

鋼製八角形断面柱を有するラーメン隅角部の静的および 繰り返し強度特性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE LOAD-DEFLECTION BEHAVIOR OF STEEL BOX SECTION BEAM-TO-OCTAGONAL SECTION COLUMN CONNECTIONS UNDER MONOTONIC AND CYCLIC LOADING

山田尚之*・青木徹彦**

By Naoyuki YAMADA and Tetsuhiko AOKI

*学生会員 名古屋大学大学院工学研究科 博士課程(前期課程) 在学中(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

**正会員 工博 愛知工業大学教授 工学部土木工学科(〒470-03 豊田市八草八千草)

This paper presents the characteristics of strength of box section beam-octagon section column connections of steel rigid frames under the monotonic loading and the cyclic loading. Six specimens of steel rigid frame connections were tested under the monotonic compression and tension loading, and the cyclic loading. The results of this test presented the ultimate strength, the deformation capacity and the absorbed energy of the rigid frame connections.

Key Words : octagonal column, beam-to-column, connection, rigid-frame, ultimate strength, cyclic loading

1. はじめに

最近、景観を形成する構成要素として橋などの構造物を考へることが学問的にも取り上げられるようになってきた。実務に携わる橋梁技術者にとって、橋の景観をどのように決定するかは、橋を安全に作るということと共に、今日大きなテーマになっている。人目に触れる機会の多い都市内高速道路の橋脚には景観上の配慮が必要と思われるが従来ほとんどのものが箱形または円形断面材である。最近では視覚的環境を考慮し、長方形断面の短辺を半円形に変えたものなどが用いられては始めている。

八角形断面柱を橋脚に用いた場合、光の影が縦方向に細長く入るために、錯視現象により実際の寸法よりも細長くスマートに見えるという利点がある。その優れた美観により、イタリア等では、PC 橋の橋脚として多く用いられている。鋼製橋脚の場合力学的には断面構成板の幅厚比が箱形断面のものより小さくなるため、板の局部座屈強度が上昇し、強度上有利になると思われるが、一方でラーメン隅角部を構成する脚と横はりとの接合部がやや複雑となる上、応力の分布状態そのものが現時点では不明確である。

従来行われた、多角形断面材の研究^{1),2)}は数少なく、ラーメン隅角部の研究においては箱形断面柱^{3)~6)}、円形断面柱を用いた隅角部の研究^{7)~9)}は若干あるものの、八角形断面柱を用いたものは皆無であり、利用できる適切な設計法もないのが現状である。

そこで本研究では橋脚部材に用いる部材として多角形のうち最も実用的と思われる八角形断面を選び、箱

形断面横はりと接合したラーメン隅角部モデルを製作して、静的載荷実験を行い、応力分布状態および終局強度を求めるとともに、最近特に注目を集めている地震時に対応する繰り返し載荷実験を行って変形性能を調べ、八角形断面柱を有するラーメン隅角部の設計のための基礎資料を提供する。

2. 実験計画

(1) 実験供試体

実験供試体の材質は全て SS400 とし、はり、柱部が直角に交差する L 型の隅角部モデルとした。柱部断面形状は正八角形断面とし、はりのウェブを柱部材表面に溶接付けしたもの、および柱断面内に割り込ませたものの 2 種を用いた。板厚は全供試体とも 6mm を標準とし、静的圧縮載荷試験用、静的引張載荷試験用および繰り返し載荷試験用の各 3 体、合計 6 体を、いずれも溶接組立により製作した。実験計画を Table 1 に示す。

供試体の概略図を Fig. 1 に示す。また、基本寸法を Table 2 に、断面定数を Table 3 に示す。

Table 2 中の幅厚比パラメータ R は次式により定義される。

$$R = \frac{B}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ここで、 B = 柱の構成板幅、 t = 柱の板厚、 σ_y = 降伏応力、 E = 弾性係数、 ν = ポアソン比、 k = 両端単純支持純圧縮板の座屈係数 (=4.0) である。八角形断面

Table 1 Test Program

Specimen	Loading Type		Inside Web	Numbers
OCT-I-C	Monotonic	Compression	○	1
OCT-O-C		Compression	-	1
OCT-I-T		Tension	○	1
OCT-O-T		Tension	-	1
OCT-I-R	Cyclic		○	1
OCT-O-R			-	1

