

(昭和52年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

船体横桁部材の座屈崩壊強度の一推定法

正員 田 口 義 明* 松 本 栄*

A Simple Estimation Curve for Maximum Loading Capacity of
Transverse Frame Element of Shipby Yoshiaki Taguchi, *Member* Sakae Matsumoto

Summary

The estimation of maximum loading capacity of structural member is the basic necessity for the analysis of ultimate strength of ship structure.

This paper shows the simple method of estimation for the maximum loading capacity of the member under bending moment based on officially reported test results of buckling collapse of transverse frame elements and additional tests at this time.

The method requires only elastic calculation of stress and buckling strength and the error of estimation is within about 10%, in spite of the disparity of the type of structure, stiffening member and the other factors. However, it is not applicable in case of the collapse caused by shearing force or axial force.

1 緒 言

船側構造の最終崩壊強度を推定することは非常に重要な問題であり、その解析法が種々研究されている^{1),3)}。その中でも、船側構造を骨組構造とみなし座屈関節あるいは塑性関節を用いて、従来の塑性設計法と同じ手法で崩壊荷重を求める計算法¹⁾によれば、比較的簡単に船側構造の最終強度を推定することができる。その場合、各部材の関節となる部分の最高耐荷力をあらかじめ知っておく必要がある。本論文は、各種実験値に基づいて、単一部材の最高耐荷力を弾性応力計算および弾性座屈強度計算結果だけから、簡単に推定する方法を提供しようとするものである。

まず座屈崩壊強度に関して著者らが過去に実施した実験、あるいは一般に公表されている実験結果を収集し、それらの実験ではカバーできない領域、すなわち弾性座屈荷重が面材の降伏荷重に比べてかなり大きくなる寸法(後で述べる定義に従えば $P_{cr}/P_{Y,cal.} \cong 2.5 \sim 4$)の桁材に対する座屈崩壊実験を追加実施した。試験模型には円弧型および直線交叉型の合計5体のコーナー部模型を採用した。なお収集した実験値の中には、コーナー部模型だけではなく、直線桁の曲げ試験結果も含まれている。

このような実験模型について応力計算および弾性座屈荷重計算を実施し、最高耐荷力の実験値と計算による面材の降伏荷重および弾性座屈荷重計算値との関係を検討

した。最高耐荷力は、形状、寸法、補強法、初期変形、残留応力、荷重のかかり方など多くの要因によって変化すると考えられるが、 $\pm 10\%$ 程度の推定誤差を許容するならば、最高耐荷力と面材の計算降伏荷重、弾性座屈荷重の間には近似的にある定まった関係があることが判明した。この関係は、コーナー部と直線部あるいは円弧型と直線交叉型、補強法の差を問わず、また腹板の座屈や桁の横倒れなどの変形モードの差を問わず成立している。結局、最高耐荷力は座屈強度と面材の降伏荷重に強く依存しており、その他の要因の影響は相対的に小さいものと考えられる。

これから、弾性計算による面材の応力値と座屈荷重、および材料の降伏応力が与えられれば、容易に最高耐荷力を推定することが可能となる。ただし以上の結果は、せん断力によって崩壊する場合あるいは軸圧縮力によって崩壊する場合には適用できない。

記 号

本論文で用いられる記号の意味は次の通りである。

P_{max} : 最高耐荷力

P_{cr} : 弾性座屈荷重の計算値

$P_{Y,cal.}$: 計算によって得られた面材の縦方向膜応力が材料の降伏応力に達する荷重。コーナー曲り部の面材では有効幅を考慮して応力を計算する。

σ_Y : 面材に使用した材料の降伏応力

σ : P_{max} の変動の標準偏差

* 三菱重工業(株)長崎研究所

2 横桁コーナ一部模型の座屈崩壊実験

まず今回追加実施した実験の概要を述べる。模型寸法は後の Table 3 に示されるように、面材の計算降伏荷重に比べて弾性座屈荷重が十分大きくなるように決定した。Fig. 1 から Fig. 5 に模型の形状および寸法を、Table 1 に材料の引張試験結果を、Table 2 に最高耐荷力の実験値と弾性座屈荷重および面材降伏荷重の計算値をまとめて示している。また Fig. 6 は変形状況を説明した図である。試験結果を要約すると次のようになる。

