

# 論文 実験的資料に基づく RC 造外部柱梁接合部のせん断耐力評価 に関する検討

草苺敏夫\*<sup>1</sup>      城    攻\*<sup>2</sup>

要旨：外部（ト型）柱梁接合部のせん断耐力を評価するために現在までに国内で行われた実験データを基に、コンクリート強度、接合部横補強筋、柱中段筋、折曲げ定着部対角角度、その他の要因が接合部耐力に及ぼす影響を調査した結果、コンクリート強度、接合部横補強筋、軸応力度、折曲げ定着部対角角度の耐力に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。これを基に接合部破壊先行型データを用いてこれらの要因を考慮した実験値と良い対応を示す耐力評価式をたて、式より入力との関係から接合部破壊先行型と部材降伏以後の接合部破壊型並びに接合部非破壊型との判別が可能であることを示した。  
キーワード：外部柱梁接合部、せん断耐力、破壊モード、せん断余裕度

## 1. はじめに

柱梁接合部の破壊形式には梁や柱部材の降伏以前に破壊する場合と部材降伏以後に破壊する場合とに分類される。特に、建物の耐震設計においては接合部に連なる梁（又は柱）部材の曲げ耐力が確実に発揮されることが重要であり、曲げ降伏以前の接合部破壊は避けなければならない。さらに曲げ降伏以後の繰り返し加力においても部材端ヒンジがエネルギー吸収を十分確保できるように耐力を維持しなければならず、このためには接合部のせん断耐力を適切に評価し、梁柱降伏時の接合部入力との比較から十分な余裕をもたせることが必要と考えられる。本報告では、直交梁やスラブが付かない平面外部（ト型）柱梁接合部を対象に、現在までに国内で行われた実験のデータを基に接合部の耐力に及ぼす各種要因の影響を調査し、影響の強い要因を用いて接合部破壊先行型のデータを対象にせん断耐力評価式をたてるとともに破壊モードの判別について検討を行ったものである。

## 2. 使用したデータ

収集したデータは、1972年から1995年までに国内の学術報告書や企業の技術報告書等に報告されたものである。その出典先の主なものは、①日本建築学会学術講演梗概集、②日本建築学会論文報告集、③日本建築学会各支部の研究報告集、④JCI年次論文集であり、これらの中から接合部で定着破壊を生じていないデータを抽出し、さらに①コンクリートは普通コンクリートを使用している、②正負繰り返し加力を行っている、③接合部は無補強か帯筋で補強されている、④梁筋は接合部コア内で折り曲げ定着（一部梁下端筋は柱内定着）されている、⑤外部変動軸力や引張り軸力を受けない、⑥梁芯と柱芯が一致している、⑦直交梁・スラブ・ハンチがないという条件に合致したデータのみを使用した。接合部の定着破壊とせん断破壊との判別については判別方法が確立していないので、本報では原文著者の判別に従い定着破壊を生じたと報告されたデータを除いている。使用した試験体は全部で129個であり、破壊モード別では部材の降伏以前に接合部がせん断破壊したもの（J型）が28個、部材降伏後に接合部がせん断破壊したも

\*1 釧路工業高等専門学校助教 建築学科 工修（正会員）

\*2 北海道大学教授 工学部建築工学科 工博（正会員）

の (F J 型) のうち梁降伏後に接合部が破壊したもの (B J 型) が 58 個, 柱降伏後に接合部が破壊したもの (C J 型) が 3 個であり最終加力においても接合部が破壊しなかったもの (B 型) が 40 個である。破壊モードは原文

