

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

EXPERIMENTAL STUDY ON INTERACTION SURFACE OF ULTIMATE STRENGTH WITH LOCAL BUCKLING
OF THIN-WALLED BOX STUB COLUMNS SUBJECTED TO COMBINED RESULTANTS FORCES

中井博*, 北田俊行**, 國廣昌史***, 中村清孝****, 岸田和人*****

Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Masashi KUNIHIRO, Kiyotaka NAKAMURA and Kazuto KISHIDA

This paper presents an experimental study on the ultimate strength of thin-walled box stub columns subjected to the combinations of compression, bending and torsion. Combining these test results with proposition of the other technical papers, three ultimate strength curves for pure compression, pure bending and pure torsion are proposed. An interaction surface for predicting the resultants forces at the ultimate state of thin-walled box stub columns is developed by using the three ultimate strength curves and the inherent interaction surface of the resultants forces at the fully plastic state of the cross section. The interaction surface at the ultimate state is verified through the 29 test results carried out in this study.

1. まえがき

斜張橋のタワーやアーチ橋のアーチリブなどには、薄肉箱形断面部材がよく用いられるが、これらには、大きな軸圧縮力の他に、曲げモーメントやねじりモーメントが組み合わさって作用する場合が多い。薄肉箱形断面部材に圧縮と曲げとが作用した場合の終局強度については、板要素の局部座屈問題も含めてかなりの研究が行われており^{1)~4)}、その特性は次第に明らかにされつつある。また、ねじり、あるいは、曲げとねじりとを受ける冷間成形された薄肉箱形断面部材(三角形断面も含む)の耐荷力については、それぞれ、Scheer-Nölke⁵⁾および Lacher-Böhm⁶⁾の実験的研究がある。しかし、溶接組立ての箱形断面部材に圧縮・曲げに加えてねじりが作用するといった複雑な組み合わせ断面力が働く場合で、局部座屈をも考慮した終局強度特性については、あまり研究がなされておらず、ほとんど明らかにされていないのが現状である。

* 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)
*** 工修	川崎重工業(株)部長	鉄構事業部・西部橋梁設計部	(〒675-01 兵庫県加古郡播磨町新島8)
****	川崎重工業(株)係長	鉄構事業部・西部橋梁設計部	(〒675-01 兵庫県加古郡播磨町新島8)
*****	大阪市立大学大学院	大学院生	(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

そこで、北田・中井・國廣・松下^{7) 8)}は、圧縮・曲げ・ねじりが同時に載荷できるN-M-T破壊実験装置を開発し、構成板パネルの最大の幅厚比パラメータ $R (= \sqrt{\sigma_Y / \sigma_{or}}, \sigma_Y$:降伏点, σ_{or} :構成板パネルの弾性座屈応力度, $k=4$)が0.7(実際に使用される橋梁部材のほぼ上限に相当)の無補剛の薄肉箱形短柱(板厚4.5mm)について、圧縮、曲げ、および、ねじりの種々の組み合わせ断面力下での耐力実験を行っている。そして、その終局強度はほぼ全塑性強度に一致すること、また局部座屈は終局強度にほとんど影響を及ぼさないことなどを明らかにしている。

本研究においては、文献7)および8)の研究を発展させ、局部座屈によって決まる終局強度相関曲面や、実際に最も多く使用される幅厚比パラメータ($R < 0.7$)を有する箱形短柱の終局強度特性について検討するために、構成板パネルの最大の幅厚比パラメータが $R=0.94$ および0.53の箱形短柱に種々の組み合わせ断面力作用させた耐力実験をN-M-T破壊実験装置を用いて実施した。

本論文では、文献7)~8)を始めとする他の文献から引用した実験結果および今回の実験結果を用いて、まず純圧縮、純曲げ、および純ねじりが単独に作用した場合の薄肉箱形短柱の局部座屈を考慮した終局強度曲線について検討を加えた。さらに、これらの終局強度曲線と全塑性相関曲面を用いて、圧縮、曲げ、および、ねじりが同時に作用する薄肉箱形短柱の終局強度相関曲面を導き、実験結果との比較、検討を行った。ただし、ここでは、斜張橋のタワーやアーチリブにおけるような、軸圧縮力の大きな箱形短柱を対象としており、箱桁のように、極めて幅厚比の大きい腹板を有する断面に曲げやせん断が作用する場合は、対象外とする。

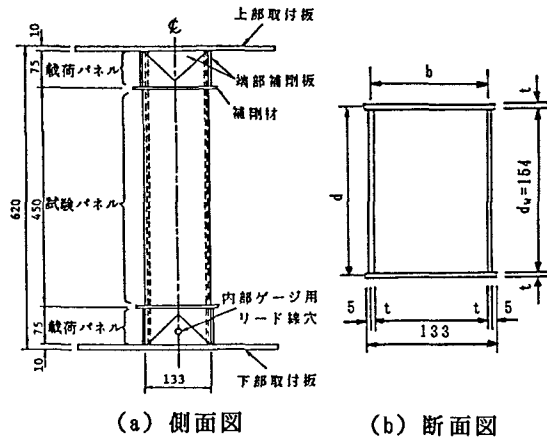


図-1 実験供試体(寸法単位:mm)

