

鋼管を頂点にもつ薄肉三角形断面鋼部材の局部座屈実験

EXPERIMENTAL STUDY ON LOCAL BUCKLING OF THIN WALLED STEEL TRIANGULAR SECTION MEMBERS WITH PIPES AT EACH APEX

青木徹彦*・佐藤徹也**・郭曉光***

Tetsuhiko AOKI, Tetsuya SATO and Gyoko KAKU

* 工博, 愛知工業大学教授, 工学部土木工学科 (〒480-0392 豊田市八草町八千種 1247)

** 愛知工業大学大学院修士課程 建設システム工学専攻 (〒480-0392 豊田市八草町八千種 1247)

*** 愛知工業大学大学院修士課程 建設システム工学専攻 (〒480-0392 豊田市八草町八千種 1247)

New type steel member of thin walled triangular section with pipes at each apex has begun to use for structural members at place counted for aesthetic. In this paper, compression test under uniformly loaded and two types eccentrically loaded test using these members with the width to thickness parameter 0.7 are described. Although the local buckling is observed at the half of the member maximum strength, those local buckling are seemed not to affect significantly on the member strength. The small steel pipes at each apex of the triangular section appeared to contribute increasing the member ultimate strength.

Key Word: local buckling, triangular section, compression test, eccentrically loaded, pipe, arch rib

キーワード: 局部座屈, 三角形断面, 圧縮試験, 偏心圧縮, パイプ, アーチリブ

1. はじめに

ヨーロッパ諸国に見られるように、社会が成熟すると構造物に美観を配慮するゆとりが生じる。鋼構造の場合、入手できる市販の鋼材料の多くは直線状または平板状であり、したがって部材のほとんどは箱形断面か円形断面、あるいは各種の圧延形鋼が直接用いられている。そのため一般にコンクリート部材に比べて視覚的デザインの自由度に欠けるといえる。最近では高速道路橋脚に八角形断面やコーナー部が円弧状のものが見られるようになったが、それでも設計者のデザインの自由度はかなり制限されている。

そこで本研究では、従来あまり見られない断面形状として、コーナーに鋼管を有する薄肉三角形断面鋼部材を取り上げ、その圧縮強度を実験的に確かめる。三角形断面構造の代表的なものとして S. Calatrava のデザインによる Bach de Roda 橋りのアーチリブがある。本研究で対象とする部材も、特に景観を重視する場所で使用されるアーチリブ、トラス弦材、ラーメン橋脚、照明、標識塔等の圧縮材の他、モノレール等の桁構造等に用いられることを意識している。

従来から普遍的に見られる箱型や、円形断面部材が視覚的に静的、安定感、平凡さがあるのに対し、三角形断面部材を構造部材または主部材に用いた場合、人々に若干の不安定感に伴う動的刺激、非凡さを感じせしめる効果があると思われる。たとえば前記 Calatrava による Bach de Roda 橋のアーチリブでは断面が逆三角形形状であり、ずんぐりとしたパイプや

箱形断面に比べ、すっきりとした新鮮さを感じさせられる。

また三角形断面部材は、力学的には一様圧縮または引張り部材に対してはパイプや箱形断面部材と比べた顕著な特徴はないが、はりのような曲げ部材に関していえば三角形断面が有利となる場合がある。たとえば鋼構造の場合、座屈曲線から明らかなように圧縮抵抗力は大雑把に言って引張り抵抗力の約半分であるから、上下対象断面では圧縮側に座屈を生じて曲げ耐力が決まり、逆三角形断面として圧縮断面を2倍にすれば合理的となる。複合構造でも同様で、圧縮側にコンクリート床板、引張り側に一本の鋼パイプを配置した Maupre 橋はその代表である。

新形式の構造部材を実構造物に用いようとするとき、その強度特性を様々な角度から検討し、明らかにしておく必要があるが、正三角形のコーナーにパイプを設けた鋼部材の圧縮強度に関する研究は、著者らの知る限り見ることができない。

本研究では基礎的研究の第一段階として、構成板の幅厚比パラメータを一定とした短柱の二様圧縮および偏心圧縮実験を行い、その局部座屈、および部材全体強度を実験的に明らかにすることを主な目的にしている。

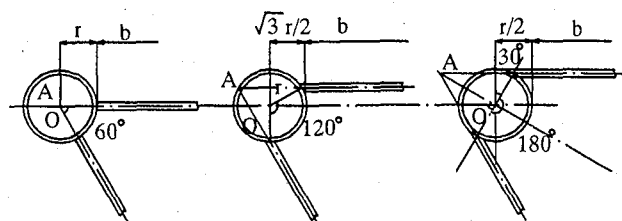
2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

(1) 試験体断面形

正三角形の頂点に鋼管を有する部材には、鋼板と鋼管の取

り付け位置によって Fig.1 に示す 3 案が考えられる。同図 (a) は鋼管の中心が三角形の頂点にあるもの、(b) は三角形の頂点が鋼管の外周上にある部材、(c) は鋼管の外周接線と三角形の辺を一致させるもので、景観上から見ると、図(a) は鋼管を強調したもので Bach de Roda- Felipe II 橋のアーチリブ

