

# 薄肉補剛箱形断面の座屈・終局強度に関する 実験的研究

中井 博<sup>1</sup>・北田俊行<sup>2</sup>・國廣昌史<sup>3</sup>・前川義男<sup>4</sup>・河内 伸<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 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)

<sup>2</sup>正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部 土木工学科

<sup>3</sup>正会員 工修 川崎重工業(株) 鉄構事業部 技師長

<sup>4</sup>正会員 阪神高速道路公団 大阪第1建設部 次長

<sup>5</sup>学生員 大阪市立大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

本研究は、圧縮、曲げ、および、ねじりの代表的な組合せ断面力を受ける薄肉補剛箱形断面の終局状態に至るまでの挙動、ならびに座屈・終局強度特性について、実験的な立場から検討を加えたものである。また、別途、理論的研究によって導かれた圧縮、曲げ、および、ねじりが単独に作用した場合のそれぞれの耐荷力曲線、ならびに、これらの組合せ断面力が作用したときの終局強度相関曲線の妥当性を実験データをもとにして検討している。さらに、道路橋示方書に基づく許容強度曲線、および許容強度相関曲線、ならびに上述の耐荷力曲線、また終局強度相関曲線を安全率1.7で縮尺した許容強度曲線、および許容強度相関曲線と実験結果とを比較し、これらの曲線の妥当性についても若干の考察を行っている。

**Key Words** : ultimate strength, buckling strength, stiffened box cross section, compression, bending, torsion, experiment, interaction curve

## 1. ま え が き

斜張橋・吊橋の鋼製タワー、アーチ系橋梁のアーチリブ、および鋼製橋脚の柱部材などの補剛材を有する薄肉箱形断面部材は、圧縮と曲げのほか、場合によって、ねじりをも同時に受けることがある。しかしながら、これらの組合せ断面力が作用する薄肉補剛箱形断面部材の局部座屈に起因する終局強度特性については、まだ十分に明らかにされていないのが現状である。

現在のところ、圧縮、曲げ、および、ねじりが組み合わさって作用する無補剛の薄肉箱形断面の終局強度については、文献1)~3)による実験的研究が実施されてきている。それらの研究においては、圧縮、曲げ、および、ねじりがそれぞれ単独に作用したときの終局断面力を全塑性断面力と見なして得られる全塑性相関曲面と相似した終局強度相関曲面を用いて、これらの断面力が同時に作用する無補剛薄肉箱形断面の終局強度を安全側に、しかも精度よく評価できることを明らかにしている。

また、文献4)、および5)においては、圧縮と曲げとを受ける薄肉補剛箱形断面の終局強度相関曲線について、実験結果をもとに検討している。とくに、文献5)においては、上記と同様、全塑性相関曲線と類似の終局強度相関曲線を適用できることをすでに提案している。

さらに、文献6)、および7)では、圧縮、曲げ、および、ねじりが組み合わさって作用する薄肉補剛箱形断面の終局強度相関曲線について、弾塑性有限変位理論に基づくパラメトリック解析により検討している。その結果、箱形断面を構成する補剛板パネルの縦補剛材間の板パネルの幅厚比が大きくなるのに伴って、全塑性相関曲線に類似した終局強度相関曲線から、それぞれの断面力が単独で作用した場合の終局強度を直線で結んだ線形相関式に変化してゆくことを明らかにしている。

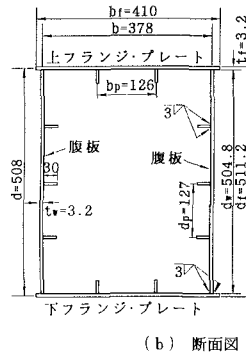
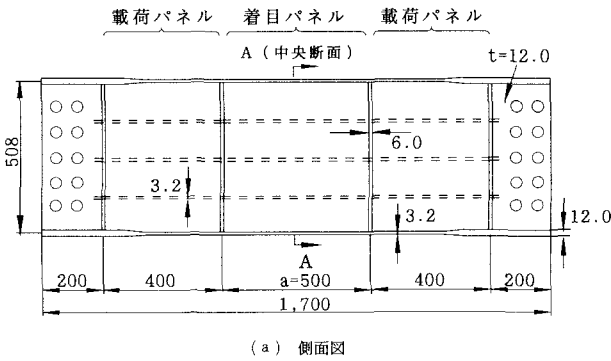
本研究では、圧縮、曲げ、および、ねじりが組み合わさって作用する薄肉補剛箱形断面の終局状態に至るまでの挙動、および座屈・終局強度特性を明らかにするとともに、文献6)、および7)で提案されている終局強度相関曲線の妥当性について検討することを目的とし、耐荷力実験を行った。

なお、本研究においては、薄肉箱形断面桁のように、腹板の幅厚比が大きい断面は、対象外とした。

## 2. 供試体、作用断面力、および荷重装置

### (1) 供試体

図-1は、供試体の形状・寸法を示したものである。ここで、縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ



- ・アスペクト比
  - 〔フランジ： $\alpha_f=1.323$
  - 〔腹板： $\alpha_w=0.990$
- ・幅厚比パラメーター
  - 〔フランジ： $R_f=0.795$
  - 〔腹板： $R_w=0.801$
- ・縦補剛材剛比
  - 〔フランジ： $\gamma_f/\gamma_w=1.085$
  - 〔腹板： $\gamma_w/\gamma_w=1.039$
- $\gamma_w$ ：道路橋示方書<sup>8)</sup>の必要最小剛比

(a) 側面図

(b) 断面図 (断面 A-A)

図-1 供試体 (寸法：mm)

表-1 供試体と作用断面力との内訳

作用断面力 供試体名	N	$M_y$	T	$N^*/M_y^*$	$T^*/M_y^*$	$N^*/T^*$
$M_y$ -1	—	○	—	—	—	—
T-2	—	—	○	—	—	—
$M_y$ T-3	—	○	○	—	1.00	—
NT-4	○	—	○	—	—	0.60
$NM_y$ -5	○	○	—	0.61	—	—
$NM_y$ T-6	○	○	○	1.33	1.00	1.32
RS	残留応力測定用の供試体					
ここに、 $N^*=N/N_p^{(1)}$ 、 $M_y^*=M_y/M_{yp}^{(1)}$ 、 $T^*=T/T_p^{(1)}$						

$R=\sqrt{\sigma_y/\sigma_{cr}}$  (ここに、 $\sigma_y$ ：降伏点、 $\sigma_{cr}$ ：板パネルの弾性座屈応力度)は、実際の、しかも降伏点 $\sigma_y$ 以下で局部座屈が発生するように、0.8程度になることを目標とした。また、補剛材の剛比は、道路橋示方書<sup>8)</sup>にしたがう必要最小値となるように、断面寸法を定めた。さらに、着目する補剛板パネルのアスペクト比は、文献9)~10)などを参照して、比較的頻度の多い0.6~2.5の範囲内に入るように、フランジで1.32、また腹板で0.99とした。

