

スチフナのスニップエンドの座屈実験

有田 喜久雄*・谷 政明*・藤原 幸雄*

Tests on Buckling of Snipped Stiffeners

By

Kikuo ARITA, Masaaki TANI and
Yukio FUJIWARA

Abstract

There were buckling damages caused in the snipped web of stiffeners attached to the side girders in the double bottom of bulk carriers or chip carriers several years ago. The damages were found to be caused by the deflection of side girders due to water pressure in ballast tank, while the ships were under construction or in service condition.

In the present paper tests were carried out on models of snipped stiffeners, with the object of following the buckling process. The results of the tests indicate that buckling is caused by compressive force parallel to free edge in the snipped parts, and that the buckles are restricted in local region. In the light of the results there are presented some means to prevent snipped stiffeners from buckling damage.

1. ま え が き

船体構造において、板を防撓するために用いられるスチフナの端部が、工作の都合あるいは端部の亀裂を防止するために、スニップ等によりソフトーにする場合がある。このような自由縁をもつ不連続構造部分においては、座屈が生じやすくなる。

実船においても数年前に、建造中あるいは就航後何年か経過したバルクキャリア等の船の二重底タイトガード付きスチフナのスニップ端部に、座屈損傷例がかなり報告された。その部分の構造を調べると、スチフナの取り付けられているタイトガードは、図1に示すように、二重底において燃料油タンクとバラスタタンクとを仕切るものであり、スチフナの取り付け側はバラスタタンク側になっていた。このことから、バラスタタンク内の水圧がタイトガードに作用し、タイトガードの船底、内底板およびフロアでかこまれたパネル

内のスチフナが座屈したものと思われる。

このような比較的新しい損傷報告でもわかるように、スチフナスニップ端部のような自由縁をもつ不連続構造部分の強度は今後も問題があると考えられる。

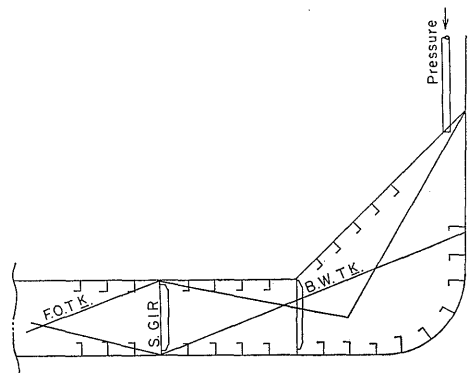


図1 二重底側桁付きスチフナ

* 船体構造部 原稿受付：昭和49年6月15日

本報告は、この問題の一つとしてガーダに取り付けられたスチフナのスニップ部分の座屈実験をおこなって、スニップ部分の強度を検討したものである。

2. 試験模型および実験の方法

2.1 試験模型

試験模型は、図2に示すようにフロアと船底外板および内底板とでかこまれたタイトガーダに相当する模型で、正方形板に両端をスニップしたスチフナが1本取り付けられている。この正方形板の周囲を枠板に溶接し、スチフナの両端はウェブのみをスニップしており、スニップ角を30°および45°とした。試験模型の寸法は実船（50,000 DWT, バルクキャリア）の1/4程度にしている。この試験模型において、スチフナのフランジ、ウェブおよびパネルの板厚を表1に示すよう

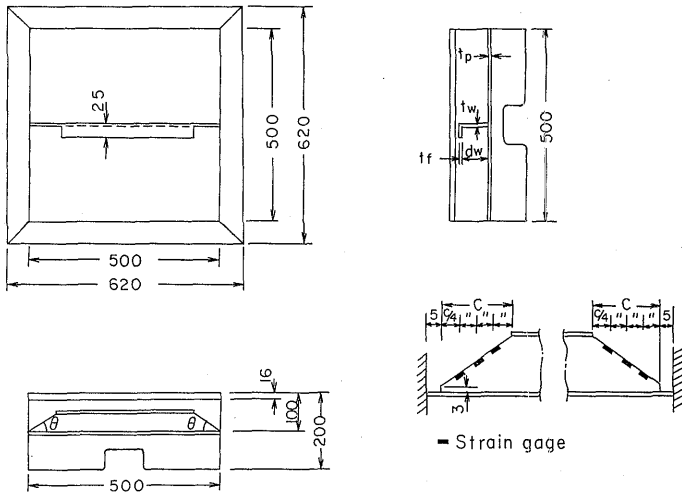


図2 試験模型

にそれぞれ変えた。試験模型の記号で、たとえば30F=3.2-2.3-3.2とあるのは、スニップ角が30°で、スチフナのフランジの板厚、ウェブの板厚およびパネルの板厚がそれぞれ3.2mm, 2.3mm および3.2mmであることを示している。Fは試験模型の種類で、特にSはウェブの深さが75mmの、弾性座屈をみるための特殊な模型である。ウェブの深さは50mmを標準寸法としている。