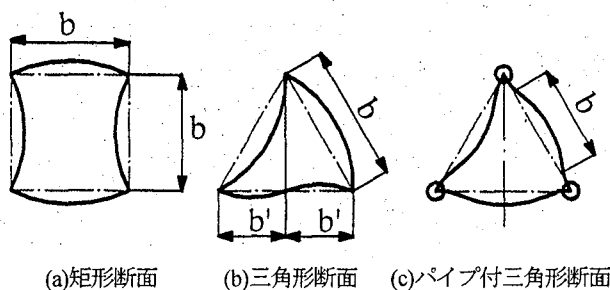


(a) 三角形の頂点と (b) 三角形の頂点が (c) パイプが三角
パイプ中心が一致 円周上 形の隅で内接

Fig.1 パイプつき三角形断面形の種類

はこのタイプである。図(c) は三角形の鋭角の頂部を柔らかくしたもので、(b) はその中間にあたる。図 (a), (b), (c) の各タイプの断面について、今回の試験体では (b) の形式を採用する。

一般に、一様圧縮を受けるリブ無し矩形断面の鋼板の局部座屈モードは Fig.2 (a) に示すように両端単純支持板のものと同じとなる。しかし断面が奇数辺からなる部材では、図(b) に示すように、3 枚のうちの 1 枚の構成板には 2 次モードが



(a) 矩形断面 (b) 三角形断面 (c) パイプ付三角形断面

Fig.2 局部座屈モードと有効幅

現れ、板幅が座屈幅とはならないものが生じる。さらにコーナーにパイプを有する場合には、パイプのねじれ抵抗により、Fig.2 (c) に示すように非載荷辺が両端固定の座屈モードに近くなると考えられ、座屈幅が小さくなる分、若干座屈強度の上昇が期待できる。

今回の実験供試体では、式 (1) に示す部材構成板の幅厚比パラメーター R を 0.7 とした。板の非載荷辺は現段階では単純支持と仮定し、 $k=4$ とする。また鋼板は板厚 4.5 mm を用いる。このとき $R=0.7$ に対応する板幅は 177 mm となる。

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

三角形の頂点に設けるパイプは外径 48.6 mm、肉厚 3.2 mm の市販の構造用鋼管 STK400 で、公称降伏強度は 235 N/mm² である。 D/t の値は 15.2、パイプ外径と板幅との比は 3.6 である。今回の試験体のパイプ外径寸法比はもっぱら美観上から感覚的に決められたもので、力学的な意味は特にない。鋼板とパイプは脚長 6mm の隅肉溶接を行う。

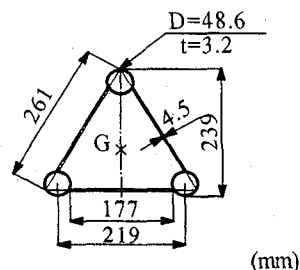


Fig.3 実験供試体断面寸法

試験体長さは構成板の局部座屈強度に注目しているため、試験体の板幅 b の 5 倍 (885 mm) とした。実験供試体断面寸法を Fig.3 に示す。

(2) 偏心量

軸力と曲げの影響を見るため、一様圧縮実験 (部材名 TRICL-G) に加え、断面の主軸方向に頂点側 (Apex side) と底辺側 (Bottom side) とでそれぞれ偏心量 e_1, e_2 を与え、両端単純支持の条件で圧縮載荷する。これらの部材名をそれぞれ TRICL-A, TRICL-B とする。偏心量 e_1 および e_2 は Fig. 4 (b), (c) に示すように、一方の最外縁応力が 0 すなわち、載荷による断面内応力分布が三角形分布となるように定め、式(2)より、 $e_1=150.8\text{mm}$ ($e_1/r=2.01$), $e_2=87.6\text{mm}$ ($e_2/r=1.17$) とした。

$$\sigma = \sigma_N + \sigma_M = \sigma_N \left(1 + \frac{e \cdot y}{r^2}\right) = 0 \quad (2)$$

$$e_1 = \frac{r^2}{y_1}, \quad e_2 = \frac{r^2}{y_2} \quad (3)$$

ここに y_1, y_2 は重心から頂点パイプおよび底辺パイプ最外縁までの距離、 r は断面 2 次半径。

試験体の公称断面寸法諸元、偏心量、Table 1 にまとめる。

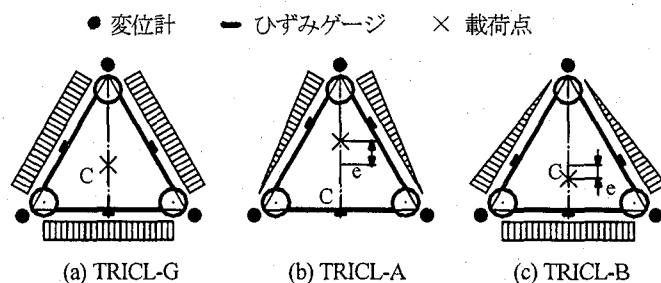
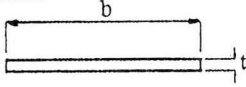
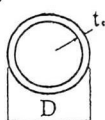
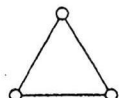
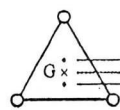


Fig.4 一様圧縮と偏心載荷部材の偏心位置と応力分布

Table 1 断面寸法諸元 (公称)

Table 1 断面寸法諸元 (公称)

