

曲げとねじりとを受ける薄肉箱形断面梁の極限強度に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF THIN-WALLED BOX BEAMS SUBJECTED TO BENDING AND TORSION

中井 博*・村山泰男**・北田俊行***・高田佳彦****

By Hiroshi NAKAI, Yasuo MURAYAMA, Toshiyuki KITADA and Yoshihiko TAKADA

This paper presents an experimental study on the ultimate strength of thin-walled box girders subjected to bending and torsion. Firstly, an experimental apparatus for applying both bending moment and torsional moment to short steel beam specimens with thin-walled box section is newly developed. Next, by using this experimental apparatus, the behavior up to the collapse and the ultimate strength of these thin-walled box beam specimens without longitudinal stiffeners are investigated. Finally, interaction curves for combined bending and torsion loading at the ultimate state are proposed.

1. まえがき

わが国の鋼橋の設計法は、現在、許容応力度設計法から限界状態設計法へ改訂すべく、鋭意検討が進められている。限界状態設計法では、構造物の終局状態における強度（終局強度）を知ることが一つの重要な課題で、各種の組合せ荷重を受ける鋼部材の終局強度が目下多数の研究者たちによって論議されている。とくに、曲線箱桁橋のように、曲げとねじりを同時に受ける箱形断面の極限強度を明確にすることも重要な課題となってきた。

曲げとねじりを受ける鋼部材の場合、すでに諸外国では、Heins や Yoo によって、局部座屈が起こらない曲線箱桁の塑性設計法に関する研究¹⁾が行われている。また、わが国では、長方形断面棒を対象とした太田・日野ら²⁾による研究があげられ、いずれも局部座屈が起こらないような断面を対象にして、曲げとねじりとが作用するときの相関曲線を用いて、終局強度が求められるとの提案がある。

しかしながら、薄肉箱断面で局部座屈が先行する場合を含めた終局強度については、現在のところまだ十分に明確にされておらず、数多くの実験や解析を行っておく必要があるように思われる。

* 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）

** 工修 栗本鉄工所設計部（〒559 大阪市住之江区柴谷 2-8-45）

*** 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）

**** 大阪市立大学前期博士課程在学中（同上）

そこで、本研究では、まず曲げモーメント、および、ねじりモーメントの組合せ荷重を同時に載荷できる薄肉断面梁の破壊実験装置を試作し、この破壊実験装置を用いて、無補剛の薄肉箱形断面桁を対象にし、その極限強度特性を調べた。さらに、極限状態における曲げモーメント、および、ねじりモーメントの相関曲線について、実験結果との比較・検討を通じて考察した。これら一連の研究を、本文で報告する。

2. 実験概要

2.1 実験装置および載荷方法

本研究で試作した実験装置の全体図およびその構成を、図-1に示す。この装置を用い、曲げとねじりとの組合せ荷重を同時に載荷する場合、組合せ荷重の載荷順序が問題になるが、ここではまずある一定の曲げモーメント（表-4参照）を載荷して、それを一定に保持した状態にしておき、続いて、ねじりモーメントを漸増載荷して供試体を崩壊させるようにした。

