

縦横に補剛された圧縮板の極限強度
に関する実験的研究†

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE ULTIMATE STRENGTH OF ORTHOGONALLY STIFFENED PLATES UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

小松 定夫*・牛尾 正之**・北田 俊行***・奈良 敬****
By Sadao KOMATSU, Masayuki USHIO, Toshiyuki KITADA
and Satoshi NARA

1. ま え が き

縦横に補剛された圧縮板の実験報告については、落橋事故後のドイツにおいて、ライン川の Oberkasseler 橋^{1),2)} や Speyer 橋³⁾ などの新しく架設される鋼箱桁橋の下フランジの座屈に対する安全性を確認する目的で行われた、二、三の例が存在するに過ぎない。

Oberkasseler 橋の場合、Leonhardt¹⁾ および Andrä-Beyer-Wintergerst²⁾ によって、下フランジの実物大の部分模型を用いた面内圧縮試験が行われている。実橋の下フランジの一部を想定し、バルブプレートの縦リブと T 形断面の横リブ 1 本を有する補剛板模型が作製され、載荷辺単純支持、側辺自由の境界条件で補剛板全体の中立面内に一様相対圧縮力を作用させた破壊実験が行われている。その際、実橋の横リブのたわみ剛性を再現するために模型の横リブの端部を等価なはりで支持している。これらの実験では主として初期たわみが極限強度に及ぼす影響を調べることを目的としている。実験の結果、破壊に至るまでの補剛板のたわみ波形は、座屈理論から求まる座屈波形とは一致せず、むしろ初期たわみ波形から予想できそうな波形となることを示している。さらに、補剛板の極限強度の実験値は、座屈強度（理論値）よりも低下したと報告している。Andrä-Beyer-Wintergerst の実験では、縦リブの溶接を連続としたり、千鳥にしたり、あるいは補剛板内に突合せ溶接部を設けた 6 体の模型を作製し、それらの極限強度特性について調査している。その結果、補剛板内に突合せ溶接部の角変形が存在すると、ないものに比較して若干極限強度が低下するという結論を得ている。

Speyer 橋の場合も、Epple-Rössig-Schaber-Wintergerst³⁾ によって、上記と同じ載荷装置を用いて同様な実物大の部分模型実験が行われている。この実験では縦リブに台形中空断面が採用されている。ここでも上記の実験結果と同様な結論を得ている。また、台形断面を用いたことによる増強効果が出なかったことも報告されている。

以上のこれらの実験はすべて実橋の下フランジの座屈に対する安全性を確認することに着目して行われた実験であり、縦横に補剛された圧縮板の極限強度特性を調べる目的で系統的に行われた基礎的な実験ではない。この種の基礎的な実験的研究は現在のところあまり行われていないものと思われる。

さて、縦方向の一様相対圧縮変位を受ける縦リブのみで補剛された板の極限強度特性については、実験的^{4),5),20)} ならびに理論的^{6)~8),13)~19)} にすでにある程度の成果が得られている^{21),22)}。また、この種の補剛板に存在する残留応力の性状についても明らかにされている⁹⁾。しかし、縦横に補剛されたより一般的な圧縮補剛板の極限強度特性については、現在のところまだ十分に明らかにされていない。そのためには、初期不整を有する縦横に補剛された圧縮板の極限強度を正確に評価できる理論解析法を確立することが不可欠である^{10),23)}。その際必要となる資料は、① 理論解析における初期値となる残留応力や初期たわみなどの初期不整の実測データであり、② 理論解析を検証するのに必要な実験値である。今回の実験は、この種のデータを得るとともに、実験的な立場からも縦横に補剛された板の極限強度特性を明らかにすることを目的として計画された。その具体的な目的は以下に示すとおりとなる。

(1) 縦横に補剛された板供試体の初期たわみの実測値を得ること。

(2) 縦横に補剛された板供試体の残留応力の実測値を得る。その際、一般によく測定されている圧縮軸方向

† 昭和 53 年度土木学会関西支部年次学術講演会にて発表。

* 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学教室

** 正会員 工博 日立造船(株)技術研究所

*** 正会員 工修 大阪市立大学講師 工学部土木工学教室

**** 正会員 工修 大阪大学助手 工学部土木工学教室

の残留垂直ひずみの横方向分布注1)のみならず、横方向の残留垂直ひずみの圧縮軸方向の分布状況注2)の測定も行う。

(3) 横リブの補剛効果を実験的に把握する。

(4) 供試体が極限状態に達した後、載荷圧縮力が若干低下し、その極限荷重を十分に確認できる状態までの各荷重段階における補剛板各部の変位およびひずみを実測する。

(5) 補剛板の非線形挙動および極限強度特性に関し新しい知見を得る。

圧縮補剛板の極限強度は材料の機械的性質ならびに初期たわみや残留応力などの不確定な初期不整に敏感に影響を受ける。そして、これらの機械的性質および初期不整は、材料および補剛板の断面寸法ならびにその製作法に大きく左右される。実験においてあまり小さな模型を作製すると、使用板厚が薄くなり、板厚に対して溶接サイズが大きくなりすぎて、初期不整の性状が実際の場合とはかなり異なるものと思われる。また、材料の機械的性質も JIS 規格で定める 構造用材料のそれを 確保させることが難しくなり、その均質性も保証されなくなってくる。極端に小さな縮尺模型を用いて得られた実験値は必ずしも実橋の場合の挙動を再現しているとは限らないという意味で不合理であると著者らは考えている。そこで、今回の実験を計画するにあたり以下の2点に特に注意を払った。

(1) 使用最小板厚を 6mm として実橋寸法にできるだけ近づけた。

(2) 溶接方法についても、できる限り実橋製作時と同様にした。

2. 供試体の設計および製作

実験供試体には、残留応力測定用供試体と圧縮試験用供試体の2種類がある。残留応力測定用供試体については3.(3)で述べることにし、この節では圧縮試験用供試体についてのみ記述する。

(1) 供試体の形状と材質

今回の実験で用いた圧縮試験用供試体は、図-1に示すように、横リブを貫通し、圧縮軸方向に平行でかつ等間隔に配置された2本の縦リブを有する長さ 200cm の

注1) 以下、これを縦方向残留ひずみ分布という。また、同様な残留応力、ひずみおよび応力度の分布についても、それぞれ、縦方向残留応力分布、縦方向ひずみ分布および縦方向応力分布という。

注2) 以下、これを横方向残留ひずみ分布という。また、同様な残留応力、ひずみおよび応力度の分布についても、それぞれ、横方向残留応力分布、横方向ひずみ分布および横方向応力分布という。

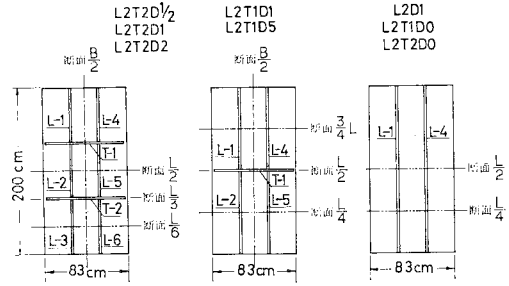


図-1 供試体の形状ならびにひずみ測定断面

補剛板である。横リブに着目すれば、① 横リブをもたない供試体、② 補剛板中央部に1本の横リブを有する供試体、③ 等間隔に配置された2本の横リブを有する供試体の3種類がある。

供試体材料には SS41 を用いた。ただし、図-2に示すように、供試体の上下の端部板パネルでは、4.(1)に述べる理由により SM58 材を使用した。

(2) 供試体の幅厚比の決定

補剛材間の板パネルの無次元幅厚比 R は次式で与えられる。

$$R = b/t \sqrt{\sigma_y/E \cdot 12(1-\nu^2)/\pi^2 k}, (k=4) \dots (1)$$

ここで、 b , t , σ_y , ν , E , k は、それぞれ、縦リブ間隔、板パネルの板厚、板パネル材料の降伏点、ポアソン比、ヤング係数および板パネルの座屈係数を表わす。今回の実験では、横リブの剛度が補剛板の極限強度に及ぼす効果を調べるという点に着目したため、縦横の補剛材で囲まれた板パネルの局部的なたわみ波形は発生させずに、横リブ位置で節となるような全体的なたわみ波形あるいはまったく節の生じない全体的な大きなたわみ波形が著しく発達して極限状態に至るように補剛板の設計を行った。すなわち、文献11)を参考にして、板パネルが降伏点に至るまで局部座屈を起こさないように、その無次元幅厚比 R をほぼ 0.5 以下になるようにした。ちなみに実橋における R はほぼ 0.3~0.7 の範囲内に分布している。一方、板厚はなるべく実橋に近いものにしたということと、圧縮試験機の能力を考慮して、板パネルの板厚 t は 11mm とした。いま、 $b=27$ cm とすると、式(1)より、 $R=0.471$ となる。ただし、板パネルの降

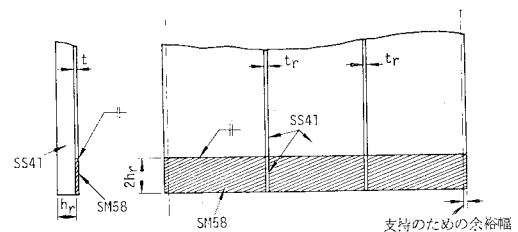


図-2 供試体端部の詳細

伏点 σ_y は 2800 kg/cm^2 とし計算した。

以上のことより、板パネルの幅 b を 27 cm 、板厚 t を 11 mm とした。すると、補剛板の全幅 B は 81 cm となる。ただし、供試体の側辺を単純支持ジグで支持するために、両側辺でそれぞれ 1 cm ずつの余裕幅を必要とする。したがって、供試体の全幅は実際には 83 cm となっている。ただし、支持辺間距離は常に 81 cm を保持できるような装置になっている。

(3) 縦横比 a/B の決定

横リブ間の補剛板パネルの縦横比を α とすると、 $\alpha = a/B$ 。ここで、 a は横リブ間隔。この α が極限強度に及ぼす影響を調べるため、横リブ本数を $0, 1, 2$ 本に変化させた。すなわち、 α はそれぞれ $2.47, 1.23, 0.823$ となる。

箱桁橋の圧縮下フランジのように補剛材本数が多い補剛板パネルではその縦横比は 1 の付近あるいはそれよりも小さくなることが多く、だいたい $0.3 \sim 1.8$ の範囲内に分布しているようである。また、トラス橋の圧縮部材の構成パネルのように補剛材本数の比較的少ない補剛板では、縦横比 α は式 (2) で与えられる道路橋示方書 (以下道示という) の最大縦横比 α_0 よりも大きい場合が多い。

$$\alpha_0 = a_0/B = \sqrt{2n^2(t_0/t)^2 \cdot (1+n\delta) - 1} \dots\dots(2)$$

ここに、 α_0 : α_0 のときの横リブ間隔、 n : 縦リブによって区切られるパネル数、 t_0 : 道示規定 3.4.1 に準拠して計算した最小板厚 ($=b/0.7 \cdot \sqrt{\sigma_y/E \cdot 12(1-\nu^2)/\pi^2 k}$)、 $\delta = F_r/Bt$: 縦リブ 1 本の断面積比、 F_r : 縦リブ 1 本の断面積。

