

補剛された圧縮板の極限強度曲線に関する統計学的研究

STATISTICAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH CURVES OF LONGITUDINALLY STIFFENED PLATES UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

奈良 敬*・小松 定夫**

By Satoshi NARA and Sadao KOMATSU

By processing statistically the data of initial deflection obtained from measurement of stiffened plate members in steel box girder bridges recently fabricated in Japan, its statistical properties can be made clear. On the basis of the initial deflection data, the ultimate strength curve corresponding to the probability of nonexceedance of 5% can be provided. Finally, the conception of determining the allowable values as well as the procedure of test measurement for the initial deflection of stiffened plates are presented.

Keywords : ultimate strength curve, stiffened plate, uniaxial compression, initial imperfections, statistical properties

1. まえがき

近年、構造解析ならびに製作架設技術の進歩に伴って、鋼構造物の長大化、軽量化が促進された。なかでも、圧縮力を受ける構造物においては、薄板要素を補剛材で縦横に補剛された、いわゆる補剛板形式の薄板部材を用いて、断面の効率化を推進する傾向が顕著である。

このように断面の効率化により鋼構造物の軽量化を強く目指す設計法が定着しつつあった中で、1969年から1971年にかけて相次いで架設中の落橋事故は、橋梁技術者にとって厳しい警告となった。事故後の調査によつて、溶接によって生ずる不可避の残留応力や初期たわみなどの初期不整が、薄肉構造部材の圧縮耐荷力を低下させることが明らかにされ、さらに耐荷力の低下に対する考慮が不十分であったことが落橋の原因として報告された。これを契機として、初期不整が鋼構造物の圧縮耐荷力に及ぼす影響についての研究が活発になっていった。

この結果、初期不整が耐荷力に及ぼす影響についてある程度まで明らかにされてきた。しかし、従来の研究で

は次のような未解決の問題点が含まれている。

- ① 理論的研究において用いられる初期不整については決定論的パラメーターとしての仮定の域を出ず、その結果を利用して直接耐荷力を評価することはできない。
- ② 実験的研究において生ずる初期不整については、実験供試体として用いた模型固有のものであることが多く、①と同様のことがいえる。

このような反省から実測データの収集について注目されるようになった。

溶接残留応力については、すでに小松・牛尾・北田によって、鋼橋の実物大模型を用いた実測結果が報告されている¹⁾。実橋と同一の溶接材料および製作法に基づいて得られた結果から、残留応力の分布形およびその大きさについて有用なデータが示されている。

一方、初期たわみについては、実物大模型による文献¹⁾のほかに、実橋において実測されたものがみられる。

西ドイツでは、Leonhardt-Hommel が Winningen 近くの Mosel 峡谷を渡る最大支間長 218 m の連続箱桁橋のボトムプレート（補剛板）について実測した結果を報告している²⁾。

イギリスでは、Cullington-Beales が、落橋事故後に新しく架設された Milford Haven 橋について実測して

* 正会員 工博 岐阜大学助手 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科
(〒570 大東市中垣内3-1-1)

いる³⁾。彼らは、連続箱桁橋のボトムプレートおよび腹板について、製作から架設に至るまでの各段階における初期たわみを、残留応力と併せて測定している。

さらに、イギリスの Department of the Environment に所属する Ellis が実施した箱桁橋の一連の実測調査⁴⁾がある。

わが国においては、加藤・石岡・中西が広幅員鋼床版 2 主桁橋（長柄橋の一部）の鋼床版および主桁腹板パネルについて実測している⁵⁾。わが国の橋梁製作方法によって製作された実橋において、初期たわみがどの程度あるのか、あるいはどのような分布になるのかを十分に調査することは、耐荷力と初期たわみの関係を定量的に明らかにするために、重要な課題である。

形状初期不整と耐荷力の関係について明らかにするためには次のことが必要である。

- ① 実橋の初期不整に関する統計的な調査研究を実施し、その特性を明らかにする。
- ② 弾塑性有限変位理論に基づいた極限強度解析法を用いる。

この種の既往の研究例^{6)~9)}においては、

- ① 単なる初期たわみの実測結果の断片的考察にとどまっているもの、
- ② 初期たわみのモードや最大値を仮定して確率論的に設計計算法を論じたもの、
- ③ 初期たわみの実測結果に基づき確率統計的な耐荷力評価について論じているが、初期たわみの分布形を正規分布と仮定しているもの、

