The Society of Naval Architects of Japan

(昭和 36 年 11 月造船協会秋季講演会において講演)

すみ肉溶接と突合せ溶接の交叉継手に関する研究

正員 寺尾貞一* 斎藤忠雄**
伊都祥富**

Research on the Cross Joint of Fillet Welding and Butt Welding

By Sadakazu Terao, *Member*
Tadao Saito and Yoshitomi Ito

Summary

For several years, basic research, using slit type test specimens, has been conducted on a concept in weld joints which has been defined as the "coefficient of restraint".

The corelation between this coefficient and the residual stress in weld joints, was determined by applying this concept of coefficient of restraint on actual structures.

The xperiments were made in two ways ;

(a) on models of solid structures having stiffeners or other similar restraining parts, and

(b) by measuring the coefficient of restraint on actual vessels.

The resu lts were then compared with the basic theory.

It is hoped that the outcome of these experiments will prove to be an important basis for determining the welding sequence for joints that connect one block or unit structure to another.

1 緒 言

防撓材のある鋼板を相互に接合する場合には，防撓材相互の溶接継手と鋼板相互の継手が同一線上にこないように，したがつて防撓材が鋼板の継手に交叉して，取りつけられるのが普通である。この場合交叉継手部付近の溶接順序をどうしたら一番よいかを考えると，この場合の工作法としては，先に鋼板相互の突合せ溶接を行ない，ついで防撓材をすみ肉溶接によつて鋼板に取りつける方法が従来の方法であるが，最近は鋼板の突合せ溶接により生じる変形等を少くする目的で，さきに防撓材を鋼板にすみ肉溶接し，そのあとで，鋼板相互の突合せ溶接を行なう方法が一部採用されている。さらにこの場合に，鋼板相互の突合せ溶接部付近のある距離だけ防撓材に溶接待ちを与え，鋼板の突合せ溶接をすませてから，この溶接待ちを溶接して防撓材を鋼板に取りつけると，溶接工作の工数を減少し，かつ鋼板の溶接により生ずる変形を少くする等多くの利点がある。しかしながらこの反面において，鋼板の突合せ溶接の際の拘束度が増加し，したがつてこの拘束度と継手部の溶接収縮量，残留応力ならびに防撓材の溶接待ち等との間にいかなる関係があるかを知つておく必要がある。

本実験は桁板や防撓材等の拘束材のある立体構造模型について，拘束度の測定，拘束材の歪変形，継手部の溶接による横収縮量および溶接による残留応力等を計測して，それら相互間の関係を調査したものである。

つぎに船台にて建造中の実船ブロック溶接継手の拘束度がどの程度であるかを測定し，スリット型試験片による平面構造実験および前述のごとき立体構造模型実験の結果と比較するために実船実験を行なつた。

2 実験の方法

実船の拘束継手とほぼ同等とみなし得る程度の拘束試験体として，イ型またはロ型拘束試験体および実物大の拘束試験体とを選び，その拘束度を，拘束材の本数または溶接待ちの距離等をかえて測定し，ついで，その溶接継手の残留応力を測定した。

原稿受付 昭和 36 年 6 月 20 日

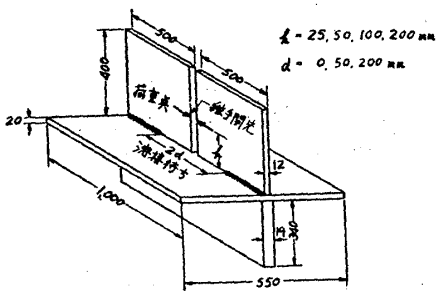
* 石川島播磨重工業株式会社技術研究所造船研究部
** 石川島播磨重工業株式会社，船舶事業部相生第1工場船殻工作部溶接工場課

NII-Electronic Library Service

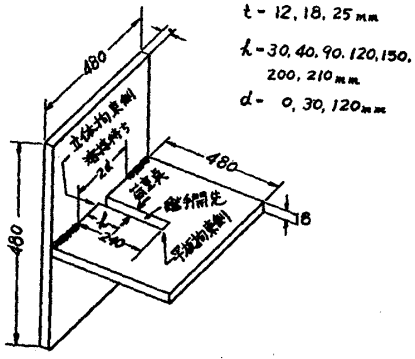
The Society of Naval Architects of Japan

2·1　拘束度の測定

2·1·1　イ型またはロ型拘束試験体の場合—たとえば1図のイ型拘束試験体の場合は，隔壁と船底板との取り付けなどにしばしば見らけられるものであり，2図はその特殊な場合と考えられる。これらの拘束度をその測定位置，溶接待ち，または拘束材の板厚を変えて測定した。



1図　イ型拘束試験体



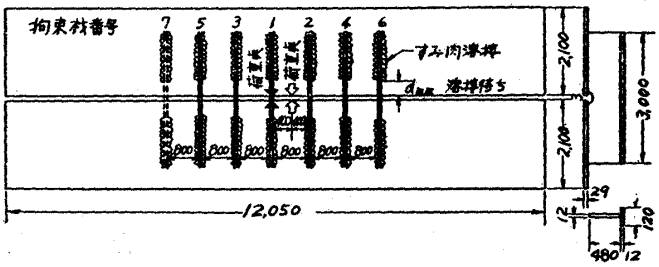
2図　ロ型拘束試験体

2·1·2　実物大の拘束試験体の場合—つぎの寸法の造船用キルド鋼板で試験体を製作した。

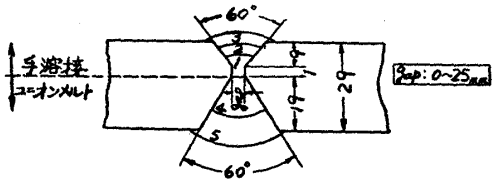
鋼板　12,050×2,100×29 mm　2枚

拘束材（T型）480×120×12 mm（長さ 3,000 mm）11本

この鋼板2枚を3図に示すごとく約3mmの間隙をとつて突合せ，継方手向と直角にT型材をすみ肉溶接によつて取り付け（但し継手を30Rのスカラップでまたぐ）拘束材とした。



3図　拘束度測定用試験体の詳細

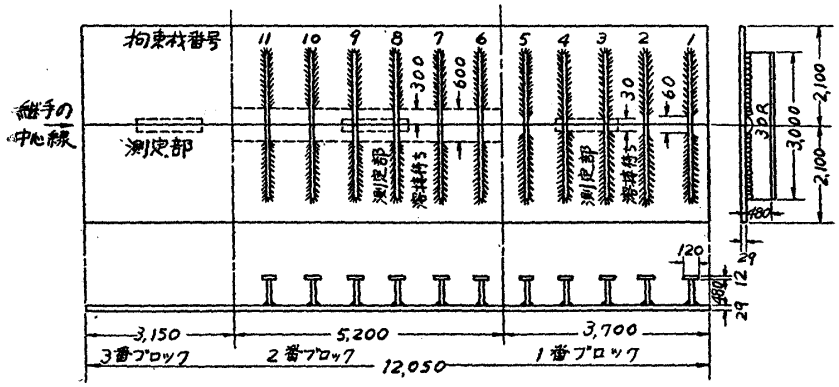


4図　開先の形状と溶接の順序

拘束度計により荷重を加える位置は場の対称を考慮し，拘束材が偶数本数のときは中央部の拘束材間の中央の両面（または片面），奇数本数のときは中央拘束材の裏側とし，荷重を加えた際の変位量をグナート歪計を用いて測定して，拘束度を求めた。

2·2　実物大拘束試験体の残留応力の測定

4図に示すような開先をとり，5図のように拘束材を取り付けて溶接を行なつた。溶接は拘束材側を先に手溶接してから



5図　残留応力測定用試験体の詳細

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

裏側を潜弧溶接2層にて仕上げた。

このように拘束の度合の条件が異なる継手を作り，第1ブロックは溶接待ちが 30mm の拘束材，第2ブロックは溶接待ちが 300mm の拘束材の場合であり，第3ブロックは一応自由継手と考えられる場合について計測を実施した。

計測の方法としては，図中破線で囲んだ継手の溶接線上に標点距離 4mm，5mm の直交2軸の抵抗線歪計をはりつけ，その周囲をドリルにより切りだすことにより行なつた。(5図参照のこと)

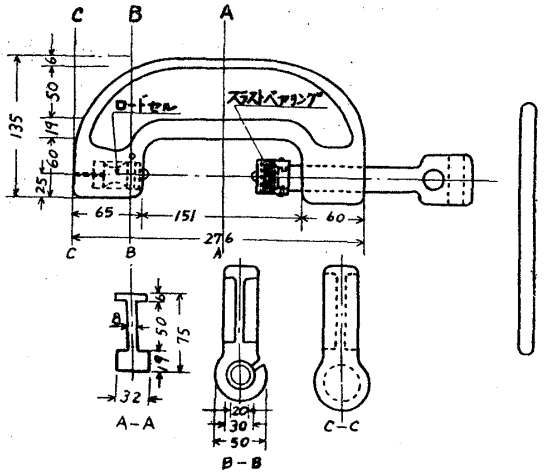
2·3 拘束度計による荷重の測定

6図に示すような拘束度計で，開先両岸に溶接した取り付けピースをはさみ，ボルトを締めることにより荷重を加えた。

取り付けピースは7図に示すごとく，幅 30mm，奥行 35mm のもので，板縁より約 15mm 離れた位置に溶接した。

このため，取り付けピースによつて板縁にかかる荷重の分布は等分布ではなく，取り付けピースの幅 30mm よりさらに広い範囲に荷重が分布していると考えられる。

しかしながら完全な荷重の分布状態を調べるのは困難であるので，理論計算の可能なスリット型試験片を用いて検定した結果，この拘束度計の荷重領域は 80mm，すなわち 80mm の範囲に等分布荷重がかかるものとみなすことにした。



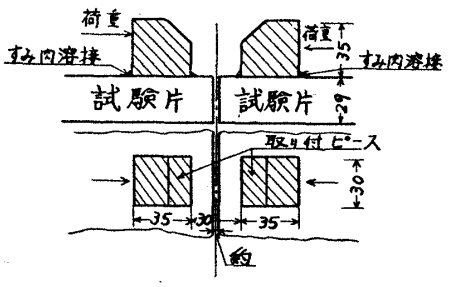
6図 拘束度計

2·4 グナート歪計による変位量の測定

変位量はグナート歪計を用いて測定した。拘束度計により取り付けピースを介して，継手部に荷重を加える場合に，場所の関係から直接板面上での変位量の測定はできなかつたので，約 6mm 角，高さ約 25mm の測定台を開先両岸に植えつけ，その頭部で変位を測定した。