No. 1 模型：腹板の座屈強度は十分に高くなっており、Fig. 6 のように面材の局部曲げを伴った降伏によって変形が進行して最高荷重に達した。

補強材間中央位置に小さな三角形ブラケットを設けて面材の変形を拘束すれば、最高耐荷力が向上するのではないかと考えられた。それを検証するために No. 2 模型が計画された。

No. 2 模型：三角形ブラケットによって補強材間中央位置の面材の降伏は起こらなくなったが、補強材先端は snip されていたため結果的には最高耐荷力は No. 1

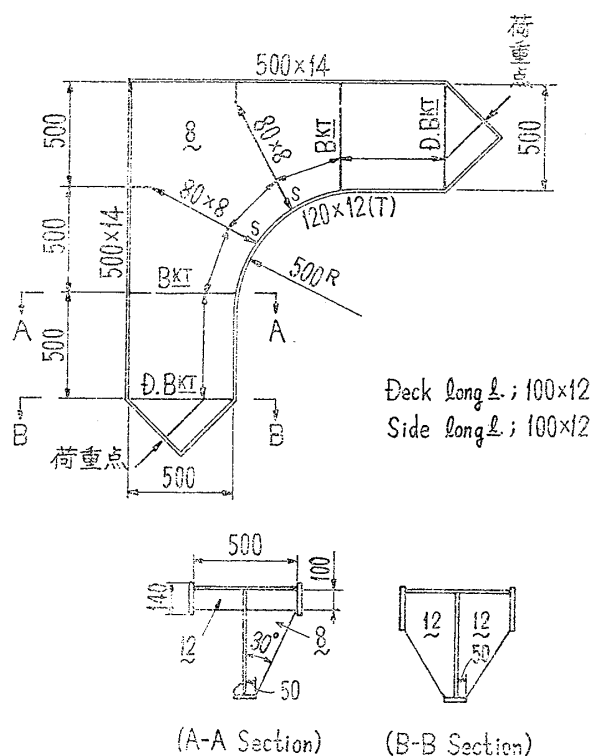


Fig. 1 No.1 test model

Table 1 Tensile test results of KAS steel plates

板厚 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	備考
8	28.5	43.7	25.4	No.1 No.2 No.3 Modelに 用いた。
	28.2	43.7	23.5	
12	27.7	43.6	29.0	
	27.4	43.9	31.3	
14	28.0	43.8	30.8	No.4 No.5 Modelに 用いた。
	27.4	43.6	28.8	
8	27.5	44.0	27.0	
	27.2	43.7	24.5	
12	27.3	43.4	26.5	
	27.2	43.4	28.0	
14	26.2	43.4	26.0	
	26.1	43.2	29.0	

Table 2 Collapse test results and calculated values of corner model

Model No.	P _{max} (ton)	P _{cr} (ton)	P _{y,cal} (ton)
1	70.0	163.8	41.8
2	72.0	163.9	43.1
3	62.0	141.9	40.4
4	76.6	138.0	55.5
5	83.2	163.9	46.0

