

論文 斜補強筋および鋼繊維補強高強度コンクリートを用いた RC 造柱・梁 接合部の弾塑性挙動に関する実験的研究

鈴木 裕介^{*1}・Sanjay Pareek^{*2}

要旨: 本研究は、高強度材料を用いた柱・梁接合部試験体の接合部パネルおよびその近傍に、接合部斜補強筋および繊維混入率 2vol%とした鋼繊維補強高強度コンクリートを用い、これらが接合部の弾塑性挙動に及ぼす影響について検討を行った。その結果、接合部パネルに補強を施した試験体は、通常配筋試験体と比較して、接合部せん断破壊の防止および接合部せん断耐力の上昇に有効に働き、さらに、接合部せん断変形が低減され、最大荷重後の耐力低下も防止される。また、各ひずみ度の測定結果より、接合部の斜補強および鋼繊維補強による接合部パネルの応力状態および破壊機構に影響を与えることが明らかとなった。

キーワード: 柱・梁接合部、接合部斜補強筋、鋼繊維補強高強度コンクリート、ひずみ度

1. はじめに

RC 造柱・梁接合部（以下、接合部）の破壊機構については、接合部内からの主筋の抜け出し、柱軸力、使用するコンクリート強度、接合部横補強筋量および接合部のアスペクト比などの影響因子が挙げられるが¹⁾、中でも接合部内からの主筋（主に梁主筋）の抜け出しについては、AIJ 靱性保障指針²⁾において、付着劣化の確実な防止を目標とする際、部材せいに対する主筋径が過大となり、実用的な範囲を超えることが懸念されている。また、梁主筋の抜け出しが接合部または部材に与える影響としては、降伏変形の増大、材端コンクリートの圧壊、エネルギー吸収性能の低下および接合部のせん断抵抗機構の変化などが挙げられる²⁾。

そこで、本研究では、接合部せん断耐力の上昇および接合部せん断破壊の抑制に加え、梁主筋の抜け出し防止を期待し、RC 造柱・梁接合部およびその近傍に接合部斜補強筋および鋼繊維補強高強度コンクリート（コンクリート体積に対する繊維混入率=2.0vol%）を用い、これらの補強法が接合部パネルの弾塑性挙動に及ぼす影響について検討している。

2. 試験体概要および使用材料

表-1 に試験体諸元を示し、図-1 に試験体形状および配筋を、図-2 に接合部配筋詳細を示す。試験体は、内接合部を対象とした平面十字形であり、Type HS, Type HF, Type D-HS および Type D-HF の計 4 体である。4 体ともに形状寸法および斜補強筋以外の配筋は同一とし、主筋およびせん断補強筋に高強度鉄筋を使用した。接合部せん断補強筋は、コンクリートの打ち込み不良が生じない程度となるよう最低限の間隔を設け配筋した。なお、D-HS および D-HF の 2 体は、接合部斜補強筋として、普

通鉄筋(SD295)を用いて接合部パネルに X 型に配した。コンクリートは、高強度コンクリート($F_c=80\text{MPa}$)とし、HF および D-HF の 2 体は、接合部およびその近傍(図-1 中の■部分)に鋼繊維補強高強度コンクリート(コンクリート体積に対する繊維混入率=2.0vol%)を使用した。また、表-2 に鉄筋、表-3 にコンクリートの材料特性を示す。なお、使用した繊維は、直径 0.60mm、長さ 30mm、引張強度 980MPa を有するインデント型の鋼繊維である。

表-1 試験体諸元

試験体名	HS	HF	D-HS	D-HF
H×L	1250×2500			
B×D	200×300			
主筋	3-D16-USD685A			
$\mu_{pc}=\mu_{pt}$ (%)	1.14			
あばら筋	2-D6-KSS785			
μ_w (%)	0.32			
斜補強筋	無		4-D10-SD295	
斜補強範囲 $\mu_{pc}=\mu_{pt}$ (%)	—		1.41	
B×D	300×300			
主筋	8-D16-USD685A			
$\mu_{pc}=\mu_{pt}$ (%)	1.14			
帯筋	2-D6-KSS785			
μ_w (%)	0.21			
横補強筋	5-D6-KSS785			
斜補強筋	無		4-D10-SD295	
μ_w (%)	0.48		0.78	
使用 コンクリート	高強度	鋼繊維 補強	高強度	鋼繊維 補強
σ_B (MPa)	70.0	94.0	94.9	104.9