今回の実験では、補剛板供試体の縦横比の最大値が α_0 以下になるようにした。

(4) 補剛材本数の決定

座屈現象があまり複雑にならないように縦リブ本数を 2 本とした。また、横リブ本数は縦横比の関係から $0, 1, 2$ 本とした。

(5) 補剛材寸法の決定と供試体番号の説明

a) 横リブが 2 本の供試体

縦リブの剛比 r は次式で与えられる。

$$r = EI_r / BD \dots\dots(3)$$

ここで、 I_r は縦リブ 1 本の断面 2 次モーメント。ただし、補剛材側の板の面に関する断面 2 次モーメント。 D は板パネルの曲げ剛度である。まず、この r が道示で規定する必要最小剛比 r_N になるように縦リブを設計する。さらに、横リブの断面 2 次モーメント I_q も道示で規定する必要最小値

I_{qN} になるように横リブを設計する。そして、この供試体を $L2T2D1$ と名付ける。さらに、横リブの剛性が極限強度に及ぼす効果を調べるため、 I_q/I_{qN} のみを $0, 0.5, 2$ になるように横リブの剛比を変化させた供試体を、それぞれ、 $L2T2D0, L2T2D1/2, L2T2D2$ と名付ける。

b) 横リブが 1 本の供試体

$r/r_N = 1, I_q/I_{qN} = 1$ となるように縦リブおよび横リブを設計した供試体を $L2T1D1$ とする。さらに、 $r/r_N = 1$ に固定し、 I_q/I_{qN} を $0, 5$ となるように設計した供試体を $L2T1D0, L2T1D5$ と名付ける。

c) 横リブがない供試体

$r/r_N = 1$ となるように縦リブを設計した供試体を $L2D1$ と名付ける。ただし、供試体 $L2T2D0, L2T1D0$ は、剛度 0 なる横リブが存在するものとして考える。

d) 縦リブの突出幅厚比

縦リブの無次元突出幅厚比 R_r は式 (4) で与えられる。

$$R_r = h_r/t_r \cdot \sqrt{\sigma_{y,r}/E \cdot 12(1-\nu^2)/\pi^2 k_s}, k_s = 0.425 \dots\dots(4)$$

ここに、 h_r : 縦リブ突出幅、 t_r : 縦リブ厚さ、 $\sigma_{y,r}$: 縦リブ材料の降伏点、 k_s : 突出板の座屈係数。

今回の実験においては、現象の複雑化を避けるために、縦リブの局部的なねじり座屈現象が生じないように、その突出幅厚比を決定した。すなわち、文献 12) を参考にして、 R_r が 0.4 以下になるようにした。

(6) ビード寸法の設計

実際の残留応力分布が再現されるように、供試体各部のビード寸法を決定した。まず、文献 9) に従って残留応力分布を決定する。その圧縮残留応力度の合力を F_c とすると、この F_c と全ビード断面積 ΣA_w の間には以下の関係があると考えられる。

$$F_c = C \cdot \Sigma A_w \dots\dots(5)$$

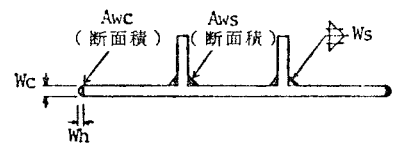
文献 9) では、本供試体の製作に用いた MISA 溶接 (Micro-Wire-Submerged-Arc-Welding) の場合、SS 41 材に対する C の値として以下の実験値を示している。

$$C = 490 \text{ kg/mm}^2$$

この C を用いて ΣA_w を求め、それを側辺ビード盛り部も含む各溶接部に均等に分配した。その結果を表 1 に示す。なお、供試体の側辺には実際の残留応力分

表 1 設計ビード寸法

供試体	W_c	W_h	W_s
L2D1	6	4	6
L2T1D1	6	4	6
L2T2D1	6	4	6



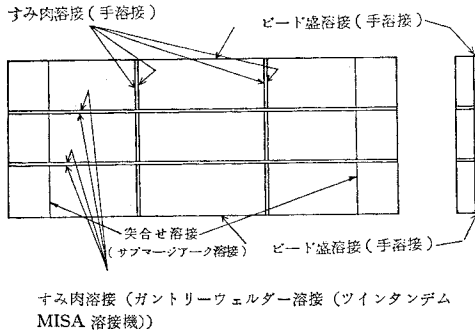


図-3 溶接法 (供試体 L2T2D1)

布を再現するためにビード盛り溶接を行っている。

(7) 供試体の製作

供試体に使用する板および補剛材は原材からガス切断により取り出された。その後、板パネル材料 (SS 41) の両端部に 図-2 に示すように 端部補強板 (SM 58) を突合せ溶接した。次に、縦リブ、それから横リブをすみ肉溶接で板パネルに接合する。さらに供試体の側辺にビード盛り溶接を行う。そして最後に、供試体長 L が 200 cm になるように、供試体の両端部を機械切断した。実橋の場合、ひずみ取りはプレス工法あるいは線状加熱法を用いて行われている。今回の供試体の製作にあたっては、実橋の場合と同様なプレスを用いたひずみ取りを行った。また、供試体各部の組立てに用いた溶接手法を 図-3 に示す。

残留応力の測定、初期たわみの測定および面内圧縮試験はすべて同じ方法でひずみ取りを行った後の供試体を対象とした。

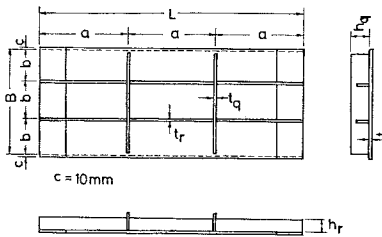


図-4 供試体寸法を表わす記号

3. 予備実験とその考察

(1) 供試体寸法の測定

供試体各部の寸法を実測し各供試体諸元とともに 表-2 に示す。表中、 n_r : 縦リブ本数、 n_q : 横リブ本数、 A, A^* : 補剛板断面積 (A^* は側辺支持ジグ取付け部を含む)、 e : 補剛板断面の中立軸と板パネル中央面との距

表-2 供試体の諸元と実験結果

供試体	L2D1	L2T1D5	L2T1D1	L2T1D0	L2T2D2	L2T2D1	L2T2D0	L2T2D0
端元								
n_r	2	2	2	2	2	2	2	2
n_q	0	1	1	1*	2	2	2	2*
L	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
a	200.0	100.0	100.0	100.0	66.7	66.7	66.7	66.7
a_0	259	283	283	283	238	237	238	238
B	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0	81.0
b	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0	27.0
$\alpha=a/B$	2.47	1.235	1.235	1.235*	0.823	0.823	0.823	0.823*
$\alpha_0=a_0/B$	3.20	3.49	3.49	3.49	2.93	2.93	2.93	2.93*
t	1.06	1.09	1.09	1.09	1.06	1.06	1.06	1.06
t_0	0.725	0.832	0.832	0.832	0.725	0.725	0.725	0.725
b/t	25.5	24.8	24.8	24.8	25.5	25.5	25.5	25.5
P	0.479	0.534	0.534	0.534	0.479	0.479	0.479	0.479
h_r	9.10	6.94	6.89	6.89	4.69	4.64	4.65	4.66
t_r	1.06	1.09	1.09	1.09	0.86	0.86	0.86	0.86
h_r/t_r	8.58	6.37	6.32	6.32	5.45	5.40	5.41	5.42
h_r	0.495	0.421	0.418	0.418	0.381	0.377	0.377	0.378
A	105.2	103.4	103.3	103.3	93.9	93.8	93.9	93.9
A^*	107.3	105.6	105.5	105.5	96.0	96.0	96.0	96.0
δ	0.1123	0.0857	0.0851	0.0851	0.0470	0.0465	0.0466	0.0467
γ	30.4	12.74	12.46	12.46	3.37	3.27	3.29	3.31
γ_N	29.0	11.28	11.26	11.26	3.40	3.39	3.40	3.40
γ/γ_N	1.05	1.13	1.11	1.11	0.99	0.97	0.97	0.97
h_q	—	9.21	6.10	0*	6.78	6.15	4.33	0*
t_q	—	0.86	0.58	0*	0.86	0.58	0.86	0*
h_q/t_q	—	10.7	10.5	—	7.88	10.6	5.03	—
q	—	224	43.9	0*	89.3	45.0	23.3	0*
q_N	—	49.6	48.6	48.6	43.7	42.5	42.7	43.0
I_q/I_{qN}	—	4.52	0.903	0*	2.04	1.06	0.546	0*
e	0.914	0.575	0.568	0.568	0.241	0.237	0.238	0.239
e/t	0.862	0.528	0.521	0.521	0.227	0.224	0.225	0.225
σ_y	2680	3530	3530	3530	2680	2680	2680	2680
$\sigma_{y,q}$	2680	3530	3530	3530	3930	3930	3930	3930
$\sigma_{y,q}^z$	—	3930	3320	—	3930	3320	3930	—
$\sigma_{y,q}^z$	2680	3530	3530	3530	2790	2780	2780	2780
$P_y(t)$	287	373	372	372	267	267	267	267
$P_{max}(t)$	215	325	308	270	227	235	230	209
P_{max}	2000	3080	2920	2560	2360	2450	2400	2080
P_{max}/P_y	0.749	0.871	0.828	0.726	0.850	0.880	0.861	0.749

* 印は剛度が0の横リブが存在すると考える (単位は kg, cm)。

離、 $\sigma_{y,q}$: 横リブ材料の降伏点、 P_y : 全断面降伏荷重、 P_{max} : 最大荷重。この表で用いたその他の記号については、図-4 および本文中にそれぞれ示す。

(2) 引張試験

供試体は4枚の原材 (鋼材番号 A, B, C および D) から作製された。それぞれの鋼材から JIS 5 号試験片を3本ずつ切り出し、合計 12 本の引張試験を行った。各供試体を使用した鋼材番号を表-3 に、引張試験の結果を表-4 に示す。

表-3 供試体を使用した鋼材

供試体	板	縦リブ	横リブ
L2D1	B	B	—
L2T1D0	A	A	—
L2T1D1	A	A	D
L2T1D5	A	A	C
L2T2D0	B	C	—
L2T2D1/2	B	C	C
L2T2D1	B	C	D
L2T2D2	B	C	C

表-4 引張試験結果

鋼材	t	$\sigma_{y,l}$	$\sigma_{y,u}$	σ_T	σ_B	E	ν	δ
A	10.9	3530	3760	4990	3680	2.08	0.286	39.5
B	10.6	2680	2830	4490	3300	2.08	0.288	42.7
C	8.6	3930	4240	5600	3920	2.11	0.288	36.4
D	5.8	3320	3520	4690	3990	2.12	0.291	36.5

