

開口部を有する圧縮補剛板の 耐荷力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF STIFFENED PLATES WITH OPENING SUBJECTED TO COMPRESSIVE FORCE

中井 博* ・北田 俊行** ・祝 賢治***
鈴木 巖**** ・堀江 佳平***** ・水原昌弘*****
Hiroshi NAKAI, Toshiyuki KITADA, Yoshiharu IWAI,
Iwao SUZUKI, Yoshihei HORIE and Masahiro MIHARA

- *工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
**工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
***大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻 社会人後期博士課程
(三井造船(株)鉄構建設事業部技術部課長 (〒559 大阪市住之江区柴谷 1-2-32))
****阪神高速道路公団 工務部 設計課調査役 (〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)
*****阪神高速道路公団 工務部 設計課係長 (〒541 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)
*****大阪市立大学大学院 工学研究科土木工学専攻前期博士課程 (〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

Presented in this paper are test results on the ultimate strength of stiffened plates with openings subjected to uni-axial compression. Four types of test models, i.e. (1) without opening, (2) with non-strengthened opening, (3) with opening strengthened by doubler plates and (4) with opening strengthened by doubler plates as well as transverse stiffeners were tested. These strengthening methods, proposed in this study, seem not completely enough to ensure the same ultimate strength as that of stiffened plate without opening. It is concluded that further researches will be needed to develop much more effective methods for strengthening the openings through additional tests and elasto-plastic and finite displacement analyses by considering the initial imperfection such as residual stress and initial deflection involved in the stiffened plates with openings.

KEYWORDS: ultimate strength, stiffened plate with opening, doubler plate, strengthening method

1 まえがき

鋼橋部材では、製作・架設上、あるいは橋梁が完成した後の維持管理上のために、大きな圧縮力を受ける補剛板であるにもかかわらず、開口部を設けることが多々ある。このような例としては、鋼製橋脚、および吊橋・斜張橋の塔の柱部材の基部付近のマンホールを設けたフランジ、あるいは腹板がある¹⁾。また、ニールセン橋のアーチリブのフランジにも、ケーブル架設のためにマンホールが設けられる。さらに、箱桁橋の支点上のダイヤフラムには、維持管理のために、開口部が設けられる。

これらの開口部のうち、主に圧縮力を受ける開口部の設計基準として、まず本州四国連絡橋公団では、吊橋・斜張橋の塔のフランジ、あるいは腹板の開口部に対して、開口による応力集中係数の算定式を与え、応力集中によるピーク応力が許容値以下になるような補強板を設けるように規定している²⁾。また、BS5400 では、箱桁橋の支点上の無補剛、あるいは補剛ダイヤフラムの開口部について、その位置、形状、寸法、および耐荷力の照査法

を与えている³⁾。

しかしながら、開口部を設けた圧縮補剛板の設計法について、道路橋示方書⁴⁾、および各公団・公社⁵⁾⁻⁸⁾の設計基準には、まだ明確な規定が設けられていないのが現状である。したがって、実橋においては、過去の実績、および設計者の経験にもとづいて開口部の位置の選定、ならびに補強設計が行われてきた。

ところで、開口部を設けた板に対しては、小判形の開口部を設けダブリング補強を施した圧縮補剛板の終局強度に関する藤井らの研究⁹⁾や、せん断力を受ける円形の開口部を設けた正方形板の強度と補強法とに関する上野谷ら¹⁰⁾⁻¹³⁾の研究、さらに初期たわみがある開口板の引張座屈に関する清水ら^{14)、15)}の研究、また鋼箱桁橋の支点上ダイヤフラムを対象とした長方形の開口部を有する板にせん断力が作用する場合の堂垣ら¹⁶⁾の研究がある。しかし、開口部を有する補剛板の座屈、および終局強度に関する研究は、あまり多くない。

さて、平成7年1月17日の早朝に発生した兵庫県南部地震は、神戸市から西宮市にかけてのベルト地帯を中

心として、阪神地域一円の高速道路に甚大な被害を与えた。これらの被災のうちでも、深刻なものの一つが、橋脚の崩壊による落橋事故であった。鋼製橋脚で、倒壊に至ったものは、わずか2例であった。しかし、柱部材には、座屈による損傷が多数生じた。そのうち、とくに柱部材の基部付近における開口部を設けた補剛板に生じた座屈被害が、多かった。

一般に、開口部の位置は、路面からの高さにより一律に決められることが多く、必ずしも応力的に余裕がある位置に限定されない。そして、開口部では、いわゆるダブリングによる補強が施されているものが多い。このタイプの補強が、補剛板の終局強度を開口部のない補剛板の終局強度にまで向上させるか否かは、明確でない。

そこで、本研究では、開口部を有し、圧縮力を受ける補剛板の耐力特性を調べるため、4タイプの供試体を製作して座屈耐力実験を行った。そして、着目する補剛板が終局強度に至るまでの挙動、終局強度特性、および開口部を対象とした補強方法の妥当性を検討した。

2 実験供試体、および実験方法

2.1 実験供試体の設計

(1) 実験供試体の種類と構造

図-1には、実験供試体の側面図、および断面図を示す。

実験供試体は、開口部の有無、開口部に対する補強の有無、および、その補強法の相違により、4種類に分類される。すなわち、供試体Pは、開口部を設けない供試体である。供試体Hは、開口部を設け、補強が施されていない供試体である。供試体S₀は、実構造で一般的に行われているように、開口部を設け、開口部の周辺をダブリング鋼板にて補強した供試体である。そして、供試体S₁は、開口によって切断される縦補剛材の補強方法について検討するためのものであり、供試体S₀と同じダブリング鋼板による補強に加えて、さらに横補剛材にても補強した供試体である。これらの4種類の供試体を、各1体ずつ、合計4体製作した。

供試体は、いずれも2軸対称の箱断面である。箱断面内の溶接施工上の理由、および縦補剛材の終局強度に至るまでの挙動の観察が容易になることにより、腹板の縦補剛材が、箱断面の外部に設けられている。

耐力特性を調べるための着目パネルは、図-1の側面図に示す腹板の中央の補剛板パネルである。着目パネルの使用鋼材は板厚3.2mmで、また材質はSS400である。一方、フランジには、腹板が塑性化し、終局状態に至っても、弾性状態を保てるように、板厚10mmで、材質がHT780の鋼材を使用している。

着目パネルに設けられた開口部は、直径が150mmの円形である。開口部がパネルの中央に位置するため、中央の縦補剛材は、開口部で切断されている。供試体S₀では、縦補剛材とダブリング鋼板とが同一面にある。

