

論文 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部に関する三次元 FEM 解析

坂下 智幸*1・高橋 誠*2・野口 博*3・高津 比呂人*4

要旨：鋼繊維を混入した超高強度コンクリート柱・梁接合部について、鋼繊維混入量の違いを変数として取り上げ、単調載荷時の三次元 FEM 解析を行い、鋼繊維混入した場合の荷重変形関係や、梁主筋ひずみ、接合部せん断力分布、接合部パネルに生じるひび割れの分散状況について検討を行った。なお、解析において鋼繊維はコンクリートの引張軟化域の特性を変化させることで表現している。解析結果から、鋼繊維混入による耐力の向上、接合部に生じるひび割れの分散などの知見が得られた。

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

1. はじめに

建物の更なる高層化の可能性を探るために、超高層 RC 造建物では、設計基準強度が 100N/mm^2 (F_c100) のコンクリートが実用化されているが、コンクリートのさらなる高強度化を図る場合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、鋼繊維を混入した超高強度コンクリートが実際の設計に採用されている。

本研究では、鋼繊維を混入させた F_c150 の超高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部のせん断実験¹⁾を対象とし、三次元 FEM 解析を行い、実験では把握することが難しい接合部内部の応力状態やひび割れの検討、接合部せん断伝達の比較を行ない、鋼繊維有無による影響を検討した。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

本研究では、3次元 FEM 解析によって鋼繊維を混入した超高強度コンクリート柱・梁接合部のせん断補強効果の確認を目的としている。実験の加力装置を図-1、部材断面を図-2、材料特性を表-1、表-2 に示す。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り変位制御とし、柱には圧縮軸力比 0.01 の一定軸力を導入して実験を行なった。

解析では実験で実施された混入率 0.0%、0.5%を解析対象試験体とした。また、本解析では鋼繊維混入の影響を確認する為、J150-0.0(鋼繊維無混入)の材料特性に統一した。

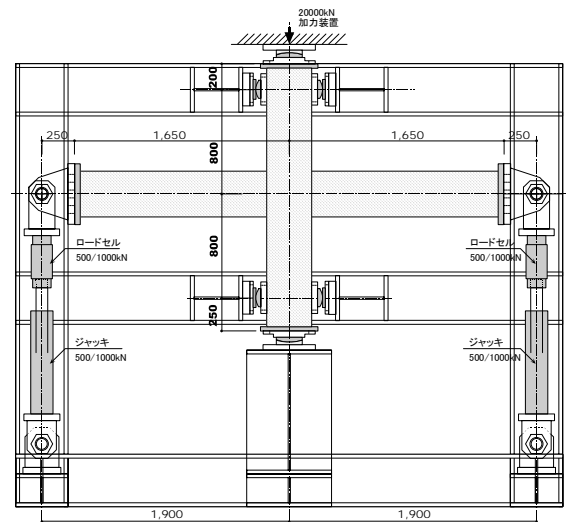


図-1 加力装置

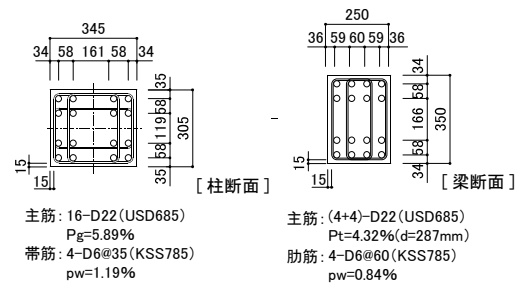


図-2 部材断面

表-1 実験材料特性

コンクリート強度		
	J150-0	J150-0.5
鋼繊維 [%]	0	0.5
圧縮強度 $[\text{N/mm}^2]$	144.6	168
ヤング係数 $[\text{N/mm}^2]$	3.95×10^4	4.26×10^4
引張強度 $[\text{N/mm}^2]$	6.16	
鉄筋強度		
	主筋 D22	補強筋 D6
降伏強度 $[\text{N/mm}^2]$	714.4	984.8
ヤング係数 $[\text{N/mm}^2]$	1.96×10^4	1.96×10^4

*1 千葉市役所 (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 東京電力 株式会社 (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)

*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) 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)