2.2 実験方法

実験方法としては、写真1および図3に示すように、まず試験模型のスチフナの取り付け側をふた板で密閉する。ふた板は枠板のふちにゴムのシートをはさんでクランプにより密着させる。ふた板には、変位計および歪ゲージ用の中継コネクタならびにダミーゲージ用の板が取り付けられている。中継コネクタは、エポキシ系の樹脂を溶かし込んで気密を保った。ふた板の空気取り入れ口を通してコンプレッサ（定格圧力5kg/cm²）により圧縮空気を送って、スチフナの取り付け側のパネルに圧力をくわえる。コンプレッサと空気取り入れ口との間に減圧弁と圧力計が取り付けられており、減圧弁の操作により圧力をじょじょに絞っていき、0.1kg/cm² ずつ圧力をくわえていって、各計測位置の歪および変位を測る。スチフナ両端のスニップの自由縁には、歪

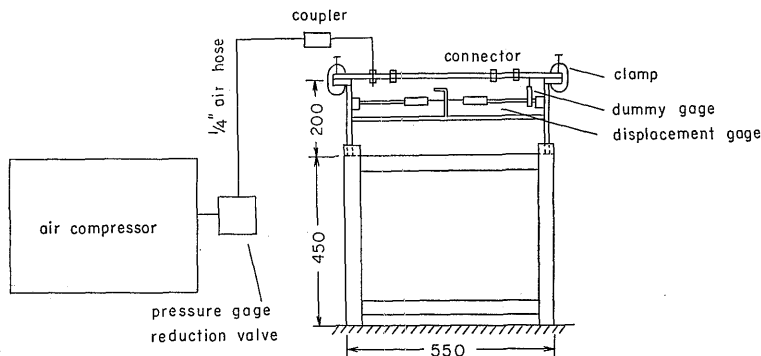
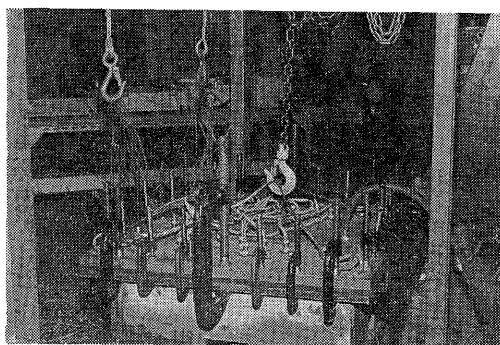
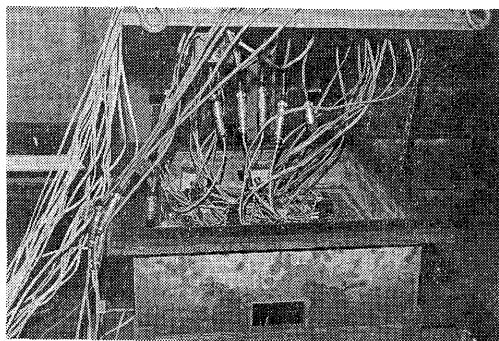


図3 実験装置



(a)



(b)

写真 1 実験装置

ゲージをウェブ板の両面に貼り、スニップの自由縁に沿った方向の歪を自由縁の4等分の位置で測った。ステフナの中央断面には、歪ゲージをステフナの長さ方向に断面の周囲に貼った。スニップ部分のウェブの面外変位を、パネルの周囲の枠板に固着した変位計により計測し、ステフナ下部の撓みを床板に固着した変位計により計測した。

3. 実験結果

実験データの一例として、試験模型30F=3.2-2.3-3.2を取り上げ、これを主にして、スニップ角 45° の場合と比較しながら以下に述べる。

スニップ部分の応力計算によると、スニップの自由縁方向の圧縮応力がスニップの強度に支配的にはたらくことがわかったので、自由縁方向の歪と荷重との関係を調べた。図4(a), (b), (c)に、スニップ部の自由縁