*1 日本大学大学院 工学研究科建築学専攻 工修(正会員)

*2 日本大学 工学部建築学科准教授 工博(正会員)

3. 載荷および測定方法

載荷方法として、左右梁先端にピン・ローラ支承を設け、柱頭反曲点をピン・ローラ支持、柱脚反曲点をピン支持とし、柱頂部にピン支承を介して、アクチュエーターにより一定軸力 $N (=0.1 \cdot F_c \cdot B_c \cdot D_c)$ 、 F_c : コンクリート設計強度、 B_c : 柱幅、 D_c : 柱せい) を作用させた後、地震力を想定した正負交番繰返し荷重を与えた。

測定方法として、梁載荷点変位は、柱反曲点位置においてピン・ローラ支持した十字型変位計ホルダーに対する相対変位として測定した。接合部のせん断変形は、接合部四隅と対角方向に取付けた変位計により測定した。また、柱頭部、柱反曲点および梁載荷点位置に設置したロード・セルにより、柱軸力、柱頭・柱脚部の水平反力および左右の梁載荷点荷重を測定した。さらに、柱および梁の主筋、接合部横補強筋にそれぞれひずみゲージを貼付け、各荷重階におけるひずみ度を計測した。

4. 解析概要

本研究では、実験と同時に、材料試験結果 (表-2 および表-3) を基とした有限要素法による2次元弾塑性解析を行い⁴⁾、実験結果との適合性を検討した。本節では、その解析概要について述べる。

図-3 に使用材料の復元力特性を示し、図-4 に HS を例に、解析モデルおよび載荷方法を示す。使用材料の復元力特性として、材料試験から得られた応力-ひずみ度曲線から、コンクリートは多線形型の1軸特性を折線で近似し、鉄筋は Trilinear 型とし、引張および圧縮ともに1軸特性を仮定した。要素モデルとして、コンクリートは三角形要素とし、鉄筋は線要素とした。また、載荷方法として、実験では繰返し載荷を行っているが、解析は単調載荷 (実験における正載荷のみ) で行った。

表-2 鉄筋の材料特性

鉄筋種別	降伏応力度 σ_y (MPa)	ヤング係数 E_s (MPa)	引張強度 σ_t (MPa)
USD685A D16	685.8	1.34×10^5	912.0
KSS785 D6	1014.7	1.36×10^5	1139.1
SD295 D10	424.6	2.13×10^5	619.4

表-3 コンクリートの材料特性

コンクリート種別	圧縮強度 σ_c (MPa)	ヤング係数 E_c (MPa)	割裂強度 F_t (MPa)
HS	70.0	4.26×10^4	3.9
HF	94.0	5.03×10^4	9.9
D-HS	94.9	4.98×10^4	4.3
D-HF	104.9	4.73×10^4	12.0