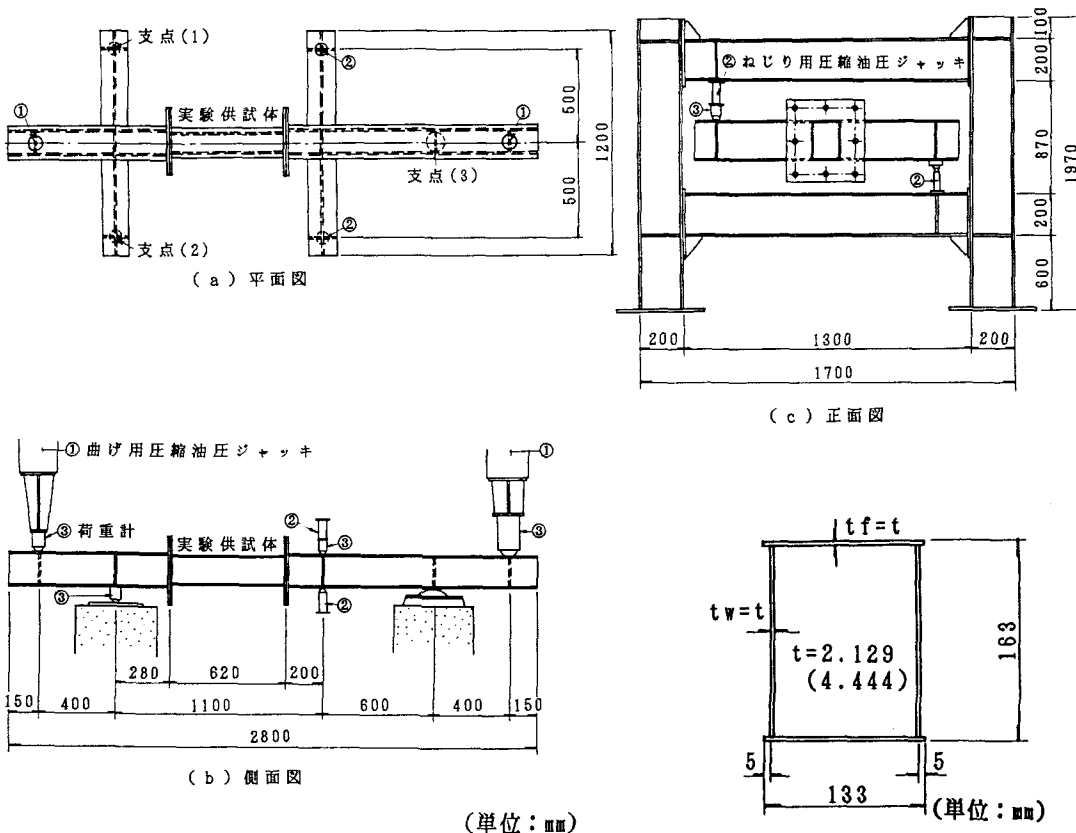


図-1 実験載荷装置

図-2 実験供試体断面図

2.2 実験供試体の設計

実験供試体は幅厚比パラメーターの異なる2種類を製作した。一つの供試体は、局部座屈が卓越することなく崩壊状態に至るように製作し、もう一つの供試体は、局部座屈の発生により崩壊状態に至るように製作した。そこで、供試体断面の幅厚比パラメータ $R_b(=\sqrt{\sigma_y/\sigma_{or}}$ 、 σ_y :降伏点、 σ_{or} :圧縮フランジの弾性曲げ座屈応力度³⁾)は、それぞれ0.32(公称板厚: $t=4.5\text{mm}$)、および、 $R_b=0.65$ (公称板厚: $t=2.3\text{mm}$)とした。図-2には、供試体の断面図を示す⁴⁾。なお、荷重が作用したときに、溶接部分が供試体の弱点とならないように、角溶接部には開先をとり、完全溶け込み溶接とした。

2.3 供試体材料の機械的性質

実験供試体の製作に用いた鋼板の機械的性質を調べるために、引張試験を行った。各試験片において0.2%耐力の平均値を降伏点 σ_y とした。またヤング係数 E 、およびポアソン比 μ の値も、各試験値の平均値を用いることにした。これらの値を表-1に示す。そして、実測寸法および降伏点を使って計算した限界断面力を、表-2に示す。また、同表には載荷方法も示している。さらに、幅厚比パラメータ R_b 、 $R_\tau(=\sqrt{\tau_y/\tau_{or}}$ 、 τ_y :せん断降伏応力度 $\sigma_y/\sqrt{3}$ 、 τ_{or} :幅厚比の最も大きい構成板パネルの弾性せん断座屈応力度⁵⁾)の値を表-3に示す。

