

# 論文 内部梁・柱接合部を含む架構における梁主筋降伏時の耐力と変形

上村 智彦<sup>\*1</sup>・吉岡 直子<sup>\*2</sup>

**要旨:** 接合部を含む架構における梁主筋降伏時の耐力と変形について検討したものである。層間変形の構成変形成分について、執筆者等が行った実験で既往の提案式との適合性を確認し、層間変形の推定の方向性を見出す。更に、この結果を踏まえ、層間変形の求め方を既往の実験資料を用いて検討する。その結果、次のような結論を得た。耐力は、±5%の精度で評価できる。層間変形は、実験では、接合部変形と梁主筋の抜け出し量の値に曲げ解析から求めた梁と柱の変形の和となるが、実用的には、梁と柱の変形を剛性低下率を用いて求めた値に文献1)の接合部変形提案式より得た値の和で概ね推定できる。

**キーワード:** 梁主筋降伏、内部梁・柱接合部、耐力、層間変形、破壊モード

## 1. 序

RC造建物の耐震性を評価するためには、梁・柱接合部を含む架構の復元力特性を正確に評価する必要がある。架構の層間変形は、梁、柱、接合部及び接合部からの軸筋の抜け出しによる各変形成分からなる。

上記の代表的研究として、文献2)が挙げられる。文献2)では、接合部内で通し配筋されている梁主筋の付着条件が良好な梁曲げ破壊する型(B型)と梁曲げ降伏後に接合部破壊する型(B·J型)の既往の十字型試験体について、文献1)で示された接合部の復元力特性と梁主筋の接合部からの抜け出し量についての求め方を用いて、架構の変形性能を評価している。しかしながら、同文献での梁降伏時層間変形の評価には、以下の点で検討の余地がある。○梁主筋降伏後の梁降伏荷重時の抜け出し量を、文献1)に従って、梁主筋降伏時について算定している点、又、○架構変形の検討方法が、具体的な実験結果に適用され、各変形成分の評価に基づいたものではない点である。

本論文では、物理的に明確な梁主筋降伏時の耐力と変形を検討した上で、梁降伏時について

考察されるべきと考え、梁主筋降伏時の検討を行う。最初、執筆者等の実験で、変形成分について既往の提案式との比較から、どの点に問題があるかを把握し、層間変形の推定の方向性を見出す。更に、この結果を踏まえ、層間変形の求め方を、既往の実験資料を用いて検討する。

## 2. 執筆者らの実験による検討

### 2.1 対象試験体と架構の変形

ここでは、文献3)と文献4)で報告した表-1の試験体6体(B型2体、B·J型4体)の層間変形と接合部変形及び梁主筋の抜け出し変形を既往の提案式を用いて検討する。

階高とスパンの中央から取り出した十字形梁・柱接合部の各部材変形成分を図-1に示す。層間変形は、柱変形( $\delta_c$ )、梁変形( $\delta_b$ )、接合部変形( $\delta_j$ )及び梁主筋の抜け出しによる変形( $\delta_s$ )の和として求められる。尚、柱主筋の抜け出し変形は、一般に、接合部近傍で、柱主筋応力が小さいので梁主筋と比べて微小と考える。