一方、供試体S₁では、縦補剛材とダブリング鋼板とが、腹板を挟んで異なった面にある。

表-1には、各供試体の特徴と実験目的をまとめた。

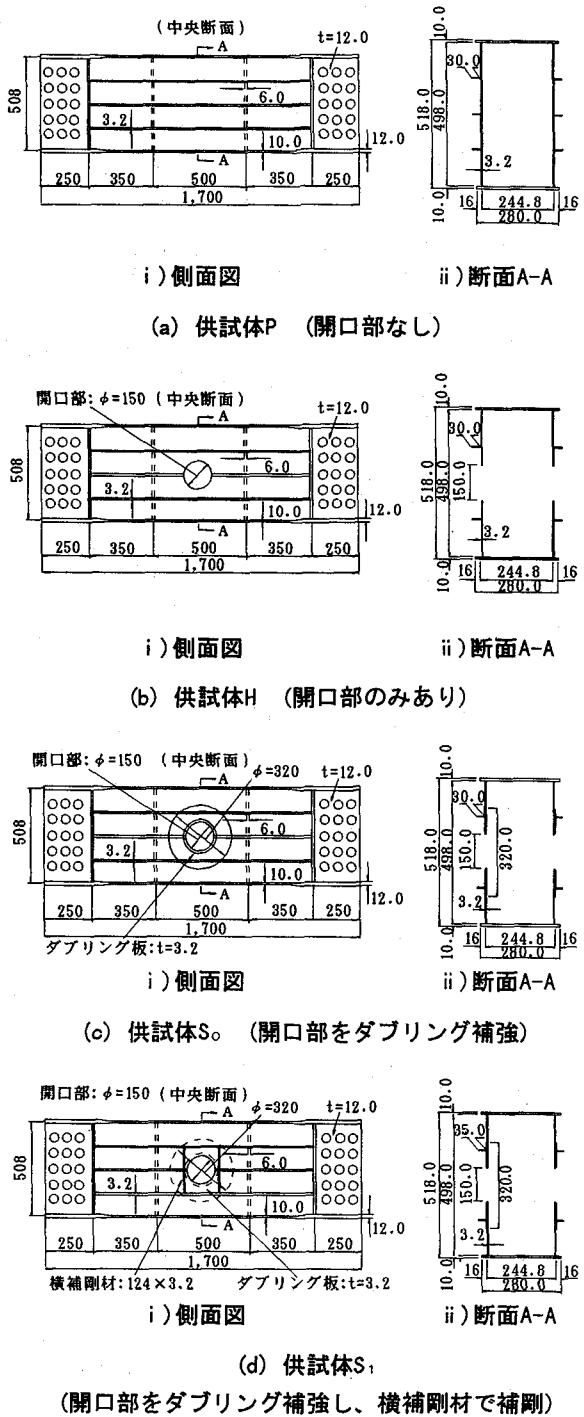


図-1 実験供試体の側面図、および断面図
(寸法単位: mm)

(2) 供試体の寸法の決定と補強方法

供試体の寸法の決定にあたっては、実構造物の実績調査結果¹⁾を参考にした。

まず、開口部のない箱形断面の腹板の幅厚比パラメータは、次式で表される。

表-1 供試体の特徴と実験目的

供試体の名称	特 徴	実験の目的
P	開口部を有しない。	開口部のない補剛板の挙動や強度と比較検討するための基準データを入手する。
H	開口部を有する。	開口部を設けるが、補強しない補剛板の挙動を比較・検討する。
S ₀	開口部を設けダブリング補強している。	一般的な補強方法としての妥当性を調べる。
S ₁	ダブリング補強に加え、横補剛材による補剛も施している。	合理的と思われる補強方法を検討する。

$$R_w = \frac{b}{n} \frac{1}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad \dots (1)$$

ここに、 t_w ：腹板の板厚、 b ：両フランジの中央面間距離（腹板幅）、 n ：腹板の縦補剛材で囲まれた板パネルの数、 σ_y ：降伏点、 μ ：ポアソン比、 E ：ヤング係数、 k ：圧縮を受ける周辺単純支持板の座屈係数（ $k=4.0$ ）、である。供試体の幅厚比パラメータの値は、0.80 となるように設計した。後述の表-2 に示す実測値を用いて R_w を計算したところ、供試体 P、H、S₀、および S₁ は、それぞれ、0.776、0.839、0.839、および 0.848 であった。一方、供試体の縦補剛材の剛比 r は、道路橋示方書にしたがって設計したところ、25.8 であった。これらの値を実橋脚の分布状況¹⁾と比較すると、供試体の幅厚比パラメータ R は若干大きめであり、また縦補剛材の剛比 r は標準的である。

つぎに、開口部の寸法パラメータである開口率 b_H/b (b_H ：開口部の径、 b ：腹板幅)、および b_H/b_F (b_F ：腹板の補剛材間隔)の供試体の値は、それぞれ 0.30、および 1.18 である。これらを実橋脚の分布状況¹⁾と比較すると、供試体の開口率は、若干大きめである。

そして、開口部の補強方法については、実構造物の 94% で行われているように¹⁾、開口により欠損した板パネルの部分（補剛材断面は含まない）の断面積に等しい断面を有し、また母材と同材質のドーナツ形のダブリング板による補強を基本とした（供試体 S₀）。ただし、供試体 S₁ では、縦補剛材の切断に対する補強として、切断された縦補剛材の剛度を補えるだけ、すべての縦補剛材の板幅を大きくし、なおかつ横補剛材にても補強した。なお、縦補剛材がダブリング板と交差する箇所にスカーラップを設けると、弱点となるため⁹⁾、スカーラップは、設けていない。

(3) 使用鋼材の機械的性質

供試体の製作に用いた鋼板の機械的性質を調べるために、JIS5 号試験片による引張試験を行った。試験片は、

各供試体に用いられた鋼板と同じものから切り出し、腹板に使用した 3 枚の鋼板、およびフランジに使用した 1 枚の鋼板から各 3 本ずつ、合計 12 本を採取した。

図-2 には、それぞれ腹板に使用した鋼板 (SS400)、およびフランジに使用した鋼板 (HT780) から製作した試験片の応力-ひずみ曲線を示す。

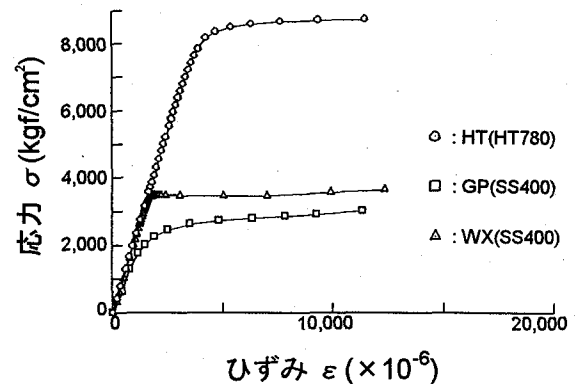


図-2 使用鋼材の応力-ひずみ曲線

これらの引張試験結果より、すべての試験片のヤング係数 E は、低ひずみ領域における応力-ひずみ曲線の傾きから求めた。ただし、試験片 GP、および HT については、応力-ひずみ曲線に明確な降伏点が認められなかったため、降伏点 σ_y は、0.2% 耐力として求めた。なお、実験結果の整理に用いる板厚 t 、ヤング係数 E 、ポアソン比 μ 、および降伏点 σ_y については、それぞれの試験片とも有意な差異が認められなかったため、それぞれ試験片の平均値を用いることとした。これらの値と各試験片がどの供試体に用いられたかの一覧を、表-2 に示す。

2.2 初期不整の測定結果

(1) 初期たわみ

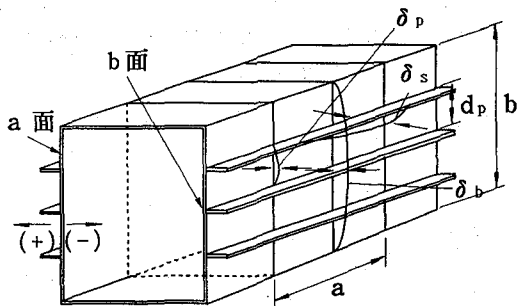
初期たわみは、各供試体の両腹板の着目補剛板パネル

表-2 板厚 t 、ヤング係数 E 、ポアソン比 μ 、および降伏点 σ_y の平均値

試験片	板厚 t (cm)	ヤング係数 E ($\times 10^6$ kgf/cm 2)	ポアソン比 μ	降伏点 σ_y (kgf/cm 2)	備 考 (使用部分)
GP	0.311	1.96	0.27	2,612	供試体 P の腹板
YZ	0.314	2.17	0.28	3,472	供試体 H、および S $_0$ の腹板
WX	0.315	2.14	0.28	3,515	供試体 S $_1$ の腹板
HT	1.005	2.16	0.27	8,573	すべての供試体のフランジ

