

# 論文 高強度鉄筋コンクリート造中柱梁接合部の梁主筋の付着性状

小田 稔<sup>\*1</sup>・小杉 一正<sup>\*2</sup>・山中 久幸<sup>\*1</sup>・田野 健治<sup>\*2</sup>

**要旨:**高強度鉄筋コンクリート造の中柱梁接合部では、梁主筋の付着劣化が問題となる。本論では、中柱梁接合部の梁主筋の付着性能を対象として加力実験を行い、梁主筋のすべり量と付着応力度から梁主筋の付着性状を検討した。その結果、梁主筋のすべり量と履歴ループのピンチ化は対応すること、1段筋と2段筋、外端筋と中間筋のように鉄筋位置により付着性能に違いが見られること等が明らかとなった。

**キーワード:**高強度材料、中柱梁接合部、梁主筋の付着性状、すべり量、付着応力度

## 1. はじめに

近年、高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造の開発が進められている。高強度材料により部材断面の縮小化を図った場合、柱梁接合部内の梁主筋には大きな付着力が発生し、付着劣化が問題となる。このため、梁主筋の付着性能を確保するための設計法が各種提案されている[1]。本論は、高強度鉄筋のSD490を対象に、これらの設計法に基づいて構成した中柱梁接合部の試験体の加力実験を行い、曲げ降伏後の梁主筋の付着性状を検討することを目的としている。

## 2. 実験概要

図-1に試験体図を、表-1に試験体一覧を示す。試験体は高層建物下層階の中柱梁接合部を対象とした約1/2の縮小模型である。実験パラメータは梁主筋量(径、本数)とコンクリート強度であり、柱梁接合部内の梁主筋の付着性能と柱梁接合部のせん断性能を変化させている。付着性能の指標としては、文献[2]の付着指標 $\mu$ に基づく付着指標値 $D/D_{cal}$ と文献[3]に示されている付着指標値 $\tau_u/\tau_f$ を用いている。せん断性能の指標としては、せん断余裕度(柱梁接合部せん断耐力時の梁せん断力/梁曲げ耐力)を用いた。

BN-1は、付着指標値およびせん断余裕度を1.0以上確保した試験体である。これに対して、BN-3, 5は付着指標値を1.0以下としてBN-1に比べて付着劣化を図った試験体であり、せん断余裕度についてはBN-1とほぼ同等となるようにしている。付着性能を低下させる方法として、BN-3では梁主筋径を上げ、BN-5ではさらにコンクリート強度を下げている。BN-2は、

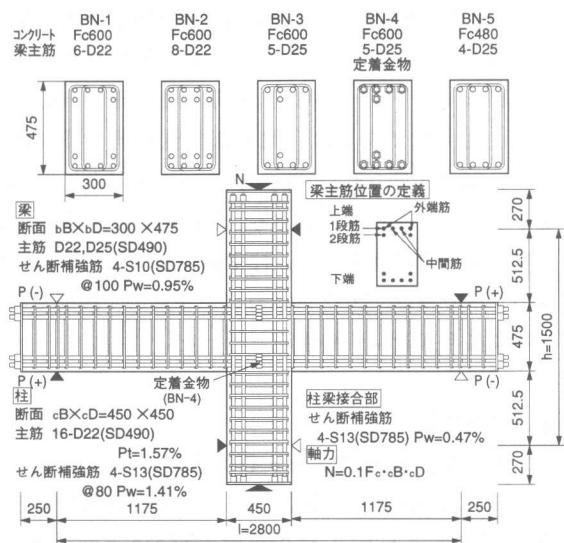


図-1 試験体図

\*1 : 三井建設(株) 技術本部 技術研究所(正会員)