なお、供試体の製作に当たっては、フランジ・プレートと腹板との溶接部が弱点にならないように、両側すみ肉溶接とした。

## (2) 作用断面力

6体の耐力実験用供試体と1体の残留応力測定用供試体を製作し、表-1に示す6種類の断面力の組み合わせケースのもとで実験を行った。なお、表中の $N$ 、 $M_y$ 、および $T$ は、それぞれ作用軸方向圧縮力、作用曲げモーメント、および作用ねじりモーメントを表している。そして、下添字“ $p$ ”は全塑性断面力であることを示し、また上添字“(1)”は関係する断面力のみが単独に作用している状態を示している。

## (3) 荷重装置

文献11)で開発された箱形断面に曲げとねじりとを作用させることができる荷重装置を、図-2に示すように、鋼棒とセンター・ホール・ジャッキを用いて、ねじり、および曲げ以外に、軸方向圧縮力も載荷することができるように改良して、所定の組合せ断面力の作用を実現した。

今回の実験においては、組合せ断面力が比例荷重となるように荷重を増加させた。また、曲げと軸方向圧縮力とが組み合わさった場合の曲げ変形に伴うテンションバーによる付加曲げモーメントの影響は、微量とみなせる。したがって、その値は、考慮しなかった。

## 3. 供試体の実測寸法と各限界断面力

供試体の実測寸法を、表-2に示す。なお、板厚については、圧延した鋼板より切り出した引張試験片をマイクロメーター(精度1/100 mm)で測定した。そして、フランジ・プレート、および腹板の板幅は、鋼尺(精度1/10 mm)を用いて測定した。

また、これらの実測寸法、および実測降伏点(表-4参照)を用いて計算した各限界断面力を、表-3に示す。

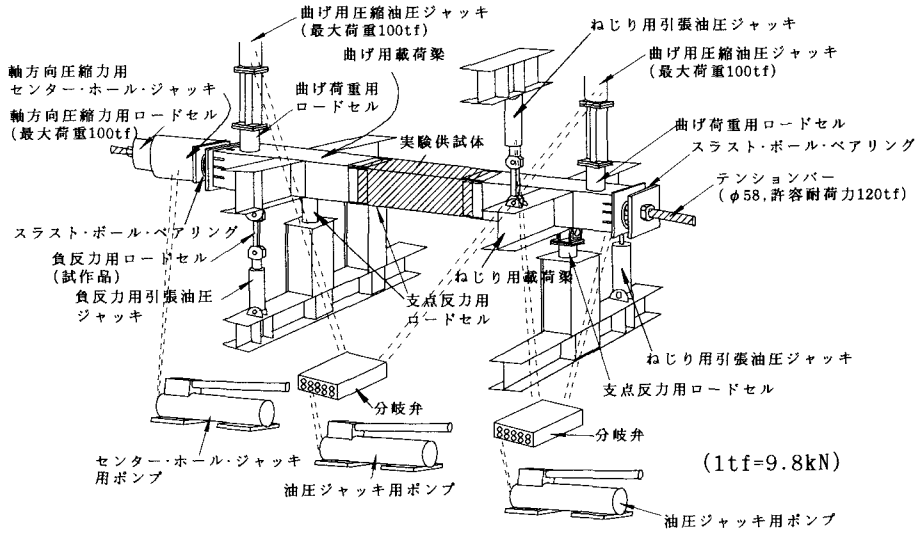


図-2 載荷装置

表-2 供試体の実測寸法 (単位: mm)

寸法(図-1参照)	t	b <sub>f</sub>	b	d
供試体名				
M <sub>y</sub> -1	3.185	409.6	377.1	506.6
T-2	3.185	409.9	377.6	507.7
M <sub>y</sub> T-3	3.185	409.5	377.0	506.6
NT-4	3.185	409.9	377.3	507.9
NM <sub>y</sub> -5	3.185	410.1	377.4	506.3
NM <sub>y</sub> T-6	3.185	409.8	376.8	506.5

表-3 供試体の各限界断面力

断面力	全塑性軸力 (tf)	降伏曲げモーメント (tf・m)		全塑性曲げモーメント (tf・m)		全塑性ねじりモーメント(tf・m)
	N <sub>p</sub>	M <sub>yY</sub>	M <sub>zY</sub>	M <sub>yP</sub>	M <sub>zP</sub>	T <sub>p</sub>
供試体名						
M <sub>y</sub> -1	204.169	30.345	26.571	36.282	30.842	21.179
T-2	202.692	30.183	26.485	36.092	30.650	21.081
M <sub>y</sub> T-3	204.127	30.352	26.549	36.275	30.826	21.181
NT-4	203.792	30.412	26.565	36.294	30.806	21.225
NM <sub>y</sub> -5	201.550	29.904	26.208	35.795	30.467	20.873
NM <sub>y</sub> T-6	201.933	29.972	26.200	35.871	30.489	20.888

備考: 1tf=9.8kN, 1tf・m=9.8kN・m

供試体の形状係数  $f(=M_{yp}/M_{yY})$  は、約 1.2 である。

#### 4. 引張試験, 残留応力および初期たわみの測定

##### (1) 引張試験

供試体の製作に用いた鋼板 (SS 400) の機械的性質を調べるため、鋼板から JIS 5号試験片を 5体切り出して引張試験を行った。代表的な引張試験結果を、図-3

に示す。また、鋼板の機械的性質の平均値を、表-4にまとめた。この図からわかるように、用いた鋼材は、薄板であり、コイル状に圧延ロールされ、その後、冷間加工によって平板にされた。そのため、明確な降伏点が存在せず、弾性挙動の後、すぐに硬化域に入る応力-ひずみ曲線を呈した。なお、ヤング係数は応力-ひずみ曲線の傾きから、また降伏点は 0.2% 耐力として求めた。

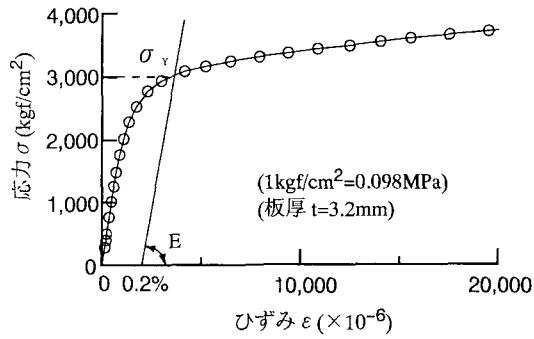


図-3 引張試験結果の代表例

表-4 供試体材料の機械的性質 (引張試験片 5 本の平均値)

