

論文 高強度軽量コンクリートを用いた中空断面柱部材の変形性能

増川 淳二^{*1}・須田 久美子^{*2}・柳井 修司^{*3}・大塚 一雄^{*4}

要旨: 高橋脚や長大橋主塔部材を想定して、高強度鉄筋と高強度軽量骨材コンクリートを用いた中空断面 RC 柱部材の加力実験を行った。部材には、軸力・曲げ・せん断力・ねじりの組合せ断面力を交番で作用させ、高強度普通骨材コンクリート試験体と変形性能について比較した。軽量骨材コンクリートを使用した試験体に関しては、コンクリート負担分のせん断耐力を 0.7 倍に低減し、その低下分をせん断補強筋で補うように設計した。その結果、高強度軽量骨材コンクリートを使用した部材は、軸力・曲げ・せん断・ねじりの組合せ断面力に対して、高強度普通骨材コンクリート部材と同等の優れた変形性能を有することが分かった。

キーワード: 主塔, 高橋脚, 軽量骨材コンクリート, 高強度鉄筋, ねじり, 変形性能

1. はじめに

RC 高橋脚や長大橋 RC 主塔部材等は、断面が非常に大きくなる上、普通強度鉄筋では鉄筋量が非常に多くなり、太径鉄筋を使用しても超過配筋となる場合が多い。そこで、設計基準強度 50N/mm^2 以上の高強度コンクリートと降伏強度が 685N/mm^2 級の高強度鉄筋を使用した高強度 RC 中空断面部材を採用すると、コンクリート量、鉄筋量を大幅に低減できるため、施工の省力化が図られ、在来工法に対して工費・工期ともに低減できる¹⁾。さらに、在来工法と同様の工種で施工できるため、熟練工による施工が可能で、施工ミスが生じにくいこと、また、高強度コンクリートの使用により、耐久性が高まることなどから、ライフサイクルコストのより一層の低減が期待できる。

この高強度 RC 中空断面部材の変形性能については、これまで、軸方向鉄筋に適用する高強度鉄筋に要求される材料特性や、変形適合ねじりが部材の変形性能に与える影響等に関する検討を行ってきた^{2) 3) 4) 5)}。特に、PC 連続ラ

ーメン橋では、橋軸直角方向の地震時に橋脚に作用する変形適合ねじりの影響は、橋脚高さが高くなるほど大きくなるが、せん断-ねじり破壊が曲げ-ねじり破壊に先行しないようにせん断補強筋量を設計すれば、十分な変形性能を有することが明らかになった^{4) 5)}。

ここでは、さらなる軽量化の可能性を検討するため、普通骨材の代わりに、近年開発された低吸水性かつ高強度の造粒型軽量骨材（以下、高性能軽量骨材）を使用した高強度コンクリートを高強度 RC 中空断面柱部材に適用し、地震力を想定した加力実験を行った。部材には、軸力、曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメントの組合せ断面力を交番で作用させ、普通骨材を使用した試験体⁵⁾と変形性能及び破壊性状について比較を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

軽量骨材コンクリートを使用した試験体（以下、軽量骨材試験体）及び普通骨材コンクリー

* 1 鹿島建設(株)技術研究所 土木系 LCE プロジェクトチーム 研究員, 工修 (正会員)

* 2 鹿島建設(株)技術研究所 土木系 LCE プロジェクトチーム 主任研究員, 工博 (正会員)

* 3 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部 材料・施工 Gr. 研究員, 工修 (正会員)

* 4 鹿島建設(株)土木設計本部 第二設計部 次長 (正会員)

