

長円形断面を有する薄肉部材の耐荷力 に関する実験的研究

Experimental Study on Ultimate Strength of Thin-Walled
Members with Oval Cross Section

北田俊行・中井 博・袴田文雄・山本竜太郎

By Toshiyuki KITADA, Hiroshi NAKAI, Fumio HAKAMADA
and Ryutarou YAMAMOTO

This paper deals with an experimental study on the ultimate strength of steel columns and beams with oval cross section consisting of semicircular parts ($R/t=32$, R :radius of curvature, t :plate thickness), flat parts ($b/t=32$, b :width of flat part) and longitudinal stiffeners at the intersections of semicircular and flat parts. The following main conclusions are obtained:
(1) The compressive strength is nearly equal to the yield strength, even in case of the column specimen without longitudinal stiffeners.
(2) The beam specimens with properly designed longitudinal stiffeners subjected to bending moment with respect to weak axis reach their fully plastic moment. (3) Even the beam specimen without longitudinal stiffeners subjected to bending moment with respect to strong axis can ensure their fully plastic moment.

1. まえがき

最近、美観上の要請から、鋼橋においても、コーナー部に曲率を設けた薄肉箱形断面部材が用いられる機会が多くなってきた¹⁾。このような要請のため、現在、阪神高速道路公団・大阪第一建設部で建設中の新浜寺大橋（ニールセンローゼ橋）²⁾のアーチリブの横繫材には、長円形断面の部材が用いられている。ドイツでも、Fehmarnsund橋（ニールセン橋梁）³⁾において、長円形断面を有する横繫材が用いられたことはよく知られている。新浜寺大橋の横繫材では、曲率部と平板部の境界線に沿ってのみ縦補剛材が設けられているが、Fehmarnsund橋の横繫材では、曲率部にも縦補剛材が設けられている。

ところで、アーチ系橋梁に風荷重などの横荷重が作用すると、横繫材は、曲げ部材として働き、橋梁の耐荷力を支配する重要な部材の一つとなる。しかし、長円形断面を有する部材の耐荷力の評価方法、および補剛材の設計法は、現在のところほとんど見あたらない。

そこで、本研究においては、長円形断面を有する短柱、および梁（弱軸および強軸曲げを受ける場合）の耐荷力評価法と縦補剛材の設計法について実験的に検討することを目的としている。

* 正員 工博 大阪市立大学助教授 工学部 土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

** 正員 工博 大阪市立大学教授 工学部 土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

*** 正員 工修 阪神高速道路公団・大阪第一建設部 (〒559 大阪市住之江区北加賀屋2-11-8)

**** 学生員 大阪市立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

2. 供試体の断面寸法、載荷方法、一般図および補剛材の設計法

2.1 供試体の断面寸法

新浜寺大橋の第一横繫材の断面を参考にして、図-1に示す長円形断面の供試体を製作した。参考までに、表-1には、実橋の横繫材と供試体との断面寸法を比較して示す。実験室のスペース、および載荷装置の能力の関係で、できるだけ小さな供試体になるようにしたが、使用鋼材の機械的性質が実橋の場合に近く、供試体の製作が無理なくできることなどを考慮して、使用鋼材の最小板厚を4.5mmとして供試体を設計・製作した。

2.2 載荷方法

長円形断面に、それぞれ純圧縮、弱軸曲げモーメント、および、強軸曲げモーメントが発生するような3種類の載荷状態のもとで実験を行った。曲げ載荷の場合には、アーチ橋が風荷重を受けて横繫材に発生する曲げモーメント分布が再現できるように、梁中央に集中荷重を作用させる載荷方法とした。

2.3 供試体の一般図

純圧縮実験、弱軸曲げ載荷実験、および強軸曲げ載荷実験のための供試体の一般図を、それぞれ図-2～4に示す。

2.4 縦補剛材の設計方法

図-1に示した長円形断面を有する部材の基準となる縦補剛材を、以下に示す方法により設計した。

まず、安全側の見地より、図-5に示すように、縦補剛材を一本の柱モデル（有効補剛材）に置換する。その際、有効補剛材の長さは環補剛材間隔あるいは、それとダイヤフラムとの間隔 a とし、有効幅 b 。