表-2 解析材料特性

	A150-S	A150-C
圧縮強度[N/mm ²]	144.6	
ヤング係数[N/mm ²]	3.95 × 10 ⁴	
引張強度[N/mm ²]	6.16	
引張下降域	白井式 (鋼繊維0%想定)	低減無し (鋼繊維0.5%想定)

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²⁾、洪により改良された三次元 FEM 解析プログラム³⁾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非弾性モデルを 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-3 に示す。ひび割れたコンクリートの圧縮強度低減には、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、前川モデルを用いた。各モデルの文献については前述の文献²⁾を参照されたい。また、コンクリートに鋼繊維を混入することで、コンクリート曲げ引張靱性が向上することが考えられる。鋼繊維を混入していない試験体 (J150-0.0) には、引張強度以降は徐々に応力が低下する白井式 (A150-S) を、鋼繊維を混入した試験体 (J150-0.5) には、引張強度以降も応力を低減させない Bi-Linear モデル (A150-C) を仮定し、鋼繊維混入の影響を考慮した。コンクリート引張応力 - ひずみ関係を図-4 に示す。

(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た。応力-ひずみ関係には、Bi-linear モデルを用いた。

(3) 付着

鉄筋とコンクリート間の付着特性は、竹中工務店技術研究所により行なわれた超高強度コンクリートの鉄筋引抜き実験⁴⁾の結果から導いた。付着特性を図-5 に示す。

2.2 要素分割および境界条件

要素分割および境界条件を図-6 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 方向面ローラー支持とした。境界条件は柱圧縮軸力を与える際は柱脚全面を XYZ 方向拘束、せん断力を与える際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。柱の軸圧縮力は実験と同じく圧縮軸力比 (=N/(BDσ_B), N: 圧縮軸力, B: 柱幅, D: 柱せい) 0.01 の一定軸力とした。解析においては両試験体とも σ_B=144.6[N/mm²]として計算し、N=152.2[kN]を入力した。

