

# 論文 鉄筋コンクリート造十字形骨組としての破壊モードと変形性能

羽田 和幸\*<sup>1</sup>・香取 慶一\*<sup>2</sup>・上村 智彦\*<sup>3</sup>・林 静雄\*<sup>4</sup>

**要旨：**内部梁・柱接合部のより合理的な設計法の確立を目的とし、既往の実験データより破壊形式、終局耐力と変形性能について検討した結果、これらは主要な因子である鉄筋係数、付着指標、理論せん断入力量と密接な関係にあること、接合部破壊先行型においては理論せん断入力量の増大とともに終局耐力が低下していることがわかった。また、理論せん断入力量により破壊モード分類は可能であり、降伏機構の保証だけでなく、変形も考慮したせん断入力レベルを提案した。更に、接合部破壊先行型で変形性能が大きいものは、梁曲げ圧潰を生じ、応力中心間距離が短くなる傾向にある試験体であったことを示した。  
**キーワード：**十字形骨組、梁・柱接合部、破壊モード、変形性能、応力伝達機構

## 1. はじめに

梁、柱各部材における研究が進み、それに伴って終局強度型設計法、靱性保証型設計法へと移行しつつある中、梁・柱接合部の設計は重要な意味を持つものとなってきている。日本をはじめ諸外国においても、これまでに様々な実験と解析がなされ、その研究成果として梁・柱接合部に関する耐震設計法が示されている。現在、我が国の梁・柱接合部に関する耐震設計法は、終局強度設計指針<sup>1)</sup>と靱性保証型設計指針(案)<sup>2)</sup>とに示されている。しかし、接合部の設計法は国によって異なるものとなっており、このことは各国で骨組に要求される性能、使用材料および建設工事慣習が異なっていることも然る事ながら、接合部の挙動を支配する因子が多く、接合部における応力伝達機構が解明されていないことによるものである。

本研究では、梁・柱接合部のより合理的な設計法の確立を目的とし、既往の実験データを用いて、梁・柱接合部における破壊形式、終局耐力と変形性能について検討した。また、接合部

周辺の応力伝達機構を明確にするため、梁接合部端での応力状態を曲げ解析により求めた。

## 2. 対象とした試験体

ここで対象とした試験体は、これまでに国内で行われた直交梁を持たない平面十字形梁・柱接合部試験体で、主筋は接合部内で通し配筋されたものである。梁主筋が上下非対称に配筋されたもの、梁と柱が偏心して取り付けられたもの、接合部域梁主筋に付着をなくす等の特殊な加工を施したもの、X型加力、変動軸力、単調載荷したもの、スラブ付きのもの、また、プレキャスト等の特殊な試験体は除いた。コンクリート強度は11.6~116.2N/mm<sup>2</sup>の範囲にあり、試験体総数は154[78]体である。その内訳は、梁曲げ降伏型(B型)24[16]体、梁曲げ降伏後に接合部破壊する型(B・J型)83[33]体、接合部破壊先行型(J型)37[22]体、付着破壊等その他の破壊をしたもの10[7]体となっている([ ]内の数字は、梁主筋が一段配筋の試験体数)。各試験体の破壊モードについては、基本的に各

\* 1 清水建設(株) 工修(正会員)

\* 2 東京工業大学建築物理研究センター 助手 工修(正会員)

\* 3 芝浦工業大学助教授 工学部 建築学科 工博(正会員)

\* 4 東京工業大学建築物理研究センター 教授 工博(正会員)