ヤング係数 $E$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	ポアソン比 $\mu$	せん断弾性 係数 $G$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	降伏点 (0.2% 耐力) $\sigma_Y$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	引張強さ $\sigma_u$ ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	伸び率 $\Delta L/L$ (%)
$2.06 \times 10^6$	0.278	$8.06 \times 10^6$	2,990	4,565	37.2

備考:  $1\text{kgf}/\text{cm}^2=0.098\text{MPa}$

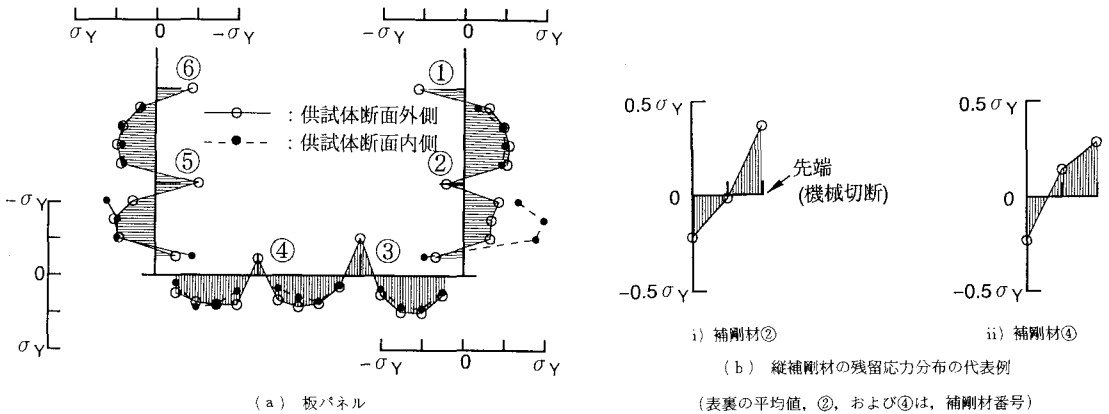


図-4 残留応力分布 (圧縮残留応力を正)

## (2) 残留応力の測定

溶接組立に伴って発生する残留応力は、薄肉箱形断面の終局強度に影響を及ぼす要因の一つである。そこで、耐荷力実験用供試体と同一断面、および同一溶接条件の残留応力測定用供試体を一体製作し、残留応力を測定した。図-4には、その結果を示す。なお、残留応力の測定は、同図に示す箱形断面の半分の部分について行った。

この図より、板パネルには、最大で  $0.5\sigma_Y$  程度の圧縮残留応力が導入されていることがわかる。この値は、実橋の補剛鋼板に含まれている値  $0.2\sigma_Y \sim 0.3\sigma_Y$  に比べて、若干、大きめの値となっている。これは、使用材料が  $3.2\text{mm}$  と薄い鋼板を採用したためと思われる。なお、圧縮残留応力が大きく一見、自己平衡になってい

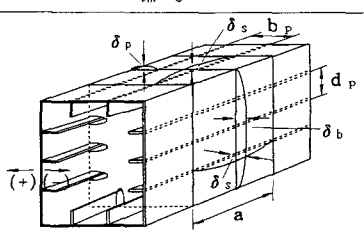
ように見えるのは、補剛材の取付け部における引張残留応力が、板パネルと補剛材の一部、およびビード断面部からなる比較的大きな切断部の平均値となっているためである。

また、縦補剛材においては、その先端部で最大  $0.25\sigma_Y$  程度の圧縮残留応力が含まれている。

## (3) 初期たわみの測定

初期たわみも、薄肉箱形断面の終局強度に影響を及ぼす要因の一つである。そこで、実験に先だって、すべての供試体の初期たわみを測定した。縦補剛材間の板パネルの初期たわみ  $\delta_b$  は、道路橋示方書<sup>8)</sup>の製作基準であるフランジの板パネル幅  $b_f$  の  $1/150$ 、あるいは腹板の板

表-5 初期たわみの最大値(絶対値)の測定結果

初期 たわみ	フランジ			腹板			備考
	$\delta_p$	$\delta_b$	$\delta_s$	$\delta_p$	$\delta_b$	$\delta_s$	
供試体名	$b_p/150$	$a/1,000$	$a/1,000$	$b_p/150$	$a/1,000$	$a/1,000$	 注:箱形断面の外側へのたわみを正とする。
$M_y-1$	0.4	1.0	-1.0	-0.8	1.5	-1.0	
T-2	0.3	0.7	1.6	0.5	2.1	1.6	
$M_yT-3$	0.3	0.6	1.3	0.3	1.7	1.3	
NT-4	0.3	1.7	1.5	0.6	2.3	1.5	
$NM_y-5$	0.3	2.4	0.9	0.5	1.0	0.9	
$NM_yT-6$	0.3	3.4	1.4	0.8	2.0	2.5	

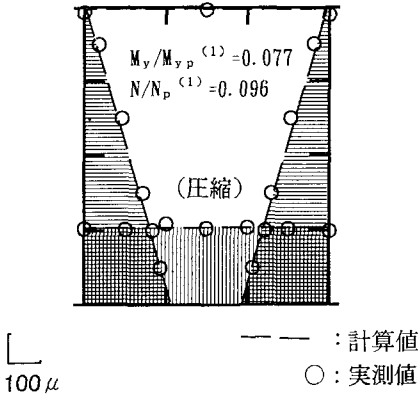


図-5 弾性範囲内における垂直ひずみ分布(供試体  $NM_yT-6$ )

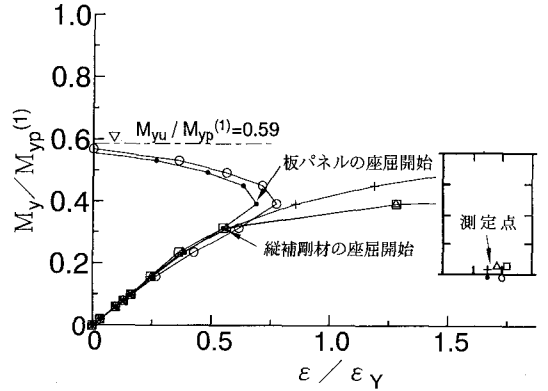


図-6 作用曲げモーメント-軸方向垂直ひずみ曲線(供試体  $NM_y-5$ )

パネル幅  $d_p$  の  $1/150$  で無次元化している。フランジ、および腹板全体の初期たわみ  $\delta_b$ 、ならびに縦補剛材の初期たわみ  $\delta_s$  については、道路橋示方書<sup>8)</sup>の柱の初期たわみ基準である  $a/1,000$  を準用して、それを用いて無次元化している。