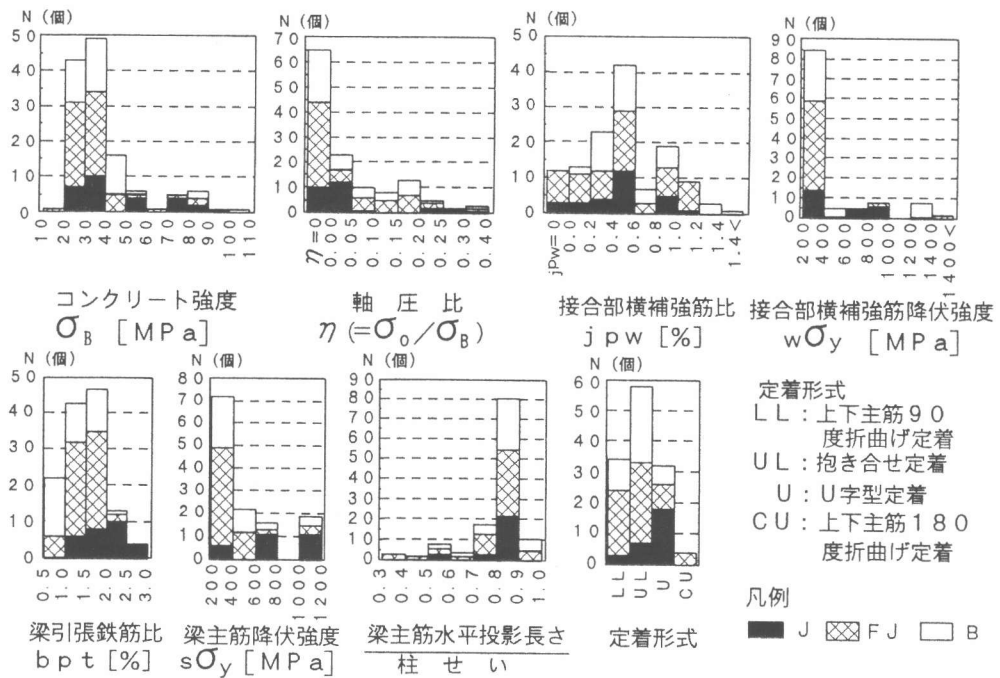


図1 使用データの主要パラメータ頻度分布

著者の判別に従った。図1に使用データの材料強度並びに主要なパラメータの頻度分布を示す。

### 3. 接合部せん断耐力に及ぼす諸要因の影響

#### 1) コンクリート強度の影響

既往の外部柱梁接合部実験から得られた最大荷重実験値を接合部平均せん断応力度に換算したものを接合部最大せん断応力度実験値 ( $\exp \tau u$ ) とし, コンクリート強度 ( $\sigma_B$ ) との比較を図2に示している。 $\exp \tau u$  は, (1) 式により計算を行った。

$$\exp \tau u = (M_b - Q_c \cdot j_b) / t_p \cdot L_{dh} \cdot j_b \dots (1)$$

ここで,  $M_b$ : 梁危険断面位置における曲げモーメント,  $Q_c$ : 柱せん断力,  $j_b$ : 梁応力中心間距離 ( $= 7/8 b_d$ ),  $t_p$ : 接合部有効幅 ( $= (\text{柱幅} + \text{梁幅}) / 2$ ),  $L_{dh}$ : 梁主筋水平投影長さである。J 型のデータが部材降伏以前に接合部が破壊したのに対し, B J 型・B 型のデータは部材降伏以後に接合部が破壊したために, 接合部耐力は部材の降伏耐力によって決定されているので, 接合部せん断耐力は J 型のデータで決定されると考えられる。図からコンクリート強度の増大に伴って接合部耐力も増大しているが, 強度が高くなると増大の割合はやや鈍る傾向にある。図中には, 学会終局強度設計指針 [1] に示されるせん断耐力式  $0.18 \sigma_B$  を示すが, J 型のデータ