Table 2 Dimensions of Test Specimens

Specimen Series	B (mm)	t (mm)	H (mm)	L (mm)
OCT-I	240	6.0	1990	1000
OCT-O				

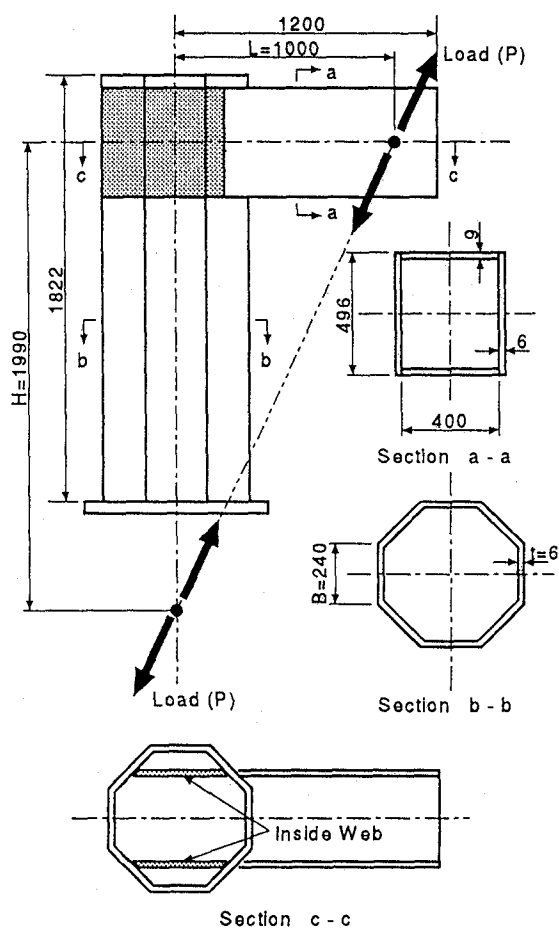


Fig. 1 Test Specimen

の柱部の一辺の幅厚比パラメータの値は $R = 0.71$ である。

実験供試体番号は、以下のように定義した。
隅角部モデルの試験体番号の表示例:

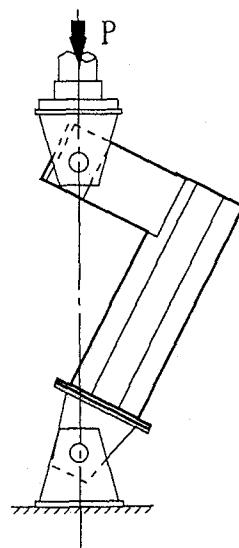


Fig. 2 Test Setup

① OCT - ② I - ③ C

- ①- 試験体の断面形状を示す。OCT は八角形 (Octagon) を示す。
- ②- はりの割り込みウェブの有無を示す。I が割り込み有り、O が割り込みなしを示す。
- ③- 载荷の方法を示す。C が静的圧縮载荷、T が静的引張载荷、R が繰返し载荷を示す。

Fig. 2 に示すようにはり、柱部をピンで支持し、300tf (2943 kN) 長柱試験機により単調または繰返し载荷を行った。

(2) 予想降伏荷重の算出

本研究では、Fig. 3 に示すように柱部の最大応力が降伏したときの荷重を予想降伏荷重 P_y とした。すなわち、圧縮载荷、引張载荷ともはりとフランジプレートとの交点で柱プレートの応力が最大となると考え、圧縮载荷、引張载荷とも、曲げ応力 σ_m と一様軸応力 σ_n との和から求めた。よって予想降伏荷重 P_y は次式で定義した。

Table 3 Cross-sectional properties

Specimen Series	A_c (cm^2)	I_c (cm^4)	W_c (cm^3)	A_b (cm^2)	I_b (cm^3)	B/t	R
OCT-I	115.2	49695	1492	129.6	54106	40	0.71
OCT-O							

A_c = Cross-sectional Area of the Column
 I_c = Geometrical Moment of Inertia of the Column
 W_c = Section Modulus of the Column
 A_b = Cross-sectional Area of the Beam
 I_b = Geometrical Moment of Inertia of the Beam

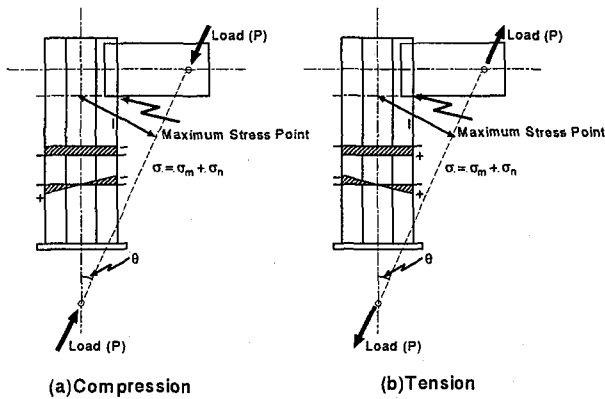


Fig. 3 Maximum Stress Point

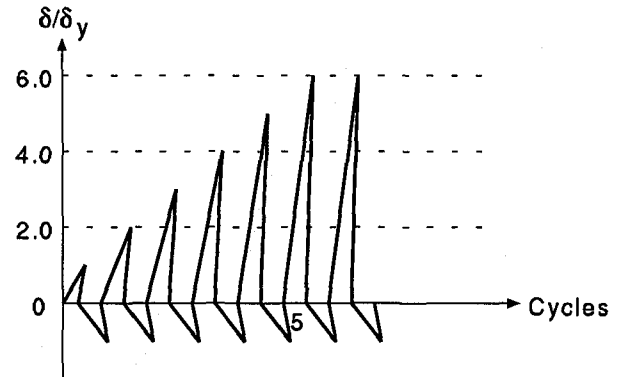


Fig. 4 Loading Program

$$\begin{aligned}
 \sigma_y &= \sigma_m + \sigma_n \\
 &= \frac{P_y l}{I_c} y + \frac{P_y \cos \theta}{A_c} \\
 P_y &= \frac{\sigma_y}{\left(\frac{\cos \theta}{A_c} + \frac{l}{I_c} y \right)} \quad (2)
 \end{aligned}$$

ここで、 σ_y = 構成板の降伏荷重で素材試験により求めた値、 θ = 荷重線と柱の中心線のなす角 ($\cos \theta = 0.89$)、 A_c = 柱の断面積、 I_c = 柱の断面二次モーメント、 y = 軸力が働かない場合の中立軸から最外縁までの距離である。