$\sigma_{y,l}$: 降伏点 (kg/cm²), t : 板厚 (mm)
 $\sigma_{y,u}$: 上昇伏点 (kg/cm²), E : ヤング係数 (10⁹ kg/cm²)
 σ_T : 引張強さ (kg/cm²), ν : ポアソン比
 σ_B : 破断強さ (kg/cm²), δ : 伸び率 (%)

引張試験の結果、強度のばらつきにより、供試体は、補剛材と板パネルの降伏点が異なるハイブリッド構造となっているものもあることがわかった。特に、L2T2シリーズはその傾向が強い。しかし、後述するように、実験後、判明したことであるが、補剛板の極限強度に影響するのは横リブの曲げ剛度 EI_q であり横リブの降伏点の大きさはあまり問題とならない。また、今回の実験では、横リブ本数別に横リブ剛度と極限強度の関係を相対的に明らかにすることを目的としているため、横リブ本数が等しく、その曲げ剛性の異なる供試体でグループ別に実験を行う。したがって、各グループ内で板パネルの降伏点および縦リブの降伏点が同一であればよく、板パネルと縦リブの降伏点が等しくなる必要はない。以上のことより、供試体がハイブリッド構造となっても本研究の目的は十分達成できるものと思われる。

(3) 残留応力の測定

a) 残留応力測定用供試体

表-5 溶接条件

供試体		D	A	V	v	Q	A_w	k
L2D1RL	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	21.8	13.5
	側辺	5.0	250	29	17.5	2.490	35.4	14.2
L2T1D1RLT	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	25.9	16.0
	横リブ	4.0	220	29	19.5	1.970	27.4	13.9
	側辺	5.0	240	29	18.0	2.320	47.1	20.3
	側辺	5.0	240	29	18.0	2.320	47.1	20.3
L2T2D1RLT	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	27.4	16.9
	横リブ	4.0	225	29	18.5	2.120	26.6	12.5
	側辺	5.0	205	29	18.0	1.885	39.5	21.0
	側辺	5.0	205	29	18.0	1.885	39.5	21.0
L2D1	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	31.8	19.6
	側辺	5.0	240	29	18.0	2.320	34.3	14.8
L2T1D5	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	30.7	19.0
	横リブ	4.0	230	29	19.0	2.110	20.8	9.9
	側辺	5.0	250	29	17.5	2.490	33.2	13.3
	側辺	5.0	250	29	17.5	2.490	33.2	13.3
L2T1D1	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	29.4	18.1
	横リブ	4.0	230	29	19.5	2.050	24.1	11.8
	側辺	5.0	240	29	18.0	2.320	34.2	14.7
	側辺	5.0	240	29	18.0	2.320	34.2	14.7
L2T1D0	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	30.2	18.6
	側辺	5.0	240	29	18.0	2.320	38.5	16.6
L2T2D2	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	30.6	18.9
	横リブ	4.0	240	29	19.0	2.110	22.3	10.6
	側辺	5.0	250	29	17.0	2.560	32.3	12.6
	側辺	5.0	250	29	17.0	2.560	32.3	12.6
L2T2D1	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	28.5	17.6
	横リブ	4.0	225	29	19.0	2.060	23.9	11.6
	側辺	5.0	195	29	18.0	1.885	32.3	17.1
	側辺	5.0	195	29	18.0	1.885	32.3	17.1
L2T2D1/2	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	34.5	21.3
	横リブ	4.0	230	29	19.0	2.110	20.7	9.8
	側辺	5.0	245	29	18.0	2.490	31.2	12.5
	側辺	5.0	245	29	18.0	2.490	31.2	12.5
L2T2D0	縦リブ	1.6	260 (280)	36 (34)	70.0	1.620	31.7	19.6
	側辺	5.0	240	29	18.0	2.320	29.1	12.5

縦リブの溶接の電流、電圧の欄で () 外はリードトーチで、() 内はトレーストーチの値を示している。

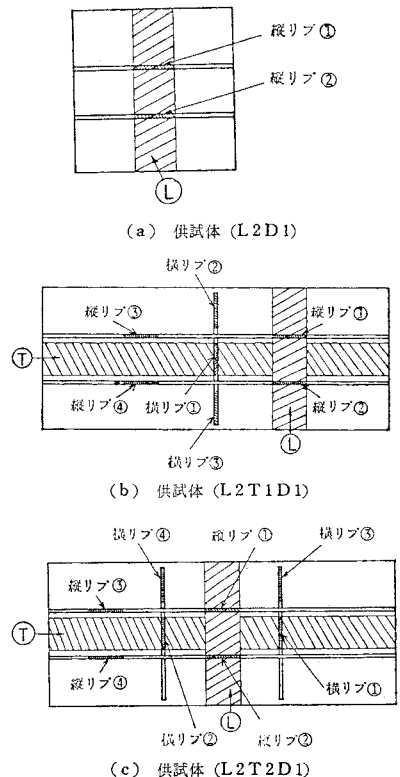
D: ワイヤ直径あるいは溶接棒径 (mm), A: 電流 (A), V: 電圧 (V), v: 速度 (mm/sec), Q: 入熱量 (10^3 J/mm), A_w : ビード断面積 (mm^2), $k = A_w/Q$

表-6 溶接寸法の実測値

供試体	溶接位置			
	縦リブ	横リブ	側 辺	
	W_s	W_s	W_c	W_k
L2D1RL	6.6	—	10.6	9.3
L2T1D1RLT	7.2	7.4	10.9	6.0
L2T2D1RLT	7.4	7.3	10.6	4.8
L2D1	8.0	—	10.6	4.1
L2T1D5	7.8	6.4	10.9	3.9
L2T1D1	7.7	6.9	10.9	4.0
L2T1D0	7.8	—	10.9	4.5
L2T2D2	7.8	6.7	10.6	4.1
L2T2D1	7.6	6.9	10.6	3.9
L2T2D1/2	8.3	6.4	10.6	3.8
L2T2D0	8.0	—	10.6	3.5

単位は mm

面内圧縮試験用供試体とは別に、供試体 L2T2D1, L2T1D1, L2D1 と同じ断面諸量を有する補剛板を残留応力測定用供試体として、同じ溶接条件で製作した。これらの供試体をそれぞれ L2T2D1RLT, L2T1D1RLT, L2D1RL と名付ける。ただし、供試体 L2D1 と同じ横断面諸量を有する供試体 L2D1RL については軸方向の残留応力はほぼ一定しているという見地からその長さを 80 cm と短くした。



①……縦方向残留ひずみ測定領域
②……横方向残留ひずみ測定領域

図-5 供試体の残留応力測定部分

b) 溶接条件

表-5, 6 に溶接条件およびビード寸法の実測値を示す。ビード断面積 A_w と入熱量 Q との比 k は, 手溶接を行ったビード盛り溶接部ならびに横リブのすみ肉溶接部では $(9.8 \sim 21.3) \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{J}$, MISA 溶接を行った縦リブのすみ肉溶接部では $(12.5 \sim 21.0) \times 10^{-3} \text{ mm}^3/\text{J}$ となり, 文献 9) と同様な値を示した。また, C の実測値は, $244 \sim 442 \text{ kg/mm}^2$ となり, ビード寸法の設計に用いられた値, すなわち, 文献 9) の値 490 kg/mm^2 は, この値より若干安全側の値となることがわかった。

c) 測定位置および測定法

3体の残留応力測定用供試体の図-5 に示す位置で残留ひずみの測定を行った。測定には熱の影響が入らないように機械切断により応力を解放する方法を採用した。その際, 切断前後の標点間の読みの差をコンタクトゲージを用いて測定した。そのゲージ長は 10 cm, 切断幅は 10~40 mm である。測定の際, 同じ材料からなるダミー片を作製して測定値の温度補正を行った。縦・横方向の残留ひずみ測定領域の交差部分ではコンタクトゲージ以外に横方向の残留ひずみを測定するためひずみゲージを併用した。しかし, 機械切断の際にゲージが不良となり, この部分の横方向残留ひずみは測定不能となった。

d) 残留応力度

縦リブと横リブを溶接した板パネルには, 縦方向残留ひずみと横方向残留ひずみが共存する。そこで, 板パネルについては, 以下に示すように平面応力問題として, その残留応力度を算出した。いま, 縦方向の残留応力度を σ_{rl} , 残留ひずみを ϵ_{rl} , 横方向の残留応力度を σ_{rq} , 残留ひずみを ϵ_{rq} とすると,

$$\sigma_{rl} = E / (1 - \nu^2) \cdot (\epsilon_{rl} + \nu \cdot \bar{\epsilon}_{rq}) \dots \dots \dots (6)$$

$$\sigma_{rq} = E / (1 - \nu^2) \cdot (\epsilon_{rq} + \nu \cdot \bar{\epsilon}_{rl}) \dots \dots \dots (7)$$

ここで, $\bar{\epsilon}_{rl}$ および $\bar{\epsilon}_{rq}$ は, σ_{rl} および σ_{rq} を計算する際に用い, 以下で述べる近似的な ϵ_{rl} , ϵ_{rq} を意味す

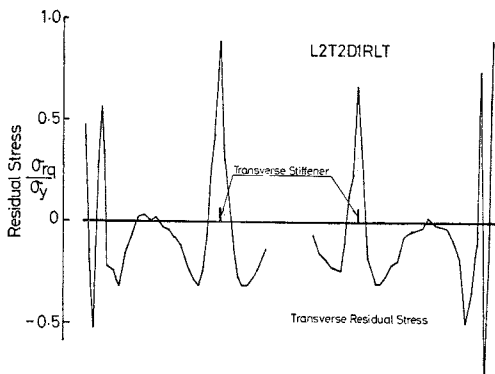


図-6 横方向残留応力分布の一例 (供試体 L2T2D1RLT)

る。

供試体 L2T2D1RLT の ϵ_{rq} の実測値をその降伏ひずみ ϵ_y ($=\sigma_y/E$) で無次元化して図-6 に示す。

表-7 直角方向残留ひずみ

供試体	$\bar{\epsilon}_{rq}$	$\bar{\epsilon}_{rl}$
L2D1RL	0	-
L2T1D1RLT	200 μ	-580 μ
L2T2D1RLT	130 μ	-530 μ

縦リブと横リブで囲まれた板パネル要素の圧縮強度に大きな影響を及ぼすパネル中央部での残留ひずみに着目して $\bar{\epsilon}_{rq}$ を求め, その $\bar{\epsilon}_{rq}$ が, 補剛板の横方向に一定して存在するものと仮定する。図-6 より, この中央部では引張の ϵ_{rq} が存在するものと思われる。ただし ϵ_{rl} の測定領域である中央の板パネルでは ϵ_{rq} の実測値が