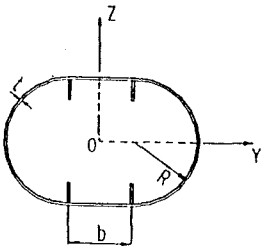
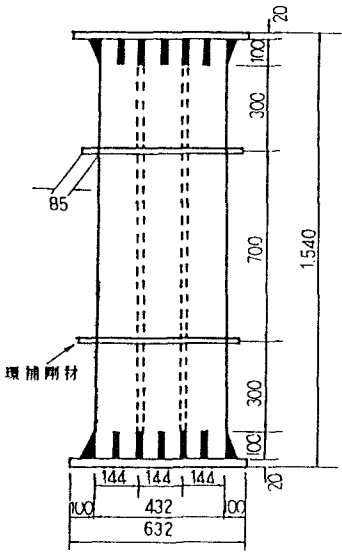


図-1 供試体の標準断面

表-1 実橋の第一横繫材と実験供試体との断面寸法の比較
(寸法単位: mm)

寸法	実橋	供試体
t	25	4.5
b	800	144
R	800	144



(寸法単位: mm)

図-2 純圧縮実験用の供試体

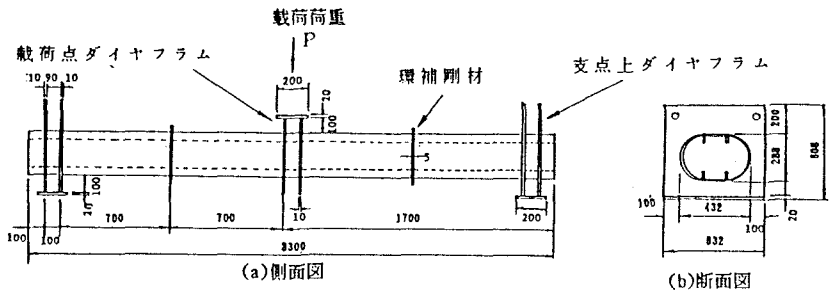


図-3 弱軸曲げ載荷実験用の供試体 (寸法単位: mm)

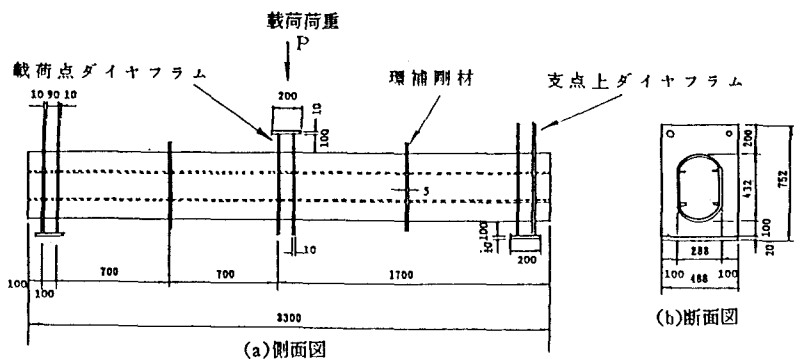
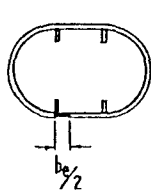
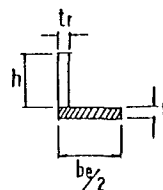


図-4 強軸曲げ载荷実験用の供試体 (寸法単位: mm)



(a) 長円形断面の縦補剛材



(b) 有効補剛材への置換

図-5 長円形断面の縦補剛材と有効補剛材への置換

は、次式によって求める⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} \frac{b_e}{b} &= 1.0 & (R \leq 0.3) \\ &= 0.702R^3 - 1.640R^2 + 0.654R + 0.926 & (0.3 \leq R \leq 1.3) \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここに、

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

有効補剛材の強度 σ_u は、道路橋示方書⁵⁾の柱の耐力力曲線を用いて求めることとした。

つぎに、縦補剛材の寸法は、次式によって決定した。

$$\bar{\sigma} \leq \sigma_u \dots (3)$$

ここに、 $\bar{\sigma}$ は降伏荷重の $\frac{1}{3}$ の大きさの荷重が作用したときに縦補剛材に発生する応力とし、その応力が軸方向に変化する場合には、大きいほうの応力が生じている側の環補剛材から $0.4a$ の位置に相当させて低減した応力(有効応力という)を用いるものとする。

なお、降伏荷重の $\frac{1}{3}$ の大きさの荷重が作用したときの $\bar{\sigma}$ を用いて基準となる縦補剛材の寸法を定めたのは、降伏荷重に対応する $\bar{\sigma}$ を用いると、純圧縮を受ける供試体において、有効補剛材の細長比パラメーター $\bar{\lambda}$ を 0.2 以下にする必要があり、縦補剛材の寸法が大きくなり過ぎるためである。