試験片の変位量としては，その表裏で測定した変位量を，試験片の板厚の中心線から測定点迄の高さの逆比で平均し，板厚の中心線上の変位をだしてそれをとつた。

この方法で求めて差し支えないことは，スリット型試験片で予備実験を行ない確認した。

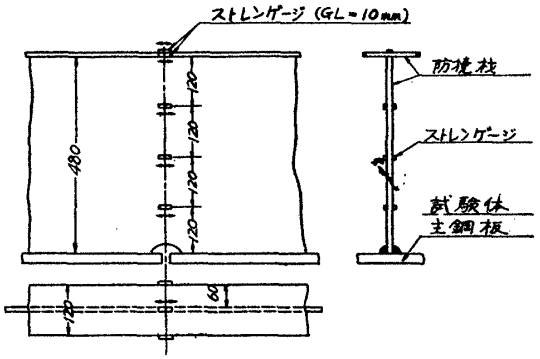


7図 取り付けピースの詳細

2·5 拘束材の歪変形および溶接横収縮量の測定

拘束度を測定するとき，および溶接の際に拘束材にかかる応力を測定するために，8図に示すごとく，拘束材 No.3 および No.7 の中央部に標点距離 10mm の単軸抵抗線歪計をはりつけ，拘束材の歪変化を測定し，また横収縮量の測定にはマイクロメーターも併用した。

すなわち標点距離 60mm で継手両岸にポンチ穴をあけ，それにマイクロメーターの先端を挿入して計測した。



8図 拘束材におけるストレンゲージの貼付

2·6 実船の場合の測定方法

実船の場合の測定方法は前述の立体構造模型実験における拘束度測定法と全く同様である。測定の時期はいずれも船台上に搭載されたブロックの取り付けが完了し，溶接される直前の状態で普通の溶接継手であり，特に実験のための作意はしなかつた。

タンク内隔壁の最下端は船底外板と仮付けを行なつているので，隔壁と隔壁との突き合わせ継手の最下部およびその付近は拘束が非常に大きな状態にあると思われるので，その付近を測定した。(実船実験 1～2)

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

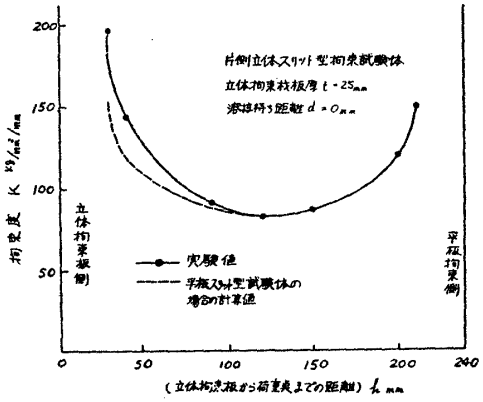
側外板の突き合わせ継手で模型実験に類似した変則的な工作法を採用した場合の拘束度を測定した。(実船実験3)

船底外板および上甲板は模型実験の場合と一見類似しているが，スティフナーは継手にまたがつて溶接されていない。すなわち，継手近傍のみを考えれば継手の片側の板には骨がついており，反対側は板そのままであるといつた状態であり，その拘束は 10m 近い継手で 2～3 のストロングバックおよび目違い修正のための多数の馬のみであると考えられたが，一応模型実験と比較するため，スティフナー間中央（両面荷重）およびスティフナーの真下（片面荷重）を測定した。(実船実験 4～8)

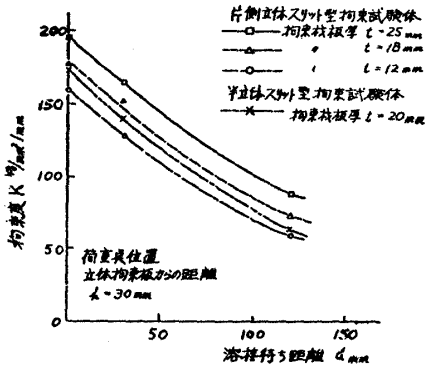
3 実験結果およびその考察

3·1 拘束度

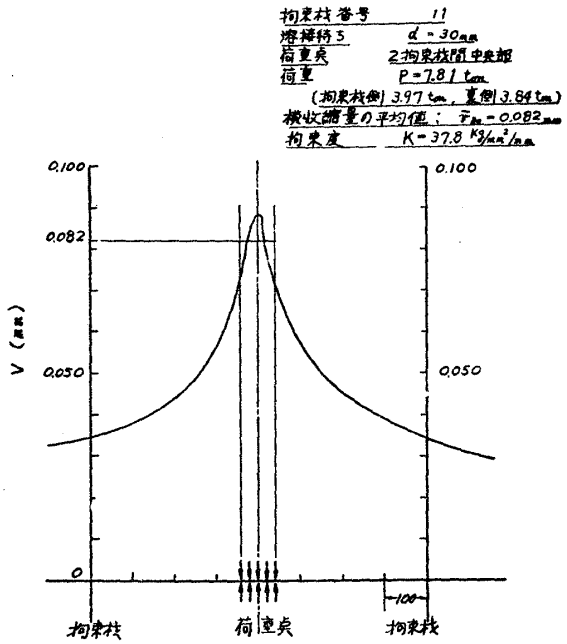
3·1·1 イ型または口型拘束試験体の場合—拘束度を測定した結果の一部を9図および10図に示すが，いずれの場合も測定位置が立体拘束板に近づくに従つて拘束度は急激に増加し，このような継手の端部では特に拘束の大きくなることを如実に示している。また継手に対する溶接待ちの影響も顕著であり，溶接待ちが小さくなるにしたがつて，拘束度は急激に大きくなつている。



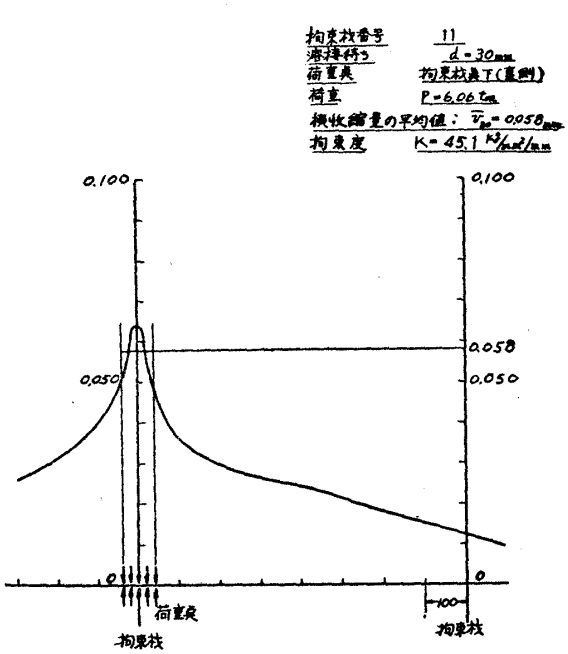
9図 荷重点位置と拘束度



10 図 溶接待ち距離と拘束度



11 図 荷重による横変位量の分布



12 図 荷重による横変位量の分布

3·1·2 実物大拘束試験体の場合—1例として拘束材が 11 本で溶接待ち $d=30$m の場合の変位曲線を拘束材間中央荷重の場合と拘束材直下荷重の場合について，それぞれ 11 図および 12 図に示す。

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

この変位曲線から荷重 b(mm) 領域の間の平均変位量 $\bar{v}_b$(mm) を求めると，拘束度 K(kg/mm²/mm) は次のごとく表わされる。

$$K=\frac{\sigma_0}{v_b} \qquad \text{但し} \quad \sigma_0=\frac{P}{b\cdot t}$$

K；拘束度 kg/mm²/mm

σ_0；平均応力 kg/mm²

P；荷重 kg

b；荷重領域 mm

t；試験片板厚 mm

$\bar{v}_b$；荷重領域間の平均変位量 mm

各実験条件において求めた結果を1表に示す。

これを拘束材の本数についてまとめると，13 図のごとくなり，溶接待ちが継手の片側で 300 mm の場合は，拘束材の真下の拘束度も拘束材間の拘束度もほとんど変りがなく，拘束材本数が測定部分の両側に増加してゆくにしたがつて拘束度は高くなる。

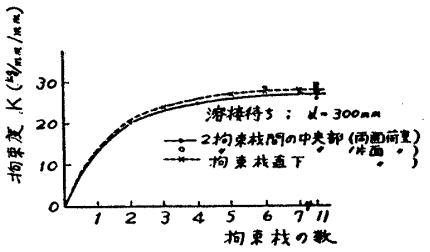
しかしながら測定部の両側に拘束材が3本ずつ以上になれば，拘束度の増加は止み，ほとんど一定の値をとり，拘束材の真下も中間も 26～28 kg/mm²/mm 程度となる。

また溶接待ちを変化させた場合は 14 図のようになり，溶接待ちが継手の片側で 300 mm 以上あれば，拘束材の真下も中間も大きな差はないが，300 mm から溶接待ちが小さくなるにしたがつて両者の拘束度の差は順次増大し，それぞれの拘束度も大きくなる。

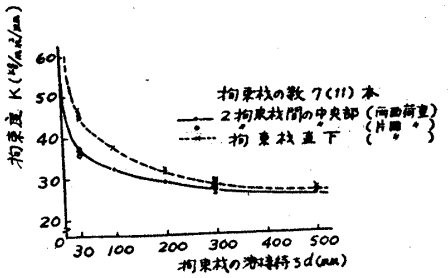
1表 拘 束 度

拘束材番号	溶接待ち d	2拘束材間中央 K (kg/mm²/mm)	拘束材の直下 K (kg/mm²/mm)
2	300 mm	20.2	
3			24.0
4		24.7	
5			27.0
6		28.5	27.8
7 (11)		25.7*	27.8
		27.8*	28.6*
		26.8**	17.1*
		29.0**	29.0*
	200 mm	29.0*	31.5
			32.0
	100 mm	32.4*	37.9
	30 mm	37.8*	45.9
		36.5*	45.4*
		35.9**	47.2*
		36.9**	45.1*
	500 mm	22.5*	26.6*
		25.4*	26.4*