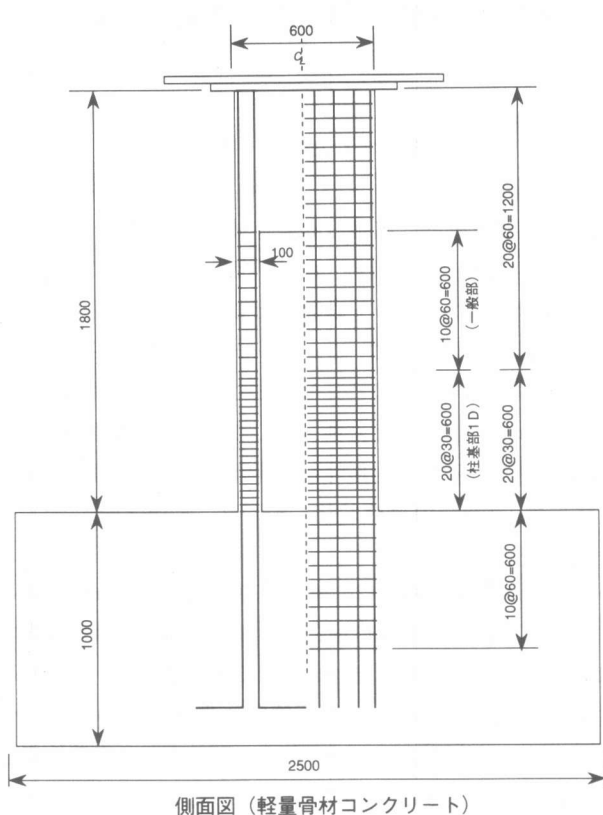


図-1 試験体配筋図

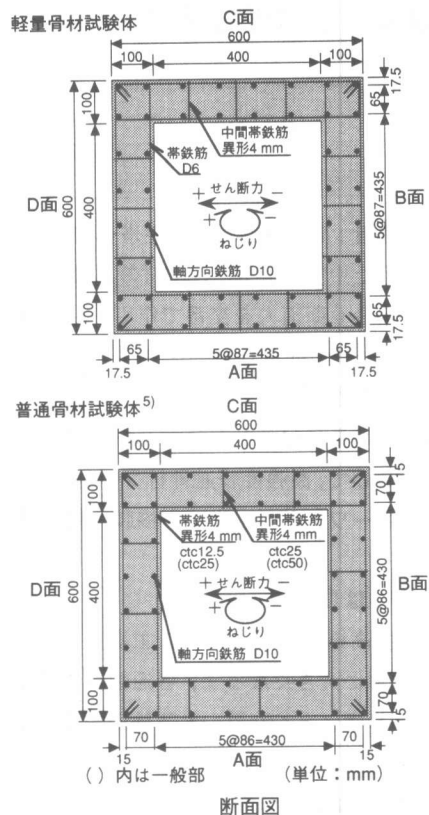


表-1 材料特性

		普通骨材試験体	軽量骨材試験体
軸方向鉄筋	降伏強度(N/mm ²)	863	784
	引張強度(N/mm ²)	1050	970
帯鉄筋	降伏強度(N/mm ²)	284	292
	引張強度(N/mm ²)	422	460
コンクリート	圧縮強度(N/mm ²)	76.5	68.7
	割裂強度(N/mm ²)	6.09	2.22
	弾性係数(N/mm ²)	3.14×10^4	2.23×10^4
	比重	2.38	1.75

トを使用した試験体（以下、普通骨材試験体）の配筋図を図-1に、材料特性を表-1に、鉄筋比及び耐力計算値を表-2に示す。

普通骨材試験体では、粗骨材に Gmax=10mm の豆砂利を用いた高流動性コンクリートを使用した。軽量骨材試験体では、高流動性の1種軽量骨材コンクリートを用いた。粗骨材には、骨材径5~8mm（表乾比重 1.19）及び骨材径

2.5~5mm（表乾比重 0.99）の高性能軽量骨材を1:9（容積比率）の割合で混合して使用した。表-1より、軽量骨材コンクリートは、普通骨材コンクリートよりも3割近く比重が軽くなっている。ただし、本実験に用いた軽量骨材コンクリートは、比重の軽い小径の軽量骨材を使用したこともあり、圧縮強度に対して、割裂強度がかなり小さい値となった。

表-2 鉄筋比及び耐力計算値

	普通骨材試験体		軽量骨材試験体	
	基部1D	一般部	基部1D	一般部
軸方向鉄筋比	0.95%		0.95%	
帯鉄筋比	0.74%	0.37%	0.70%	0.42%
Vc (kN)	142		139	
Vs (kN)	603	302	590	354
Vc+Vs (kN)	745	443	729	493
0.7Vc+Vs (kN)	—	—	687	451