において測定することとした。そのため、各供試体の腹板に縦・横の線を入れ、それらの交点における面外たわみを、鋼尺 (測定精度 1/10mm)、および可視距離 0mm のトランシットで測定した。

まず、図-3には、初期たわみに関する諸記号を示す。ただし、箱断面外側へのたわみを、いずれも正とする。



(箱断面外側へのたわみを正とする)

図-3 初期たわみに関する記号

つぎに、表-3には、初期たわみの測定結果を示す。この表によると、板厚が薄いため、補剛板パネルの初期たわみ δ_b 、板パネルの初期たわみ δ_p 、および補剛材の初期たわみ δ_s は、それぞれ道路橋示方書の製作基準値である $b/150$ 、 $d_p/150$ 、および縦補剛材を柱と考えた場合の準用値である $a/1,000$ をかなり上回っていることがわかる。とくに、開口部に補強板を有する供試体 S $_0$ 、および供試体 S $_1$ の初期たわみが、大きいことがわかった。

(2) 残留応力

残留応力の測定には、2つのグループの供試体を製作した。まず、供試体 RB は、圧縮実験供試体の残留応力

の分布と大きさを調べるためのものである。この供試体 RB は、図-4の(c)に示すように、実験供試体より箱断面の幅を少し大きくし、実構造物と同様に、縦補剛材を内側に設けた。そして、片側の腹板には開口部のみを設け (供試体 RB-H)、他方の腹板には開口部の周辺をダブリング板にて補強した (供試体 RB-S $_0$)。

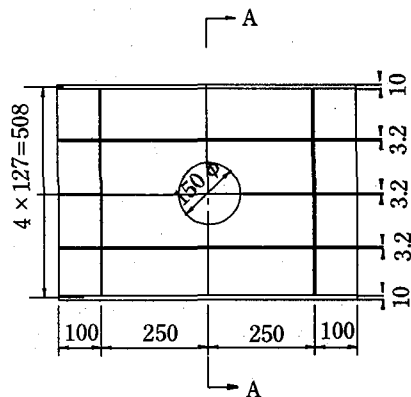
つぎに、もう1つのグループの供試体としては、開口部周辺の残留応力の特徴を調べ、基礎データを得るための3つの供試体である。すなわち、図-5の(a)、(b)、および(c)に示すような正方形板の中央に、開口部のみを設けた供試体 RP-H、開口部の周辺にダブリング板用の溶接ビードのみを盛った供試体 RP-W、およびドーナツ形のダブリング板の内周部と外周部とに溶接ビードを盛った供試体 RD-Wである。

これらの供試体には、部材軸に対して、斜め方向の測定線に対して3軸ゲージを、直角方向の測定線に対して2軸ゲージを鋼板の裏表に貼り付けてひずみの初期値を測定し、小さく正方形に機械切断加工の後、再びひずみを測定することにより、残留応力値を求めた。その測定結果も、それぞれ、図-4、および図-5に示す。なお、図示の応力は、測定線に対して法線方向の膜応力を板の降伏点により無次元化した値である。ただし、供試体 RB-S $_0$ のダブリング板上の残留応力については、腹板と補強板のそれぞれの外表面の応力の平均値である。したがって、厳密には、膜応力といえない。

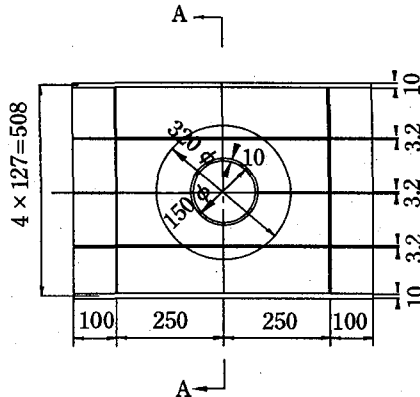
基礎データ採取用の供試体 RP-H、RP-W、および RD-Wの測定結果より、開口部のガス切断による引張残留応力、および補強板の溶接による引張残留応力が生じ、これらを重ね合わせると、供試体 RBの残留応力分布がほぼ推定できることがわかった。また、供試体 RBの引張残留応力度の値は降伏点 σ_y に達しており、また圧縮残留応力は補剛材間の中央で $0.65 \sigma_y$ に達していた。

表-3 供試体の初期たわみの最大値

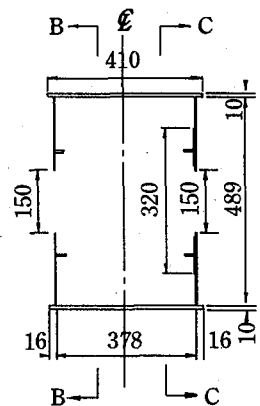
供試体 項目	P		H		S $_0$		S $_1$	
	a面	b面	a面	b面	a面	b面	a面	b面
$\delta_s/(a/1,000)$	2.1	1.8	1.5	2.0	1.9	2.4	4.0	3.3
$\delta_b(b/150)$	0.4	0.3	0.3	0.5	0.6	0.7	0.7	1.1
$\delta_p(d_p/150)$	0.5	0.4	1.0	0.7	1.3	2.3	1.5	2.2



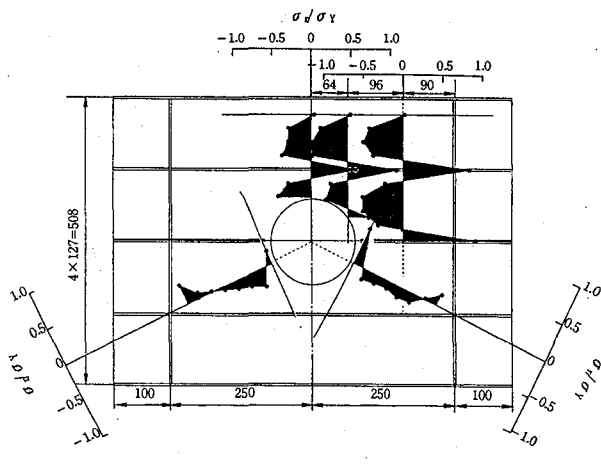
(a) 側面図 B-B (供試体RB-H)
(開口部のみ)



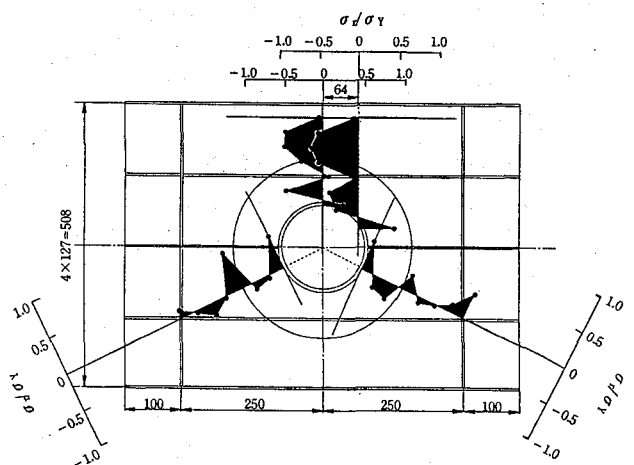
(b) 側面図 C-C (供試体RB-S0)
(開口部をダブリング補強)