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。

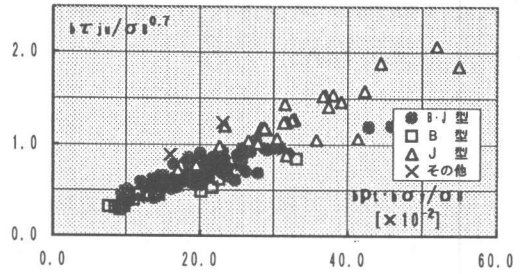
### 3. 主要な因子

梁・柱接合部の力学的性能を評価する上で、その応力伝達機構を明確にすることは重要なことである。数多くある因子のうち、大きな影響を及ぼすものとしては、隣接ヒンジ部材からのせん断入力量<sup>注)</sup>と接合部域に通し配筋される主筋の付着性状とが挙げられる。また、接合部破壊を接合部コンクリートにおける斜め圧縮ストラットの圧潰によるものと考えると、梁接合部端における圧縮応力状態も大きな影響を及ぼすものと考えられる。梁接合部端圧縮側の応力状態を評価するものとして、一般に曲げ圧潰しやすさの指標とされる鉄筋係数  $b\rho_t \cdot b\sigma_y / \sigma_B$  と靱性保証型設計指針(案)<sup>2)</sup>で言うところの付着指標  $\mu$  ( $=b d_r \cdot b\sigma_y / (D_c \cdot \sigma_B^{1/3})$ )、梁主筋降伏時理論せん断入力量  $b\tau_{ju} / \sigma_B^{1/2}$  とのそれぞれとの関係を図-1(a)~(c)に示す。尚、(b)と(c)には靱性保証型設計指針(案)の地震応答解析に基づく2つの付着指標の制限値<sup>2)</sup>を目安として示す。

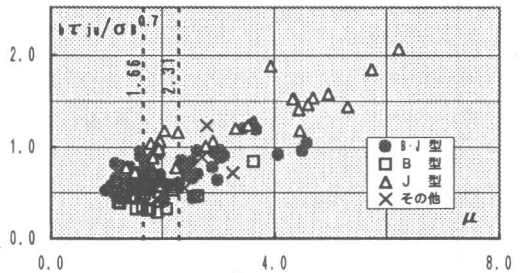
図より、付着が絡む(b)と(c)については、二段配筋のものにより多少のばらつきが見られるが、せん断入力量を縦軸に取った(a)、(b)については右上がりの比例関係にあり、密接な関係があるのがわかる。このことは、梁・柱接合部における応力伝達機構を明らかにする上で困難となる大きな原因であると同時に、せん断入力量のみで設計することで、鉄筋係数や付着指標とを考慮した指標となり得ることを示す。

### 4. 破壊モード分類

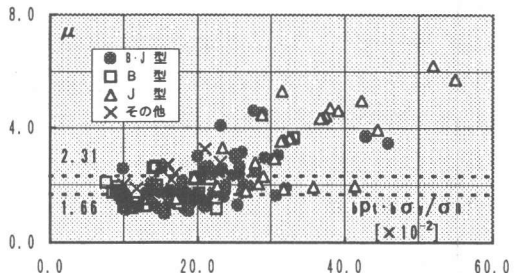
現在の日本、アメリカ(ACI)、ニュージーランド(NZS)における梁・柱接合部に関する規定では、いずれも接合部せん断入力量に上限を設け、一方で通し配筋される梁主筋の付着応力



(a) 梁主筋降伏時理論せん断入力量  
－梁部材鉄筋係数関係



(b) 梁主筋降伏時理論せん断入力量  
－接合部域梁主筋付着指標関係



(c) 接合部域梁主筋付着指標  
－梁部材鉄筋係数関係

図-1 主要な因子間の相互関係

度に制限を設ける形を取っている。我が国でのせん断入力量の上限値は、実験時に得られた梁接合部端曲げモーメントを仮定した応力中心間距離  $jb = (7/8) \cdot db$  ( $db$ : 梁有効成) で除し、梁主筋の応力を求め、これにより算出した接合部せん断応力度  $eb\tau_{ju}$  を用いて決められている。しかしながら、 $jb = (7/8) \cdot db$  となるのは、主筋比が小さく、曲げモーメントを受けた際にコンクリートの圧潰よりも主筋の降伏が先行する場合のみであり、いわゆる  $at \cdot s\sigma_y \cdot jb$  ( $at$ : 引張鉄筋断面積、 $s\sigma_y$ : 引張鉄筋降伏強度) より求