5. 破壊状況

図-5 および図-6 に $R=1/100$ (層間変形角の設計限界) および $R=1/20$ (最終) 時の破壊状況を示す。

設計限界時 ($R=1/100$) の破壊状況は、4体ともに同様な傾向を示し、柱および梁の曲げひび割れ、軽微ながら

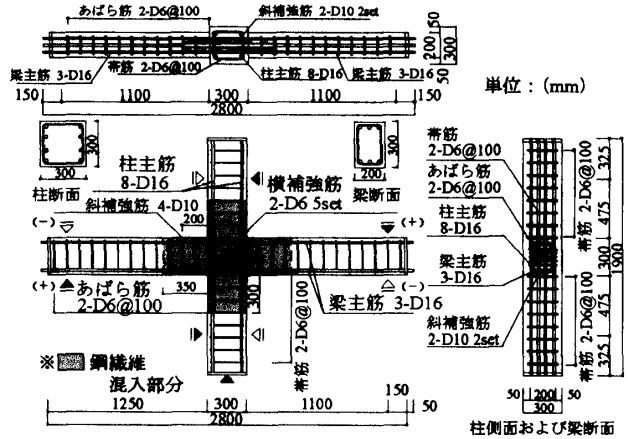


図-1 試験体形状および配筋

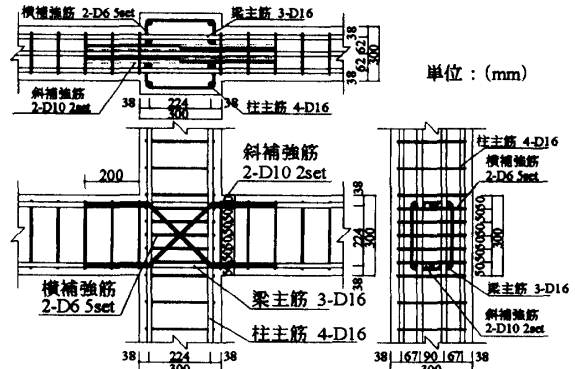


図-2 接合部断面詳細

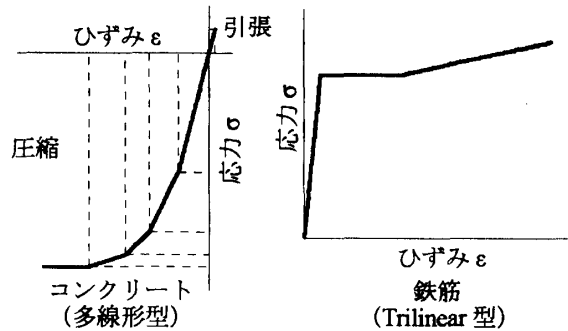


図-3 使用材料の復元力特性

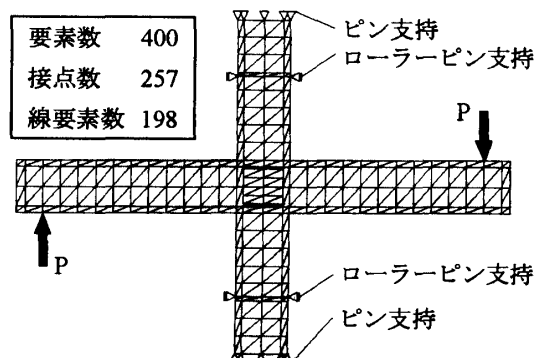


図-4 解析モデルおよび載荷方法 (HS)

線は表-4中の梁降伏時の計算値を示している。解析は、単調載荷（正載荷時のみ）として行ったため、負載荷における解析の曲線は、正載荷時の逆対象のものとした。

各試験体とも弾性範囲内では安定した履歴ループを示した。HSは、最大荷重以降、接合部パネルのせん断ひび割れの進展に伴い、耐力低下およびエネルギー吸収性能に乏しい逆S字型の復元力特性を示した。接合部パネルに鋼繊維を混入したHF、斜補強筋を配したD-HSおよび、斜補強筋を配し、さらに鋼繊維を混入したD-HFの3体は、梁降伏後の剛性低下が少なく、最大荷重後の耐力低下はほとんど見られなかった。その結果3体ともエネルギー吸収性能に富む紡錘形の履歴性状を示した。

解析結果との比較では、弾性範囲内において、HSおよび鋼繊維を混入したHFは、解析値が各包絡線に沿って進み、実験値との良い対応が見られた。接合部パネルに斜補強筋を用いたD-HSおよびD-HFは、弾性剛性で実験値を大きく上回る傾向を示した。

8. 接合部パネルせん断応力度-せん断変形角曲線

図-8に接合部パネルせん断応力度(τ)-せん断変形角(γ)曲線を示す。せん断変形角(γ)は、接合部四隅と対角方向に取付けた変位計による測定結果から算出した。また、図中の破線は有限要素法による解析値を示す。

HSは、接合部パネルのせん断ひび割れ発生以降、せん断変形が徐々に進行した。また、最大せん断応力度後、せん断変形が負載荷時における変形方向へ著しく増大し、偏った履歴ループを示した。HF、D-HSおよびD-HFは、接合部パネルに鋼繊維を混入したことによる接合部コアコンクリートの拘束効果、または斜補強筋を配したことによる補強効果によって、接合部パネルのせん断変形が大きく低減された。特に、斜補強筋を配したD-HSはせん断ひび割れ発生以降もせん断変形の増加がほとんど見られなかった。