	$b = 177.0 \text{ mm}$ $t = 4.5 \text{ mm}$ $b/t = 39.33$ $R = 0.7$
	$D = 48.6 \text{ mm}$ $t = 3.2 \text{ mm}$ $D/t = 15.19$ $r_p = 1.61 \text{ cm}$ $L/r = 55.0$
	$A = 37.59 \text{ cm}^2$ $I = 2122 \text{ cm}^4$ $r = 7.51 \text{ cm}$ $L = 5b = 88.5 \text{ cm}$ $(L/r)e = 5.9$
	TRICL-G $e = 0$ TRICL-B $e1 = 64.6 \text{ mm}$ TRICL-C $e2 = 37.6 \text{ mm}$

r = radius of gyration, L = length, A = Cross Sectional area, I = moment of inertia

2.2 実験方法

(1) 載荷方法

中心軸一様圧縮載荷では両端平押し状態で一様圧縮し、偏心圧縮では偏心方向に回転できるよう1軸回転ピン支持の状態で圧縮載荷する。ピン支持装置は市販のローラーベアリングを有するもので極めて滑らかに回転できる。試験体のセットの様子を Photo 1 に示す。

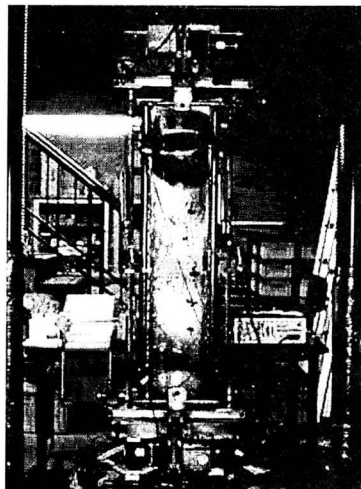


Photo 1 試験の様子

(2) ひずみおよび変位の計測

試験体のパイプおよび鋼板部にひずみゲージを張り付け、ひずみの計測を行う。ひずみゲージは一様応力分布となる鋼板では板の中央に、応力勾配のある板では応力の大きい側から板幅の 1/4 の位置に縦に一列に等間隔で 7 枚貼り付けた (Fig.4 参照)。変位計はパイプの位置に 3 か所設置し、変位の

計測値から部材平均ひずみを求める。

3. 実験結果とその考察

3.1 素材引張り試験とパイプの圧縮試験

鋼板部から 3 体の引張り試験片を切り出し、引張り試験を行い平均値を求めた。その結果、降伏応力 $\sigma_y = 283.3 \text{ N/mm}^2$ 、引張り強度 $\sigma_u = 428.2 \text{ N/mm}^2$ 、 $E = 0.2056 \text{ GN/mm}^2$ 、硬化係数 $E_{st} = 0.0373 \text{ GN/mm}^2$ 、硬化開始ひずみ $\epsilon_{st} = 0.98\%$ 、最大応力点でのひずみ $\epsilon_u = 16.6\%$ 、ポアソン比 $\nu = 0.32$ を得た。降伏応力は公称値 $\sigma_F = 235 \text{ kN/mm}^2$ より 20.4% 高い値であった。

パイプ単体 (断面積 4.564 cm^2) の両端に鋼板を溶接し、両端平押し状態で圧縮試験を行った。実験から最大荷重 $P_{u,p} = 189 \text{ kN}$ を得た。この値は公称降伏応力 $\sigma_F = 235 \text{ kN/mm}^2$ を用いた降伏荷重 107.3 kN の約 1.8 倍にもなる。

このようなパイプの素材の強度増は、板厚が 3.2mm と薄く、加工硬化しているためとパイプの製造時における曲げ加工における硬化によるものと思われる。より実構造物に近い部材寸法では、外径 $D = 114.3$ 、肉厚 $t = 4.5 \text{ mm}$ の電縫鋼管の降伏応力の実測値が公称値の 1.4 倍という実験結果²⁾もあり、この種の鋼管の母材強度からの降伏強度の上昇は一般的な傾向といえる⁵⁾。

圧縮試験の最大荷重時にはパイプの上下端部に膨らみを生じた。これは試験体端部での溶接残留応力や半径方向への変形を拘束したためと考えられ、このような座屈変形がない場合、最大強度は若干増すものと思われる。

3.2 残留応力の測定結果

部材の中央高さで、平板部の表面に縦方向にひずみゲージを張り付け、鋸切断により応力解放を行って残留応力を測定した。結果を Fig. 5 に示す。平板部中央で降伏応力 σ_y の約 0.45 の比較的大きな圧縮残留応力が観察された。測定された残留応力は自己釣り合いを保っており、不釣り合い量は約 $0.20 \sigma_y$ だけ圧縮応力が大きく、これに釣り合う合応力 (引張り力) はパイプが受け持っていると考えられる。

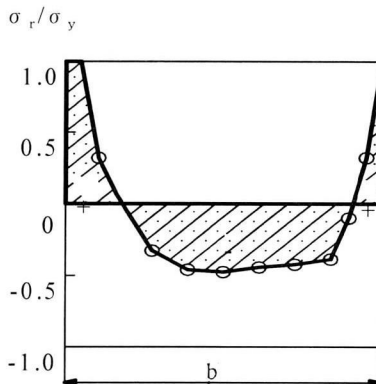


Fig.5 残留応力の測定結果

3.3 最大強度

(a) 一様圧縮試験 (TRICL-G)