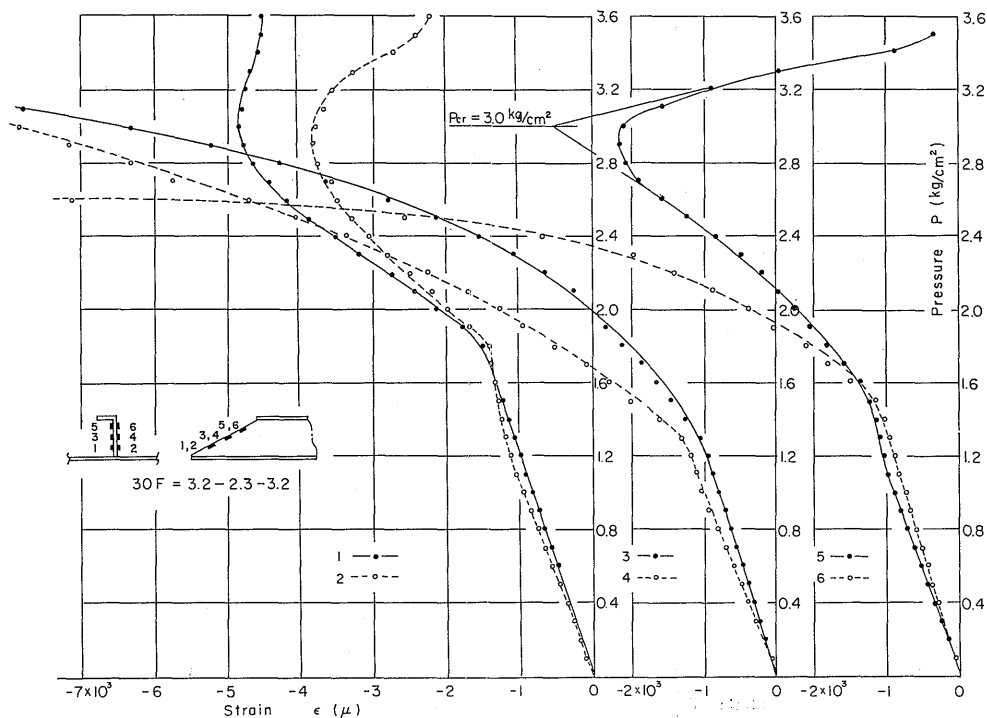


図 4 (a) スニップ部の歪-荷重曲線

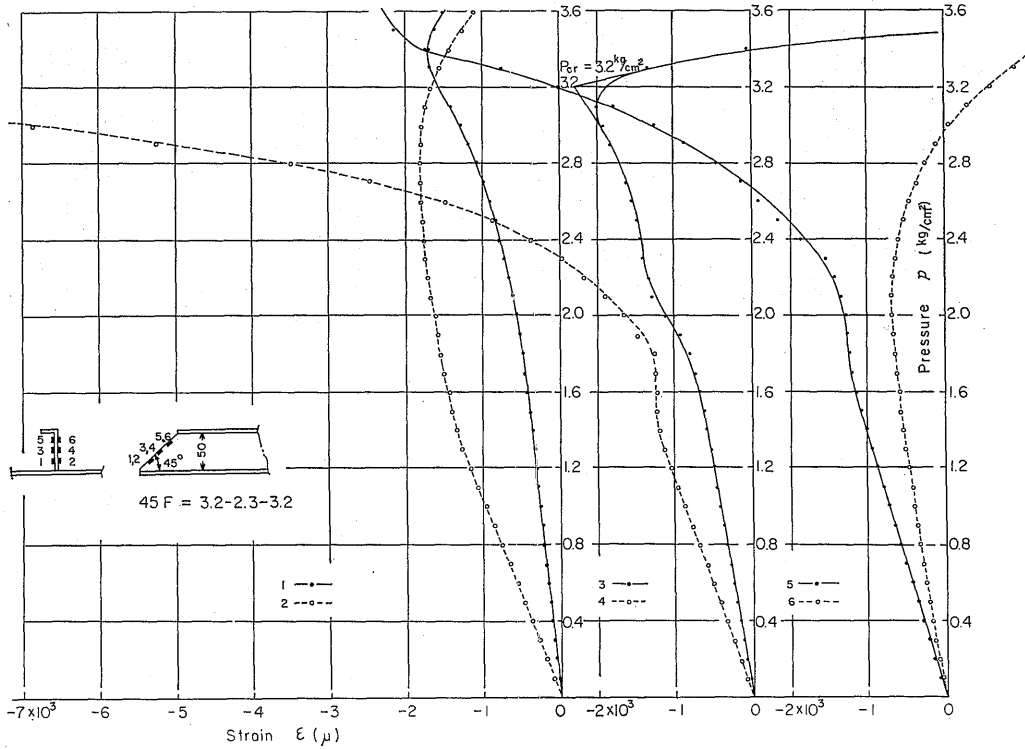


図 4 (b) スニップ部の歪-荷重曲線

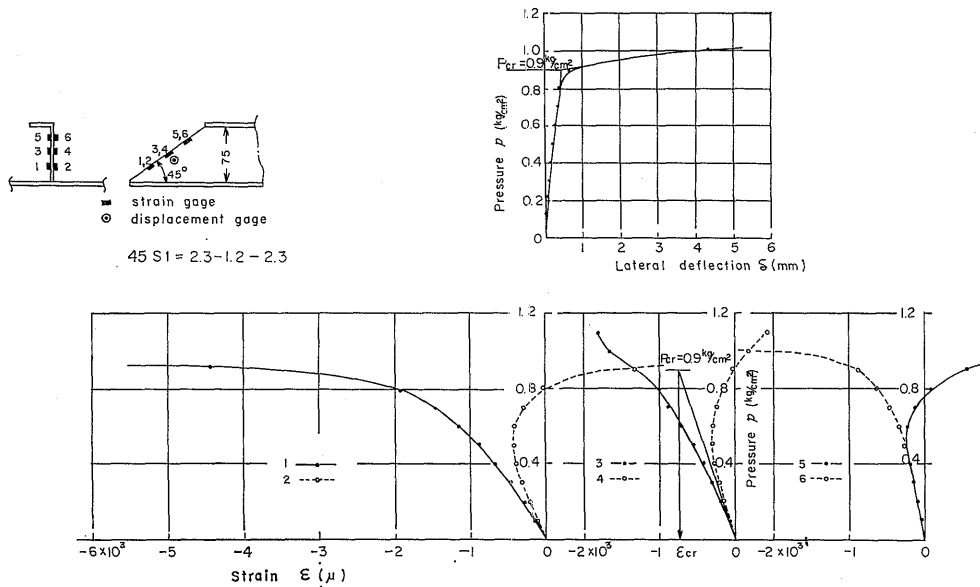


図 4 (c) スニップ部の歪-荷重曲線

方向の歪とパネルにくわわる圧力との関係を示す。図4の(a)はスニップ角 30° 、(b)はスニップ角 45° の例であり、(c)はウェブの深さが75mmの特殊な例である。圧力をくわえた最初の段階では、スニップの自由縁に沿った歪は直線的に変化していく。その歪の値は自由縁に沿ってほぼ同じ大きさになっている。歪の値を同じ圧力段階でスニップ角 30° と 45° とを比べた場合、スニップ角 45° のほうが小さくなっている。圧力をさらにくわえていき、塑性域がスニップ部に広がったところで、自由縁の中央付近でウェブ板両面の歪の反転が

