

論文 鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部のせん断入力量と付着指標の変化に伴う梁主筋付着性状

澤田 和宏^{*1}・岸本 直樹^{*2}・林 静雄^{*3}・上村 智彦^{*4}

要旨：内部梁・柱接合部におけるせん断入力量および付着指標を変数とした実験を行い、接合部域梁主筋付着性状への影響について検討したものである。結果として以下の知見を得た。せん断入力量の違いによって梁主筋の接合部内引張側でのひび割れ状況が異なり、接合部域梁主筋平均付着応力度に差を生じた。また、付着指標により、梁主筋の接合部内圧縮側及び中央部での付着性状が異なり、接合部域梁主筋平均付着劣化度（曲げ理論値に対する低下率）に違いが生じた。梁主筋の接合部内引張側では柱曲げひび割れの影響を強く受け付着劣化するが、同じ接合部せん断力時での付着劣化度は同じであった。

キーワード：梁・柱接合部，せん断入力量，付着指標，梁主筋付着性状，ひび割れ性状

1. はじめに

内部梁・柱接合部に通し配筋される梁主筋の付着性状は、架構の耐震性能に大きな影響を及ぼす。従って、通し配筋される梁主筋の付着性状を明らかにし梁・柱接合部の設計に反映させることが重要である。

現在までに、梁・柱接合部内に通し配筋される梁主筋の付着性状についての研究は、森田等¹⁾、北山等²⁾、寺岡等³⁾、李等⁴⁾が様々な変数について実験的研究を行っている。梁・柱接合部を設計する際に用いられる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⁵⁾の付着強度式は、接合部を模擬した藤井等⁶⁾の実験により導かれたもので、コンクリート強度と柱圧縮軸応力度による関係式となっている。しかし、この実験式では接合部域梁主筋付着性状に影響を及ぼすと考えられる接合部せん断入力量⁷⁾($\tau_{py}/v\sigma_B$, τ_{py} ：理論梁曲げ降伏時の接合部せん断応力度, $v\sigma_B$ ：コンクリートの有効圧縮強度($v=0.8-2400/\sigma_B$)や付着指標⁵⁾($\mu=d_b\cdot\sigma_y/(2D_c\cdot\sigma_B^{2/3})$), d_b ：梁主筋径, σ_y ：梁主筋降伏応力度, σ_B ：コン

クリート強度)の影響が考慮されていない。

そこで、本研究では、接合部せん断入力量と付着指標を変数とした試験体を作成し接合部域梁主筋付着性状について実験的検討を行った。

2. 実験概要

試験体は、3体(B-LS, BJ-LS, BJ-HS)である。B-LSとBJ-LSは使用鉄筋が同じで梁主筋本数、即ち、接合部せん断入力量が異なる試験体である。BJ-HSは梁主筋に細径高強度鉄筋を用いて付着指標を変化させた試験体で、BJ-LSと接合部せん断入力量はほぼ同等である。B-LSは梁曲げ降伏型、BJ-LSとBJ-HSはせん断入力量がほぼ同等の梁曲げ降伏後の接合部破壊型を想定して設計した。各試験体の諸元および使用材料の性質を表-1、2に、また、形状、寸法を図-1に示す。梁主筋の種類、本数以外の試験体形状・寸法等は、全試験体共通である。

加力方法は、試験体の柱頭に一定圧縮軸力294[kN](軸力比：0.16)を与え、梁端に変位制御により正負交番繰り返し荷重(P)を与えた。最終変

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 清水建設 (株)

*3 東京工業大学 建築物理研究センター教授 工博 (正会員)