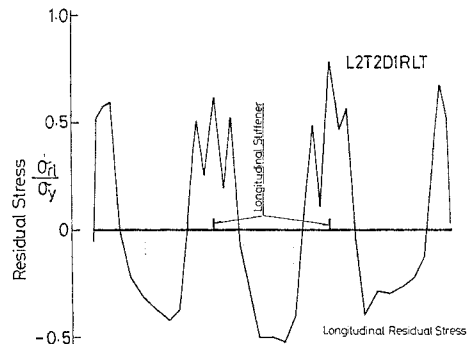


図-7 縦方向残留応力分布の一例 (供試体 L2T2D1RLT)

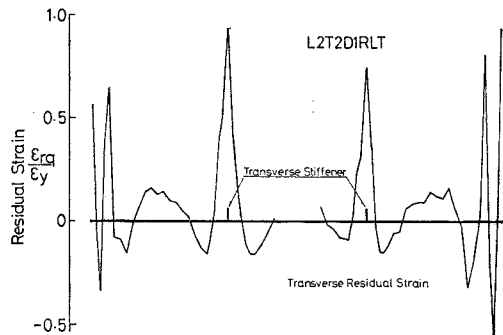


図-8 横方向残留ひずみ分布の一例 (供試体 L2T2D1RLT)

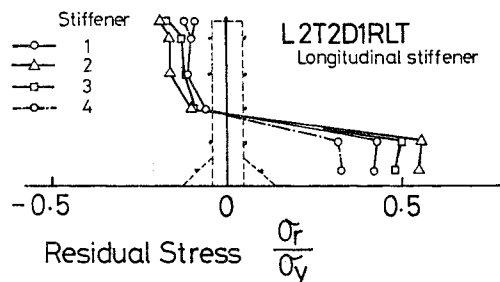
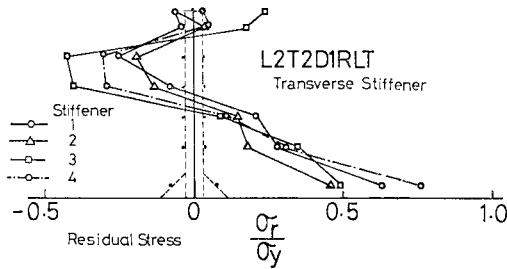


図-9 縦リブの残留応力分布の一例 (供試体 L2T2D1RLT)



図一〇 横リブの残留応力分布の一例 (供試体 L2T2D1RLT)

入手できなかったため隣接パネルの中央部の引張の ϵ_{rq} の平均値を σ_{rl} を求める際の $\bar{\epsilon}_{rq}$ とした。

$\bar{\epsilon}_{rl}$ については、中央板パネルの圧縮の ϵ_{rl} の平均値を用いた。

このようにして求めた $\bar{\epsilon}_{rl}$ と $\bar{\epsilon}_{rq}$ を表一七に示す。ただし、供試体 L2D1RL については、横リブが存在しないので $\bar{\epsilon}_{rq}=0$ として σ_{rl} を計算した。

このようにして求めた板パネルの残留応力度 σ_{rl} , σ_{rq} および縦リブと横リブの残留応力度を 図一七~一〇 に示す。板パネル中央部の残留応力分布について着目すれば、縦方向の残留応力度 σ_{rl}/σ_y の大きさは、 ϵ_{rl}/ϵ_y の大きさとほとんど変わらなかったが、 図一六 と 図一八 を比較するとわかるように、横方向の残留応力度 σ_{rq}/σ_y の大きさは、 ϵ_{rq}/ϵ_y より小さくなり、板パネル中央部ではほとんど残留応力度が 0 になっていることがわかる。また、実測した残留応力度の分布形をパターン化し、その代表値および代表的な寸法をまとめ表一八、九に示す。縦リブ、横リブおよび板パネルの残留圧縮応力度の分布形を矩形分布にパターン化すると、それぞれの平均圧縮応力度は、 $\bar{\sigma}_{rc,r}/\sigma_{y,r} = -0.11 \sim -0.33$, $\bar{\sigma}_{rc,r}/\sigma_{y,q} = -0.18$, $\bar{\sigma}_{rc}/\sigma_y = -0.24 \sim -0.45$ となった。実測したビード寸法が設計値より大きくなったため、測定結果が文献 9) の値より、若干大きく出たものと思われる。板パネルの横方向の残留圧縮応力度の分布形は三角形にパターン化でき、その絶対最大値 σ_{rci}/σ_y は $-0.23 \sim -0.39$ となった。

縦リブおよび横リブについては先端をすべてガス切断で仕上げた

にもかかわらず、L2D1RL の縦リブを除いて、その先端部では文献 9) で示されているようなきわだった引張の残留応力は生じていなかった。これは、ビード寸法 ($w_s=6\text{ mm}$) に対するリブの高さの比が、L2D1RL の縦リブでは 15.2 と大きいのに、ほかは 7.7~11.5 と小さかったことに起因したものと思われる。この比が小さいと、ガス切断によって生じていた残留応力がリブを板に取り付けるすみ肉溶接の際に除去されるためと思われる。しかし、これらの縦リブは、突出幅厚比 h_r/t_r が 5.4~6.4 と小さく、横倒れ座屈が生じにくい断面となっている。したがって、リブの先端に引張の残留応力が存在するかしないかはリブの補剛効果という点からはあまり問題とならないように思われる。事実、実験において縦リブのねじり座屈現象は認められなかった。

(4) 初期たわみの測定

図一〇 (a) に示す板パネルの初期たわみ (δ_1, δ_2)、縦リブおよび横リブの Z 軸方向の棒としての初期たわみ ($\delta_3, \delta_3', \delta_4$) ならびに縦リブの Y 軸方向の板としての初期たわみ (δ_4, δ_4') をレベルと鋼尺を用いて測定した。 δ_4, δ_4' 以外の初期たわみについては、4.(1) で述べる側

表一八 縦方向残留応力度 σ_{rl} の実測値

(a) 板パネル (縦方向)									
供試体	$\frac{bc_1}{b}$	$\frac{\bar{\sigma}_{rc1}}{\sigma_y}$	$\frac{bc_2}{b}$	$\frac{\bar{\sigma}_{rc2}}{\sigma_y}$	$\frac{bc_3}{b}$	$\frac{\bar{\sigma}_{rc3}}{\sigma_y}$	$\frac{bc}{b}$	$\frac{\bar{\sigma}_{rc}}{\sigma_y}$	c (kg/mm ²)
L2D1RL	0.67	0.45	0.63	0.39	0.67	0.39	0.66	0.41	442
L2T1D1RLT	0.67	0.32	0.63	0.34	0.67	0.27	0.66	0.31	327
L2T2D1RLT	0.52	0.34	0.56	0.42	0.67	0.24	0.58	0.33	244

(b) 縦リブ						
供試体	$\frac{\bar{\sigma}_{rc,r}}{\sigma_{y,r}}$	$\frac{\sigma_{rs,r}}{\sigma_{y,r}}$	$\frac{\bar{\sigma}_{rc,r}}{\sigma_{y,r}}$	$\frac{h_{r0}}{h_r} \left(\frac{h_c}{h_r} \right)$	$\frac{h_{cm}}{h_r}$	
L2D1RL	0.52	△ 0.35	0.33	0.56 (0.44)	0.37	
L2T1D1RLT	0.20	0.05	0.13	0.54 (0.54)	0.22	
L2T2D1RLT	0.14	—	0.11	0.55 (0.55)	0.00	

(c) 引張残留応力度 (縦方向)					
供試体	σ_{rt1}	σ_{rt2}	σ_{rt3}	σ_{rt4}	σ_{rt}
L2D1RL	1.06	1.00	1.01	0.98	1.01
L2T1D1RLT	0.78	0.81	0.78	0.78	0.79
L2T2D1RLT	0.59	0.61	0.78	0.67	0.66

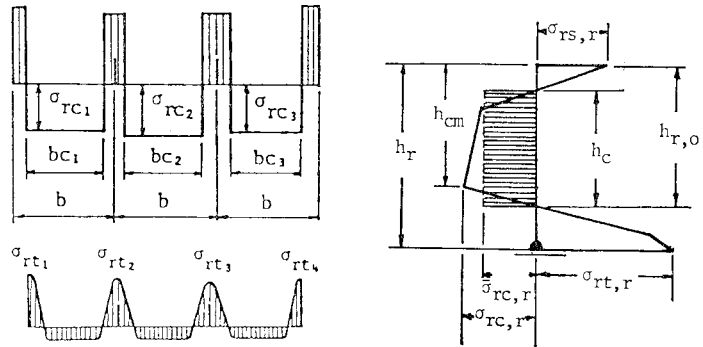


表-9 横方向残留応力度 σ_{rt} の実測値

(a) 縦パネル

供試体	$\frac{\sigma_{rc1}}{\sigma_y}$	$\frac{\sigma_{rc2}}{\sigma_y}$	$\frac{\sigma_{rc3}}{\sigma_y}$	$\frac{\sigma_{rc4}}{\sigma_y}$	$\frac{a_{c1}}{2a}$	$\frac{a_{c2}}{2a}$	$\frac{a_{c3}}{2a}$	$\frac{a_{c4}}{2a}$
L2T1D1RLT	0.39	0.37	—	—	*	0.26	—	—
L2T2D1RLT	0.31	0.31	0.23	0.30	0.36	*	*	0.44

供試体	$\frac{a_{t1}}{2a}$	$\frac{a_{t2}}{2a}$	$\frac{a_{t3}}{2a}$	$\frac{a_{t4}}{2a}$	$\frac{a_{m1}}{2a}$	$\frac{a_{m2}}{2a}$	$\frac{a_{m3}}{2a}$	$\frac{a_{m4}}{2a}$
L2T1D1RLT	0.04	0.04	—	—	0.05	0.09	—	—
L2T2D1RLT	0.09	0.08	0.08	0.05	0.16	0.16	0.13	0.13

* 印は測定不能

(b) 横リブ

供試体	$\frac{\sigma_{rc,r}}{\sigma_{y,q}}$	$\frac{\sigma_{rs,r}}{\sigma_{y,q}}$	$\frac{\bar{\sigma}_{rc,r}}{\sigma_{y,q}}$	$\frac{h_{rD}}{h_q}$ ($\frac{h_c}{h_q}$)	$\frac{h_{cm}}{h_q}$
L2T1D1RLT	0.31	△ 0.07	0.18	0.58 (0.58)	0.25
L2T2D1RLT	0.29	0.23	0.18	0.51 (0.48)	0.24

(c) 引張残留応力度 (横方向)