一様圧縮試験による三角形断面部材の最大強度 P_u は 1275kN となった。板材のみの実測降伏応力 283.3N/mm²、および実測板厚 ($t=4.39\text{mm}$)、板幅 ($b=177\text{mm}$) を用いて鋼板 3 枚の受け持つ降伏荷重を求めると 660kN となる。部材強度からこれを引き、パイプ 1 本の最大荷重を算定すると 205kN となる。この算定値の中には溶着金属部の荷重分担が含まれているが、ここではこれを無視し、パイプの耐力に含める。

前述のパイプ単体の圧縮試験結果は 189kN であったから、部材一様圧縮試験から求めたパイプ圧縮強度の算定値は単体の実験値より 8.5% 高い。この差は、溶接組み立てされたパイプでは、残留応力のところで述べたように、パイプに引張り残留応力が導入され、見かけの降伏応力が増加しているため、および部材ではパイプが鋼板により補剛され局部座屈しにくくなっているためと考えられる。

以下ではパイプの最大荷重を部材圧縮試験より算出して求めた 205kN とする。このときパイプの降伏応力は 450 N/mm² となる。この値は公称降伏強度の約 1.9 倍にも達する。

鋼板 SS400 の公称降伏応力 ($\sigma_F=235\text{N/mm}^2$) を用いた部材公称降伏荷重は $P_F=884\text{kN}$ となる。これによる無次元化降伏強度は $P_u/P_F=1.44$ となった。以下では設計の便を考え、実験値の強度の無次元化には公称値による部材降伏荷重 $P_F=884\text{kN}$ を用いる。

部材の降伏荷重を定める別の基準として部材断面積と鋼板の実測降伏応力の積をとることが考えられる。このときの部材降伏荷重は $P_y=1065\text{kN}$ となる。一様圧縮試験の最大荷重をこの P_y で無次元化した強度 P_u/P_y は 1.20 となった。実験による最大荷重を Table 2 に示す。なお局部座屈強度欄の (Flange) は後で示されるように、一様圧縮応力分布を受ける板、(Web) は偏心圧縮柱で側辺となり、三角形応力分布となる板をいう。

本試験体では、全断面積に占めるパイプ断面積の割合は 37% であるのに対して、パイプの強度が大きいため、パイプが部材全体の最大強度を受け持つ割合は 48% と大きく増加している。このような強度増を設計で積極的に利用すれば構造物の軽量化に役立たせることができる。

(b) 偏心圧縮実験 (TRCL-A, TRCL-B)

偏心圧縮実験による最大強度は TRCL-A で 637 kN、TRCL-B で 924kN となった。これらの値を一様圧縮試験の公称値 $P_{FG}=884\text{kN}$ により無次元化すれば、それぞれ 0.721 および 1.045 である。

偏心圧縮を受ける部材の降伏強度 $P_{y,ec}$ は式(2)と同様の関係から、偏心量 e の大きさによって式(4)のように低減する。

$$\frac{P_{y,ec}}{P_F} = 1 / (1 + \frac{e \cdot y}{r^2}) \quad (4)$$

ここに P_F は一様圧縮時の公称降伏強度 ($=P_{FG}=884\text{kN}$)、 y は中立軸から最外縁までの距離。

同式による降伏荷重は TRICL-A に対して $P_{y,ec}/P_F=0.367$ 、TRICL-B に対して $P_{y,ec}/P_F=0.633$ である。これを Fig. 6 に破線で示す。最大荷重はこれらの設計降伏荷重に対して TRICL-A で 1.96 倍、TRICL-B に対しては 1.65 倍もの大きな値を示した。

3.4 荷重—変位関係

3 本のパイプに取り付けた変位計による変位と荷重の関係を Fig. 6 に示す。荷重は公称降伏強度 $P_F=884\text{kN}$ で無次元化した。また変位は取付長 400mm で除した後、公称降伏ひずみ ($\epsilon_y=1143\mu$) で無次元化し、平均ひずみとして表している。

一様圧縮試験 (TRICL-G) では 3 本の変位計の値の平均を示し、頂点側偏心圧縮試験体 (TRICL-A) では偏心に近い頂点の軸方向変位を、底辺側偏心圧縮試験体 (TRICL-B) では底辺側 2 本のパイプの軸方向変位の平均をとっている。これらは

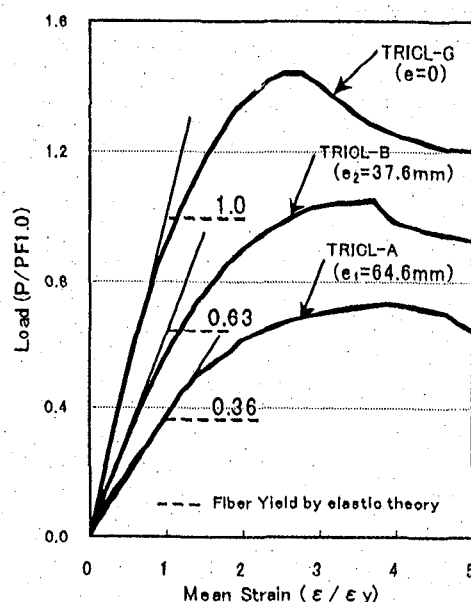


Fig. 6 荷重—変位関係

Table 2 実験による最大荷重と局部座屈荷重

試験体名	偏心量 e/r	設計降伏荷重 P_F (kN)	最大荷重 P_u (kN)	P_F/P_u	P_u/P_F	P_u/P_{FG}	局部座屈強度 P_l/P_u
TRCL-G	0	884 (P_{FG})	1276	0.69	1.44	1.44	0.53 (Flange)
TRICL-A	2.01	324	637	0.51	1.97	0.72	0.62 (web)
TRICL-B	1.17	560	924	0.61	1.65	1.05	0.43 (Flange) 0.64 (Web)