*4 芝浦工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

形時は、層間部材角 1/25 を行った後、押し切る加力とした。

3. 破壊性状と破壊形式

図-2 に梁端荷重(P)ー層間変形角(R)曲線を、図-3 に最終変形時のひび割れ状況を、表-3 に諸現象発生荷重を示す。本実験では、梁端荷重で加力制御したので、本論文で示す荷重は梁端荷重(P)で表現しており、層せん断力に変換するには梁端荷重を 1.43 倍すればよい。各試験体の最大耐力は、B-LS : 35.2[kN], BJ-LS : 48.6[kN], BJ-HS : 40.6[kN]となった。全ての試験体で最大耐力が理論梁曲げ耐力を上回った。

B-LS は、最大耐力時までに梁主筋は降伏したが、実験終了まで接合部補強筋と柱主筋は降伏しなかった。また、梁付け根部のコンクリートが圧潰し、耐力低下を生じた。

BJ-LS は、最大耐力時までに梁主筋が降伏し、その後耐力低下が見られた。また、接合部せん断ひび割れが顕著となり接合部補強筋も降伏した。

梁主筋に高強度鉄筋を使用した BJ-HS は、最大耐力前に梁付け根部のコンクリート圧潰現象が見られ、最大耐力時には梁主筋が降伏し、その後、梁付け根部の圧潰現象が進行し、

表-1 試験体諸元

試験体		B-LS	BJ-LS	BJ-HS
梁	主筋	2-D16 (SD295)	3-D16 (SD295)	2-D13 (USD685)
	補強筋	□-D6@80[cm] (SD345)		
	μ^{*1}	2.5	2.5	4.2
柱	主筋	12-D16(SD345)		
	補強筋	□-D6@50[cm](SD345)		
接合部	補強筋比	0.30[%]		
	$\tau_{py}/\nu\sigma_B^{*2}$	0.35	0.52	0.45

*1, *2 の記号等については 1 章中に記載。

表-2 材料特性

鉄筋	梁主筋		柱主筋	補強筋
	D16	D13	D16	D6
降伏強度 [MPa]	368	751	401	335
ヤング係数 [$\times 10^5$ MPa]	1.96	1.95	1.92	1.75
コンクリート圧縮強度[MPa]	$\sigma_B=30.7$			

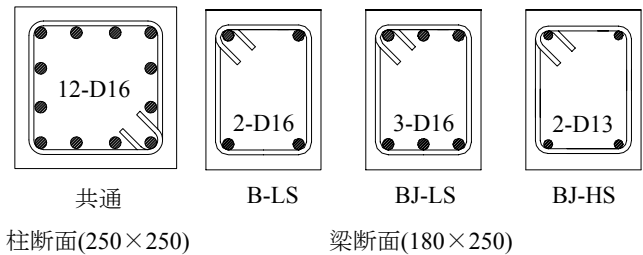
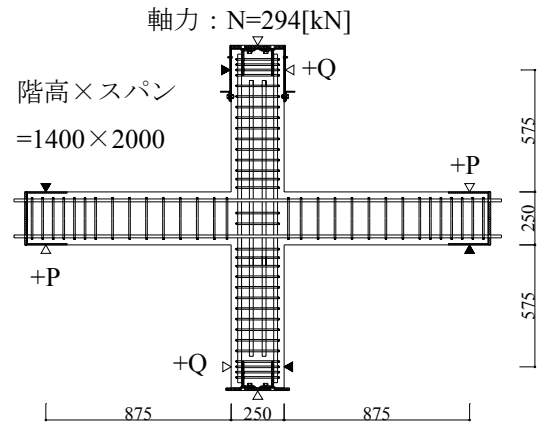


図-1 試験体の形状・寸法 [mm]