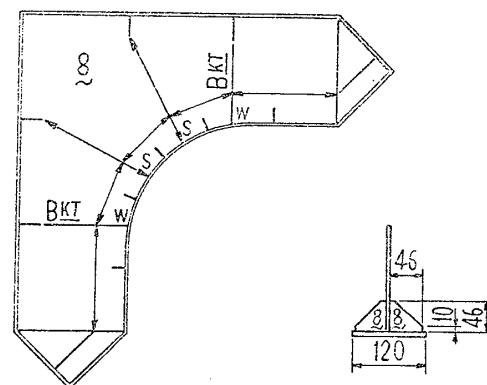


Fig. 2 No.2 test model

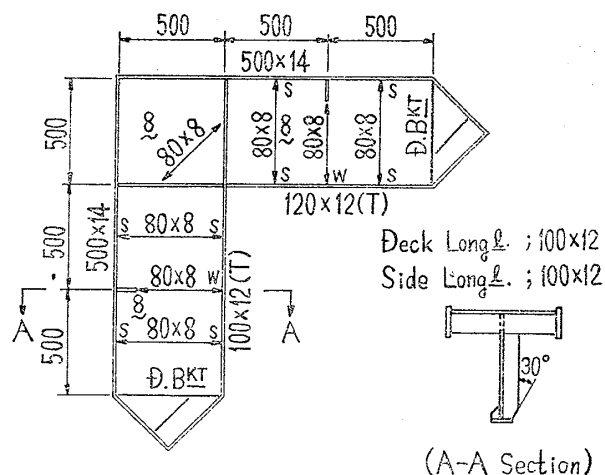


Fig. 3 No.3 test model

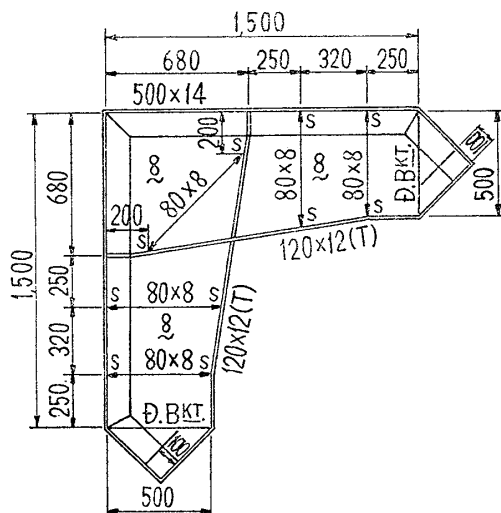


Fig. 4 No. 4 test model

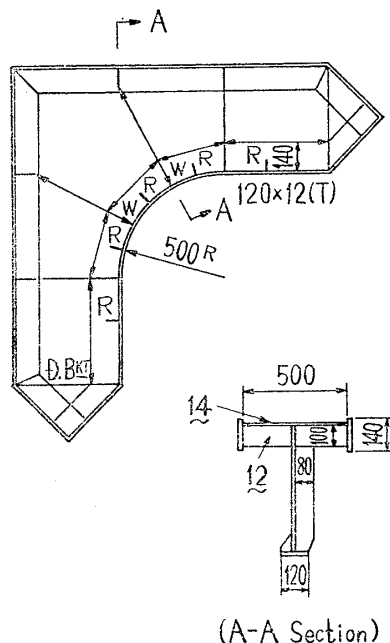


Fig. 5 No. 5 test model

模型と変わらず、面材の降伏位置が補強材先端に移っただけであった。

No. 5 模型：これは No. 2 模型の補強材先端を面材に溶接した模型である。面材の有効幅が大きくなり、局部

曲げ変形が生じにくくなったことにより約 20% 最高耐荷力が上昇している。このように面材を補強することは最高耐荷力を向上させる上で効果的であるが、面材に溶接するブラケットはかなり密に配置する必要があるようである。

No. 3 および No. 4 模型：円弧型面材に比べて直線型面材を持つコーナー部構造では、面材の有効幅低下がなく局部曲げ変形を生じにくいこと、面材は外板付縦通材に固定されるので横倒れ変形に対する抵抗が大きいと考えられることなどの特徴があり、円弧型との比較のために No. 3, No. 4 模型が計画された。No. 3 は円弧型に比べて交叉部の腹板の深さが減少しているの、それを補償するように腹板の深さに勾配をつけたものが No. 4 模型である。No. 3 模型は他の模型に比べて同一荷重に対する面材の応力が高くなるので、最高耐荷力はやや低目になっているが、高応力部分の面材の断面積を局部的に増すことによって最高耐荷力を十分に向上させることが可能であろう。従って、船倉内空間の有効利用の点で優れている No. 3 形式が、座屈崩壊強度の点でも優れていると考えられる。

Fig. 7～Fig. 9 は、別途実施した gunwale 部と strut 基部の座屈実験結果をまとめたもので、次に述べる Table 3 の中の今回の実験 (Ⅱ) に相当している。

3 横桁部材の最高耐荷力の一推定法

最高耐荷力は、構造形式、寸法、補強法、材料の降伏応力、初期変形、荷重形式など多くの要因によって変化する。腹板が座屈するとそれによって面材に局部曲げ変形を生じること、桁としての変形が急激に大きく進行し始めるのは面材の降伏がその起点になっていることなど、これまでに実施してきた種々の座屈崩壊実験の経過を念頭において上記要因による影響を考える時、最高耐荷力に大きく影響するパラメータとしては、部材の降伏強度（特に面材の降伏）と座屈強度の二点に集約されるように考えられる。