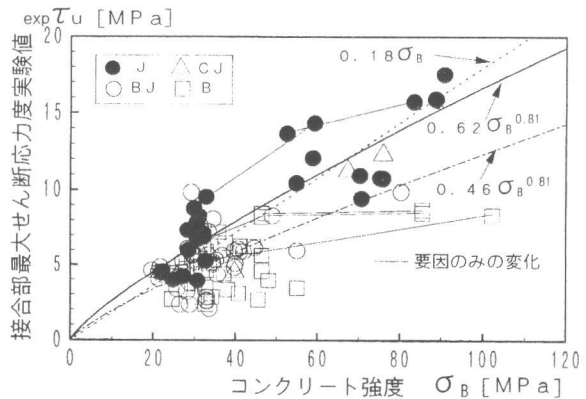


図2  $\exp \tau u$  と  $\sigma_B$  との関係

には, 学会終局強度設計指針 [1] に示されるせん断耐力式  $0.18 \sigma_B$  を示すが, J 型のデータ

では70MPaを超えた範囲でこの値を下回るデータがあり、せん断耐力を過大評価している。図中の直線で結ばれたデータは $\sigma_B$ のみを変化させて行われた実験データ同士を結んでいるが、BJ型からB型への破壊モードの変化が見られることから $\sigma_B$ の増大は接合部の靱性に影響を及ぼすものと考えられる。J型試験体のうち接合部横補強筋と柱軸力のないもの3体は、コンクリート強度のみの影響を受けており、この3体を結ぶ回帰式として、 $0.46\sigma_B^{0.81}$ が求められた。また、J型データ全体の回帰式として $0.62\sigma_B^{0.81}$ が得られ、 $\exp \tau u$ との相関係数は0.87であり、コンクリート強度以外の要因によって耐力が分散している。

### 2) 軸方向応力の影響

図3には、 $\exp \tau u$ を前述した回帰式中の $\sigma_B^{0.81}$ で除して規準化し（以降ではこれを入力レベルと称する）、軸方向応力度（ $\sigma_0$ ）との比較を示す。外部柱梁接合部の場合、梁のせん断力が付加軸力として作用し、軸力が変動することになるが、ここでは、初期に加えられた軸力の値をそのまま使用している。 $\sigma_0$ の増大は接合部上下方向の拘束を高めるために耐力を上昇させるものと予想されるが、図中の要因同士を結んだデータのうち軸圧比 $\eta$ が0.3を超える大きな軸力を受けた場合には耐力は低下している。しかし高軸圧比のデータ数が少ないこと、本使用データの $\sigma_0$ が0~24MPa（ $\eta=0\sim0.32$ ）の範囲にあること、既往の外部柱梁接合部の折り曲げ定着実験結果では[2]、 $\sigma_0$ が0~0.08 $\sigma_B$ までは急激に耐力が増大するものの、それ以上の $\sigma_0$ の範囲では耐力増大がなくなり一定値になること等を考慮して $\sigma_0$ のべき乗表記を用いることとした。J型データの回帰分析から図中の式が得られた。BJ型のデータも右上がりの傾向を示しており、大きすぎない $\sigma_0$ は接合部のせん断耐力上昇に影響を及ぼしている。

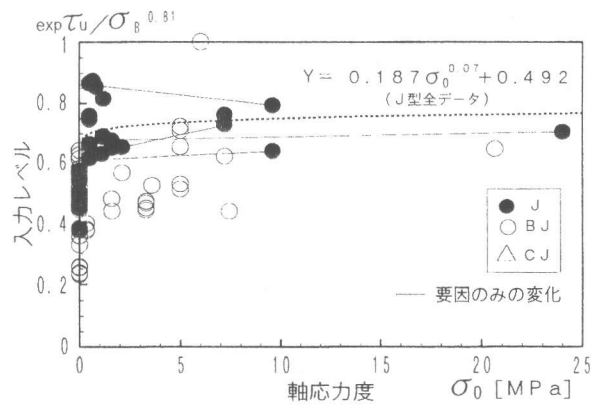


図3  $\exp \tau u / \sigma_B^{0.81}$ と $\sigma_0$ との関係

### 3) 接合部横補強筋の影響

図4にjpwに横補強筋降伏強度（ $w\sigma_y$ ）を掛け合わせた値を $\sigma_B^{0.81}$ で規準化したもの（接合部横補強筋鉄筋係数）と入力レベルとを比較して示している。J型、BJ型のデータともに鉄筋係数の増加に伴って入力レベルも増大しており、鉄筋係数の増加は接合部の耐力ならびに靱性の向上に影響を及ぼしている。図中の1, 2, 3の番号付けされたデータは（梁筋水平投影長さ/柱せい）が0.5と短く、後述する折曲げ定着部対角角度（ $\cot \theta$ ）も0.4rad程度のものであるが、このような配筋は接合部せん断耐力を低下させる要因となる。鉄筋係数とJ型データの入力レベルとの回帰分析では $0.78(jpw \cdot w\sigma_y / \sigma_B^{0.81}) + 0.50$ が得られ、ほぼ直線的に耐力が増大している。この回帰式の値と入力レベルとの相関係数は0.67であった。内部柱梁接合部では