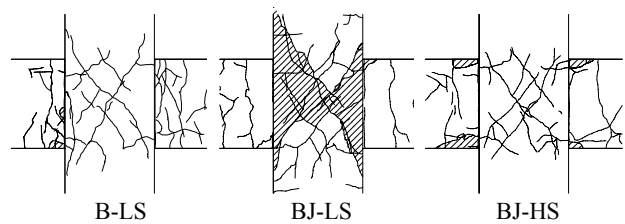


図-3 最終変形時のひび割れ状況

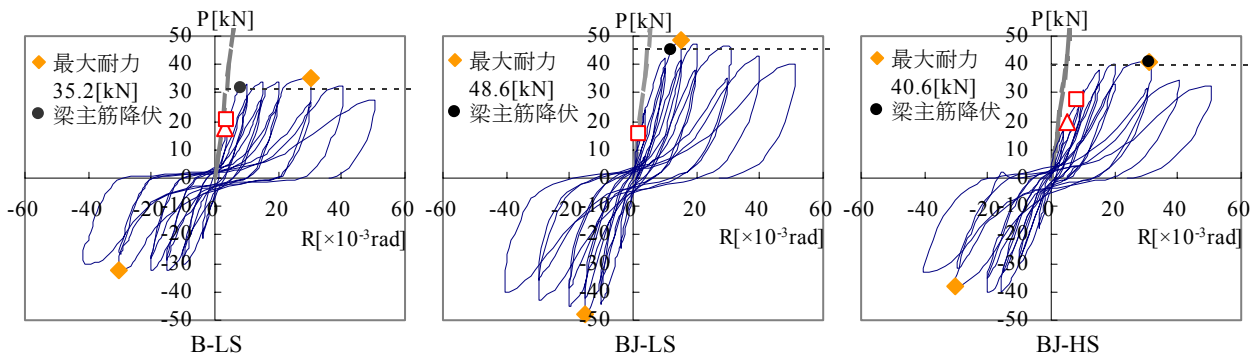


図-2 荷重(P)ー層間変形角(R)曲線

— 初期剛性理論値 - - - - - 曲げ理論値
 ▲ 接合部ひび割れ □ 柱曲げひび割れ

表－3 諸現象発生荷重（梁せん断力[kN]）

試験体	最大荷重	梁		柱		接合部			
		主筋降伏		曲げひび割れ		せん断ひび割れ		終局強度	
		計算値*1	実験値	計算値*2	実験値	計算値*3	実験値	計算値*4	実験値
B-LS	35.2	30.3	31.4	23.5	20.5	17.5	17.6	59.2	35.2
BJ-LS	48.6	45.5	45.1		15.7		15.7		48.6
BJ-HS	40.6	39.5	40.6		27.4		19.6		40.6

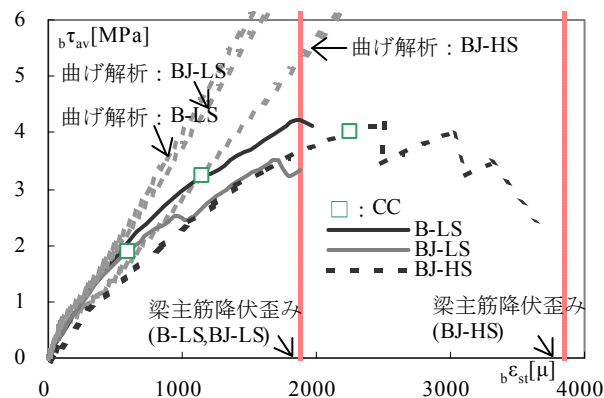
*1 断面分割法による曲げ解析
 *2 $M_c = (c\sigma_t + \sigma_0) \cdot Z_c$
 $c\sigma_t = 1.8\sqrt{\sigma_B}$ 注) *1~4は, [kgf]単位で算出した値を梁端荷重: P[kN]に換算したものである。
 *3 $V_j = j_c \cdot b_c \sqrt{c\sigma_t^2 + c\sigma_t \cdot \sigma_0}$ (主応力説)
 *4 $V_{ju} = 1.56\sigma_B^{0.712} \cdot b_j \cdot D_c$ (靱性指針式⁴⁾)
 Z_c : 断面係数
 σ_0 : 軸応力度
 b_j : 接合部有効幅
 j_b, j_c : 梁, 柱応力中心間距離