*：拘束材
**：一面荷重



13 図 拘束度と拘束材の数との関係



14 図 拘束度と拘束材の溶接待ちとの関係

拘束材間中央における拘束度は，溶接待ち 300 mm で 27 kg/mm²/mm 程度であつたものが，溶接待ち 30 mm では，37 kg/mm²/mm 程度となり，その収斂値すなわち溶接待ち 0 mm の値は，スリット長さ 800 mm のスリット型試験片のスリット中央の拘束度の理論値 55·3 kg/mm²/mm に漸近すると考えられる。

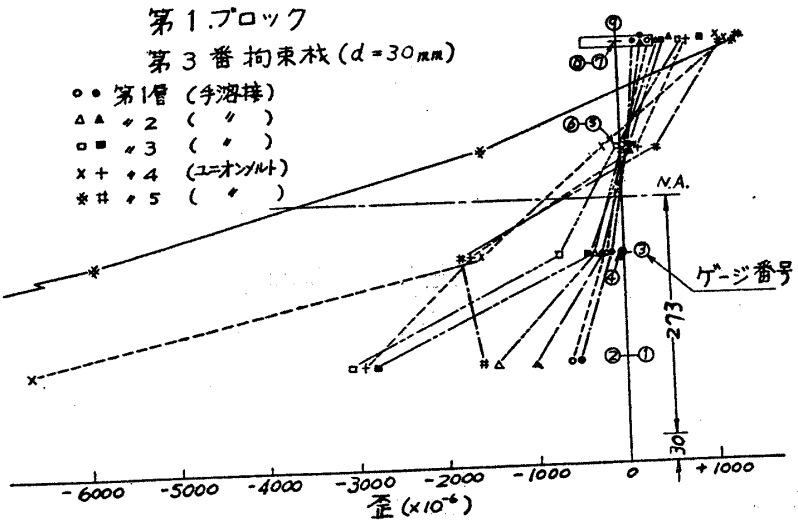


図 15 突合せ継手の溶接による拘束材の歪増加

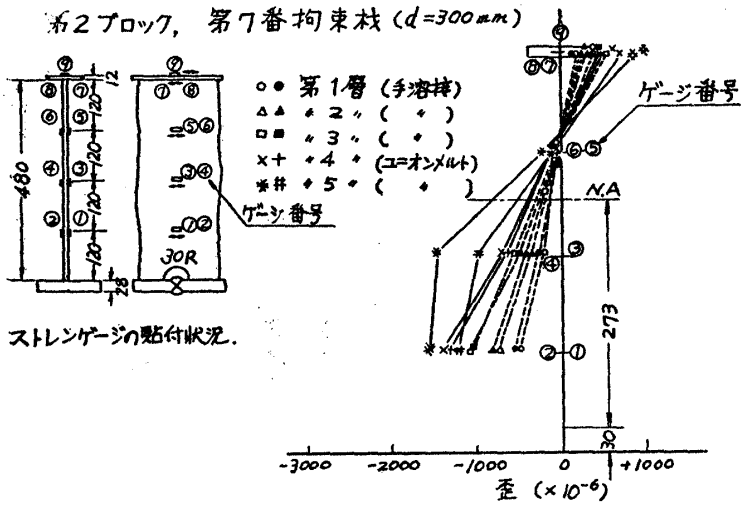
3·2 拘束材の歪変化

拘束度測定のため荷重をかけた際に，拘束材に生ずる歪は，フェース板において引張り，腹板の下端において圧縮であり，その変化はほぼ直線的で偏心荷重による曲げ変形を生じていることが明らかである。

この歪の値は荷重点から離れた拘束材ほど減少し，荷重点から3本目

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan



16 図 突合せ継手の溶接による拘束材の歪増加

の拘束材にかかる応力はほとんど零となつている。これは 13 図において拘束材 6 本の場合に相当し，このように遠方の拘束材はもはや効いていないことを示している。

溶接による拘束材の歪変化の例を示すと，15 図，16 図のようである。

第 1 ブロックの拘束材 No. 3（溶接待ち $d=30$ mm）の場合，スカラップ付近に可なりの応力集中があることが，測定点を結ぶ線の折れで推察される。この折れは次第に大きくなり，2 層目で拘束材下部は降伏点近くに達し，その後は塑性変形に入り，ついに潜弧溶接の第 4 層目にいたつて拘束材表裏の歪差は大きく現われ，かつ不規則となり，拘束材が座屈を起こしたことを示している。

2 番ブロックの拘束材 No. 7（溶接接待ち $d=300$ mm）の場合，1，2，3 層の溶接では弾性変形をなし，4 層目では拘束材下部は塑性領域に入つても，座屈を生じていないと考えられる。

この拘束材が単純に曲げのみを受けるとすれば，その中性軸は継手の母材より 303 mm の高さの所にあるはずであるが，実際にはかなり上方になつている。

このことは溶接横収縮によつて拘束材にかかる応力が単に曲げ応力のみでなく，面内圧縮と曲げの合成されたものであることを示している。また歪が零となる点は各層を重ねるごとに上昇している。拘束材 No. 7 では変化は少ないが，拘束材 No. 3 では顕著であり拘束材の下部から徐々に塑性変形を生じ，その量がだんだん大きくなつていることを示している。

3·3 溶接による横収縮量

溶接による横収縮量の変化を示すと 17 図のごとくである。開先間隙の相違による変化はあるが，第 1，2，3 ブロック共総体的な横収縮量には大きな差は見られなかつた。第 1，2 ブロックにおける拘束材間中央部と，拘束材直下との山谷の差が大きいのは，拘束材の“効き”の点から当然と考えられる。

3·4 溶接残留応力

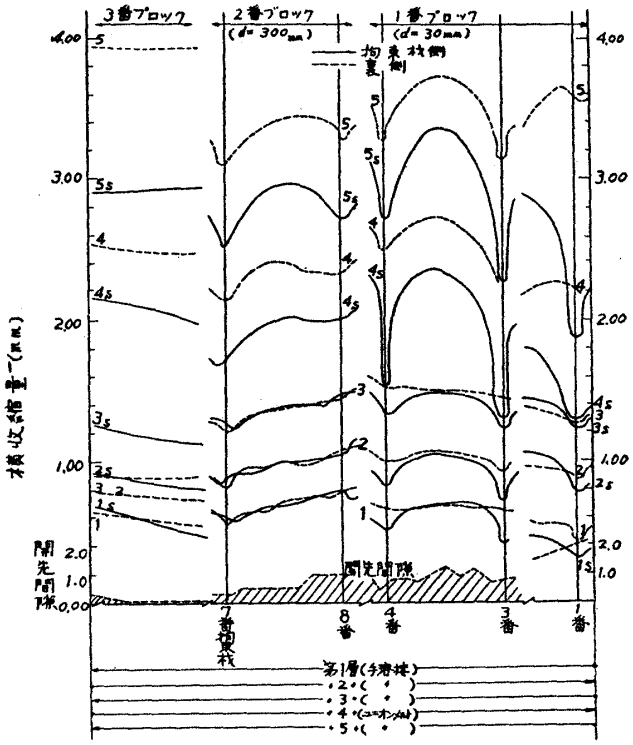
各ブロックごとに全測定点の平均値を求めると，18 図のごとくなる。図において各点がそれぞれ 1 つの測定値を示すが，大体において溶接線方向の縦方向応力 σ_x は溶接線上で 20～30 kg/mm² の高い引張応力であり，溶接線と直角方向の横方向応力 σ_y は比較的小さく，数 kg/mm² 程度の引張応力である。

第 1，2 ブロックにおいては，σ_x および σ_y の平均値は拘束度の大きい第 1 ブロックの方が大きくなつている。

第 3 ブロックにおいては，σ_x および σ_y はいずれも手溶接面の値が潜弧溶接の面の値よりかなり大きい。

3·5 拘束度と残留応力との関係について

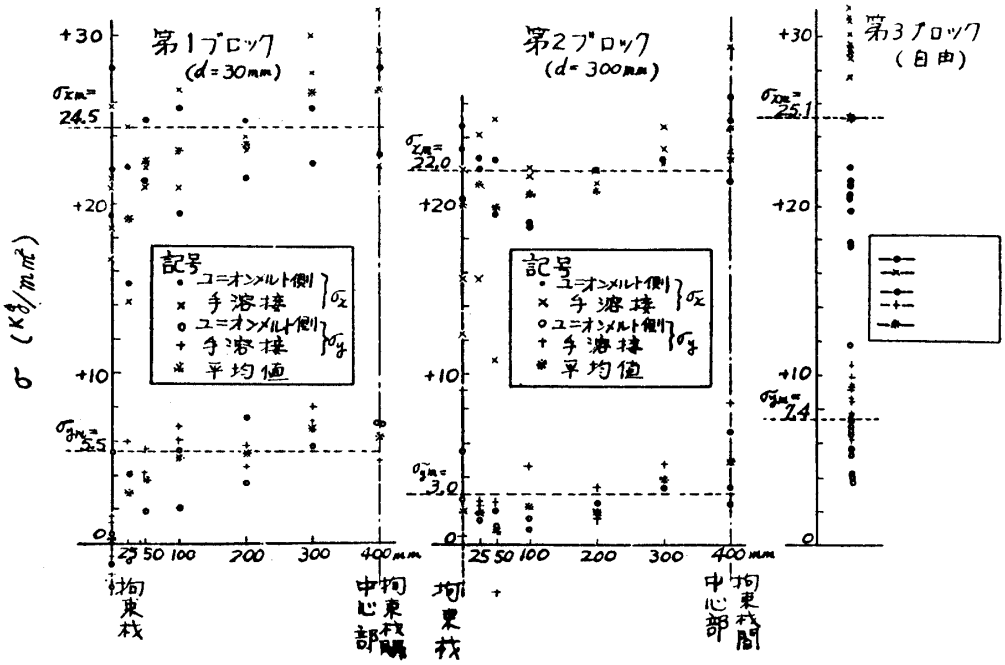
拘束度と残留応力との関係は前項のごとく，比較



17 図 突合せ継手の溶接による横収縮量の分布

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan



18 図 残留応力の分布

的拘束度の大きい第1ブロックの方が，拘束度の小さい第2ブロックより，残留応力の平均は σ_{xm} および σ_{ym} ともに大きくなつているが，拘束材の直下は中性軸の移動のために明らかに曲げが働いている状況で，残留応力を測定しているため，その平均値は拘束材間中央部よりも小さくなつている。

