

# 論文 既往の実験に基づく鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の終局強度と梁主筋の抜け出し変形

滝本 博康<sup>\*1</sup>・上村 智彦<sup>\*2</sup>

要旨：接合部を含む架構における接合部耐力と、架構の変形性状を把握する場合に必要な梁主筋の抜け出し変形に関して、既往の実験資料を用いて検討したものである。靱性指針式<sup>1)</sup>では、接合部アスペクト比(梁せい/柱せい)が考慮されていないので、接合部耐力を正しく評価できないが、接合部耐力算定に柱せん断終局強度式を用いると、良い対応が見られる。また、梁主筋の抜け出し変形に関しては、構成するめり込み変形の算出に際しての梁接合部端のコンクリート圧縮歪の評価が重要であることが確認できた。

キーワード：梁・柱接合部，アスペクト比，接合部終局強度，抜け出し変形，めり込み変形

## 1. はじめに

接合部を含む架構の最大耐力と変形性状が予測できることが、設計上、重要なことである。

最大耐力を予測するには、接合部耐力の精度良い評価が可能である必要がある。特に、現在、設計で使用されている接合部終局強度式には、接合部の形状に関する接合部アスペクト比(梁せい/柱せい)の影響が考慮されていない点に一つの問題点がある。

接合部アスペクト比を考慮した研究では、接合部圧縮ストラット機構を用いて接合部耐力を評価しているが、ここでは応力状態の類似性に着目し、接合部を柱の一部と見なせると考え、既往資料を用いて接合部耐力の評価を試みる。

架構の変形性状については、その変形を構成する要素の内、梁主筋の抜け出し量は重要な一要素である。しかしながら、文献2)で示したように、靱性指針式では評価できない。そこで本稿では、既往資料の実測値を用いて、梁主筋の抜け出し量の正確な算定方法の検討を行う。

## 2. 接合部終局強度

文献3)で、現在設計で使用されている接合部設計式<sup>1)</sup>では、接合部アスペクト比(梁せい/

柱せい)が大きい接合部のせん断耐力を正しく評価できないことを指摘した。検討の結果、接合部と柱の応力状態の類似性から、接合部の終局強度の算定に、柱せん断終局強度式が適用可能ではないかという予測を得た。

そこで、ここでは、接合部の形状、特にアスペクト比を考慮した接合部終局強度の算定手法について、既往の実験資料を用いて検討を行う。

### 2.1 検討方法

アスペクト比の大きな接合部は、荷重の上昇に伴う梁部分の曲げひび割れによる開口が原因で、図-1のような応力状態になる。アスペクト比の増大に伴い、接合部が長く、コンクリート圧縮ストラットが急勾配となる。従って、文献5)にも示されているように、接合部の主たる抵抗機構をストラット機構であると仮定すると、接合部圧縮ストラット方向の角度( )が大きくなると共に、ストラット幅の減少により、ストラット応力度が増加し、接合部のせん断強度が低下することが予想される。このような接合部の応力状態は、接合部が柱の逆対称加力実験に似た外力を受ける応力状態に類似している。そこで、接合部を柱の一部と見なし、接合部の

\*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 芝浦工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

終局強度を式(1)に示すRC構造計算規準<sup>4)</sup>における柱せん断終局強度式を適用して求め比較する。

$$V_{ju} = \left\{ \frac{k_u \cdot k_p \cdot (b_c + 180) \cdot 0.115}{M/Qd + 0.12} + 2.7 \sqrt{\rho_w \cdot w_y + 0.1} \right\} \cdot 0.8 D_c \cdot b_c \quad \dots(1)$$

- $k_u$  : 断面形状による補正係数
- $D_c, b_c$  : 柱せいと柱幅,  $\rho_w$  : せん断補強筋比
- $k_p$  : 引張鉄筋比 ( $\rho_t$ ) による補正係数
- $M/Qd$  : せん断スパン比 ( $=j_b/2d$ )
- $j_b$  : 梁主筋間距離,  $d$  : 柱有効せい
- $w_y$  : せん断補強筋降伏強度,  $\sigma_c$  : 軸心力度