解析結果との比較では、Q- δ 曲線と同様な傾向となり、接合部パネルに斜補強筋を用いたD-HSおよびD-HFは、弾性剛性において、実験値を大きく上回った。

9. 梁主筋ひずみ度分布

図-9に梁主筋ひずみ度計測位置を示し、図-10に正載荷時の上端筋を例に、梁主筋ひずみ度分布を示す。梁主筋ひずみ度は、図-9中の梁断面図における主筋(梁断面●)に貼付けたひずみゲージより測定した。また、図-10中に材料試験結果である主筋(USD685-D16)の降伏ひずみ度($\epsilon_y=6100\mu$)を一点鎖線で併記する。

各試験体とも、 $R=1/400$ では、接合部内で一端引張、他端圧縮の応力が作用している。

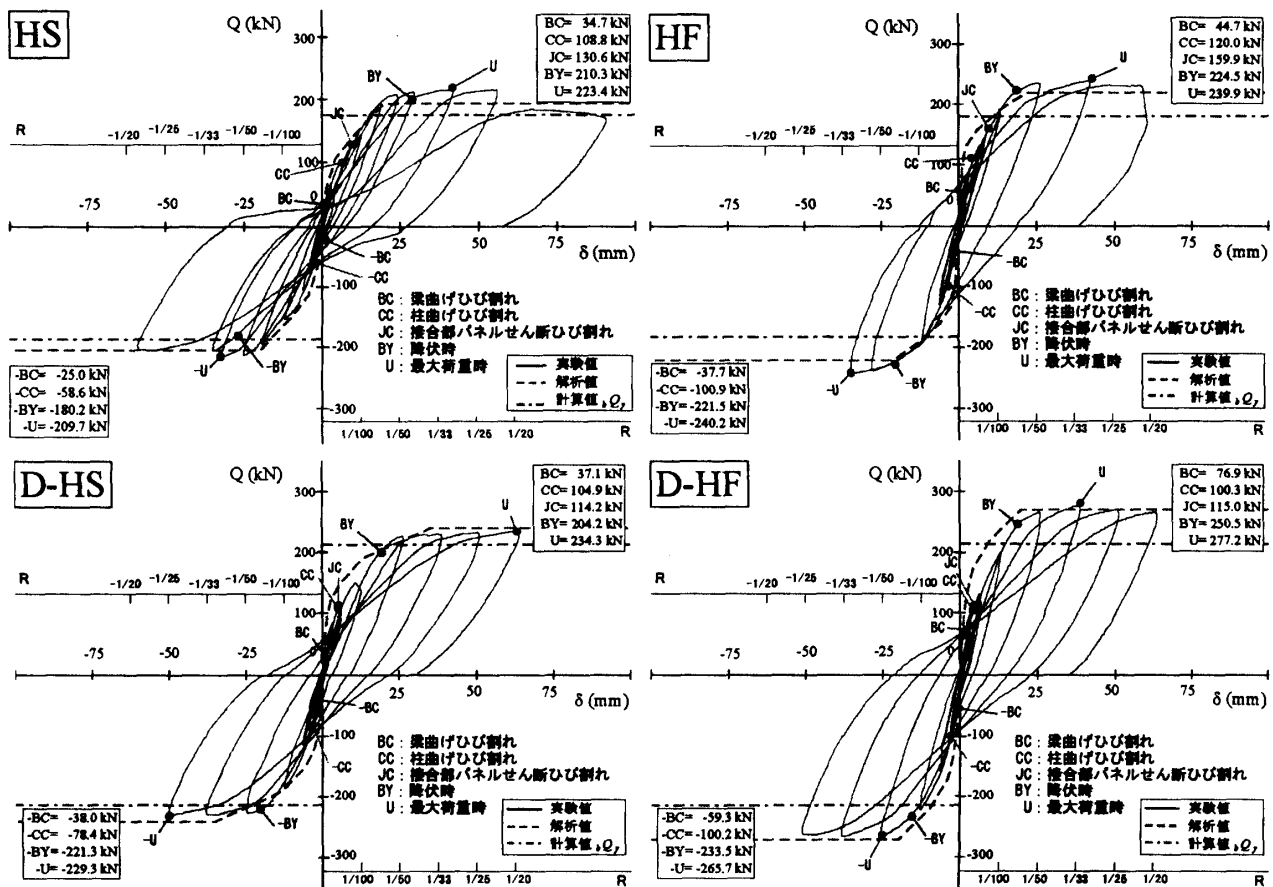


図-7 層せん断力(Q)-層間変位(δ)曲線

HS は、 $R=1/50$ までのひずみ度が、最大でも約 3000μ 程度であり、接合部領域内外に問わず、ひずみ度がわずかであることから、高強度材料を用いたことで起こりうる接合部内への入力せん断力が増大していることがうかがえる。また HS は、次載荷 ($R=1/33$) において、接合部領域内のひずみ度が計測不能となるほど増大するため、接合部内梁主筋が、接合部せん断変形により降伏性状を示したことが推察される。以上のことより、前述したようなせん断変形の著しい増大が裏付けられる (図-8)。