顕著にみられ座屈が生じる。この傾向は、本実験に用いた特殊なSシリーズ以外の試験模型に共通してみられた。したがって、座屈荷重に達したときは、スチフナの一部分あるいはかなりの部分が塑性域に入っていることがわかる。図4(c)は、ウェブの深さを大きくしたSシリーズの試験模型の、スニップ自由縁に沿った歪と圧力との関係を示したものである。同図には、スニップ中央部のウェブ板の面外変位を別に示しているが、スニップ中央部の面外変位が急激に大きくなるところと歪の反転が顕著にあらわれるところとがほぼ一

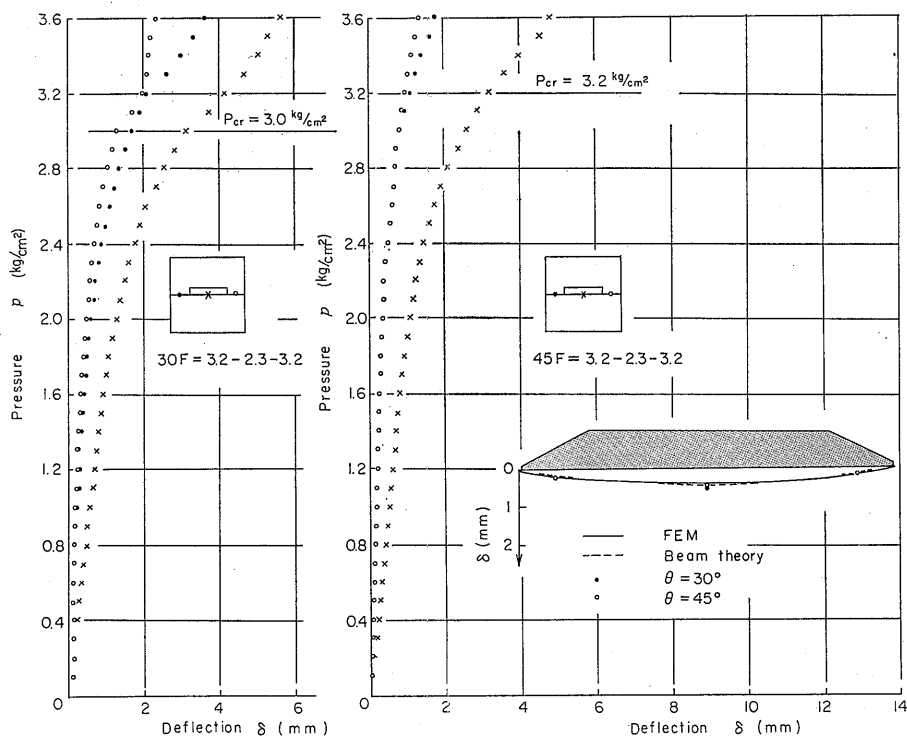


図5 スチフナの撓み

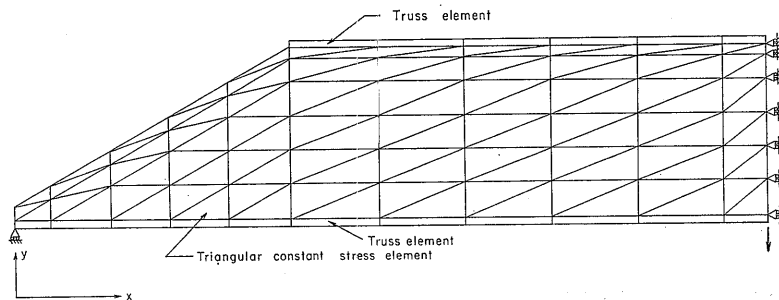


図6 スチフナの要素分割

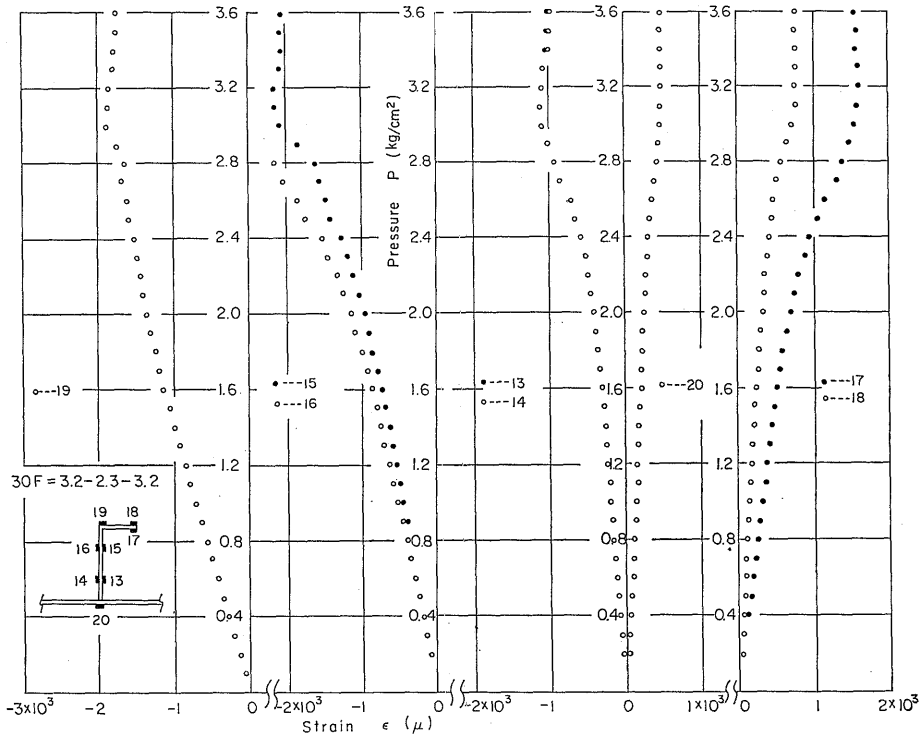


図7 スチフナ中央の歪-荷重曲線

致していたので、この値を座屈荷重とした。また、座屈荷重におけるスニップ中央の歪の値から、座屈応力値を求めた。

図5はスチフナの撓みと圧力との関係を示したものである。実験点は、スチフナの中央およびスニップの中央の位置で、スチフナとパネルの接合点の撓みを測定したものである。また同図には、圧力1 kg/cm²のときのスチフナの撓み形を示している。実線は、スチフナをパネルの半幅を有する梁とし、図6のようにモデル化して有限要素法により計算した値であり、点線は、スチフナを中央断面と同じ断面をもつ一様梁として単純梁理論によって計算した値である。計算値および実験値ともにスニップ角30°および45°について示しているが、両者はだいたい一致しており、スニップ角の影響はほとんどあらわれていない。荷重-撓みの関係を見ると、スニップの座屈荷重でスニップ下部のパネルの撓みの増加がやや大きくなるが、それほど顕著にはあらわれていない。