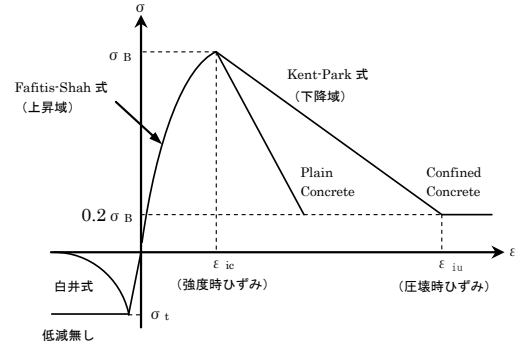


図-3 コンクリートの材料特性

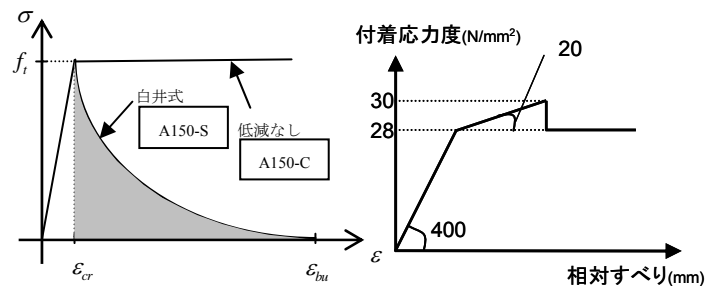


図-4 引張応力 - ひずみ関係

図-5 付着特性

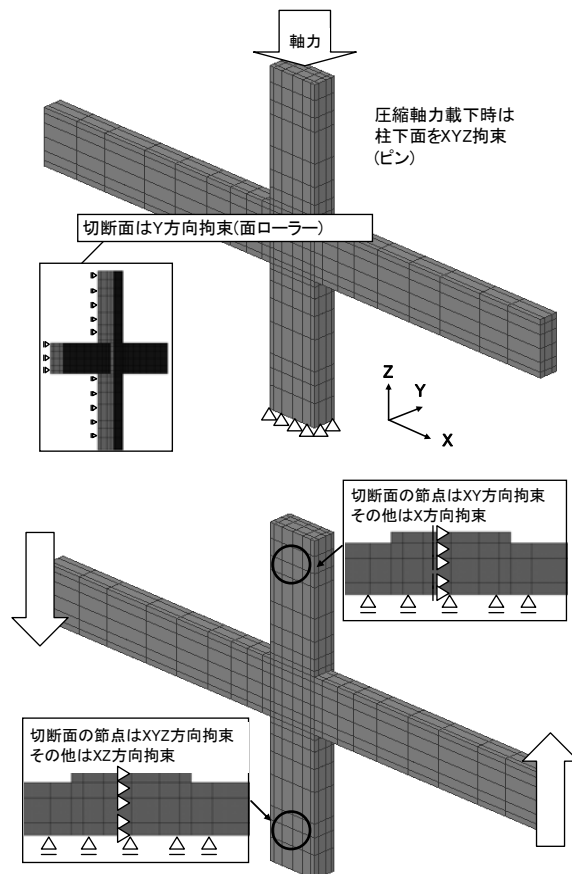


図-6 要素分割および境界条件

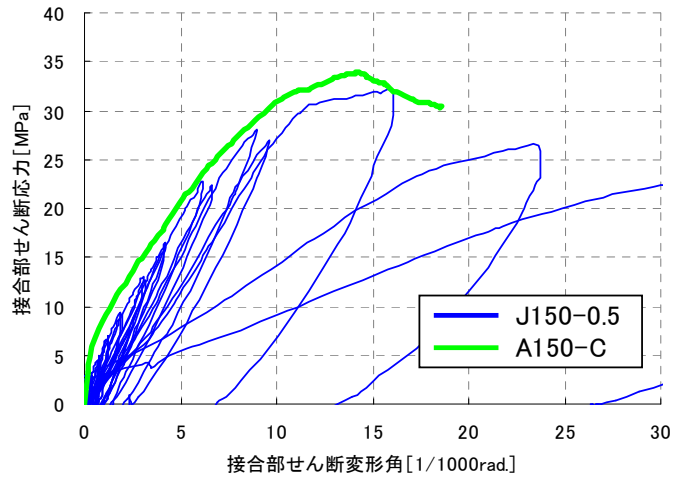
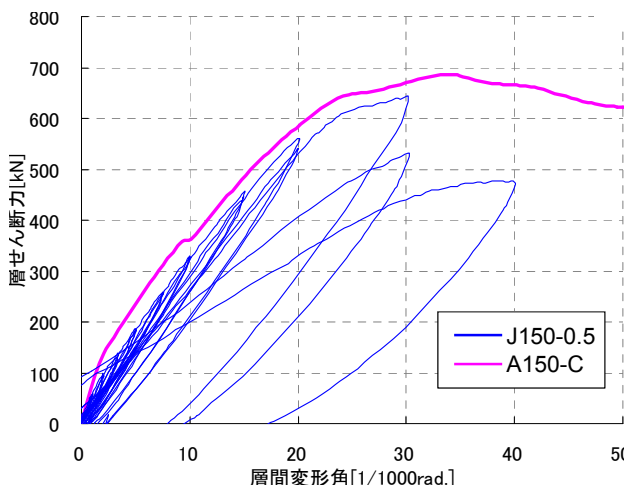
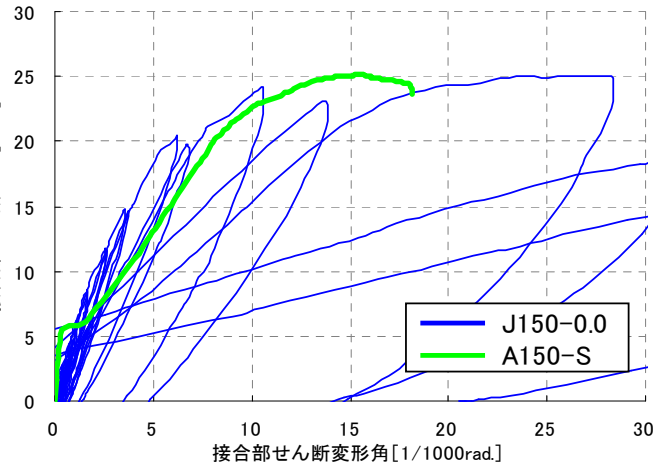
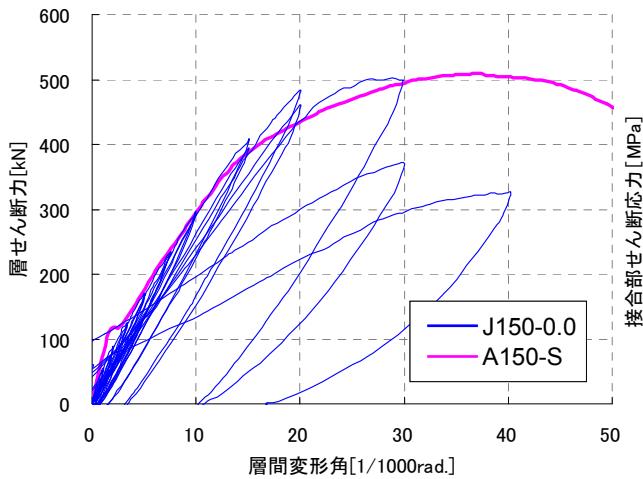