(2) 式より、予想降伏荷重 $P_y = 56.2 \text{ tf}$ (551.3 kN) を得た。

3. 実験方法

(1) 荷重方法

(1) 静的圧縮荷重

圧縮方向に荷重を始め、予想降伏荷重まで 3tf (29.4 kN) きざみで荷重制御を行い、降伏荷重付近で変位制御に切り替えて荷重する。

(2) 静的引張荷重

引張方向に荷重を始め、静的圧縮荷重と同様の制

御法で行う。

(3) 繰り返し荷重

現段階では、繰り返し荷重の荷重プログラムに関する一般的な規定がないため、本研究では文献 4) を参考に Fig. 4 に示すような荷重プログラムを用いた。

最初に、圧縮方向から荷重を始め変位制御で行い、圧縮側のみ、各サイクルごとに降伏変位 δ_y ずつピン支承間変位が進むように荷重する。

ピン支承間変位は、最大 $6\delta_y$ とし、その後は顕著な強度低下が現れるまで荷重を行う。

また、引張側は、 δ_y を強制変位として繰り返し荷重を行う。

(2) ひずみおよび変位の測定

供試体の隅角部付近で、座屈変形が予想される部分にひずみゲージを貼付け、各荷重レベルごとに測定値を記録する。また、ピン支承間変位および柱部中心軸の変形を調べるために、変位計を設置し、各荷重レベルごとの変位を記録する。

Table 4 Results of Tensile Coupon Test

t mm	σ_y kgf/cm ² (MPa)	ϵ_y $\times 10^{-6}$	E kgf/cm ² (GPa)	ν	σ_y/σ_F	σ_u kgf/cm ² (MPa)
6.0	2998 (294)	1427	2.07×10^6 (203)	0.29	1.25	4374 (428)
9.0	2584 (253)	1221	2.10×10^6 (206)	0.29	1.08	4186 (410)

σ_y = Yield Stress, E = Young's modulus
 σ_F = Nominal Yield Stress 2400 kgf/cm² (235 MPa), ν = Poisson's ratio

Table 5 Maximum Load under Monotonic Test

Specimen	Loading	Inside Web	Maximum Load P_u tf (kN)	P_u/P_y
OCT-I-C	Compression	○	69.1 (677.9)	1.23
OCT-O-C	Compression	-	70.0 (686.7)	1.25
OCT-I-T	Tension	○	87.8 (861.3)	1.56
OCT-O-T	Tension	-	88.0 (863.3)	1.57

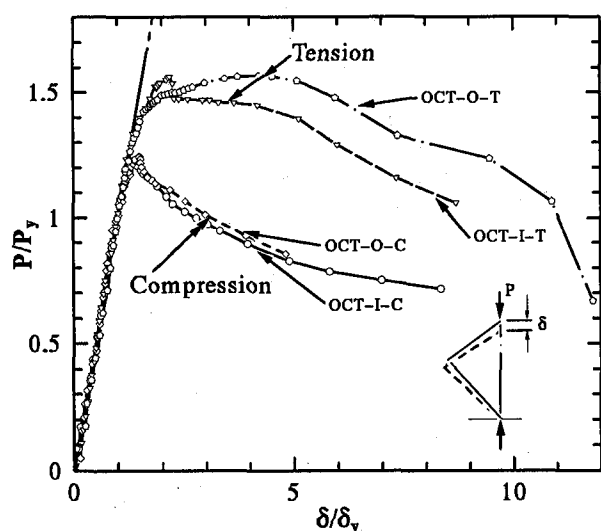


Fig. 5 $P/P_y - \delta/\delta_y$ Curves under Monotonic Test

4. 実験結果および考察

(1) 素材試験

断面構成板と同じ材質で板厚 6mm と 9mm の JIS 1 号 1A 試験片を各 3 本製作し、引張試験を行った結果の平均値を Table 4 に示す。

(2) 最大荷重の比較

Table 5 に各供試体の最大荷重を示す。最大荷重ははりの割り込みウェブの有無による差はほとんどなく、また、素材試験実測値を用いた予想降伏荷重より圧縮荷重では約 24%、引張荷重では約 56% 高い値となった。圧縮荷重および引張荷重の結果を比較すると、引張荷重の方が約 26% 高い結果となった。これは、引張荷重では隅角部内側の柱の引張フランジプレートの方が圧縮フランジプレートの局部座屈の発生前に降伏に達し、その後ひずみ硬化に入ったため応力が上昇した

ためと思われる。

(3) 荷重-変位 ($P/P_y - \delta/\delta_y$) 曲線

圧縮荷重および引張荷重の荷重 P 、変位 δ をそれぞれ予想降伏荷重 P_y 、予想降伏変位 δ_y (各供試体それぞれに予想降伏荷重を載荷したときの変位を用いた。) で除し無次元化した $P/P_y - \delta/\delta_y$ 曲線を Fig. 5 に示す。

同図より圧縮荷重を行った OCT-I-C、OCT-O-C は、最大荷重強度と同じく割り込みウェブの有無にかかわらず、ほぼ同じ荷重-変位挙動を示しており、最大荷重後の荷重低下が著しい。これは、隅角部内側では、曲げ応力が生じやすくまた、応力集中により、柱部の圧縮フランジプレートが早期に局部座屈を生じたためと思われる。

一方、引張荷重を行った OCT-I-T、OCT-O-T は、最大荷重後の荷重低下が圧縮荷重のものよりもゆるやかであった。これは、最大荷重の項で述べたように背面の圧縮フランジプレートが降伏に達する前に隅角部内側の引張フランジプレートの方が先に降伏し、荷重の増加に伴ってひずみが増大したために隅角部全体の变形が大きくなったためと思われる。