表-3 供試体の幅厚比パラメータ

項目 公称板厚	測定板厚 (mm)	R_b	R_τ
$t=2.3\text{mm}$	2.129	0.650	0.978
$t=4.5\text{mm}$	4.444	0.322	0.449

表-1 供試体の機械的性質

項目 板厚: t	ヤング係数 E (kgf/cm^2)	ポアソン比 μ	降伏応力 σ_y (kgf/cm^2)
2.3mm	2.08×10^6	0.284	2,619
4.5mm	2.10×10^6	0.273	3,804

1kgf=9.8N

表-2 限界断面力

項目 供試体	全塑性モーメント $M_p(\text{tf}\cdot\text{m})$	全塑性ねじりモーメント $T_p(\text{tf}\cdot\text{m})$	板厚 t (mm)	載荷方法
M2-1	1.869	1.227	2.3 (mm)	純曲げ
MT2-2	1.871	1.228		曲げとねじり
MT2-3	1.866	1.225		
MT2-4	1.868	1.226		
T2-5	1.870	1.227	4.5 (mm)	純ねじり
M4-1	5.540	3.653		純曲げ
MT4-2	5.557	3.663		曲げとねじり
MT4-3	5.570	3.673		
T4-4	5.500	3.624		純ねじり

tf·m=9.8×10³N·m

2.4 初期不整

(1)初期不整

溶接等によって生じる板パネルの初期たわみは、薄肉箱断面梁の極限強度に影響を及ぼす重要な要因の一つであるので、実験に先立って全供試体の初期たわみを測定した。供試体の中央テストパネル部ダイヤフラム間のフランジおよびウェブ・プレート(長さ450mm)を対象とし、各パネルについて、5×6の格子点上の初期たわみを、ダイヤルゲージ(精度1/100mm)を用いて測定した。板厚2.3mmの供試体に対するフランジおよびウェブ・

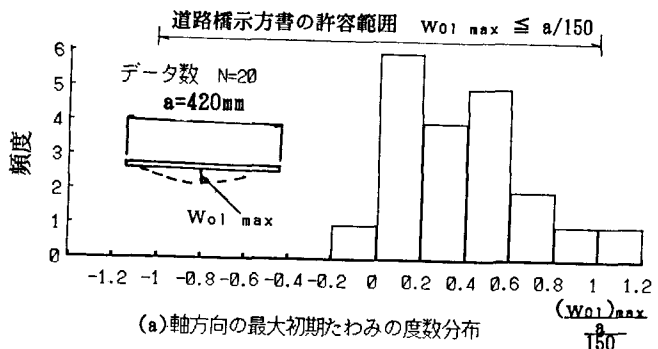


図-3 初期たわみの最大値の度数分布(その1)

プレートの軸方向および横方向の初期たわみ、 w_{01} および w_{0t} の最大値の度数分布を、図-3に示す。各パネルについて、初期たわみの最大値は、それぞれ $(w_{01})_{\max}$ と $(w_{0t})_{\max}$ で表している。なを、図中には、道路橋示方書に規定されている初期たわみの許容範囲も示している。また、公称板厚 4.5mm の供試体の場合、 $(w_{01})_{\max}$ は $-0.4a/150 \sim 0.4a/150$ 、 $(w_{0t})_{\max}$ は $-1.0a/150 \sim 0.4a/150$ の範囲に分布しており、全てが道路橋示方書の製作基準を満足していた。なお、溶接等によって生じる供試体の残留応力分布を実測の結果、ばらつきが大きく良好な結果が得られなかったためここでは省略した。