めた降伏モーメントと実験時の降伏モーメントでは誤差が大きいことが指摘されている<sup>3)</sup>。

既往の実験データより実験時最大梁端荷重から求めたせん断入力量  $eb\tau_{ju}/\sigma B^{0.7}$  と梁主筋降伏強度から求めた理論せん断入力量  $b\tau_{ju}/\sigma B^{0.7}$  との関係を図-2に示す。この図より、理論値  $b\tau_{ju}/\sigma B^{0.7}=1.0$  まではB型、B・J型が比例して分布し、1.0を越えてJ型が出現するのがわかる。ここでJ型には右下がりの傾向があり、 $b\tau_{ju}/\sigma B^{0.7}$  の増大とともに、接合部せん断終局耐力が低下しており、縦軸、 $eb\tau_{ju}/\sigma B^{0.7}$  で上限を設けることには問題があると思われる。一方、横軸の理論値  $b\tau_{ju}/\sigma B^{0.7}$  で見ると、B型、B・J型、J型と、各破壊モードがはっきりと分かれているのがわかる。また、実際の設計で用いられるせん断入力量はこの横軸、つまり理論値であるので、精度の良い破壊モード予測が可能であると思われる。

理論せん断入力量に対する各破壊モード試験体の累積分布を、図-3に示す。尚、接合部せん断応力度を無次元化する際、我が国では、接合部せん断強度はコンクリート強度の0.7乗に比例するものとしているが、ACIではコンクリート強度の平方根に比例すると考えており、ここでは、接合部せん断応力度は我が国の指針における方法<sup>1),2)</sup>を用いて算出し、無次元化には双方の考えを用いて比較検討する。同図より、B型とB・J型、B・J型とJ型との各々の上下不合格率が等しくなる境界は、 $\sigma B^{0.7}$  で無次元化したもので0.529, 0.937, 不合格率16.9%, 10.8%,  $\sqrt{\sigma B}$  で無次元化したものでは1.11, 1.88, 不合格率9.64%, 8.11%となり、双方ともかなり精度の良い破壊モード分類ができていますが、 $\sqrt{\sigma B}$  で無次元化したものの方がより良い分類である。

### 5. 接合部を含む骨組としての変形性能

前章で梁・柱接合部における破壊モード分類ができた。現在、我が国の接合部における設計

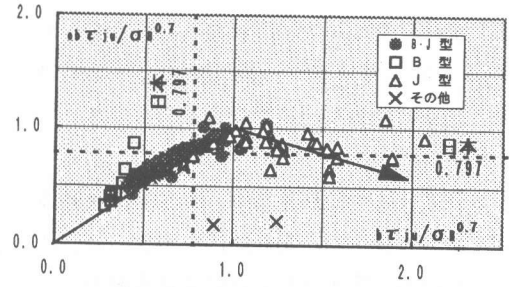
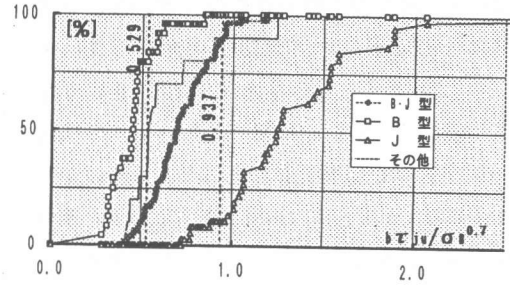
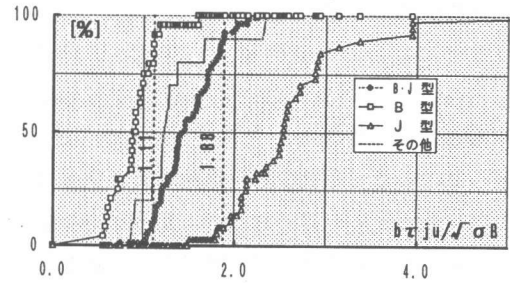


図-2 実験時最大せん断入力量  
—梁主筋降伏時理論せん断入力量関係



(a)  $\sigma B^{0.7}$  で無次元化したもの



(b)  $\sqrt{\sigma B}$  で無次元化したもの

図-3 破壊モード累積分布図

思想はB・J型も許容するものとなっている<sup>1),2)</sup>が、B・J型であってもJ型に近い破壊性状を示すことも考えられ、どこで制限を設けるかの問題となる。そこで、B・J型の変形性能について検討をする。