2. 実験供試体と作用断面力

2.1 供試体の設計

薄肉箱形短柱の実験供試体としては、座屈実験用に、板厚3.2mm および 6.0 mm の2種類の鋼板を用い、それぞれ10体および9体、また残留応力測定用供試体を板厚毎に各1体製作した。さらに、板厚4.5 mmの実験供試体については、文献7)の実験で用いたものと同一のものを3体追加した。したがって、板厚4.5 mmの供試体は、合計10体となった。供試体の寸法は、板厚以外すべて文献7)に準じて決定した。供試体の

断面形状と寸法、および、幅厚比パラメータを、それぞれ図-1 および図-2 にまとめた。板厚3.2mm の実験供試体の腹板の幅厚比パラメータ $R_w=0.94$ は、実績調査結果⁹⁾には見受けられず、実橋には採用され難い値であるが、局部座屈が先行する箱形断面柱の終局強度特性を明らかにするために用いた。板厚4.5mm の

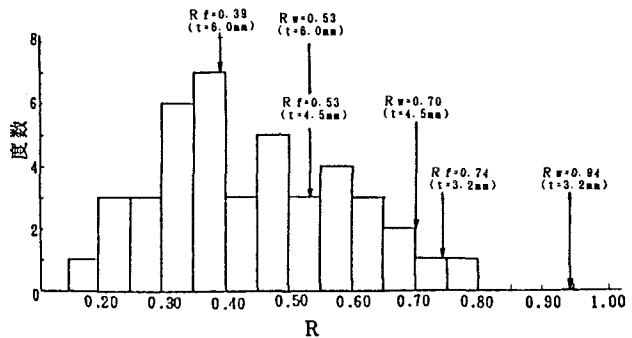


図-2 斜張橋タワーの板パネルの幅厚比パラメータ R の実績調査結果⁹⁾と、実験供試体の R との比較

供試体の腹板の幅厚比パラメータ $R_w=0.7$ は、実橋で使用される幅厚比パラメータの上限値に対応している。また、実績調査結果において最も多く用いられている幅厚比パラメータ $R=0.35\sim0.40$ に対応させて、板厚6.0mmの供試体のフランジの幅厚比パラメータ $R_f=0.39$ を定めた。

なお、供試体の制作にあたっては、腹板とフランジとの溶接部分が供試体の弱点とならないように、レ型開先溶接を採用した。

2.2 実験供試体の種類

各供試体の板厚、幅厚比パラメータ、および、それぞれの供試体に作用する断面力の組合せを表-1にまとめている。なお、この表において、 R_f 、 R_w の計算には実測の降伏点と板厚とを用いた。

表-1 実験供試体一覧表と記号

(a) その1

板厚 (mm)	幅厚比パラメータ		本数	作用断面力				
	R_f	R_w		N	T	My	Mz	NT
3.2	0.74	0.94	10	N-1 N-11	T-1	My-1	Mz-1	NT-1
4.5	0.53	0.70	10	N-2*	T-2*	My-2*	Mz-2	NT-2*
6.0	0.39	0.53	9	N-3	T-3	My-3	Mz-3	NT-3

(b) その2

板厚 (mm)	作用断面力			
	NMy	NMz	NMyT	NMzT
3.2	NMy-1	NMz-1	NMyT-1	NMzT-1
4.5	NMy-2*	NMz-2	NMyT-2* NMyT-21*	NMzT-2
6	NMy-3	NMz-3	NMyT-3	NMzT-3

*: 文献7)の実験供試体

N: 軸方向圧縮力
T: ねじりモーメント
My: 強軸まわりの曲げモーメント
Mz: 弱軸まわりの曲げモーメント

2.3 作用断面力

圧縮(N)、曲げ

(M: My; 強軸回り

、Mz; 弱軸回り)、

ねじり(T)、圧縮・

曲げ(NM)、圧縮・

ねじり(NT)、およ

び、圧縮・曲げ・ね

じり(NMT)の各組

合せ断面力下の弾性範囲

内における作用応力分

布を図-3に示す。板

厚3.2mmと6mmの供試

体では、最初に所定の

ねじりモーメント(全

塑性ねじりモーメント

T_p の1/2)を与え、それを一定に保持し、その後、圧縮と曲げの比を一定に保ちながら、荷重を漸増させ供試

体を終局状態に至らしめた。また、4.5mmの供試体については、作用させる圧縮・曲げ・ねじり荷重の比を

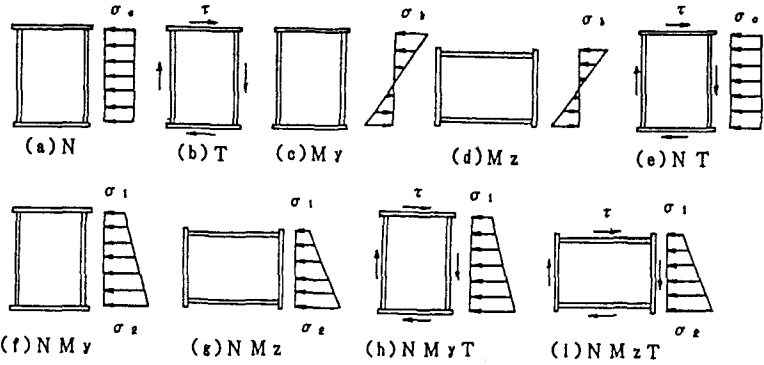


図-3 各供試体作用応力分布

所定の値に保ちながら比例載荷の条件で実験を行った。終局強度が載荷径路に若干影響を受けるものと思われるが、ここでは、このような載荷方法を採用した。しかし、載荷径路が終局強度に及ぼす効果については、今後検討を加えることが必要である。