などであるものが多く、上述した 2 点をともに満たす例は少なく、耐荷力の評価を行うことは困難といえる。しかしながら、Massonnet を委員長とする IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering, 国際構造工学協会) の Task Group (T.G. "Tolerances in Steel Plated Structures") による活動報告¹⁰⁾には次の点で注目すべき点が多い。

- (a) 欧米各国の 20 数名の委員から成る Task Group である。
- (b) 実橋の初期たわみデータは、ベルギー、チェコスロバキア、イギリス、西ドイツの 4 か国で収集されている。
- (c) 初期たわみと極限強度の関係を表わす敏感度曲線については、圧縮板パネルの場合、Fisher-Harre によって実施された 74 体の供試体の破壊実験結果に基づいた提案曲線¹¹⁾が示されているほか、Moxham, Little, Crisfield, Frieze, Hardinge らの解析結果が引用されている¹²⁾。圧縮補剛板においては、Carlsen の解析法⁸⁾が挙げられていて、いずれも、弾塑性有限変位問題として耐荷

力を評価しようとしている。

また、上田・中長・森山¹³⁾は、上田・矢尾ら^{14)~16)}の一連の研究成果を踏まえて、溶接初期不整である初期たわみと残留応力の簡易推定法を示すとともに、推定された残留応力と、有効初期たわみ係数なる概念を導入して得られる有効初期たわみとから、精度のよい圧縮板の極限強度の簡易推定式を提案している。

さらに、圧縮補剛板に関する実験データベースの構築¹⁷⁾が待たれる現状にある。

本研究は、わが国の鋼材、溶接材料および製作法を基盤にした実橋の膨大な初期たわみの実測データ¹⁸⁾を統計パラメーターとし、その他のパラメーターについては実際的なものを用いて、圧縮補剛板の耐荷力を確率論的に評価しそれに基づく極限強度曲線を提示すること目的とする。

2. 圧縮補剛板の初期たわみ

初期たわみの測定対象、測定法および統計処理法については文献 18) のとおりである。

(1) 初期たわみの確率モデル

確率統計学的立場から、残留応力および初期たわみを考慮に入れた圧縮補剛板の耐荷力の評価を行うために、初期たわみの確率モデルについて考える。

図-1 で示す頻度分布より、次式に示すワイブル分布¹⁹⁾が初期たわみの確率モデルとして適切であると考える。

$$f(x) = \begin{cases} 0 & x < \gamma \\ \frac{m}{\alpha} (x - \gamma)^{m-1} \cdot \exp \left[\frac{-(x - \gamma)^m}{\alpha} \right], & x \geq \gamma \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 α , m , γ はそれぞれ尺度、形状、位置を表わすパラメーターである²⁰⁾。

初期たわみの確率モデルがワイブル分布にあてはまるかどうかについては、Stirling の公式を使って近似すればカイ二乗法によって適合度の検定を行うことができる²¹⁾。その結果、初期たわみの確率モデルとしてワイブル分布が最もよく適合することがわかった。ワイブル分布のパラメーターは、平均値と標準偏差から反復計算により求めた。ただし、初期たわみを正側と負側に分けてワイブル分布にあてはめたので、 $\gamma=0$ とした。

(2) 補剛板の初期たわみ

圧縮補剛板の耐荷力に最も影響を及ぼすのは縦補剛材の初期たわみと考えられるので、縦補剛材の初期たわみ性状について調べた。縦補剛材の最大初期たわみ量 δ_0 、正弦半波長の初期たわみ波形の振幅 δ_{01} 、IDWR²²⁾ の測定法に基づいた初期たわみ量 Δ_{sx} を $a/1000$ で無次元化し、その頻度分布を図-1(a)~(c) に示す。いずれの