図-4に、実験時に梁主筋降伏を生じた層間変形角  $R_y - b\tau_{ju}/\sqrt{\sigma B}$  関係を示す。この図より、 $b\tau_{ju}/\sqrt{\sigma B}$  の増大とともに  $R_y$  が比例して大きくなっている。また、前章で求めたB型とB・J型との境界、 $b\tau_{ju}/\sqrt{\sigma B}=1.11$  のところで、終局強度型<sup>1)</sup>や靱性保証型設計法<sup>2)</sup>で言うところの設計限界変形角1/100程度を越えている。このことは、B・J型は1/100から1/50という大変形に

ならないと降伏しないことを示しており、1/100 程度の変形時に降伏機構を保証するとすれば、せん断入力レベル  $b\tau_{ju}/\sqrt{\sigma_B}$  の限界は 1.11 程度となる。つまり、B 型のみを許容することとなる。

図-5 に、限界変形角  $R_{u95}$ —梁主筋降伏時理論せん断入力量  $b\tau_{ju}/\sqrt{\sigma_B}$  関係を示す。尚、ここで言う限界変形角とは、実験時最大耐力より 95% に低下した時の層間変形角とする。また、同図には、終局強度型や靱性保証型設計法で言うところの梁部材の終局限界状態時の変形角とする 1/50 と、それに柱部材の 1/67 を足した値<sup>1),2)</sup>を記載する。この図では、いずれの破壊モードであっても層間変形角 1/50 程度の変形能力はあるが、J 型において変形性能が大きいものと小さいものとの 2 つに分けられる。

## 6. 抵抗機構の考察

前章ではいわゆる脆性破壊とされる J 型であっても、終局限界時における層間変形角は 1/50 程度以上とかなり大きいことがわかった。しかしその中で、変形性能が比較的大きいものと小さいものに分けられる。より合理的な設計法の確立のためには、接合部における応力伝達機構を明確にすることが重要である。ここでは、同じ J 型であり、その変形性能に差を生んだ原因を明らかにするため、接合部周辺における応力状態の相違を検討する。

筆者等は、この変形性能が大きかったものについて、既報では接合部破壊とされているが、梁曲げ圧潰に近い破壊性状を示したために変形性能が大きくなったのではないかと考えた。そこで、J 型試験体のうち梁主筋は一段配筋で変形性能について記載されたもの 19 体（変形性能が大：5 体，小：14 体）について、曲げ解析を行い、梁接合部端ヒンジゾーンにおける圧縮応力状態を検討した。その際、①接合部域梁主筋の付着性状が良好で圧縮側鉄筋が曲げ理論通りに働くと仮定して、複筋比  $\gamma=1.0$  とした