なお、圧縮力と曲げモーメントとを同時に作用させるNMおよびNMTの実験では、 $\sigma_1 / \sigma_2 = 0.5$ (σ_1, σ_2 : それぞれ箱形断面の上縁および下縁の応力度) を目標とした。

3. 予備実験

3. 1 鋼材の引張試験

供試体の製作に用いた鋼材 (SS41) の機械的性質を調査するために、各板厚につき3体の引張試験を行った。降伏棚は見られたが、明確な降伏点が認められなかったので、各引張試験結果の0.2%耐力に相当する降伏点の平均値を、供試体の降伏点 σ_y とした。同様に、ヤング係数Eならびにポアソン比 μ の値も各試験値の平均値を用いることとした。これらの値を、各板厚に対して表-2に示す。

表-2 鋼板の機械的性質

鋼板厚 (mm)	ヤング係数 E (kgf/cm ²)	せん断弾性係数 G (kgf/cm ²)	ポアソン比 μ	降伏応力 σ_y (kgf/cm ²)	引張強さ σ_u (kgf/cm ²)
3.2 (3.19)*	2.07×10^6	8.12×10^5	0.27	2,874	4,500
4.5 (4.43)*	2.11×10^6	7.99×10^5	0.28	2,950	4,290
6.0 (5.95)*	2.05×10^6	8.26×10^5	0.28	2,900	4,040

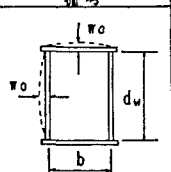
*: () 内は実測値を示す。
(1kgf/cm² = 0.098N/mm²)

3. 2 初期不整の測定

初期たわみは、薄肉箱形短柱の終局強度に影響を及ぼす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。表-3に示す初期たわみの最大値から、供試体の中には道路橋示方書の製作基準値を若干越えている腹板を有するものが1体あるのみで、残りはすべて製作基準を満足していることがわかる。なお、測定には、鋼尺 (精度1/10mm) およびトランシットを用いた。

また、供試体と同一断面・同一溶接条件の残留応力測定用供試体を用いて、その残留応力を機械的切断法によって測定した。一例として、板厚 3.2 mm と 6.0mm との供試体の測定結果を図-4に示すが、残留応力の大きさは、3体ともほぼ等しかった (板厚 4.5mmの供試体の残留応力分布については、文献7)を参照)。

表-3 初期たわみ ($w_0 / (b/150)$ あるいは $w_0 / (d_w/150)$) の最大値

供試体	flg.	web	供試体	flg.	web	供試体	flg.	web	備考 
N-1	0.3	0.9	N-2	0.7	0.7	N-3	0.7	0.6	
N-11	0.5	0.8	T-2	0.5	0.7	T-3	1.0	0.9	
T-1	0.5	0.7	My-2	0.5	0.7	My-3	—	—	
NT-1	0.5	0.3	Mz-2	0.8	1.0	Mz-3	1.0	0.9	
NMy-1	0.5	0.5	NT-2	0.9	1.1	NT-3	0.3	0.3	
NMz-1	0.5	0.7	NMy-2	0.5	0.9	NMy-3	0.6	0.3	
NMyT-1	0.9	0.7	NMz-2	0.3	0.3	NMz-3	0.9	0.2	
NMzT-1	0.9	0.7	NMyT-2	0.5	0.5	NMyT-3	0.3	0.4	
My-1	—	—	NMyT-21	0.5	0.7	NMzT-3	0.3	0.3	
Mz-1	—	—	NMzT-2	0.4	0.4				

4. 座屈実験

N-M-T破壊実験装置を用いて、文献7) に準じて座屈実験を行った。

4. 1 弾性実験

座屈実験に先立ち、低荷重レベルで数回の弾性実験を行って、供試体断面内の軸方向垂直応力、および、せん断応力が、所定の分布形になることを確かめた。

4. 2 座屈実験

通常、実構造物によく用いられる幅厚比パラメータ $R_w = 0.53$ ($t = 6\text{mm}$) の供試体は、いずれの荷重の組合せにおいても全塑性状態に達し、その後、終局状態に至った。一方、幅厚比パラメータが大きい $R_w = 0.93$ ($t = 3.2\text{mm}$) の供試体は、すべてが全塑性状態に至るまでに、局部座屈が発生し、終局状態に至った。

表-4には、終局強度の実験値をまとめた。

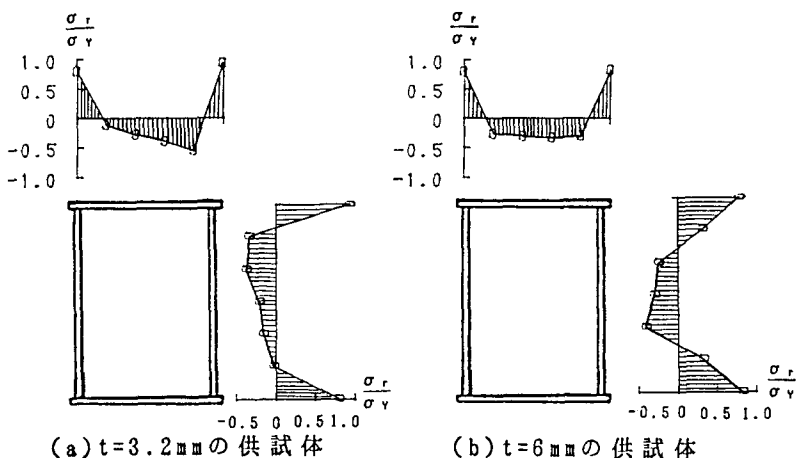


図-4 残留応力分布 (表裏の平均値)