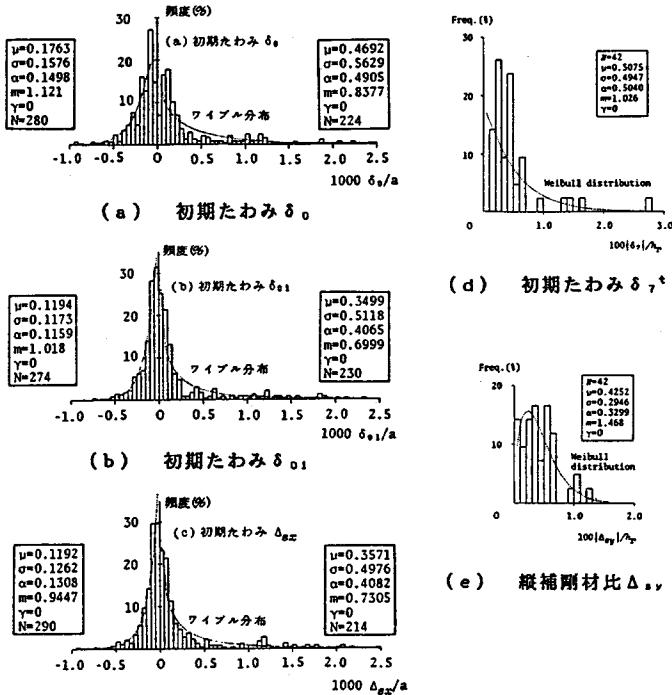


図-1 縦補剛材の初期たわみの頻度分布

図-1 縦補剛材の初期たわみの頻度分布

表-1 各国示方書との比較

Specifications	Allowable Values	Probability Exceedance (%)		
		δ_0	δ_{01}	Δ_{sx}
IWR(1973)	positive side $a/900$ negative side $a/1200$	10.8 0.43	7.1 7.7×10^{-3}	7.1 0.16
ASHTO(1973)	positive side $a/480$ negative side $a/480$	2.3 2.5×10^{-3}	1.6 1.2×10^{-4}	1.5 2.3×10^{-4}
ÖNORM B4602 (1975)	positive side $a/500$ negative side $a/500$	2.6 4.9×10^{-3}	1.8 2.6×10^{-4}	1.7 4.1×10^{-4}
IMSE-R1-012 (1978)	positive side $a/400$ negative side $a/400$	1.2 8.0×10^{-7}	0.94 3.0×10^{-6}	0.84 1.3×10^{-6}
JSHB(1980)	positive side $a/1000$ negative side $a/1000$	13.0 0.13	8.5 1.8×10^{-6}	8.6 4.8×10^{-6}
BSS400(1980)	positive side $a/750$ or $2mm$ negative side $a/750$ or $2mm$	7.5 9.9×10^{-3}	4.9 9.5×10^{-6}	4.9 4.4×10^{-6}

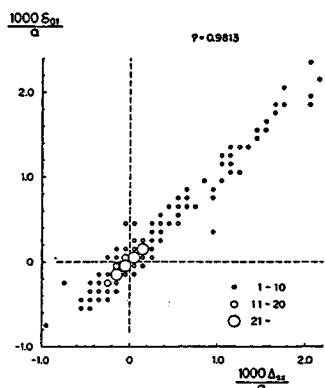


図-2 縦補剛材の初期たわみの相関図

場合も補剛材側（正側）の初期たわみの最大値は $a/1000$ の 2.5 倍近くに達するが、板パネル側（負側）では $a/1000$ 程度である。表-1 には、初期たわみの測定値が各國の示方書の規定値を超過する確率を示す。正側では、道路橋示方書（以下、「道示」とよぶ）の圧縮材の規定を準用すると最も厳しく、対応する測定値 δ_0 の超過確率が 13.0 % となる。負側では、IDWR の規定値が最も厳しく、対応する測定値 Δ_{sx} の超過確率は 0.2 % である。その他の示方書における規定値は非常に緩く、対応する測定値の超過確率は最大 1.8 % である。

なお、縦補剛材の初期たわみの確率モデルには、ワイブル分布を選択し、初期たわみの頻度分布図中に点線で示した。

図-2 には、 δ_{01} と Δ_{sx} の相関図を示す。この図および図-1 より、 δ_{01} は Δ_{sx} で置き換えることができる。すなわち、縦補剛材上の初期たわみを三角級数に分解して δ_{01} を求めなくても、IDWR の規定のようにゲージ長 $G (= a)$ を定めて測定される初期たわみ Δ_{sx} で代用することができる。

(3) 横倒れ初期たわみ

縦補剛材の横倒れ初期たわみについては、絶対最大値 δ_{01}^* と、IDWR の測定法に基づいた初期たわみ量 Δ_{sy} を $h_r/100$ で無次元化し、その頻度分布を図-1(d), (e) に示す。道示のフランジの直角度の制限規定を準用した場合、対応する測定値 δ_{01}^* が規定値 $h_r/100$ を超過した頻度は 9.5 % である。一方、IDWR の規定値 $(60/h_r)(G/1000)^2$ を、対応する測定値 Δ_{sy} が超過した頻度は、0 % である。