これまでに公表されている座屈崩壊実験の中には、座屈強度計算を行なったものもいくつかはあるが、計算さ

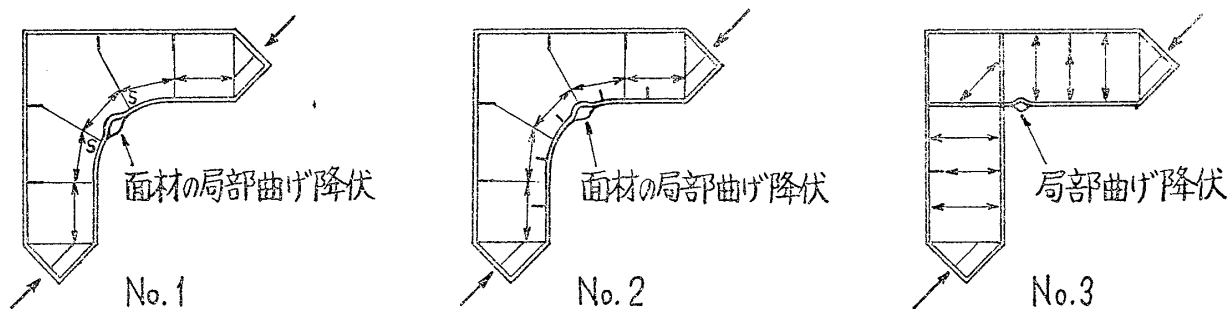


Fig. 6 Sketch of collapsed state

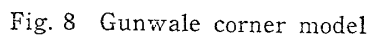
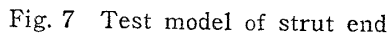


Figure 10 consists of two diagrams and two tables comparing experimental and calculated results for the buckling behavior of a tapered plate.

The top diagram shows a tapered plate with four vertical supports on the left. It displays experimental buckling patterns with dashed lines and a central region labeled "(-)". A label "F.B. がねじれ変形" (F.B. undergoes torsional deformation) points to the right edge.

	実験値	計算値
P _{cr.}	63~67 ^{TON}	73 ^{TON}
P _{max.}	84.5 ^{TON}	—

The bottom diagram shows a tapered plate with four vertical supports on the left. It displays experimental buckling patterns with dashed lines and a central region labeled "(+)". A label "F.B. が局部的に降伏・ねじれ" (F.B. undergoes local yielding and torsion) points to the right edge.

	実験値	計算値
P _{cr.}	71 ^{TON}	76 ^{TON}
P _{max.}	76 ^{TON}	—

Fig. 9 Collapse test results of strut end and gunwale corner model

ここで $P_{\max}/P_{Y, \text{cal.}}$ と $P_{\text{cr.}}/P_{Y, \text{cal.}}$ の関係を図示すると Fig.10 のようになる。実線が平均値を表わしており、一点鎖線が $\pm\sigma$ (σ : 標準偏差) の幅を表わしている。この場合の変動係数は

$$\text{變動係數} = \frac{\text{標準偏差}}{\text{平均值}} \cong 0.09$$

となっており、ほとんどの実験値が平均値に対して $\pm 10\%$ の範囲内に入っていることになる。初期変形、構造形式の違い、材料の降伏応力の変動、模型縮尺、補強法の違いなど多くの変動要因を含みながら、それらは二次的な影響を及ぼすだけで、ほぼ1本の線のまわりに実験値が集っていることは非常に興味ある結果である。

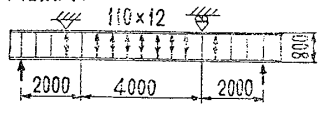
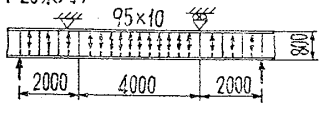
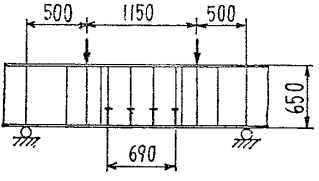
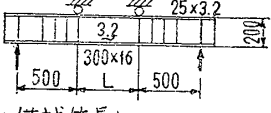
そして $\pm 10\%$ 程度の推定誤差を許容するならば、Fig. 10 の実線を用いて弾性応力および弾性座屈荷重計算値から、曲げモーメントを受ける桁材の最高耐荷力を推定することが可能であろう。またこれらの実験点によれば最高耐荷力に関する模型縮尺比の影響は小さく、実寸に近い大型模型を使用する必要はないように考えられる。