(c) 断面図 A-A

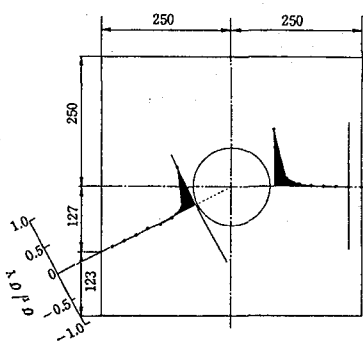


(d) 供試体RB-H

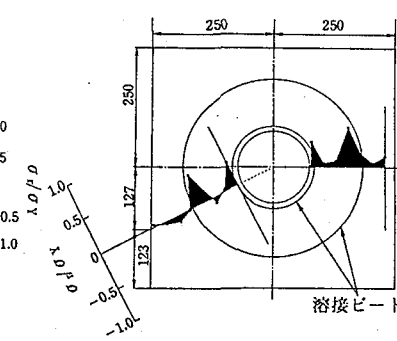


(e) 供試体RB-S0

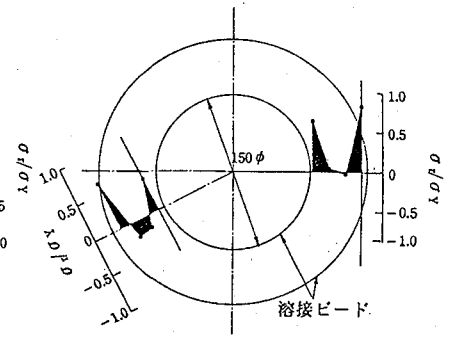
図-4 残留応力測定用の供試体、および測定結果 (寸法単位: mm)



(a) 供試体RP-H (開口部のみ)



(b) 供試体RP-W (開口部とダブリング補強用のビードのみを有する)



(c) 供試体RD-W
(ダブリング板のみ)

図-5 残留応力の基礎データ測定用の供試体、および測定結果 (寸法単位: mm)

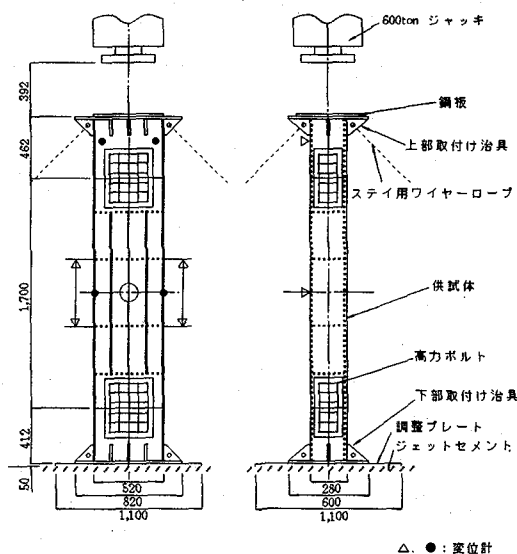
なお、供試体の腹板の板厚は、3.2mmの薄板である。腹板への補強板の溶接サイズ s は、施工上より3mmであり、母材とはほぼ同じ大きさとなっている。

実構造物の溶接サイズは、通常、 $\sqrt{2t}$ (t : 薄い方の板厚) 程度であるため、実構造物の板厚として20mm～30mmを考えると、供試体の s/t の値は、実構造物よりも、2倍から4倍ほど大きいといえる。このため、供試体には、実構造物よりも大きめの残留応力が存在していたと思われる。

2.3 実験方法

(1) 載荷方法

供試体への圧縮力の載荷方法を、図-6に示す。供試体上下の端部には、取付け治具を設け、載荷装置にセットした。600tf油圧ジャッキが鉛直方向に設置されているので、供試体は、その部材軸線が正確に鉛直方向になるように設置した。そして、載荷時には、軸圧縮力が断面全体に均等にかかるように、600tf油圧ジャッキと荷重載荷板との間に硬質ゴムを入れて、両者が密着するようにした。また、荷重が偏心載荷されていないことを確認するため、供試体四隅における鉛直方向の縮み測定用の変位計を4台、また供試体全体の柱としてのたわみ測定用の変位計を2台、それぞれ供試体の中央断面、および上部取付け治具の上側に設置した。



(a) 正面図

(b) 側面図

図-6 載荷方法(寸法単位: mm)

(2) 測定方法

各供試体には、着目する補剛板の中央より軸方向に70mmから95mmの間隔で、また箱断面の全周方向に60mm程度の間隔で、ひずみゲージを貼付し、フランジ、腹板、および縦補剛材のひずみを測定した。また、各供試体の4隅には、軸方向に4台の変位計を取り付け、軸

圧縮荷重による供試体の鉛直縮みを測定した。さらに、供試体の腹板である着目補剛板パネルにおいては、座屈現象による面外変位の発生、および波形を観測するために、腹板の中央断面上に変位計を取り付けた。

3 腹板の分担荷重の算定方法とその確認

3.1 腹板の分担荷重の算定方法

図-7を参考にして、圧縮荷重 P のうち、各腹板の分担荷重 P_{wa} 、および P_{wb} は、各フランジの分担荷重 P_{FU} 、および P_{FL} を各フランジに貼り付けたストレングージによるひずみの実測値より求めるものとする、次式の連立方程式から算出される。

$$\left. \begin{aligned} P &= P_{FU} + P_{FL} + P_{wa} + P_{wb} \\ P \cdot e_y &= P_{FU} \cdot e_{FU} + P_{FL} \cdot e_{FL} + P_{wa} \cdot d - P_{wb} \cdot d \end{aligned} \right\} \dots (2) \text{ a, b}$$

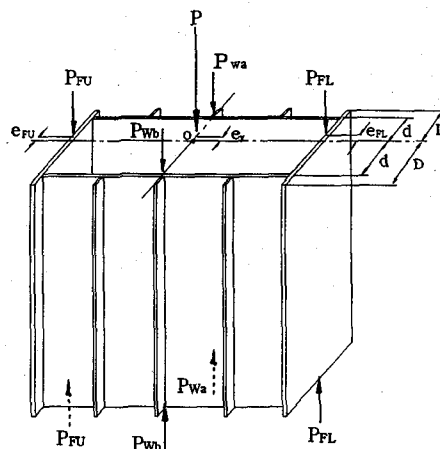


図-7 作用圧縮荷重 P とフランジ、および腹板とが分担する圧縮力 P_F 、ならびに P_W

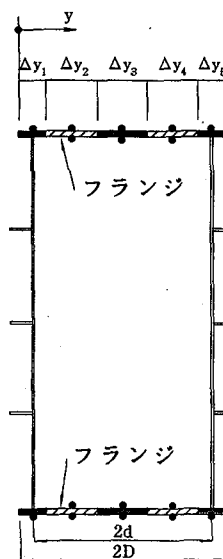


図-8 フランジのひずみゲージの貼付け位置

ここに、

e_{FU} 、 e_{FL} ：各フランジにおける分担荷重 P_{FU} 、および P_{FL} の偏心量
 e_Y ：作用圧縮荷重 P の偏心量

ここで、各フランジの分担荷重 P_{FU} 、および P_{FL} は、図-8を参照して、フランジに貼り付けたひずみゲージの実測値を用いると、次式で推定される。

$$\left. \begin{array}{l} P_{FU} \\ P_{FL} \end{array} \right\} = \int_0^{2D} \sigma_{xi} t dy = \sum_{i=1}^N \sigma_{xi} t \Delta y_i \quad \dots (3)$$

ここに、

t ：フランジの板厚

Δy_i ：1つのひずみゲージが分担する板幅

N ：1つのひずみゲージが分担する板幅の数

σ_{xi} ：各フランジの着目点における直応力度

ただし、各フランジに作用する応力度 σ_{xi} は、ダイアフラムによって断面方向のひずみが拘束されないものと考え、次式で求めた。

$$\sigma_{xi} = E \varepsilon_{xi} \quad \dots (4)$$

ここに、

E ：ヤング係数

ε_{xi} ：各フランジの着目点における直ひずみで次式によって求める。

$$\varepsilon_{xi} = \frac{1}{2} (\varepsilon_{xオモテ} + \varepsilon_{xウラ}) \quad \dots (5)$$