\*2 : 三井建設(株) 技術本部 技術研究所

表-1 試験体一覧および実験結果

試験体名	試験体概要				計算結果								実験結果 最大耐力 ePu (tonf)	破壊モード			
	コンクリート強度			梁主筋定着金物	梁	柱梁接合部											
	設計	圧縮	割裂			せん断				付着							
	F <sub>c</sub>	$\sigma_B$	$\sigma_t$			曲げ gP <sub>m</sub> (tonf)	pP <sub>s</sub> (tonf)	pP <sub>s</sub> gP <sub>m</sub>	$\mu$	D Dcal	$\tau_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\tau_f$ $\tau_u$	$\tau_f$				
	(kgf/cm <sup>2</sup> )																
BN-1	600	805	49	6-D22		37.8	59.5	1.57	8.9	1.12	152	125	1.22	42.9	B		
BN-2				8-D22	無	49.4	57.8	1.17	8.9	1.12	152	125	1.22	51.7	BS		
BN-3				5-D25		44.5	60.5	1.36	10.9	0.92	134	142	0.94	46.3	BB		
BN-4				5-D25	有	44.5	60.5	1.36	10.9	0.92	134	142	0.94	46.6	BS		
BN-5	480	523	42	4-D25	無	36.4	50.5	1.39	13.5	0.74	102	142	0.72	37.5	BB		

## &lt;共通要因&gt;

梁スパン: l=2,800 階高: h=1,500

梁: 断面 bB×bD=300×475

主筋 D22, D25(SD490)

横補強筋: 4-S10(SD785)@100 Pw=0.95%

柱: 断面 cB×cD=450×450

主筋 16-D22 (SD490) Pt=1.57%

横補強筋: 4-S13(SD785)@80 Pw=1.41%

柱梁接合部: 横補強筋 4-D13 Pw=0.47%

軸力: N = 0.1F<sub>c</sub>·cB·cD

&lt;破壊モード&gt;

B: 曲げ降伏

BS: 曲げ降伏後接合部せん断劣化

BB: 曲げ降伏後接合部梁主筋付着劣化

## &lt;計算方法&gt;

記号は参考文献参照

梁: 曲げ耐力 gP<sub>m</sub> は建築センター式<sup>[4]</sup>

柱梁接合部:

せん断耐力 pP<sub>s</sub> は接合部せん断耐力を  $pQ_s = 5.5 \sqrt{O_B} Be \cdot cD$  とし、梁のせん断力に変換した<sup>[5]</sup>

Be: 接合部有効幅(柱幅と梁幅の平均)

付着  $\mu$ : 文献[2]の付着指標

$$\mu = \sigma_y db / (cD \sqrt{O_B}), \quad D/Dcal = 10/\mu \quad (\text{付着指標値})$$

 $\tau_u, \tau_f$ : 文献[3]の付着指標値

$$\tau_u = 22.5 (0.86 + 0.84 \sigma_0 / \sigma_B) Be / db \cdot (O_B / 357)^{0.86}$$

$$\tau_f = \sigma_y db / (2cD) \quad db: n \times db(n: \text{鉄筋本数})$$

BN-1 と同等の付着性能を確保しつつ柱梁接合部のせん断余裕度を下げた試験体である。また、BN-4 は、BN-3

に対して梁主筋の柱梁接合部中央にナットを取り付けた試験体で、梁主筋の付着性能の改善を目的としている。この時、ナットと鉄筋のがた止めには、ナット中央に 6 フの孔を設けてグラウト材を注入した。

表-2 に鉄筋の材料試験結果を示す。主筋には SD490 を、せん断補強筋には SD785 の高強度鉄筋を用いた。

加力は柱に一定軸力( $N=0.1F_c \cdot cB \cdot cD$ )を与え、柱の上下をピン・ローラー支持し、梁端に左右逆方向の力を加えた。加力サイクルは、梁の部材変形角が  $R=1/400$ , $1/200\text{rad}$  で 1 回、 $R=1/100, 1/66, 1/50, 1/33, 1/20\text{rad}$ 

で 3 回正負の繰り返しである。測定項目は、荷重、変形、鉄筋のひずみ度である。荷重は梁荷重、柱軸力を、変形は梁変形、柱梁接合部変形、柱梁接合部内梁主筋のすべり量を測定した。梁主筋のすべり量は、図-2 のように上下端の 1 段筋で測定した。ひずみ度の測定は、梁、柱主筋および柱梁接合部せん断補強筋で行った。

表-2 鉄筋の材料試験結果

呼び名	鉄筋種類	降伏点 $\sigma_y$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強さ $\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	ヤング率 $\times 10^4 E_s$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
D25	SD490	5,450	7,360	2.04
D22	SD490	5,120	7,220	1.98
D13	SD785	8,330	10,540	2.23
D10	SD785	8,490	10,340	2.23