HF は、 $R=1/50$ において、接合部領域外で降伏レベルを超えるひずみ度が確認され、梁曲げ降伏が進行する様相を呈したひずみ度分布を示した。以上のことより、梁主筋の接合部内抜け出しが抑制されたと考えられ、図-6 で示したような接合部パネルおよび梁表面でのせん断ひび割れ、梁端における曲げひび割れが軽減されたと考えられる。D-HS は、 $R=1/200$ からの接合部内におけるひずみ度が、すべて引張側に分布し、 $R=1/50$ においては、接合部内で降伏レベルを超えるひずみ度が確認された。以上のことより、梁主筋の接合部内定着が困難となり、図-6 で示したような接合部パネルおよび梁表面にせん断ひび割れが多数発生したと考えられる。D-HF は、 $R=1/50$ において、引張側梁端のひずみ度が大きな応答を示し、変形が梁端に集中した。

10. 接合部横補強筋のせん断応力度-ひずみ度関係

本実験のような柱および梁に対して、接合部パネルに異種コンクリートまたは接合部斜補強筋を用いた既存の実験データは少なく、接合部パネルの応力状態も複雑であるため、本節では、接合部の挙動を見る一つの手法を記載する⁹⁾。図-11 に接合部横補強筋のひずみ度計測位置を示し、図-12 に設計限界を超えた $R=1/50$ までの接

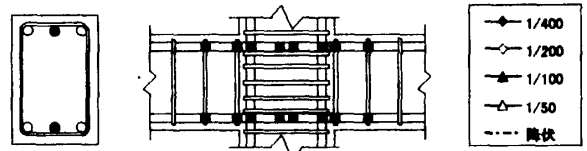


図-9 梁主筋ひずみ度計測位置

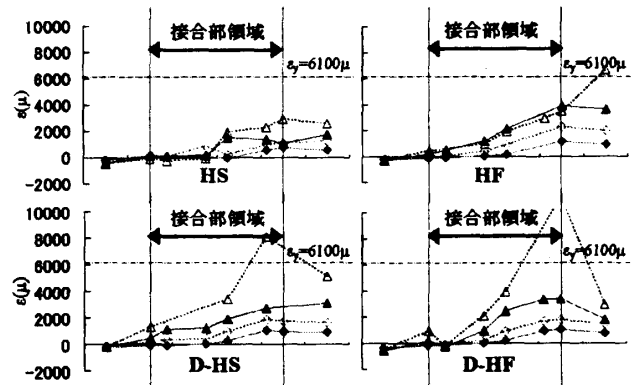


図-10 梁主筋ひずみ度分布 (正載荷時の上端筋)