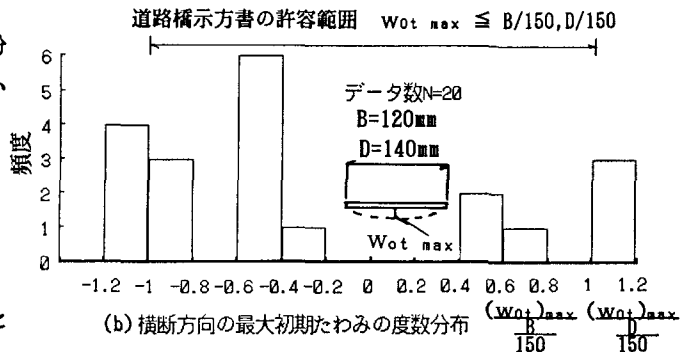


図-3 初期たわみの最大値の度数分布 (その2)

3. 実験結果とその考察

3.1 荷重-ひずみ曲線

破壊実験より得られた荷重-ひずみ曲線から、代表的な実験供試体の崩壊に至るまでの挙動を調べた。

(1) 純曲げ実験

図-4には、供試体中央断面の圧縮側フランジ・パネルの荷重-軸方向ひずみ曲線を示す。供試体M2-1においては、 $M/M_p=0.4$ 付近で局部座屈が始まっていることがわかる。供試体M4-1は、 $M/M_p=0.8$ でパネルの中央部と周辺部とのひずみに差が生じ始めており、降伏ひずみの達する $M/M_p=0.8$ 付近で中央部のひずみが急増している。

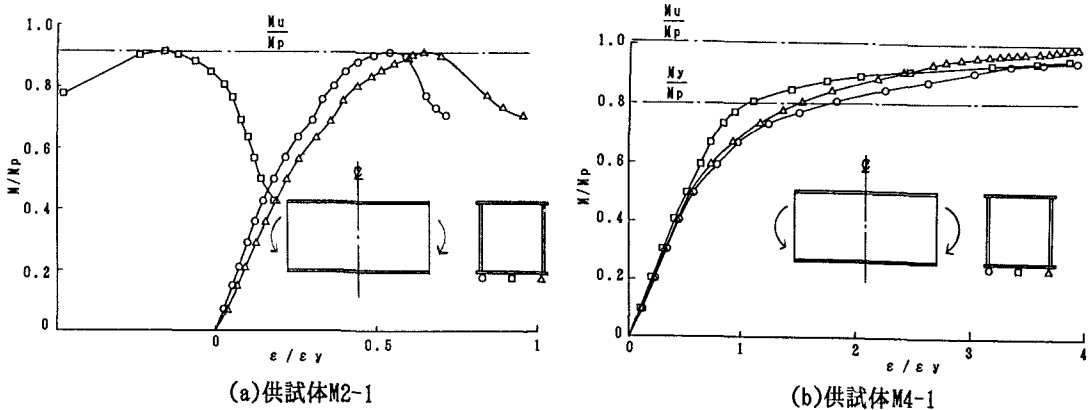


図-4 荷重-軸方向ひずみ曲線

(2) 純ねじり実験

図-5は、供試体中央断面の荷重-ひずみ曲線を示す。供試体T2-5については、ウェブの1パネルが初期たわみの影響で初期の段階から剛度が低下し、 $T/T_p=0.7$ で局部座屈が発生して崩壊状態に至っている。供試体T4-4については、全断面が降伏してからは、せん断ひずみが流れ出して回転変形が増加するが、荷重の低下はほとんど見られない。