図-7 層せん断力 - 層間変形角関係

図-8 接合部せん断応力 - 接合部せん断変形角関係

3. 解析結果

3.1 層せん断力—層間変形角関係

各試験体の層せん断力-層間変形角関係を図-7に示す。J150-0.0(鋼繊維 0.0%) と A150-S(白井式)では、初期剛性は良い対応を示したが、接合部コンクリートのひび割れ発生後の荷重は解析が実験よりやや下回った。J150-0.5(鋼繊維 0.5%)と A150-C(低減なし)では初期剛性は実験よりやや高かったが、ひび割れ後は良い対応を示した。

3.2 接合部せん断応力—接合部せん断変形角関係

接合部せん断応力 - 接合部せん断変形角関係を図-8に示す。接合部せん断応力は靱性保証型指針⁵⁾により計算した接合部せん断力 V_j を柱有効断面積で除して求めた。また、接合部せん断変形角 γ は実験と同様、接合部パネルの四隅の節点における対角方向の相対変位から求めた。実験と解析の γ の計測位置を図-9に示す。実験の計測点は解析における切断面で節点の変位が上手く取れなかった為、実験ボルト位置より外側の節点から求めた。接合部せん断変形角 γ を求める式(1)を以下に示す。

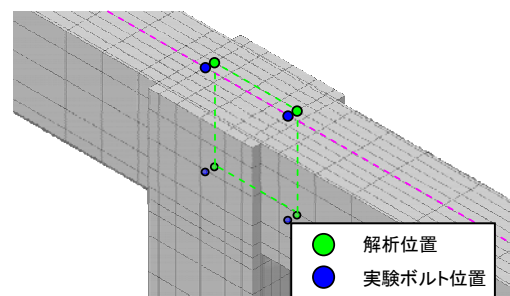
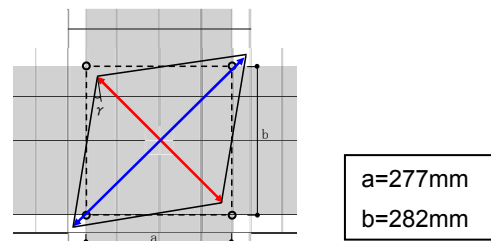


図-9 せん断変形角計測位置

$$\gamma = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{a \cdot b} \cdot \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} \quad (1)$$

δ_1, δ_2 : 対角方向 (青矢印, 赤矢印) の伸縮量

A150-S(白井式)は接合部コンクリートのひび割れ発生までは良い対応をしているが、発生後は実験包絡線の内側を辿っている。これは接合部内のひび割れ集中により破壊が局所化したためと考えられる。A150-C(低減無し)はひび割れ発生後も良い対応を示した。これは鋼繊維混入により破壊の局所化が抑えられたためと考えられる。いずれの解析も実験と同じく接合部破壊型となった。