供試体	σ_{rt1}	σ_{rt2}
L2T1D1RLT	0.99	—
L2T2D1RLT	0.89	0.67

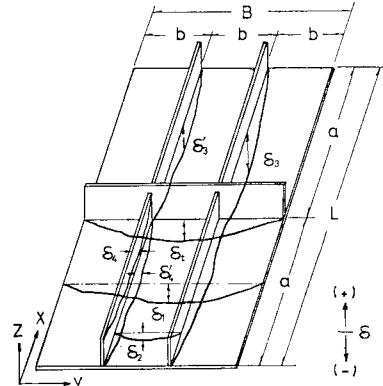
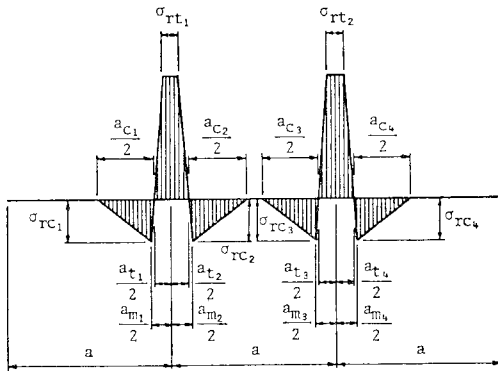


図-11(a) 補剛板の初期たわみ

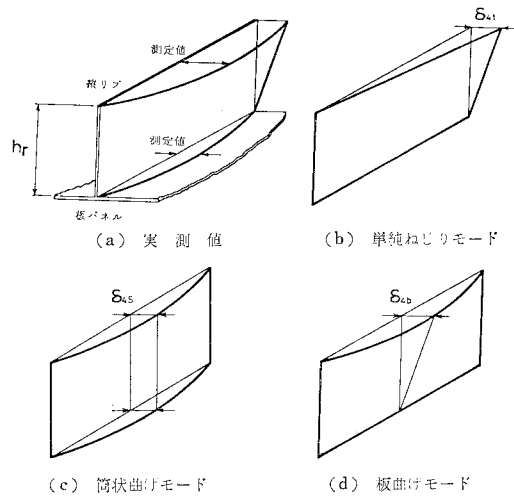


図-11(b) 縦リブの横倒れ初期たわみ

辺単純支持ジグに供試体をセットした状態で測定を行った。最小二乗法を用いて圧縮軸方向の測定値 (Y, Z 座標は一定で, X 軸方向に沿った測定値) を数項の三角級数であてはめ、そのあてはめた初期たわみ波形を用いて測定値の棄却検定を行った。棄却検定された初期たわみ

を種々のモードに整理し、それぞれの正負の最大値を表-10 に示す。表中の L-1, T-1 などの記号は 図-1 に示す縦リブおよび横リブの位置を表わしている。| δ_1 | は道示の許容限界値である $B/150$ の 0.07~0.53 程度、| δ_2 | は $b/150$ の 0.08~0.67 程度、 δ_3 は補剛板長 L の

表-10 補剛板の初期たわみ

供試体	$150 \cdot \delta_1 / B$	$150 \cdot \delta_2 / b$	$1000 \cdot \delta_3 / L$	$1000 \cdot \delta_3 / a$						$1000 \cdot \delta_2 / B$	
				L-1	L-2	L-3	L-4	L-5	L-6	T-1	T-2
L2D1	0.49	0.52	0.97	0.97	*	*	0.57	*	*	*	*
	—	-0.23	-0.25	-0.25	*	*	-0.20	*	*	*	*
L2T1D0	0.36	0.67	0.73	0.73	*	*	0.61	*	*	*	*
	—	-0.14	-0.24	-0.14	*	*	-0.24	*	*	*	*
L2T1D1	0.38	0.51	0.36	—	—	*	0.68	—	*	1.89	*
	—	-0.08	-0.95	-1.59	-1.21	*	-0.25	-0.46	*	—	*
L2T1D5	0.39	0.60	0.12	—	—	*	0.66	—	1.10	0.99	*
	—	-0.08	-1.12	-1.87	-0.08	*	-1.19	—	*	—	*
L2T2D0	0.45	0.57	0.13	0.13	*	*	0.11	*	*	*	*
	—	-0.16	-0.66	-0.66	*	*	-0.51	*	*	*	*
L2T2D1/2	0.37	0.63	0.20	—	0.65	—	0.10	—	0.33	1.49	0.67
	-0.07	-0.19	-0.42	-0.70	-0.05	-0.90	-0.20	-0.37	-0.63	—	-0.32
L2T2D1	0.30	0.59	0.73	—	1.41	—	0.17	0.07	—	0.91	0.08
	-0.28	-0.40	-0.92	-2.27	—	-0.69	-0.74	-0.29	-1.38	-1.11	-1.69
L2T2D2	0.53	0.63	0.57	1.00	—	—	0.13	1.21	—	0.41	1.08
	-0.13	-0.36	-0.44	—	-0.89	-1.31	—	-1.03	-0.80	-0.14	-0.52

($-1.12 \sim 0.97$) $\times 10^{-3}$, δ_s' は横リブ間隔 a の ($-2.27 \sim 1.21$) $\times 10^{-3}$, δ_f は幅 B の ($-1.69 \sim 1.89$) $\times 10^{-3}$ 程度となった. 縦リブの Y 軸方向の初期たわみについては 図-11(b) に示す δ_{4t} , δ_{4s} , δ_{4b} という 3 つのモードに分離して整理してみた. 道示では, 補剛材の横倒れ初期たわみに関する規定はないが, フランジ直角の規定を準用し, その制限値を一応 $h_r/100$ であるとみなす. 今回の供試体では, 図-11(b) に示す各モード δ_{4b} , δ_{4s} , δ_{4t} の絶対最大値が, 供試体 L2D1, L2T2D1/2 では $h_r/100$ の 2 倍程度, L2T1D0, L2T1D5, L2T2D1 では 3 倍程度, L2T1D1, L2T2D2 では 4 倍程度, L2T2D0 では 6 倍程度とかなり大きくなっていった. これは, ビード断面積対リブ断面積の比 (F_r/A_w) が小さく, 溶接による変形が大きく出たものと思われる. しかし, 今回の実験においては, 補剛材に局部的なねじり変形が生じないように h_r/t_r を十分小さくしているため初期たわみが大きかったことは補剛材の曲げ剛性および補剛板の極限強度にほとんど影響を与えなかったものと思われる. 事実, 実験においても, 補剛材のねじり座屈現象はまったく認められなかった.

4. 面内圧縮試験とその考察

(1) 圧縮試験装置

面内圧縮試験に用いた試験装置の概略を 図-12 に示す. この装置は, 今回の実験に際して新たに開発されたもので, 数本の縦リブと 0~2 本の横リブを有する補剛板の面内圧縮実験を行うことができる. 装置の主要部分である側辺単純支持ジグは, 以前に著者らが開発したジグ^{4),5)} と同じ機構になっている. 回転, ねじり, および縦横方向の面内変位は自由なたわみのみを拘束した状態で, 補剛板の側辺を支持することができるような機構となっている. 前回の実験⁵⁾ では, 載荷辺は固定あるいは補剛板全体の中立軸位置で単純支持となるような機構とした.

今回は 図-13 に示すように, 板パネルの中央面で単純支持となるような機構とした. その理由は以下の 2 点にある. まず, 補剛板の場合, 載荷辺で完全に純圧縮で単純支持の境界条件を実験で再現するのがきわめて難しいこと. および, 今回の実験では, 縦横に補剛された圧縮板の理論解析法の検証に有用な実験データを提供することも 1 つの目的としており, そのためには, 境界条件の明確な実験でなくてはならないという 2 点である. また, 今回の実験では, 横リブの本数別に横リブの剛度と極限強度の関係を相対的に把握することを目的としており, 実験から得られた極限強度の絶対値を基に, 直接,

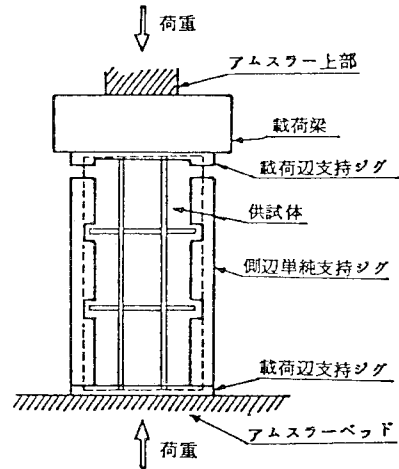


図-12 載荷装置の概略図

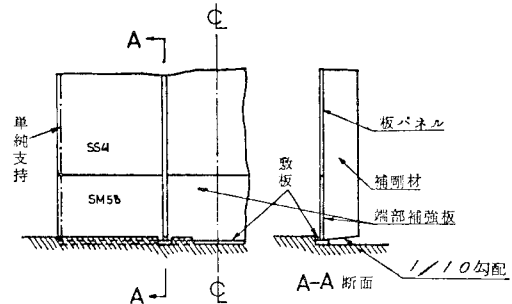


図-13 載荷辺概略図

実橋の場合の圧縮補剛板の極限強度あるいはその安全性について検討を加えるわけではない. したがって, この載荷方法で, 本研究の目的は十分達成できるものと思われる. その際, 補剛板の載荷辺付近では板パネルを通じて力が導入される. したがって, 端部の板パネルは, 内側の板パネルより負担が大きく, 局部的な座屈現象を生じる危険性がある. そこで, 図-2 に示すように, その部分に SM 58 材を用いて対処した.

(2) 面内圧縮試験

圧縮試験には, 400 t アムスラー型万能試験機を用いて, 板パネルの中央面に圧縮荷重を導入した. 供試体各部のひずみ, 而外変位および軸方向変位については, 各荷重段階でデジタル自動静ひずみ計, 動ひずみ計, データレコーダおよび XY レコーダなどを用いて計測と記録を行った. また, 圧縮試験後の供試体の板パネルと縦リブの残留変形を鋼尺とストレートエッジあるいはレベルを用いて測定した.

圧縮破壊実験を行う前に予備載荷を行い, 弾性状態での供試体のひずみ分布を調べ, 一様載荷となるように調整を行った.