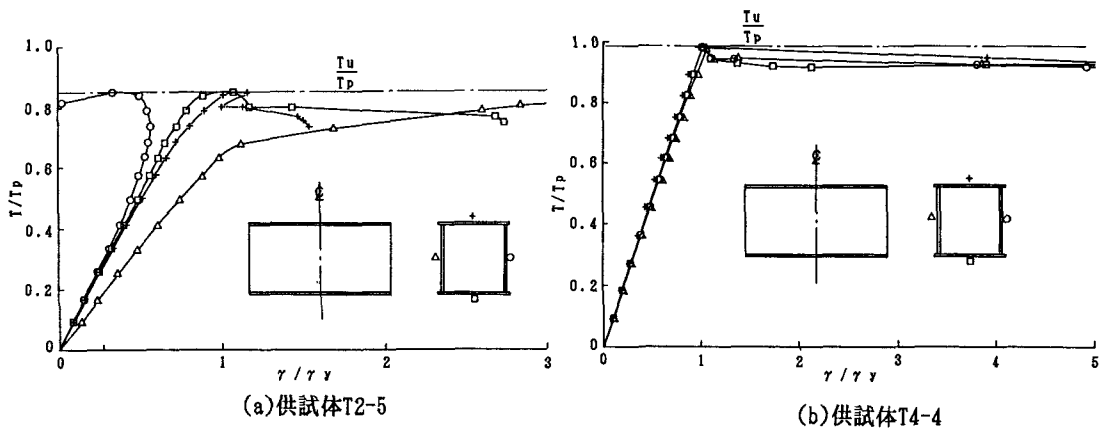


図-5 荷重-せん断ひずみ曲線

(3) 曲げとねじりを受ける場合

図-6には、実験供試体MT2-4、およびMT4-3の中央断面の荷重-せん断ひずみ曲線を示す。供試体MT2-4は、先に載荷した曲げモーメントの影響で局部座屈を生じており、ねじりモーメント載荷直後からせん断ひずみに差異が生じ始めている。