計測結果を以上のようにして整理すると、表-5 のようにまとめられる。この表に示すように、フランジ、および腹板の板パネルの初期たわみ  $\delta_p$  については、道路橋示方書<sup>8)</sup>の製作基準を満足している。しかし、フランジ、および腹板全体の初期たわみ  $\delta_b$ 、ならびにダイアフラム間の縦補剛材の初期たわみ  $\delta_s$  については、供試体に用いた板厚が  $3.2\text{ mm}$  と薄いために、準用基準値を超えるものが多いことがわかる。

## 5. 耐荷力実験

### (1) 弾性実験

耐荷力実験に先立ち、低荷重レベルで数回の弾性実験を行い、供試体断面の軸方向垂直ひずみ、および、せん断ひずみが、所定の分布形状になることを確かめた。一例として、供試体  $NM_yT-6$  の中央断面の弾性範囲内における垂直ひずみ分布を、図-5 に示す。この図より、

実測値と計算値とは、良好に一致していることがわかる。さらに、供試体着目パネルの曲率、および、ねじり率が、所定の値になることも確認した。

### (2) 終局状態に至るまでの挙動

耐荷力実験より得られた代表的な作用断面力-ひずみ曲線から、各実験供試体の崩壊に至るまでの挙動を調べた。なお、終局強度特性については、後述の(5)以降で理論的な全塑性相関曲線、および終局強度相関曲線と比較して考察を行う。

図-6には、耐荷力実験の結果の代表例として、供試体  $NM_y-5$  の作用曲げモーメント-軸方向垂直ひずみ曲線を示す。同図において、縦軸は作用曲げモーメント  $M_y$  を全塑性曲げモーメント  $M_{yp}^{(1)}$  で、また横軸は軸方向垂直ひずみ  $\epsilon$  を降伏ひずみ  $\epsilon_Y$  で、それぞれ無次元化している。同図から、 $M_y/M_{yp}^{(1)} = 0.34$  付近で下フランジの縦補剛材で柱としての曲げ座屈現象が、 $M_y/M_{yp}^{(1)} = 0.40$  付近で下フランジの板パネルに局部座屈現象が始まっていることがわかる。しかしながら、この供試体では、これらの座屈現象の開始から終局状態 ( $M_y/M_{yp}^{(1)} = 0.59$ ) に至るまでの後座屈強度がかなり大きいことがわかる。

表一六 座屈開始強度, および終局強度の集約表

供試体名	板パネルの座屈開始強度	縦補剛材の柱としての曲げ座屈開始強度	縦補剛材の局所的な横倒れ座屈開始強度	面外せん断による縦補剛材の座屈開始強度	終局強度
M <sub>y</sub> -1	M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.68	M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.58	M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.87	—	M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.95
T-2	T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 1.05	—	—	*	T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 1.10
M <sub>y</sub> T-3	M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.66 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.66	*	*	*	M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.77 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.78
NT-4	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.38 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.64	*	*	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.48 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.80	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.52 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.85
NM <sub>y</sub> -5	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.24 M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.40	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.21 M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.34	*	—	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.36 M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.59
NM <sub>y</sub> T-6	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.44 M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.33 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.33	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.45 M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.34 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.34	*	*	N/N <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.53 M/M <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.40 T/T <sub>p</sub> <sup>(1)</sup> = 0.40

備考 — : 座屈現象が発生しなかったもの。

\* : ゲージを貼付した付近で座屈現象が発見できなかったもの。

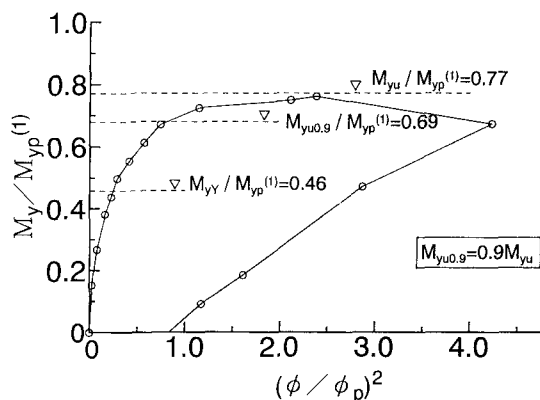
表一六は、座屈現象が始まる強度を座屈開始強度と定義し、各耐荷力実験により得られた作用断面力-ひずみ曲線より、板パネルの局部座屈開始強度、ならびに補剛材の曲げ座屈開始強度、横倒れ座屈開始強度、および面外せん断による座屈開始強度の値を読み取り、終局強度とともにまとめたものである。

なお、座屈開始強度は、供試体の表裏に貼付したひずみゲージの値に差異が生じ始めた点を作用断面力-ひずみ曲線から読み取ったものである。表中の座屈の種類のうち、縦補剛材の柱としての曲げ座屈については縦補剛材先端と板パネルのひずみゲージの値の差異により判断し、そして縦補剛材の局所的な横倒れ座屈に関しては縦補剛材先端の表裏に貼付したひずみゲージにより判断した。

また、この表において、記号“—”は、その欄に関係する座屈現象が発生していなかったこと、また記号“\*”は、ゲージを貼付した付近で、関連する座屈が発生しなかったことを示している。

### (3) 90% 強度

作用曲げモーメント-曲率曲線、および、ねじりモーメント-ねじり率曲線において、曲率  $\phi$ 、および、ねじり率  $\theta$  が急増する点を明確にするために、曲げモーメント  $M$  と曲率の2乗  $\phi^2$ 、および、ねじりモーメント  $T$  とねじり率の2乗  $\theta^2$  との関係を調べた。その結果、若干のばらつきはあるものの、すべての供試体において、終局断面力の90%の値に達するあたりで曲率、および、ねじり率が急増し始めることがわかった。以下、この点に相当する断面力を90%強度という。



図一七 M<sub>y</sub>- $\phi^2$  曲線 (供試体 M<sub>y</sub>T-3)

本研究で対象としているような薄肉補剛箱形断面部材を実構造物に用いる場合、その部材は、曲率、および、ねじり率が急増し始める最高断面力の90%付近でほぼ機能を失うと考えられるため、その状態を実用的な意味での1つの限界状態とした。

図一七には、代表例として供試体 M<sub>y</sub>T-3 の M<sub>y</sub>- $\phi^2$  曲線を示すが、終局断面力の90%の値に達するあたりで曲率が急増し始めていることがわかる。ここに、 $\phi_p$  は、弾性微小変位解析において、全塑性曲げモーメント  $M_p$  に対応する曲率である。