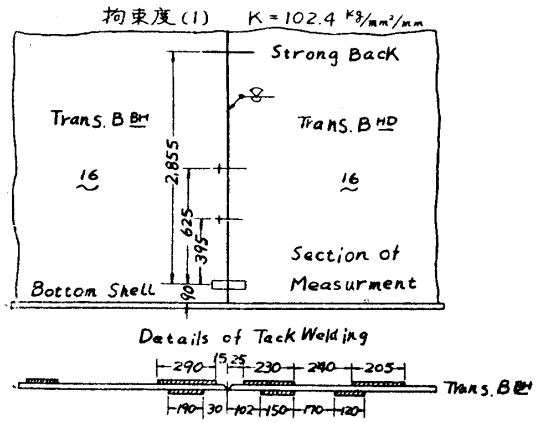
また拘束材のある第1，第2ブロックの方が，自由継手である第3ブロックよりも残留応力が小さくなつているのは，前述のごとき曲げの作用と，拘束材が溶接のために座屈したことにより，その関連性は特に求め難いものになつていると思われる。

3·6 実船における拘束度の測定結果

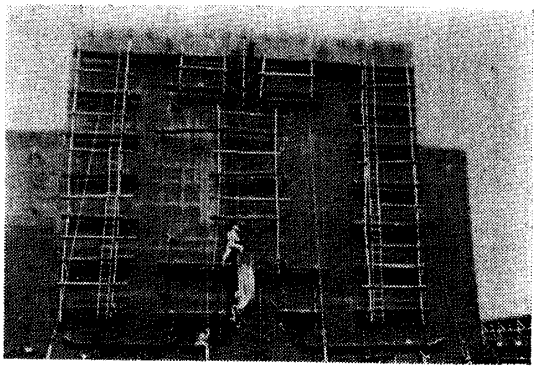
各測定場所および測定結果を 19 図～27 図に示す。

3·6·1 隔壁の突き合わせ継手の場合 (実船実験 1～2)—隔壁と船底外板との取り合いは，すみ肉溶接で仮付けを行なつている。このため隔壁の突き合わせ継手の下端部は非常に長いスリットの端部に相当すると考えられる。そこで下端より 90 mm 上方を拘束度計の中心として測定した。

スリット端から 90 mm の点を中心に幅 80 mm の等分布荷重を加え，スリット長 $2L$ mm を種々変えた場合の拘束度 K kg/mm²/mm を理論式より求めると，$2L=130$ mm で $K\fallingdotseq110$ kg/mm²/mm，$2L=200$ mm で $K\fallingdotseq90$ kg/mm²/mm 程度となり，$2L\geqq400$ mm では $K\fallingdotseq76$ kg/mm²/mm でほとんど一定の値を示す。実験においてスリットの他端と仮定されるストロングバックまでの船底からの距離は，いずれの場合も 400 mm 以上の遠



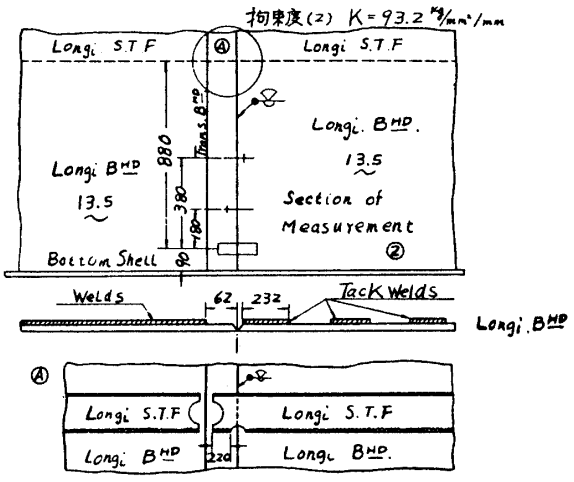
19 図 実船実験 1 横隔壁の突合せ継手



20 図 横隔壁の突合せ継手における拘束度の測定状況

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

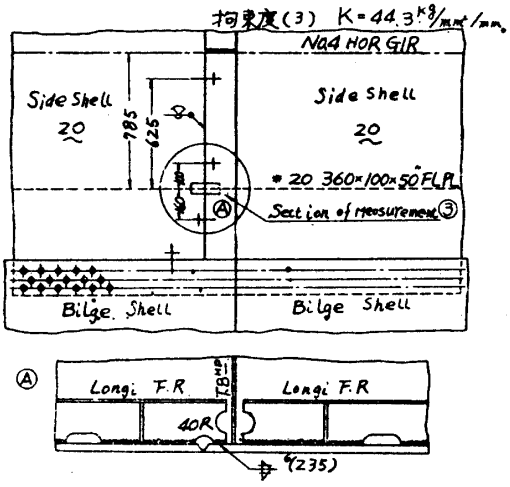


21 図 実船実験 2 縦隔壁の突合せ継手

22 図 縦隔壁の継手における拘束度測定状況

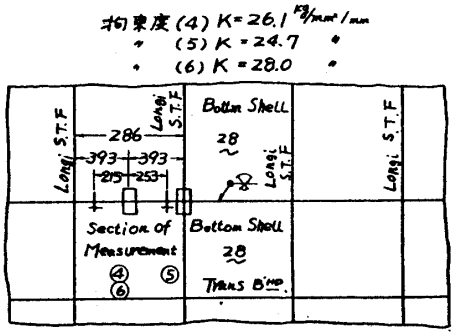
くにある。しかし隔壁に比べて船底外板は非常に厚いので，スリット端の船底外板側が平面的な場合に比べて非常に強いと考えられ，その付近は平板スリット型試験片におけるよりは拘束は相当に大きくなるのではないかと考えられる。

3·6·2 船側外板の突き合わせ継手の場合（実船実験 3)—測定位置は図に示すごとく模型実験の場合と，フレームの大きさおよび間隔はやや異なるが，一応模型実験における溶接待ち $d=40$ mm の場合に相当すると考えられる。模型実験の場合は $K\fallingdotseq 44.0$ kg/mm²/mm となり，本実験の値 $K=44\cdot3$ kg/mm²/mm とよく合つている。

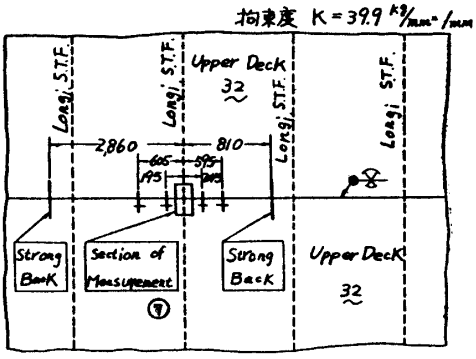


23 図 実船実験 3 船側外板の突合せ継手

3·6·3 船底外板および上甲板の突き合わせ継手の場合（実船実験 4～8)—得られた結果は船底外板の場合 $K=25\sim28$ kg/mm²/mm 程度であり，また上甲板の場合 $K=38\sim40$ kg/mm²/mm 程度の値を示し，これらは意外に大きかつた。この場合ストロングバック以外にブロックの大きさ，すなわち重量による抵抗が，この比較的大きな拘束度を示す原因と考えられる。すなわちブロック重量は船底で 30～47 ton，上甲板で 50～60 ton あり，それらの重量に原因する摩擦抵抗は非常に大きいものとなり，したがつて模型実験で得られた値をはるかに上廻る大きな拘束度となつたのであろう。



24 図 実船実験 4, 5, 6 船底外板の突合せ継手



25 図 実船実験 7 上甲板の突合せ継手

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

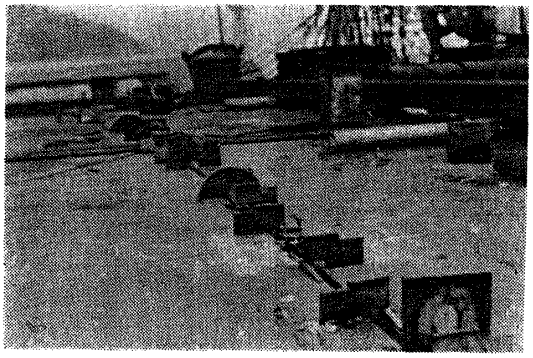


図 26 上甲板の継手における拘束度測定状況

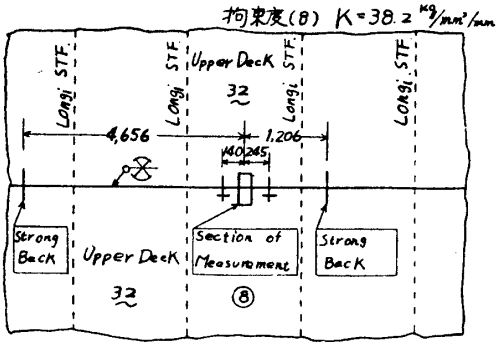


図 27 実船実験 8 上甲板の突合せ継手

4 結　　言

本試験の範囲では，次の結論を得た。

（1） 拘束材の溶接待ちが継手の片側で 300 mm の場合，拘束材本数の増加に伴なつて拘束度は増大するが，測定場所にかかわらず測定部の片側に 3 本以上の拘束材があれば，それ以上拘束材を増加しても拘束度はほとんど一定の値となる。

（2） 溶接待ちが継手の片側で 300 mm 以上では拘束材の真下の拘束度と拘束材中間の拘束度とはほとんど同等であり，その値は 27～28 kg/mm²/mm 以下である。

（3） 溶接待ちを 500 mm から順次減少せしめると，拘束材の中間および真下における拘束度はともに上昇するが，その程度は拘束材真下の方が急激である。溶接待ちが継手の片側で 30 mm の場合においては，前者は 37 kg/mm²/mm 程度であり，後者は 46 kg/mm²/mm 程度となる。

（4） 拘束材は継手を溶接することにより曲げ応力を受けて一部は塑性変形をなし，溶接完了時には，溶接待ち 300 mm の場合は座屈しなかつたが 30 mm の場合は座屈した。

（5） 溶接横収縮量は拘束材間中央で最大となり，拘束材直下で最小となつたが，平均横収縮量は 3.2 mm 程度であつた。

（6） 溶接残留応力は溶接線上で，溶接線方向に 15～30 kg/mm² 程度，溶接線直角方向に 0～8 kg/mm² 程度の引張応力であつたが拘束材の溶接待ちを変えても残留応力は大して変らなかつた。