$$\delta_c = \delta_{c1} + \delta_{c2} \quad (1)$$

$$\delta_b = (H/L) \cdot (\delta_{b1} + \delta_{b2}) \quad (2)$$

$$\delta_j = (1 - D_b/H - D_c/L) \cdot \gamma \cdot H \quad (3)$$

\*1 芝浦工業大学教授 工学部建築学科 工博（正会員）

\*2 旭硝子ビルウォール（株）（非会員）

表-1 試験体の形状・寸法

形状・加力方法	梁		柱	NO.①	NO.②	NO.③	NO.⑤	NO.⑥	NO. 1
軸力: $N=294.2[N]$	NO.①~③ NO.1	NO.⑤, ⑥	全試験体共通	補強筋 (フープ筋) 0.15%	1-D6 0.30%	4-D6 0.60%	2-D6 0.30%	4-D6 0.60%	4-D6 0.60%
付着指標値 <sup>*1</sup>	14.73	14.73	14.73	14.73	14.73	14.73	14.73	14.73	13.17
接合部せん断入力量 <sup>*2</sup> (破壊モード)	0.59 B·J型	0.56 B·J型	0.56 B·J型	0.41 B型	0.41 B型	0.41 B型	0.41 B型	0.46 B·J型	
正負交番繰返し 加力 (梁端加力) 階高×スパン 1400×2000	3-D16 $P_t=1.58\%$ $B_b \times D_b$ 180×250	2-D16 $P_t=1.05\%$ $B_b \times D_b$ 180×250	8-D16 $P_t=2.55\%$ $B_b \times D_b$ 250×250	*2 接合部せん断入力量: $\tau_p / \nu \sigma_B$ $\tau_p$ : 最大耐力時接合部せん断応力度, $\nu \sigma_B$ : コンクリート有効圧縮強度 ( $\nu=0.8 \cdot \sigma_B/235$ ) 接合部せん断力の求め方: $V_t=2M_b/j_b-Q$ $M_b$ : 梁接合部端バネル面梁モーメント $Q$ : 柱せん断力, $j_b$ : 梁有効せいの7/8倍 接合部バネル: 梁及び柱の応力中心間距離で囲まれた部分, 有効幅は梁幅と柱幅の平均値					

\*1 付着指標値:  $d_b \cdot \sigma_y / (D_c \cdot \sqrt{\sigma_B})$

$d_b$ : 梁主筋径,  $\sigma_y$ : 梁主筋降伏応力度,  $D_c$ : 柱せい,  
 $\sigma_B$ : コンクリート強度

$$\delta_S = \theta \cdot (L_0/2), (\theta = S/j) \quad (4)$$

$L, H$ : スパン長と階高,  $D_b, D_c$ : 梁と柱のせい

$\delta_{b1}, \delta_{b2}$ : 左右の梁変形,  $\delta_{c1}, \delta_{c2}$ : 上下の柱変形

$S, \theta$ : 抜け出し量と回転角,  $\gamma$ : 接合部変形

$L_0$ : 梁のクリアスパン,  $j$ : 主筋の重心間距離

梁主筋の抜け出しの測定方法を図-2に示す。梁主筋の抜け出し量とめり込み量は、柱接合部中心部のコンクリート中に埋め込んだボルトと、梁接合部端から接合部外側に4cmの位置の梁主筋との相対的滑り量としている。また、伸び量は、抜け出し量からめり込み量を差し引いた値である。



図-2 抜け出し変形の測定方法

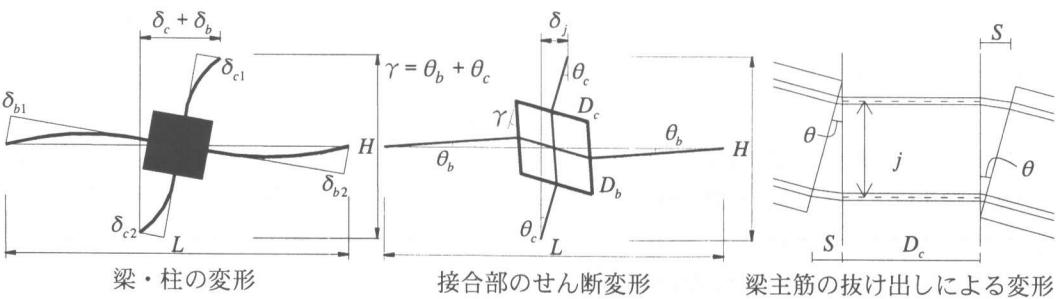


図-1 各部材変形成分

### 2.3 梁主筋降伏時の接合部変形

接合部せん断応力度とせん断変形角関係を、接合部せん断ひび割れ発生時せん断応力度と初期剛性( $G_1$ )及び第2剛性( $G_2$ )から表現した文献1)に従い求め、梁主筋降伏時の接合部変形による層間変形を式(3)により算出する。図-4の計算値と実験値の比較から、B型で、実験値がかなり小さい値となる場合が見られる。尚、B型の場合、梁主筋降伏時の接合部変形の層間変形への影響は、微小である。