表-4 終局強度相関曲面を用いた推定値と終局強度の実験値との比較

供試体 No.	推定値				実験値				$l_{0.05}-l_{0.95}$ (%)
	N_u/N_p	M_u/M_p	T_u/T_p	l_u	N_{ue}/N_p	M_{ue}/M_p	T_{ue}/T_p	l_{ue}	
N-1	0.794	0	0	0.794	0.838	0	0	0.838	5.497
N-11	0.776	0	0	0.776	0.774	0	0	0.774	-0.295
T-1	0	0	0.912	0.912	0	0	0.946	0.946	3.680
NT-1	0.646	0	0.53	0.836	0.668	0	0.53	0.853	1.994
My-1	0	0.958	0	0.959	0	1.043	0	1.043	8.797
Mz-1	0	0.887	0	0.888	0	0.982	0	0.982	10.621
NMy-1	0.676	0.200	0	0.705	0.686	0.201	0	0.715	1.363
NMyT-1	0.550	0.162	0.53	0.781	0.705	0.212	0.53	0.907	16.099
NMz-1	0.671	0.185	0	0.697	0.74	0.24	0	0.778	11.664
NMzT-1	0.550	0.144	0.53	0.778	0.62	0.19	0.53	0.837	7.675
N-2*	0.859	0	0	0.860	1.045	0	0	1.045	21.573
T-2*	0	0	0.967	0.967	0	0	1.041	1.041	7.609
NT-2*	0.681	0	0.589	0.901	0.798	0	0.677	1.046	16.125
My-2*	0	1.008	0	1.008	0	1.078	0	1.078	6.939
Mz-2	0	0.942	0	0.942	0	1.104	0	1.104	17.172
NMy-2*	0.730	0.214	0	0.762	0.866	0.254	0	0.902	18.502
NMyT-2*	0.683	0.219	0.315	0.784	0.812	0.261	0.37	0.930	18.513
NMyT-21*	0.607	0.181	0.551	0.841	0.718	0.214	0.621	0.973	15.746
NMz-2	0.711	0.221	0	0.745	0.8183	0.269	0	0.861	15.564
NMzT-2	0.609	0.189	0.5	0.811	0.8129	0.1774	0.5	0.971	19.722
N-3	0.937	0	0	0.937	1.031	0	0	1.031	10.020
T-3	0	0	1.002	1.002	0	0	1.052	1.052	4.975
NT-3	0.812	0	0.5	0.954	0.9456	0	0.5	1.070	12.157
My-3	0	1.039	0	1.039	0	1.13	0	1.130	8.757
Mz-3	0	0.993	0	0.994	0	1.12	0	1.120	12.727
NMy-3	0.791	0.233	0	0.825	0.9116	0.2211	0	0.938	13.698
NMyT-3	0.721	0.145	0.5	0.889	0.8577	0.2026	0.5	1.013	13.915
NMz-3	0.784	0.223	0	0.816	0.8227	0.2644	0	0.864	5.869
NMzT-3	0.740	0.105	0.5	0.900	0.764	0.1412	0.5	0.924	2.700
T-4**	0	0	0.800	0.800	0	0	0.8473	0.847	5.876
T-5**	0	0	0.967	0.967	0	0	0.9761	0.976	0.900
My-4**	0	0.879	0	0.880	0	0.9147	0	0.915	4.005
My-5**	0	1.008	0	1.008	0	1.0286	0	1.029	2.046

*: 文献 7)による実験供試体

** : 文献 19)による実験供試体

表中、終局状態における圧縮力 N_{ue} 、曲げモーメント M_{ue} 、および、ねじりモーメント T_{ue} は、それぞれに対応する全塑性軸力 N_p 、全塑性曲げモーメント M_p 、および全塑性ねじりモーメント T_p で無次元化している。また、3軸直角座標における原点から着目点迄の距離 ℓ_{ue} は

$$\ell_{ue} = \sqrt{(N_{ue}/N_p)^2 + (M_{ue}/M_p)^2 + (T_{ue}/T_p)^2} \quad \text{----- (1)}$$

で与えられる。

一例として、供試体NO. NMZ T-2の破壊状況を、図-5に示す。

5. 終局強度曲線

ここでは、4. の終局強度の実験結果を用いて、純圧縮、純曲げ、および純ねじりが、それぞれ独立に作用した場合の無補剛薄肉箱形短柱の終局強度曲線について検討する。

5. 1 純圧縮力を受ける場合

本研究で行った純圧縮力実験の結果を、それぞれ、■、△、□、および、○で示す文献10)、13)、20)、21) の実験結果、ならびに、これまでに提案されている代表的な終局強度曲線とともに、図-6に示す。縦軸は、終局圧縮力 N_u を全塑性軸力 N_p で除して無次元化した値であり、横軸は、次式で定義される箱形短柱に対する幅厚比パラメータ R_{fw} をとっている¹⁰⁾。すなわち、