3.3 梁主筋ひずみ

実験との梁主筋ひずみ分布の比較を図-10に示す。実験結果と解析結果ではよい対応を示している。解析では圧縮側梁主筋ひずみは層間変形角 $R=15/1000rad.$ までほとんど違いがなかった。 $R=20/1000rad.$ では、接合部危険断面の引張側梁主筋が降伏ひずみに達し、ひずみが大きくなった。これは接合部の引張側コンクリートの破壊によって梁主筋の降伏に影響が出たものと思われる。図-11に等荷重時における梁主筋ひずみを比較する。いずれにおいてもA150-SのひずみがA150-Cを上回る結果が出た。これは、鋼繊維がコンクリートの引張を負担することで、梁主筋のひずみが抑制されたためと考えられる。

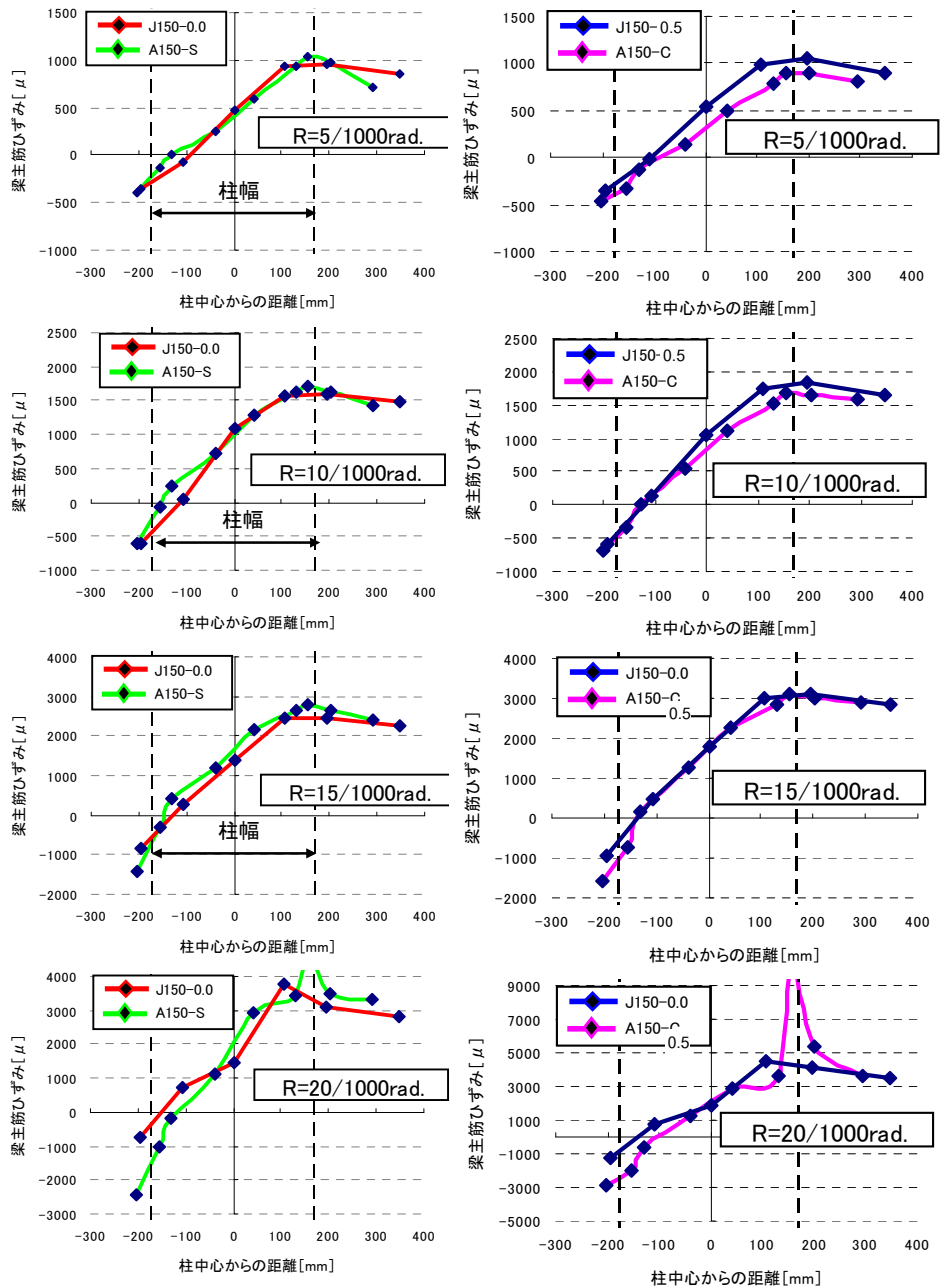


図-10 変形角ごとの梁主筋ひずみ

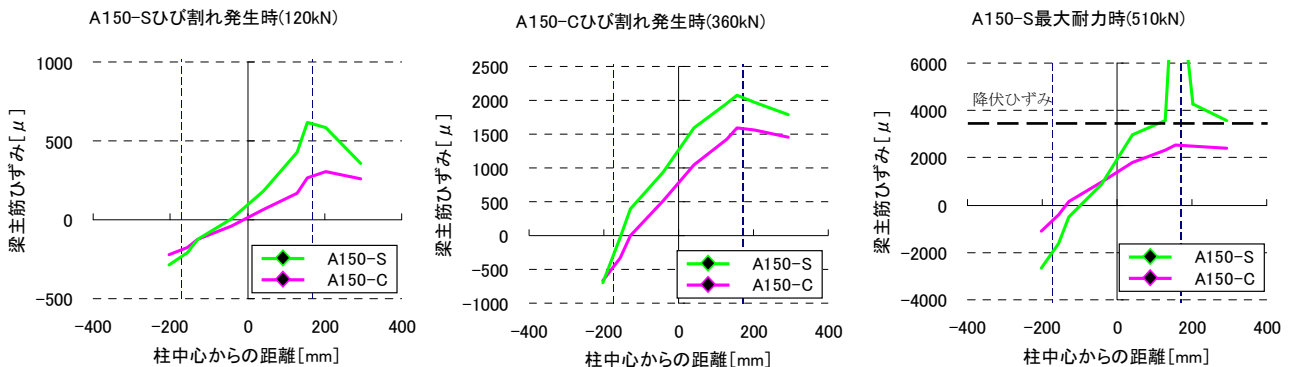


図-11 等荷重時の梁主筋ひずみ比較

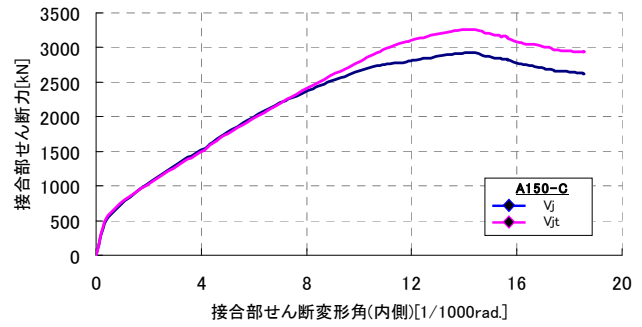
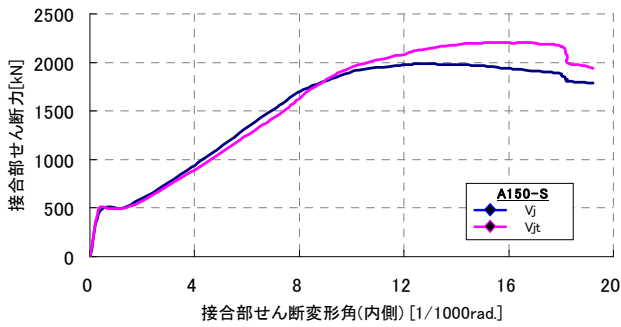


図-12 接合部せん断力の比較

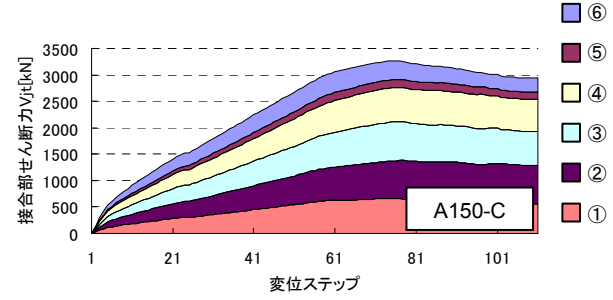
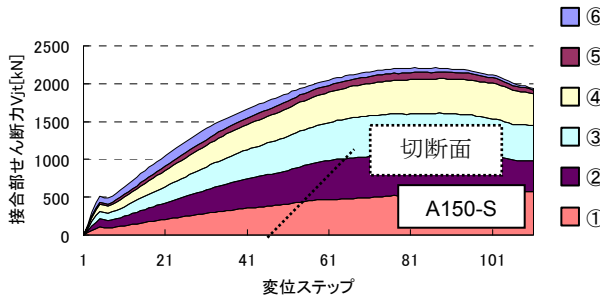