（7） 船底外板に仮付けされた隔壁同志の突合せ継手の下端部船底から 90 mm のところの拘束度は約 100 kg/mm²/mm 程度の値であつた。

（8） 船底外板の突合せ継手で 25～28 kg/mm²/mm 上甲板の突合せ継手で 38～40 kg/mm²/mm 程度の拘束度があつた。

（9） 実船のブロックのごとき重量物同志の継手はその継手にまたがる拘束材がなくとも，その重量自体によつて相当大きな拘束があり，高い拘束度を示した。

5 謝　　辞

本研究は日本造船研究協会第 39 部会で採りあげられ，船舶溶接研究会でも討議されたものであり，とくに，東大木原教授，運研楠田技官の御指導を仰いだことを深く感謝致します。また本研究中たびたび重要な御注告を戴いた松山工場長，拘束度の理論式の誘導，数値計算を手伝われた楠守君，の両氏に厚くお礼を申上げます。

（終）

附録 1 拘束度に関する研究

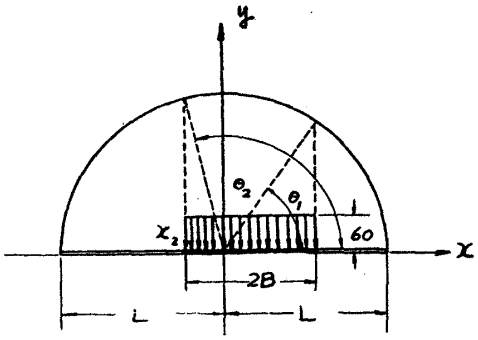
1 スリット試験片の拘束度

1·1 拘束度の定義

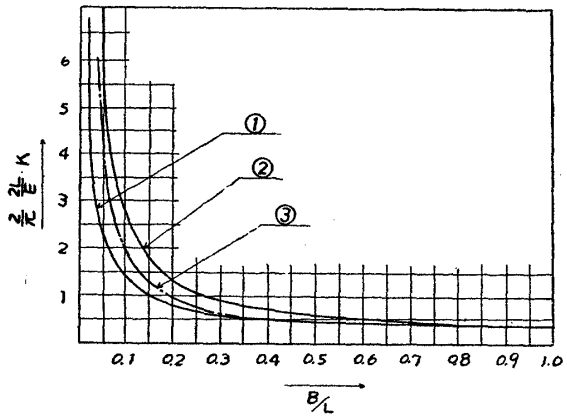
無限板の実軸上，$(-L, 0)$ から $(L, 0)$ までの長さ $2L$ のスリットがあいているとき，そのスリットの上下

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan



付1-1図 スリット試験片の座標



付1-2図 拘束度（K）と荷重幅/スリット長（B/L）との関係

両岸に $x=x_1\sim x_2(\theta=\theta_1\sim\theta_2)$ なる長さ $2B$ の領域にのみ一様なる応力 σ_0 を加えたときの両岸の近より（クイチガイ $\boxed{v}$）を求める。（付 I-1 図参照）

$$\boxed{v}=\frac{4}{\pi}\cdot\sigma_0\cdot\frac{2L}{E}\cdot\sum_{n=1}^{\infty}\frac{P_n}{n}\sin n\theta \qquad (1)$$

ただし，
$$P_n=\int_{\theta_1}^{\theta_2}\sin\theta\sin n\theta\, d\theta \qquad (2)$$

$x=x_1\sim x_2$ の間の $\boxed{v}$ の平均値 $\overline{\boxed{v}}_{2B}$ は

$$\overline{\boxed{v}}_{2B}=\frac{2}{\pi}\cdot\frac{2L}{2B}\cdot\frac{2L}{E}\sigma_0\phi \qquad (3)$$

ただし，
$$\phi=\sum_{n=1}^{\infty}\cdot\frac{P_n{}^2}{n} \qquad (4)$$

拘束度Kは次式で与えられる。

$$\sigma_0=K\overline{\boxed{v}}_{2B} \qquad (5)$$

したがつて
$$K=\frac{\pi}{2}\cdot\frac{B}{L}\cdot\frac{E}{2L}\cdot\frac{1}{\phi} \qquad (6)$$

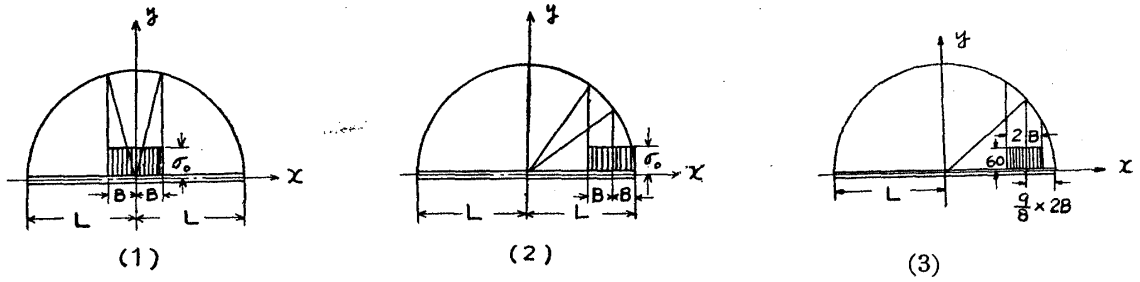
1·2 拘束度と B/L の関係図

（6）式を $\frac{2}{\pi}\cdot\frac{2L}{E}K=\frac{1}{\phi}\cdot\frac{B}{L}$ と変形して $\frac{2}{\pi}\cdot\frac{2L}{E}K$ と $\frac{B}{L}$ の関係を付 1-2 図に示す。

(1)はスリットの中央に幅 $2B$ にわたつて一様分布荷重をかけたときの値（付 1-3 図-(1)）

(2)はスリットの一端から幅 $2B$ にわたつて一様分布荷重をかけたときの値（付 1-3 図-(2)）である。

(3)はスリットの一端から $\frac{9}{8}\times 2B$ の点に中心をおき幅 $2B$ にわたつて一様分布荷重をかけたときの値である。（4図）

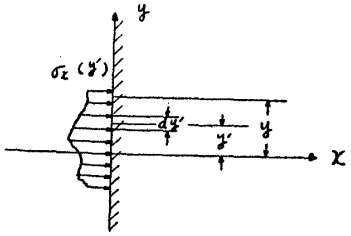


付1-3図 荷重位置

2 桁板試験体の拘束度

2·1 基本理論

2·1·1 半無限板の自由縁に荷重が作用する場合の変位—半無限板の自由縁に垂直応力 $\sigma_x(y')$ を作用させたとき（付 1-4 図），自由縁の荷重方向の変位，$u_{x=0}(y)$ は次式で与えられる。



付 1-4 図 半無限板の自由縁に分布荷重が作用するとき

$$u_{x=0}(y)=-\frac{2}{\pi E}\int_{-\infty}^{\infty}\sigma_x(y')\log|y-y'|dy'+C \qquad (7)$$

ただし，Cは剛体移動量を表わし

$\int_{-\infty}^{\infty}\sigma_x(y)dy=0$ が成り立つものとする。

2·1·2 半無限板の内部に荷重が作用する場合の変位—半無限板内の自由縁に平行な直線上に垂直応力 $\sigma_x(y')$ を作用させたとき（付 1-5 図），自由縁の荷重方向の変位 $u_{x=0}(y)$ は次式で与えられる。

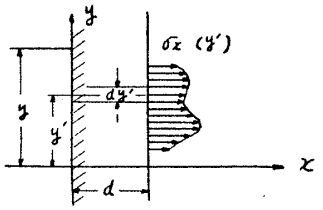
NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$u_{x=0}(y)=\frac{1}{\pi E}\int_{-\infty}^{\infty}\sigma x(y')\left[(1+\nu)\frac{d^2}{(y-y')^2+d^2}\right.$$
$$\left.-\log\{(y-y')^2+d^2\}dy'+C\right. \qquad (8)$$

ただし，Cは剛体移動量で，

$\int_{-\infty}^{\infty}\sigma_x(y)dy=0$ が成り立つものとする。



付1-5図　半無限板の $x=d$ に分布荷重が作用するとき

（8）式で $d=0$ とおくと，自由縁に荷重が作用する場合になり（7）式と一致する。

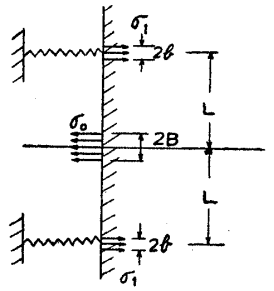
2·2　基本理論の応用例（1）

半無限板を自由縁で弾性支持している場合を考える。

2·2·1　支持点が2個の場合（付1-6図）—支持点の中央に一様分布荷重をかけた場合の自由縁の変位 $u_{x=0}(y)$ は（7）式を用いて次式で与えられる。

$$u_{x=0}(y)=-\frac{2}{\pi E}\int_{-B}^{B}\sigma_0\log|y-y'|dy'-\frac{2}{\pi E}\int_{L-b}^{L+b}\sigma_1\log|y-y'|dy'$$
$$-\frac{2}{\pi E}\int_{-L-b}^{-L+b}\sigma_1\log|y-y'|dy'+C \qquad (9)$$

$$\sigma_0\cdot 2B+2\times\sigma_1\cdot 2b=0 \qquad (10)$$



付1-6図　自由縁上2個の弾性支持材があるとき

ただし，Cは支持材の変位と剛体の移動量の和を表わす。

拘束度は定義にしたがつて，

$$K=\frac{\sigma_0}{2\overline{|u_{x=0}|}_{2B}} \qquad (11)$$

$$\overline{|u_{x=0}|}_{2B}=\frac{1}{2B}\int_{-B}^{B}u_{x=0}(y)dy+C \qquad (12)$$

（9）式から（yは荷重領域 $\pm 2B$ 間にあることを考慮して）

$$u_{x=0}(y)\doteqdot-\frac{2\sigma_0}{\pi E}[(y+B)\{\log(y+B)-1\}+(B-y)\{\log(B-y)-1\}]$$
$$-\frac{2\sigma_1}{\pi E}\cdot 2b\{\log(L-y)+\log(y+L)\}+C \qquad (13)$$

ただし，$b/L\ll 1$ とした。

$$\overline{|u_{x=0}|}_{2B}\doteqdot-\frac{2\sigma_0}{\pi E}\cdot 2B\left(\log 2B-\frac{3}{2}\right)-\frac{2\sigma_1}{\pi E}\cdot 2b\left(\frac{L}{B}\log\frac{L+B}{L-B}+2\log L-2\right)+C$$