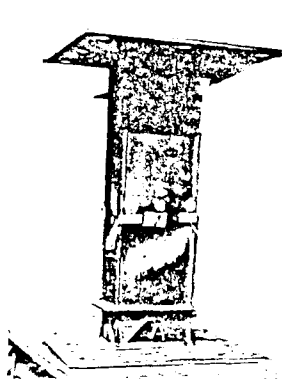


図-5 供試体 No. NMZ T-2 の破壊状況

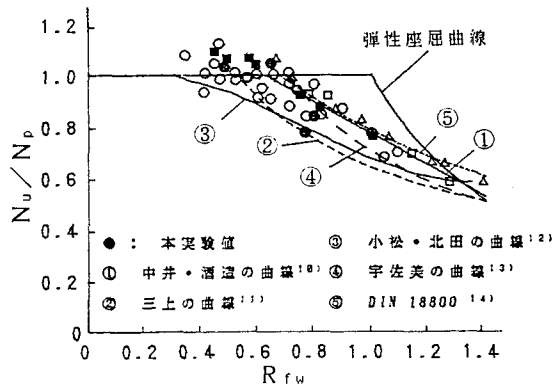


図-6 終局軸方向圧縮力と幅厚比パラメータ R_{fw} との関係

$$R_{fw} = \sqrt{\sigma_y / \sigma_{cr, fw}} = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{K_{fw}\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad \text{----- (2)}$$

ただし、 $0.5 \leq R_f/R_w \leq 2.0$

ここに、

$$K_{fw} = \frac{(\alpha_f + 1/\alpha_f)^2 + (d/b)(\alpha_w + 1/\alpha_w)^2}{1 + (b/d)^2} \quad \text{----- (3)}$$

：フランジプレートを基準にした箱形短柱の座屈係数 ($t_f = t_w$ の場合)

$$\alpha_f = a/b, \quad \alpha_w = a/d \quad \text{----- (4) a, b}$$

$$a = b \left\{ \frac{1 + (d/b)^3}{1 + (b/d)} \right\}^{1/4} \quad \text{----- (5)}$$

： $\sigma_{or, fw}$ を最小にする座屈モードの半波長

$\sigma_{or, fw}$ ：箱形短柱の弾性座屈応力度

t_f ：フランジプレートの板厚

b, d ：腹板およびフランジプレートの中心線間距離

μ ：ポアソン比

E ：ヤング係数 ($= 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)

R_f, R_w ：フランジプレートおよび腹板の幅厚比パラメータ

図-6より、小松・北田の曲線③が、多くの実験結果のほぼ下限値を押えていることがわかる。この曲線は、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} N_u/N_p &= 1.0 & , R_{fw} \leq 0.3 \\ &= 0.542R_{fw}^3 - 1.249R_{fw}^2 + 0.412R_{fw} + 0.968 & , 0.3 < R_{fw} < 1.3 \end{aligned} \quad \text{----- (6) a, b}$$

なお、この耐荷力曲線に対して、実験結果の平均値は10.2%上に位置し、標準偏差は 0.102であった。

5. 2 純曲げを受ける場合

純曲げ実験の結果を、図-7に示す。縦軸は、終局曲げモーメント M_u を全塑性曲げモーメント M_p で無次元化した値であり、横軸は、次式で定義される純曲げの幅厚比パラメータ R_b をとっている。すなわち

$$R_b = \sqrt{\sigma_y / \sigma_{or, b}} \quad \text{----- (7)}$$

ここに、 $\sigma_{or, b}$ は、箱断面梁が純曲げにより弾性座屈を起こす時の圧縮フランジの応力度であり、文献15)に従って計算した。最小2乗法により、安全側の終局強度曲線（平均値-2倍の標準偏差、標準偏差0.041）として、以下の回帰式が得られる。

$$M_u/M_p = -0.392 R_b + 1.220, \quad 0.2 \leq R_b \leq 0.65 \quad \text{----- (8)}$$

この式 (8)を図-7中にプロットしたが、同式は、実験値の下限値によく適合していることがわかる。

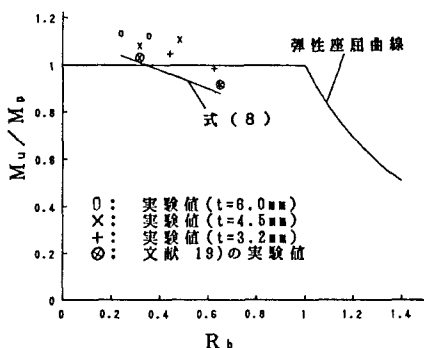


図-7 終局曲げモーメントと幅厚比パラメータ R_b との関係

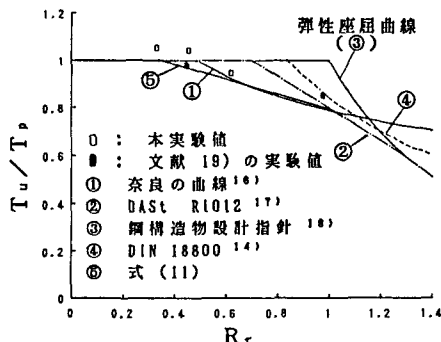


図-8 終局ねじりモーメントと幅厚比パラメータ R_r との関係

5. 3 純ねじりを受ける場合

純ねじり実験の結果を、図-8に示す。純ねじりを受ける箱形断面の終局強度に関しては研究成果が少なく、まだ十分明らかにされていないのが現状である。ここでは、縦軸は、終局ねじりモーメント T_u を全塑性ねじりモーメント T_p で無次元化した値を示し、横軸は、純ねじりを受ける箱形断面の幅厚比パラメータ R_τ をとっている。ここに、 R_τ は、

$$R_\tau = \sqrt{\tau_y / \tau_{cr, w}} = \frac{d}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k_\tau \pi^2}} \sqrt{\frac{\tau_y}{E}} \quad \text{----- (9)}$$