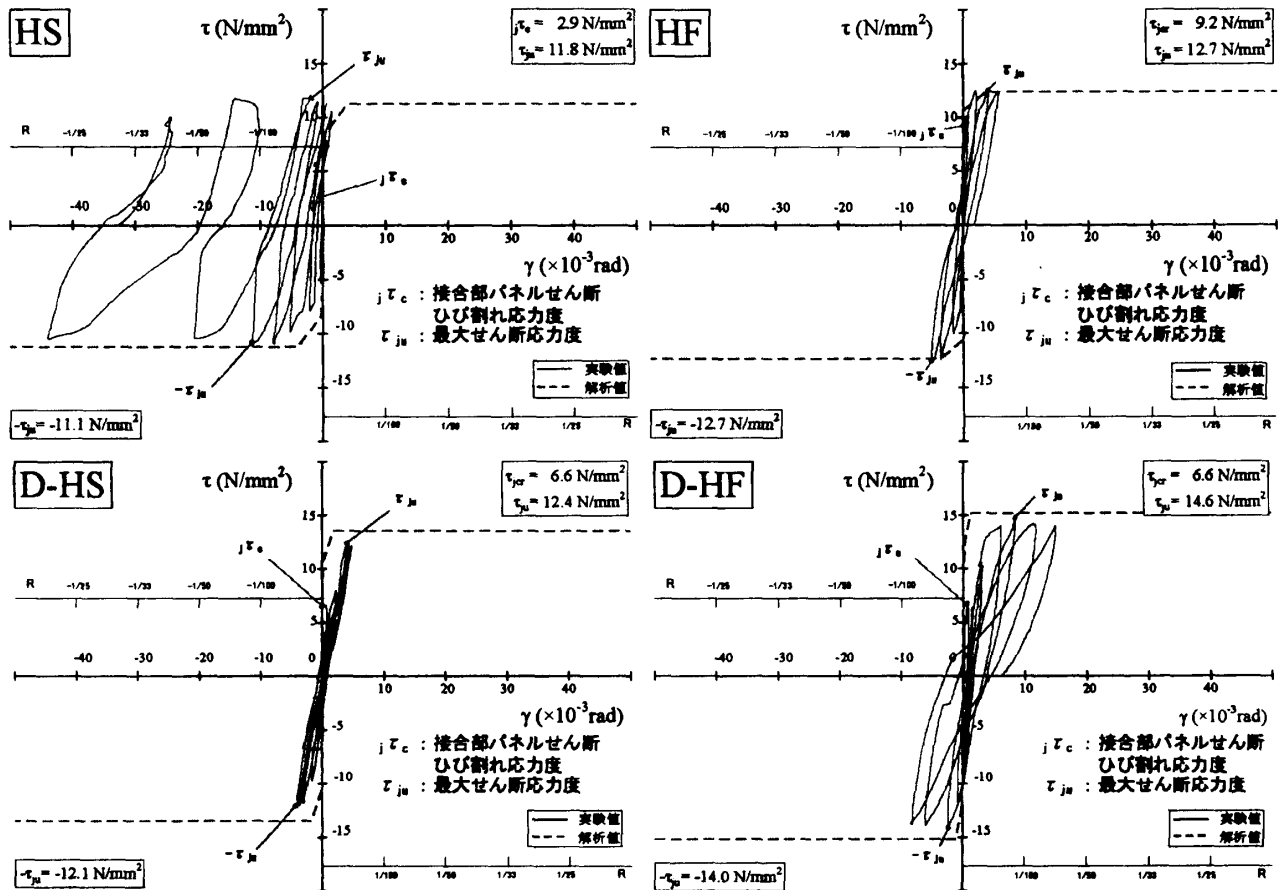


図-8 接合部せん断応力度(τ)—せん断変形角(γ)

合部パネルせん断応力度 (τ) - 接合部横補強筋ひずみ度 (e) 曲線を示す。せん断および直交方向のそれぞれのひずみ度は、図-11 に示す中央の接合部横補強筋における値とした。なお、図-12 中の τ_c は各試験体の表-4 で示した接合部パネルせん断ひび割れ応力度を示している。

各試験体ともせん断方向のひずみ度が、直交方向に対して大きな応答を示した。接合部パネルに多数のせん断ひび割れが発生した HS および D-HS は、せん断ひび割れ発生以降にせん断方向ひずみ度の急激な増加が確認できた。接合部パネルせん断ひび割れ応力度が最大であった HF は、せん断方向のひずみ度もあまり大きな応答は示さず、せん断ひび割れの低減および靱性能の向上に有効に働いたと考えられる。直交方向ひずみ度では、接合部パネルへの補強による大きな差異は見られなかったが、補強した 3 体は、HS と比較して、ひずみ度がわずかながら進行したため、応力が分散されたと考えられる。