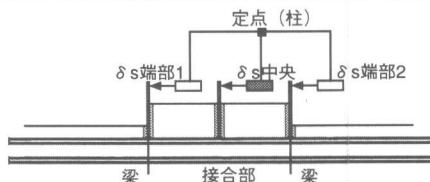


図-2 梁主筋のすべり量測定

## 3. 実験結果

## 3. 1 荷重-変形関係および破壊経過

図-3 に荷重-変形関係を、図-4 に最終破壊状況を示す。全ての試験体において、梁主筋の 1 段筋は  $1/100\text{rad}$  までに、2 段筋は  $1/66\text{rad}$  までに降伏している。BN-1 は、 $1/33\text{rad}$  の繰り返しにより耐力がやや低下し、 $1/20\text{rad}$  の繰り返しで履歴性状にピンチ化が見られた。BN-3, 5 は BN-1 とほぼ同様の経過を示したが、 $1/33\text{rad}$  の繰り返しで履歴性状のピンチ化が BN-1 に比べてやや大きくなっている。BN-2 は、せん断補強筋の降伏が他の試験体に比べて早期( $1/66\text{rad}$ )に始まり、 $1/50\text{rad}$

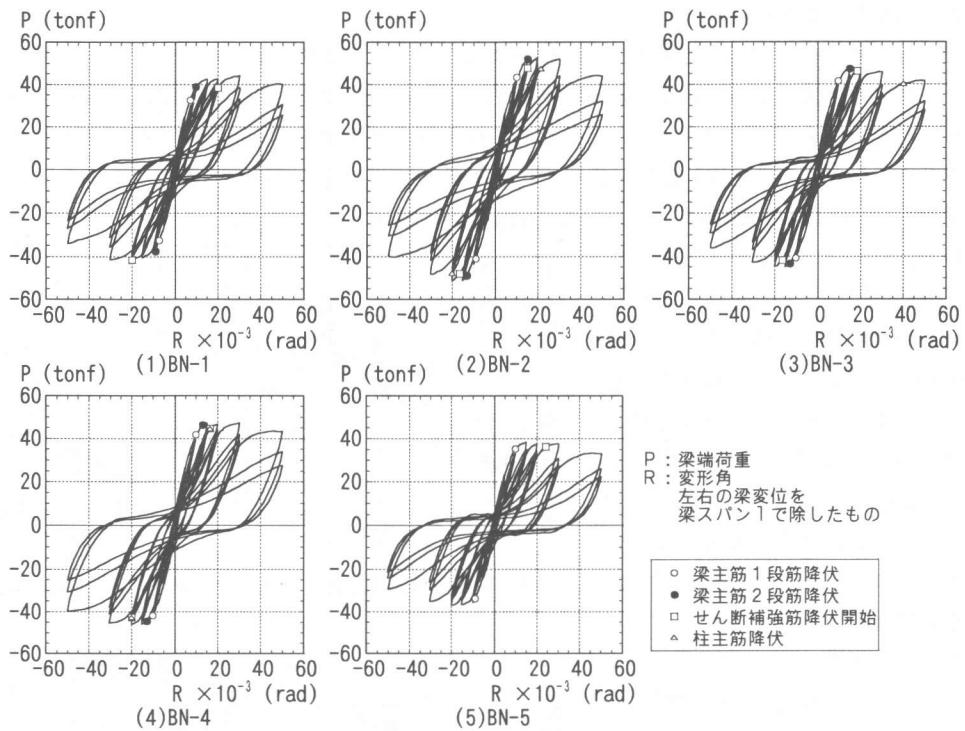


図-3 荷重-変形関係

の繰り返しで柱梁接合部のせん断ひび割れが大きくなり、 $1/33\text{rad}$  の繰り返しで耐力が低下した。BN-4 は、BN-3 とほぼ同様の履歴経過を示しているが、 $1/50\text{rad}$  に柱梁接合部のせん断ひび割れが大きくなり、最終変形時には BN-3 に比べて