で定義されるもので、本研究においては、箱形断面の幅厚比パラメータが最大となる構成板パネルの値、すなわち腹板の値を用いている。さらに、

τ_y : 降伏せん断応力度 ($\tau_y = \sigma_y / \sqrt{3}$)
 $\tau_{cr, w}$: 腹板の弾性せん断座屈応力度
 k_τ : 純せん断を受ける周辺単独支持板の座屈係数

$$\left. \begin{aligned} k_\tau &= 4.00 + 5.34 (b/a)^2, \quad a/b \leq 1 \\ &= 5.34 + 4.00 (b/a)^2, \quad a/b > 1 \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (10) a, b}$$

a/b : 腹板のアスペクト比

なお、参考のため図には純せん断を受ける周辺単独支持板を対象として過去に提案されている種々の終局強度曲線をも合わせて示す。

図-8において、①～④の終局強度曲線では、それらを下回る実験値が存在するため、最小2乗法によって回帰し、以下に示すような安全側の終局強度式（平均値-2倍の標準偏差，標準偏差 0.021）を作成した。

$$T_u/T_p = -0.314 R_\tau + 1.109, \quad 0.3 \leq R_\tau \leq 1.0 \quad \text{----- (11)}$$

式(11)を図-8に示すが、同式は、実験値の下限值によく適合していることがわかる。

6. 組合せ断面力による終局強度相関曲面

箱形断面短柱の局部座屈を考慮した近似的な終局強度相関曲面は、全塑性相関曲面を基にして、5.で検討した、純圧縮、純曲げ、および純ねじりのそれぞれの終局強度曲線を用いて、以下のように導くことができる。

6. 1 全塑性相関曲面

軸圧縮力、曲げモーメント、および、ねじりモーメントを受ける箱形断面短柱の全塑性相関曲面は、その断面固有の N_p 、 M_p および T_p の関数として定義される。これについては文献 7) で詳述されているので、ここでは、結果の式のみを示す。すなわち、

①中立軸が腹板内にある場合 ($N_u \leq K_\beta A_w \sigma_y$) :

$$\overline{M}^* = 1 - \frac{1}{1 + \frac{2A_x d}{A_w d_w}} \left(1 + \frac{A_x}{A_w} \right)^2 \overline{N}^{*2} \quad \text{----- (12) a}$$

②中立軸がフランジプレート内にある場合 ($N_u > K_\beta A_w \sigma_y$) :

$$\overline{M}^* = \frac{1}{1 + \frac{2A_x d}{A_w d_w}} \frac{2(A_x + A_w) d_x}{A_w d_w} (1 - \overline{N}^*) \quad \text{----- (12) b}$$

ここに、 d : フランジプレートの中心間距離

d_x : 箱形断面の高さ

d_w : 腹板の幅

A_x, A_w : それぞれフランジおよび腹板の断面積

さらに、

$$\overline{N}^* = \frac{N_u}{K_\beta N_p} = \frac{N_u}{N_{p,eq}}, \quad \overline{M}^* = \frac{M_u}{K_\beta M_p} = \frac{M_u}{M_{p,eq}} \quad \text{----- (13) a, b}$$

$$K_\beta = \sqrt{1 - (T_u/T_p)^2} \quad \text{----- (14)}$$

K_β は、ねじりモーメントによるせん断応力の存在による見かけ上の降伏点の低下を考慮するための低減係数である。

6. 2 終局強度相関曲面

上で示した相関曲面は、全塑性状態を終局状態と考えたものであり、構成板パネルの局部座屈が問題とならない箱断面に対して有効である。 $R_w = 0.7$ の供試体では、この全塑性相関曲面と実験結果とは、よく合致することが確認されている⁷⁾。しかし、全塑性に至る前に局部座屈が生じ、これが最終強度に影響を及ぼすような断面に対しては、全塑性相関曲面は適用できない。

局部座屈を考慮した終局強度相関曲面は、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幅厚比パラメータで低減される各終局強度曲線を用いて、全塑性相関曲面から拡張することができる。いま、

$$K_\sigma = N_u / N_p, \quad K_b = M_u / M_p, \quad K_\tau = T_u / T_p \quad \text{----- (15) a, b, c}$$

と置けば、これらは5. で示した各終局強度曲線における縦軸の無次元化強度であり、全塑性断面力に対する低減係数と考えることができる。これらの低減係数を用いると、局部座屈、および、ねじりモーメントの影響を考慮した等価終局軸力 $N_{p,eq1}$ 、等価終局曲げモーメント $M_{p,eq1}$ 、および、等価終局ねじりモーメント $T_{p,eq1}$ は、次のように近似される¹⁹⁾。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} N_{p,eq1} &= K_\sigma K^*_\beta N_p \\ M_{p,eq1} &= K_b K^*_\beta M_p \\ T_{p,eq1} &= K_\tau T_p \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (16) a, b, c}$$