そして、各フランジ分担荷重の偏心量 e_{FU} 、および e_{FL} についても、各フランジに貼り付けたひずみゲージの実測値を用いて求めた。すなわち、ひずみ分布が、直線分布すると仮定し、最小自乗法にもとづき、次式によって算出される。

$$\left. \begin{array}{l} e_{FU} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\varepsilon_{F2} - \varepsilon_{F1}}{\varepsilon_{F2} + \varepsilon_{F1}} D \\ e_{FL} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\varepsilon_{F4} - \varepsilon_{F3}}{\varepsilon_{F4} + \varepsilon_{F3}} D \end{array} \right\} \quad \dots (6) a, b$$

ここに、

ε_{F1} 、 ε_{F2} 、 ε_{F3} 、 ε_{F4} ：それぞれ各フランジの縁ひずみ

すると、上で示した式 (2) a, b の連立方程式を解けば、各腹板の分担荷重 P_{wa} 、および P_{wb} は、次式で与えられる。

$$\left. \begin{array}{l} P_{va} = \frac{P}{2} \left\{ 1 + \frac{e_y}{d} - \left(\frac{P_{FU}}{P} + \frac{P_{FL}}{P} \right) - \left(\frac{P_{FU}}{P} \cdot \frac{e_{FU}}{d} + \frac{P_{FL}}{P} \cdot \frac{e_{FL}}{d} \right) \right\} \\ P_{vb} = \frac{P}{2} \left\{ 1 - \frac{e_y}{d} - \left(\frac{P_{FU}}{P} + \frac{P_{FL}}{P} \right) + \left(\frac{P_{FU}}{P} \cdot \frac{e_{FU}}{d} + \frac{P_{FL}}{P} \cdot \frac{e_{FL}}{d} \right) \right\} \end{array} \right\} \quad \dots (7) a, b$$

ここで、作用荷重の偏心载荷の影響が比較的大きく現れた供試体 P について、 e_y をパラメーターとして、式 (7) より、 P_{wa} 、および P_{wb} を求めたところ、 $e_y = 2\text{mm}$ のとき誤差は、高々 3% であった。したがって、ここでは、 $e_y = 0\text{mm}$ として、 P_{wa} 、および P_{wb} を求めた。

3.2 算定方法の確認

上述の方法の妥当性を検討するために、一例として、供試体 P の弾性領域内において、腹板の分担荷重 P_{wa} 、および P_{wb} 、ならびにフランジの分担荷重 P_{FU} 、および P_{FL} のどちらも、ひずみゲージの実測値より求めてみた。その結果を、表-4に例示する。

この結果によると、ジャッキの作用圧縮荷重 $P = 106.7\text{tf}$ に対して、前述の分担荷重の算定方法により求めた圧縮荷重 P^* の値は、105.443tf となる。したがって、両者の間には、1.2% の誤差しか認められない。この程度の誤差であれば、上述の方法により、腹板の分担する荷重を求めても、問題ないことがわかった。

つぎに、図-9には、一例として、供試体 H におけるジャッキの作用圧縮荷重 P 、および腹板の分担力 P_w (P_{wa} と P_{wb} とを総称したもの) と軸方向縮み v/v_Y との関係を示す。

この図より、作用圧縮荷重 P が終局荷重に至るまでに、腹板の分担力 P_w が終局状態に至っており、後者の終局強度が精度よく把握できることがわかる。

また、腹板が終局状態に至る少し以前で、作用圧縮荷重 P と軸方向縮み v/v_Y との関係には、非線形性が生じ始めていることがわかる。

表-4 弾性領域における分担荷重の算定結果の一例 (単位: tf)

ジャッキの作用圧縮荷重 P	腹板の分担荷重		フランジの分担荷重		圧縮荷重
	P_{wa}	P_{wb}	P_{FU}	P_{FL}	$P^* = P_{wa} + P_{wb} + P_{FU} + P_{FL}$
106.7	20.762	20.369	31.835	32.477	105.443

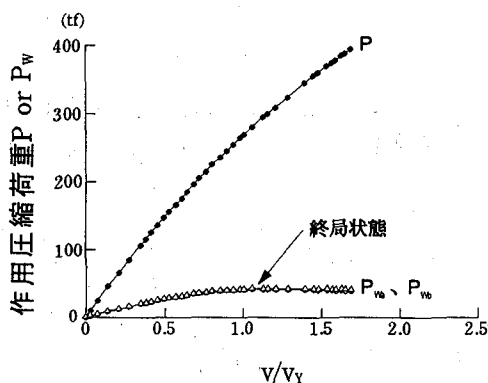


図-9 荷重-軸方向縮み曲線(供試体 H)

4 実験結果

ここで、実験結果の軸方向縮み、および軸方向ひずみの正負は、以下のように定義した。まず、軸方向縮みは、縮む方向を正、伸びる方向を負とし、軸方向ひずみは、圧縮方向を正、引張方向を負と定義した。

4.1 荷重-軸方向縮み曲線

図-10 には、供試体の四隅鉛直方向に設けた変位計より求めた荷重-軸方向縮み曲線の供試体 P の例を示す。ここで、縦軸は、前述の腹板に作用している a 面の分担荷重 P_{wa} 、および b 面の分担荷重 P_{wb} の平均値を腹板の全塑性軸力 P_{wy} で無次元化し、また横軸の軸方向縮み v は、 P_{wy} に対応する縮み量の計算値 v_y で無次元化している。なお、図中の水平の破線は、終局状態における分担荷重 P_{wu} と P_{wy} との比で与えられた終局強度を示している。

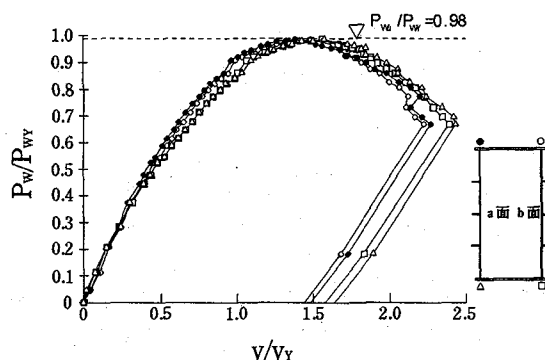


図-10 荷重-軸方向縮み曲線(供試体 P)

この図から、各測定点における荷重-軸方向縮み曲線には、それほど差異が見られないことがわかる。したがって、終局状態に至るまで、作用荷重の偏心は、ほとんどなかったものと考えられる。

つぎに、供試体の各測定点における縮みをそれぞれ平均し、全供試体と比較したものを、図-11 に示す。

同図より、供試体 P は、供試体 S_0 、H、および S_1 に比して、終局強度が高くなっている。一方、供試体 S_1 においては、低荷重レベルから非線形性が生じ、終局強度が供試体 H とほぼ等しい値になっている。さらに、同図から、開口部を有する供試体 H を除き、低荷重レベルにおける荷重-軸方向縮み曲線の傾きがほぼ等しい。したがって、ダブリング補強を施した供試体 S_0 、および S_1 の面内剛度は、開口部を有しない供試体のそれとほぼ等しかったものと考えられる。