接合部の損傷が大きかった。これは柱梁接合部中央の梁主筋に設けたナットの支圧作用の影響と思われる。各試験体は付着指標値  $\tau_u/\tau_f$  が 1.0 以下のものも含めて、 $1/50\text{rad}$  までは曲げ降伏型の安定した履歴性状を示し、 $1/20\text{rad}$  においても耐力の低下は最大耐力の 80% 以内であった。

### 3.2 等価粘性減衰定数と履歴ループのピンチ化

図-5 に各加力サイクルの等価粘性減衰定数  $heq$  を示す。各試験体の  $heq$  は、文献[2]で付着性能評価の目安としている「 $1/50\text{rad}$  で 10% を確保」を 1 回目は確保しているが、2, 3 回目は下回っている。それ以降の変形角では 10% 以上である。 $heq$  が  $1/50\text{rad}$  の繰り返しで 10% を下回っているのは、梁主筋に高強度鉄筋の SD490 を用いており降伏変形角が  $1/100 \sim 1/66\text{rad}$  と遅くなっているためである。図-6 に各加力サイクルの履歴ループのピンチ化の度合いを示す。ここで、ピンチ化の度合いとは、荷重除荷時の剛性  $K_1$  とスリップ剛性  $K_2$  の比で評価したものである。 $K_1/K_2$  は、BN-1 では  $1/33\text{rad}$  の繰り返しで急激に大きくなっているのに対し、BN-3, 5 では  $1/50\text{rad}$  から徐々に増加している。これより、付着指標値が小さいほど早期にピンチ化が進行することが分かる。BN-2, 4 は BN-1, 3, 5 に比べて  $1/33\text{rad}$  以降に耐力低下の度合いの大きい履歴性状を示しているが、 $K_1/K_2$  は小さく、ピンチ化の傾向は少なかった。BN-2, 4 で  $1/20\text{rad}$  の  $heq$  が大きいのはこのためである。

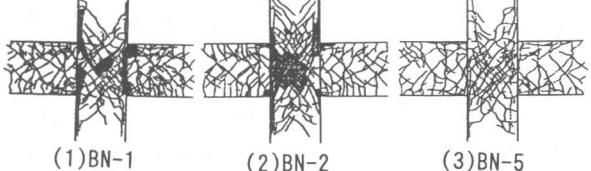


図-4 最終破壊状況

### 3.3 梁主筋のすべり量

図-7に、柱梁接合部の端部と中央部における梁主筋のすべり量の一例を示す。中央部のすべり量は正負対称の性状を示しており、端部は梁主筋の引張応力時では大きく、圧縮応力時では小さくなっている。図-8に各加力サイクルピーク時の柱梁接合部の梁主筋中央部のすべり量（上下端および正負載荷の値の平均値）の推移を示す。梁主筋のすべり量は、図-6の履歴ループのピンチ化の度合いとほぼ同様に推移している。BN-1,3,5においては、 $1/33\text{rad}$ までは付着指標値に応じて梁主筋のすべり量に差が見られた。BN-2のすべり量は $1/33\text{rad}$ の1回目まではBN-1と同様の性状を示すが、それ以降BN-1程は進展しない。BN-4は、BN-3のすべり量が $1/50\text{rad}$ で徐々に増加したのに対し増加せず、ナットによる定着の効果が見られる。図中には4.3に示す局所付着応力度が最大となる加力サイクルを黒塗りで示した。すべり量は局所付着応力度が最大値に達してもすぐには増加していない。

### 3.4 変形成分の分離

図-9に各加力サイクルピーク時の柱梁接合部、柱、梁、および梁主筋の抜け出しによる変形の割合を示す。梁主筋の抜け出しによる変形は、測定した主筋のすべり量から梁端の回転角 $\theta$ を求めて算出したものである。梁主筋の抜け出しによる変形量は、 $1/50\text{rad}$ までは $10\sim30\%$ であり、その後BN-1,3,5は増大している。これに対して、BN-2,4ではそれぞれ $1/50, 1/33\text{rad}$ から柱梁接合部による変形の割合が増加している。これは、両試験体の柱梁接合部のせ