(10) 式から

$$\overline{|u_{x=0}|}_{2B}=\frac{2\sigma_0\cdot 2B}{\pi E}\left(\log\frac{L}{2B}+\frac{L}{2B}\log\frac{L+B}{L-B}+\frac{1}{2}\right)+C \qquad (14)$$

したがつて，

$$K=\frac{1}{\frac{8B}{\pi E}\left(\log\frac{L}{2B}+\frac{1}{2}+\frac{L}{2B}\log\frac{L+B}{L-B}\right)+C'} \qquad (15)$$

$$C'=\frac{C}{\sigma_0}$$

あとで実験値と比較できるように，$y=0$，$y=L$ 2点の $u_{x=0}$ の値を計算しておく。

(13) 式において，$y=0$ とおけば，

$$u_{\substack{x=0\\y=0}}=-\frac{2\sigma_0}{\pi E}\cdot 2B(\log B-1)-\frac{2\sigma_1}{\pi E}2b\cdot 2\log L+C$$
$$=\frac{2\sigma_0\cdot 2B}{\pi E}\left(\log\frac{L}{B}+1\right)+C \qquad (16)$$

（9）式において，$y=L$ とおけば

$$y_{\substack{x=0\\y=L}}=-\frac{2\sigma_1}{\pi E}\cdot 2b(\log b-1)-\frac{2\sigma_0}{\pi E}2B\log L-\frac{2\sigma_1}{\pi E}2b\log 2L+C$$

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$=\frac{2\sigma_0\cdot 2B}{\pi E}\left(\log\sqrt{\frac{2b}{L}}+1\right)+C \tag{17}$$

2·2·2 支持点が $2n$ 個の場合(付1-7図)—$2n$ 個の場合も2個の場合と同様に，(7)式および力の釣合方程式を用いてまず荷重点および支持点の中央の変位 $\{u_0\,;\ u_n(n=1,2,3\cdots)$ と表わす$\}$ を求める。

$\{u_0'\,;\ u_n'(n=1,2,3\cdots)\}$ を $\{u_0\,;\ u_n\ (n=1,2,3\cdots)\}$ から支持材の変位と剛体移動量を除去した値とすれば

$$-\frac{\pi}{2}\frac{E}{2B\sigma_0}u_0'=\left(\log\frac{B}{L}-1\right)+\left(\frac{b}{B}\right)\sum_{n=1}^{n}\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0}\right)2\log\left\{\frac{2(n-1)l}{L}+1\right\} \tag{18}$$

$$-\frac{\pi}{2}\frac{E}{2B\sigma_0}u_n'=\log\left\{\frac{(n-1)l}{L}+\frac{1}{2}\right\}+\left(\frac{b}{B}\right)\left[\sum_{\substack{m=1\\ m\neq n}}^{n}\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_0}\right)\log|n-m|\right.$$

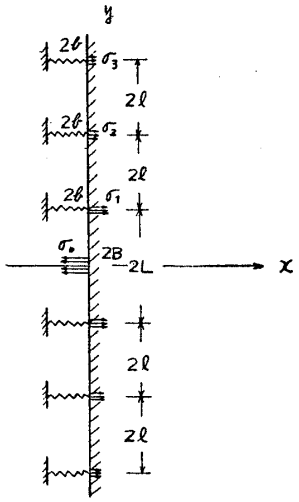
$$\left.\left\{(n+m-2)\left(\frac{l}{L}\right)^2+\frac{l}{L}\right\}+\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0}\right)\left\{\log\left(\frac{2(n-1)l}{L}+1\right)+\log\frac{b}{2L}-1\right\}\right] \tag{19}$$

(19)式において

$$\sigma_n=ku_n' \tag{20}$$

とおき，釣合条件式 $\sum_{n=1}^{n}\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0}\right)=-\frac{B}{2b}$ を考えれば $\left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0}\right)$ は決まり，それを(18)，(20)式に代入して $\{u_0\,;\ u_n(n=1,2\cdots)\}$ を求めることができる。

拘束度は(11)式より計算するが，$\overline{\overline{|u_{x=0}|}}_{2B}$ の値は，$u_{x=0}(y)$ 曲線から図式的に読みとつた値に，支持材変位と剛体移動量を加えたものとして近似的に計算する。



付1-7図 半無限板が自由縁上の $2n$ 点で弾性支持されているとき

2·3 基本理論の応用例(2)

自由縁に一様分布荷重を加えた半無限板を板内の自由縁に平行な線上2点で弾性支持している場合について考える。(付1-8図)

(8)式から

$$u_{x=0}(y)=-\frac{2\sigma_0}{\pi E}\int_{-B}^{B}\log|y-y'|dy'+\frac{\sigma_1}{\pi E}\int_{L-b}^{L+b}\left[(1+\nu)\frac{d^2}{(y-y')^2+d^2}\right.$$

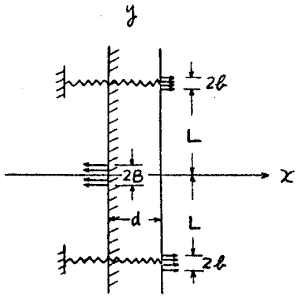
$$\left.-\log\{(y-y')^2+d^2\}\right]dy'+\frac{\sigma_1}{\pi E}\int_{-L-b}^{-L+b}\left[(1+\nu)\frac{d^2}{(y-y')^2+d^2}\right.$$

$$\left.-\log\{(y-y')^2+d^2\}\right]dy'+C \tag{21}$$

が得られる。ただし $\sigma_0\cdot 2B+2\times\sigma_1\cdot 2b=0$

Cは支持材変位と剛体移動量の和

拘束度Kを求めるために $|y|\leqq B$ とおくと，$b/L\ll 1$ より反力は集中力におきかえて次のごとく簡単になる。



付1-8図 自由縁の分布荷重と板内の2反力が釣合っている場合

$$u_{x=0}(y)=-\frac{2\sigma_0}{\pi E}[(y+B)\{\log(y+B)-1\}+(B-y)\{\log(B-y)-1\}]$$

$$+\frac{\sigma_1}{\pi E}2b\left[(1+\nu)\frac{d^2}{(L-y)^2+d^2}-\log\{(L-y)^2+d^2\}\right]$$

$$+\frac{\sigma_1}{\pi E}2b\left[(1+\nu)\frac{d^2}{(y+L)^2+d^2}-\log\{(y+L)^2+d^2\}\right]+C \tag{22}$$

したがつて，

$$\overline{\overline{|u_{x=0}|}}_{2B}=-\frac{2\sigma_0\cdot 2B}{\pi E}\left(\log 2B-\frac{3}{2}\right)$$

$$+2\cdot\frac{\sigma_1}{\pi E}\cdot 2b\left[2-\frac{(1+\nu)}{2}\cdot\frac{d}{B}\cdot\left(\tan^{-1}\frac{L+B}{d}-\tan^{-1}\frac{L-B}{d}\right)\right.$$

$$\left.-\frac{L}{2B}\log\frac{(L+B)^2+d^2}{(L-B)^2+d^2}-\log(L^2+d^2)\right]+C$$

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$=\frac{2\sigma_0\cdot 2B}{\pi E}\left[\log\frac{\sqrt{L^2+d^2}}{2B}+\frac{1}{2}+\frac{L}{4B}\log\frac{(L+B)^2-d^2}{(L-B)^2+d^2}\right.$$
$$\left.+\frac{(1-\nu)d}{4B}\left(\tan^{-1}\frac{L+B}{d}-\tan^{-1}\frac{L-B}{d}\right)\right]+C \tag{23}$$

$$K=\frac{1}{\frac{8B}{\pi E}\left[\log\frac{\sqrt{L^2+d^2}}{2B}+\frac{1}{2}+\frac{L}{4B}\log\frac{(L+B)^2+d^2}{(L-B)^2+d^2}+\frac{(1-\nu)d}{4B}\left(\tan^{-1}\frac{L+B}{d}-\tan^{-1}\frac{L-B}{d}\right)\right]+C'} \tag{24}$$

(24) 式において，$d=0$ とおくと (15) 式と一致する。

2·1·2　2と同様な理由で $y=0$ および L の点の変位 $u_{\substack{x=0\\y=0}}$, $u_{\substack{x=0\\y=L}}$ を求めておく。

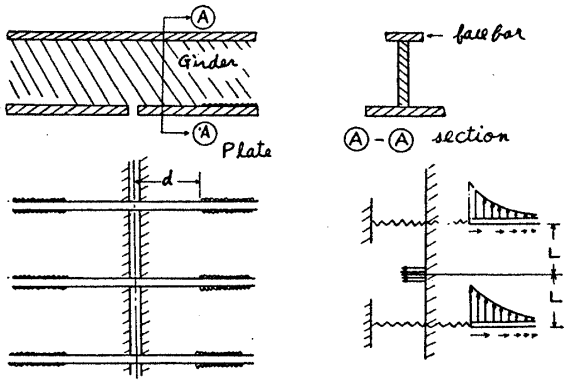
$$u_{\substack{x=0\\y=0}}=\frac{2\sigma_0\cdot 2B}{\pi E}\left\{\log\frac{\sqrt{L^2+d^2}}{B}+1-\frac{1+\nu}{2}\frac{d^2}{L^2+d^2}\right\}+C \tag{25}$$

$$u_{\substack{x=0\\y=L}}=\frac{\sigma_0\cdot 2B}{\pi E}\left\{\log\sqrt{\left(\frac{2d}{L}\right)^2+\left(\frac{d}{L}\right)^2}-\frac{1+\nu}{2}\left(1+\frac{d^2}{4L^2+d^2}\right)\right\}+C \tag{26}$$