図-13 柱断面の幅方向の接合部せん断力分布

3.4 接合部せん断力

接合部中央層のコンクリート要素上面の積分点におけるせん断応力度からコンクリート要素のせん断力を求めた。各要素のせん断力の和を求めることで中心層の接合部せん断力 V_{jt} を求めた。

本研究では、層せん断力 V_c から導いた接合部せん断力 V_j と、上記から導いた接合部せん断力 V_{jt} を比較していく。 V_j と V_{jt} の整合性を確認したうえで、接合部中央層における柱断面にかかる幅方向のせん断力分布を検討し、鋼繊維混入の影響を確認する。

図-12 に接合部せん断力 V_j と V_{jt} を示す。グラフ横軸は接合部せん断変形角(内側解析位置)を取っている。 V_j と V_{jt} は初期剛性、ひび割れ以降も概ね良好な対応を示した。最大耐力付近から少しずつ差異が生じているのは梁危険断面の応力中心間距離が少しずつ変化しているからと考えられる。

接合部中央層における V_{jt} の各要素列のせん断力分布を図-13、せん断力計測位置を図-14 に示す。図-13 は下層が切断面に近い要素の列となっており、上層に行くほど接合部のかぶり要素の列となる。図から A150-S(白井式)は切断面付近の要素をはじめ、中央付近にせん断力が集中しているが、A150-C(低減無し)は A150-S に比べ、かぶりまでせん断力が分布していることが分かる。よって、鋼繊維を混入することにより耐力が上昇したのは接合部の有効断面積が広がったためと推察される。

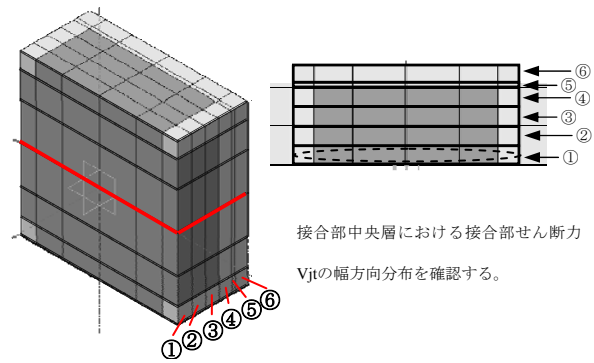
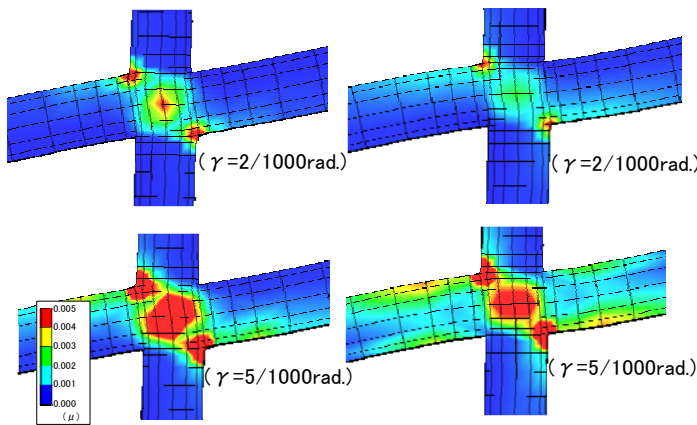