耐力低下を生じた。これらの結果から、B-LSは梁曲げ破壊型、BJ-LSは梁曲げ降伏後の接合部破壊型、BJ-HSは梁曲げ圧潰型と判断した。

4. 接合部域梁主筋付着性状

4.1 接合部域の梁主筋平均付着応力度

図－4に各試験体の接合部域の梁主筋平均付着応力度($b\tau_{av}$)－接合部端引張側梁主筋歪み($b\epsilon_{st}$)関係を曲げ解析による理論値と共に示す。梁主筋平均付着応力度は、引張側、圧縮側梁主筋の接合部端位置の歪みを応力変換し、その差から求めた。歪みからの応力変換は、Ramberg-Osgoodモデルを用いて行った。B-LSとBJ-LSについては梁主筋降伏時まで、BJ-HSについては歪み測定値が信頼性に欠けるため、主筋降伏直前の段階までを示した。尚、付着性状に影響すると考えられる柱曲げひび割れ(CC)の発生段階を図中に示す。各試験体とも初期の付着剛性は曲げ理論値に良く一致しているが、柱曲げひび割れ発

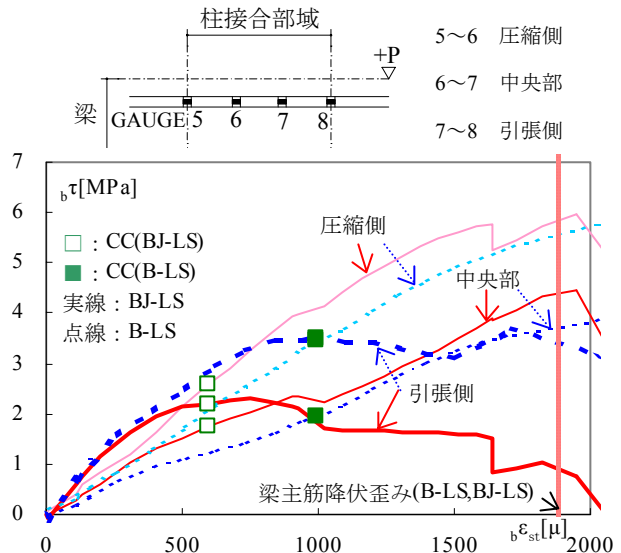


図－4 梁主筋平均付着応力度
 ー接合部端引張側梁主筋歪み

生後に剛性が低下している。

4.2 接合部内における梁主筋局所付着応力度

接合部内を引張側・中央部・圧縮側の3区間に区切り、図－5にB-LSとBJ-LSの各区間での梁主筋局所付着応力度($b\tau$)－接合部端引張側梁主筋歪み($b\epsilon_{st}$)関係を示す。圧縮側及び中央部では両試験体とも著しい付着劣化を起こさずに推移する。しかしながら、引張側では柱曲げひび割れ発生後に、急激に付着劣化が生じた。これは接合部内引張側では柱曲げひび割れ発生によりコンクリートの拘束効果が低下するためであると考えられる。



図－5 梁主筋局所付着応力度
 ー接合部端引張側梁主筋歪み

4.3 既往の提案式との比較

図－6に各試験体の接合部域の梁主筋平均付着応力度($b\tau_{av}$)－梁接合部端引張側梁主筋歪み($b\epsilon_{st}$)関係を寺岡等³⁾の提案式と共に示す。寺岡等

が提案している次式は、柱曲げひび割れ点での剛性低下を考慮し bi-linear にモデル化した式である。

第1直線： $c_{10}\tau_{av}=0.07k_1 \cdot (o_{dbd}/D_c) \cdot b\varepsilon_{st}$

第2直線： $c_{20}\tau_{av}=0.22 k_2 \cdot (o_{dbd}/D_c)^{0.43} \cdot \sigma_B^{0.19} \cdot (0.71+0.35\eta_0) \cdot \beta^{-1.11} \cdot (0.0201b\varepsilon_{st}+14.46)$