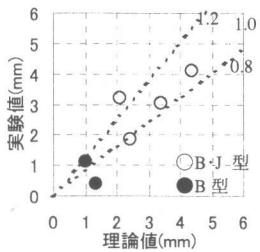


図-4 接合部変形による層間変形

### 2.4 梁主筋降伏時の梁主筋の抜け出し

#### 2.4.1 検討方法

以下に示す方法1と方法2より求めた抜け出し量と測定した抜け出し量との比較を行う。

方法1：文献1)の下式によって梁主筋降伏時の抜け出し量( $S_y$ )を求めた。

$$\text{上端筋: } S_y = k_t \cdot \Delta S, \text{ 下端筋: } S_y = k_b \cdot \Delta S$$

$$\Delta S = \varepsilon_y \cdot D_c / 2$$

$k_t, k_b$ ：上・下端筋の抜け出し係数

$$k_t = 0.368 \cdot (u_b / \sigma_B)^{2/3} + 0.733$$

$$k_b = 0.321 \cdot (u_b / \sigma_B)^{2/3} + 0.463$$

$$u_b = (1 + \gamma) (\sigma_y \cdot d_b) / (4 \cdot D_c)$$

$\varepsilon_y$ ：梁主筋の降伏歪み

$\gamma$ ：複筋比

方法2：測定した梁主筋のひずみ分布から求める(文献6))。図-5に示すように、接合部からの抜け出し量を主筋の接合部域の伸び量( $S_2$ )と接合部へのめり込み量( $S_1$ )の和として求める。伸び量は主筋の歪み( $\varepsilon_{SPX}$ )を接合部域で積分して求め、めり込み量は主筋の歪みと曲げ理論により求めたコンクリート歪み( $\varepsilon_{SCX}$ )の差を、梁

主筋の圧縮歪みがコンクリートとの相対滑りによって減少し始める点( $X_C$ )から危険断面までで積分して求める。

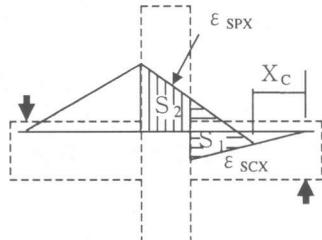


図-5 ひずみ分布からの抜け出し量の算出法

#### 2.4.2 検討結果

図-6に、方法1と方法2による抜け出し量の計算値と測定値との比較を示す。方法1は、B·J型を過小評価としているが、B型では測定値に対応している。一方、方法2は、精度は良いが、B型、B·J型共に、測定値より小さめとなっている。そこで、方法1のB·J型で過小評価となっていることと、方法2で精度が良くならない原因について考察する。

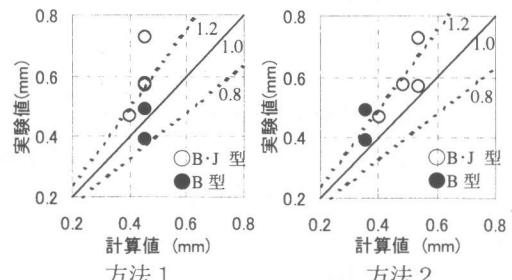


図-6 抽け出し量

図-7に、接合部域の梁主筋の伸び量とめり込み量を示す。歪み分布による梁主筋の伸び量の計算値は、抜け出し量からめり込み量を差し引いた実験値と良い対応を示す。一方、歪み分布による梁主筋のめり込み量は実験値より小さい値になる。これはめり込み量を求める際に、コンクリート歪みに理論値を用いたためである。又、方法1で用いた抜け出し量の算定式にも、この点の考慮がされていない。従って、抜け出