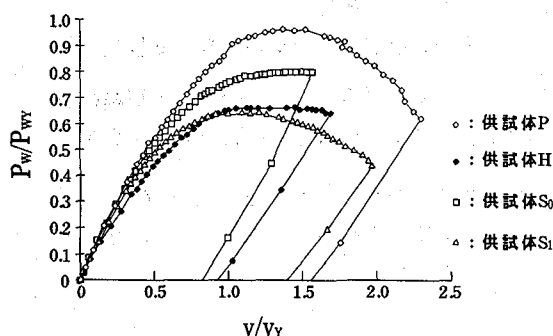


図-11 荷重-軸方向縮み曲線

4.2 平均圧縮応力度-軸方向ひずみ曲線

着目部の各測定断面の表裏面に貼り付けたひずみゲージのデータより、補剛材間の板パネルの表・裏、および補剛材先端の表・裏の軸方向のひずみ差が急増し始める強度を、それぞれ板パネル、および補剛材の局部座屈の開始強度とみなした。また、補剛材の先端とその補剛材位置における板パネルの軸方向ひずみの差が急増する強度を、補剛材の曲げ座屈開始強度とみなすことにした。

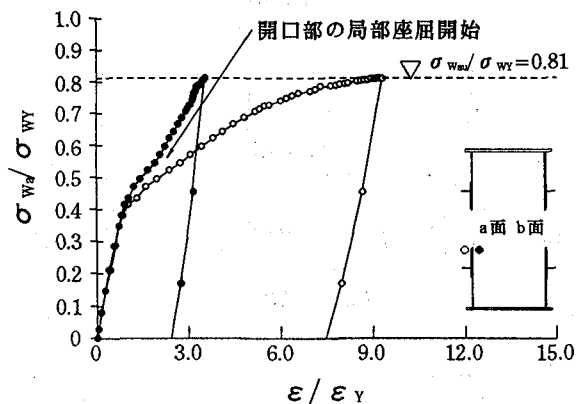
図-12 には、供試体 S_0 の中央断面(測定断面 A)における開口部周辺、縦補剛材位置、ならびにダイアフラムより 60mm だけ中央よりの測定断面 C における端板パネルの各測定点のうちで、座屈現象が認められた代表的な測定点における平均圧縮応力度-軸方向ひずみ曲線を示す。縦軸の平均圧縮応力度は、腹板の降伏点 σ_{wy} で無次元化している。また、横軸の軸方向ひずみは、腹板の降伏ひずみ ϵ_y で無次元化している。

まず、同図 (a) に示す開口部周辺において、 $\sigma_{wa}/\sigma_{wy} - \epsilon/\epsilon_y$ 曲線は、 $\sigma_{wa}/\sigma_{wy} = 0.4$ 付近まで線形性を保持している。そして、 $\sigma_{wa}/\sigma_{wy} = 0.45$ 付近で表裏のひずみに差異が出始め、開口部周辺で局部座屈が発生していることがわかる。その後、断面は、 $\sigma_{wa}/\sigma_{wy} = 0.81$ で終局状態に至っている。また、同図より、開口部は、箱断面内側方向に座屈しているのがわかる。

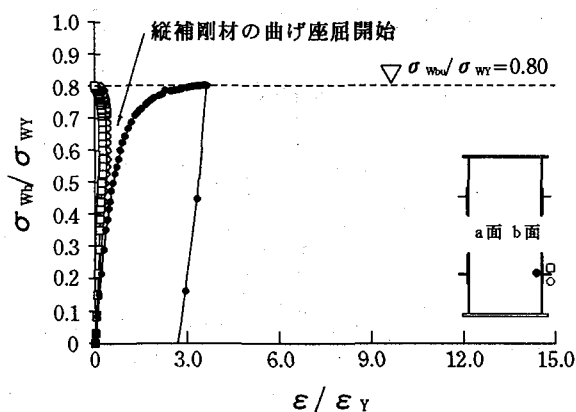
つぎに、同図 (b) より、縦補剛材位置における曲線は、 $\sigma_{wb}/\sigma_{wy} = 0.45$ 付近まで、線形性を保っている。その

後、 $\sigma_{wb} / \sigma_{wy} = 0.55$ 付近で、補剛材の曲げ座屈が発生し始め、この断面は、終局状態に至ったことがわかる。

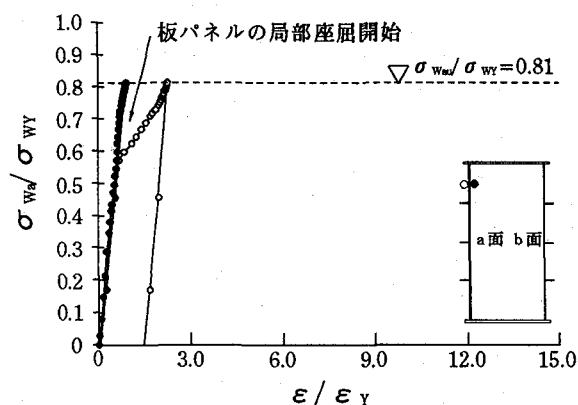
さらに、同図(c)より、端板パネルの中央部分では、 $\sigma_{wa} / \sigma_{wy} = 0.58$ 付近まで線形性を保持している。そして、 $\sigma_{wa} / \sigma_{wy} = 0.6$ で座屈現象が、現れていることがわかる。



(a) 開口部付近(測定断面A)



(b) 縦補剛材位置(測定断面A)



(c) 端板パネル中央部(測定断面C)

図-12 平均圧縮応力度一軸方向ひずみ曲線
(供試体S₀)

4.3 平均圧縮応力度-面外たわみ曲線

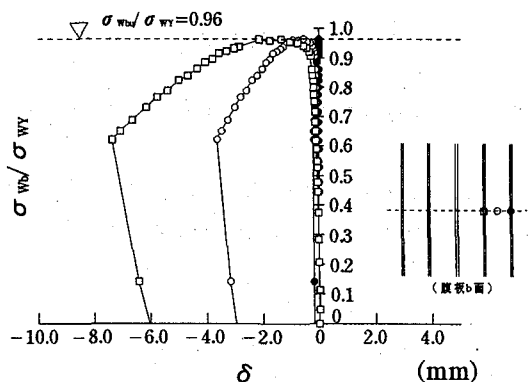
図-13には、着目パネルの各測定断面に取り付けた変位計より得られた腹板部分の面外たわみの挙動と平均圧縮応力度との関係の代表例を示す。なお、図中には、終局状態における $\sigma_{wb} / \sigma_{wy}$ 値も、破線で示してある。

同図(a)より、供試体Pでは、終局状態に近い状態で、板パネルの中央、および縦補剛材位置での断面内方向へのたわみが急増していることがわかる。また、たわみは、断面中央に至るほど大きくなっている。

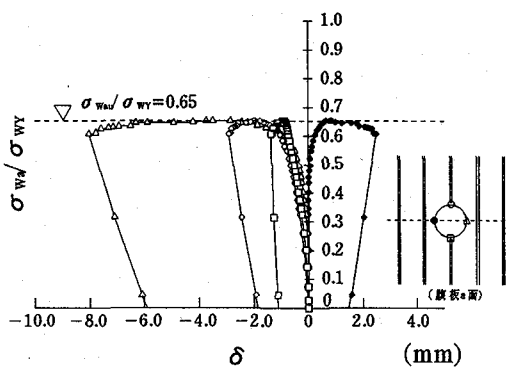
供試体Hでは、同図(b)より、開口部周辺の板パネルの局部座屈が始まる $\sigma_{wa} / \sigma_{wy} = 0.25$ 付近から各測定点におけるたわみに差異が生じてきている。そして、箱断面の内側にたわんでいる部分と、箱断面の外側にたわんでいる部分とがあることがわかる。