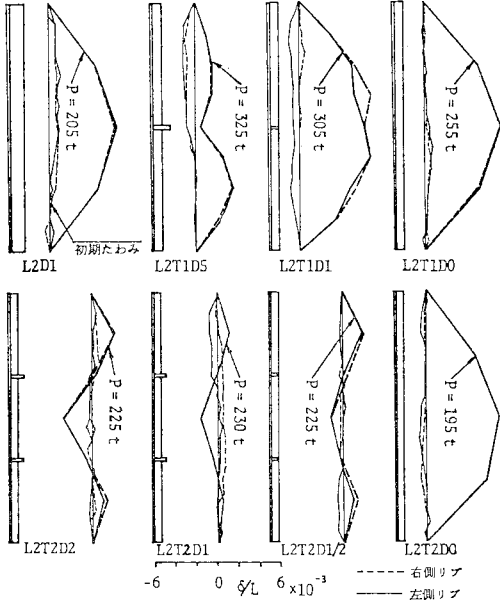


図-14 縦リブの初期たわみ波形と破壊直前のたわみ波形

(3) 実験結果とその考察

a) たわみ波形

極限状態における全供試体の縦リブのたわみ波形を初期たわみ波形とともに 図-14 に示す。図中の P は圧縮荷重を表す。この図に示す初期たわみは、3.(4)の棄却検定を行う前のなまの初期たわみである。この図より認められることがらを横リブ本数および横リブ剛度について分類すれば次のようである。

(i) 横リブ本数

- ① 横リブをもたない供試体 (L2D1, L2T1D0, L2T2D0)

縦リブの剛度の大きさにかかわらず圧縮軸方向に大きく半波形でたわんでいる。

- ② 1本の横リブをもつ供試体 (L2T1D1, L2T1D5)

横リブの剛度が I_{qN} にはほぼ等しい供試体 L2T1D1 の場合は極限状態に至り、横リブ位置で節となっていたたわみ波形が半波形に変化した。一方、横リブの剛度が $4.52 \cdot I_{qN}$ の供試体 L2T1D5 の方は、極限状態においても横リブ位置で節となるたわみ波形が観察される (図-15(a),(b) 参照)。

- ③ 2本の横リブをもつ供試体 (L2T2D1/2, L2T2D1, L2T2D2)

横リブの剛度を $0.546 \cdot I_{qN}$, $1.06 \cdot I_{qN}$, $2.04 \cdot I_{qN}$ と変化させても、すべて横リブ位置で節となるたわみ波形のまま破壊に至った。横リブのない供試体と横リブ1本の供試体が、板パネル中央面に圧縮荷重を導入することに

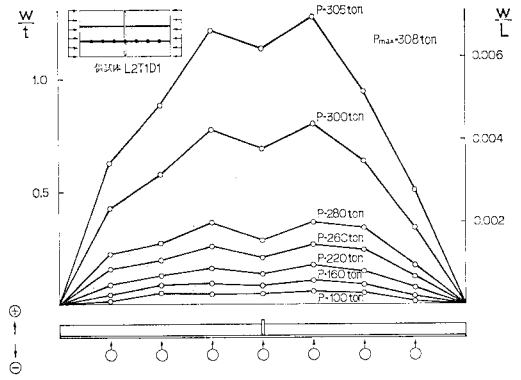


図-15(a) 右側縦リブのたわみ波形 (供試体 L2T1D1)

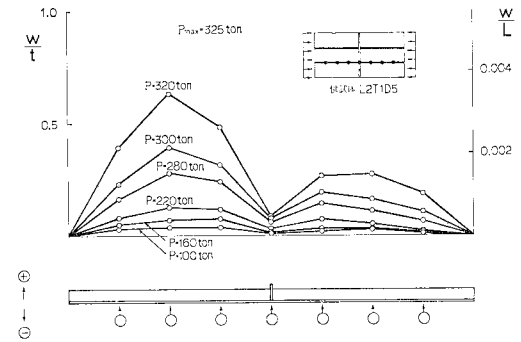


図-15(b) 右側縦リブのたわみ波形 (供試体 L2T1D5)

よる偏心荷重の影響を大きく受けて補剛材側にたわんだように、横リブを2本もつ供試体の場合も、端部の偏心による曲げモーメントを強く受けて、図-14 に示すように初期たわみの形状とは無関係にすべての供試体で同一のたわみ波形が得られた。しかし横リブ本数が0本、1本の供試体に比較すると、偏心量が小さいため、大きな半波形ではなく、1波形半のたわみ波形となった。

(ii) 横リブの剛度

1本の横リブをもつ供試体では、横リブの剛度を $0.903 \cdot I_{qN}$ から $4.52 \cdot I_{qN}$ に変化させることによって、破壊状態に至りたわみ波形が異なったものとなった。しかし、2本の横リブをもつ供試体では横リブの剛度を $0.546 \cdot I_{qN}$ から $2.04 \cdot I_{qN}$ に変化させてもたわみ波形に顕著な差異は認められなかった。横リブが2本の供試体では、縦リブの降伏点が板パネルのそれよりかなり高かったにもかかわらず、すべてのケースで横リブ位置で節となる座屈モードとなった。すなわち、縦リブと板パネルの降伏点が等しい補剛板についても、ハイブリッド構造の補剛板の場合と同様に、横リブは十分有効に働くものと考えられる。

また、中央横断面におけるたわみ波形の一例を 図-16(a) に、横リブ位置のたわみ波形を 図-16(b) に示

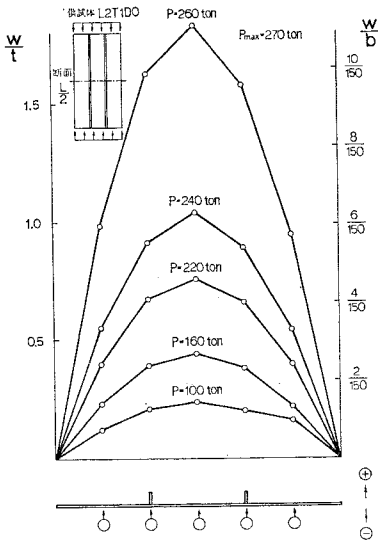


図-16(a) 中央断面のたわみ波形 (供試体 L2T1D0)

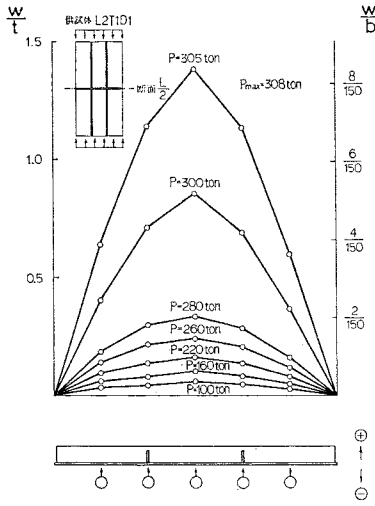


図-16(b) 横リブのたわみ波形 (供試体 L2T1D1)

す。これらの図が示すように、すべての供試体の横方向のたわみ波形は正弦半波形で近似できそうな波形となった。これより、縦リブ間の板パネルの局所的な変形はあまり認められず、補剛板全体のたわみ波形が特に卓越して破壊に至ったことがわかる。

b) 縦方向ひずみ分布

図-1 の破線で示す断面の板パネル中央面における圧縮軸方向のひずみ^{注3)}の横方向分布の代表例を図-17に示す。表-11 に示す挿入図のように、極限状態直前で

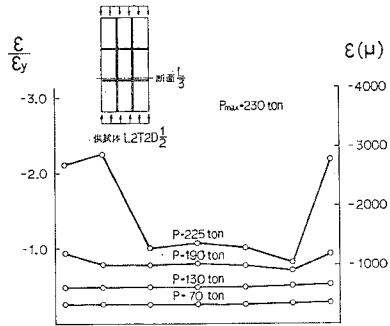


図-17 縦方向ひずみ分布 (供試体 L2T2D1/2)

表-11 縦方向ひずみ分布

供試体	断面	Type	供試体	断面	Type
L2D1	$\frac{L}{2}$	W	L2T2D0	$\frac{L}{2}$	W
	$\frac{L}{4}$	W		$\frac{L}{4}$	W
L2T1D5	$\frac{3}{4}L$	A			
	$\frac{L}{2}$	W			
	$\frac{L}{4}$	A			
L2T1D1	$\frac{3}{4}L$	M			
	$\frac{L}{2}$	W			
	$\frac{L}{4}$	W			
L2T1D0	$\frac{L}{2}$	V			
	$\frac{L}{4}$	W			
L2T2D2	$\frac{L}{2}$	A			
	$\frac{L}{3}$	V			
	$\frac{L}{6}$	A			
L2T2D1	$\frac{L}{2}$	A			
	$\frac{L}{3}$	V			
	$\frac{L}{6}$	A			
L2T2D $\frac{1}{2}$	$\frac{L}{2}$	A			
	$\frac{L}{3}$	V			
	$\frac{L}{6}$	A			

注3) ひずみは板厚方向に直線変化するものと仮定し、表・裏の測定値を平均して、板パネル中央面におけるひずみを計算した。

の板パネル中央面のひずみ分布に対して、補剛板中央部で大きくひずみが增大している分布をAタイプ、縦リブ位置でのひずみが大きく縦リブ間の板パネルにひずみ

分布のポケットが認められるものを M タイプ、補剛板中央部でひずみ分布がくぼみ、補剛板全体の座屈を示す分布を V タイプ、さらに、縦リブ間の板パネル中央部で大きくひずみが盛り上がる分布を W タイプとよぶことにする。各供試体の各断面における縦方向ひずみ分布の形状は表-11 に示すとおりとなる。この表より、縦リブ間の板パネルの局部座屈の傾向を示す M タイプはわずかに一断面で認められただけで、A タイプおよび W タイプがほとんどの供試体でみられる。これは、板パネルの無次元元幅厚比が小さく、補剛材間の板パネルで局部座屈に伴うひずみ分布のポケットが生じなかったこと、および、板パネル中央部に存在する残留圧縮応力度によりその部分が荷重段階早期に塑性域に入ることなどの要因で起こったものと考えられるが、現在のところ明確な原因は不明である。また、横リブが 2 本の供試体の横リブ位置での分布はすべて V タイプであった。

c) 横方向ひずみ分布

横リブをもつ供試体については、横リブの剛性の効果を調べるために、補剛板の中央板パネルの圧縮軸方向中心線に沿って、圧縮軸に直角な方向の直ひずみを測定した。その測定結果の一例を、板パネル中央面におけるひずみを用いて図-18 に示す。供試体 L2T1D1 を除く横リブをもつすべての供試体において、図-18 にみられるように横リブ間（横リブ 2 本の場合のみ）あるいは横リブと載荷辺の間のひずみが大きく成長する傾向が観察された。ただし、供試体 L2T1D1 の場合は、極限状態に至り横リブ位置での板パネル中央面の横方向直ひずみの急激な増加が認められた。

d) 荷重-軸方向圧縮変位曲線

一例として、横リブが 1 本の供試体の場合の圧縮荷重と軸方向圧縮変位の関係を図-19 に示す。横リブの剛度の小さいものから順番に枝分かれする曲線となっている。

e) 荷重-ひずみ曲線

まず、圧縮荷重と横リブ間の中央断面における縦リブの軸方向ひずみならびにパネルの圧縮軸方向のひずみの関係を、横リブ本数によって分類して記述する。

① 横リブをもたない供試体

圧縮荷重と補剛板中央断面における縦リブの軸方向ひずみならびに板パネルの圧縮軸方向ひずみの関係を図-20 に示す。縦リブでは荷重段階早期から偏心載荷による曲げモーメントを受けて曲げ応力度が漸増している。一方、補剛板中央部における板パネルのひずみは、表側、裏側とも、 $P/P_y=0.5$ 付近から急激に大きくなっている。これは $P/P_y=0.5$ 付近で、この部分における残留ひずみ ϵ_{rl} と圧縮荷

