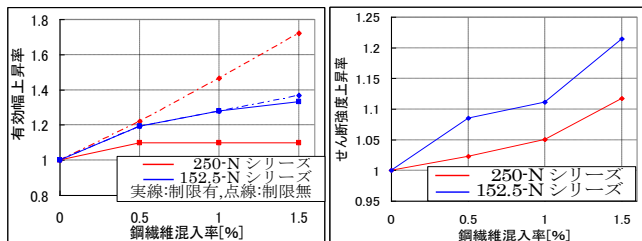


図 - 14 有効幅上昇率

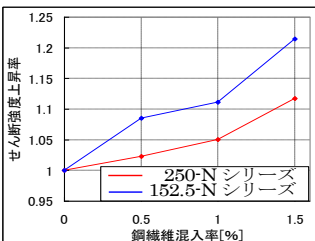
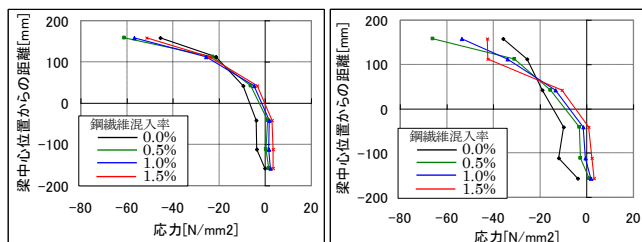
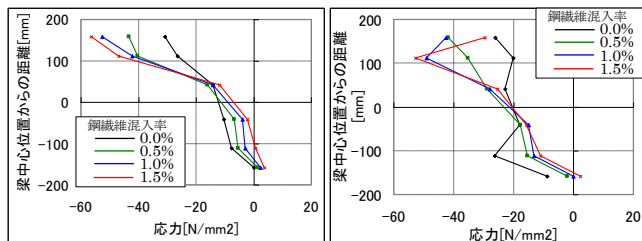


図 - 15 せん断強度上昇率



$V_j' = 1850\text{kN}$ 時

$V_j' = 1450\text{kN}$ 時



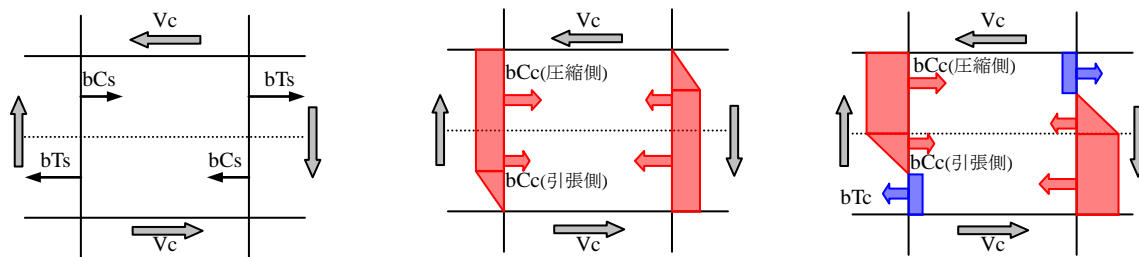
最大耐力時

最大耐力時

図 - 16 梁危険断面位置での応力分布 (左:250-N シリーズ, 右:152.5-N シリーズ)

図-18に等 V_j' 時と最大耐力時での接合部に入力されるせん断力割合を示す。接合部に入力されるせん断力の内訳は、梁主筋の付着力によるもの $[bTs - bCs]$ と引張側での梁端部コンクリート引張合力 $[bTc]$ とその他 $[bCc(\text{圧縮側}) - bCc(\text{引張側}) - Vc]$ の 3 項目である。梁主筋の付着力は梁危険断面位置の梁主筋力の差から求め、引張側での梁

端部コンクリート引張合力は梁危険断面位置の引張側の要素から計測した。その他は、 V_j' から $[bTs - bCs]$ と $[bTc]$ を引いたものである。両シリーズで、鋼繊維を混入することによって梁主筋の付着力による入力せん断力割合が減少する。この原因について図-17を基に、また式(1)で V_j' が一定とした場合について説明する。鋼繊維混入に伴い bCc (圧縮側)と bTc は増加し、 bCc (引張側)は減少するのが3.7から確認できる。この時、式(1)において下線部 A の項の値は大きくなる。必然的に V_j' は一定なので下線部 B の項の値は小さくなる。このために、梁主筋の付着力による入力せん断力割合が減少したと考えられる。