また、同図(c)より、供試体S₀においても、 $\sigma_{wb} / \sigma_{wy} = 0.45$ 付近から、座屈による断面外方向へのたわみが徐々に増大していることがわかる。

さらに、同図(d)より、供試体S₁においては、縦補剛材の曲げ座屈が始まる $\sigma_{wb} / \sigma_{wy} = 0.35$ 付近から、開口部周辺のたわみが箱断面内側に漸増していることがわかる。

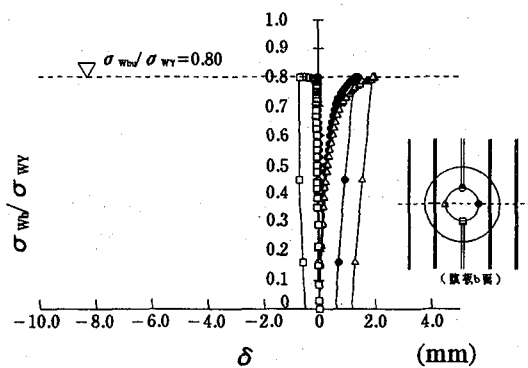


(a) 供試体P

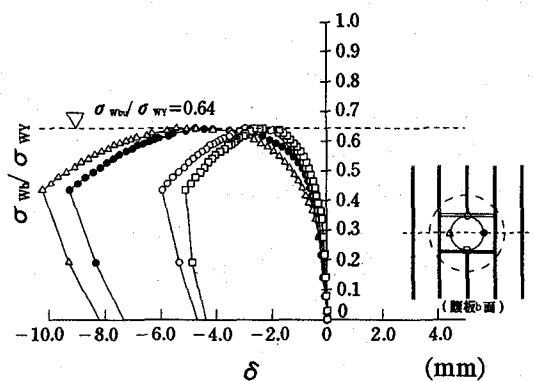


(b) 供試体H

図-13 平均圧縮応力度一面外たわみ曲線(つづく)



(c) 供試体S₀。



(d) 供試体S₁。

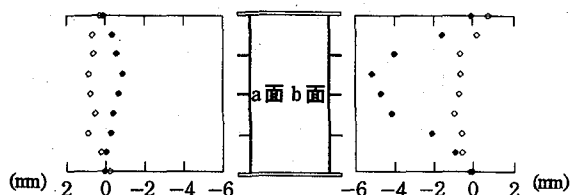
図-13 平均圧縮応力度-面外たわみ曲線 (つづき)

いずれの結果も、平均圧縮応力度-軸方向ひずみ曲線、および後述の面外たわみ波形の測定結果と傾向が良好に一致している。

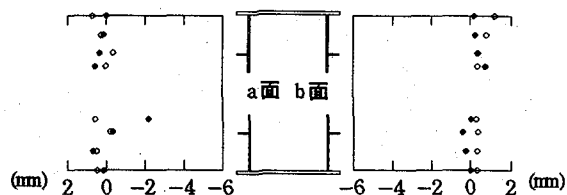
4.4 終局状態における面外たわみ波形

図-14には、各供試体の中央断面における初期たわみ波形、および終局状態における面外たわみ波形を示す。すなわち、これらの図中の横軸には面外たわみ δ を、また縦軸には面外たわみの各測定点の位置を示している。

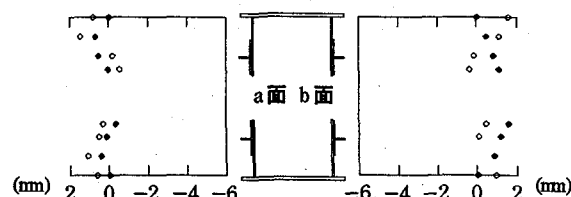
まず、同図(a)より、供試体Pにおいては、b面の腹板が特に大きく断面内側にたわんでいる。a面に比べて、b面の腹板のほうが、初期たわみ、および残留応力の影響を大きく受けたためと思われる。同図(b)より、供試体Hのたわみ波形は、断面の内側、および外側に不規則である。これは、開口部周辺にダブリング板による補強がないときの特徴であると思われる。そして、同図(c)より、供試体S₀においては、b面の腹板は外側へたわみ、a面の腹板では開口部付近で内側にたわみを生じた。さらに、供試体S₁においては、同図(d)より、両腹板が共に断面の内側にたわんでいるのがわかる。一般に、圧縮補剛板においては、座屈たわみが補剛材側に生じるよりも、その反対側に生じた方が、終局強度が低下



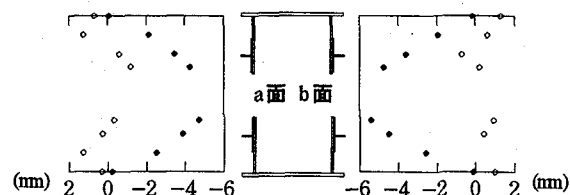
(a) 供試体P



(b) 供試体H



(c) 供試体S₀。



(d) 供試体S₁。

○ : 初期たわみ波形
● : 終局状態における
面外たわみ波形

図-14 初期たわみ波形、および終局状態における面外たわみ波形

することが知られている。このことも、供試体S₀に比較して、供試体S₁の終局強度が、著しく低下した原因として挙げられる。

5 実験結果の考察

5.1 各供試体の座屈強度、および終局強度

4.2で述べたような方法により、各供試体について、座屈現象が始まる強度を座屈開始強度と定義し、各供試体の平均圧縮応力度-軸方向ひずみ曲線より、板パネル、あるいは開口部の局部座屈開始強度、縦補剛材の曲げ座屈開始強度、および縦補剛材の局部座屈開始強度の

値を読みとり、終局強度とともに、表-5にまとめた。

同表より、開口部を設けた供試体 H では、降伏点で無次元化した平均圧縮応力度が 0.25 から 0.35 のかなり早期の段階で、開口部近傍の局部座屈が開始している。しかし、ダブリング補強を施した供試体 S_0 、および S_1 の開口部近傍の局部座屈の開始は、無次元化平均圧縮応力度が 0.45 から 0.50 であり、ダブリング板が局部座屈の開始を遅らせる効果があることがわかる。

また、供試体 S_1 では、板パネルの局部座屈、および縦補剛材の曲げ座屈かなり早期に開始しており、終局強度の低下の一因になったと思われる。

5.2 有効断面積と終局強度との関係

図-15 には、各供試体腹板の有効断面積と終局強度との関係を示す。ここで、縦軸の終局強度 σ_{wu} は腹板の降伏点 σ_{wy} で、また横軸は各供試体の中央断面における腹板の有効断面積 A_{eff} を、開口部がない供試体の腹板の断面積 A で無次元化した有効断面積比 (A_{eff}/A) である。なお、有効断面積 A_{eff} は各供試体の中央断面における一方の腹板の純断面積を示している。また、表-6 には、各供試体の2つの腹板の終局強度の平均値を示す。

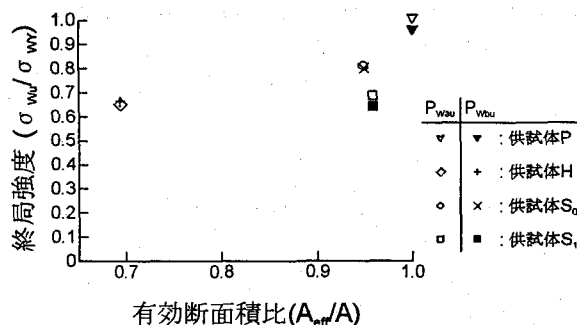


図-15 有効断面積比と終局強度との関係

図-15、および表-6から、次のことがいえる。すなわち、供試体 P の終局強度の平均値は、0.985 であり、4 種類の供試体のうち最も高く、開口部を設けて補強をしない供試体 H の終局強度の平均値は、0.660 であり、4 種類の供試体のうち最も低い結果となった。また、開口部を設けダブリングにて補強をした供試体 S_0 の終局強度の平均値は、0.805 であり、供試体 P に次いで高い。図-15 によれば、供試体 P、H、および S_0 の有効断面