縦補剛材の設計に用いた降伏点 σ_y は、実橋部材の鋼種SM50Yの公称降伏点 3600 kgf/cm^2 (353 N/mm^2)とした。このようにして設計した縦補剛材を有する純圧縮実験用供試体をC-1R、弱軸曲げ载荷実験用供試体を

MY-1R、強軸曲げ載荷実験用供試体をMZ-1Rとする。

これら以外に、縦補剛材の剛度が終局強度や終局状態に至るまでの挙動に及ぼす影響を調べるため、3種類の載荷条件の各実験に対して、縦補剛材を有しない供試体C-10、MY-10、MZ-10、および、縦補剛材の剛度を基準となる縦補剛材の5倍にした供試体C-51R、MY-51R、MZ-51Rを作製した。供試体の内訳と縦補剛材の寸法を表-2に示す。ここに、Cは純圧縮実験、MYは弱軸曲げ載荷実験、MZは強軸曲げ載荷実験を意味する。供試体S1およびS2については後で説明する。

3. 板厚、機械的性質および初期不整の計測

3.1 供試体の実測板厚

供試体の数カ所において板厚を測定し、その平均値から板厚 t を求めたところ、 $t=4.49\text{mm}$ が得られた。

3.2 供試体材料の機械的性質

供試体に用いた鋼板の機械的性質を調べるため、引張試験を行った。母材の鋼板より1本、実験終了後の弱軸曲げ載荷実験用供試体、および、強軸曲げ載荷実験用供試体より各2本、合計5本の引張試験片を切り出した。

5本の内訳は、曲率を有する部分（以下、曲率部という）から切り出したもの3本、平板パネル（以下、平坦部という）から切り出したもの2本で

表-3 引張試験結果

ヤング係数 E ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	ポアソン比	せん断弾性係数 G ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)	降伏点 σ_y (kgf/cm^2)	伸び $\Delta l/l$ (%)
2.08	0.28	8.15	3830	28.2

$1 \text{ kgf/cm}^2 = 0.098 \text{ N/mm}^2$

ある。曲率部から切り出した試験片、また平坦部から切り出した試験片とも、ヤング係数、ポアソン比、および、降伏点に有意な差異は認められなかった。5本の引張試験結果の平均値を、表-3に示す。

3.3 初期不整

すべての供試体の初期形状、および、3体の残留応力測定用の供試体を用いた残留応力の実測を行った。それらについては、文献6)を参照にされたい。

4. 実験結果とその考察

4.1 純圧縮実験

(1) 終局強度と補剛材剛比との関係

図-6には、終局強度と補剛材剛比との関係を示す。この図の縦軸は、終局状態における軸方向圧縮力 N_u を降伏軸力 N_y で無次元化した量に取っている。横軸の無次元量 $I_r / I_{r, req}$ は、2.4で示した方法によって設計した縦補剛材の断面2次モーメントを

表-2 縦補剛材の寸法

供試体 番号	補剛材	
	板厚 (mm)	高さ (mm)
C-10	4.5	—
C-1R		25
C-51R		43
MY-10		—
MY-1R		19
MY-51R		32
MZ-10		—
MZ-1R		10
MZ-51R		17
S1		17(20°)
S2		10(20°)

*追加補剛材の高さ(mm)