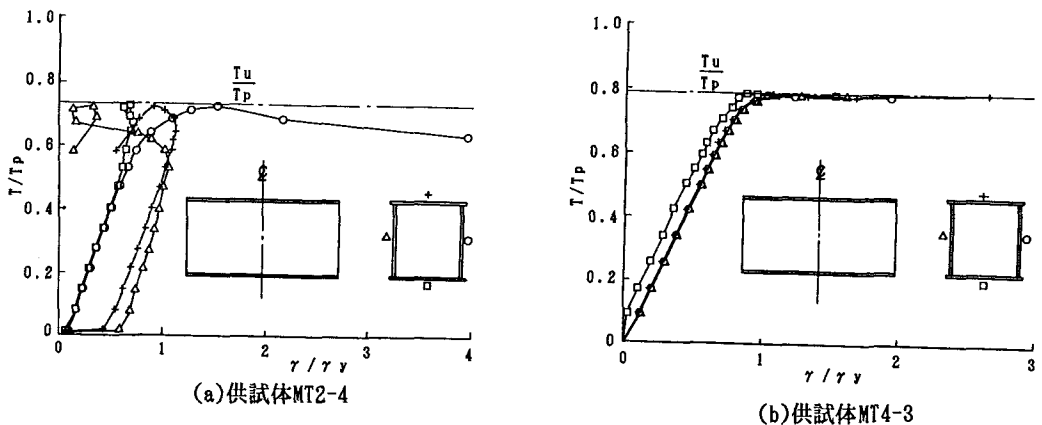


図-6 荷重-せん断ひずみ曲線

3.2 実験結果

実験により得られた極限強度を、表-4に示す。また、表中には、実験結果を全塑性値で無次元化した値も示している。

なお、表中において、 ϕ_u は以下の式で与えられる。

$$\phi_u = \sqrt{(\mu_u/\mu_p)^2 + (t_u/t_p)^2} \quad \text{----- (1)}$$

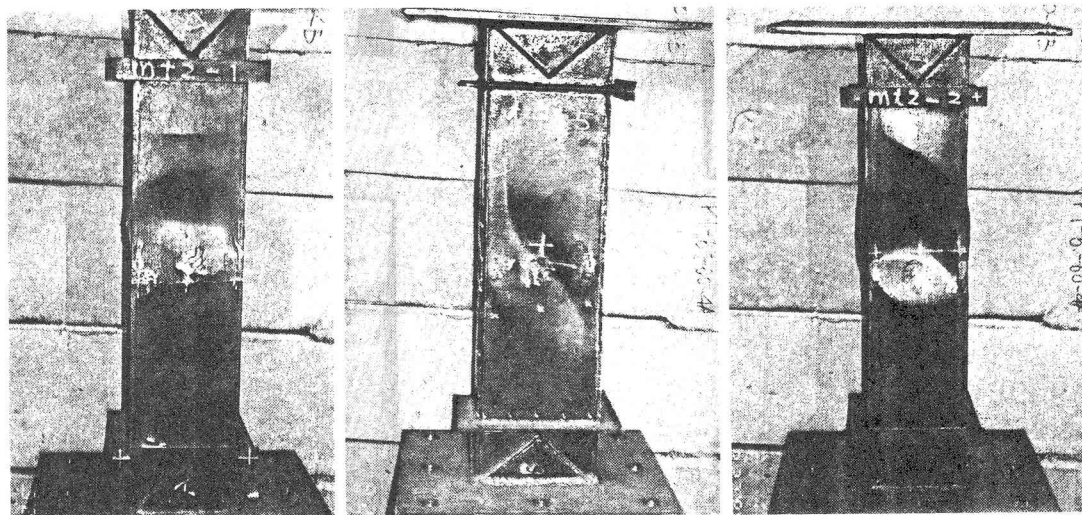
3.3 供試体の崩壊状況

実験後の公称板厚2.3mmの供試体の残留変形の写真を、図-7に示す。なお、公称板厚4.5

表-4 実験結果

供試体	μ_u (tf・m)	μ_u/μ_p	t_u (tf・m)	t_u/t_p	ϕ_u
M2-1	1.710	0.915	0	0	0.915
MT2-2	1.080	0.577	0.803	0.654	0.873
MT2-3	0.920	0.493	0.877	0.716	0.869
MT2-4	0.818	0.438	0.917	0.748	0.867
T2-5	0	0	1.039	0.847	0.847
M4-1	5.699	1.029	0	0	1.029
MT4-2	4.525	0.814	2.057	0.562	0.989
MT4-3	3.523	0.631	2.891	0.787	1.008
T4-4	0	0	3.540	0.977	0.977

■■の供試体では、肉眼で確認できる程の残留変形は生じていなかった。



(1)純曲げ実験

(2)純ねじり実験

(3)曲げ+ねじり実験

図-7 残留変形

4. 終局強度曲線と終局強度相関曲線の検討

4.1 終局強度曲線

(1) 曲げ耐荷力

無補剛の箱形断面桁の曲げ耐荷力は、圧縮フランジと腹板との連成座屈を考慮した箱形断面全体としての座屈強度を降伏点で無次元化した幅厚比パラメータ R_b の関数として表されるものとする。そこで、横軸には幅厚比パラメータ R_b を、縦軸には極限強度をとって本実験値および文献6)の実験値をプロットしたものを、図-8に示す。この図より、種々の曲線について検討した結果、文献6)で提案している以下の式が実験結果の平均値および下限値として得ることができる。

平均値に対して：

$$\frac{M_u}{M_p} = 1.220 - 0.392R_b \quad \text{-----} \quad (2)$$

(ただし、 $0.24 \leq R_b \leq 0.65$)

下限値に対して：

$$\frac{M_u}{M_p} = 1.134 - 0.392R_b \quad \text{-----} \quad (3)$$

(ただし、 $0.24 \leq R_b \leq 0.65$)

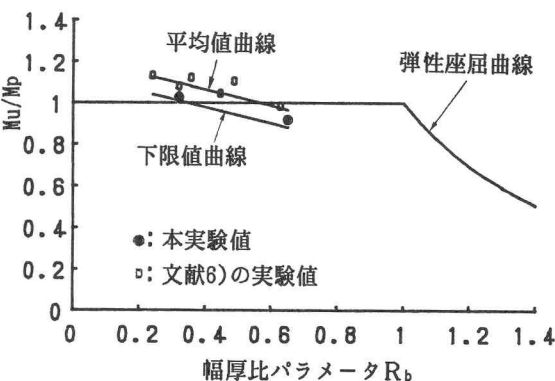


図-8 曲げ終局強度曲線

(2)ねじり耐荷力

無補剛の箱形断面桁のねじり耐荷力は、幅厚比パラメータ $R\tau$ の関数として表されるものとする。そこで、図-9には、横軸には幅厚比パラメータ $R\tau$ を、縦軸には極限強度をとって本実験値および文献6)の実験値をプロットした。この図より、種々の曲線について検討した結果、文献6)で提案している以下の式が実験結果の平均値および下限値として得られる。