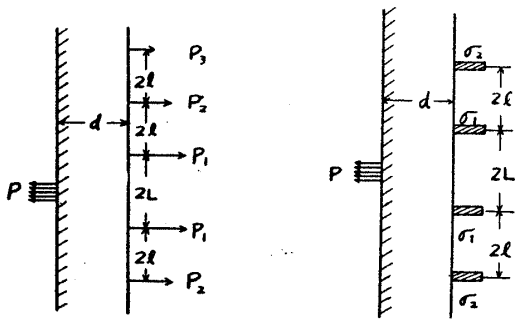
2·4　半無限板を桁板で支持する場合

2·4·1　桁板で支持する場合の応力伝達—半無限板を桁板で支持する場合の自由縁の変位は，

i）桁板と板との接合部での応力伝達を考慮して計算せねばならないが，3次元弾性の問題となり計算が非常に面倒である（付 1-9 図）



付1-9 図　半無限板上に桁板を溶接待ち d をおいて溶着したとき桁板の溶接待ち部をバネとみなす

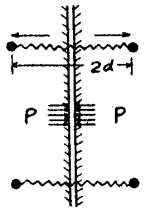


付1-10 図　着力点に集中荷重がかかるとみなすとき，および着力点を長方形に限りその中で応力を一様とした場合

ii）一方行桁が板に及ぼす反力を集中力とみなすことは板（2次元弾性体）内の応力分布を求めるには最も便利であるが，この場合には着力点が特異点（変位が無限大）となり，3本以上の桁板がついた場合の応力配分を解くことはできない。（付 1-10 図）

iii) i), ii) の中間型として桁板が板に及ぼす反力を一様分布荷重と考えれば着力点の変位は有限となり好都合であるが，それでも計算はかなり面倒である。

2·4·2　2本の桁板で支持する場合の拘束度—3本以上の桁板支持の場合は伝達応力の計算が困難であるために拘束度を容易に求められないが，2本の桁板支持の場合は次のごとく梁理論を用いて近似的に求める。（付 1-11 図）



付1-11 図　半無限板の着力点の位置

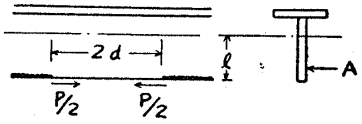
自由縁での変位は次の2つの変位の合成されたものである。

(1)　板の変位 $u_{x=0}$

(2)　桁板の変位 u_g

(1)は (22) 式で与えられる。　(2)は次式で求められる。

$$u_g=\frac{2d}{E}\left(\frac{1}{A}+\frac{e^2}{I}\right)\cdot\frac{P}{2} \tag{27}$$



付1-12 図　桁板形状

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

A：断面積

e：着力点と中性軸との距離

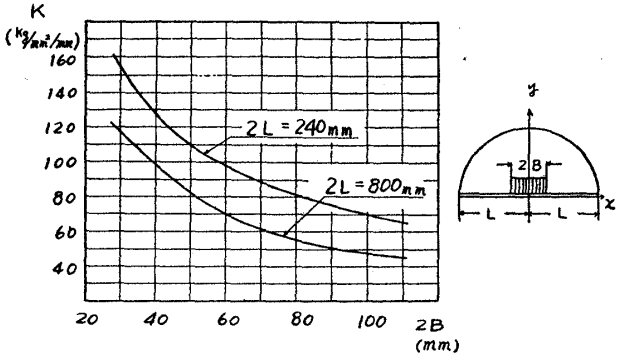
I：断面2次モーメント

したがつて，$\overline{\overline{u_{m=0}}}\Big|_{2B}$ は (23) 式の $C=u_g$ とおけば，拘束度は (24) 式より求められる。(付 1-12 図)

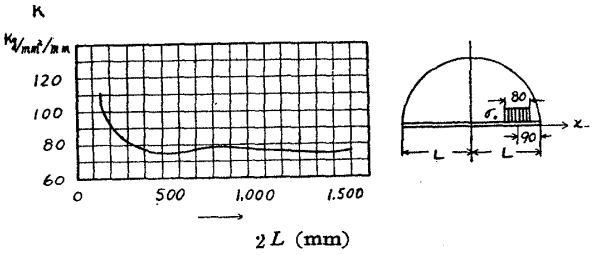
3 理論式による拘束度計算

3·1 スリット型試験片の拘束度

i) スリットの中央に幅 $2B$ にわたつて一様分布荷重を加えたとき (付 1-2 図の曲線①) 拘束度 (K) と荷重幅 ($2B$) との関係を付 1-13 図に示した。スリット長さは $2L=240$ mm および 800 mm の2種の試験片を想定して計算した。



付 1-13 図 スリット型試験片における拘束度 K と荷重幅 $2B$ との関係 ($2L=240$, 800 mm)



付 1-14 図 拘束度 (K) スリット長 ($2L$) との関係 (ただし $2B=80$ mm で $2B$ 中心はスリット端から 90 mm のところにある)

ii) スリットの一端から 90 mm の点に荷重幅 $2B=80$ mm なる一様分布荷重を作用させたとき，拘束度 (K) とスリット長 ($2L$) との関係を調べ付 1-14 図に示した。

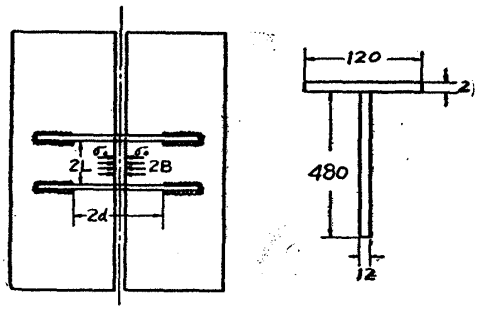
3·2 桁板試験体の拘束度

最も簡単な場合として有限板を2本の桁板で支持し，桁板間の中央に幅 $2B$ にわたつて一様分布荷重を加えた場合の拘束度を計算する (付 1-15 図)

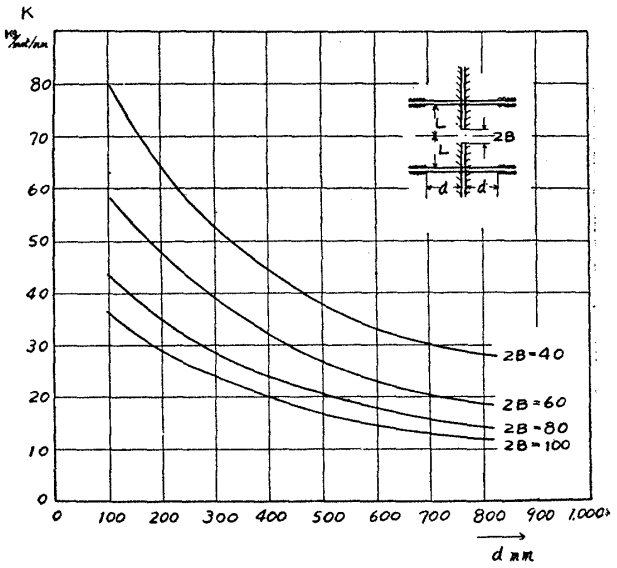
2枚の板と地面との間に摩擦が小さいと仮定すれば，板の剛体移動量は桁板の変位に比べて小さいと考えられるから，拘束度は (24) 式より求められる。ここで C' は桁板の変位による項目で (27) 式から

$$C'=\frac{2d}{E}\left(\frac{1}{A}+\frac{e^2}{I}\right)\frac{2Bt}{2}$$

とおけばよい。すなわち，



付 1-15 図 有限板を2本の桁板で支持して中央に荷重を加えたときと桁板断面形状



付 1-16 図 桁板試験体における拘束度 (K) と溶接待ち d との関係 ($2B=40$, 60, 80, 100 mm)

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$K=\frac{1}{\frac{8B}{\pi E}\left[\log\frac{\sqrt{L^2+d^2}}{2B}+\frac{1}{2}+\frac{L}{4B}\log\frac{(L+B)^2+d^2}{(L-B)^2+d^2}+\frac{(1-\nu)d}{4B}\right.}*$$

$$*\left.\left(\tan^{-1}\frac{L+B}{d}-\tan^{-1}\frac{L-B}{d}\right)\right]+\frac{2d}{E}\left(\frac{1}{A}+\frac{e^2}{I}\right)\frac{2Bt}{2} \tag{28}$$

で近似的に拘束度を求めることができる。

いま，t（板厚）=29 mm の板に付-15 図に示すごとき形状の2本の桁板を，$2L$=800 mm の間隔で溶接待ち d を残して溶着した場合を想定する。この2本の桁板の中央に一様分布荷重を加えたとき，拘束度と溶接待ち $2d$ との関係を付-16 図に示した。荷重幅は $2B$=40，60，80 および 100 mm の4種について考えた。

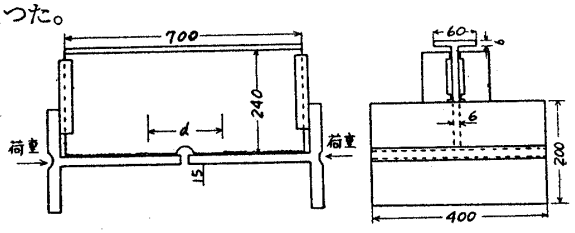
付録 2　防撓材の座屈に関する研究

1　緒　　言

立体構造模型実験において，防撓材が座屈したと考えられる現象を生じたので，この現象を調査し実験の考察の参考とするために，防撓材のみを取上げて座屈試験を行なつた。

2　試験片および試験方法

試験片は実物の 1/2 の寸法の防撓材であり，周辺支持条件が同様となるように防撓材の下縁に鋼板を溶接し，スカラップを取り，また横倒れ，捩れ等を防止するリブを取りつけた。計験片の形状および寸法は，付 2-1 図の通りで溶接待ち寸法（図中の d）を 3種類に変え，試験片組立後に焼鈍したものについても試験を行なつた。すなわち，付 2-1 表に示す5個の試験片について実験を行なつた。



付 2-1 図　試験片の形状および主要寸法

試験片記号	W 1	A 1	W 2	A 2	W 3
溶接待ち d mm	300	300	30	30	100
焼　鈍	—	施 行	—	施 行	—
材料降伏点 kg/mm²	30.5	29.2	38.4	29.2	38.4
板　厚 mm	6.1	6.1	6.4	6.1	6.4

付 2-1 表　試 験 片 種 別

試験は島津式オルゼン型万能試験機を用い，荷重位置が一定となるように，治具を取りつけて圧縮した。実船の場合は突き合わせ溶接による収縮力が防撓材の内側（付 2-1 図の d の部分）にかかるのであるが，本実験では外側から圧縮してこれに換えた。

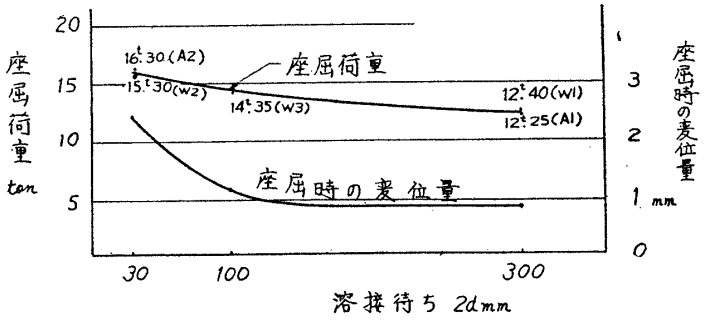
防撓材腹板の両面における歪の測定は抵抗線歪計によつて行ない，溶接待ち d の間の変位はダイアルゲージによつて測定した。