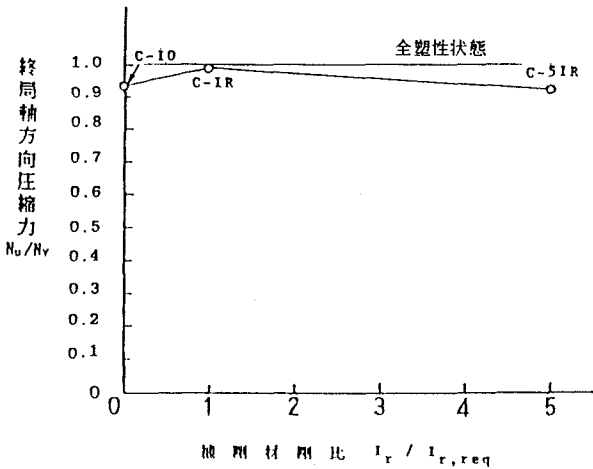


図-6 終局強度と補剛材剛比の関係（純圧縮実験）

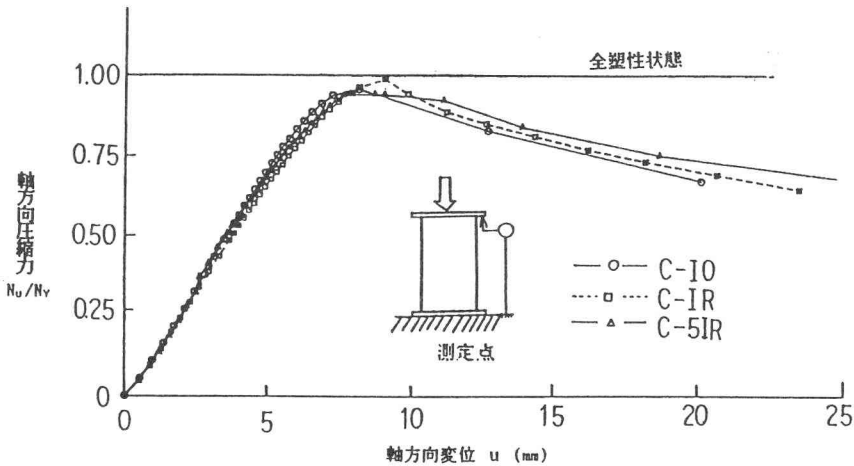


図-7 荷重-軸方向変位曲線

表している。

この図から、実験誤差などを考えると、3体の供試体の極限強度は、ほぼ等しく、すべて全塑性状態に達しているものと考えられる。

したがって、今回対象とした、曲率部の曲率半径と板厚との比 $R/t=32$ 、および平坦部の幅厚比 $b/t=32$ の長円形断面を短柱として用いる場合には、曲率部と平坦部の境界線に沿って縦補剛材を設ける必要はないものと思われる。

(2) 荷重-軸方向変位曲線

図-7には、荷重-軸方向変位曲線を示す。この図より、縦補剛材の剛比が大きくなるほど、終局状態を過ぎてからの変形能がわずかではあるが大きくなることがわかる。

(3) 残留変形

図-8には、破壊後の供試体C-1Rの残留変形の状況を例示する。供試体C-51Rの残留変形は、供試体C-1Rのそれと類似していた。3体の供試体とも座屈は、上端部の補剛材のすぐ下の所で発生した。

供試体C-10では、上端部に曲げが発生し、片側の平坦部の方に偏心した座屈が発生した。供試体C-1RとC-51Rとでは、長円形断面の周上に様な座屈波形が発生した。また、供試体C-10では、目視できる局部座屈が発生し、それと同時に供試体は終局状態に達した。しかし、供試体C-1R、および供試体C-51Rでは、終局状態に至っても目視できるような局部座屈変形は認められず、終局状態通過後の除荷途中で顕著な局部座屈変形が発生した。

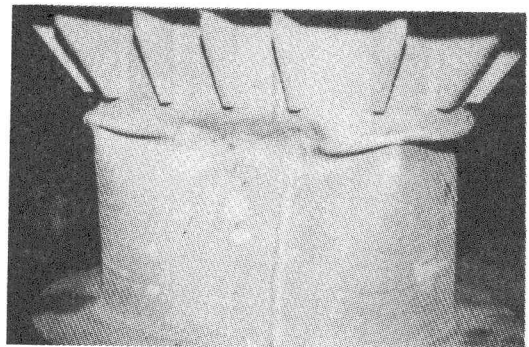


図-8 破壊状況 (供試体 C-1R)

4.2 弱軸曲げ載荷実験

(1) 弾性範囲内における応力分布

図-9には、供試体MY-51Rの中央断面付近のひずみ分布を示す。同図には、初等梁理論による応力分布も示されている。両者のひずみ分布は、ほぼ一致していることがわかる。

圧縮側の平坦部中央における上縁ひずみが、補剛材位置におけるひずみより小さくなっているのは、Shear lag 現象が現れたためと思われる。

長円形断面では、箱形断面の場合と比較すると、Shear lag 現象が緩和されるものと思われるが、今後、この点について十分な検討を加えて行くことが必要である。

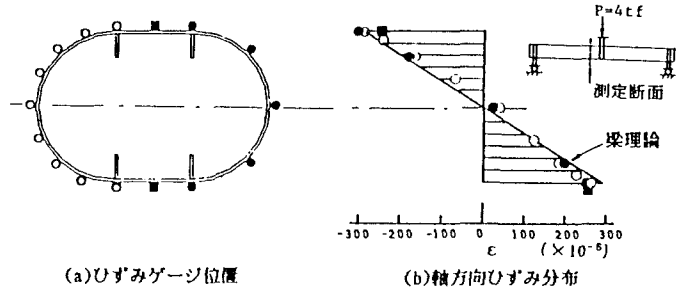


図-9 軸方向ひずみ ϵ の分布図 (供試体 MY-1R)