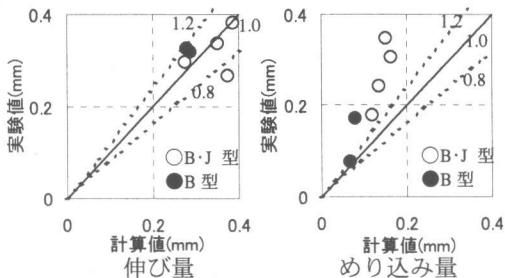


図-7 伸び量とめり込み量

しの評価方法にはめり込み量の考慮が重要であることがわかる。

## 2.5 梁主筋降伏時の層間変形

### 2.5.1 検討方法

ここでは、梁変形と柱変形の成分は、実測が困難であったことから、接合部変形と梁主筋の抜け出しによる変形に実測値を使って、既往の提案式の梁変形と柱変形との適合性を確かめ、同時に層間変形の算出方法の方向性を見出す。

梁と柱変形に、前述の曲げ解析<sup>5)</sup>の曲率分布から求める方法と、剛性低下率の式<sup>7)</sup>を用いて求める方法の二つを使った場合と、剛性低下率の式が梁主筋の抜け出しも加味していることを考慮して、梁主筋の抜け出しを加算しない場合の表-2に示す3方法で検討する。

尚、剛性低下率を用いての梁主筋降伏時の梁と柱変形は、菅野式によって決定される初期剛性と剛性低下率からなる第1、第2勾配の折れ線上にあると考える。

### 2.5.2 検討結果

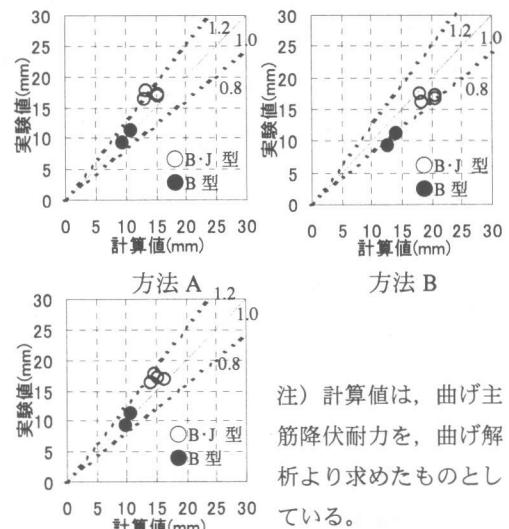
図-8に、各試験体について各方法で求めた実験値と計算値の比較を示す。

方法Aに微小である柱主筋の抜け出し量を考慮すると方法Cと同様な対応を示すと思われる。このことは、方法Aの曲げ解析による梁変形と実測した梁主筋の抜け出しによる変形の和が、方法Cの剛性低下率による梁変形とほぼ同じ値であることを示している。

方法Bで、計算値が大きいのは、剛性低下率の式が、梁主筋の抜け出しによる変形も含んでいることから、梁主筋の抜け出しを重複して加

表-2 各方法における各変形成分の算出法

方法	梁	柱	接合部	梁主筋の抜け出し
A	曲げ 解析値	曲げ 解析値	実測値	実測値
B	剛性 低下率	剛性 低下率	実測値	実測値
C	剛性 低下率	剛性 低下率	実測値	考慮 しない



注) 計算値は、曲げ主筋降伏耐力を、曲げ解析より求めたものとしている。

方法 C

図-8 層間変形の実験値と計算値の比較

算した結果、過大評価となったものと思われる。

以上の結果からは、梁主筋降伏時の層間変形の推定法として、方法Aと方法Cが対応する。

「2.3」の検討から、文献1)の提案式と接合部変形は、概ね対応するが、梁主筋の抜け出しについては、対応を示さなかった。従って、実用的な梁主筋降伏時の層間変形の推定としては、方法Cの接合部変形の実験値を、文献1)の提案式を使った場合とすれば、対応するものと考えられる。