図7はスチフナ中央断面の歪と圧力との関係を示したものである。歪ゲージは、ウェブの深さの3等分の

位置でウェブ板両面、ウェブとパネルの接合点、ウェブとフランジの接合点およびフランジの自由縁に、それぞれスチフナの長さ方向に貼付してある。図7をみると、圧力が2 kg/cm²付近からウェブの歪の増加がやや大きくなって、歪と圧力との関係が線形関係からずれてくるが、歪は座屈荷重の3 kg/cm²付近でもそれほど急激に大きくならず、むしろ停留する傾向にある。

図8は、歪と圧力とが直線関係にある範囲において

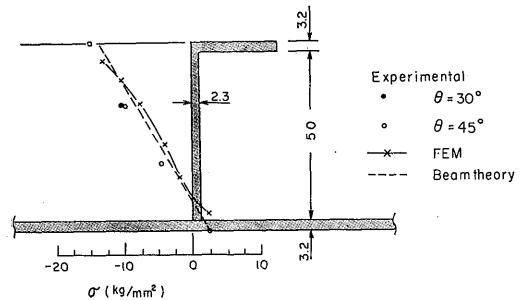


図8 スチフナ中央断面の応力分布

て、単位圧力あたりのスチフナ中央断面のウェブの応力分布を、スニップ角が30°と45°の場合を比較して示したものである。実線および点線はそれぞれ、前述と同じ有限要素法および梁理論による計算値である。有限要素法による計算値は梁理論による計算値と良い一致を示している。実験値はスニップ角30°および45°について示しているが、スニップ角は中央断面の応力分布にもほとんど影響をあたえていないことがわかる。

4. 実験結果に対する考察

スニップ部の座屈強度を検討するため、まず同部の応力分布を調べた。図6のようにモデル化したスチフナについて有限要素法により計算した応力分布を示すと、図9のようになる。図9よりみると、スニップ部

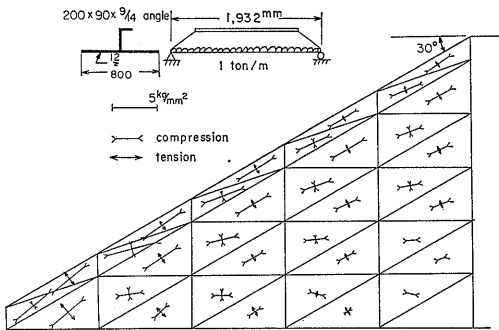


図9 スニップ部の主応力

においては、最大主応力は圧縮で自由縁に沿ってほぼ同じ大きさで、パネルに近づくにつれてその値は小さくなっていることがわかる。したがって、パネルに作用した圧力によってスニップ自由縁に沿って圧縮力がはたらく、これによってスニップ部が座屈したと考えられる。