図-14 せん断力計測位置

3.5 最大主ひずみ

図-15 に接合部せん断変形角 γ ごとの A150-S(白井式)、A150-C(低減無し)の試験体切断面における接合部最大主ひずみコンターを示す。

$\gamma=2/1000\text{rad}$ では、A150-S の接合部隅角部と中央に引張ひずみが集中していることが分かる。 $\gamma=5/1000\text{rad}$ では、A150-S は主に接合部全域に引張ひずみが集中しているのに対して、A150-C は接合部だけでなく柱と梁まで引張ひずみが広がっている。梁の圧縮側コンクリートに引張ひずみが見られるのは、接合部かぶり部分が圧壊したことにより直交方向の引張ひずみが発生し、切断面までひずみが広がったためであると考えられる。図から鋼繊維を混入することで、コンクリートの引張ひずみが抑えられたことが確認された。



A150-S(白井式) A150-C(低減無し)

図-15 最大主ひずみコンター

3.6 接合部ひび割れ幅分布

図-16 に解析から得られた各試験体のひび割れ幅の分布、図-17 にひび割れ幅計測位置を示す。ここでは接合部のかぶり部分のひび割れ分布を検討した。本研究では、ひび割れ面に直交する引張主ひずみに要素の等価長さを掛けたものを 1 要素のひび割れ幅として定義した。なお、積分点の引張主ひずみの平均値からコンクリート要素の中心位置におけるひび割れとしている。図で示すように、A150-S(白井式)は接合部中心と隅角部に大きなひび割れが発生しているのに対し、A150-C(低減無し)はひび割れ幅が小さく、ひび割れの局所化が抑えられていることが確認された。

4 まとめ

鋼繊維を混入した超高強度コンクリート柱・梁接合部について三次元 FEM 解析を行い、次の結果を得た。

- (1) 引張応力 - ひずみ関係を、鋼繊維無混入試験体は白井式、鋼繊維 0.5%混入試験体は引張強度以降も応力を低減させない Bi-linear モデルと仮定することにより、最大耐力や初期剛性について、概ね実験と良好に対応した。
- (2) 鋼繊維混入により梁主筋のひずみが抑えられる傾向を示した。
- (3) 鋼繊維を混入することで接合部の有効断面積が広がり、接合部せん断力が上昇した。
- (4) 鋼繊維混入により接合部コンクリートのひび割れが抑えられる傾向が見られた。

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

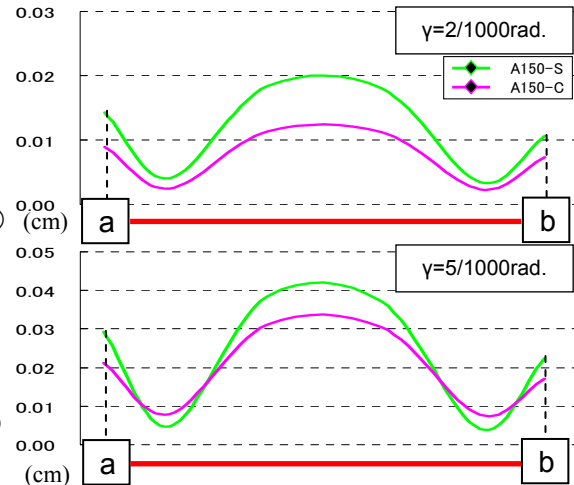


図-16 ひび割れ幅の分布

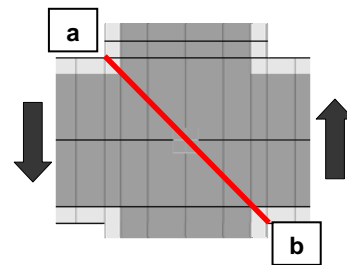


図-17 ひび割れ幅計測位置(解析)

行われた。竹中工務店・木村秀樹氏、上林厚志氏、Ousalem Hassane 氏、ト部藍女史には貴重な実験データの提供や多くのご助言を頂きました。また、千葉大学・柏崎隆志助教には本解析を行うにあたり、多くのご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

本研究の一部は、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報告集, pp.559-564, 2009.7
- 2) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: RC 構造部材の 3 次元繰返し載荷時の FEM 解析プログラムの開発 (その 1, 2), AIJ 大会学術講演梗概集, pp.67-70, 2004.8
- 3) 洪杰, 柏崎隆志, 野口博: 3 次元 FEM 解析による直交部材付き RC 偏心柱・梁接合部の耐震性能に関する研究, AIJ 大会学術講演梗概集, pp.605-608, 2007.9
- 4) 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
- 5) 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, 1999.8