・せん断耐力はコンクリート標準示方書の
棒部材のせん断耐力式を用いて求めた。

Vc: コンクリート負担分のせん断耐力

Vs: 帯鉄筋負担分のせん断耐力

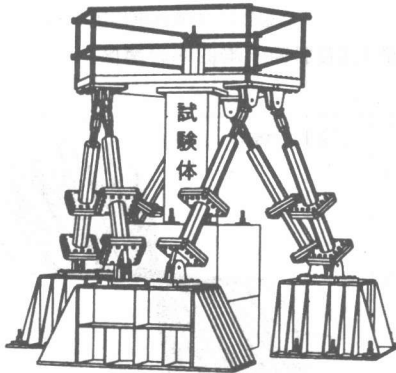


図-2 6自由度加力装置⁶⁾

軽量骨材試験体と普通骨材試験体では、使用した帯鉄筋の径が異なるため、図-1の断面図に示すように配筋が若干異なるが、両試験体で帯鉄筋負担分のせん断耐力 V_s が同程度となるように帯鉄筋間隔を定めた。ただし、軽量骨材試験体の一般部（柱基部1D（D：断面高さ）以外）の帯鉄筋量は、表-2に示す通り、土木学会コンクリート標準示方書に準じて、コンクリート負担分のせん断耐力 V_c を7割に低減させ、その減少分を帯鉄筋で補うように定めた。したがって、軽量骨材試験体における $0.7V_c + V_s$ の値が、普通骨材試験体の $V_c + V_s$ と同程度になっている。

2.2 加力方法

加力には、試験体頭部の軸方向鉄筋に溶接された鋼板を介して、曲げ、せん断、ねじり、軸力を任意の組合せで加力できる6自由度加力装置⁶⁾（図-2）を用いた。軸力を一定に制御した状態で、曲げ、せん断およびねじりを漸増交番

繰り返しにより加力した。せん断スパン比は、試験体頭部に曲げモーメントを作用させることにより任意に設定でき、本実験では5.0（せん断スパン300cm）とした。平均軸圧縮応力度は 3.53N/mm^2 （軸力比0.05）とした。

荷重の制御は、変形適合ねじりを想定して次のように行った。

(a) RC断面計算により最外縁引張鉄筋が降伏応力度の90%（地震時許容応力度相当）に達する荷重までは、曲げモーメントに対するねじりモーメントの比率を15%として、荷重制御による漸増交番加力（繰り返し無し）を行った。

(b) それ以降は、最外縁の引張鉄筋が降伏応力度の90%に達した荷重時の、基部1.5D区間における平均曲率に対するねじり回転角の比率を求め、この比率を一定に保つようにねじり変形を制御しながら、曲率制御による交番加力を行った。ただし、曲げ降伏荷重時における基部1.5D区間の平均曲率（ ϕ_p ）の整数倍の曲率で、3回ずつ繰り返しながら加力した。