(2) 終局強度と補剛材剛比との関係

図-10には、終局強度と補剛材剛比との関係を示す。縦軸には、弱軸まわりの終局曲げモーメント M_u を全塑性モーメント M_p で無次元化した量に取っている。なお、補剛材寸法が異なるため、 M_p の大きさは各供試体で若干異なる。補剛材を設けなかった供試体 MY-10 の終局曲げモーメント M_u は降伏モーメント M_y に達しているものの、 M_p には至っていないことがわかる。

一方、2.4の設計法に従って縦補剛材を設けた供試体MY-1R、および、供試体MY-51Rは、ほぼ全塑性状態で終局状態に至っていることがわかる。

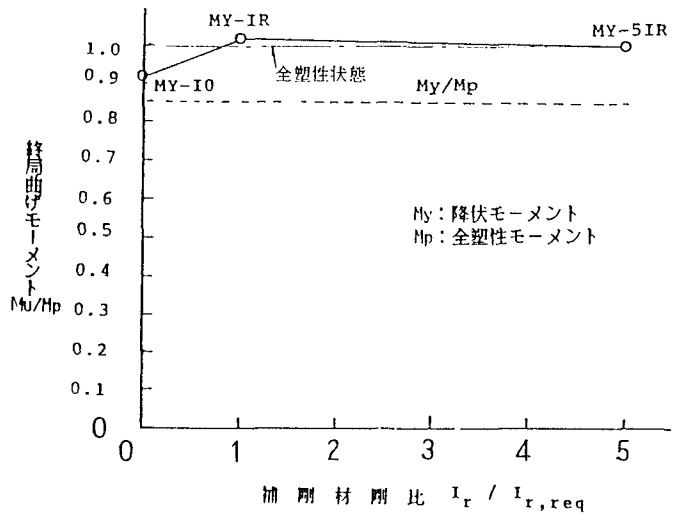


図-10 終局強度と補剛材剛比との関係 (弱軸曲げ載荷実験)

すなわち、曲率部が腹板となる弱軸曲げが長円形断面に作用した場合、断面の終局モーメントは、補剛材を設けなければ、ほぼ降伏モーメントとなり、適切な補剛材を設ければ、全塑性モーメントとなることがわかる。

(3) 作用曲げモーメント-たわみ曲線

図-11には、3体の供試体の作用曲げモーメント-たわみ曲線を比較して示す。この図から、すべての供試体の作用曲げモーメント-たわみ曲線は、作用曲げモーメントが降伏モーメントに達するまでは、ほぼ線形性を呈することがわかる。

また、縦補剛材のない供試体 MY-10では、降伏モーメントを少し越えた曲げモーメント $0.92 M_p$ が作用した時点で、局部座屈が発生し、終局状態に至ったことがわかる。

さらに、供試体 MY-1Rと供試体 MY-51Rは、いずれも全塑性状態に達しており、2.4で設計した縦補剛材が有効に働いたことがわかる。また、 M_p に達してからの変形能も、かなり期待できることがわかる。

(4) 残留変形

図-12~13は、破壊後の供試体MY-10およびMY-1Rの残留変形のスケッチを示したものである。供試体 MY-10では、上縁の平坦部がふくれ上がったのに対して、供試体MY-1Rでは、平坦部に凸と凹の2つの変形が生じた。

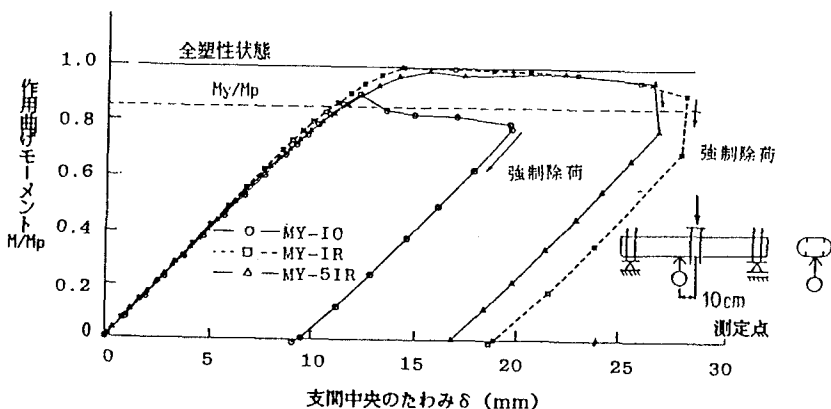


図-11 作用曲げモーメント-たわみ曲線 (弱軸曲げ載荷実験)