3　実験結果および考察

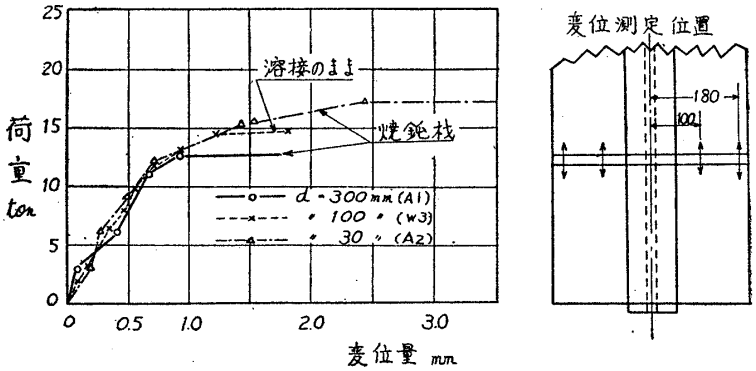
3·1　座屈荷重と変位量

拘束材の溶接待ち側の荷重方向の変位量と圧縮荷重との関係の1例を付 2-2 図に示す。このグラフより座屈時の荷重と変位量とを求め，溶接待ちとの関係を示すと，付 2-3 図のごとくなる。

これをみると溶接待ちが小さくなるに従つて座屈荷重が大きくなり，また座屈時の変位



付 2-2 図



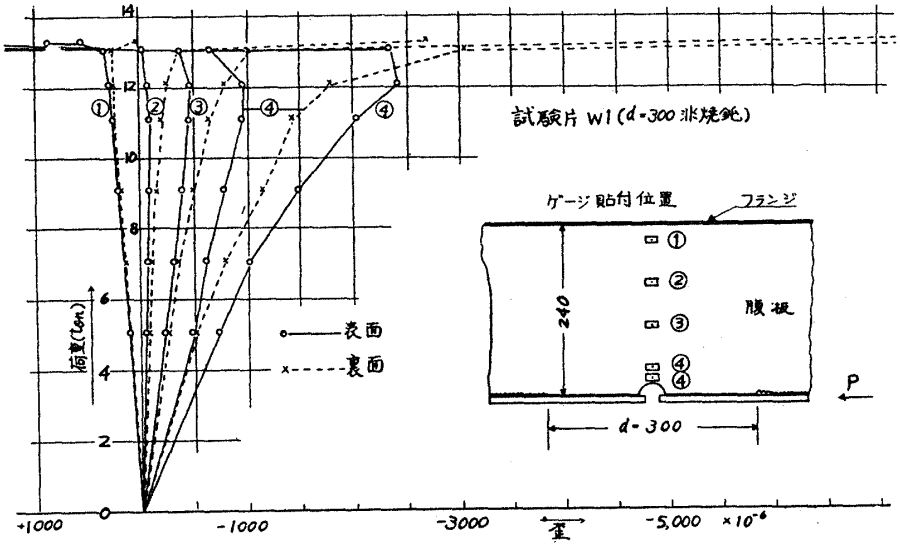
付 2-3 図　荷重と変位量の関係

付 2-2 表　溶接待ちと溶接収縮量との関係

溶接待ち (d) mm	限界変位量 mm	溶接収縮量 mm	備　　考
600	1·6	2·9	座屈する
60	5·0	2·4	座屈しない

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan



付2-4図 荷重歪曲線

量も大きくなつていることがわかる。焼鈍の影響はほとんどないように思われる。

突合せ溶接による収縮力が防撓材にかかる場合を考えると，この座屈時の変位量より溶接収縮量の方が大きくなつたとき，防撓材が座屈すると考えられ，したがつて溶接待ちが小さくなり溶接収縮量が小さくなると，ある値以下では防撓材は座屈しなくなると考えられる。

立体構造模型においては防撓材の寸法は本実験の場合の2倍であり，したがつて座屈時の変位量も2倍と考えて，これと溶接収縮量とを比較すると付2-2表のごとくなつて，溶接待ち600 mmの場合は座屈しているが，溶接待ち60 mm の場合は座屈していないと考えられる。

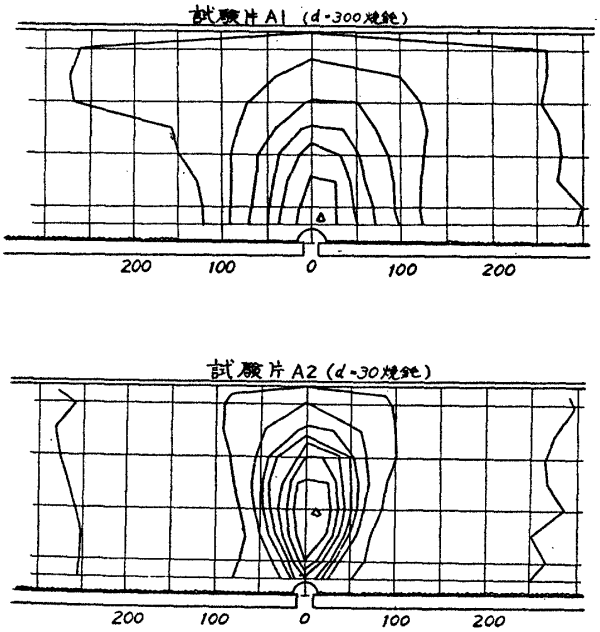
3·2 防撓材の歪

防撓材腹板の荷重方向の歪と荷重との関係の1例を付2-4図に示す。

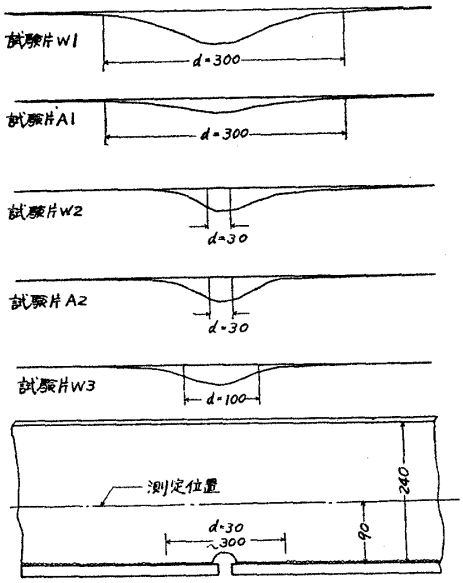
測定位置は図中に示す通りで座屈時には，表裏の歪差が急激に増大していることがわかる。歪の大きさをみると座屈時には塑性歪を生じており，この塑性域は溶接待ちが小さい程深くなつている。

3·3 座屈範囲および形状

座屈範囲および形状は上述の腹板上の各点において測定した表裏の歪差を取ることによつて，知ることができ



付2-5図 防撓材座屈形状（等高線）



付2-6図 防撓材の座屈形状（中央部長さ方向）

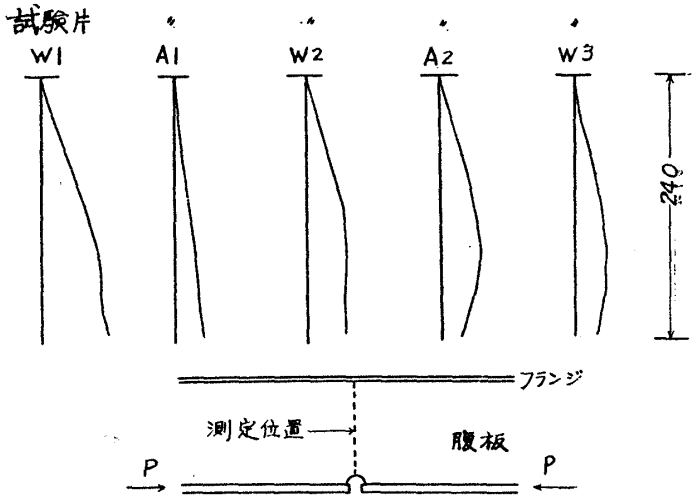
NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

る。その結果を付 2-5～7 図に示す。

付 2-6 図は腹板の荷重方向の断面の座屈後の形状を示す。溶接待ち 300 mm の W 1, A 1 はほぼ溶接待ち間で座屈しているとみられるが，溶接待ち 30 mm の W 2, A 2 は明らかに溶接待間の座屈ではなく，その範囲は d の数倍の広さにおよんでいる。溶接待 100 mm の W 3 も溶接待の間の座屈ではなく，d の約 2 倍の範囲で座屈している。また付 2-6 図から試験片の撓み形状がわかるが，いずれも両端では撓み線は傾斜がなく，したがつて，両端の支持状態は固定に近い。

付 2-7 図は防撓材中央部における腹板の荷重に直角方向の断面の座屈後の形状である。W 1, A 1 のそれはほぼ直線とみなされ，W 2, A 2 は正弦曲線に近い形となつている。これらの傾向は特に鈍材においてはつきりしている。この形状から判断すると，荷重に平行な 2 辺の支持状態は W 1, A 1 はフランジ側は単純支持，その反対の溶接待ち側では自由であり，W 2, A 2 は両側とも単純支持に近いものと考えられる。W 3 は上の両者の中間的なものでフランジ側は単純支持，その反対側は自由と単純支持の中間であると考えられる。



付 2 - 7 図　防撓材座屈形状（中央部横方向）

3·4 変　位　量

防撓材の溶接待ち側の荷重方向の変位量と荷重との関係を付 2-7 図に示す。

4 結　　言

この模型座屈実験の範囲内で次の結論を得た。

1) 溶接待ち $d=30$, 100, 300 mm のいずれも弾性域において座屈せず塑性域にはいつてから座屈した。
2) 座屈は溶接待ちが小さい程生じ難い。
3) 溶接待ち $d=300$ mm のときは座屈の範囲は 300 mm であるが，$d=30$～100 mm の場合は座屈の範囲は 150～200 mm である。
4) 周辺条件は荷重辺は固定，フランジ側は単純支持，溶接待ちのある側は，溶接待ちの長さによつて自由から単純支持の間にあると考えられる。

防撓材座屈時の溶接待ち間の限界変位量は，溶接待ちの距離が小さい程大きい。

NII-Electronic Library Service