OCT-I-T、OCT-O-T では、割り込みウェブがない OCT-O-T の方が隅角部としての変位性状は安定している。これは、はりの割り込みウェブがないことにより隅各部に応力が集中しにくく八角形部材のせん断ゾーンで降伏が生じ、最終的にせん断座屈を生じたためと思われる。また、はりの割り込みウェブのある OCT-I-T は応力の分散があるものの、ウェブがあるため、その下方で応力の集中が生じ、OCT-O-T に比べ局部座屈が早めに生じたと思われる。

(4) ひずみ分布

本研究では、座屈が予想される部分 (圧縮フランジプレート) に着目し表面のひずみを測定した。はりから

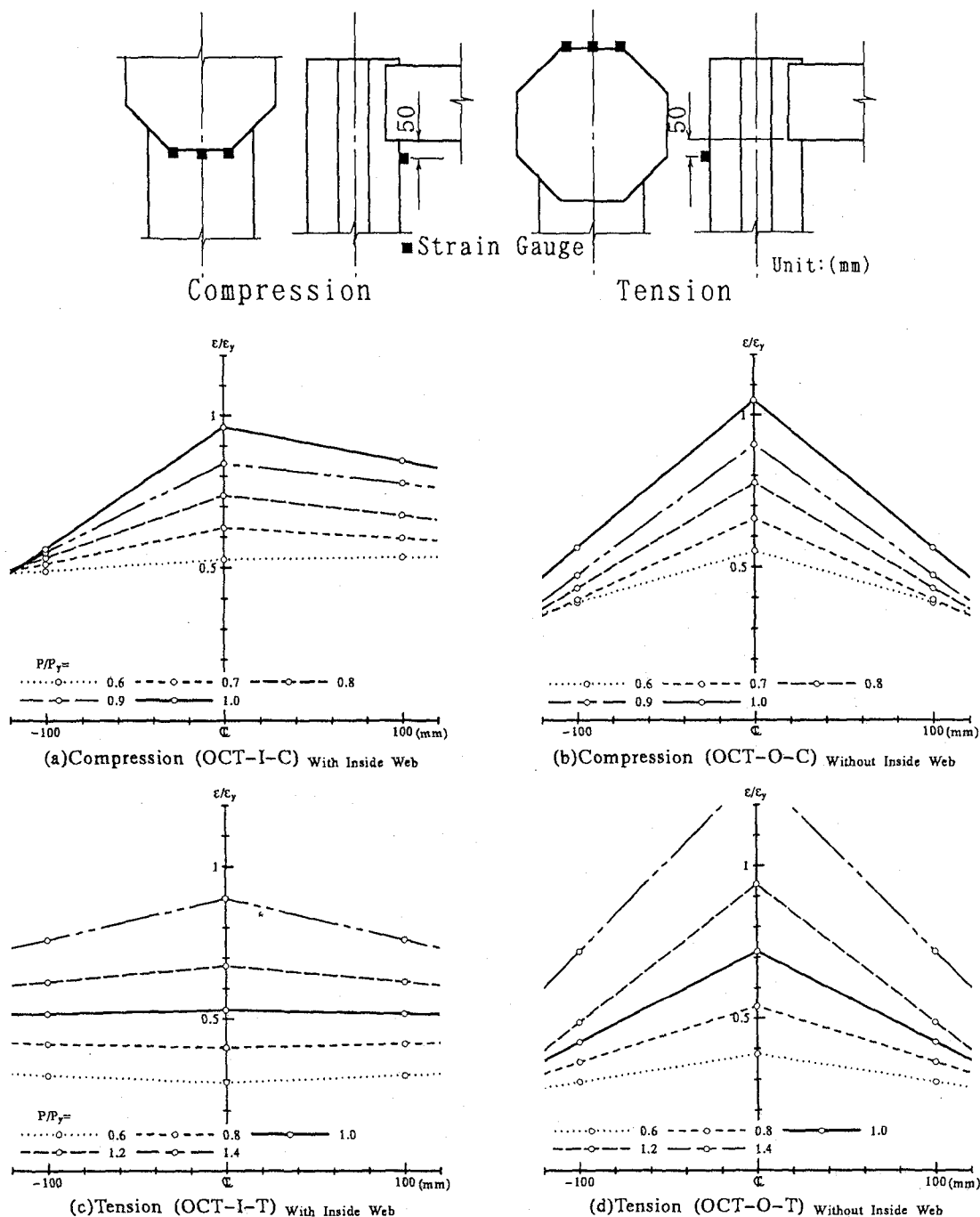


Fig. 6 Strain Distribution of Compression Plate

50mm 位置での各荷重レベルごとの柱部軸方向ひずみを示すと Fig. 6 のようになる。

同図より、本八角形断面柱を用いたラーメン隅角部では、静的圧縮荷重および静的引張荷重実験とも、はりの割り込みウェブのある供試体 (Fig. 6(a),(c)) ではひずみ分布が平坦で、割り込みウェブの無い供試体 (Fig. 6(b),(d)) の方は、圧縮フランジプレートを中心線部で最大ひずみが現れていることがわかる。これは、割り込みウェブのある部材では、はりの力が比較

的均等に柱断面に伝達されるのに対し、割り込みの無い部材では、柱部材の八角形断面形の 45° 板要素表面にはりが溶接されているため、この辺に面外方向の曲げ力が作用するので、八角形の最外縁辺 (フランジ) でも応力の乱れを生じやすいためと考えられるが、本実験の少ないひずみ測定点による観測結果からは現段階では正確なことは不明である。