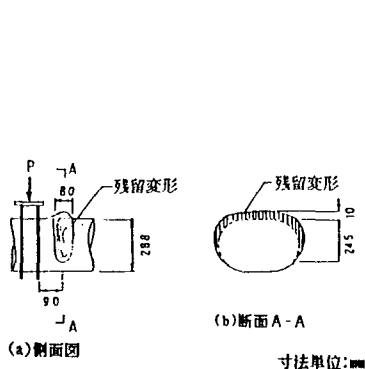


図-12 残留変形 (供試体 MY-I0)

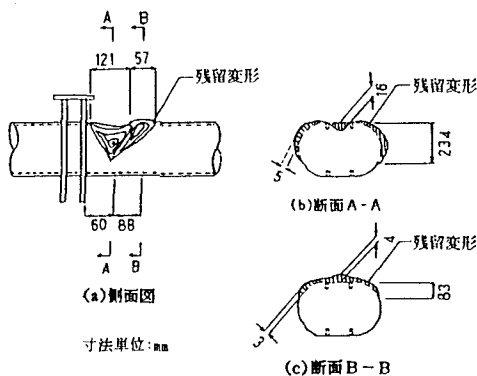


図-13 残留変形 (供試体 MY-IR)

また、供試体MY-51Rでは、補剛材を筋として平坦部が凹で曲率部が凸の変形となった。

4.3 強軸曲げ載荷実験 (その1)

(1) 終局強度と補剛材剛比との関係

図-14には、終局強度と補剛材剛比との関係を示す。

この図より、曲率部がフランジに相当する強軸曲げ載荷の場合には、全塑性モーメントと降伏モーメントの間にかかなりの差異があることがわかる。道路橋示方書のように、これらの部材を降伏曲げモーメントを基準強度として設計するのは、不経済であるように思われる。

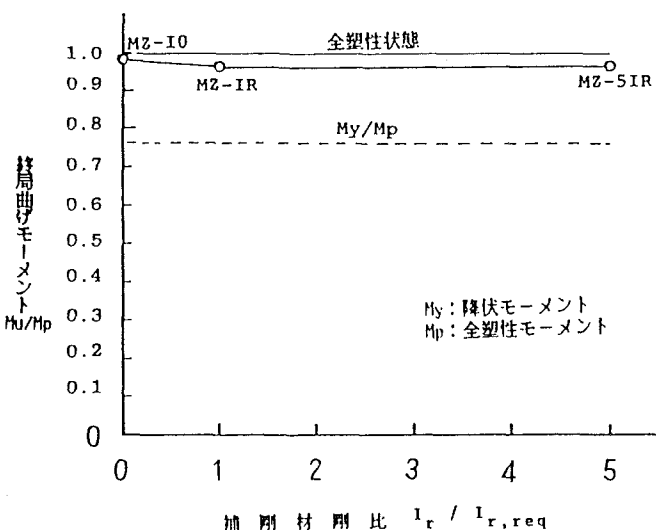


図-14 終局強度と補剛材剛比の関係 (強軸曲げ載荷実験)

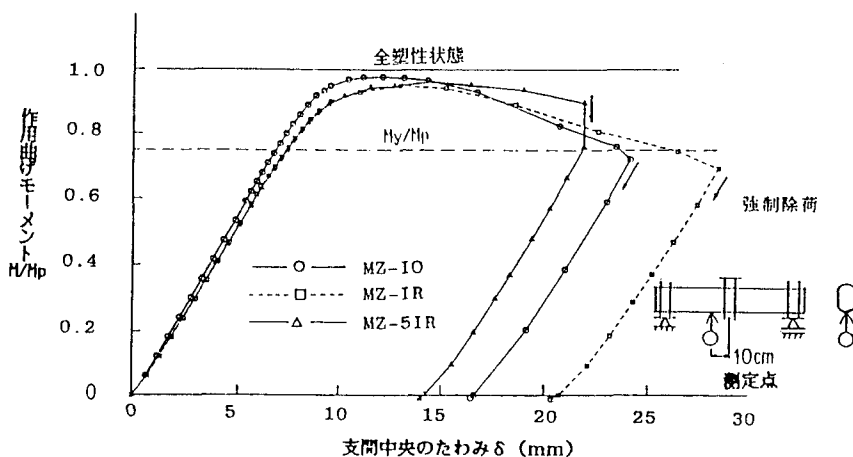


図-15 作用曲げモーメントーたわみ曲線（強軸曲げ載荷実験）

また、縦補剛材の寸法に関係なく3体の供試体の耐荷力は、ほぼ等しく、降伏曲げモーメントを大きく上回り、全塑性モーメントにほぼ一致していることがわかる。すなわち、強軸曲げが作用した場合、現在の位置に取り付けられた補剛材は、ほとんど有効でないことがわかる。