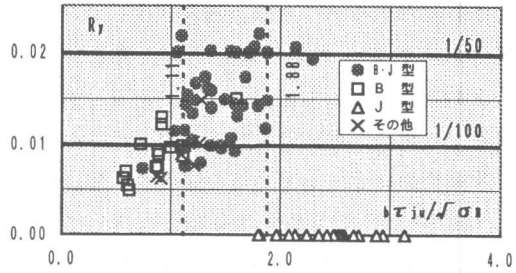


図-4 梁主筋降伏時層間変形角—梁主筋降伏時理論せん断入力量関係

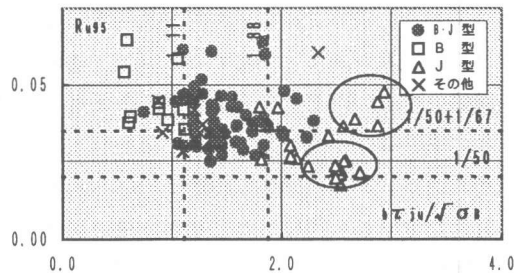


図-5 限界変形角—梁主筋降伏時理論せん断入力量関係

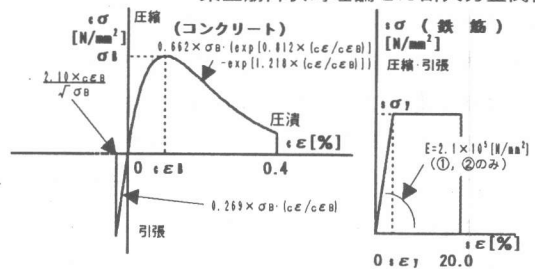


図-6 各材料における応力-歪関係

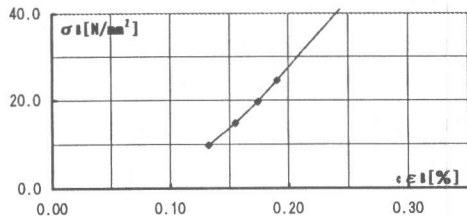


図-7 コンクリート最大耐力時歪関係

場合、②接合部域梁主筋の付着性状が劣化し圧縮側鉄筋が応力を負担しなくなったと仮定して、 $\gamma=0.0$  とした場合、③更に、接合部域梁主筋の抜け出しを考慮し、梁主筋の見かけ上のヤング係数低減を考慮した場合と 3 種の場合を想定した。尚、コンクリート、鉄筋の応力-歪関係を図-6 のように仮定した。更に、黒正等の

文献<sup>4)</sup>を参考にして、コンクリート最大耐力時歪  $\epsilon \in B$  とコンクリート強度の関係を図-7のように仮定した。また、接合部からの主筋の抜け出しを考慮した、鉄筋の見かけ上のヤング係数  $E_s^*$  は次式より算出した。

$$E_s^* = s\sigma_y / s\epsilon_y^*$$

$$s\epsilon_y^* = s\epsilon_y + \Delta l / db$$

$$\Delta l = (1/2) \cdot s\epsilon_y \cdot D_c$$

ここで、 $s\sigma_y$ ：梁主筋降伏強度、 $s\epsilon_y^*$ ：梁主筋見かけ上の歪、 $s\epsilon_y$ ：梁主筋降伏歪、 $\Delta l$ ：抜け出し量、 $db$ ：梁の有効成（梁接合部端ヒンジゾーン長さを  $db$  としている）、 $D_c$ ：柱成である。

この式は、引張側梁主筋が降伏する際を考え、図-8に示すように、圧縮側主筋歪を0、引張側主筋歪を  $s\epsilon_y$  とし、その積分値を接合部域梁主筋の抜け出し量  $\Delta l$  としている。抜け出しが生じる場合、梁接合部端では平面保持の仮定は成立しないが、梁ヒンジゾーンにおける曲げせん断ひび割れの進展により、ヒンジゾーン端では平面保持が成り立つ状態となったものと仮定した。このことにより、ヒンジゾーンの鉄筋の見かけ上の伸びは、抜け出し量と鉄筋の伸びとの和となるので、これを平均して、見かけ上のヤング係数と考えた。

図-9に、上記の①接合部域梁主筋の付着性状が良好な場合、②接合部域梁主筋の付着劣化を考慮した場合、③抜け出しによる見かけ上のヤング係数低減を考慮した場合、それぞれにおける、各試験体の梁主筋降伏時理論せん断入力量  $b\tau_{ju}/\sqrt{\sigma_B}$  に対する  $\epsilon \in c_{max}/\epsilon \in B$  ( $\epsilon \in c_{max}$ ：曲げ解析における梁主筋降伏時最外圧縮側コンクリート歪、 $\epsilon \in B$ ：コンクリート最大耐力時歪) 関係を示す。

この図からは、J型試験体であって変形性能が大きかったものは、接合部域梁主筋の付着劣化を考慮した場合、更にそれに伴う見かけ上のヤング係数の低減を考慮した場合、 $\epsilon \in c_{max}/\epsilon \in B$  がより大きくなる傾向があり、より曲げ圧潰しやすいことがわかる。また、せん断入力量の最