平均値に対して：

$$\frac{T_u}{T_p} = 1.152 - 0.316R\tau \quad \text{-----} \quad (4)$$

(ただし、 $0.34 \leq R\tau \leq 0.98$)

下限値に対して：

$$\frac{T_u}{T_p} = 1.109 - 0.316R\tau \quad \text{-----} \quad (5)$$

(ただし、 $0.34 \leq R\tau \leq 0.98$)

4.2.終局強度相関曲線の検討

今回実験を行った2種類の幅厚比パラメータをもつ箱型断面が、1軸曲げモーメント、および、ねじりモーメントを同時に受ける場合について終局強度相関曲線の検討を試みる。

まず、構成板パネルの局部座屈が問題とならない箱形断面($R_b = 0.32$)に対して考えてみる。このとき、全ての実験供試体がほぼ全塑性で崩壊状態に至ったことより、全塑性状態を終局状態と考えることができる。図-10には、縦軸を M_u/M_p 、横軸を T_u/T_p にとって実験値をプロットした。種々の曲線について検討した結果、以下の相関式を得ることができた。

$$\left(\frac{M_u}{M_p}\right)^2 + \left(\frac{T_u}{T_p}\right)^2 = 1 \quad \text{---} \quad (6)$$

一方、局部座屈が卓越する場合の箱形断面($R_b = 0.65$)に対しても、図-10と同様に、縦軸を M_u/M_p 、横軸を T_u/T_p にとって実験値をプロットしたものを図-11に示す。実験結果により種々の曲線について検討した結果、以下の相関式を得ることができた。

$$\left(\frac{M_u}{\alpha_g M_p}\right)^2 + \left(\frac{T_u}{\beta_g T_p}\right)^2 = 1 \quad \text{---} \quad (7)$$

ここで、 $\alpha_g = 0.92$, $\beta_g = 0.85$ ----- (8)

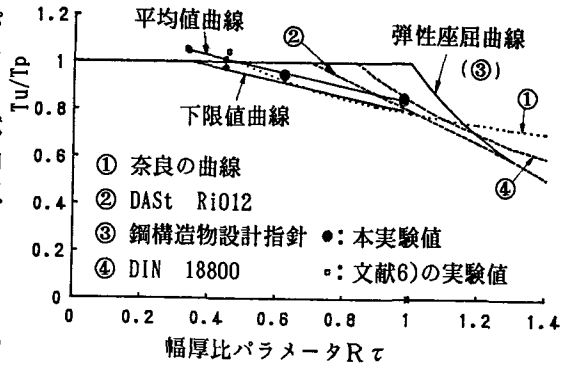


図-9 ねじり終局強度曲線

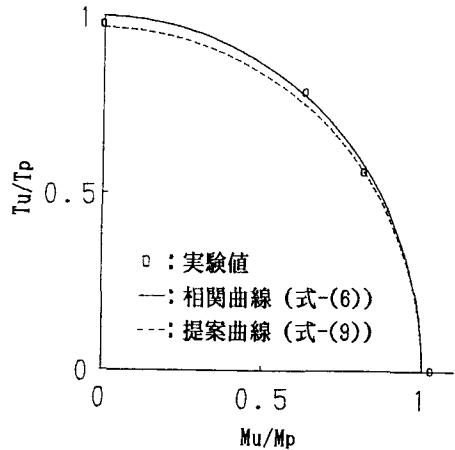


図-10 終局強度相関曲線
($R_b=0.322, R\tau=0.449$)