## 3 既往の試験体を用いての検討

### 3.1 対象試験体

試験体は通し配筋されている十字型内部梁・柱接合部で梁曲げ破壊する試験体17体と、梁曲げ降伏後に接合部破壊する試験体33体である。

試験体は、高強度鉄筋を使用したもの、特殊配筋であるもの、スラブや直交梁を有するもの等特殊なものは、除外した。表-3に、使用した試験体の諸元の範囲を示す。

又、使用した試験体の付着指標値 ( $d_b \cdot \sigma_y / (D_c \cdot \sqrt{\sigma_B})$ ) と、せん断入力量 ( $\tau_{py} / \nu \sigma_B$ ,  $\tau_{py}$ : 理論梁曲げ降伏時接合部せん断応力度)との関係を図-9に示す。図-9から付着が悪い試験体や接合部破壊に近い試験体が含まれていることが分かる。但し、試験体は全て、梁主筋が降伏している。

表-3 使用した試験体の諸元の範囲

コンクリート圧縮強度 $\sigma_B$	19.3~54.2 (N/mm <sup>2</sup> )
接合部補強筋比 $p_{jw}$	0.15~1.77(%)
柱軸力比 ( $\sigma_0 / \sigma_B$ )	0.04~0.28
柱断面( $B_c \times D_c$ )	(25×25)~(66×66)(cm×cm)
梁断面( $B_b \times D_b$ )	(18×25)~(60×60)(cm×cm)
$B_b/B_c$	0.67~1.0
$D_b/D_c$	0.88~1.17

注)  $p_{jw} : \sum A_{jw} / (B_c \cdot j) [ \sum A_{jw} : j \text{区間の補強筋断面積の総和}]$   
 $\sigma_0$ : 柱軸応力度

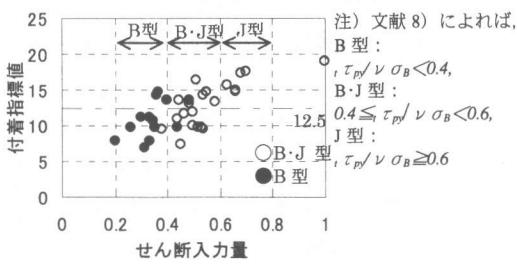


図-9 付着指標値とせん断入力量

### 3.2 検討方法

梁主筋降伏時の変形は、前述の「2.5」の検討から、実用的には、層間変形を剛性低下率を用いた梁変形と柱変形及び文献1)の提案式を用いた接合部変形の和とすれば、良い対応を示すことが得られているが、参考までに、表-4に示すように、この場合(方法I)も含めた組み合わせについて検討する。

表-4 各方法における各変形成分の算出法

方法	梁	柱	接合部	梁主筋の抜け出し
I	剛性低下率	剛性低下率	文献1)の提案式	考慮しない
II	曲げ解析値	曲げ解析値	文献1)の提案式	文献1)の提案式
III	剛性低下率	剛性低下率	文献1)の提案式	文献1)の提案式

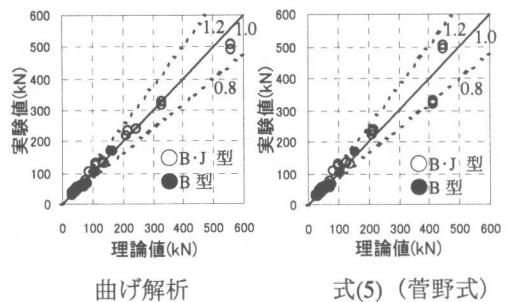


図-10 梁主筋降伏時耐力の比較

### 3.3 検討結果

#### 3.3.1 梁主筋降伏時耐力

図-10に、曲げ解析と菅野式による理論値と実験値の比較を示す。傾向は、前述の「2.2」の検討と同じ傾向を示している。

#### 3.3.2 梁主筋降伏時層間変形

図-11に、各方法によって求めた計算値と実験値の比較を示す。

方法IIでは、実験値より計算値の方が小さくなる。その傾向はB・J型では特に強く、大幅に計算値が小さくなっている。この原因は、前述の「2.4.2」でも示したように、文献1)の抜け出しの提案式によって求めた値が、B・J型で小さくなっていることに起因する。