2.3 計測方法

(1) 平均曲率

フーチング上面から1.5D（90cm）の高さの柱隅角部の4箇所、それぞれフーチング上面との相対変位を測定し、測定区間の平均曲率を算出した。

(2) ねじり回転角

平均曲率と同様に、フーチング上面から1.5Dの高さにおいて、A面およびC面（図-1参照）の中央における水平変位を測定し、ねじり回転角を算出した。

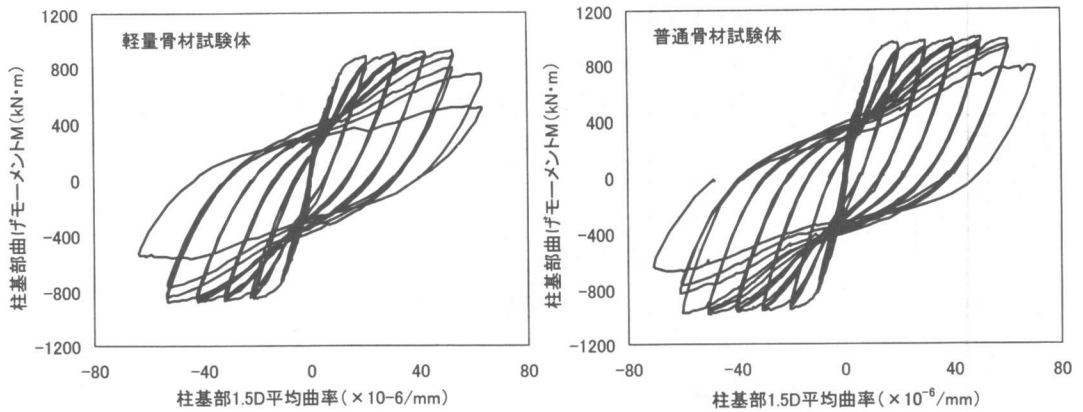


図-3 柱基部の曲げモーメントと柱基部1.5D区間平均曲率の関係

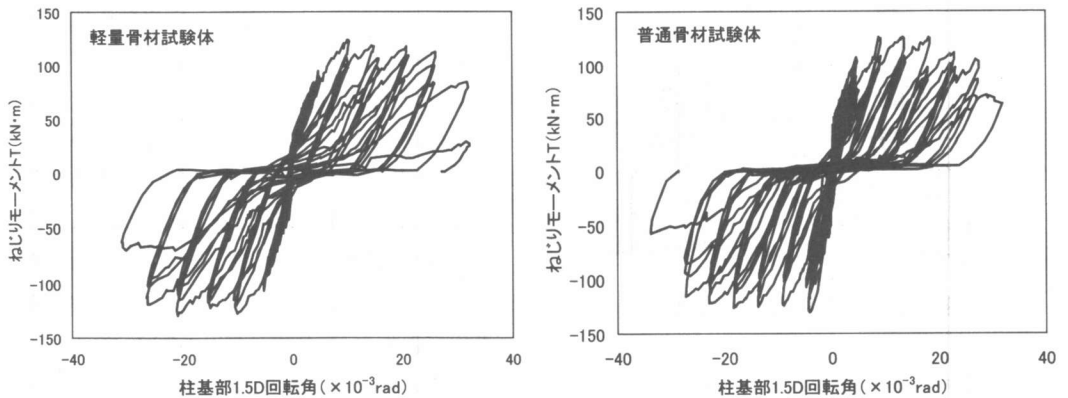


図-4 ねじりモーメントと柱基部1.5D区間のねじり回転角の関係

3. 実験結果

軽量骨材試験体及び普通骨材試験体の柱基部の曲げモーメント (M) と柱基部 1.5D 区間平均曲率 (ϕ) の関係を図-3 に、ねじりモーメント (T) と柱基部 1.5D 区間のねじり回転角 (θ) の関係を図-4 に示す。

曲げひび割れは、軽量骨材試験体が $M_c = 220 \text{ kN}\cdot\text{m}$ で、普通骨材試験体が $M_c = 300 \text{ kN}\cdot\text{m}$ で発生した。両試験体の M_c から、デコンプレッションモーメント (両試験体とも $110 \text{ kN}\cdot\text{m}$) を差し引いた値の普通骨材試験体に対する軽量骨材試験体の比率は約 58% となる。それに対し、コンクリートの割裂試験強度の普通骨材試験体に対する軽量骨材試験体の比率は約 36% である。したがって、本実験に於いては、軽量骨材コンクリートの割裂強度試験結果 (表-

1) は、普通骨材コンクリートに比べ、相対的に曲げひび割れ発生強度に対して低い値となっていると考えられる。

曲げ降伏時の柱基部 1.5D 区間平均曲率 ϕ_y と柱基部の曲げモーメント M_y は、軽量骨材試験体で $\phi_y = 9.8 \times 10^{-6} / \text{mm}$ 、 $M_y = 690 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、普通骨材試験体で $\phi_y = 10 \times 10^{-6} / \text{mm}$ 、 $M_y = 790 \text{ kN}\cdot\text{m}$ であった。普通骨材試験体の M_y が軽量骨材試験体よりも高いのは、軸方向鉄筋の降伏強度とコンクリートの圧縮強度が普通骨材試験体の方がそれぞれ 1 割程度高いためである。両試験体の比較がしやすいように、図-3、図-4 の包絡線に対して、縦軸をそれぞれ曲げ降伏時の柱基部曲げモーメント及びねじりモーメントで除し、横軸を曲げ降伏時の曲率及びねじり回転角で除したものを図-5 に示す。