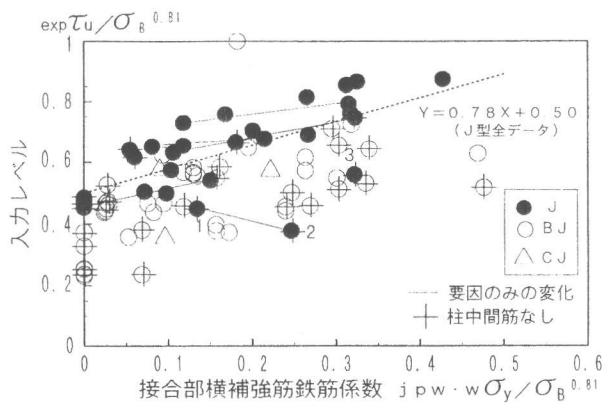


図4  $\exp \tau u / \sigma_B^{0.81}$ と  $jpw \cdot w \sigma_y / \sigma_B^{0.81}$ との関係

接合部横補強筋の効果が少ないと言われているが [3] , 外部 (ト型) 接合部ではその効果は大きい傾向にある。これは, 十字型内部柱梁接合部では接合部が両側の梁で拘束されているのに対し, ト型では片側のみであり, 梁による拘束が弱まる分を補強筋が負担するためと考えられる。

#### 4) 柱中段筋の影響

図5に柱中段筋比 (c m p) に柱中段筋降伏強度 (c s σ y) を掛け合わせたものを σ B 0.81 で除して規準化し (柱中段筋鉄筋係数), 入力レベルと比較して示す。柱中段筋比は 0 ~ 2 % の範囲にあり, 降伏強度は 2 8 2 M P a ~ 1 1 2 0 M P a の範囲にある。J型, B J型ともにグラフは右上がりの傾向を示し, 接合部の耐力増大に多少ではあるが寄与するものと考えられる。当要因のみを変化させたデータは1組しかないために, 明確な性状を把握できないが, この1組をみるかぎりでは約16%の耐力増大がある。J型の全データでみると接合部横補強筋のような明確な傾向としてあらわれず, 回帰分析の結果得られた  $Y = 0.182\sqrt{X} + 0.569$  の回帰式に対する相関係数は0.4であった。図中の1, 2の番号付けされたデータは, 柱中段筋のみが存在するデータであるが, この場合にはせん断耐力が極めて低くなっている。

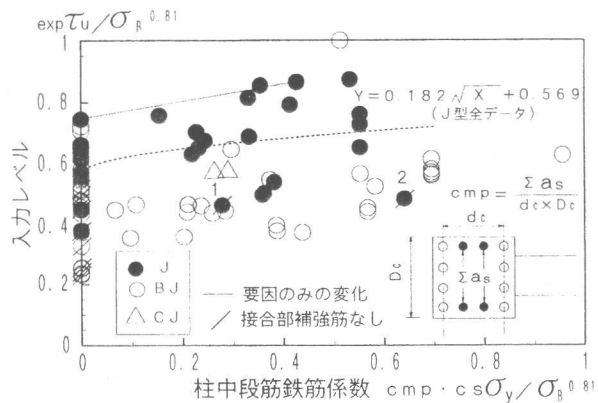


図5  $\exp \tau u / \sigma B^{0.81}$  と  $c m p \cdot c s \sigma y / \sigma B^{0.81}$  との関係