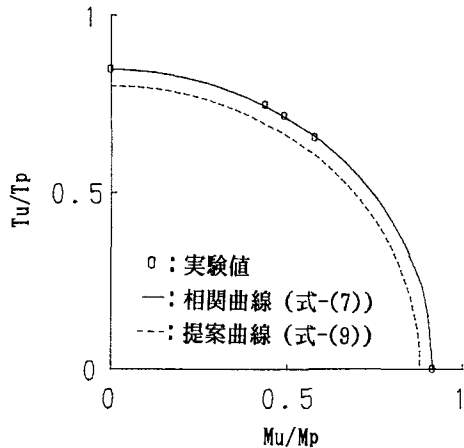


図-11 終局強度相関曲線
($R_b=0.650, R\tau=0.978$)

以上の結果を総合すると、曲げとねじりの相関曲線は、曲げについては式-(3)で提案した終局強度曲線により幅厚比パラメータ R_b の関数として表される α を低減係数として M_p に乘じ、 M_u/M_p が1を越えない範囲をとるようにし、ねじりにおいても式-(5)で提案した終局強度曲線により幅厚比パラメータ R_τ の関数として表される β を T_p に乘じ、式-(7)のように表すことができる。

$$\left(\frac{M_u}{\alpha M_p}\right)^2 + \left(\frac{T_u}{\beta T_p}\right)^2 = 1 \quad \cdots \cdots \cdots (9)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.0 && (R_b < 0.34) \\ \alpha &= 1.134 - 0.392R_b && (0.34 \leq R_b \leq 0.65) \quad \cdots \cdots \cdots (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= 1.0 && (R_\tau < 0.34) \\ \beta &= 1.109 - 0.316R_\tau && (0.34 \leq R_\tau \leq 0.98) \quad \cdots \cdots \cdots (11) \end{aligned}$$

本実験結果と、終局強度相関曲線式-(9)との誤差は、図-10および図-11に示すように-6.1%~0.5%以内に収まっている。

5.1. まとめ

本研究で明らかになったことをまとめると、以下のようになる。

- (1) 幅厚比パラメータ $R_b(=0.32)$ を有する板パネルから構成される本実験供試体は、いずれの荷重の場合もほぼ全塑性状態に達し、その後に終局状態に至った。
- (2) 幅厚比パラメータ $R_b(=0.65)$ の実験供試体は、局部座屈により崩壊した。
- (3) 本実験結果より、式-(9)で表される終局強度相関曲線を導いた。
- (4) 補剛材を有する薄肉箱形断面梁においては、今後実験および解析によって終局強度特性を明かにし、終局強度相関曲線を導く必要がある。

参考文献

- 1) C.H.Yoo and P.Heins : Plastic Collapse of Horizontally Curved Bridge Girders, Proc.of ASCE, Vol.98, No.ST4, Apr, 1972, pp.899~914.
- 2) 太田俊昭・日野伸一：曲げとねじりモーメントを受ける一様な長方形断面棒の弾塑性解析，土木学会論文報告集，No.362，1979年5月，pp.37~43。
- 3) 米沢博・三上市蔵：箱桁の弾性座屈について，土木学会論文集，No.120, 1965年8月，pp.8~13。
- 4) 北田俊行・中井博・國廣昌史・松下孝文：圧縮・曲げ・ねじりの組合せ断面力を受ける薄肉箱形短柱の終局強度特性に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.31A，1988年3月，pp.221~231。
- 5) 奈良敬・出口恭司・福本湧士：純せん断応力を受ける鋼板の極限強度特性に関する研究，土木学会論文集，No.392，1988年4月，pp.265~271。
- 6) 中井博・北田俊行・國廣昌史・中村清孝・岸田和人：組合せ断面力を受ける薄肉箱形短柱の局部座屈を考慮した終局強度相関曲面に関する実験的研究，構造工学論文集，土木学会，Vol.36A，1990年3月（投稿中）。

(1990年10月2日受付)