### (4) 座屈変形, および残留変形

図一八には、供試体 NM<sub>y</sub>-5 の中央断面下フランジのたわみ分布の変化状況の一例を示す。

同図より、ねじりが主に作用する供試体 T-2、および

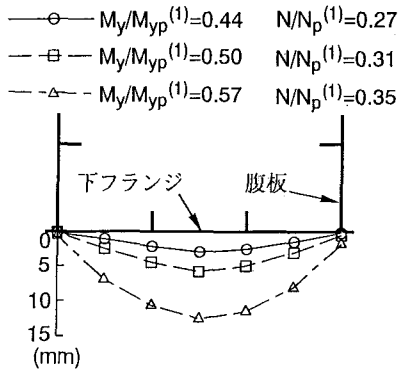


図-8 たわみ波形の変化 (供試体  $NM_7-5$ )

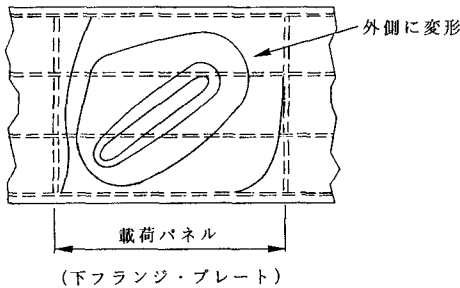


図-9 残留変形のスケッチ (供試体  $NM_7T-6$ )

$NT-4$ においては、終局状態に至るまで、ほとんど座屈変形が生じなかった。しかし、その他の供試体では、同図に示すように、補剛板パネル全体の座屈変形が顕著に現れた。

また、図-9には、一例として、耐荷力実験終了後の供試体  $NM_7T-6$  の下フランジの残留変形を示している。ねじり、および、ねじりを含む組合せ断面力を受ける供試体においては、同図に示すように、ねじりによるせん断力により、座屈変形の稜線が補剛板パネルの対角線方向を向く傾向を示した。しかしながら、終局状態においては曲げ、および圧縮による補剛板パネル全体の座屈波形を示し、また残留変形は終局状態における座屈変形とかなり相異していた。

### (5) 曲げ・ねじり耐荷力曲線の検討

ここでは、曲げ、および、ねじりの耐荷力曲線<sup>6),7)</sup>の妥当性を、実験により得られた終局強度と比較することにより、検討する。さらに、道路橋示方書<sup>8)</sup>に基づく許容強度曲線と、実験により得られた座屈開始強度・終局強度とを比較することにより、許容強度曲線の妥当性についても、若干の考察を行う。

なお、以降、下添字“ $u$ ”の付く断面力は、終局断面力を表すものとする。

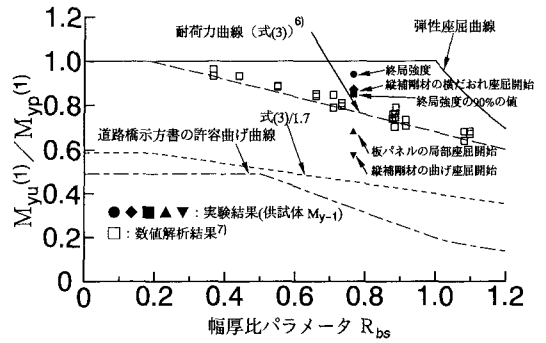


図-10 実験による種々の強度限界と耐荷力・許容曲げ曲線との比較 (供試体  $M_7-1$ )

#### a) 純曲げを受ける場合 (供試体 $M_7-1$ )

純曲げが作用する場合の箱形断面梁の局部座屈強度の指標である幅厚比パラメーター  $R_{bs}$  は、フランジと腹板との幅厚比パラメーター  $R_f$ 、および  $R_w$  に、それぞれ断面の中立軸回りのフランジ、および腹板の補剛板としての断面二次モーメント  $I_{fs}$ 、および  $I_{ws}$  を乗じ、文献6)で提案されている次式の重み付き平均値として求めた。

$$R_{bs} = \frac{I_{fs}R_f + I_{ws}R_w}{I_{fs} + I_{ws}} \quad (1)$$

ここに、上式における  $I_{fs}$ 、および  $I_{ws}$  は、具体的に次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} I_{fs} &= \frac{bd^2t}{4} + n_f h_s t \left( \frac{d-h_s}{2} \right)^2 \\ I_{ws} &= \frac{d^3t}{12} + h_s t \sum_{i=1}^{n_w} \Delta_i^2 \end{aligned} \right\} \quad (2) a, b$$

さらに、上式における  $\Delta_i$  は断面の中立軸から腹板に配置されている縦補剛材の図心までの距離であり、また  $h_s$  は縦補剛材の突出幅である。

以上のようにして求めた幅厚比パラメーター  $R_{bs}$  と終局曲げモーメント  $M_{yu}^{(1)}/M_{yp}^{(1)}$  との関係について考察する。

図-10には、供試体  $M_7-1$  の座屈開始強度、および終局強度の実験値をプロットしてみた。

また、図中には、文献6)で提案されている以下の曲げ耐荷力曲線も示してみた。

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_u^{(1)}}{M_p^{(1)}} &= 1.0 : (R_{bs} \leq 0.188) \\ &= -0.393 R_{bs} + 1.074 \\ & : (0.188 < R_{bs} \leq 1.20) \end{aligned} \right\} \quad (3) a, b$$

同図からわかるように、実験により得られた終局強度、および90%強度は、式(3)の曲げ耐荷力曲線から求まる強度を上回っている。また、同式は、本実験結果と比較して安全側の強度を評価している。これは、文献6)において比較的大きな初期たわみと残留応力とを用い

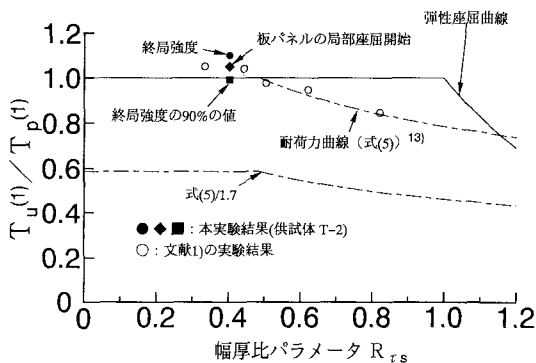


図11 実験による種々の強度限界と耐力力・許容ねじり曲線との比較 (供試体 T-2)

て、安全側の耐力力曲線を導いているためである。

また、板パネル、および縦補剛材の座屈開始強度は、式(3)の曲げ耐力力曲線に比して、かなり低い値となっている。これは、この実験供試体の板パネルに、比較的大きな圧縮残留応力が存在していたためと考えられる。しかし、これらの座屈開始強度は、道路橋示方書<sup>9)</sup>に基づく許容曲げ強度曲線、および式(3)の曲げ耐力力曲線を安全率1.7で除した許容曲げ強度曲線のどちらをも上回っていることがわかる。