圧縮荷重 (Fig. 6(a),(b)) では $P/P_y=1.0$ では $\epsilon/\epsilon_y = 1.0$ となっているのに対し、引張荷重実験を行っ

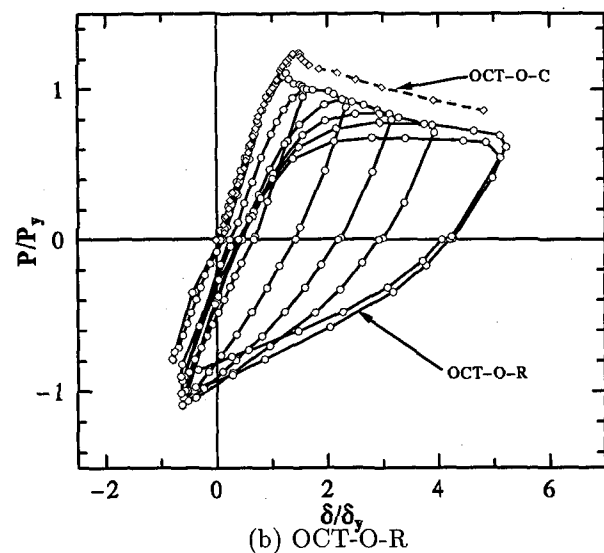
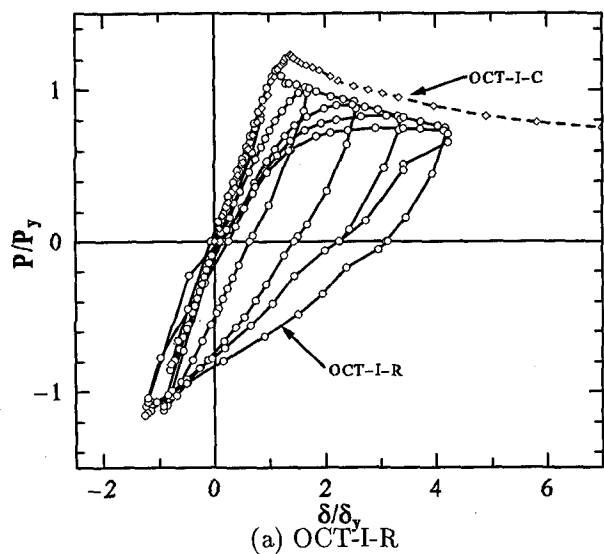


Fig. 7 $P/P_y - \delta/\delta_y$ Curve under Cyclic Test

た OCT-I-T, OCT-O-T では、予想降伏荷重をかなり上回った荷重でも降伏に達していないことがわかる。これは、先に述べたように引張側のプレートが先に降伏するためである。

(5) 繰返し載荷実験の比較

繰返し載荷を行った OCT-I-R, OCT-O-R の $P/P_y - \delta/\delta_y$ 曲線を Fig. 7 に示す。図中には、静的圧縮載荷実験 (OCT-I-C, OCT-O-C) の $P/P_y - \delta/\delta_y$ 曲線も示す。OCT-I-R, OCT-O-R とも荷重-変位曲線の包絡線が静的圧縮載荷の約 10% 下方で平行に位置し、繰返し載荷による耐力の低下は最大荷重後も静的載荷と同程度で、本八角形断面柱を有するラーメン隅角部は、良好な耐震性を有していることがわかる。

(6) 箱形断面柱を用いた隅角部モデルとの比較

Fig. 8 に本学で行った箱形断面柱を用いた隅角部モデルの静的実験結果¹⁰⁾と本静的実験結果を示す。

箱形断面実験供試体は本八角形断面柱隅角部モデル

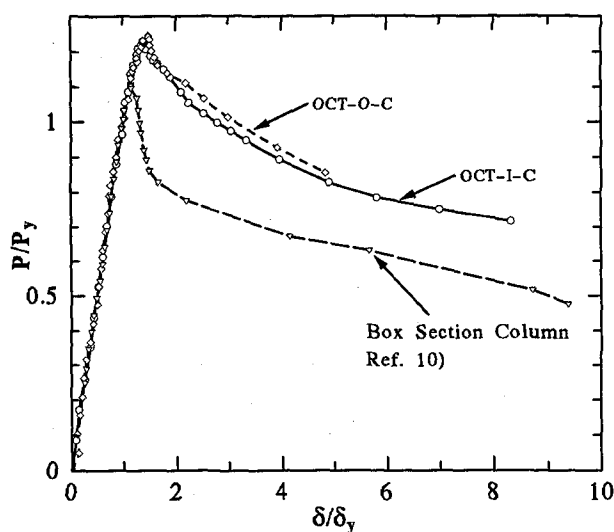


Fig. 8 Comparison between Frame Connections with Box Column and Octagon Column

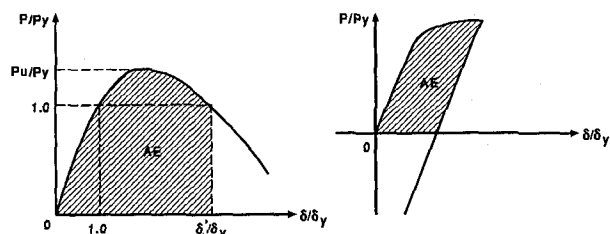


Fig. 9 Definition of The Absorbed Energy

と同程度の断面諸元 ($R_f=0.79, I_c=54106 \text{ cm}^4$) を有している。

同図より、箱形断面柱を用いた隅角部モデルよりも八角形断面柱を用いた隅角部モデルの方が、無次元化強度は約 14% 高くまた、最大荷重後の耐力の低下が若干緩やかであることがわかる。これは、八角形断面柱では構成板の幅厚比が $R=0.71$ と箱形断面柱の値 $R_f=0.79$ に比べて小さいためと思われる。