スニップ自由縁に沿った圧縮応力を計算するには、有限要素法によるか、あるいは後述のように楔理論によるかであろう。単純梁理論は、スチフナの自由縁がスチフナの長さ方向と平行ではないので、そのままの形で適用することはできない。スチフナのスニップ部のように三角形板の応力分布を求める方法として楔理論¹⁾²⁾がある。図10に示すように楔の先端Oに、軸に垂直な力 P_1 、軸に沿った力 P_2 および曲げモーメント M が作用している場合を考える。フランジの断面積を A_f および $A_{f'}$ とし、 A_f および $A_{f'}$ は一定で重心点に集中しているものとして計算すると、任意の点 m の極座標表示の応力（半径方向の応力 σ_r 、剪断応力 $\tau_{r\theta}$ ）は（1）式のようになる。

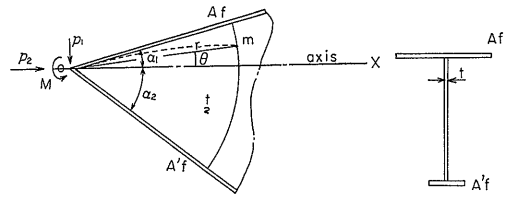


図10 フランジを有する楔

① P_1 に対して

$$\sigma_{r1} = \frac{P_1 \sin \theta}{r t \left\{ \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{1}{4}(\sin 2\alpha_1 + \sin 2\alpha_2) \right\} + A_f \sin^2 \alpha_1 + A_{f'} \sin^2 \alpha_2}$$

② P_2 に対して

$$\sigma_{r2} = \frac{-P_2 \cos \theta}{r t \left\{ \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2) + \frac{1}{4}(\sin 2\alpha_1 + \sin 2\alpha_2) \right\} + A_f \cos^2 \alpha_1 + A_{f'} \cos^2 \alpha_2}$$

③ M に対して

$$\sigma_{r3} = \frac{2 M \sin 2\theta}{r \left[t r \left\{ \frac{1}{2}(\sin 2\alpha_1 + \sin 2\alpha_2) - (\alpha_1 \cos 2\alpha_1 + \alpha_2 \cos 2\alpha_2) \right\} + 2(A_f \alpha_1 \sin 2\alpha_1 + A_{f'} \alpha_2 \sin 2\alpha_2) \right]}$$

$$\tau_{r\theta 3} = \frac{-M \{ t r (\cos 2\theta - \cos 2\alpha_2) + 2 A_{f'} \sin 2\alpha_2 \}}{t r^2 \left[t r \left\{ \frac{1}{2}(\sin 2\alpha_1 + \sin 2\alpha_2) - (\alpha_1 \cos 2\alpha_1 + \alpha_2 \cos 2\alpha_2) \right\} + 2(A_f \alpha_1 \sin 2\alpha_1 + A_{f'} \alpha_2 \sin 2\alpha_2) \right]}$$

ただし、軸OXを決定する式は

$$\frac{A_f}{r} \sin 2\alpha_1 - \frac{A_{f'}}{r} \sin 2\alpha_2 + \frac{t}{2} (\cos 2\alpha_2 - \cos 2\alpha_1) = 0$$

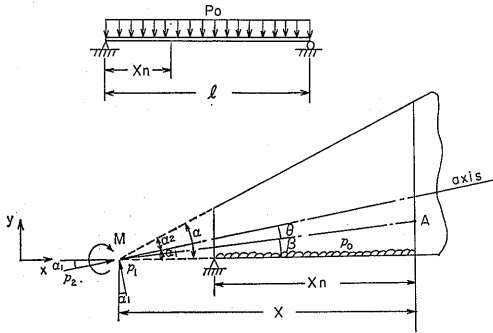


図11 スニップ端部

図11に示すように、両端がスニップされたスチフナが
一様分布荷重をうける場合に、この式を適用すること
を考える。図11において、任意の点 A に対する P_1 、
 P_2 、 M を求める。 x 軸および y 軸方向の力、曲げモ
ーメント M のつり合いを考えると (2) 式のように

なる。

$$\left. \begin{aligned} -P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_1 &= 0 \\ P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_1 &= P_0 \left(\frac{l}{2} - x_n \right) \\ M + P_1 (x \cos \alpha_1 + x \tan \beta \sin \alpha_1) \\ &+ P_2 (x \sin \alpha_1 - x \tan \beta \cos \alpha_1) \\ &= \frac{P_0 x_n}{2} (l - x_n) \end{aligned} \right\} (2)$$

(2) 式から、楔理論における荷重 P_1 、 P_2 および M
は

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= P_0 \left(\frac{l}{2} - x_n \right) \cos \alpha_1 \\ P_2 &= P_0 \left(\frac{l}{2} - x_n \right) \sin \alpha_1 \\ M &= \frac{P_0 x_n}{2} (l - x_n) - P_0 \left(\frac{l}{2} - x_n \right) x \end{aligned} \right\} (3)$$