ここで、 $c_{10}\tau_{av}$ 、 $c_{20}\tau_{av}$ ：接合部内平均付着応力度、 k_1 、 k_2 ：コンクリートの違いによる係数、 o_{dbd} ：梁主筋径、 D_c ：柱径、 η_0 ：柱軸圧比、 β ：上主筋量/下梁主筋量。

図-6で実験値は、どの試験体も前述の計算値より小さい値を示すが、寺岡等の指摘の通り柱曲げひび割れ発生後に剛性が低下している。しかし、柱曲げひび割れの発生段階が正確に評価されないことが誤差を生んでいる一因と考えられ、特に、B-LSとBJ-LSを比較した場合、接合部せん断入力量の大きいBJ-LSでは、歪みが小さい段階で柱曲げひび割れが発生するため、梁主筋降伏時の平均付着応力度が18[%]程度小さくなっている。これは、BJ-LSでは梁主筋本数

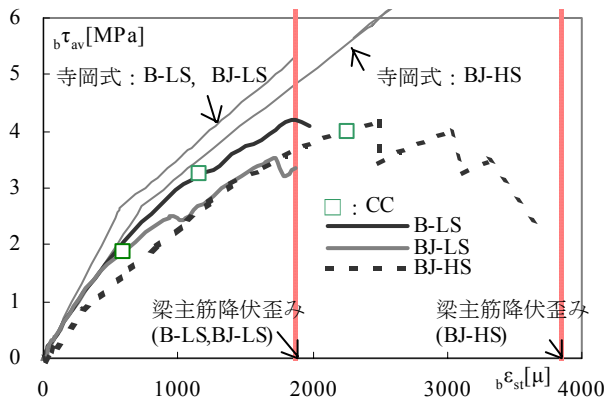


図-6 $b\tau_{av}-b\varepsilon_{st}$ (寺岡式と比較)

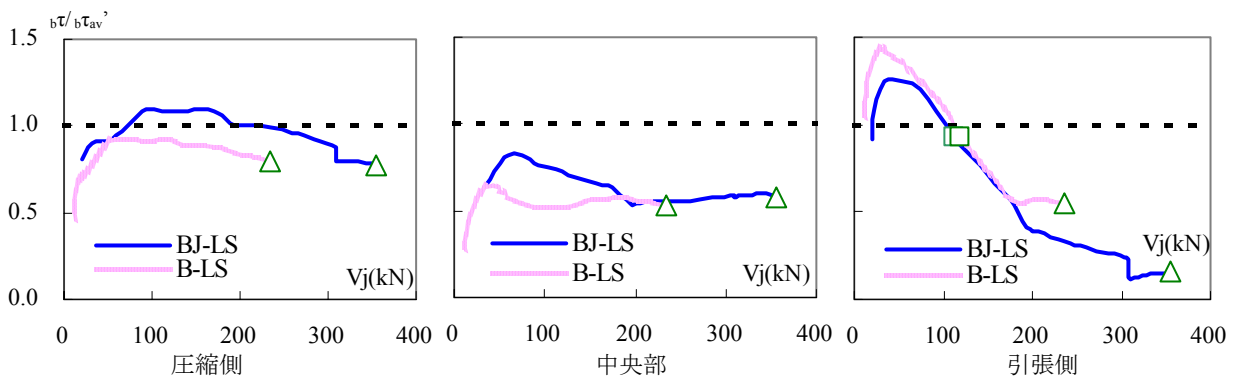


図-7 基準化局所付着応力度-接合部せん断力(B-LS, BJ-LS)

□：柱曲げひび割れ
△：主筋降伏時

が多いため、梁主筋歪みが小さい段階で柱曲げひび割れが生じ、梁主筋引張側での拘束力が低下するため、付着剛性が早期に低下すると考えられる。

5. 接合部域梁主筋付着劣化度

5.1 付着指標が同じで接合部せん断入力量異なる場合(B-LS, BJ-LS)