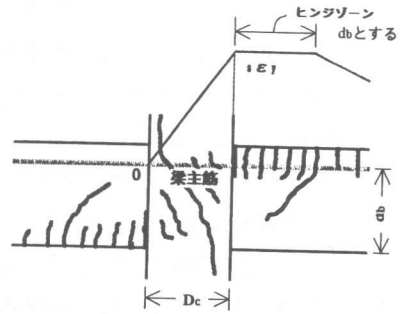
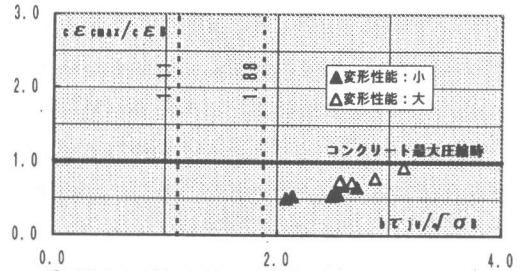
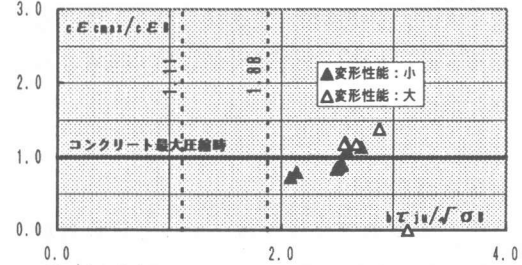


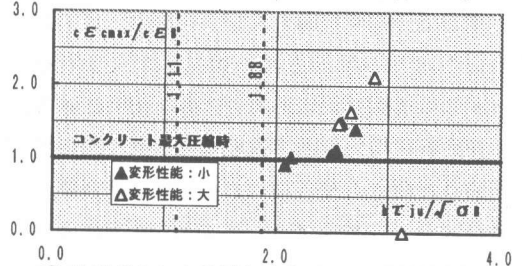
図-8 見かけ上のヤング係数低減モデル



① 接合部域梁主筋の付着性状が良好な場合 ( $\gamma=1.0$ )



② 接合部域梁主筋の付着劣化を考慮 ( $\gamma=0.0$ )



③ 抜け出しによる見かけ上のヤング係数低減を考慮

図-9 コンクリート最大耐力時歪に対する梁主筋降伏時最外圧縮側コンクリート歪

も大きかった1体 ( $b\tau_{ju}/\sqrt{\sigma_B}=3.13$ ) では、②、③の仮定では、梁主筋降伏以前に曲げ圧潰を生じた。

また、図-10には、各試験体の梁接合部端における圧縮ストラットの応力状態を検討するため、上記③の条件下における、梁有効成  $db$  に対する曲げ解析最大耐力時の応力中心間距

離  $j_b$  の比を示す。尚、同図には、一般に曲げ耐力を略算する際に用いられる  $j_b/db=7/8$  を記載した。ここでは、J型で変形性能が大きかったものほど  $j_b/db$  が小さくなる傾向が見られ、実験から得られた梁接合部端モーメントを  $(7/8) \cdot db$  で除して求めた主筋の応力は、かなりの誤差を含んでいることがわかる。また、終局時の接合部における主たる応力伝達機構は接合部コンクリートの斜め圧縮ストラットによるものと考えられているが、変形性能が大きかった試験体ほど、梁接合部端における  $j_b$  が小さくなり、圧縮域が広くなるという傾向が見られる。接合部斜め圧縮ストラット幅を検証するには梁接合部端からの入力だけではなく、柱接合部端からの入力も考慮しなくてはならないが、梁の圧縮域が広がることによりストラット幅も広くなり、接合部斜め圧縮ストラットの応力が緩和され、大変形まで接合部破壊に至らなかったと予想される。

## 7. まとめ

既往の十字形骨組試験体における実験資料を用いて検討した結果、以下の知見を得た。

- (1) 梁主筋降伏時理論せん断入力量は、梁部材鉄筋係数と通し配筋された梁主筋の付着指標といずれも比例関係にあり、密接な関係にある。
- (2) 接合部破壊先行型の試験体は、梁主筋降伏時理論せん断入力量の増大とともに、接合部せん断終局耐力が低下する。これは、梁接合部端における仮定された応力中心間距離にも問題があり、真の耐力低下であるかの検討が必要。
- (3) 梁曲げ降伏型と梁降伏後に接合部破壊する型、梁降伏後に接合部破壊する型と接合部破壊先行型との破壊モード分類は、梁主筋降伏時理論せん断入力量により可能である。
- (4) 実験時における梁主筋降伏を生じた層間変形角から、梁曲げ降伏型のみを許容して設計すれば、層間変形角 1/100 までに梁降伏が保証される。