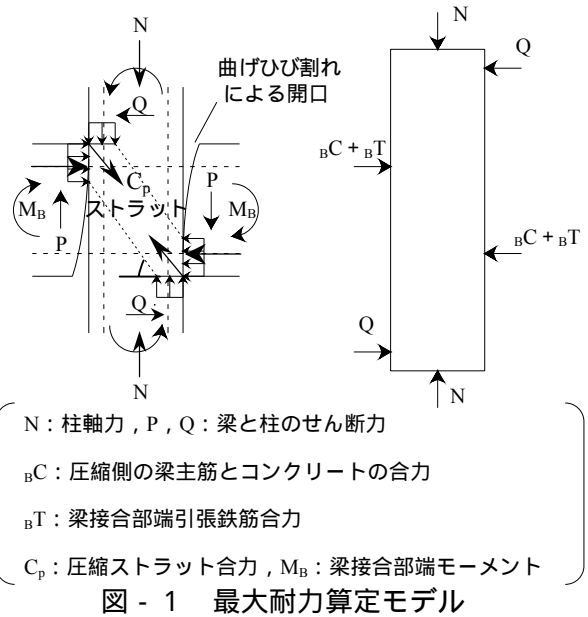
尚, せん断スパン比 ( $M/Qd$ ) については, 文献4)で1  $M/Qd$  3の範囲と定められているが, 同文献にも示されているように  $M/Qd < 1$  の範囲についても, 柱せん断強度値は, 同式と同様の傾向にある。したがって, ここでは接合部の形状を考慮するため, アスペクト比に関連する  $M/Qd$  について  $M/Qd < 1$  の範囲においても適用する。また, ここでの比較では, 柱幅を柱と梁の幅の平均値とした。

### 2.2 対象とした試験体

対象とした試験体は, 国内で行われたスラブ及び直交梁を持たない平面十字型内部梁・柱接合部で, 主筋は通し配筋されたものである。梁と柱が偏心して取り付けられたもの, 変動軸力などの特殊な試験体は除いた。試験体総数は 173 体であり, その内訳は, 梁曲げ降伏後の接合部破壊型 (BJ 型) 108 体, 接合部破壊型 (J 型) 65 体である。尚, 各試験体の破壊モードについては, 各研究者の判断に従い, 最大耐力や層間変形角が明記されていないものについては荷重 - 層間変形曲線より情報を得た。また, BJ 型の試験体の最大耐力は, 接合部終局耐力にほぼ等しいと考える。表 - 1 に使用した試験体の諸元の範囲を示す。又, 図 - 2 に, 破壊モードとアスペクト比及び軸力比の関係を示す。

### 2.3 検討結果

前述の柱せん断終局強度式を適用した場合と, 式(2)の靱性指針式を適用した場合の計算値と実験値との比較を図 - 3 と図 - 4 に示す。



N : 柱軸力, P, Q : 梁と柱のせん断力  
 $B_c$  : 圧縮側の梁主筋とコンクリートの合力  
 $B_t$  : 梁接合部端引張鉄筋合力  
 $C_p$  : 圧縮ストラット合力,  $M_B$  : 梁接合部端モーメント

表 - 1 使用した試験体の諸元の範囲

コンクリート強度( $f_c$ )[MPa]	11.6 ~ 115.3
接合部補強筋比 $p_{jw}$ [%]	0.00 ~ 2.44
柱軸力比 ( $\sigma_c / f_c$ )[%]	0.00 ~ 0.45
柱断面 ( $b_c \times D_c$ ) [mm × mm]	100 × 150 ~ 800 × 700
梁断面 ( $b_b \times D_b$ ) [mm × mm]	100 × 150 ~ 600 × 600
接合部アスペクト比 (梁せい / 柱せい)	0.6 ~ 3.0