梁主筋付着力からの入力せん断力 梁端部と柱端部コンクリートからの入力せん断力(左:鋼繊維無混入, 右:鋼繊維混入)
 図 - 17 接合部周辺の応力状態

4. まとめ

鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部の三次元 FEM 解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 鋼繊維混入によって柱・梁接合部のせん断耐力が向上する原因は、圧縮ストラットとして伝達される圧縮応力を接合部柱幅方向全域で均等に応力負担するようになり、圧縮ストラット有効断面積が柱幅方向に拡大したためである。
- (2) 柱・梁接合部のせん断耐力において鋼繊維混入が有効と思われるものは柱幅に対して梁幅が小さく、またコンクリートのひび割れが局所化しやすいものである。
- (3) 鋼繊維混入コンクリートの接合部入力せん断力はコンクリートの引張力負担も考慮する必要がある。
- (4) 鋼繊維混入によって、梁危険断面位置での応力分布が変化し梁主筋の付着力によって接合部に入力されるせん断力割合は減少する。

今後、設計式に鋼繊維効果を取り入れるためには、更なる実験及び解析的検討が必要である。

謝辞

本研究は、竹中工務店技術研究所との共同研究として行われた。竹中工務店木村秀樹氏、上林厚志氏、中村

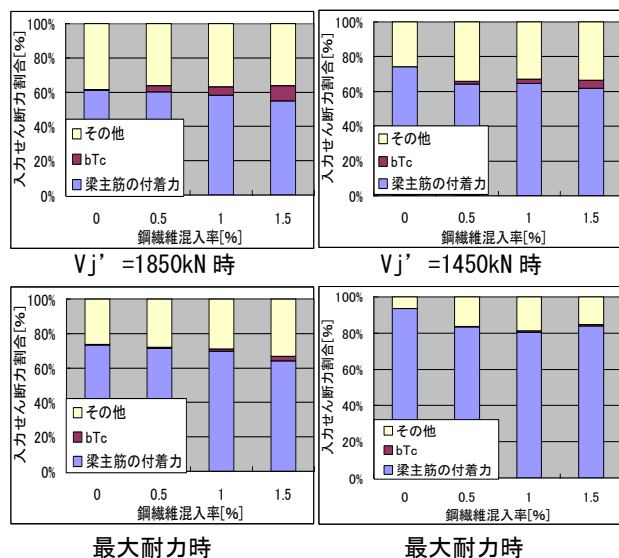


図 - 18 接合部に入力されるせん断力の割合
 (左:250-N シリーズ, 右:152.5-N シリーズ)

尚弘氏, Ousalem Hassane 氏, 山田藍氏, 木下拓也氏には貴重な実験データの提供や多くのご指導を頂いた。ここに感謝の意を表します。

また、本研究は科学研究費補助金・基盤研究 C (研究代表者:野口博) により行われた。

参考文献

- 1) 高津比呂人, 木村秀樹: 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱梁接合部に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.559-564, 2009
- 2) 高橋誠, 坂下智幸, 柏崎隆志, 野口博: 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部に関する解析的研究, AIJ 大会学術講演梗概集, pp.393-396, 2009, 8
- 3) 坂下智幸, 入澤尚人, 柏崎隆志, 野口博, 木村秀樹, 高津比呂人: 鋼繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究, AIJ 大会学術講演梗概集, pp.449-452, 2010, 8
- 4) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: 繰返し載荷時の RC 柱部材の性能評価に関する 3 次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.157-162, 2005,6
- 5) 洪杰, 柏崎隆志, 野口博: 3 次元 FEM 解析による RC 造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.301-306, 2009,7
- 6) 小林一輔, 睦好宏史: 繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形, 土木学会論文報告集, 第 299 号, pp101-112, 1980,7
- 7) 関口雄平, 柏崎隆志, 野口博, 高津比呂人: 鋼繊維混入超高強度鉄筋コンクリート柱部材の耐震性能に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.175-180, 2010
- 8) 辻 大二郎ほか: Fc200N/mm2 超高性能コンクリートの開発(その 2) 自己収縮およびその他の力学特性, AIJ 大会学術講演梗概集, pp.1089-1090, 2008.7
- 9) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート建造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999