したがって、補剛材を設けるならば、後述の図-17に示す位置に配置したほうが合理的であるものと思われる。この点について検討するため、後述の補強実験も行った。

(2) 作用曲げモーメントーたわみ曲線

図-15には、作用曲げモーメントーたわみ曲線を示す。

すべての供試体の作用曲げモーメントーたわみ曲線は、作用曲げモーメントが降伏モーメントに一致するまでは、ほぼ線形に挙動していることがわかる。強軸曲げ載荷実験の場合、補剛材の剛比を変化させても終局強度は変化せず、むしろ補剛材を有しない供試体MZ-10の方が残留応力などの初期不整が小さくなり、補剛材を有する供試体MZ-1RおよびMZ-51Rよりも終局強度が大きくなっている。

しかしながら、終局状態を過ぎてからの耐荷力の減少量は、補剛材の剛比が大きいほど小さいことがわかる。

(3) 残留変形

図-16には、実験終了後の供試体MZ-1Rの破壊状況を示す。供試体MZ-10およびMZ-51Rの残留変形もこれと同様の形状を呈していた。

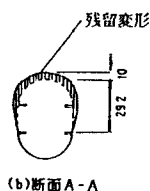
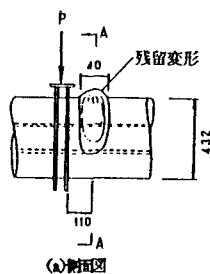
4.4 強軸曲げ載荷実験（その2）

前節に示した強軸曲げ載荷実験では、補剛材の剛比を変化させても、終局強度はほとんど変化しないことが明らかになった。

そこで、強軸曲げを受ける長円形断面部材の補剛法について検討するため、実験終了後の強軸曲げ載荷実験用供試体の非破壊部分を利用して、以下のような追加実験を行った。

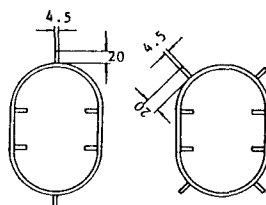
(1) 供試体

供試体S1 および S2では、それぞれ、実験後の供試体MZ-51R およびMZ-1Rの非破壊側に追加縦補剛材(P1. 4.5×20×100)を、図-17に示す位置に溶接した。破壊側ハネルは、かなり剛な縦補剛材(P1. 12×100×700)を溶接し補強した。



寸法単位: mm

図-16 残留変形 (供試体 MZ-1R)



(a) 供試体 S1 (b) 供試体 S2

図-17 供試体 S1 および S2 (寸法単位: mm)

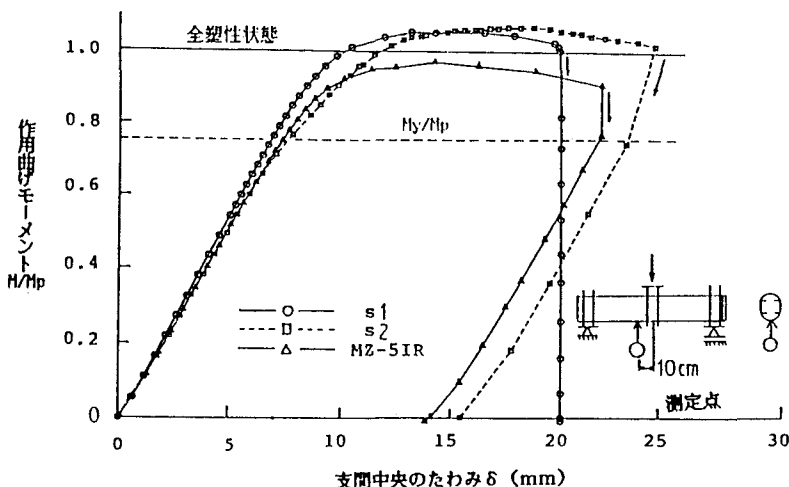


図-18 作用曲げモーメント-たわみ曲線

(2) 作用モーメント-たわみ曲線

図-18には、作用モーメント-たわみ曲線を示す。

追加補剛材を設ける前の供試体MZ-1R、および、供試体MZ-51Rの終局強度は、全塑性強度までしか至らなかった。

しかし、追加補剛材を設けた供試体S1およびS2では、その補剛効果によって断面の一部は、ひずみ硬化域に入り、終局強度は全塑性強度を若干上回っていることが、図-18からわかる。

さらに、圧縮側に1本の追加補剛材を設けた供試体S1は、終局強度に達してから耐荷力が若干低下しているのに対して、2本の追加補剛材を設けた供試体S2は、終局強度に達してからも、しばらくはその強度を維持していることがわかる。