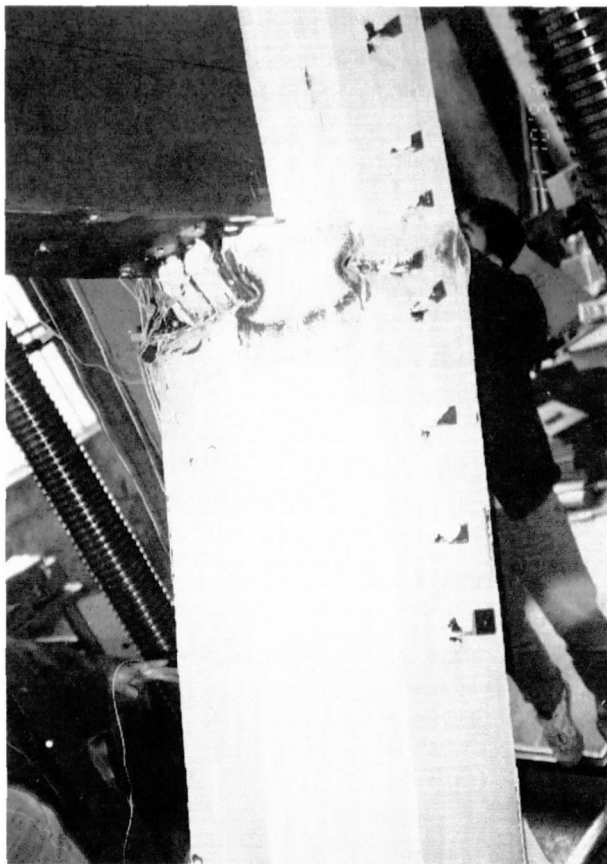
(7) 座屈変形モード

OCT-I-C, OCT-O-C および OCT-I-T は、隅角部柱部のはり部直下の圧縮フランジプレートに局部的な座屈が見られた。一方、OCT-O-T は、始め背面フランジに局部座屈を生じた後、せん断パネル部に複雑なせん断座屈変形を生じた。

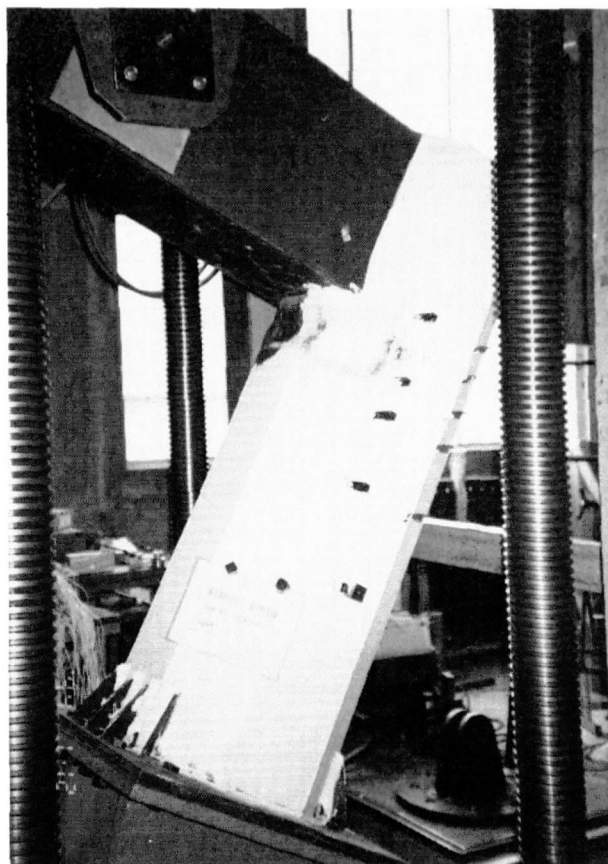
これら各供試体の破壊時の座屈変形モードを Photo 1 に示す。

(8) エネルギー吸収性能

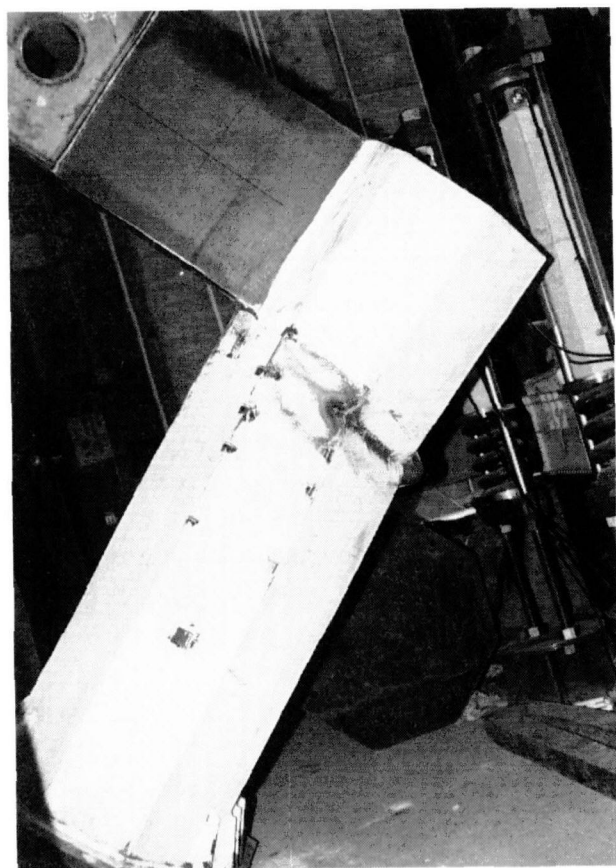
エネルギー吸収性能は、Fig. 9 に示すように、最大荷重からさらに変位が増加し、 $P/P_y=1.0$ まで低下したときの変位を最大許容変位 δ' とし、変位 δ が δ' に達す