Fig. 10 では、 $P_{cr.}/P_{Y.ca1} \cong 4.0$ 以下の実験値に限定されているが、それ以上の領域ではどうなるであろうか。実験例は非常に少ないが、 $P_{max}/P_{Y.ca1}$ の値にはあ

Table 3 Summarized collapse test results and calculated values

著者	Model No.	$P_{max.}(ton)$	$P_{cr.}(ton)$	$P_{y.cal.}(ton)$	$\sigma_y (kg/mm^2)$	$P_{max.}/P_{y.cal.}$	$P_{cr.}/P_{y.cal.}$	備考
今回の実験Ⅱ 田口 松本	1	70.0	163.8	41.8	27.6	1.67	3.92	
	2	72.0	163.9	43.1	"	1.67	3.80	
	3	62.0	141.9	40.4	"	1.54	3.51	
	4	76.6	138.0	55.5	27.3	1.38	2.49	
	5	83.2	163.9	46.0	"	1.81	3.56	
今回の実験Ⅲ 田口 倉本 松本	Gunwale corner模型	76.0	76.0	101.2	28.0	0.75	0.75	
	Strut 端部模型	84.5	73.0	95.3	27.0	0.89	0.77	
SR-133 ⁽⁴⁾ 田口 川辺 中島	∅	140	74.3	183	29~32	0.77	0.41	
	F2	168	87.1	205	"	0.82	0.42	
	F1	154.8	74.5	183	"	0.85	0.41	
	M	176.4	195.2	186	"	0.95	1.05	
	S1	164.4	—	159	"	1.03	—	
	S2	176.0	80.9	223	"	0.79	0.36	
	F3	158.2	102.2	185	28.5	0.86	0.55	
SR-152 ⁽⁵⁾ 青木 直井他 (船研)	A-1	25.3	15.8	32.3		0.78	0.49	
	A-2	34.1	21.4	38.6		0.88	0.55	
	A-3	41.6	26.3	45.4		0.92	0.58	
	B-1	20.0	13.4	28.0		0.71	0.48	
	C-2	32.0	25.3	38.6		0.83	0.66	
	D-2	27.4	18.8	39.7		0.69	0.47	
	E-2	24.5	20.7	34.5		0.71	0.60	
	E-4	57.1	43.6	62.2		0.92	0.70	
堀 萩原 坂田 ⁽⁶⁾	3	5.5	6.5	8	25.0	0.69	0.81	
	5	5.5	6.6	7	"	0.79	0.94	
	7	5	7.5	6	"	0.84	1.26	
	8	15	49.0	6.7	"	2.23	7.28	
	10	6.5	7.7	6.6	"	0.99	1.17	
	11	13	47.3	6.6	"	1.97	7.17	
	15	8	10.1	11.0	"	0.73	0.92	
	44	14.8	29.0	11.0	"	1.35	2.63	

Table 3 (continued)