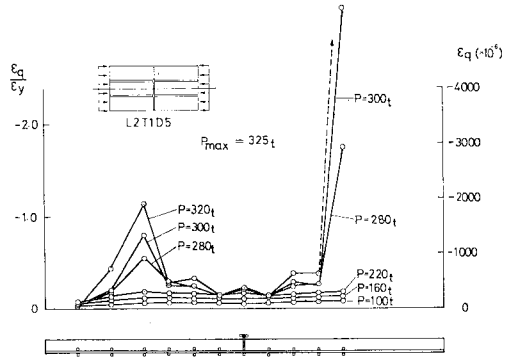


図-18 横方向ひずみ分布 (供試体 L2T1D5)

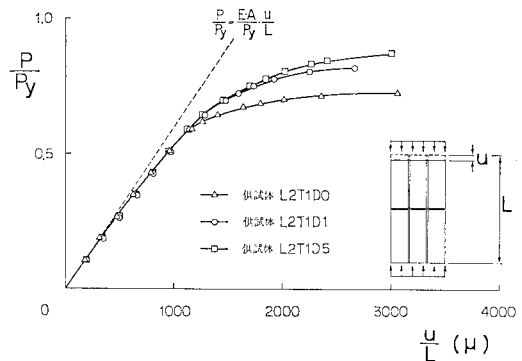


図-19 圧縮荷重と軸方向圧縮変位 (供試体 L2T1 シリーズ)

重による圧縮軸方向ひずみ ϵ_l の和がちょうど降伏ひずみに達し塑性域に入ったためと思われる。縦リブの剛度が小さくなれば、偏心量も小さくなるため、供試体 L2T1D0, L2T2D0 における偏心載荷による曲げ応力度は図-20 で示されるものより順次少なくなる。

② 1本の横リブをもつ供試体

圧縮荷重と横リブ間の中央断面における縦リブの軸方向ひずみならびに板パネルの圧縮軸方向のひずみは、横リブをもたない供試体の場合と同様な傾向を示す。

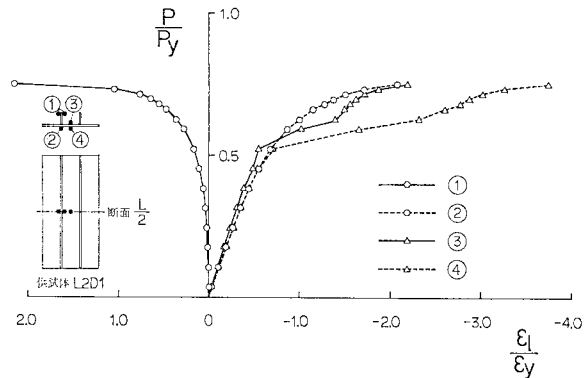


図-20 圧縮荷重と縦方向ひずみ (供試体 L2D1)

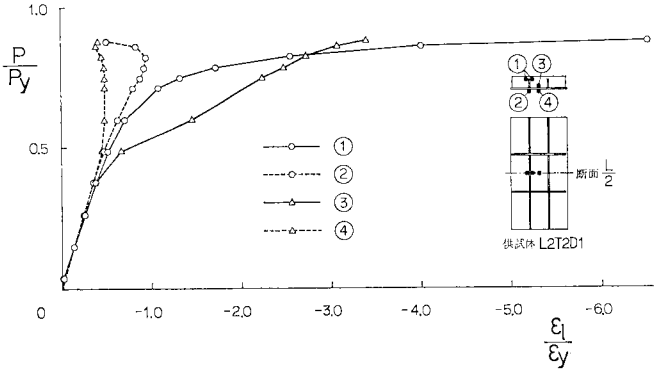


図-21(a) 圧縮荷重と縦方向ひずみ (供試体 L2T2D1)

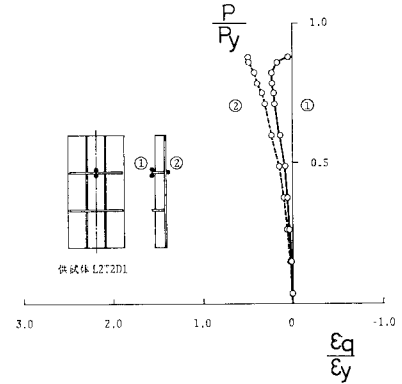


図-22(b) 圧縮荷重と横方向ひずみ (供試体 L2T2D1)

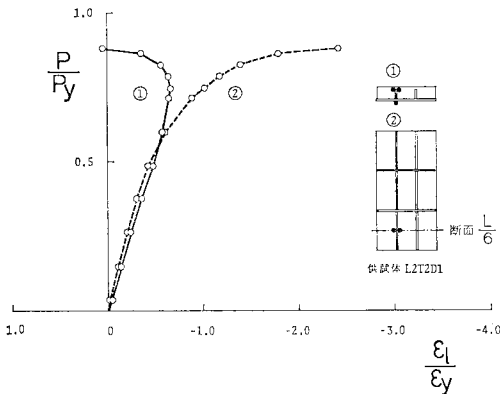


図-21(b) 圧縮荷重と縦方向ひずみ (供試体 L2T2D1)

③ 2本の横リブをもつ供試体

図-21(a),(b)に、圧縮荷重と横リブ間の中央断面における縦リブの軸方向ひずみならびに板パネルの圧縮軸方向のひずみの関係を示す。図-21(a)より、たわみ波形の実測結果からは認められなかった縦リブ間の板パネルの局部的なたわみ波形が $P/P_y=0.4$ 付近から生じ始めていることが推測できる。また、図-21(a)と図-

21(b)を比較してみると、 $L/2$ 断面と $L/6$ 断面における縦リブ先端での軸方向曲げひずみがそれぞれ圧縮と引張になっており、その中間にある横リブ位置付近でたわみが逆転していることが推測できる。

次に、圧縮荷重と横リブの軸方向ひずみの関係を図-22(a),(b)に示す。供試体 L2T2D1/2 および L2T2D2も、図-22(b)に示した L2T2D1と同じ挙動を示した。この図より以下のことがわかる。

① 横リブが1本の供試体では、横リブの剛度を I_{qN} にほぼ等しく取った供試体 L2T1D1の横リブは、極限状態に至り大きな曲げ応力度が発生し大きく変形する。横リブの剛度を $4.52 \cdot I_{qN}$ に取ると、L2T1D1の場合に比し、横リブの曲げ応力度は少なくなる。

② 横リブが2本の供試体では、横リブ剛度が $0.546 \cdot I_{qN}$ から $2.04 \cdot I_{qN}$ の範囲では、横リブ剛度に無関係に、横リブに発生する曲げ応力度は小さい。

③ 供試体 L2T1D1のように横リブの剛性が小さく、その変形が大きくなり、材料の一部が最終的には降伏域に入る場合でも、L2T1D1とL2T1D5の極限強度の差は5%程度であり、横リブの降伏点の大きさが極限強度に及ぼす影響はほとんどないことがわかる。すなわち、今回の実験で用いたすべての供試体において、その極限強度に影響したのは、横リブの曲げ剛性 EI_q であり、その降伏点の差はあまり問題とならなかった。

f) 極限強度

各供試体の極限状態における平均圧縮応力度 $\bar{\sigma}_{max}(=P_{max}/A^*)$ を次式で定義される補剛板の換算降伏点 σ_y^* で無次元化して表-2の最下欄 P_{max}/P_y および図-23に示す。ただし、 P_{max}/P_y は $\bar{\sigma}_{max}/\sigma_y^*$ と等価である。

$$\sigma_y^* = \{ \sigma_y(B+2c)t + \sigma_{y,r} \cdot n_r \cdot h_r \cdot t_r \} / A^* = P_y / A^* \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 c は側辺単純支持ジグをセットするために必要

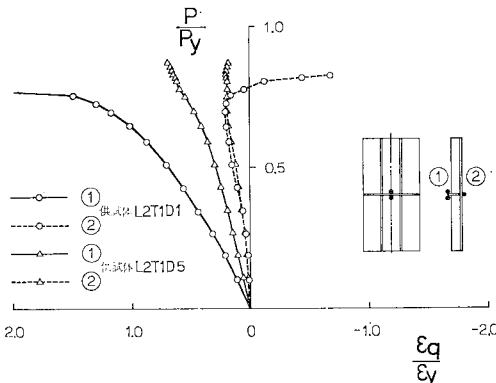


図-22(a) 圧縮荷重と横方向ひずみ (供試体 L2T1D1, L2T1D5)

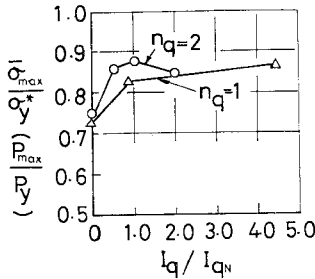


図-23 横リブ剛度と極限強度

な余裕幅で 10 mm である。

図-23 より以下のことがわかる。

① 横リブが 1 本の供試体の場合、横リブ剛度を $4.52 \cdot I_{qN}$ に高めると、 $I_q/I_{qN}=0.903$ の供試体に比較して 5.2%

の強度上昇が認められる。

② 横リブが 2 本の供試体の場合、 $I_q/I_{qN}=1.06$ の供試体に比較し、 $I_q/I_{qN}=0.546$ で 2.2% の強度低下が認められる。

③ 横リブが 2 本の場合、 $I_q/I_{qN}=2.04$ の供試体についても $I_q/I_{qN}=1.06$ の供試体より 3.4% の強度の低下が認められた。この主要な原因は、初期たわみ波形が前者では破壊時のたわみ方向に一致していたが後者ではそれらが相反していたためと思われる。しかし、以上を総合して、この程度の増減であれば、耐力力に実質的な差は認められないものと考えられる。

また、補剛板の極限強度は縦横比および載荷時の偏心量等にも左右されるものと思われるので、以下のような種々の角度からの整理も行ってみた。まず、縦横比・偏心量と極限強度の関係を 図-24 に示す。また、縦横のリブの剛度比と極限強度の関係を 図-25 に示す。これらの図より、縦横比と偏心量をとともに増加させると極限