図-7にはB-LSとBJ-LSの梁主筋降伏時までについて、縦軸に歪み測定値より算出した接合部域梁主筋局所付着応力度($b\tau$)を曲げ理論値から算出した平均付着応力度($b\tau_{av}$)で除すことによって基準化した値(以後、基準化局所付着応力度($b\tau/b\tau_{av}$)と呼ぶ)を、図-8には、縦軸に歪み測定値より算出した接合部域梁主筋平均付着応力度($b\tau_{av}$)を曲げ理論値から算出した平均付着応力度($b\tau_{av}$)で除すことによって基準化した値(以後、基準化平均付着応力度($b\tau_{av}/b\tau_{av}$)と呼ぶ)を各々とり、接合部せん断力(V_j)($V_j=2T-V_c$, T：接合部端の梁主筋の引張力の総和、 V_c ：柱せん断力)との関係を示す。

各区間で両試験体について比較すると、付着劣化度はどの区間でも同じような傾向を示す。圧縮側ではほぼ付着劣化なく一定に推移し、中央部では付着劣化度が大きく約6割程度だが、 V_j が増加しても劣化度はほぼ一定の値を示す。それに対して、引張側では柱曲げひび割れが発生後から急激に付着劣化する。この引張側の急激な付着劣化は、柱曲げひび割れの影響によるものではあるが、両試験体の柱曲げひび割れ発生荷重は同じであったので、柱曲げひび割れに

よる影響は同じ接合部せん断力時と比較すると、降伏直前では違いが出たものの降伏に至る過程では付着劣化度は同じ傾向であると言える。

図-9に梁主筋降伏時のひび割れ状況を示す。この2体の試験体の場合では、主筋本数が多いBJ-LSは降伏時の接合部せん断力が大きくなるので、ひび割れ発生から梁主筋降伏までの間に、引張側に生じる柱曲げひび割れの本数や進展長さなどのひび割れ状況に差異が生じ、付着劣化度が大きくなったと考えられる。これにより、図-8の接合部全域でみた場合、付着劣化していく推移は同じだが、降伏時の接合部せん断力が大きいBJ-LSの方が付着劣化度は大きくなった。

5.2 接合部せん断入力量が同じで付着指標が異なる場合(BJ-LS, BJ-HS)

図-10に同じ接合部せん断入力量であるBJ-LSとBJ-HSについて接合部域各区分での梁主筋降伏時までについて、縦軸を基準化局所付着応力度($b\tau/b\tau_{av}$)、図-11に縦軸に基準化平均付着応力度($b\tau_{av}/b\tau_{av}$)を各々とり、接合部せん断力

(V_j)との関係を示す。

引張側では両試験体とも、接合部せん断力が増加するにつれて付着劣化度が大きくなる傾向を示している。同じ接合部せん断力では付着劣化度は同じであると言える。引張側に関しては、条件の違う三体の試験体B-LS, BJ-LS, BJ-HSで柱曲げひび割れ発生後の付着劣化度の推移が同等であるという傾向が見られた。これは、接合部内引張側では、柱曲げひび割れ発生の影響があり、同じような付着劣化度を示すと考えられる。