になる。

(3) 式を (1) 式に代入すれば、任意の点の半径方

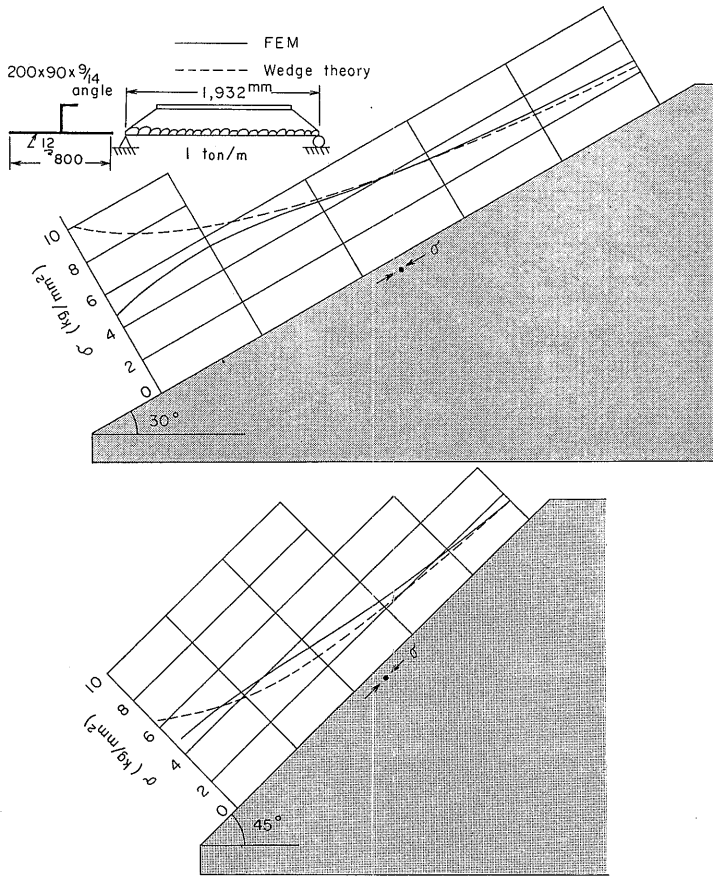


図12 スニップ部の自由縁に沿った応力

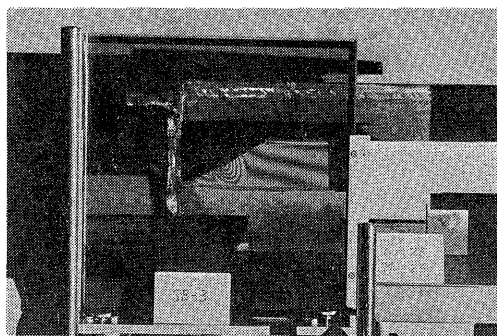
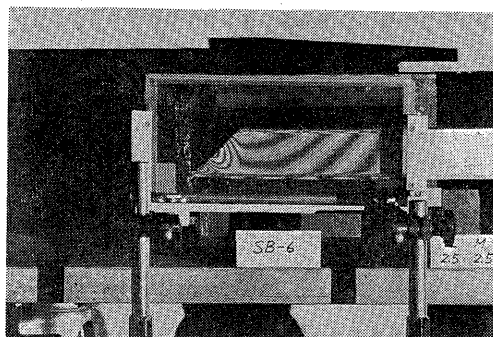
 $\theta=30^\circ$  $\theta=45^\circ$

写真 2 座屈波形

向の応力 σ_r は (4) 式により求まる。

$$\sigma_r = \sigma_{r1} + \sigma_{r2} + \sigma_{r3} \quad (4)$$

自由縁に沿った応力について、椽理論と有限要素法により求めた値を比較したのが図12である。同図から、スニップの先端部を除けば両者は比較的良好一致していることがわかる。この自由縁に沿った方向の圧縮力によってスニップ部が座屈すると考えられるが、座屈が生じた時点のスニップ部のウェブの面外変形は、スニップ部の局所的な部分に限られており、フラ

ンジを有するウェブまで変形は達していない。モアレ法によって、座屈波形を撮影した例を写真2に示す。写真にあらわれている線は、縞間隔1mmの等高線を示している。この写真から、自由縁の中央付近に変形の山があり、その変形は局所的であることがわかる。

表1に座屈荷重の実験値を示す。この表から次のことがいえる。

(1) スニップ角30°と45°とを比較した場合、45°のほうの座屈が、ウェブの深さと板厚との比が大きい模

表 1 実験結果

Snip angle	Specimen	Thickness			Critical load (kg/cm ²)
		t_f	t_w	t_p (mm)	
30°	30 A	2.3	1.6	2.3	1.2
	30 B	2.3	2.3	2.3	2.6
	30 C	2.3	2.3	3.2	2.7
	30 D	3.2	1.2	3.2	0.9
	30 E	3.2	1.6	3.2	1.3
	30 F	3.2	2.3	3.2	3.0
	30 S1*	2.3	1.2	2.3	0.6
	30 S2*	3.2	1.2	3.2	0.7
45°	45 A	2.3	1.6	2.3	1.6
	45 B	2.3	2.3	2.3	2.8
	45 C	2.3	2.3	3.2	2.9
	45 D	3.2	1.2	3.2	1.0
	45 E	3.2	1.6	3.2	1.6
	45 F	3.2	2.3	3.2	3.2
	45 S1*	2.3	1.2	2.3	0.9
	45 S2*	3.2	1.2	3.2	0.9

* Web depth = 75mm for S-series
= 50 for all others

型を除いて10%程度高くなる。ウェブの深さと板厚との比が大きくなると、その差がさらに大きくなる傾向にある。

(2) 座屈荷重はウェブの深さと板厚との比によって左右され、フランジの板厚およびパネルの板厚は座屈荷重にそれほど大きな影響はあたえない。

前述のように、スニップ部分の座屈はウェブの深さと板厚との比によって左右されることがわかったが、これにもとづいてスニップ部分の座屈算定式をつくる。スニップ部分の応力分布から、スニップ部分を図13のようにモデル化し、この三角形板の自由縁に沿って一様に三角形形状の分布荷重が作用すると考える。