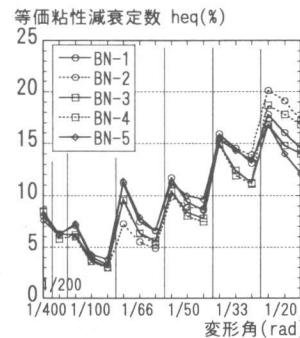


図-5 等価粘性減衰定数

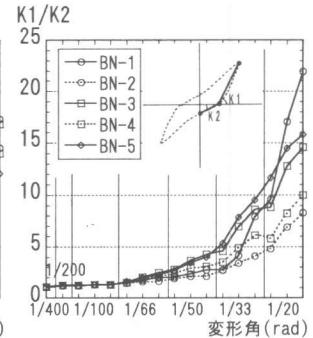


図-6 履歴ループの  
ピンチ化の度合い( $K1/K2$ )

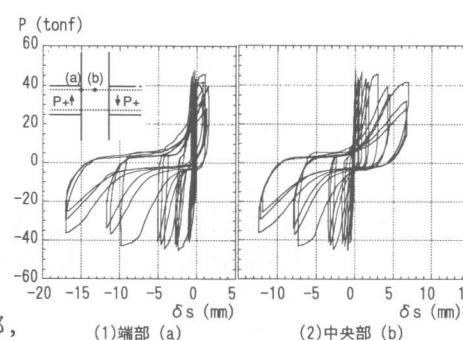


図-7 荷重-梁主筋のすべり量の関係(BN-3) 図-8 梁主筋すべり量の推移

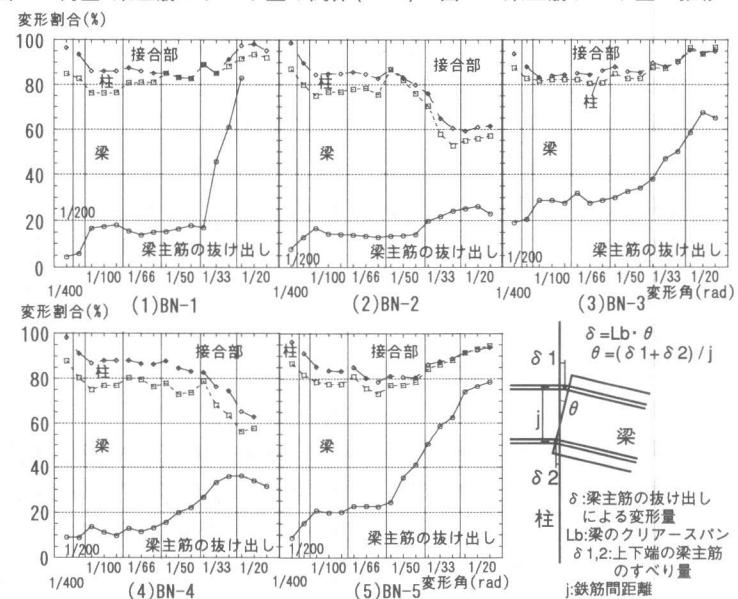


図-9 各部の変形割合

ん断ひび割れやコンクリートの損傷が大きかったことと対応している。

以上に述べた実験結果から、各試験体の破壊形式を以下のように評価する。BN-1は1/33rad以降に梁主筋の付着劣化が生じるもの、1/50radまではすべり量が小さく曲げ降伏とする。BN-3,5は1/50radからすべり量が増加しており曲げ降伏後の梁主筋の付着劣化とし、BN-2,4は曲げ降伏後の接合部せん断劣化とする。

#### 4. 梁主筋の付着性能に関する検討

##### 4. 1 1段筋の挙動

図-10に曲げ降伏および曲げ降伏後付着劣化したBN-1,3,5の梁主筋1段筋の外端筋と中間筋の応力度について、各サイクル1回目の正載荷ピーク時の分布を示す。鉄筋の応力度は、ひずみ度の測定値をRamberg-Osgoodの履歴関数を用いて変換した。この結果、各試験体とも引張側主筋は1/100radでほぼ降伏応力度に達し、それ以降に降伏領域が柱梁接合部内に進んでいる。また、圧縮側主筋は、BN-1では1/50radでほぼ圧縮降伏しているが、BN-3,5では圧縮降伏にいたらば、外端筋については引張応力度に転化している。図-11は図-10の応力度から付着応力度を求めたものである。梁主筋の引張力は、柱梁接合部の圧縮側約2/3の範囲の付着力で確保されている。