いずれも部材断面のひずみが最大となる最外縁位置での平均ひずみを表している。

図中、原点から引いた直線は曲げと軸力を受ける弾性部材の部材断面の平均応力と最外縁ひずみの変化を表しており、実験値の初期勾配とほぼ一致している。

一様圧縮試験では最大荷重到達後に急速に荷重が低下しているのに対し、偏心圧縮柱では低下がゆるやかである。後述のように平板部では最大荷重の約半分の値で局部座屈が発生したが、Fig. 6 からわかるように、変位計による測定結果ではこれが読みとれない。すなわち局部座屈しても部材としての荷重—変位挙動にその影響は直接現れておらず、後座屈強度が十分にあることを示している。

3.5 荷重—ひずみ関係

(1) 一様圧縮試験 (TRICL-G)

一様圧縮試験 (TRICL-G) の3枚の平板上のひずみ測定結果を Fig. 7 (a), (b) に示す。縦軸は荷重を公称降伏荷重 $P_F=884$ kN で無次元化しており、またひずみの値は公称降伏ひずみで無次元化している。これらの図から分かるように、ひずみ曲線5～6個のうちの1.2個のひずみ曲線が局部座屈の発生によるひずみの増加を明確に示している。

同図中には比較のため、Fig. 6 に示した変位計による部材平均ひずみを破線で示している。この平均ひずみは、局部座屈発生までは局所的なひずみゲージによる値とよく一致している。

荷重—ひずみ曲線から見た局部座屈の発生荷重は $0.56P_F \sim 0.97P_F$ と3枚の板においてやや大きな差が見られたが、これらの平均値は最大荷重 P_u の0.53倍で発生しており、局部座屈発生後の強度増加は著しい。また局部座屈発生荷重はFig. 5 に示した圧縮残留応力の残存応力値 ($1 - \sigma_r / \sigma_y = 0.55$) とほぼ一致しており、局部座屈強度に及ぼす圧縮残留応力の影響が大きいことが分かる。

Fig. 7 (c) はパイプに貼られたひずみゲージの値を示す。実験中の目視によれば、板は局部座屈しても3本のパイプの局部座屈は最大荷重あたりまで生ずることはなく、最大荷重後に板の局部変形が10～20mmに程度の大きな量に達した後、パイプに局部変形が現れて、荷重が急速に低下した。パイプのひずみは最大荷重の50%付近から僅かに減少し、70%程度でさらに平均値から減少、すなわち膨らみ始めたことを示している。

(2) 頂点側偏心圧縮荷試験 (TRICL-A)

頂点側偏心圧縮荷試験体 (TRICL-A) の2つの側辺 (Web-1, Web-2) 上の軸方向に50mmピッチで張り付けたひずみゲージの値を Fig. 8 (a), (b) に示す。同図 (c) は圧縮頂点側のパイプのひずみゲージによるもので、中心から100mmピッチで張り付けてある。同図 (a), (b) に示した破線は前と同様Fig. 6 の変位計から求めたゲージ位置での平均ひずみである。

これらの図からわかるように、2枚のウェブおよびパイプのいずれも $0.45P_F$ (最大荷重 P_u の62%) で同時に局部座屈を生じている。最終的にウェブの座屈変形は2枚とも部材上部から約150mmの位置で凸側の変形であった。すなわち、通常の箱形断面のようにコーナー部で回転を生じるような座屈変形はなく、板としては非載荷辺が固定の条件で座屈している。偏心方向と逆側にある底辺部の板およびパイプではひずみはほとんどなかった。

(3) 底辺側偏心圧縮試験 (TRICL-B)

底辺側偏心荷試験体 (TRICL-B) の平板部の荷重—ひずみ関係を Fig. 9 (a), (b), (c) に示す。ひずみゲージは板の縦方向中心線上に中央から50mmピッチで配置されている。図中の破線はFig. 6 に示した、底辺側の2本のパイプに取付けた変位計から求めたゲージ位置での平均ひずみの値である。Fig. 9 (a) は偏心を与えた底辺側 (フランジ) の平板上のひずみで、同図より、1本のひずみ曲線が最大荷重 P_u の43%で大きく増加し始め、その点で局部座屈が生じたことがわかる。

Fig. 9 (b), (c) は側辺 (ウェブ側) の縦方向線上に配置したひずみゲージによる値で、破線は変位計による平均ひずみから求めたひずみゲージ位置での値である。前と同様、この位置での平均ひずみを示す。Fig. 9 (b), (c) の2枚の側辺板 (ウェブ) はそれぞれ最大荷重の62% および66% で局部座屈を生じており、底辺側より約20%高く、底辺板の座屈とは独立に座屈している。また側辺プレート (Web-1) では座屈とともにひずみは平均値より減少し、全体的に凸側に変形しているのに対し、他方の側辺プレート (Web-2) では座屈とともにひずみは平均値より増加し、全体的に凹側に変形している。

一般にコーナー部にパイプ部材を持たない箱形断面ではフランジ部の座屈と同時にウェブ部も座屈変形が誘発され、コーナー部が直角を保つように変形するが、本部材ではそのような挙動は観察されなかった。