著者	Model No.	$P_{max.}(t.m)$	$P_{cr.}(t.m)$	$P_{y.cal.}(t.m)$	$\bar{\sigma}_y (kg/mm^2)$	$P_{max}/P_{y.cal.}$	$P_{cr}/P_{y.cal.}$	備考
SR-127 ⁽⁷⁾ 老岐 中島	T12N	79.4	109.4	77.2	28~32	1.03	1.42	T12系列;  T20系列; 
	T12SN00	76.0	"	"	"	0.98	"	
	T12SN10	73.8	"	"	"	0.96	"	
	T20NX	63.2	111.0	68.9	"	0.92	1.61	
	T20S00	57.6	"	"	"	0.84	"	
	T20S10	62.0	"	"	"	0.90	"	
SR-127 ⁽²⁾ 上田 松石 森 村川	A-1	19.5	6.7	21.5	32.3	0.91	0.31	 初期たわみを変えた実験
	A-2	17.0	"	"	"	0.79	"	
	A-3	16.1	"	"	"	0.75	"	
	A-4	15.4	"	"	"	0.72	"	
	A-5	16.8	"	"	"	0.78	"	
	A-6	18.3	"	"	"	0.85	"	
	B-1	14.8	5.8	18.2	"	0.81	0.32	
	B-2	14.3	"	"	"	0.79	"	
	B-3	11.8	"	"	"	0.65	"	
	D-1	21.5	17.4	25.8	"	0.83	0.67	
	D-2	19.7	"	"	"	0.76	"	
	D-3	19.5	"	"	"	0.76	"	
新田 ⁽⁸⁾	1	1.80	3.78	1.60	29.2	1.13	2.37	 L: 供試体長さ Vertical stiff. space: 100
	2	1.55	3.31	"	"	0.97	2.07	
	3	1.58	2.86	"	"	0.99	1.78	
	4	1.41	1.87	"	"	0.88	1.17	
	5	1.34	1.34	"	"	0.84	0.84	
	A1	2.34	4.63	1.83	33.4	1.28	2.54	
	A2	1.89	4.19	"	"	1.04	2.29	
	A4	1.90	4.19	"	"	1.04	2.29	
	B1	2.56	4.81	"	"	1.40	2.64	
	B2	2.35	4.37	"	"	1.29	2.39	
	B3	2.09	4.35	"	"	1.15	2.38	
	B4	2.25	4.35	"	"	1.23	2.38	
	C1	2.39	4.07	"	"	1.31	2.23	
	C2	2.30	4.07	"	"	1.26	2.23	