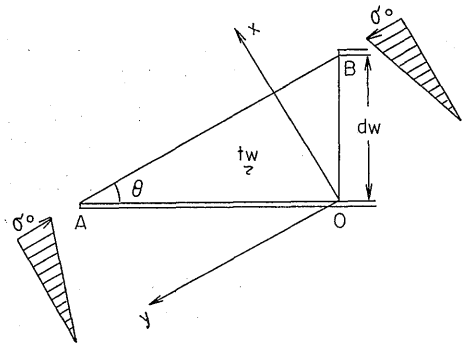


図13 スニップ部のモデル化

スチフナの面外撓み w を図13の座標軸に対して

$$w = C_1 \left(y - \frac{x}{m} \right) (y + mx) (1 + \gamma_1 x + \gamma_2 y + \gamma_3 xy + \gamma_4 x^2 + \gamma_5 y^2) \quad (4)$$

ただし $m = \tan \theta$

と仮定する。

OA, OBに沿っては $w = 0$ のみを満足し, ABは自由辺の境界条件

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + (2-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y^2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

を満足するように $\gamma_1 \sim \gamma_5$ を求めて、エネルギー法によって自由縁の圧縮応力 σ_0 の弾性座屈応力値 σ_e を求めると (6) 式ようになる。

$$\sigma_e = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t_w}{d_w} \right)^2 \quad (6)$$

$$k = \begin{cases} 3.3 & : \theta = 30^\circ \\ 4.2 & : \theta = 45^\circ \end{cases}$$

ただし E : ヤング率
 ν : ポアソン比

d_w : スチフナのウェブの深さ
 t_w : スチフナのウェブの板厚
 θ : スニップ角

ウェブの深さと板厚との比が小さい範囲の座屈応力値は、柱におけるジョンソンの式と同様な考え方によって (7) 式によって求める。

$$\sigma_{cr} = \sigma_Y \left(1 - \frac{\sigma_Y}{4\sigma_e} \right) \quad (7)$$

すなわち、(7) 式は座屈応力が降伏応力 σ_Y の 1/2 を超える範囲では、 $\sigma_{cr} = 0.5\sigma_Y$ の位置で (6) 式に接する2次曲線で近似する方法である。

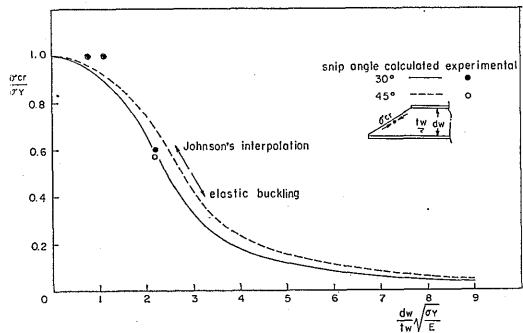


図14 スニップ部の座屈応力

(6) 式および (7) 式より計算した値と実験結果とを比較すると、図14ようになる。座屈応力の実験値は、歪が自由縁に沿って一様ではなくウェブ板の両面でかなり差が出てくるので明確には決めにくい、図4(c)に例を示すように、自由縁の中央付近の歪の値 ϵ_{cr} から求めたものである。この結果から、座屈応力値におよぼすスニップ角の影響は実験によって明らかにならなかったが、座屈応力値の大きさは (6) 式および (7) 式で算定することができるものと思われる。

5. むすび

実船の損傷例を検討する一環として、両端をスニップしたスチフナを取り付けたパネルに均一な圧力をくわえる実験によって、スニップ部分に座屈が生じる過程を観察した。スニップの座屈変形はスニップの自由縁中央付近の局部的な部分に限られ、変形はスチフナ平行部のウェブまでおよんでいない。これについては、実船の損傷例も同じような変形状態になっていた。この座屈は、スニップ部分の応力分布から、主として自由縁に沿った圧縮力によって生じることがわかった。そして、通常実船に使用されている寸法のスチ

フナにおいては、塑性域がかなり広がったところで座屈が生じることが推定される。したがって、工作上的工数の増加を考えなければ、スニップ自由縁方向に補強材を入れることが、座屈損傷防止に有効であると思われる。なお、実船の損傷例についての詳しい検討は委員会報告としてまとめられている³⁾。

座屈強度はスニップ角を変えることによって変化するが、また同時にスチフナ全体の横倒れ等の影響も考慮する必要がある。スチフナ両端のスニップに生じる応力は、ガーダの固着条件によって微妙に変化するので、今後はガーダの周辺条件の影響をさらに検討する必要があると思われる。

終わりに、本実験についていろいろご検討ください

た船体構造委員会スニップエンド小委員会（委員長、山口勇男）の委員各位に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) W. R. Osgood: "A Theory of Flexure for Beams with Nonparallel Extreme Fibers", *Journal of Applied Mechanics*, (1939)
- 2) 山口勇男: "貨物船の横強度について", 博士論文, (1961)
- 3) スニップエンド小委員会: "二重底スチフナスニップエンドの座屈防止に関する検討", *日本造船学会誌*, (1974)

.....