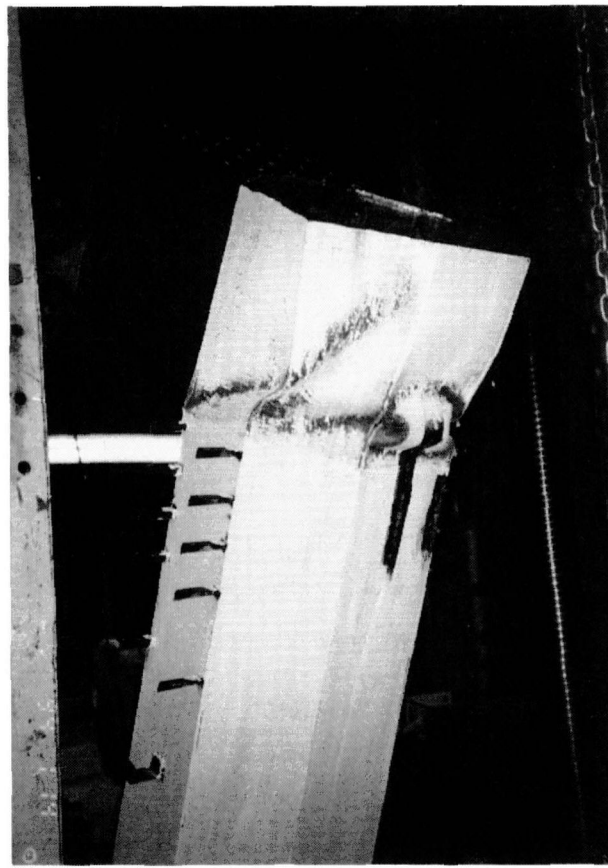
(a) Compression (OCT-I-C) With Inside Web



(b) Compression (OCT-O-C) Without Inside Web



(c) Tension (OCT-I-T) With Inside Web



(d) Tension (OCT-O-T) Without Inside Web

Photo 1 Buckling Mode

Table 6 Absorbed Energy

Specimen	Loading	Inside Web	(AE)
OCT-I-C	Compression	○	2.42
OCT-O-C	Compression	—	2.85
OCT-I-T	Tension	○	6.08
OCT-O-T	Tension	—	8.96
AE=Absorbed Energy			

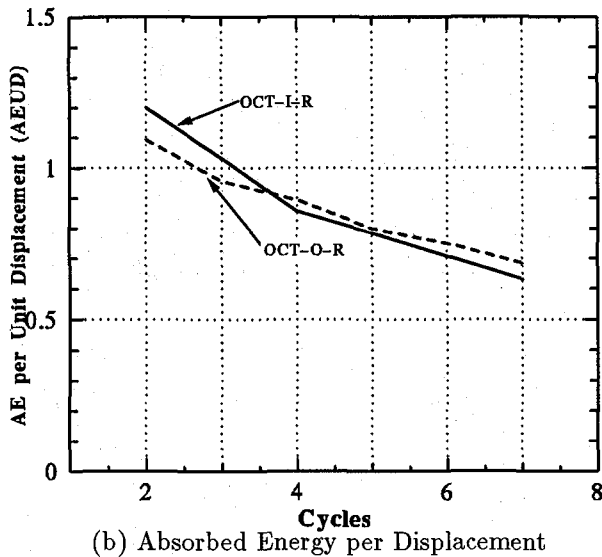
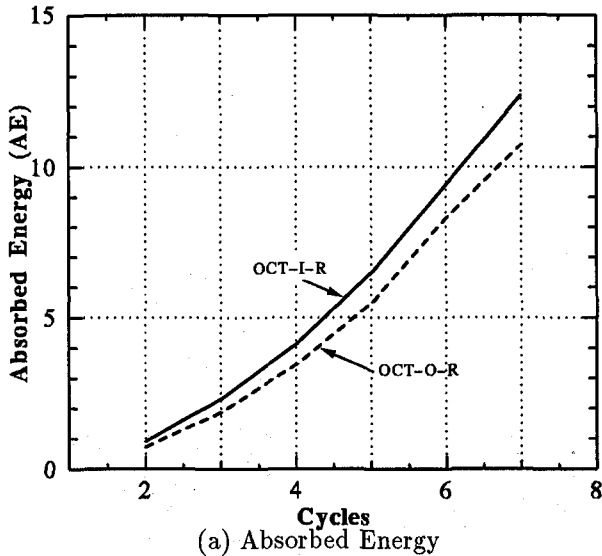


Fig. 10 Absorbed Energy per Displacement

るまでの面積とした。

ここでは無次元化した $P/P_y - \delta/\delta_y$ の関係を用いるため、基本エネルギー ($P_y \delta_y$) の倍率で表すこととした。