測定データがわずかに 42 例ではあるが、IDWR に比較して道示の規定値の方が厳しいという傾向がみられる。

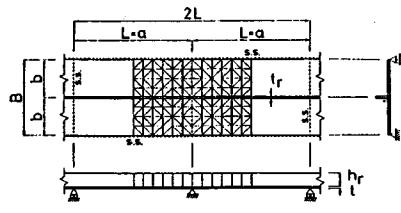
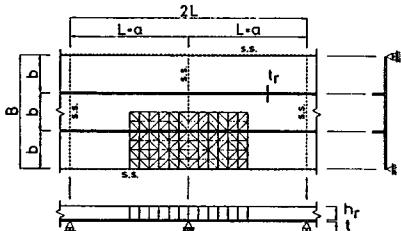
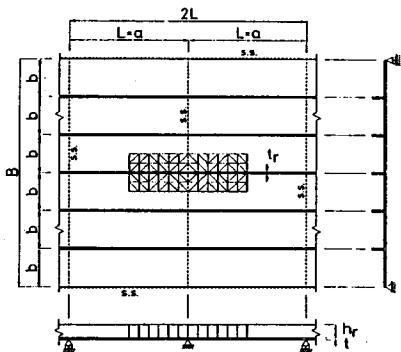
3. 圧縮補剛板の敏感度曲線

(1) 解析法

初期たわみと残留応力を同時に考慮することのできる弾塑性有限変位理論に基づき、面内変位には有限要素法、面外変位にはモーダルアナリシス的手法を併用して大幅に自由度を低減させた解析法を用いる。解析法の詳細については文献 23) および 24) を参照して頂きたい。

(2) 解析モデル

図-3 に示す周辺単純支持の補剛板モデルを用いて、初期たわみモード¹⁸⁾と極限強度との関係について調べた

(a) 周辺単純支持モデル ($n_r=1$)(b) 周辺単純支持モデル ($n_r=2$)

(c) 多リブモデル

図-3 圧縮補剛板の解析モデル

表-2 初期たわみモードと極限強度

初期たわみの大きさ	$\frac{a}{l_0}$	$R=0.7, L=144\text{cm}, n_r=2,$
初期たわみモード	$\frac{1}{1000}$	$B=144\text{cm}, T/t_r=1.0$
両状曲げ (I)	0.7243	$a_r=2400\text{kg/cm}^2$
板曲げ (I)	0.7332	周辺単純支持モデルを採用。

結果を表-2に示す。この結果より、補剛板全体の初期たわみモードの違いによる極限強度の変化は認められず、むしろ縦補剛材の初期たわみにより極限強度が大きく支配されるものと考えられる。

次に、図-3(a), (b)に示す解析モデルを用いて、縦補剛材本数のみを変化させて解析した結果を図-4に丸印で示す。図中の一点鎖線は、図-3(c)に示す多リブモデルを用いて解析したときの極限強度を表わす。縦補剛材本数 $n_r \geq 4$ の場合、圧縮補剛板の極限強度は多リブモデルで十分算定することができる。

以上の2つの結果、ならびに、測定対象とした圧縮補

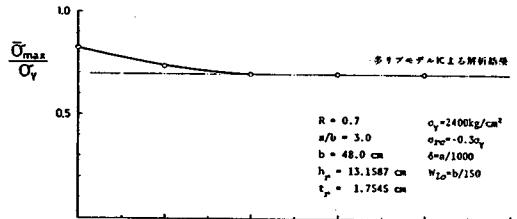
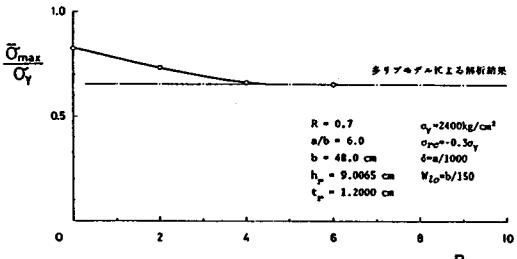
(a) $a/b=3$ の場合(b) $a/b=6$ の場合

図-4 縦補剛材本数と極限強度

表-3 隣接補剛板パネルを含む縦補剛材の初期たわみモードと極限強度

Stiffener Imperfection	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$	longitudinal stiffener	
		$\frac{a}{l_0}$	plate panel
P	0.7323		(a) Mode "P"
M	0.7127		(b) Mode "M"
C	0.7073		(c) Mode "C"

$R=0.7, \sigma_y=2400\text{kg/cm}^2$
 $a/b=3, \sigma_{p0}=-0.3\sigma_y$
 $\delta_{p0}=a/1000, \nu_{t0}=b/150$

剛板の縦補剛材本数 $n_r=3 \sim 9$ 、板パネル縦横比 $a/b=3.32 \sim 9.25$ より、図-3(c)に示す多リブモデルを用いて圧縮補剛板の極限強度を計算する。