なお、上記の安全率の値1.7は、荷重のばらつき、施工誤差をも含んだものであるが、一応の目安として本実験を評価する耐力力曲線にも用いることとした。

#### b) 純ねじりを受ける場合 (供試体 T-2)

純ねじりを受ける補剛箱形断面の幅厚比パラメータは、文献12)の考え方を適用し、以下のようにして求める。

いま、薄肉補剛箱形断面の終局ねじりモーメント  $T_u^{(1)}$  (kgf·cm) は、次式で与えられるものとする。

$$T_u^{(1)} = 2\tau_u b d \quad (4)$$

ここに、 $\tau_u$  は、周辺単純支持の補剛板パネルの終局せん断応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>) であり、文献13)で提案されている耐力力曲線を用いるものとする。すると、ねじりを受ける薄肉補剛箱形断面の耐力力曲線は、次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{T_u^{(1)}}{T_p^{(1)}} &= 1.0 : (R_{rs} \leq 0.486) \\ &= (0.486/R_{rs})^{0.333} \\ &: (0.486 < R_{rs} \leq 2.0) \end{aligned} \right\} \quad (5) a, b$$

上式中の幅厚比パラメータ  $R_{rs}$  は、次式で求められる。

$$R_{rs} = \sqrt{\frac{\tau_Y}{\tau_{cr}}} \quad (6)$$

ここに、

$$\tau_Y = \frac{\sigma_Y}{\sqrt{3}} : \text{せん断降伏応力度 (kgf/cm}^2\text{)}$$

$\tau_{cr}$  : 補剛板全体、および補剛材間の板パネルの弾性せん断座屈応力度 (kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>12)</sup> のうちの最小値とする。

したがって、終局ねじりモーメント  $T_u^{(1)}$  は、幅厚比パラメータ  $R_{rs}$  を用いて算定することができる。

式(5)の耐力力曲線と本実験結果、および文献1)~3)の実験結果を、ともに図11にプロットしてみた。

この図より、今回対象とした断面は、ねじり座屈によって耐力力が低下しない領域 ( $R_{rs} \leq 0.486$ ) にあり、ねじりに対しては、全断面有効としてよいことがわかる (式(7)の  $K_T=1$ )。また、実験により得られた終局ねじりモーメント、および90%強度は、式(5)、および式(6)から求まる耐力力曲線をもほぼ上回っていることがわかる。もちろん、これらの実験値は、この耐力力曲線を安全率1.7で除した許容ねじり強度曲線を上回っている。

#### (6) 終局強度相関曲線の検討

局部座屈を考慮した終局強度相関曲線は、圧縮、曲げ、および、ねじりがそれぞれ単独に作用した場合の終局断面力、それぞれに対応する全塑性断面力の代わりに用いれば、近似的に全塑性相関曲線に一致することが文献1)~3)で明らかにされている。

いま、各終局断面力の無次元量を、次のように置く。

$$\left. \begin{aligned} K_\sigma &= \frac{N_u^{(1)}}{N_p^{(1)}} \\ K_{\gamma_b} &= \frac{M_{\gamma u}^{(1)}}{M_{\gamma p}^{(1)}} \\ K_T &= \frac{T_u^{(1)}}{T_p^{(1)}} \end{aligned} \right\} \quad (7) a \sim c$$

すると、これら無次元断面力は、全塑性断面力に対する低減係数であるとも考えることができる。

これらの低減係数  $K_\sigma$ 、 $K_{\gamma_b}$ 、および  $K_T$  は、それぞれ圧縮、曲げ、および、ねじりが作用する薄肉補剛箱形断面の幅厚比パラメータ  $R_{fms}$  (式(10)参照)、 $R_{bs}$  (式(1)参照)、ならびに  $R_{rs}$  (式(6)参照) の関数として表現できるものとする。ちなみに、これらの幅厚比パラメータは、すべて降伏点と弾性座屈強度との関数である。

ただし、ねじり荷重も同時に作用する薄肉補剛箱形断面の終局断面力  $N_u$ 、および  $M_{\gamma u}$  を求める際に用いる幅厚比パラメータは、文献6)にしたがって、降伏点を、ねじりによるせん断力の存在により、見かけ上  $K_B \sigma_Y$  と低減して求めるものとした。ここに、 $K_B$  は、全塑性ねじりモーメント  $T_p^{(1)}$  によるせん断応力度  $\tau_p$  を用い、von Mises の降伏条件式にしたがって、次式のように導



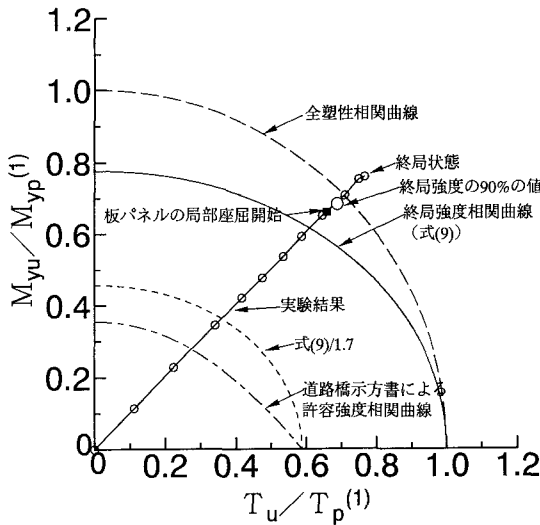


図-12 実験結果と許容・終局強度相関曲線との比較 (供試体  $M_yT-3$ )

かれる。

$$k_\beta = \sqrt{1 - \left[ \frac{\tau_u}{\tau_p^{(1)}} \right]^2} = \sqrt{1 - \left[ \frac{T_u}{T_p^{(1)}} \right]^2} \quad (8)$$

なお、ひずみ硬化現象により、 $T_u$  が組合せ断面力下の全塑性状態におけるねじりモーメント  $T_p$  より大きくなる場合、式 (8) の  $T_u$  には、 $T_p$  を用いるものとする。

ここでは、上記のようにして得られる終局強度相関曲線の妥当性を、実験により得られた終局強度と比較することにより検討している。さらに、道路橋示方書<sup>8)</sup>に基づく許容強度相関曲線と、実験により得られた座屈開始強度・終局強度とを比較することにより、現行の道路橋示方書<sup>9)</sup>の許容強度相関曲線の妥当性についても若干の考察を行う。

a) 曲げとねじりを受ける場合 (供試体  $M_yT-3$ )

曲げとねじりを受ける終局強度相関曲線は、文献 1)~3) によると、次式で与えられる。

$$\left[ \frac{1}{K_{yb}} \frac{M_{yu}}{M_{yp}^{(1)}} \right]^2 + \left[ \frac{1}{K_\tau} \frac{T_u}{T_p^{(1)}} \right]^2 = 1.0 \quad (9)$$