パイプの座屈変形は、はじめにフランジが局部座屈を生じ、変形が大きくなって最大荷重付近に至るまで見られなかった。

3.6 局部座屈発生の様子

最終的な局部座屈の様子を Photo 2 に示す。以下に一様圧縮および偏心圧縮部材3体の局部座屈の様子をまとめる。

一様圧縮試験体 (TRICL-G) では平板部がほぼ同一断面で凸状の座屈変形を示した。すなわちパイプのねじれは見られず、板の非載荷辺は回転拘束の条件に近いと言える。

頂点側偏心荷試験体 (TRICL-A) では、2枚の Web 平板およびパイプがほぼ同時に $0.62P_u$ で局部座屈した。しかしこの場合もパイプにねじれ変形は見られず、2枚のウェブ板は同じ高さで、どちらも凸側の変形を示した。

底辺側偏心圧縮部材 (TRICL-B) では、はじめにフランジ板が $0.43P_u$ で局部座屈した後、さらに荷重が上昇し、 $0.62P_u$ および $0.66P_u$ に至ってウェブ板が座屈した。フランジとウェブの連成は見られなかった。座屈変形は一方は凸、他方は凹

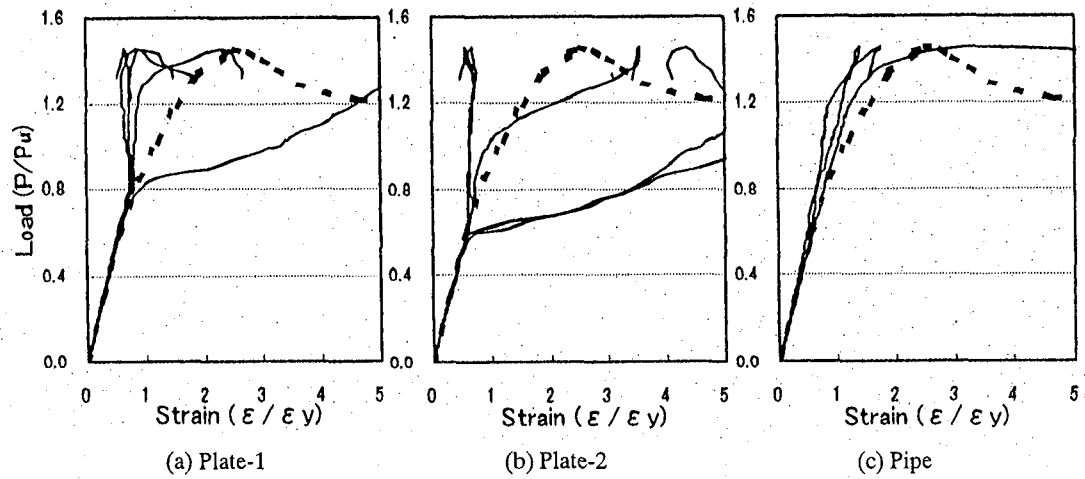


Fig. 7 荷重—ひずみ関係 (一様圧縮試験体 TRICL-G)

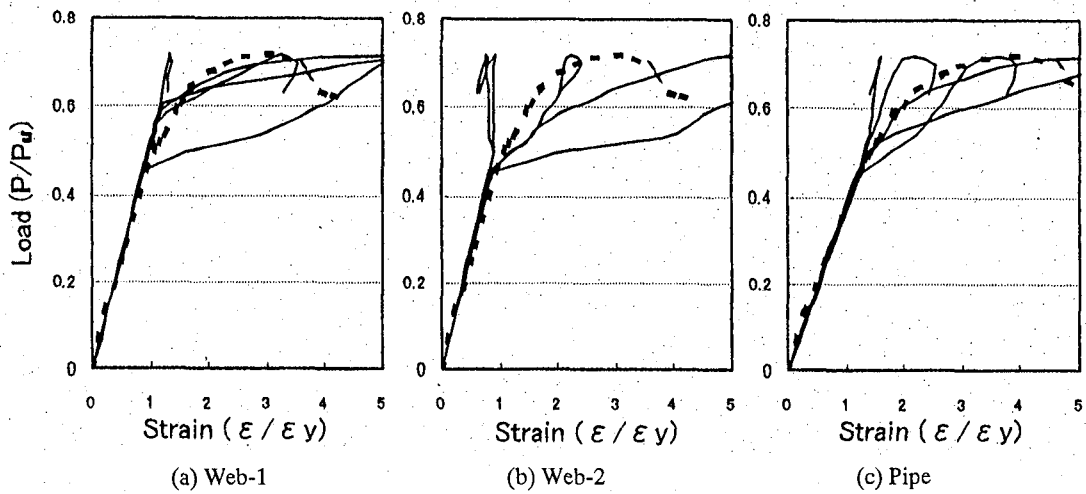


Fig. 8 荷重—ひずみ関係 (頂点側偏心圧縮試験体 TRICL-A)