$$\text{接合部補強筋比} : p_{jw} = \frac{a_w \cdot n}{b_c \cdot j_b}$$

n : 接合部補強筋の組数

$a_w$  : 1 組の接合部補強筋の断面積,  $j_b$  : 梁主筋間距離

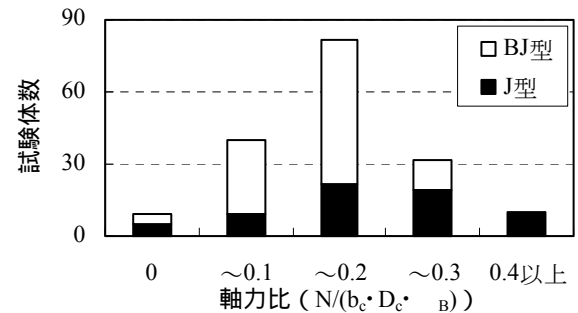
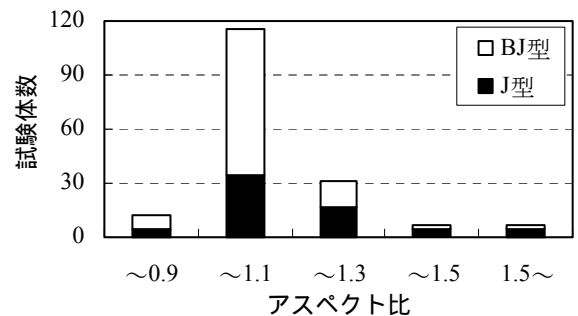


図 - 2 対象とした試験体

$$V_{ju} = 1.56 \times \sigma_B^{0.712} \cdot b_j \cdot D_j \quad (2)$$

( $D_j$ : 柱せい,  $b_j$ : 接合部有効幅)

実験値の接合部せん断力  $V_{ju}$  は, 式(3)より求めた。尚,  $j_b$  を一定と見なしたのは, 接合部破壊型と梁曲げ降伏後に接合部破壊した型の試験体の最大耐力時には, 一般的に梁付け根コンクリートの圧壊は進行していないと考えられるからである。

$$V_{ju} = {}_B C_S + {}_B C_C + T - Q = \frac{2M_B}{j_B} - Q \quad (3)$$

${}_B C_S$ : 梁接合部端鉄筋圧縮合力  
 ${}_B C_C$ : 梁接合部端コンクリート圧縮合力  
 $j_b$ : 梁主筋重心間距離  $7/8d$ ,  $d$ : 梁有効せい

図 - 3 と図 - 4 は, 縦軸に柱せん断終局強度式と, 靱性指針式より求めた計算値を各々実験値で除した値をとり, それらとコンクリート圧縮強度, アスペクト比との関係を示したもので

ある。図 - 3 より, コンクリート強度の影響は見られないが, 柱せん断終局強度式を用いた方が, 靱性指針式より J 型についてばらつきが小さく, 接合部耐力を評価できることがわかる。

図 - 4 より, 靱性指針を用いた場合, アスペクト比が大きい試験体の接合部耐力を危険側に評価する傾向にあることがわかる。一方, 柱のせん断強度式では, アスペクト比が大きい試験体の接合部耐力についても,  $\pm 20\%$  以内で概ね評価できると考えられる。尚, 柱のせん断強度式で求めた値に, せん断補強筋による値の占める割合は, 13%程度である。

これらのことから, 接合部耐力を正しく評価するためには, アスペクト比を考慮する必要があることが分かり, また, 接合部耐力の評価には, 柱せん断終局強度式を用いる方が, 現状では, より適合性が良い。