##### 4. 2 2段筋の挙動

図-12に2段筋の応力度について、各加力サイクル1回目の正載荷ピーク時の分布を示す。2段筋の応力度(実験値)は圧縮側において1/400radの早い段階から引張応力度に転化している。

破線の計算値は上下端1段筋の実測ひずみ度から平面保持を仮定して2段筋位置のひずみ度を求め、応力度に変換した。引張側では実験値と計算値はほぼ一致しているが、圧縮側では計算値に対して実験値は引張方向に大きく移行している。これは文献[6]でも述べられているように、2段筋が柱梁接合部のせん断ひび割れと交差してせん断補強筋として挙動し、引張力を負担しているためと思われる。

##### 4. 3 局所付着強度

文献[3]では柱梁接合部

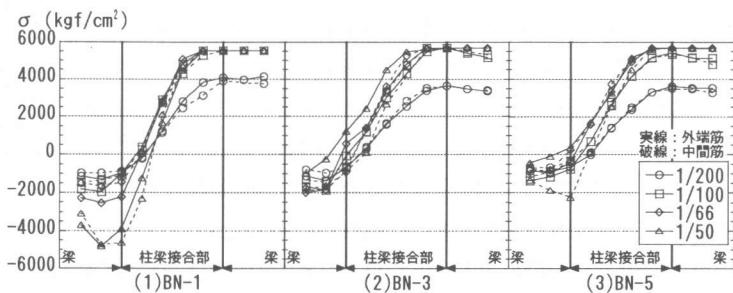


図-10 梁主筋の応力度分布(1段筋)

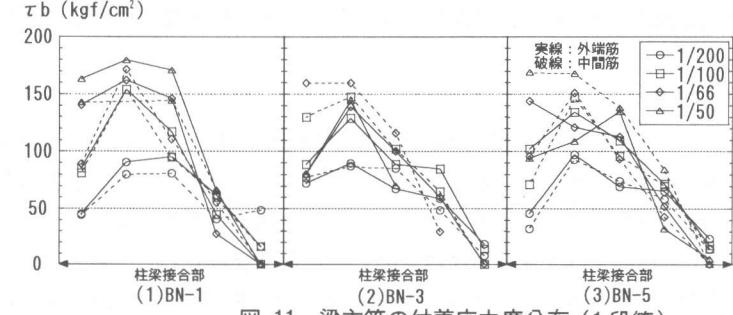


図-11 梁主筋の付着応力度分布(1段筋)

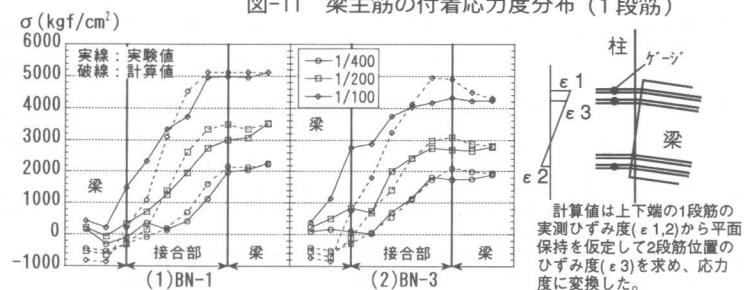


図-12 梁主筋の応力度分布(2段筋)

中央部における梁主筋の局所付着強度 $\tau_u$ を評価し、付着性能の指標としている。図-13は柱梁接合部中央部の各サイクルピーク時の局所付着応力度の推移を示したものである。1段筋の局所付着応力度は、BN-1,2,3では中間筋が外端筋よりも大きく、局所付着応力度が最大になる変形角も大きくなっている。これは、中間筋では外端筋に比べてコンクリートによる拘束度合が大きいためと推測される。一方、BN-4,5では外端筋と中間筋の局所付着応力度の差は小さい。これは、BN-4ではナットにより外端筋も十分な付着性能が得られ、BN-5ではもともと中間筋の付着性能が低く、外端筋と中間筋で同様な性状を示したものと考えられる。2段筋の局所付着応力度は、各試験体とも1段筋に比べてかなり低い値となっている。また、BN-3,4の2段筋ではほとんど差ではなく、ナットによる定着の効果は見られない。