上式の終局強度相関曲線、および全塑性相関曲線 ( $K_{yb} = K_\tau = 1.0$ ) を、供試体  $M_yT-3$  の実験結果とともに図-12 に示す。

同図より、実験から得られた終局強度、および 90% 強度は、終局強度相関曲線のみならず全塑性相関曲線から求まる値をも上回っていることがわかる。これは、降伏点として 0.2% 耐力を用いたが、使用鋼材の応力-ひずみ関係に起因して、ひずみ硬化現象が顕著に現れたためと思われる (図-3 参照)。

また、板パネルの局部的な座屈開始強度も終局強度相関曲線の値を上回っていることがわかる。

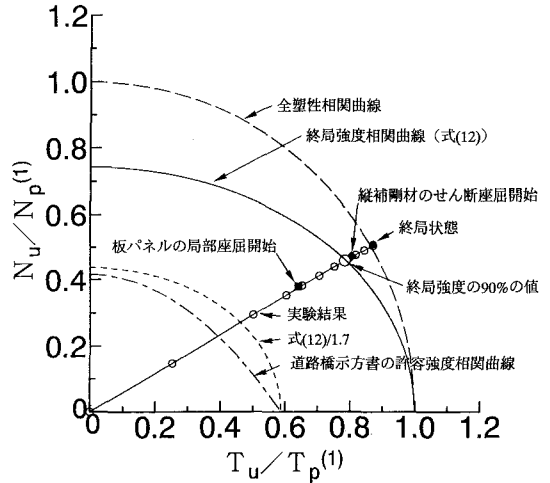


図-13 実験結果と許容・終局強度相関曲線との比較 (供試体  $NT-4$ )

b) 圧縮とねじりを受ける場合 (供試体  $NT-4$ )

純圧縮を受ける薄肉補剛箱形断面の幅厚比パラメーター  $R_{fws}$ 、および純圧縮を受ける補剛箱形断面の終局強度と幅厚比パラメーターとの関係は、文献 6) によると、それぞれ以下の式 (10)、および式 (11) で表される。

$$R_{fws} = \frac{R_f + R_w \frac{A_{ws}}{A_{fs}} \frac{\sigma_{wY}}{\sigma_{fY}}}{1 + \frac{A_{ws}}{A_{fs}} \frac{\sigma_{wY}}{\sigma_{fY}}} \quad (10)$$

$$\frac{N_u^{(1)}}{N_p^{(1)}} = 1.123 - 0.475 R_{fws} \quad (11)$$

: (0.256 <  $R_{fws}$  ≤ 1.20)

ここに、

$A_{fs}$ : 補剛フランジの断面積

$\sigma_{fY}$ : フランジの降伏点

$A_{ws}$ : 補剛腹板の断面積

$\sigma_{wY}$ : 腹板の降伏点

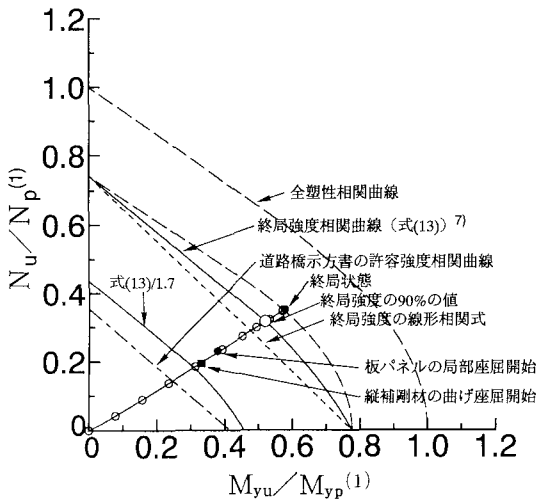
また、終局強度相関曲線は、次式のように表されるものとする<sup>3)</sup>。

$$\left[ \frac{1}{K_\sigma} \frac{N_u}{N_p^{(1)}} \right]^2 + \left[ \frac{1}{K_\tau} \frac{T_u}{T_p^{(1)}} \right]^2 = 1.0 \quad (12)$$

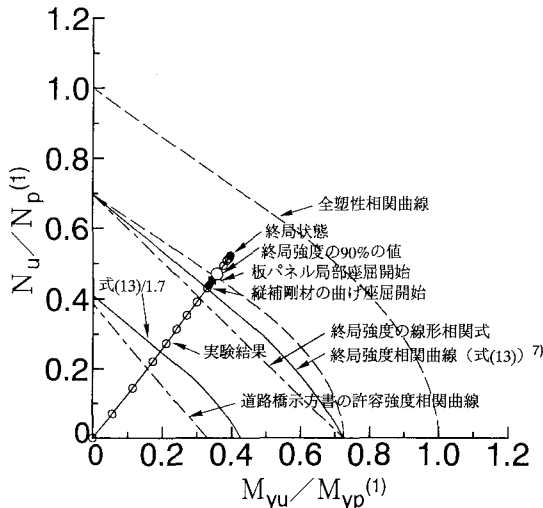
全塑性相関曲線 ( $K_\sigma = K_\tau = 1.0$ ) と式 (12) の終局強度相関曲線、および供試体  $NT-4$  の実験結果を比較したものを、図-13 に示す。

この場合も、図-12 に示した曲げとねじりとの組合せの場合と同様に、実験による終局強度、および 90% 強度は終局強度相関曲線を上回り、また終局強度についてはほぼ全塑性相関曲線上に位置していることがわかる。これは、供試体  $M_yT-3$  の場合と同様に、材料特性に起因するひずみ硬化現象が現れたためと思われる。

また、板パネルの座屈開始強度は、道路橋示方書<sup>9)</sup>に



図一14 実験結果と許容・終局強度相関曲線との比較 (供試体  $NM_y-5$ )



図一15 実験結果と許容・終局強度相関曲線との比較 (供試体  $NM_yT-6$ )

よる許容強度相関曲線，および式 (12) の終局強度相関曲線を安全率 1.7 で縮尺した許容強度相関曲線のどちらをも大きく上回っていることがわかる。

### c) 圧縮と曲げとを受ける場合 (供試体 $NM_y-5$ )

圧縮と曲げとを受ける場合の終局強度相関曲線は，文献 2) において提案されている全塑性性相関曲線式をもとに，これまでと同様の方法で得られる。

しかし，その後，文献 7) によると，構成板パネルの幅厚比が大きくなるほど，圧縮と曲げとの終局強度相関曲線は，全塑性性相関曲線に類似の曲線 ( $f_p$  (断面寸法， $\sigma_Y$ ) = 1.0) から線形相関式 ( $f_1$  (断面寸法， $\sigma_Y$ ) = 1.0)