BJ-LSとBJ-HSの圧縮側及び中央部について、同じ接合部せん断力時と比較した場合、全体的

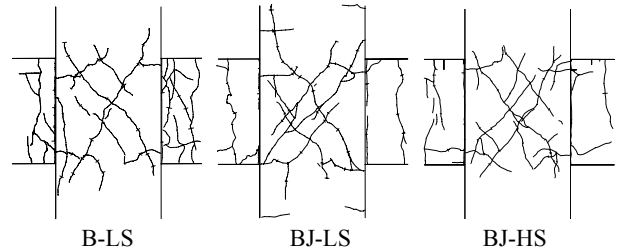


図-9 梁主筋降伏時のひび割れ状況

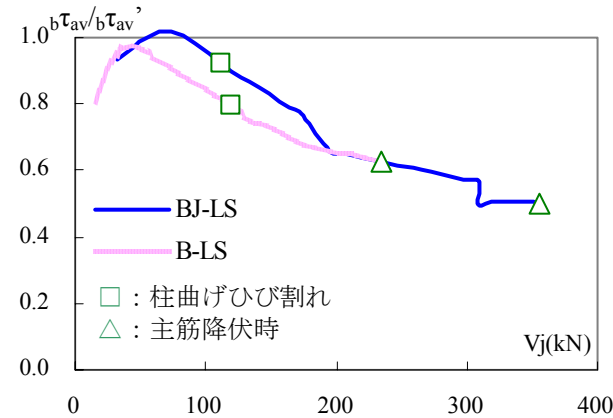


図-8 基準化平均付着応力度-接合部せん断力 (B-LS, BJ-LS)

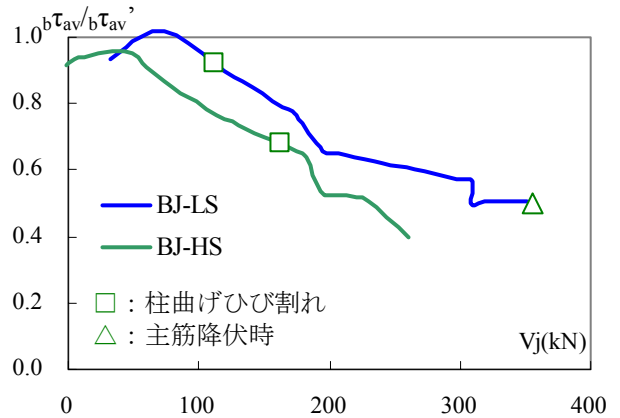


図-11 基準化平均付着応力度-接合部せん断力 (BJ-LS, BJ-HS)

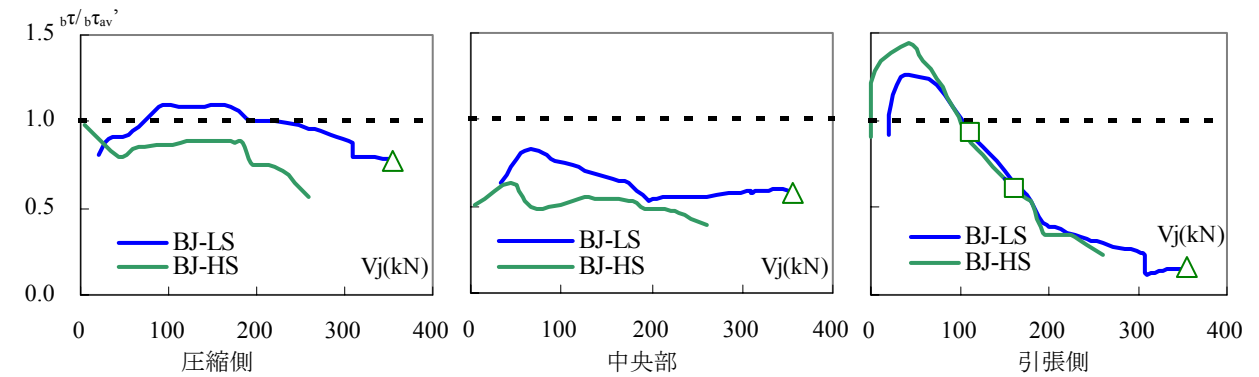


図-10 基準化局所付着応力度-接合部せん断力(BJ-LS, BJ-HS)