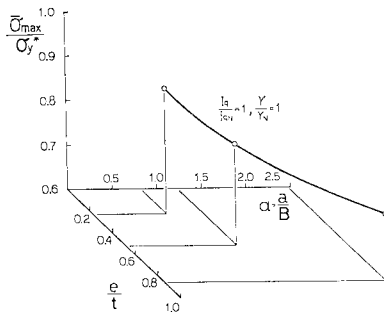


図-24 縦横比・偏心量と極限強度

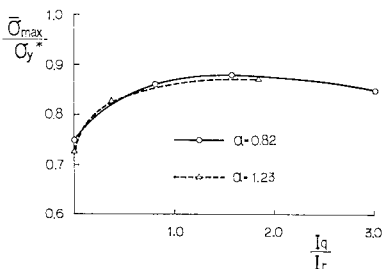


図-25 縦横のリブの剛度比と極限強度

強度が低下すること、および横リブの剛度を縦リブに等しくすれば十分な強度が得られることなどがわかる。しかし、本研究においては供試体の数が限定され、縦横比、偏心量および横リブの剛度を個々に独立に変化させることができなかったため、図-23~25 より、これらの個々のパラメーターと極限強度との関係についての的確な評価はできなかった。したがって、補剛板の極限強度に及ぼす縦リブと横リブの剛度や縦横比の効果および偏心量の影響等を定量的に評価するには厳密な解析法を用いた理論的考察を行うことが重要である。

g) 破壊後の供試体の残留変形

面内圧縮試験後、供試体の板パネルの残留変形を側面単純支持ジグにセットしたままで鋼尺とストレートエッジで測定した。また、供試体の縦リブの残留変形については鋼尺とレベルを用いて測定した。すべての供試体について縦リブ間の板パネルの局部変形、縦リブおよび横リブの局部的なねじり変形はまったくみられず、補剛板全体の変形あるいはそれと横リブ間の変形が併存するような変形が生じていた。

5. 結 論

縦横比と横リブの剛性を変化させ、実橋製作法に基づいて製作された 8 体の供試体について行った面内圧縮試験ならびに 3 体の残留応力測定用供試体について行った残留応力測定の結果、得られた結論を列挙する。

(1) 縦横に補剛された圧縮板の種々の理論解析法の検証を行う際、およびその合理的設計を推進するうえで有用となる基礎的資料を提供したと考えている。

(2) 実際に近い断面諸量を有する圧縮補剛板の初期たわみを測定した結果、補剛板パネルでは道示の許容値の 0.07~0.53 倍、板パネルでは 0.08~0.67 倍、縦リブの初期たわみ δ_s は補剛板長 L の $(-1.12 \sim -0.97) \times 10^{-3}$ 倍、横リブ間隔 a に対する縦リブの初期たわみ δ'_s は a の $(-2.27 \sim -1.21) \times 10^{-3}$ 倍、横リブの初期たわみ δ_t は幅 B の $(-1.69 \sim -1.89) \times 10^{-3}$ 倍であった。

(3) 残留応力については、縦方向残留応力分布の他に横方向残留応力分布をも測定した結果、① 縦リブの平均残留圧縮応力度 $\bar{\sigma}_{rc,r}$ は $(-0.11 \sim -0.33) \sigma_{y,r}$ 、② 板パネルの縦方向残留応力分布を矩形分布にパターン化すれば、その平均残留圧縮応力度 $\bar{\sigma}_{rc}$ は $(-0.24 \sim -0.45) \sigma_y$ 、③ 横リブの平均残留圧縮応力度 $\bar{\sigma}_{rc,r}$ は $(-0.29 \sim -0.31) \sigma_{y,q}$ 、④ 板パネルの横方向残留応力分布は三角形分布でパターン化できその最大圧縮応力度 σ_{rc} は $(-0.23 \sim -0.39) \sigma_y$ であることがわかった。溶接サイズが大きくなったため、若干大きな値が得られた。

(4) たわみ波形については、① 横リブをもたない供試体の場合は、補剛材側に大きくたわみ全体的な半波形のたわみが卓越して破壊に至った。② 1本の横リブをもつ供試体の場合は、横リブの剛度がほぼ I_{qN} に等しい供試体が、極限状態に至り横リブ位置で節とはならずには破壊したのに比して、 $4.52 \cdot I_{qN}$ の横リブ剛度を有する供試体は、横リブ位置で節となるたわみ波形を維持したまま破壊した。③ 2本の横リブを有する供試体の場合は、横リブの剛度にかかわらず ($0.546 \cdot I_{qN} \sim 2.04 \cdot I_{qN}$)、また初期たわみの形状にかかわらず ($\delta_t/B = (-1.69 \sim 1.89) \times 10^{-3}$)、すべての供試体が横リブ位置で節となるたわみ波形のまま破壊に至った。

(5) 板パネル中央面内の垂直ひずみの分布については、横断面方向および縦断面方向の両方の場合とも、補剛材間の板パネルの中央部で盛り上がる現象が生じた。

(6) $R=0.479$, $\alpha=0.823$, $r/r_N=1$ なる横リブ2本の供試体では $I_q/I_{qN}=1$ 程度でほぼ極限強度は収束している。横リブ2本で $I_q/I_{qN}=2.04$ の供試体については、 $I_q/I_{qN}=1.06$ の供試体に比して 3.4% の強度の低下があった。これは、初期たわみ波形が破壊時のたわみ波形と相似であったためと思われる。一方、 $R=0.534$, $\alpha=1.235$, $r/r_N=1.1$ の横リブ1本の供試体では $I_q/I_{qN}=0.903$ から $I_q/I_{qN}=4.52$ に横リブ剛度を高くすることにより 5.2% の強度の上昇が認められた。しかし、以上を総合して、この程度の増減であれば、耐荷力に実質的な差は認められないものと考えられる。

(7) 偏心量と縦横比をともに大きくすることにより極限強度が低下することがわかった。

(8) パラメーターの任意の組み合わせに対して、 $\bar{\sigma}_{\max}/\sigma_y^*$ と I_q/I_r の関係が一つの曲線で表わされる。

6. あとがき

本研究の一部は、昭和 52 年度文部省科学研究補助金(初期不整を有する縦横に補剛された圧縮鋼板の極限強度特性と合理的設計に関する研究)によるものである。ここに改めて感謝の意を表します。

実験実施に際して常に親切にご協力いただいた日立造船(株)の牧本 宏氏、堀 正二郎氏、柴田和孝氏、矢野幸男氏、当時大阪大学大学院工学研究科学生の竹谷栄一君(現在日本道路公団に勤務)および現在院生の小島治雄君に対して感謝の意を表します。特に竹谷栄一君にはデータ整理および実験結果のまとめなどの実験全般にわたってご協力いただいたことを付記しておきます。

参考文献

1) Leonhardt, F. and D. Hommel : The necessity of quantifying imperfections of all structural members

for stability of box girders, International Conf. on Steel Box Girder Bridges, London, 13-14, Feb., 1973.

2) Andrä, W., Beyer, E. und L. Wintergerst : Beulversuche mit Bodenblechen von stählernen Hohlkasten, Der Bauingenieur, 49, H. 10, s. 373-382, 1974.

3) Epple, G., E. Rössing, E. Schaber und L. Wintergerst : Die neue Rheinbrücke für die Bundesautobahn bei Speyer, Der Stahlbau, 46, H. 10, S. 297-308, 1977, (Fortsetzung) H. 11, s. 341-353, 1977.

4) 小松定夫・吉川 紀・牛尾正之: 80 キロ鋼の補剛板の極限強度に関する実験, 土木学会論文報告集, 第 218 号, 1973 年 10 月.

5) 小松定夫・牛尾正之・北田俊行: 補剛材を有する圧縮板の極限強度に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 255 号, 1976 年 11 月.

6) 小松定夫・北田俊行・岡田純一: 初期不整を有する補剛された圧縮板の極限強度について, 日本鋼構造協会第 11 回大会研究集会マトリックス解析法研究発表論文集, pp. 175~180, 1977 年 6 月.

7) 奈良 敬・小松定夫・北田俊行: 初期不整を含む縦リブで補剛された連続圧縮板の弾塑性解析, 第 32 回土木学会年次学術講演会概要集, I-142, 1977 年 5 月.

8) 小松定夫・北田俊行・奈良 敬: 初期不整を含む補剛された連続圧縮板の極限強度特性, 土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-61, 1978 年 5 月.

9) 小松定夫・牛尾正之・北田俊行: 補剛板の溶接残留応力および初期たわみに関する研究, 土木学会論文報告集, 第 265 号, 1977 年 9 月.

10) 奈良 敬・小松定夫・北田俊行: 初期不整を有する縦横に補剛された圧縮板の弾塑性解析, 第 33 回土木学会年次学術講演会概要集, I-310, 1978 年 9 月.

11) 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関する研究, 土木学会論文報告集, 第 270 号, 1978 年 2 月.

12) 小松定夫・北田俊行: 初期不整を含む自由突出圧縮板要素の強度特性について, 第 32 回土木学会年次学術講演会概要集, I-281, 1977 年 10 月.

13) Hovichitr, I., P. Karasudhi, F. Nishino and S.-L. Lee: A rational analysis of plates with eccentric stiffeners, IABSE Proceedings P-9/77, November, 1977.

14) Fukunoto, Y., T. Usami and K. Yamaguchi : Inelastic buckling strength of stiffened plates in compressions, IABSE Proceedings, P-8/77, August, 1977.

15) Hasegawa, A. and N.C. Lind : Design of cold formed steel stiffened elements, ECCS-IABSE, Liège Colloquium on Stability of Steel Structures, Preliminary Report, pp. 659~667, 13-15, April, 1977.

16) 上田幸雄・矢尾哲也・菊本仁司: 補剛材の最小剛比について, 日本造船学会論文集, 第 140 号, pp. 211~216, 1976 年 11 月.

17) 上田幸雄・矢尾哲也・片山正孝・中峰正則: 補剛材の最小剛比について(第 2 報), 日本造船学会論文集, 第 143 号, pp. 308~315, 1978 年 5 月.

18) 大坪英臣・山本善之・李 雅榮: 防撓板の圧縮強度の研究(その 1), 日本造船学会論文集, 第 143 号, pp. 316~325, 1978 年 5 月.

19) 小松定夫・牛尾正之: 圧縮補剛板の弾塑性座屈強度と合理的設計法について, 土木学会論文報告集, 第 278 号, pp. 39~52, 1978 年 10 月.

20) Yamada, Y., E. Watanabe and R. Ito : Compressive strength of plates with closed-sectional ribs, Proc. of JSCE, No. 278, pp. 133~147, October, 1978.

21) Massonnet, Ch. and R. Maquoui : Recent progress in

- the field of structural stability of steel structures, IABSE Surveys, S-5/78, 1978.2.
- 22) Dowling, P.J. : Recent developments on the inelastic analysis and design of plate and box girders, Int. Colloquium on Stability of Structures under Static and Dynamic Loads, Washington, D.C., Proceedings published by ASCE, pp. 407~421, May, 1977.
- 23) Komatsu, S., T. Kitada and S. Nara : Elasto-plastic analysis of orthogonally stiffened plates with initial imperfections under uniaxial compression, Computer & Structures (to be published).

(1978.7.14・受付)