(3) 残留変形

図-19には、実験終了後の供試体S1の残留変形を示す。S1、および、S2の両供試体とも、追加補剛材にも若干の残留変形が認められた。

5. まとめ

本研究は、曲率部の曲率半径と板厚の比が $R/t=32$ で、平坦部の幅厚比が $b/t=32$ 、また、降伏点 $\sigma_y=3630 \text{ kgf/cm}^2$ (356 N/mm^2) を有する長円形断面の短柱、および、梁の耐荷力とその補剛材の設計法を実験的に検討したものである。本研究で得られた主な結論を純圧縮実験(3体)、弱軸曲げ載荷実験(3体)、および、

強軸曲げ載荷実験(3体)について項目別に示すと、以下のとおりである。

5.1 純圧縮実験

- (1) 曲率部と平坦部の境界線に沿って縦補剛材を設けなくても、終局強度は、ほぼ降伏強度に等しくなる。
- (2) 境界に設けた縦補剛材の剛度を大きくするに伴って、終局状態後の変形能は、若干大きくなる

5.2 曲率部が腹板に相当する弱軸曲げ載荷実験

- (1) 本研究で提案した強度を有する縦補剛材を設ければ、長円形断面の梁の終局状態に於ける弱軸回りの曲げモーメントは、全塑性モーメントまで高めることができる。
- (2) 縦補剛材を設けなくても、降伏強度は、十分に確保できることがわかった。
- (3) 長円形断面の梁では、箱形断面梁のように、Shear Lag現象が顕著に現れていないことがわかった。今後、長円形断面部材のShear Lag現象については、十分な検討を加えて行く必要がある。

5.3 曲率部がフランジに相当する強軸曲げ載荷実験

- (1) 曲率部と平坦部の境界に縦補剛材を設けなくても、長円形断面の終局状態における強軸まわりの曲げモーメントは、ほぼ全塑性モーメントまで高めることができる。
- (2) しかしながら、縦補剛材を設けることによって、終局状態に至った後の変形能を大きくすることができる。
- (3) また、曲率部に補剛材を設けることによって、全塑性強度を上回る強度が確保できる。
- (4) とくに、強軸曲げ載荷の場合は、Shape factorが大きくなり、断面が降伏してから全塑性状態に至るまでの強度差が大きく、耐震設計の際のダクティリティーの確保が容易になる。
- (5) 道路橋示方書では、降伏強度を基準にして耐荷力を定めているため、Shape factorの大きい強軸曲げ載荷では、とくに安全側に耐荷力を評価することになる。

本研究を遂行するにあたり、阪神高速道路公団・大阪第一建設部 杉山功課長、(株)横河橋梁製作所 栗本英規氏、楠屋晴男氏および松尾橋梁(株) 明田啓史氏には、種々のご配慮を頂いた。ここに深謝の意を表する。また、実験は当時大阪市立大学工学部土木工学科学生の前川玲氏の協力のもとに行ったものであることを付記する。

参考文献

- 1) 中井博・宮村重範・山内幸裕・田中実雄・松浦健二：半径500mmの曲面を持つ鋼製橋脚の設計・施工、橋梁と基礎、Vol. 21, No. 2, 1987年2月, pp. 17-22
- 2) 吉川 紀・杉山 功・山内幸裕・袴田文雄：新浜寺大橋の設計概要、土木学会論文集、第397号、1988年9月, pp. 27~33
- 3) Jahnke, J.: Fehmarnsundbrücke, Eisenbahntechnische Rundschau, H. 2, Feb., 1964, pp. 69-70
- 4) 小松定夫・北田俊行：初期不整を有する圧縮板の極限強度特性に関する研究、土木学会論文報告集、第270号、1978年2月, pp. 1~14
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、昭和48年12月
- 6) 横河・松尾建設工事共同企業体・(財)大阪都市協会都市技術研究所：小判型断面を有する薄肉断面部材の耐荷力とその補剛材の設計法に関する研究、昭和63年3月

(1988年10月12日受付)

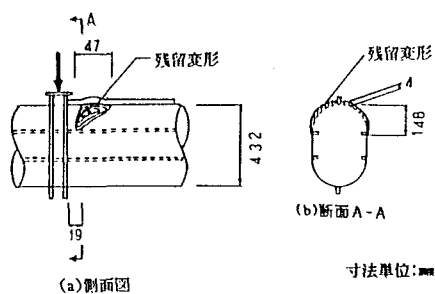


図-19 残留変形(供試体S1)