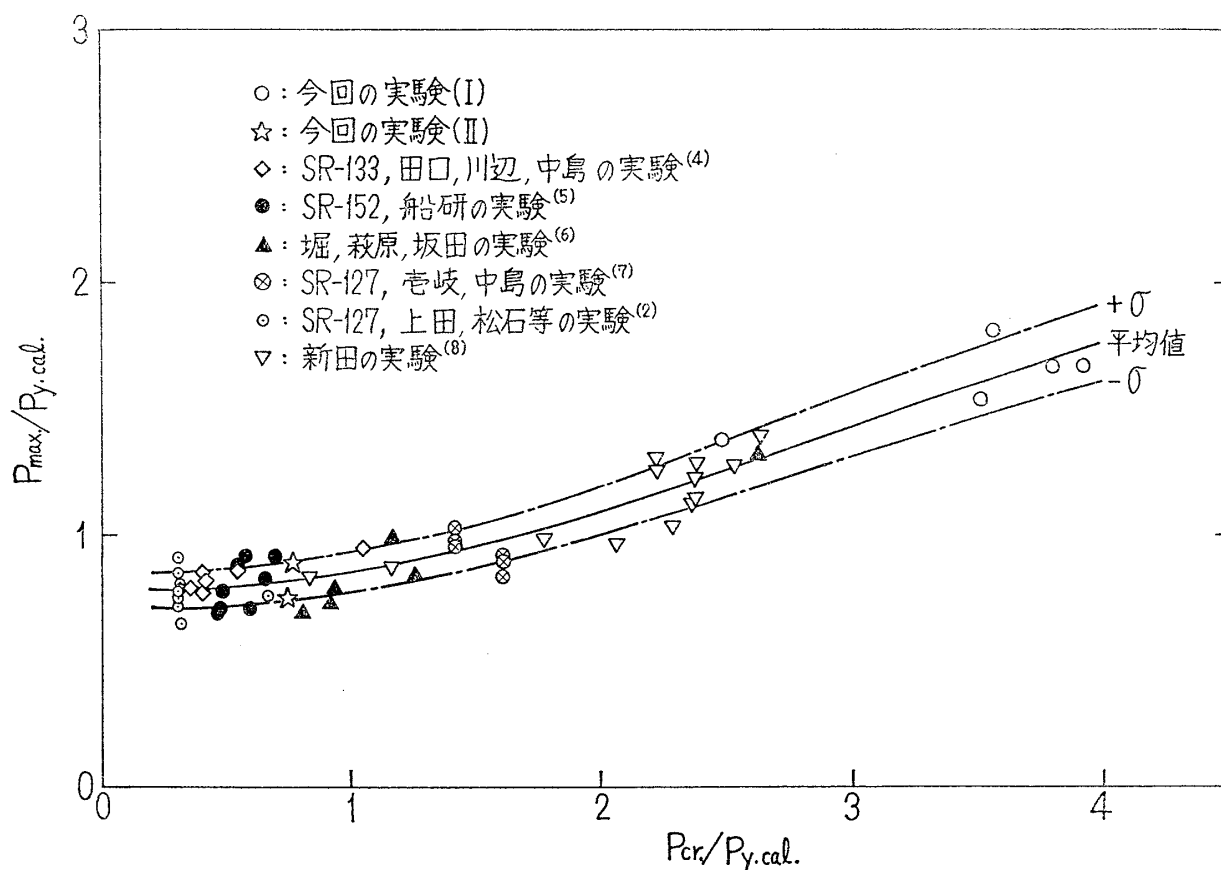


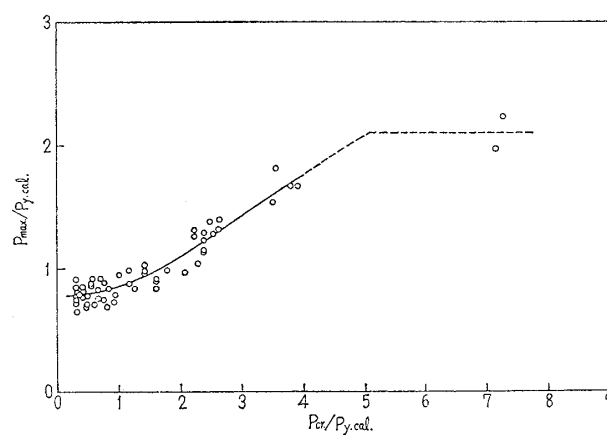
Fig. 10 Experimental curve for estimation of maximum loading capacity

る上限値があるはずであり, Fig. 11 にその例を示している。 $P_{cr}/P_{Y.cal.} \cong 7.5$ 近くの実験点は Table 3 の堀・萩原・坂田の実験の Model No. 8 および No. 11 の点であり, $P_{max}/P_{Y.cal.}$ の上限値に近いものではないかと考えられる。この上限値は塑性関節モーメントに関連していると考えられるが, 詳細な検討はなされておらず, さらに実験の追加が望まれる。ここでは一例を示すにとどめる。

4 結 論

これまでに公表されている船体横桁部材の座屈崩壊実験結果を検討し, また実験値が不足している領域については実験を追加実施し, これらの結果から曲げ荷重を受ける部材の最高耐荷力を比較的容易に推定するための一方法を提案した。これは弾性応力計算と弾性座屈荷重の計算値から推定するもので, その推定精度はほぼ $\pm 10\%$ の誤差範囲内に入っているようであり, 耐荷力の概算値を知る方法として有用ではないかと考えられる。

なお多くの大学, 研究所などで実施された実験結果を

Fig. 11 An explanation of upper limit of $P_{max}/P_{Y.cal.}$

引用させていただいたこと, それぞれの著者に対し心から御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 栖原, 肥山他: 鈦石運搬船船側構造模型の崩壊実験と解析, 西部造船会々報, 第 51 号, (昭 51-3).

- 2) 上田, 松石他: 曲げを受ける横桁の最終強度に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 139 号.
 - 3) 上田, R. Sherif: 船体最終強度解析に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第 136 号.
 - 4) 田口, 川辺, 中島: 船体横桁コーナー部の座屈崩壊に関する実験的考察, 日本造船学会論文集, 第 138 号.
 - 5) 青木, 直井他: 鉱石運搬船の横強度 (第二報), 日本造船学会論文集, 第 141 号.
 - 6) 堀, 萩原, 坂田: 塑性設計による船殻構造の検討 (第 2 報), 西部造船会々報, 第 26 号, (昭 38-9).
 - 7) 寺岐, 中島: 大型タンカーの Deck Transverse の座屈強度について, 日本造船学会論文集, 第 136 号.
 - 8) 新田: 桁板構造の最終強度に関する研究 (その 3), 日本造船学会論文集, 第 127 号.
-