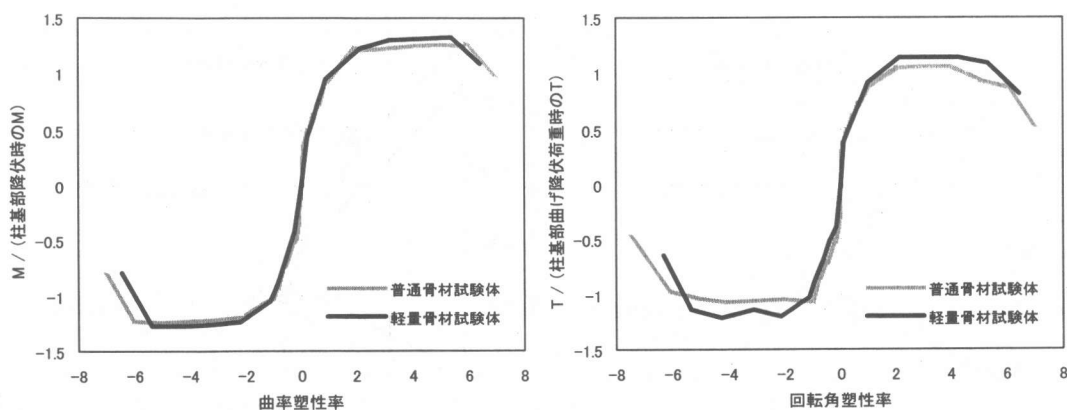


図-5 軽量骨材試験体と普通骨材試験体の変形性能の比較

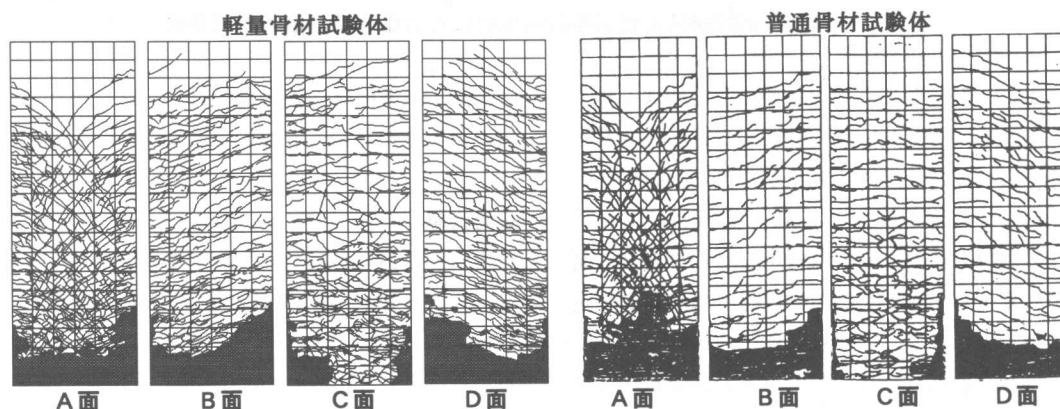


図-6 軽量骨材試験体と普通骨材試験体のひび割れ最終状況の比較
(1マス=10cm)

降伏以降は、両試験体とも $4 \sim 5 \phi_y$ で柱基部隅角部付近のコンクリートの剥離が進み、 $5 \phi_y$ の繰返し途中から鉄筋が座屈し始めた。 $6 \phi_y$ の繰返しによりA面(せん断によるせん断応力度とねじりによるせん断応力度が足し合わされる面)のかぶりコンクリートがフーチング面から30cm以上の広範囲に渡ってはく落した。その後、側方の軸方向鉄筋が広い範囲で座屈して、座屈後の軸方向鉄筋の局所的な曲げ戻しによる破断とコンクリートの圧壊が進行し、終局に至った。荷重の低下度合いは、軽量骨材試験体の方が若干急激であったが、じん性率については、両試験体で大きな差は見られなかった。

ねじりについては、両試験体とも最大ねじりモーメントは $125 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 程度で、図-4に示され

る $T-\theta$ 関係もほぼ同じ形状であった。したがって、軽量骨材コンクリート部材では、 V_c を7割に低減させてせん断・ねじり設計をすれば、普通骨材コンクリート部材と同程度の変形性能を示すと言える。

両試験体のひび割れ分布及びかぶりコンクリートの剥落の最終状況は、図-6に示す通りで、両者ともA面の損傷が最も激しく、C面の損傷が最も小さい。これは、せん断とねじりによるせん断応力度が、A面では足し合わされ、C面では相殺されるためである。実際、A面の帯鉄筋が最も早く($1 \sim 2 \phi_y$)降伏し、ひずみも大きかった。加力方向に対して直行するB面とD面では、柱基部の損傷状態がほぼ同じであったため、 $M-\phi$ 関係においては、正負に特に顕著な差は見られなかった。