#### 5) 梁筋折曲げ定着部対角角度の影響

図6に折曲げ定着部対角角度  $c o t \theta$  (= 梁主筋水平投影長さ (L a h) / 梁有効せい (b a)) と入力レベルとの関係を示している。この角度が緩くなるほど梁筋力が直接的に梁圧縮部へ伝達する成分が少なくなると共にストラット有効幅が減少し, 接合部せん断耐力は低下することが予想される。図中に示される  $\theta$  のみを変化させたデータでは, 折曲げ定着部対角角度が大きくなることによりJ型からB J型への破壊モードの変化が見られ, J型同士結ばれたデータは, L a h が一定で b a が変化したものであるが, 角度の減少に伴って15%程度の耐力低下がみられる。回帰分析の結果では, 図中の回帰式に対する相関係数は0.4と小さいが, 破壊モードの変化や耐力低下のデータがあることから接合部耐力に少なからず影響するものと考えられる。

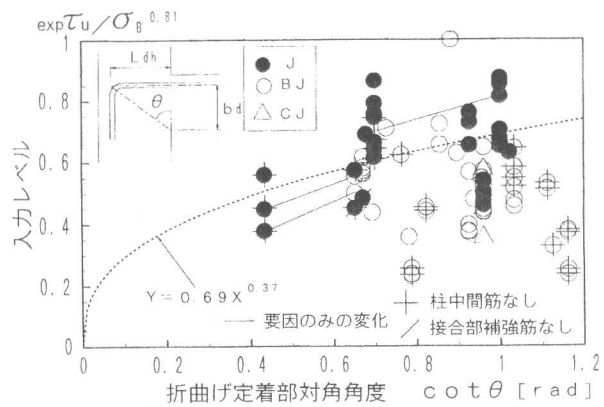


図6  $\exp \tau u / \sigma B^{0.81}$  と  $c o t \theta$  との関係

#### 6) 梁からの入力量の影響

図7に理論梁曲げ降伏時接合部せん断応力度 (c a l τ y) を σ B 0.81 で規準化し, 入力レベルとの比較を示している。c a l τ y は, 軸力と多段配筋を考慮した断面分割法により計算したもので, σ - ε 関係は, 鉄筋ではバイリニアとし, 圧縮コンクリートは e 関数法に従うものと仮定して計算した。B J型・B型とも  $\exp \tau u = c a l \tau y$  の線に沿って分布しており, B J型の一部を除き, 線上あるいはその上方に分布し, 実験における梁降伏先行モードと対応している。また, c a l τ y

$\sigma_B^{0.81}$  が概ね 0.5 を超える範囲では J 型のデータが分布しており、それ以下では B J 型、B 型のデータが分布している。即ち、接合部せん断破壊を防ぐにはこの値を 0.5 程度以下にする必要がある。J 型の範囲にある C J 型の 2 個のデータは梁降伏型で設計したにもかかわらず、柱降伏型になったものであり、この C J 型の試験体の梁降伏時  $\text{cal } \tau_y$  は  $\Delta$  印で示されるように概ね  $\text{exp } \tau_u = \text{cal } \tau_y$  の線の近傍に位置していることから何故柱降伏が先行したかを解明する必要がある。入力レベルがほぼ 1.0 の位置にある B J 型のデータは

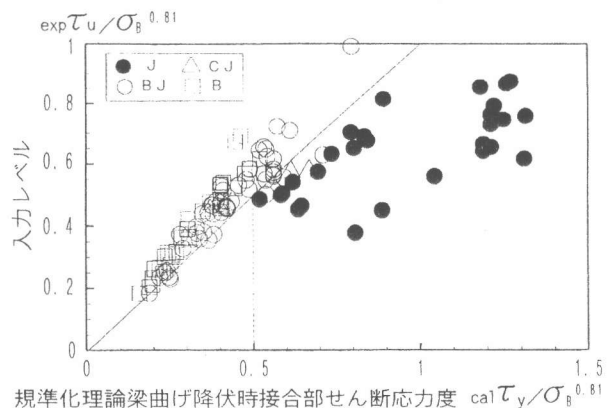


図7  $\text{exp } \tau_u / \sigma_B^{0.81}$  と  $\text{cal } \tau_y / \sigma_B^{0.81}$  との関係

梁からの入力量を大きくして接合部破壊先行型で設計したにもかかわらず梁降伏先行型となったものであり入力レベルが大きくなっている。この試験体は、接合部内に中子筋が密に配筋されており本報ではデータの不足から考慮しなかった中子筋の影響についても今後解明する必要がある。