□ : 柱曲げひび割れ
△ : 主筋降伏時

に BJ-HS の方が付着劣化度が大きくなっている。図-12 に曲げ理論値から算出された付着応力度 (τ) と接合部せん断力 (V_j) の関係を示す。同じ接合部せん断力時で比較した場合、主筋径が小さい BJ-HS の方が付着応力度は高くなる。即ち、主筋径の細い鉄筋では単位表面積当たりで負担すべき付着力が大きくなり付着劣化しやすくなる。圧縮側及び中央部では主筋径が小さい BJ-HS で付着劣化度が大きくなったことから、図-11 より接合部全域の同じ接合部せん断力時での平均付着劣化度は、付着指標の大きい BJ-HS の方が大きくなる。

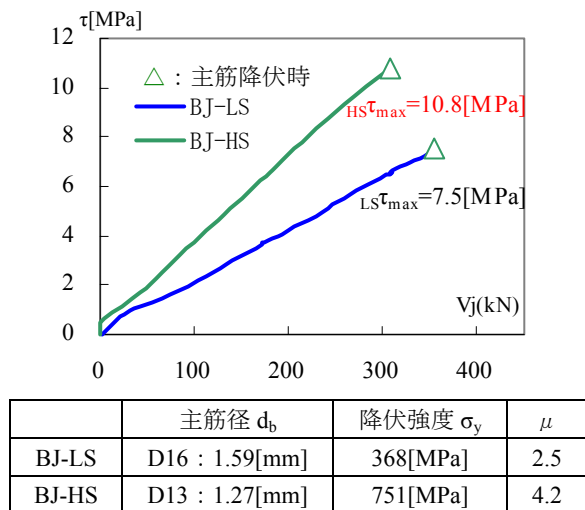


図-12 理論付着応力度-接合部せん断力

6. まとめ

本研究より得られた知見を以下に示す。

- 1) 接合部域梁主筋平均付着応力度は、柱曲げひび割れの発生によって梁主筋の接合部端引張側近傍のコンクリートの拘束効果が低下し、劣化すると考えられる。
- 2) 付着指標が等しく接合部せん断入力量が大きい試験体では、梁主筋降伏時の接合部域引張側での付着劣化度が大きく、接合部域梁主筋平均付着応力度は小さくなる。
- 3) 接合部せん断入力量が等しく梁主筋径が細い試験体では、梁主筋の接合部域圧縮側及び中央部で発揮されるべき付着応力度が高くなることによって付着性状が悪化し、接合部域梁主筋平均付着劣化度も大きくなる。

- 4) 梁主筋の接合部域引張側では、同じ接合部せん断力時でせん断入力量及び付着指標による影響はなく、柱のひび割れ状況に強く影響を受けるため梁主筋付着劣化度は同じとなると考えられる。

これらの結果から、接合部内梁主筋付着性状の評価に際し、引張側では柱ひび割れ性状、圧縮側及び中央部では付着指標による影響を受けることを考慮しなければならない。

謝辞

本研究は、東京工業大学建築物理研究センターとの共同研究であり、また、実験実施にあたり御協力頂いた皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 森田司郎, ほか: 鉄筋コンクリート柱・はりにおけるはり軸筋の接合部からの抜け出しについて, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1099-1100, 1972.10
- 2) 北山和宏, ほか: 鉄筋コンクリート梁の降伏変形推定法, 日本建築学会構造系論文集, No501, pp.85-92, 1997.11
- 3) 寺岡勝, ほか: 鉄筋コンクリート内柱・梁接合部における通し梁主筋の降伏前の付着挙動の評価, 「材料」, Vol.48, No.8, pp.927~933, 1999.8
- 4) 李詳浩: 高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造内柱・梁接合部の耐震性能に関する研究, 1994.12
- 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, pp.255-258, 1999.8
- 6) 藤井栄, ほか: 高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部における梁通し筋の付着性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13-2, pp.483-488, 1991.6
- 7) 乗物丈巳他: RC 内部梁・柱接合部終局強度への諸因子の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.109~110, 1995.