11. まとめ

- (1)最終破壊状況より、接合部パネルへの補強を施したことで、コンクリートの剥落は見られず、接合部せん断破壊が軽減された。特に、鋼繊維を混入した HF および D-HF は、せん断ひび割れの著しい減少が見られた。
- (2)強度結果より、接合部パネルへの補強を施したことで、接合部パネルせん断ひび割れ応力度をはじめとする各強度の上昇が得られた。
- (3)Q- δ 曲線および τ - ϵ 曲線より、接合部パネルへの補強を施したことで、最大耐力および靱性能の向上が確認された。
- (5)梁主筋ひずみ度分布より、鋼繊維補強高強度コンクリート用いたことで、梁曲げ降伏が進展する分布傾向が確認された。
- (6)接合部横補強筋の τ - ϵ 曲線より、各試験体ともせん断方向のひずみ度に大きな応答が見られたが、鋼繊維補強のみを行った HF は、その応答の低減が確認された。
- (7)本研究による補強法は、接合部せん断耐力の上昇などの様々な効果は認められたが、接合部斜補強筋を配した際、斜補強筋を定着させた梁断面において、梁主筋の太径化が表面化される傾向が見られた。その結果、通常配筋時 (HS) と比較して、接合部パネルへの入力せん断力が上昇することが推察され、梁主筋の接合部内抜け出しに影響すると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、エーユーエム構造設計株式会社の秋山和仁さん、東洋建設株式会社の石田圭司さん、三井住友建設株式会社の桑田陽平さんには、多大な御協力を頂きました。ここに記し感謝の意を表します。

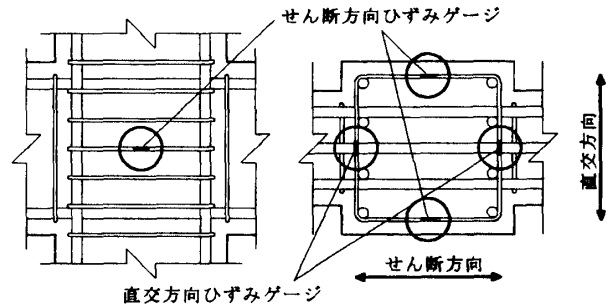


図-11 接合部横補強筋ひずみ度計測位置

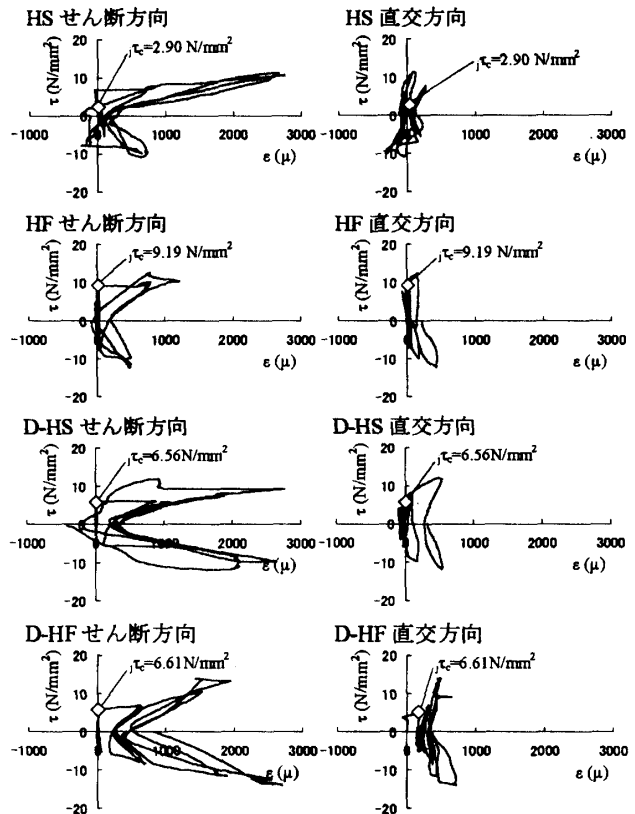


図-12 接合部横補強筋の接合部せん断応力度(τ) - ひずみ度(ϵ)関係

参考文献

- 1) 林和也, 高森直樹, 寺岡勝: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造柱・梁接合部のせん断強度に関する調査・検討, 日本コンクリート工学協会 高強度コンクリート構造物の構造性能研究委員会 報告書・論文集, pp.522-529, 2006.7
- 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・解説, 1999
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 -, 1999
- 4) 吉田博, 小堀為雄: 有限要素法による構造解析プログラム, 丸善株式会社, 1980
- 5) 桑田陽平, 石田圭司, Sanjay Pareek, 黒田浩司: 高強度材料を用いた RC 造柱・梁接合部に関する実験 (3), 日本建築学会東北支部研究報告集, 第 68 号 構造系, pp.199-206, 2005.6