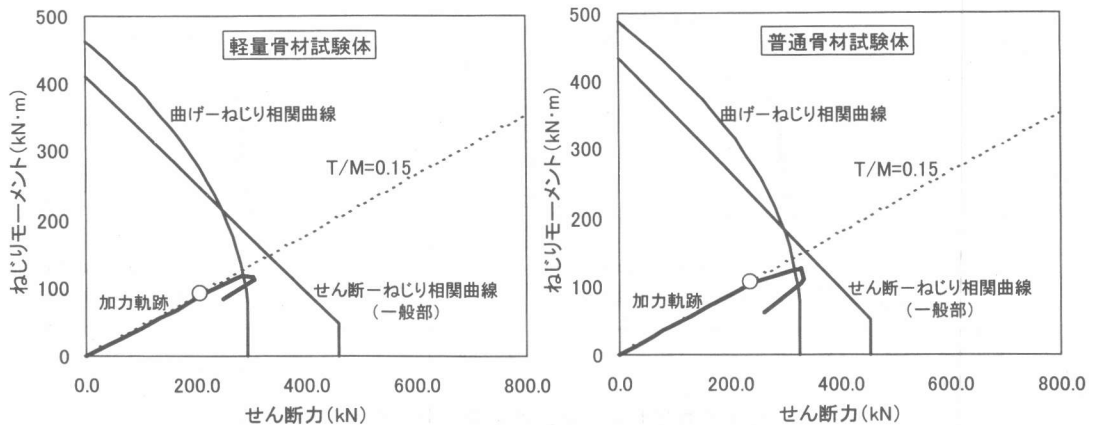


図-7 軽量骨材試験体と普通骨材試験体の加力軌跡及び耐力相関曲線

次に、図-7に、加力軌跡と耐力相関曲線⁴⁾
⁵⁾を示す。図中の○印は引張縁の鉄筋が地震時
 許容応力度に相当する降伏応力度の90%の応力
 度に達した時を示している。○印の前後でねじ
 りの制御方法が、荷重制御からねじり変形の制
 御に変化している。この変形適合ねじりを想定
 した加力により、○印以降は、両試験体ともT
 /Mの値が15%よりも若干小さめの値となった。
 最終的には、両試験体とも柱基部が曲げ-ねじ
 り破壊した。

4. まとめ

高橋脚や長大橋主塔部材を想定して、高性能
 軽量骨材及び普通骨材を粗骨材に用いた中空
 断面RC高強度柱部材に、軸力、曲げモーメン
 ト、せん断力、ねじりモーメントの組合せ断面
 力を交番に作用させて加力実験を行った結果、
 次の知見が得られた。

- (1) 軽量骨材コンクリートを使用した試験体は、
 コンクリート負担分のせん断耐力を0.7倍に低
 減し、その低下分をせん断補強筋で補うように
 設計すれば、曲げ-ねじり破壊を先行させるこ
 とができる。
- (2) 骨材の種類に関わらず、高強度中空断面RC
 部材は、ねじりに対して適切な補強をすれば、
 変形適合ねじりが作用する荷重条件下でも優
 れた変形性能を示す。

- (3) 橋脚、主塔部材への軽量骨材コンクリート適
 用の可能性が認められた。

参考文献

- 1) 水口和之, 芦塚憲一郎, 大塚一雄, 天野玲子:
 スーパーRC工法, 橋梁と基礎, Vol. 33, No. 8,
 pp. 141-144, 1999. 8
- 2) 増川淳二, 天野玲子, 須田久美子, 大塚一雄:
 高強度鉄筋を用いたRC橋脚部材の開発, コ
 ンクリート工学論文集, 第9巻第1号, pp. 123
 -132, 1998. 1
- 3) 増川淳二, 須田久美子, 村山八洲雄, 一宮利
 通: 高強度鋼材を柱筋に用いたRC柱部材の
 破壊性状, 第50回土木学会年次学術講演会
 講演概要集, V-414, pp. 828-829, 1995. 9
- 4) 一宮利通, 須田久美子, 村山八洲雄, 新保
 弘: 曲げ、せん断、ねじりが作用するRC柱
 部材の耐力, 土木学会年次学術講演会講演概
 要集, 第50回, 第V部門, pp. 840-841, 1995. 9
- 5) 須田久美子, 天野玲子, 増川淳二, 一宮利通:
 高橋脚の耐震性能に及ぼすねじり加力の影
 響, コンクリート工学年次学術論文報告集,
 vol. 19, No. 2, pp. 789-794, 1997. 6
- 6) 新保弘, 村山八洲雄, 須田久美子, 一宮利通:
 6自由度加力装置を用いたRC柱部材実験, コ
 ンクリート工学年次論文報告集, Vol. 15,
 No. 2, pp. 1113-1118, 1993. 6