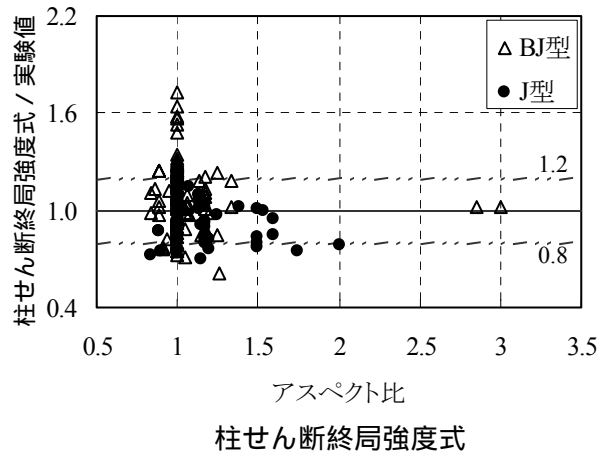
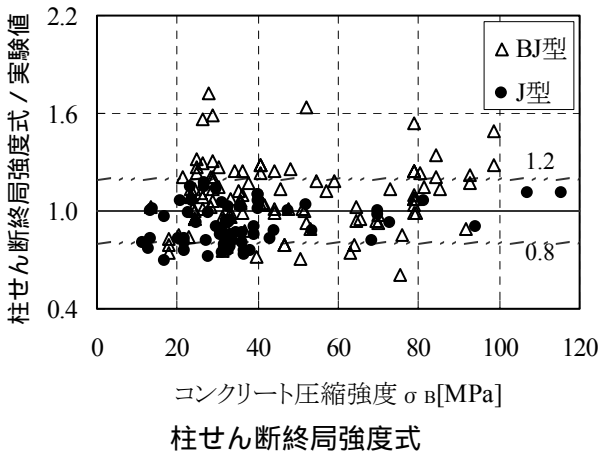
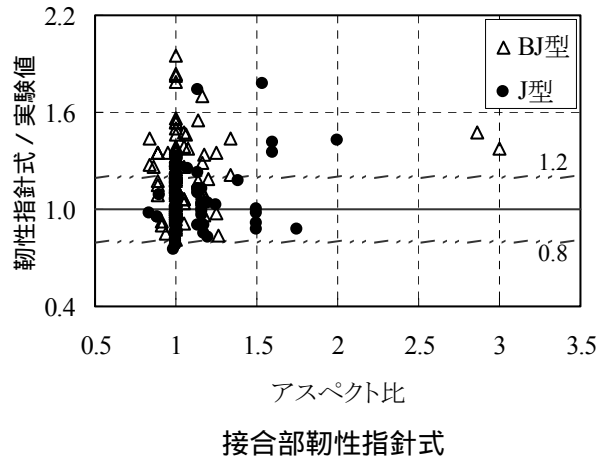
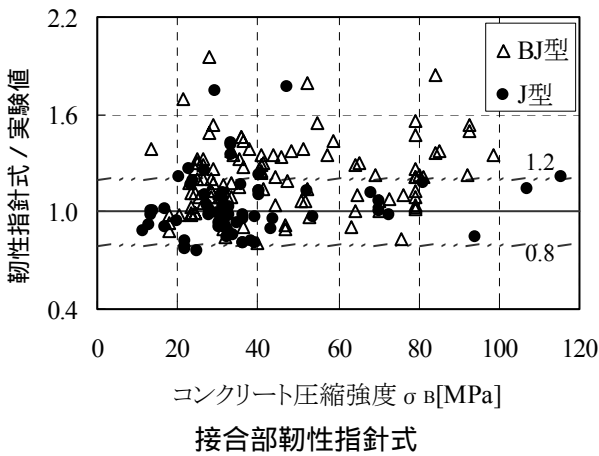


図 - 3 各計算値と実験値の比較  
(コンクリート強度の影響)

図 - 4 各計算値と実験値の比較  
(接合部形状の影響)

表 - 2 試験体寸法・配筋 (単位[mm])

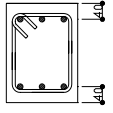
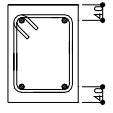
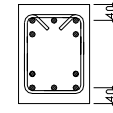
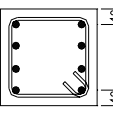
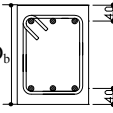
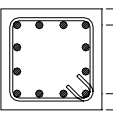
梁			柱
No. ~ No.1  3-D16 $B_b \times D_b$ 180 × 250	No. ,  2-D16 $B_b \times D_b$ 180 × 250	No.2~4  5-D13 $B_b \times D_b$ 180 × 250	左記試験体  8-D16 $B_c \times D_c$ 250 × 250
試験体名	梁	梁せい $D_b$	柱
BCJ-0.6	 3-D13 $B_b \times D_b$ 180 × $D_b$	150	BCJ-0.6~2.0
BCJ-1.0		250	 12-D16 $B_c \times D_c$ 250 × 250
BCJ-1.2		300	
BCJ-1.6		400	
BCJ-1.6J		400	
BCJ-2.0	500		