繰り返し载荷では、各サイクルのループ内面積を吸収エネルギーとし、これも基本エネルギーの倍率で表わした。ただし、本研究では圧縮側のみ変位を増加させたため圧縮側のみ求めるものとしている。

Table 6 に载荷試験体のエネルギー吸収性能を示し、Fig. 10(a) に無次元化した繰り返し载荷のエネルギーと繰り返し数の関係を、また (b) に繰り返し载荷の単

位変位当たりのエネルギー吸収率を示す。

Table 6 から、圧縮载荷および引張载荷ともはりの割り込みウェブがない方がややエネルギー吸収性能がよいことがわかる。また、Fig. 10(b) から、繰り返し载荷の単位変位当たりのエネルギー吸収率が高いこともわかる。

Fig. 10 から、OCT-I-R、OCT-O-R とも $6\delta_y$ での累積エネルギーが基本エネルギーの約 9 倍あり、また、単位変位当たりのエネルギー吸収率も繰り返し数が増加しても低下がゆるやかであることより、耐震性が高いと思われる。

割り込みウェブのある供試体では、はり接合部付近で柱板要素が局部座屈するが、割り込みウェブのない供試体では隅角部分の材料が広い範囲で塑性域に入るため地震エネルギー吸収の観点から言うと割り込みウェブのない方が望ましいと考えられる。ただし、地震終了後の補修を考えると別の配慮が必要となろう。

文献 5), 6) でもラーメン隅角部の強度を相対的に低くした方がエネルギー吸収性能は向上するという同様の事例が示されている。

5. 結論

本研究は美観を考慮して、八角形断面柱を用いた場合の鋼製ラーメン隅角部の静的、および繰り返し载荷実験についてまとめたものである。得られた結論を要約すると以下ようになる。

- (1) 静的载荷では、圧縮载荷 (OCT-I-C, OCT-O-C) の場合は、割り込みウェブの有無にかかわらず耐力はほとんど変わらなかった。また予想降伏荷重の約 1.25 倍の最大荷重が得られた。
- (2) 引張载荷の場合は、割り込みウェブのあるもの (OCT-I-T) よりもむしろない方 (OCT-O-T) が大きな耐力を示し、隅角部としての変位性状も安定していた。また予想降伏荷重の約 1.56 倍の最大荷重が得られた。
- (3) 圧縮载荷および引張载荷の最大荷重の比較を行うと、引張载荷の方が圧縮载荷より約 26% 高い荷重になった。
- (4) 箱形断面柱を用いた隅角部モデル¹⁰⁾との比較を行うと本八角形断面柱を用いた隅角部モデルの方が最大荷重では約 5% 高く、また最大荷重後の耐力の低下が若干緩やかであることがわかった。また、八角形断面の方が幅厚比が小さい分強度上有利と思われる。
- (5) 繰り返し载荷の場合は、はりの割り込みウェブの有無にかかわらず、荷重-変位曲線の包絡線が静的圧縮载荷の約 10% 下方で平行に位置し、繰り返し载荷による耐力の低下は最大荷重後も緩やかであり、本八角形断面柱を有するラーメン隅角部は

良好な耐震性を有していると言える。

- (6) 吸収エネルギーは、静的圧縮荷重および静的引張荷重とも割り込みウェブがない方がややエネルギー吸収性能がよい事がわかった。

謝辞

本研究は、土木学会鋼構造委員会新技術小委員会の援助を受けた。また実験供試体の製作は瀧上工業(株)にお願いした。ここに記して感謝する次第です。

参考文献

- 1) 小瀬古信博・青木徹彦・福本昤士: 八角形断面柱の局部座屈強度, 土木学会論文報告集, 第330号, pp.27~36, 1983年3月
- 2) 右田泰弘・青木徹彦・福本昤士: 多角形断面柱の局部座屈に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第422号, pp255~263, 1990年10月
- 3) 奥村敏恵・石沢成夫: 薄肉構造ラーメン隅角部の応力計算について, 土木学会論文集, 第153号, pp1~18, 1968年5月
- 4) 中井博・福岡悟・酒造敏廣・明橋克良: 鋼製ラーメン隅角部の Shear Lag と耐荷力とに関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.33A, pp193~206, 1987年3月
- 5) 黄元燮・西村宣男・高津秀俊: 鋼製ラーメン橋脚隅角部の強度と変形能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.40A, pp201~214, 1994年3月
- 6) 黄元燮・西村宣男・高津秀俊: 鋼製ラーメン隅角部パネルの強度および変形能の評価法, 構造工学論文集, Vol.40A, pp215~226, 1994年3月
- 7) 奥村敏恵・前田邦夫・石沢成夫: 最近におけるラーメン構造の隅角部-円柱と矩形ばりの組合せ-, 土木学会誌, Vol.49-11, pp76~82, 1964年11月
- 8) 宇佐美勉・戸谷和彦・鈴木森晶・是津文章: 繰り返し荷重を受ける鋼製門形ラーメンの強度と変形能に関するパイロット実験, 構造工学論文集, Vol.41A, pp289~300, 1995年3月
- 9) 浜島良吉・奥村敏恵: 円筒柱形ラーメン隅角部における応力集中について, 土木学会論文報告集, 第292号, pp29~40, 1979年12月
- 10) 長谷川桂・青木徹彦・安藤浩吉: 鋼製ラーメン橋脚隅角部の静的および繰り返し載荷実験, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集, 第1部, I-56, 1995年9月