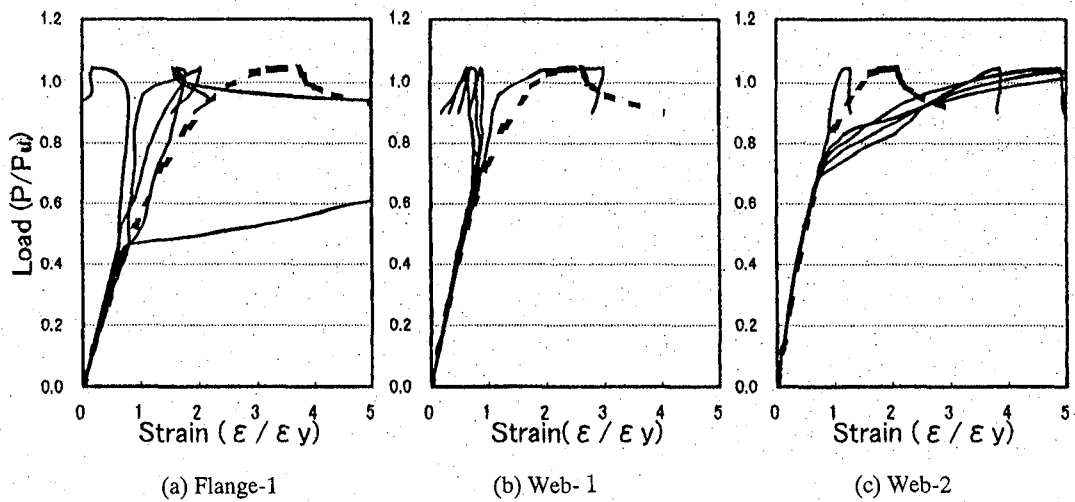
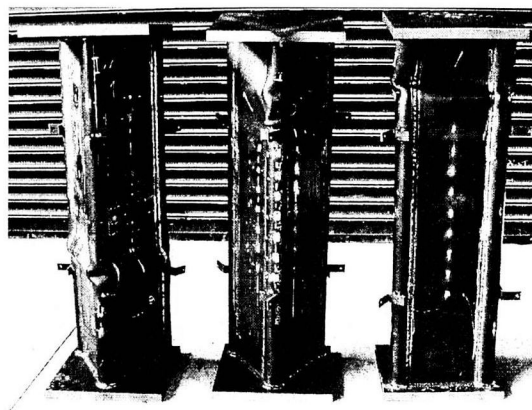


Fig. 9 荷重—ひずみ関係 (底辺側偏心圧縮試験体 TRICL-B)

であった。

$$Kc=8.4/(2.1-\phi)=7.64$$

(6)



(a) TRICL-G (b) TRICL-A (c) TRICL-B

Photo 2 局部座屈の様子

3.7 偏心圧縮部材強度の概算値の簡易推定法

一様圧縮部材強度実験結果を利用して、偏心圧縮部材の強度の概算値を簡単に推定する方法を考える。ここでは一様および三角形分布を受ける板、およびパイプ部材がそれぞれ終局強度に至っているとの観点から、それらの和で部材強度を推定する方法を述べる。

(1) 一様圧縮板の終局強度

最大強度の項で述べたように、一様圧縮部材の板一枚分の最大強度を $P_{u,e}=220\text{kN}$ 、パイプ一本の最大強度は $P_{u,p}=205\text{kN}$ とする。

もし板の座屈耐力を式 (5) ³⁾ で与えると、 $R=0.7$ であるから、板 1 枚が受け持つ荷重は $P_{u,e}=0.806 P_y=177\text{kN}$ となるが、

$$\frac{P_u}{P_y} = \left(\frac{0.453}{R} \right)^{0.495} \quad (5)$$

この値は非載荷辺が単純支持の場合であり、今回の試験体では固定支持に近いために、板の終局強度は降伏強度まで達しているものとする。

(2) 三角形分布荷重を受ける板の終局強度

今回の偏心圧縮実験では一方の最外縁ひずみが 0 となるよう偏心量を与えたため、ウェブ板材の応力分布は Fig. 4 (b), (c) に示すようにはほぼ三角形応力分布となる。実験では断面の最外縁であるパイプ表面位置で応力が 0 または最大となっているが、差は小さくまた簡単のため、ここでは板材の応力分布を三角形と考える。

三角形分布荷重を受ける板の座屈係数 k_c ³⁾ は次式で与えられる。

ここで、 ϕ は非載荷辺の応力を σ_1 および σ_2 とすると $\phi = (\sigma_1 - \sigma_2) / \sigma_1 = 1.0$

このとき、式 (1) の幅厚比パラメーターは $R=0.506$ となり、これを式(5)に代入すると、 $P_{u,e}=0.947 P_{y,e} (=208\text{kN})$ を得る。しかし今回の試験体では、前述のように鋼板は両端固定支持に近いと考えられるため、上記の値を無条件に使用することはできない。

そこで残留ひずみ分布を Fig. 10 に示すように矩形分布に単純化し、板の一端の作用ひずみを -1.0 、他端を例えば $2 \epsilon_y$ と置いて、作用ひずみより下の残留ひずみ分布の面積を求め応力に変換し、この作用ひずみに対応する板の耐力を求める。圧縮残留応力として実測値の $0.45 \sigma_y$ を仮定すると Fig.10 の斜線部の面積は $0.73 \epsilon_y$ となり、これに相当する板の降伏耐力は $0.73 P_y$ となる。一方の外力ひずみを、いまの場合 $2 \epsilon_y$ としたが、図からわかるように、この値はおおよそ ϵ_y 以上であれば、どのような値でも降伏耐力の結果に差はほとんどない。よって本試験体に対して、三角形応力分布を受けるウェブの終局耐力の概算値 $P_{u,w}$ を $0.73 P_y = 160\text{kN}$ とおくことにする。