表-3にBN-1,3,5の局所付着応力度の最大値(局所付着強度)を示す。局所付着強度に達するのは1/66~1/50radである。計算値 $\tau_u$ と実験値を比較すると、1段筋の局所付着強度は外端筋( $\tau_{b1}$ )では計算値の1.0~1.5(平均1.27)倍、中間筋( $\tau_{b2}$ )では1.3~1.5(平均1.44)倍であり、計算値 $\tau_u$ は安全側の評価を与えており。一方、2段筋の局所付着強度( $\tau_{b3}$ )は1段筋より小さいが、全体の履歴性状に与える影響は少ないようである。

## 5.まとめ

高強度鉄筋を用いた中柱梁接合部の実験結果から、以下のことが明らかとなった。

- (1)既往の付着指標をもとに構成した試験体において、梁主筋のすべり量、付着強度等の付着性能は、概ね付着指標値の大きさに応じた性状を示している。
- (2)梁主筋のすべり量と履歴性状のピンチ化はほぼ対応している。
- (3)BN-1,2,3の梁主筋1段筋の付着応力度は、外端筋よりも中間筋の方が大きくなっている。
- (4)梁主筋2段筋は圧縮側でも早期に引張応力度に転化し、付着応力度は1段筋よりかなり小さい。
- (5)本実験においては、文献[3]による局所付着強度 $\tau_u$ は安全側の評価を与えている。

謝辞 本研究では、足利工業大学 園部泰寿教授にご指導を賜りました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1]北山 和宏：鉄筋コンクリート柱・はり接合部における通し主筋の付着性状－研究の動向と問題点－、コンクリート工学、Vol.33、No.5、pp.25-33、1995.5
- [2]日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990
- [3]藤井 栄・村上 秀夫ほか：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、No.2、pp.483-488、1991
- [4]日本建築センター：建築物の構造規定－建築基準法施行令第3章の解説と運用－、1995
- [5]（財）国土開発技術研究センター：平成4年度New RC研究開発概要報告書、1994.3
- [6]藤井 栄・森田 司郎：鉄筋コンクリート内・外部接合部の性状の比較、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.2、pp.691-696、1990

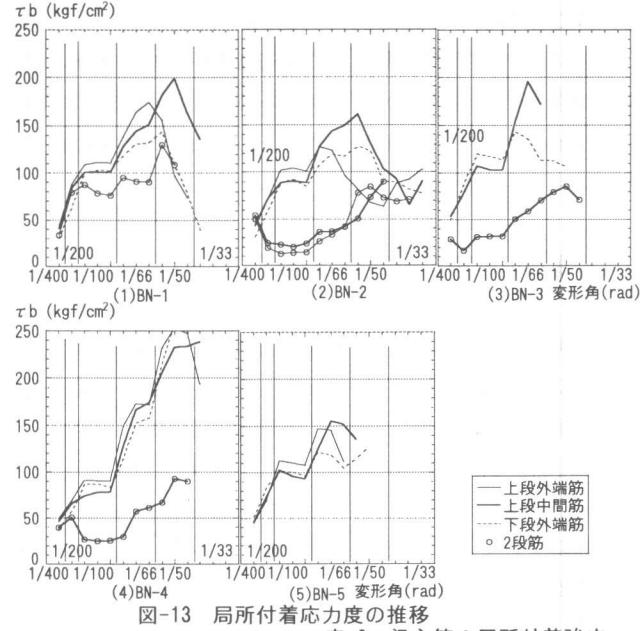


図-13 局所付着応力度の推移

表-3 梁主筋の局所付着強度

	実験値			計算値
	$\tau_{b1}$	$\tau_{b2}$	$\tau_{b3}$	
BN-1	161	201	130	152
BN-3	156	196	108	134
BN-5	161	157	--	102

$\tau_{b1}$ : 1段筋外端筋,  $\tau_{b2}$ : 1段筋中間筋  
 $\tau_{b3}$ : 2段筋  
 単位(kgf/cm²)