積と終局強度の間には、正の相関が見られる。

開口部をダブリング補強するとともに、切断された中央縦補剛材の剛性を確保するために横補剛材を設けた供試体 S_1 の終局強度の平均値は、0.665 であり、本実験結果によると、供試体 S_0 より低い値となった。これは、以下の理由のためと考えられる。すなわち、i) ダブリングプレート、および横補剛材の溶接により、他の供試体に比較して、残留応力、および初期たわみがかなり大きくなっていった。そして、ii) 座屈たわみが箱断面の内側へ生じ、また縦補剛材の先端の圧縮応力がその取付け位置よりも大きくなるような厳しい座屈モードで終局状態に至った。

表-6 各供試体の無次元化終局強度の平均値 (σ_{wu}/σ_{wy})

供試体	終局強度の平均値
P	0.985
H	0.660
S_0	0.805
S_1	0.665

ところで、開口部のない補剛板を基準とするととき、本実験の供試体は、開口による強度の低下と、縦補剛材の切断による強度の低下とが重ね合わさっている。耐荷力に対する補強としては、この両者に対する補強が必要である。なお、実橋脚の柱部材の基部の開口部の 96% は、縦補剛材が開口により切断されている¹⁾。

6 まとめ

本研究より得られた主な結論をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 開口部を設けない供試体 P の無次元化終局強度の平均値は、0.985 であり、4 種類の供試体の中で最も高い結果となった。
- (2) 開口部を設け、ダブリング補強を施した供試体 S_0 の無次元化終局強度の平均値は、0.805 であった。一方、開口部を設けただけの供試体 H の無次元化終局強度の平均値は、0.660 であった。供試体 S_0 の結果より、ダブリング補強による効果がある程度認められるものの、開口を設けない供試体の強度まで高めるだけの十分な補強とは、いえない。

表-5 座屈開始強度、および終局強度の集約表

供試体 No.	板パネルの局部座屈開始強度	開口部の局部座屈開始強度	縦補剛材の曲げ座屈開始強度	縦補剛材の局部座屈開始強度	終局強度
P $P_{wa}/P_{wy}, P_{wb}/P_{wy}$	0.45, 0.90	—	0.85, 0.85	1.01, 0.96	1.01, 0.96
H $P_{wa}/P_{wy}, P_{wb}/P_{wy}$	0.45, 0.60	0.25, 0.35	0.65, 0.60	0.65, 0.67	0.65, 0.67
S_0 $P_{wa}/P_{wy}, P_{wb}/P_{wy}$	0.60, 0.78	0.45, 0.45	0.45, 0.55	0.70, 0.80	0.81, 0.80
S_1 $P_{wa}/P_{wy}, P_{wb}/P_{wy}$	0.35, 0.50	0.50, 0.50	0.35, 0.35	0.69, 0.64	0.69, 0.64

- (3) 開口部を設け、ダブリング補強のほか、さらに横補剛材による補強も施した供試体 S_1 の無次元化終局強度の平均値は、0.665 となり、ダブリング補強のみを施した供試体 S_0 の無次元化終局強度より低かった。この原因としては、供試体 S_0 に比して、供試体 S_1 の初期たわみ、および残留応力がかなり大きかったことが考えられる。また、供試体 S_1 では、供試体 S_0 と異なり、座屈たわみが箱断面内側に生じたことなどが挙げられる。なお、ダブリング補強は、初期不整に対して敏感な構造と思われる。
- (4) 開口部を設けた供試体 H では、降伏点で無次元化した平均圧縮応力度が 0.25 から 0.35 のかなり早期の段階で、開口部近傍の局部座屈が開始した。一方、ダブリング補強を施した供試体 S_0 、および S_1 の開口部近傍の局部座屈の開始は、無次元化した平均圧縮応力度が 0.45 から 0.50 であり、ダブリング板が局部座屈の開始を遅らせる効果があると認められる。
- (5) 今回の研究で対象としたダブリング補強、および、それとともに横補剛材による補剛も行う方法は、耐荷力の面からは、開口部のない補剛板の強度まで高めるだけの補強効果が期待できないことがわかった。

今後は、開口部、ならびに縦補剛材の切断が補剛板の強度低下に及ぼす影響を分離して調べ、各々に対する効果的な補強方法を考案し、それらの効果を弾塑性有限変位解析、あるいは実験により検討する必要がある。

謝辞：本実験のフランジに用いた高張力鋼板 (HT780)

は、住友金属工業㈱から提供して頂いた。また、データの分析にあたっては、津田 亮（当時、大阪市立大学 学部学生）、および向高直樹（大阪市立大学 学部学生）の両君の協力を得た。ここに、記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 中井 博・北田俊行・鈴木 巖・堀江佳平・祝 賢治：開口部を有する圧縮補剛板の実績調査，橋梁と基礎，Vol.30, No.9, pp.31-38, 1996 年 9 月。

- 2) 本州四国連絡橋公団：吊橋主塔設計要領・同解説、平成元年 4 月。
- 3) British Standard Institution: BS5400, Steel, concrete and composite bridge, Part 3, Code of practice for design of steel bridges, 1982.
- 4) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編、Ⅱ鋼橋編）、丸善、平成 6 年 2 月。
- 5) 阪神高速道路公団：鋼構造物設計基準，平成 6 年 7 月。
- 6) 首都高速道路公団：鋼構造物設計基準，平成 4 年 4 月。
- 7) 名古屋道路公社：鋼構造物設計基準，平成 7 年 10 月。
- 8) 福岡北九州道路公社：鋼構造物設計基準，平成 4 年 4 月。
- 9) 藤井 堅・藤枝洋二・佐藤 誠：圧縮を受ける有孔補剛板の補強と終局挙動，構造工学論文集，Vol.39A, 土木学会，pp.133-142, 1993 年 3 月。
- 10) 上野谷 実・大村 裕：一様せん断変形を受ける円孔を有する正方形板の弾塑性座屈強度，土木学会論文集，No.386, pp.227-236, 1987 年 10 月。
- 11) 上野谷 実・大村 裕：円孔を有する固定正方形板の弾性せん断座屈，構造工学論文集，Vol.32A, 土木学会，pp.353-362, 1986 年 3 月。
- 12) 上野谷 実・大村 裕：円孔を有する固定支持正方形板の弾塑性せん断座屈に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.35A, 土木学会，pp.145-154, 1989 年 3 月。
- 13) 中村雅樹・上野谷 実：補強円孔を有する正方形板の弾塑性せん断座屈強度，構造工学論文集，Vol.41A, 土木学会，pp.357-368, 1995 年 3 月。
- 14) 清水 茂・吉田俊弥：面外初期たわみのある有孔板の大変形解析，構造工学論文集，Vol.38A, 土木学会，pp.203-212, 1992 年 3 月。
- 15) Shimizu, S., Yoshida, S. and Enomoto N: Buckling of Plates with a Hole under Tension, Thin-Walled Structure, Vol.12, No.1, pp.35-49, 1991.
- 16) Dogaki, M., Harada, M. and Yonezawa, H.: Elastic Buckling of Support Diaphragms with Rectangular Holes in Steel Box Girders, Technical Report, Kansai Univ., No.27, pp.173-185, 1986.

(1996 年 9 月 6 日受付)