#### 4. 接合部せん断耐力の評価

接合部耐力に影響を及ぼす要因と考えられるコンクリート強度、軸応力度、接合部横補強筋、柱中段筋、折曲げ定着部対角角度について考えてきたが、これらの要因を用いて  $\text{exp } \tau_u$  に対する重回帰分析を行った結果、柱中段筋の接合部耐力への寄与率は極めて小さかったので、残りの 4 要因を用いて耐力評価を行った。最初にコンクリート強度、軸応力度、接合部横補強筋の 3 要因について実験値との対応を試みた。その結果 (2) 式が得られた。

$$\text{cal } \tau_{u1} = \sigma_B^{0.81} (0.500 + 0.110 \sigma_0^{0.07}) + 0.325 \text{ jpw} \cdot w \sigma_y \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $0.110 \sigma_B^{0.81} \sigma_0^{0.07}$  は前節で論じたように  $\sigma_0$  が極めて小さい範囲では軸応力度によるコンクリートの拘束による耐力増大を表し、 $\sigma_0$  が大きい範囲では期待しないことを表現したものである。 $\text{cal } \tau_{u1}$  と  $\text{exp } \tau_u$  との相関係数は 0.975、平均 1.00 である。図 8 に  $\text{exp } \tau_u / \text{cal } \tau_{u1}$  と折曲げ定着部対角角度との関係を示す。相関曲線として  $1.04 \cot \theta^{0.224}$  が得られるので、折曲げ定着部対角角度は  $\cot \theta^{0.224}$  に比例して補正するものとして、折曲げ定着部対角角度が 0 の場合にはトラス機構のみ存在すると考え、これと (2) 式との重回帰分析を行うと (3) 式が得られる。

$$\begin{aligned} \text{cal } \tau_u = & \cot \theta^{0.224} \{ \sigma_B^{0.81} (0.450 + 0.127 \sigma_0^{0.07}) \} \\ & + 0.586 \text{ jpw} \cdot w \sigma_y \cdots \cdots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $\sigma_B$ : コンクリート強度、 $\text{jpw}$ : 接合部横補強筋比、 $w \sigma_y$ : 接合部横補強筋降伏強度  $\sigma_0$ : 軸応力度、 $\cot \theta$ : 折曲げ定着部対角角度である。 $\text{cal } \tau_u$  と  $\text{exp } \tau_u$  との相関係数は 0.987、平均 1.015 となり折曲げ定着部対角角度を考慮しない (2) 式よりも精度を上げることができる。図 9 に  $\text{cal } \tau_u$  と  $\text{exp } \tau_u$  との比較を示す。図 10 は、(3) 式を使用して B J

型・B型に対して  $\text{cal } \tau u$  を求め、 $\text{cal } \tau y$  で除したものの（せん断余裕度）とコンクリート強度との比較を行ったものである。J型のデータは  $\text{cal } \tau u / \text{cal } \tau y$  が 1.0 以下に分布し、BJ型の大部分が 1.0 から 2.0 の範囲に分布している。また、B型の大部分は 2.0 以上となり梁降伏時せん断応力度に対する接合部せん断耐力の余裕度が大きいことがわかる。