表 - 3 使用材料の性質 (単位[MPa])

試験体名	降伏応力度		
	No.1~4	No. ~ , ,	BCJ-0.6~2.0
D16	358	403	395
D13	342		702
D6	341	439	435
コンクリート	30.4	29.7	33.2

表 - 4 接合部補強筋

No.1~3, ,	No.4.	No. ,			
4-D6	1-D6	2-D6			
BCJ-0.6	BCJ-1.0	BCJ-1.2	BCJ-1.6	BCJ-1.6J	BCJ-2.0
1-D6	2-D6	3-D6	6-D6	3-D6	7-D6

軸力：NO.3,4 49[kN](引張)

その他の試験体 294[kN](圧縮)

### 3. 梁主筋の接合部からの抜け出し変形

層間変形を正確に把握するためには、その変形を構成する梁主筋の接合部からの抜け出しによる変形を現象として明確に評価することが問題となる。

評価方法は、執筆者らの行った実験資料文献3), 文献6)~8)の15体を用いて検討する。

#### 3.1 対象とした試験体

表 - 2, 3, 4 に対象とした十字型試験体の寸法・配筋等を示す。試験体は階高とスパンは全試験体同じで、階高 1400[mm]、スパン 2000[mm]である。実験変数を接合部補強筋量、接合部アスペクト比、梁主筋降伏強度としている。

#### 3.2 接合部域からの抜け出し変形の測定方法

接合部域からの梁主筋の抜け出しの測定方法を図 - 5 に示す。梁主筋の抜け出し量とめり込み量は、柱接合部の中心部のコンクリート中に埋め込んだボルト A と、梁接合部端から接合部外側に 40[mm]の位置の梁主筋に溶接されたボルト B との相対滑り量としている。引張側梁接合部端から接合部外側ボルト B の区間では、主筋は危険断面方向に抜け出すと思われるが、その量は区間が短いため、小さいと考えられる。又、伸び量は、抜け出し量からめり込み量を差し引

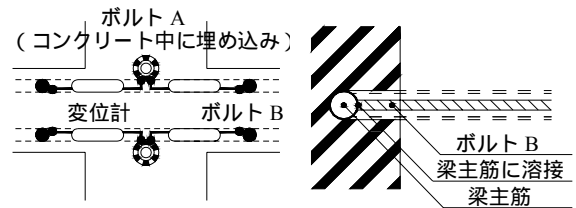
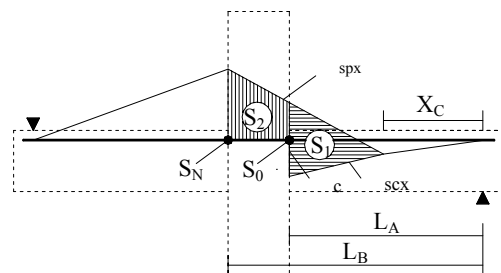


図 - 5 抜け出し変形の測定方法



spx : 梁主筋歪分布  
sex : コンクリート圧縮歪分布  
c : 梁接合部端コンクリート圧縮歪  
注) 梁端から  $X_c$  の区間はコンクリートと梁主筋の相対滑り零

図 - 6 歪み分布からの抜け出し量の算出法

いた値となる。

#### 3.3 抜け出し量の評価

ここでは、抜け出し変形を前述の直接測定した値と、以下に示す歪測定値から求めた方法との比較を行い評価する。

1) 歪測定値からの算出方法

測定した梁主筋の歪分布から求める(文献9)。図-6に示すように、上端筋の点  $S_0$  では抜け出し、点  $S_N$  ではめり込み状態となり、接合部からの抜け出し量 ( $S$ ) 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 ( $\epsilon_{spx}$ : 実測値) を接合部域について積分して求め、めり込み量は主筋の歪と曲げ理論より求めたコンクリート歪 ( $\epsilon_{scx}$ ) 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(梁端から  $X_c$  の距離)から危険断面まで積分して求める。尚、接合部端のめり込み側と抜け出し側の梁主筋は、抜け出し方向に滑動し位置が変化するが、そのことによる歪への影響は無視できると思われる。

$$S = S_1 + S_2 \quad (4)$$

$$= \int_{X_c}^{L_A} (\epsilon_{spx} - \epsilon_{scx}) \cdot dx + \int_{L_A}^{L_B} \epsilon_{spx} \cdot dx$$