ここに、 K^*_{β} は、ねじりによるせん断応力の存在とともに、さらに局部座屈の発生による見かけ上の降伏点の低下を考慮するための低減係数であり、

$$K^*_{\beta} = \sqrt{1 - (T_u/T_{p,eq1})^2} \quad \text{----- (17)}$$

したがって、式 (12) ～ (14) の $N_{p,eq}$ 、 $M_{p,eq}$ および T_p の代わりに、式 (14) と同様に $T_{p,eq1}$ に関する応力低減係数 K^*_{β} を用いてそれぞれ補正した、式 (16)a ～ (16)c の $N_{p,eq1}$ 、 $M_{p,eq1}$ 、 $T_{p,eq1}$ を用いれば、圧縮、曲げ、および、ねじりが同時に作用する薄肉箱形断面短柱の終局強度相関曲面が導ける。本研究では、終局強度曲線としては、5. における検討をふまえて、純圧縮に対しては小松・北田の曲線式 (6)、純曲げに対しては式 (8)、そして純ねじりに対しては式 (11) を用いることとする。

6. 3 終局強度相関曲線と実験結果との比較

各供試体の断面寸法、降伏応力、および荷重条件のもとで、6. 2 で導いた終局強度相関曲面上における、それぞれに対応する全塑性断面力で無次元化した終局強度を、推定値として表-4 に示す。なお、3 軸直交座標における原点から着目迄の距離 ℓ_u は

$$\ell_u = \sqrt{(N_u/N_p)^2 + (M_u/M_p)^2 + (T_u/T_p)^2} \quad \text{----- (18)}$$

で与えられ、これも合わせて表-4 に記載したが、またこれと実験結果を比較したのが図-9 である。

さらに、一つの終局強度相関面（一般化された終局相関面）で実験値をプロットするため、6. 2 で求めた終局強度 N_u 、 M_u 、 T_u を、また、座屈実験において供試体が終局状態に達した時の断面力 N_{ue} 、 M_{ue} 、 T_{ue} を、等価終局断面力で無次元化した。すなわち、

$$\bar{N} = N_u / N_{p,eq1}, \quad \bar{M} = M_u / M_{p,eq1}, \quad \bar{T} = T_u / T_{p,eq1} \quad \text{----- (19)a, b, c}$$

$$\bar{N}_e = N_{ue} / N_{p,eq1}, \quad \bar{M}_e = M_{ue} / M_{p,eq1}, \quad \bar{T}_e = T_{ue} / T_{p,eq1} \quad \text{----- (20)a, b, c}$$

ここで、 $\bar{N}$ 、 $\bar{M}$ 、 $\bar{T}$ を推定値と呼ぶこととする。

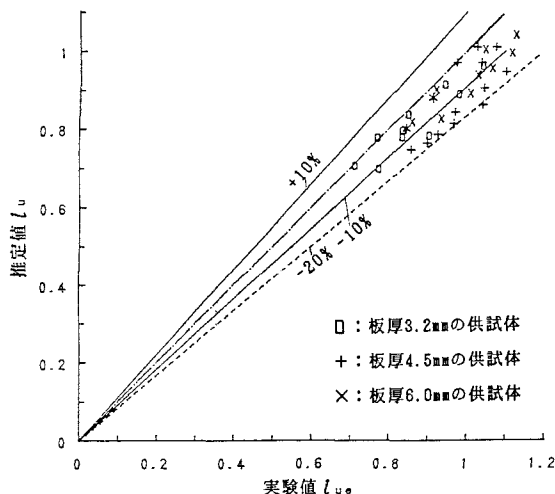


図-9 終局強度の推定値と実験結果との比較

これらを図-10、11に示す。図-9～11からも明らかなように、実験結果は、それに対応する本終局強度相関曲面上の点の少し外側に位置しており、その誤差は最大で20%の精度であった。初期たわみや残留応力などの初期不整を考えると、本終局強度相関曲面は、組合せ断面力を受ける箱形断面短柱の終局強度を、実用上安全側に評価できることが明らかとなり、その有用性が確かめられた。