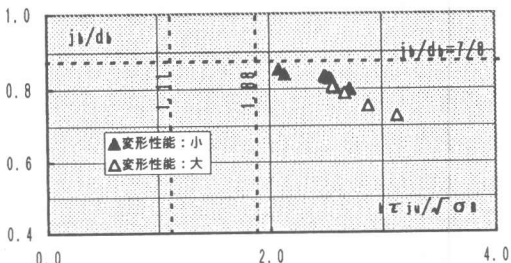


図-10 J型試験体における付着劣化と抜け出しを考慮した最大耐力時応力中心間距離位置

- (5) 接合部破壊先行型であっても変形性能が大きかった試験体は、付着劣化や抜け出しに伴う見かけ上のヤング係数低減を考慮すれば、梁曲げ圧縮破壊し、応力中心間距離が短くなる。

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

### 【引用文献】

- |                        |                        |
|------------------------|------------------------|
| 大和田等：大会, pp. 1297, '73 | 田中等：大会, pp. 1293, '73  |
| 大和田等：大会, pp. 1455, '76 | 上村等：大会, pp. 1147, '75  |
| 大和田等：大会, pp. 1789, '77 | 若林等：大会, pp. 1781, '77  |
| 別所等：大会, pp. 1311, '79  | 上村等：大会, pp. 1673, '78  |
| 大和田等：大会, pp. 1437, '81 | 大和田等：大会, pp. 1511, '80 |
| 城等：大会, pp. 1809, '83   | 本岡等：大会, pp. 1473, '81  |
| 野口等：大会, pp. 291, '85   | 城内等：大会, pp. 1983, '84  |
| 吉崎等：大会, pp. 189, '86   | 寺岡等：大会, pp. 115, '86   |
| 寺岡等：大会, pp. 615, '87   | 大塚等：大会, pp. 89, '86    |
| 寺岡等：大会, pp. 415, '88   | 城等：大会, pp. 621, '87    |
| 青山等：大会, pp. 423, '88   | 上村等：大会, pp. 419, '88   |
| 上村等：大会, pp. 435, '89   | 川崎等：大会, pp. 477, '88   |
| 城等：大会, pp. 443, '89    | 森田等：大会, pp. 439, '89   |
| 塩原等：大会, pp. 353, '90   | 塩原等：大会, pp. 459, '89   |
| 野口等：大会, pp. 577, '91   | 上村等：大会, pp. 375, '90   |
| 中村等：大会, pp. 583, '91   | 川崎等：大会, pp. 579, '91   |
| 青山等：大会, pp. 609, '91   | 上村等：大会, pp. 603, '91   |
| 山田等：大会, pp. 149, '92   | 青山等：大会, pp. 635, '91   |
| 寺岡等：大会, pp. 253, '92   | 入江等：大会, pp. 251, '92   |
| 野口等：大会, pp. 513, '92   | 野口等：大会, pp. 263, '92   |
| 鈴木等：大会, pp. 495, '94   | 平松等：大会, pp. 493, '94   |
| 上村等：大会, pp. 657, '96   | 池田等：大会, pp. 497, '94   |
| 松本等：大会, pp. 687, '96   | 田畑等：大会, pp. 673, '96   |
| 入澤等：大会, pp. 705, '96   | 瀬口等：大会, pp. 701, '96   |
| 貫洞等：大会, pp. 335, '97   | 中野等：大会, pp. 715, '96   |
| 野口等：JCI, pp. 497, '88  | 上村等：大会, pp. 411, '97   |
| 多田等：関東, pp. 225, '76   | 寺岡等：JCI, pp. 633, '90  |
|                        | 多田等：関東, pp. 233, '77   |
- 大会：日本建築学会大会学術講演梗概集  
JCI：コンクリート工学年次論文報告集  
関東：日本建築学会関東支部研究報告集

- 【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. 11. / 2) 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. / 3) 楠原文雄・塩原等：接合部破壊が先行するRC柱はり接合部の接合部せん断力と接合部破壊の因果関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 1005-1010, 1997. / 4) 黒正清治：鉄筋コンクリート部材の終局強度(2), コンクリート・ジャーナル, Vol. 5, No. 10, pp. 58-65, 1967. 10.

注) せん断入力量：隣接部材から接合部に入力される平均せん断応力度の大きさを言う。