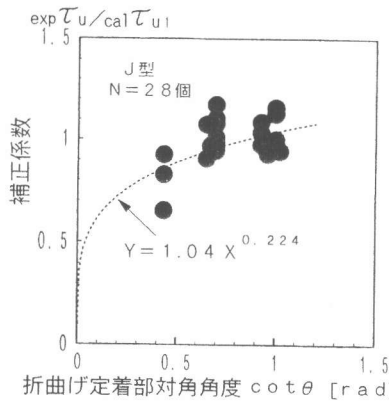


図8  $\text{exp } \tau u / \text{cal } \tau u$  と  $\cot \theta$  との関係

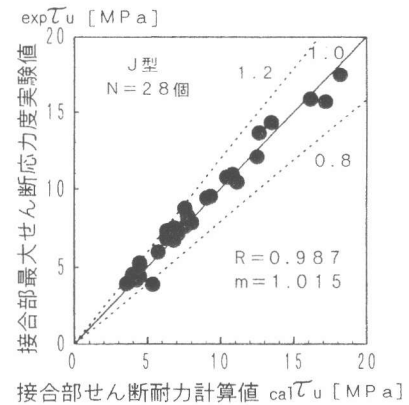


図9  $\text{exp } \tau u$  と  $\text{cal } \tau u$  との関係

## 5. まとめ

(1) 既往の実験資料を用いて、外部柱梁接合部のせん断耐力に及ぼすコンクリート強度、接合部横補強筋、軸応力度、折曲げ定着部対角角度の影響を明らかにした。

(2) 上述の要因を取り入れた接合部せん断耐力評価式を提案し、実験値を精度よく推定することができた。

(3) せん断余裕度 ( $\text{cal } \tau u / \text{cal } \tau y$ ) を用いれば、1 以下の場合には J 型破壊となり余裕度が大きくなるにつれて BJ 型から B 型に破壊モードが変化する実験の結果を現すことができる。

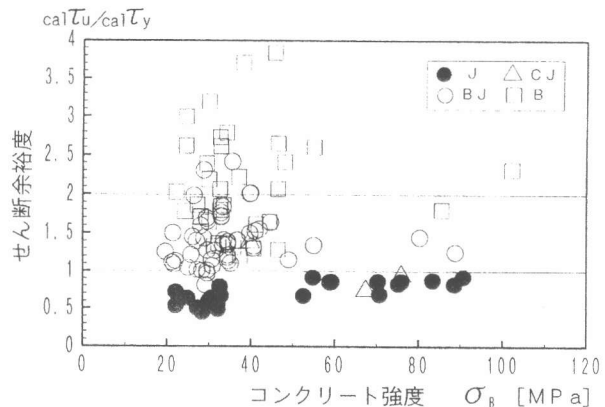


図10  $\text{cal } \tau u / \text{cal } \tau y$  と  $\sigma_B$  との関係

【謝辞】本研究には多数の研究者の貴重な実験データを使用させていただきました。厚く感謝致します。

【引用文献】1) 森田他：JCI年次，pp665-668，1984 2) 森田他：JCI年次，pp613-616，1985 3) 森田他：AIJ大会梗概，pp441-442，1989 4) 城他：JCI年次，pp537-542，1989 5) 城他：JCI年次，pp639-644，1990 6) 角他：AIJ大会梗概，pp645-648，1991 7) 城他：AIJ大会梗概，pp641-644，1991 8) 角他：AIJ大会梗概，pp201-204，1992 9) 城他：JCI年次，pp391-396，1992 10) 角他：JCI年次，pp641-644，1986 11) 若林他：AIJ大会梗概，pp1817-1818，1983 12) 森田他：JCI年次，pp665-668，1984 13) 葉研地他：間組研究年報，pp137-151，1988 14) 森田他：AIJ大会梗概，pp651-652，1987 15) 小倉他：AIJ大会梗概，pp75-76，1986 16) 角他：AIJ大会梗概，pp647-648，1987 17) 寺岡他：JCI年次，pp657-662，1990 18) 角他：AIJ東海支部研，pp169-176，1988 19) 河内他：AIJ大会梗概，pp395-398，1990 20) 大西他：JCI年次，pp681-684，1990 21) 三輪他：JCI年次，pp385-390，1992 22) 今井他：AIJ大会梗概，pp537-542，1993 23) 村井他：AIJ大会梗概，pp47-48，1995 24) 吉野他：AIJ大会梗概，pp1883-1884，1984 25) 中山他：AIJ大会梗概，pp1677-1678，1978 26) 五十嵐他：AIJ大会梗概，pp563-564，1993 27) 長嶋他：AIJ大会梗概，pp557-558，1993

## 参考文献

[1] 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 [2] 城，後藤・他：RC造柱梁接合部における折曲げ梁筋の定着破壊（その1）（その2），日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol.68，pp.77-84，1995. 3 [3] 李，小谷，青山：鉄筋コンクリート内柱・梁接合部のせん断強度，日本建築学会大会学術講演梗概集C構造II，pp.231-232，1992. 8