(3) 頂点側偏心圧縮部材の強度

頂点側偏心圧縮の場合、パイプ ($P_{u,p}=205\text{kN}$) 一本とウェブ ($P_{u,w}=160\text{kN}$) 2 枚が外力を分担する。したがって部材最大荷重の推定値はこれらを加え合わせて 525kN と算定される。この値は実験値 704kN より 25% 小さい。

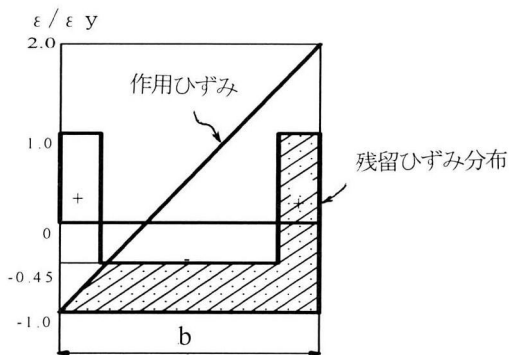


Fig.10 矩形残留ひずみ分布と三角形作用ひずみ

実験値が大きくなった原因は、現段階で明らかではないが、一様応力分布を受けて座屈後変形の大きいフランジ板がなく、最大強度を決定づけるパイプの局部座屈に影響を与える要因が少ない荷重状態であることが一因と考えられる。

(4) 底辺側偏心圧縮部材強度

底辺側偏心圧縮部材の場合、Fig. 4 (c) に示す応力分布となる。上述のように 2 枚のウェブプレートが $160\text{kN} \times 2 = 320\text{kN}$ 、2 本のパイプが $205\text{kN} \times 2 = 410\text{kN}$ 、1 枚のフランジが 220kN 受け持つとすると、終局強度の推定値は 950kN となる。この値は実験値 (924kN) より 約 3 % 大きい値である。この

場合はよい推定値となっている。

4. 結論

本研究は景観に配慮した部材として、正三角形断面の頂点付近にパイプを有する鋼圧縮部材を用い、一様圧縮実験および偏心圧縮実験を行ったものである。研究によって得られた結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 板材の降伏強度は公称値より約 20%高く、パイプ部材は約 90%高い値を示した。パイプ部材は薄肉の上、パイプへの曲げ塑性加工の工程で高強度になるものと思われる。実構造物でもこのような優れた強度特性を設計に反映させれば、より軽量な構造物が実現できる。
- (2) 残留応力の測定の結果、鋼板部中央には $0.45 \sigma_y$ の比較的大きな圧縮残留応力が存在した。一様応力分布を受ける板の局部座屈強度はほぼ残余応力 $0.55 \sigma_y$ に一致している。
- (3) 一様圧縮試験ではほぼ全断面降伏強度が得られた。最大強度は公称降伏強度の約 44%高い値となった。座屈変形の観察の結果、平板の非載荷辺は固定と見なされる。パイプの終局強度を一様圧縮試験から算出した。
- (4) 偏心圧縮試験体の最大強度は、三角形断面の底辺側偏心および頂点側偏心で、それぞれ弾性限荷重の 1.65 倍、および 1.96 倍の大きさが得られた。またこれらは一様圧縮公称降伏強度の 0.72 および 1.05 倍である。
- (5) 局部座屈は部材の最大強度を P_u とするとき、一様圧縮試験では $0.53P_u$ で発生した。また底辺側圧縮試験体ではフランジで $0.43P_u$ のとき、ウェブには $0.64P_u$ のとき生じた。フランジとウェブの局部座屈はそれぞれ独立に生じている。頂

点側圧縮試験体では底辺側圧縮と同様、ウェブに $0.62P_u$ のとき、局部座屈が発生した。局部座屈後の部材強度の上昇は著しく、また全体荷重—変形挙動に及ぼす影響はほとんどない。

- (6) 実験の観察より、部材の最大荷重はパイプの局部座屈によって支配され、パイプの局部座屈は、一様応力分布となるフランジの局部座屈後の大変形によって誘発される。
- (7) 板およびパイプの各要素が極限強度に至っているとの観点から、偏心圧縮柱の最大強度の簡易推定法を述べた。圧縮応力が分布するフランジを有しない頂点側偏心部材の強度が推定値より約 25%大きく、フランジが隣接するパイプの耐力はやや低下すると考えられる。底辺側偏心圧縮部材の場合、推定値は実験値とほぼ一致した結果が得られた。

なお本実験は愛知工業大学建設系構造実験室および耐震実験センターで行われたものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) K.Frampton, A.C. Webster, A. Tischhause, "CALATRAVA bridges," Birkhauser Verlag, Basel, 1996, pp14-31.
- 2) 青木徹彦・福本誘士：小口径電縫鋼管の統計的材料強度特性と残留応力分布の評価、土木学会論文集、No. 314, pp.39-51, 1981.10.
- 3) Fukumoto, Y. edited, "Structural stability Design - Steel and Composite Structures," Pergamon, 1997, pp151.
- 4) Galambos, T.V. edited, "Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures," 4th Edition, John Wiley & Sons, 1976, p103.
- 5) 福本誘士編：座屈設計のガイドライン、土木学会鋼構造委員会、昭和 60 年 4 月、p.88

(平成 12 年 9 月 14 日受付)