に近づく。このことを考慮して，次式に示す終局強度相関式を提案している。

$$\beta f_p + (1 - \beta) f_1 = 1.0 \quad (13)$$

ここに，係数  $\beta$  は，式 (10) の  $R_{rms}$  の線形関数で表され，全塑性性相関曲線と線形相関式との重み付き平均値を調整する係数である<sup>7)</sup>。

上式の終局強度相関曲線と実験結果とを比較したものを，図一14 に示す。本実験による終局強度，および 90% 強度は式 (13) の終局強度相関曲線をほぼ上回っており，この終局強度相関曲線は安全側の終局強度を推定することがわかる。

また，座屈開始強度も，終局強度相関曲線を安全率 1.7 で縮尺した許容強度相関曲線，および道路橋示方書<sup>8)</sup>に基づく許容強度相関曲線のどちらをも上回っていることがわかる。

### d) 圧縮，曲げ，および，ねじりを受ける場合 (供試体 $NM_yT-6$ )

圧縮，曲げ，および，ねじりを同時に受ける場合の終局強度相関曲線は，式 (13) においてねじりの影響を考慮することにより得られる。すなわち，ねじりによるせん断力により，降伏点が見かけ上， $K_\beta \sigma_Y$  に低減されると考える。

以上のようにして求めた終局強度相関曲線を，全塑性性相関曲線，および供試体  $NM_yT-6$  の実験結果と比較して図一15 に示す。この図より，実験により得られた終局強度，および 90% 強度は，終局強度相関曲線を上回っていることがわかる。

また，座屈開始強度は，終局強度相関曲線，終局強度相関曲線を安全率 1.7 で縮尺した許容強度相関曲線，および道路橋示方書<sup>8)</sup>に基づく許容強度相関曲線から求まる値のいずれをも上回っていることがわかる。

## 6. ま と め

組合せ断面力を受ける 6 体の薄肉補剛箱形断面供試体を用いた実験的研究より得られた主な結論は，以下のようにならめられる。

(1) 若干のばらつきはあるものの，すべての供試体において終局断面力の 90% の強度 (90% 強度) に達するあたりで，曲率，および，ねじり率が，急増し始めることがわかった。

(2) 実験において得られた終局強度，および 90% 強度は，すべて，文献 6)，および 7) で提案されている終局強度相関曲線より求まる強度を上回っている。これは，これらの文献において比較的大きな初期たわみと残留応力とを用い，安全側の終局強度相関曲線を導いているためである。

(3) 終局強度の実験値は，終局強度相関曲線より求ま

る強度を大きく上回るものもあった。これは、使用鋼板の材料特性に起因するひずみ硬化現象が現れたためと考えられる。

(4) 板パネルに比較的大きな圧縮残留応力が存在していたと思われる実験供試体において、実験により得られた局部座屈開始強度は、終局強度相関曲線より求まる強度を下回った。しかし、すべて道路橋示方書に基づく許容強度相関曲線は、上回ることがわかった。

(5) 本実験により得られた局部座屈開始強度は、すべて、終局強度相関曲線を1.7で縮尺した許容強度相関曲線より求まる強度をも上回る。

謝辞：本実験を行うに当たり、阪神高速道路公団・神戸第2建設部の南荘 淳氏、同・大阪管理部西林彦彦氏、川崎重工（株）鉄構事業部・西部橋梁設計部の迫田治行氏、尾立圭己氏、および当時、大阪市立大学大学院生の原田直樹氏（現、新日本製鉄（株））の協力を得た。ここに記して、深謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 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に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 34 A, 土木学会, pp. 221-231, 1988年3月.
- 2) 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断面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, Vol. 36 A, 土木学会, pp. 89-100, 1990年3月.
- 3) 北田俊行, 中井 博, 國廣昌史, 岸田和人: 圧縮, 2軸曲げ, および, ねじり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, Vol. 37 A, 土木学会, pp. 73-82, 1991年3

月.

- 4) 宇佐美勉, 福本啓士, 青木徹彦, 松川昭夫: 補剛箱形断面偏心圧縮柱の強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第350号, pp. 197-205, 1984年10月.
- 5) Nakai, H., T. Kitada and T. Miki: An Experimental Study on Ultimate Strength of Thin-Walled Box Stub-Columns with Stiffeners Subjected to Compression and Bending, *Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng.*, Vol. 2, No. 2, pp. 87-97, October 1985.
- 6) 大阪市立大学・工学部・土木工学科・橋梁工学研究室, 川崎重工工業（株）・鉄構事業部・橋梁技術総括部・西部橋梁設計部, 川崎重工工業（株）・明石技術研究所・強度研究部: 組合せ断面力を受ける薄肉補剛箱形断面材の終局強度に関する研究, 報告書, 1994年3月.
- 7) 北田俊行, 中井 博, 國廣昌史, 原田直樹: 圧縮と曲げとを受ける無補剛・補剛薄肉箱形断面の終局強度相関曲線に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 40 A, 土木学会, pp. 331-342, 1994年3月.
- 8) 日本道路協会: 道路橋示方書, 同解説, II 鋼橋編, 丸善, 1994年2月.
- 9) 長大鋼橋研究委員会: アーチ橋の実績調査報告, (社) 建設コンサルタンツ協会近畿支部, 1985年8月.
- 10) 長大鋼橋研究委員会: 吊橋の実績調査報告, (社) 建設コンサルタンツ協会近畿支部, 1991年8月.
- 11) 中井 博, 村山泰男, 北田俊行: 曲げとねじりとを受ける補剛材付き薄肉箱形断面梁の極限強度に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 38 A, 土木学会, pp. 155-164, 1992年3月.
- 12) 土木学会関西支部: 鋼橋の設計と限界状態—活荷重と終局・疲労限界—, 平成3年度講習会テキスト, 6.2.1 鋼箱桁の終局限界状態の一照査法, pp. 79-92, 1991年6月.
- 13) 奈良 敬, 出口恭司, 福本啓士: 純せん断を受ける鋼板の終局強度特性に関する研究, 土木学会論文集, 392号 / I-9, pp. 265-271, 1988年4月.

(1994. 10. 31 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON BUCKLING AND ULTIMATE STRENGTH OF THIN-WALLED STIFFENED BOX MEMBERS

Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Masashi KUNIHIRO,  
Yoshio MAEGAWA and Noburu KAWAUCHI

This paper deals with an experimental study carried out to investigate the buckling strength, ultimate stress resultants and their interaction curves of thin-walled stiffened box members due to local buckling. Six specimens of stiffened box members subjected to various combinations of compression, bending and torsion have been tested by using an experimental apparatus.