方法IIIでは、実験値より計算値の方が大きくなる。これは、前述の「2.5」に示したように、梁主筋の抜け出しを重複して加算した結果である。

方法Iでは、B・J型の一部を除けば、±20%の精度で、層間変形が得られる。

尚、これらの方法IIとIIIでの各試験体の各変形の割合を破壊モード別に見ると、梁変形と梁主筋の抜け出しによる変形の和は、B・J型よりB

型の方が、割合が大きくなり(B型:約80%, B・J型:約75%),一方、柱変形と接合部変形の和は、逆にB型よりB・J型の方が大きくなる(B型:約20%, B・J型:約25%)。B型、B・J型いずれの場合も、特に梁変形と梁主筋の抜け出しによる変形の和は、層間変形の80%程度を占めると考えられ、これらの変形の算定の精度を上げることが重要であることが理解できる。

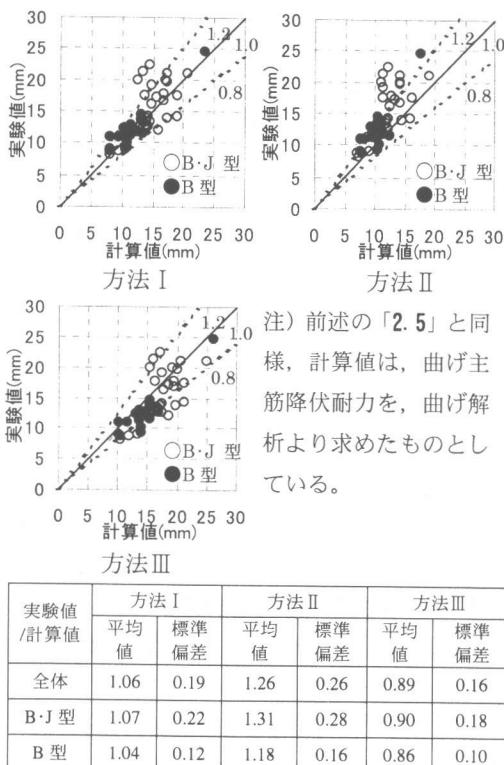


図-11 層間変形の実験値と計算値の比較

#### 4 結び

梁主筋降伏時の耐力と変形について、執筆者の実験と既往の実験資料を用いて、既往の提案式等との比較検討を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 梁主筋降伏時の耐力は、曲げ解析値より小さく、菅野式の値より大きくなる傾向があるが、その相違は、±5%程度である。
- 2) 抜け出し量の精度向上のためには、めり込み量の正確な評価が重要である。

3)執筆者らの実験からは、接合部変形と梁主筋の抜け出し量が正確に求められれば、層間変形は、それらの値に曲げ解析から求めた梁と柱の変形の和として求められることが分かった。

4)ここで使用した既往試験体の層間変形は、実用的には、梁と柱の変形に剛性低下率を用いる算定式、接合部変形には文献1)の提案式を各々用いて求め、それらの和として得られる。

#### 参考文献

- 1) 本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の韌性保証型耐震設計指針(案)・同解説, 1997.9
- 2) 村上秀夫,藤井栄,森田司郎:鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部単位架構の変形性能に関する検討(接合部データベース解析 その2), 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.103-110, 1999.9
- 3) 上村智彦ほか:鉄筋コンクリート造梁・柱接合部の力学的挙動への補強筋の影響, 日本建築学会大会梗概集, 構造IV, pp.411-412, 1997.9
- 4) 上村智彦ほか:梁曲げ降伏するRC造内部梁・柱接合部の補強筋の挙動, 日本建築学会大会梗概集, 構造IV, pp.967-968, 1999.9
- 5) 藤井俊二ほか:材料特性より求めた鉄筋コンクリート断面のモーメント-曲率関係, 日本建築学会大会梗概集, pp.1261-1262, 1973.10
- 6) 森田司郎,角徹三:鉄筋コンクリート柱・はり接合部におけるはり軸筋の接合部からの抜け出しについて, 日本建築学会大会梗概集, pp.1099-1100, 1972.10
- 7) 菅野俊介:鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究, コンクリート・ジャーナル, vol.11, No.2, pp1-9, 1973.2
- 8) 乗物丈巳ほか:RC内部梁・柱接合部終局強度への諸因子の影響, 日本建築学会大会梗概集, 構造IV, pp.109-110, 1995.8