(但し、接合部コンクリート歪は無視)

2) 直接測定した値と歪測定値から算出した値との比較

伸び量

伸び量は、直接測定した抜け出し量からめり込み量を差し引いた値と考えられる。この値と、歪測定値より求めた前述の伸び量 ( $S_2$ ) の比較を、縦軸に直接測定した実験値を、横軸に歪分布より求めた計算値をとり図-7に示した。両者は概ね一致している。但し、変位計より求めた値は、梁接合部端より 40[mm]離れた位置であるので、歪分布の伸び量は、同位置迄の区間の歪みを積分して求めた。

めり込み量

歪分布より求める方法において、梁接合部端のコンクリート圧縮歪みに曲げ理論より求めた値を用いる場合(方法1)と以下に示す矩形コンクリートストレスブロックの応力から、歪みに変換することにより求めた値を用いる場合(方法2)について、直接測定した値との比較を行う。

方法1: 曲げ理論より求めたコンクリート圧縮歪

みを用いた場合

図-8に梁接合部端コンクリート圧縮歪みが曲げ理論値に一致すると歪分布から計算しためり込み量  $S_1$  を横軸に、又、直接測定しためり込み量を縦軸にと

り示した。図から歪分布から求めた計算値が小さいことが分かる。この原因は、梁接合部端のコンクリート圧縮歪みの求め方に問題がある。

方法2: 梁接合部端コンクリート圧縮応力度を矩形ストレスブロックと仮定した場合

実験において測定された主筋歪より求めた応力等を用いて、式(5)よりコンクリート圧縮合力 ( $bC_c$ ) を算出する。(図-9参照)