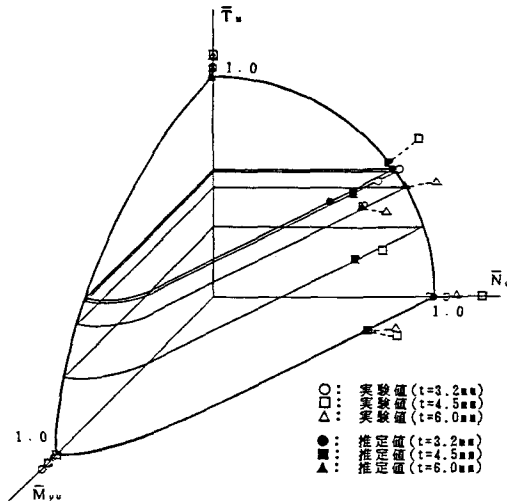


図-10 一般化された終局強度相関曲面と実験結果との比較（強軸曲げ）

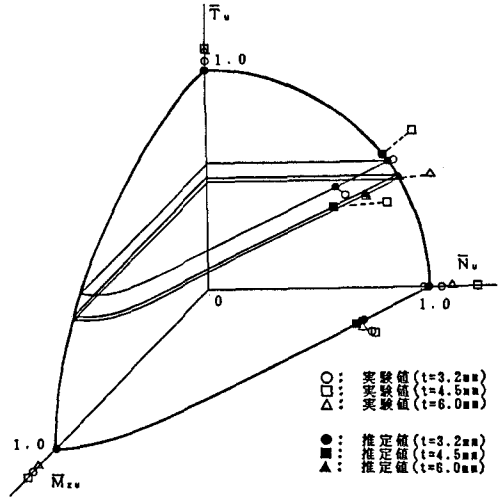


図-11 一般化された終局強度相関曲面と実験結果との比較（弱軸曲げ）

7. まとめ

本研究で得られた主な結論をまとめると、以下のようになる。

- (1) 通常、実構造物によく用いられる、幅厚比パラメータ $R_w = 0.53$ (板厚6mm)の供試体は、いずれの荷重の組合せにおいても全塑性に達し、その後、終局状態に至った。
- (2) 一方、幅厚比パラメータが大きい $R_w = 0.94$ (板厚3.2mm)の供試体は、座屈実験の結果、すべてが全塑性に至らずに終局状態を迎えた。
- (3) 箱形断面短柱の終局強度曲線については、次のことがいえる。
 - ① 純圧縮のみを受ける場合は、小松・北田の曲線式 (6) が多くの実験値の下限值によく適合していた。
 - ② 純曲げを受ける場合については、実験値の下限值を与えるものとして、式 (8) を得た。
 - ③ 純せん断を受ける場合は、実験値の下限值を与えるものとして、式 (11) を得た。
- (4) 軸圧縮、曲げ、および、ねじりの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を提案した。
- (5) この終局強度相関曲面と実験値とを比較したところ、本相関曲面は、終局強度を安全側に評価し、実験値との誤差は最大で約20%であることがわかり、本相関曲面の有用性が確かめられた。

なお、本研究において、川崎重工業株式会社技術研究所の大南亮氏、および、 $t = 3.2\text{mm}$ の供試体の実験を行うに当たり、当時大阪市立大学工学部学生 秋田精治氏（現 野村証券㈱）の協力を得たことを付記し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Nakai, H., Kitada, T. and Miki, T.: Interaction Curve of Thin-Walled Box Stub-Column Subjected to Compression and Bending for Applying to Overall Buckling Analysis of Columns, Proc. of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 2, No. 2, October 1985, pp. 65 ~ 73
- 2) Nakai, H., Kitada, T. and Miki, T.: 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, October 1985, pp. 87 ~ 97
- 3) 宇佐美勉・土屋信洋・大谷恭弘・福本嘯士: 薄板集成短柱の弾塑性有限変位解析, 土木学会論文報告集, 第362号/I-4, 1985. 10, pp. 293 ~ 302
- 4) 宇佐美勉・福本嘯士・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/I-2, 1984. 10, pp. 197 ~ 205
- 5) Scheer, J. und Nölke, H.: Traglastversuche an torsionsbelasteten dünnwandigen Kastenträgermodellen, Bauingenieur, 51 Jahrg., Heft 10, 1976, S. 381 ~ 386
- 6) Lacher, G. und Böhm, M.: Traglastversuche an dünnwandigen Kastenträgermodellen mit kombinierter Biegemomenten- und Torsionsbeanspruchung, Bauingenieur, 56 Jahrg., Heft 2, 1981, S. 45 ~ 54
- 7) 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実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 34A, 1988. 3, pp. 221 ~ 231
- 8) Kitada, T., Nakai, H. and Kunihiro, M.: Ultimate Strength of Box Stub Columns under Combined Actions of Compression, Bending and Torsion, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 13, Nos. 2 & 3, 1989, pp. 153 ~ 168
- 9) (社)建設コンサルタンツ協会近畿支部: 斜張橋の実績調査報告, 1982. 5
- 10) 中井 博・北田俊行・酒造敏廣: 圧縮を受ける薄肉箱形短柱の終局強度特性と終局強度算定法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 31A, 1985. 3, pp. 65 ~ 77
- 11) 三上市蔵・堂垣正博・米沢 博: 連続補剛板の非弾性圧縮座屈, 土木学会論文報告集, No. 298, 1980. 6, pp. 17 ~ 30
- 12) 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ついて, 土木学会論文報告集, Vol. 270, 1978. 2, pp. 1 ~ 14
- 13) 宇佐美勉・福本嘯士・青木徹彦: 溶接箱形断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No. 308, 1981. 4, pp. 47 ~ 58
- 14) DIN 18800, Teil 2, Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken, Entwurf, 1980. 11
- 15) 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. 8, pp. 8 ~ 13
- 16) 奈良 敬・出口恭司・福本嘯士: 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. 4, pp. 265 ~ 271
- 17) Deutscher Ausschuß für Stahlbau : DASt Richtlinie 012, Beulsicherheitsnachweise für Platten, 1978. 10
- 18) 土木学会: 鋼構造設計指針, Part A, 一般構造物, 1987. 11
- 19) 中井 博・村山泰男・北田俊行・高田佳彦: 曲げとねじりを受ける薄肉箱型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. 36A, 1990. 3 (投稿中)
- 20) 宇佐美勉・福本嘯士: 鋼圧縮部材の連成座屈強度実験と有効幅理論による解析, 土木学会論文報告集, No. 326, 1982. 10, pp. 41 ~ 50
- 21) 奥村敏恵・西野文雄・長谷川彰夫: 箱形断面柱の局部座屈強度, 土木学会論文報告集, No. 205, 1972. 9, pp. 19 ~ 30

(1989年10月2日受付)