$$bC_c = bT_s - bC_s \quad (5)$$

矩形ストレスブロックと仮定し、圧縮域 ( $a_b$ ) を式(7)より求める。

$$\bar{j}_b = \{bM - (D_b - 2 \cdot b d_c) \cdot bC_s\} / bC_c \quad (6)$$

$$a_b = 2 \cdot \{(D_b - b d_c) - \bar{j}_b\} \quad (7)$$

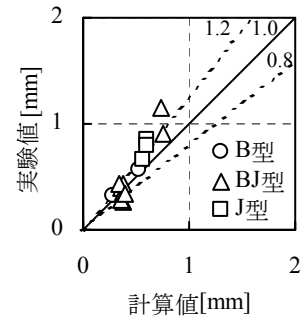


図-7 伸び量

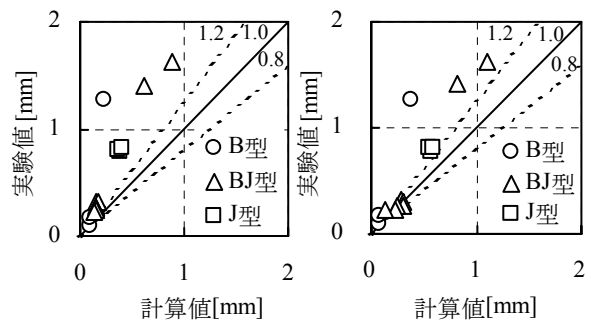


図-8 めり込み量

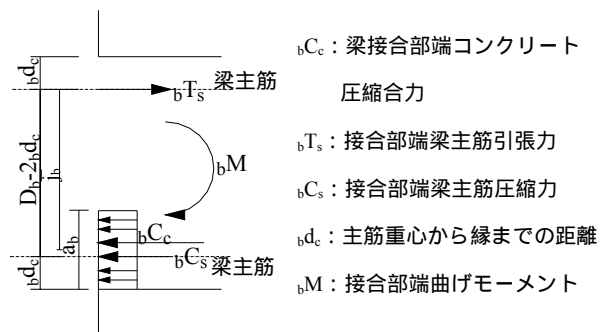


図-9 梁接合部端の応力状態

$$\sigma_B = \sigma_{Bc} / (a_b \cdot B_b) \quad (8)$$

得られたコンクリート圧縮応力度 ( $\sigma_B$ ) を、実験時の材料試験によるコンクリート応力 - 歪曲線に照らし合わせ、コンクリート圧縮歪みを求める。図 - 8 にコンクリート圧縮応力度を矩形ストレスブロックと仮定して求めた計算値と、直接測定した値との比較を示す。方法 1 と比較して、改善されている傾向にある。

#### 抜け出し量

図 - 10 に歪測定値から求めた伸び量と、方法 1 と方法 2 から求めた各々のめり込み量を加えた抜け出し量の計算値と直接測定した値との比較を示す。当然のことながら、めり込み量を方法 2 で求めた場合に、より一致する傾向にある。

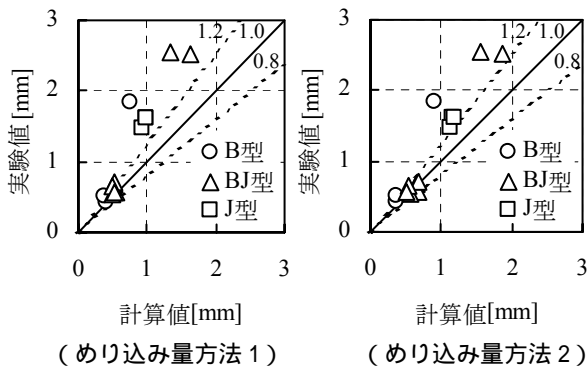


図 - 10 抜け出し量

#### 4. まとめ

既往の実験資料を用いて検討した結果以下の知見が得られた。

- 1) 靱性指針式では、アスペクト比が 1.0 付近の試験体を除いて、接合部耐力を評価できない。
- 2) 接合部を、柱の一部と見なし、接合部の耐力算定時に柱せん断終局強度式を用いると、靱性指針式より良い対応が見られる。
- 3) 梁主筋の接合部域からの抜け出し量は、伸び量とめり込み量の和と考えることができる。
- 4) 伸び量については、接合部コンクリートの歪みを無視し、主筋の歪みのみを積分することにより、評価できる。
- 5) めり込み量の算定においては、梁接合部端のコンクリート歪みの評価が問題となる。

6) めり込み量について、梁接合部端断面の梁主筋歪みの実測値を用いて求めたコンクリート圧縮合力が、矩形ストレスブロックを形成すると考え、そのコンクリートの応力度に対応する圧縮歪みを用いると、精度が向上した。

#### 参考文献

- 1) 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(案)・同解説，1997.7
- 2) 吉岡直子，上村智彦：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.23，No.3，pp.367～372，2001.7
- 3) 小林宗悟，上村智彦，ほか：鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の破壊性状への影響(その1)～(その4)，日本建築学会大会論文梗概集，構造，pp.481-482，2003.9
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1999.11
- 5) 寺岡勝，狩野芳一，小林勝巳：鉄筋コンクリート造内部柱・梁接合部のせん断強度に関する調査及び検討 - 普通コンクリートを用い，直交梁の無い場合 - ，構造工学論文集，Vol.37B，pp.365～378，1991.3
- 6) 武田信治，吉野正弘，上村智彦：鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の力学的挙動への補強筋の影響，日本建築学会大会論文梗概集，構造，pp.411-410，1997.9
- 7) 神野卓之，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影響，日本建築学会大会論文梗概集，構造，pp.967-968，1999.9
- 8) 梶尾誠，上村智彦，ほか：鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の最大耐力後の破壊性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.3，pp.535～540，1998.6
- 9) 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，日本建築学会大会論文梗概集，構造，pp.1099-1100，1972.10