(3) 隣接補剛板パネルを含む縦補剛材の初期たわみモードの影響

隣接補剛板パネルを含む縦補剛材の3つの初期たわみモードと極限強度の関係を表-3に示す。縦補剛材の初期たわみの最大値はすべてのモードについて a/l_0 とした。その結果、横補剛材位置で節となる正弦波形で表わされる初期たわみモード C が最も小さい極限強度を与えることがわかる。表中の図に示した初期たわみモード以外のモードについては、隣接補剛板パネルにおいて連続して正側の初期たわみとなるモード、あるいは連続して負側の初期たわみモードが考えられる。しかし、これらの初期たわみモードの場合、初期たわみモード P あるいは M に比較して、むしろ極限強度が大きくなると考えられる。したがって、以下の計算において縦補剛材の初

表-4 板パネルの初期たわみと圧縮補剛板の
極限強度

Initial Deflection	Longitudinal Stiffener	$a/1000$
	Plate Panel	0 $b/150$
$\frac{D_{max}}{a_y}$	$R=0.5$	0.9543 0.9495
	$R=0.5$	0.9063 0.8849
	$R=0.7$	0.7614 0.7073
	$R=0.9$	0.6406 0.5596
	$R=1.1$	0.5208 0.4111
	$R=1.3$	0.3981 0.3887

$$R = 0.7, \quad \sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2, \quad a/b = 3, \quad \sigma_{rc} = -0.3\sigma_y$$

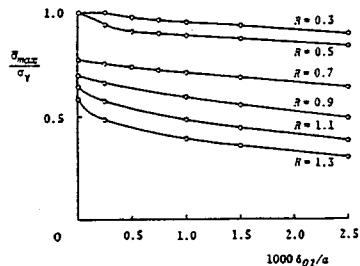


図-5 圧縮補剛板の敏感度曲線

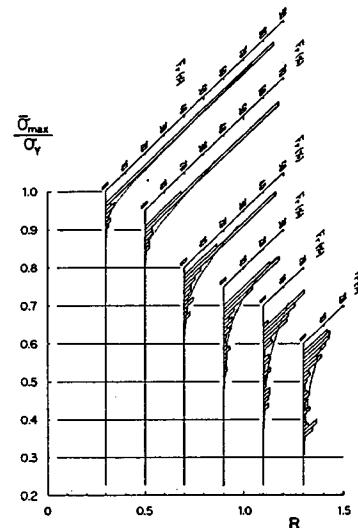


図-6 圧縮補剛板の極限強度の頻度分布

期たわみモードとしては、幾分安全側をとり横補剛材位置で節となる正弦波形で表わされるモードCを対象とする。

(4) 敏感度曲線

圧縮補剛板においては、縦補剛材の初期たわみのほかに板パネルの初期たわみも極限強度の低下をもたらす原因となる。縦補剛材の初期たわみを $a/1\,000$ に固定し、板パネルの初期たわみを変化させて、板パネルの初期たわみが圧縮補剛板の極限強度に与える影響について調べた結果を表-4 に示す。幅厚比パラメーター $R = 0.7 \sim 0.9$ において、その影響が最も大きく、板パネルの初期たわみがない場合に比較して 7.1~7.8 % の強度低下が生ずる。それ以外の R の領域では、強度低下は最大 3.5 % である。図-5 に圧縮補剛板の敏感度曲線を示す。圧縮板パネル¹⁸⁾に比較して初期たわみに対する敏感性はかなり低い。また、幅厚比パラメーター R が増加するにつれて、少しづつではあるが敏感性が増す傾向を示し、圧縮板パネルの場合とは正反対である。圧縮補剛板の敏感度曲線はほぼ直線で表わされることも認められる。

4. 圧縮補剛板の耐荷力評価

圧縮補剛板の耐荷力評価については、次の2つの方法を用いた。

- ① 縱補剛材の初期たわみの頻度分布をワイブル分布にあてはめて求められる超過確率 5 % 点の初期たわみの値を、敏感度曲線に代入し極限強度の非超過確率 5 % 点を求める方法
 - ② 縱補剛材の初期たわみの全データを、順次敏感度曲線に代入して、図-6に示すように極限強度の頻

度分布を求めた後、その頻度分布をワイブル分布にあてはめ、極限強度の非超過確率 5 % 点を求める方法。

上述の2つの方法により求められた極限強度の非超過確率5%点については、両者にほとんど差異は認められなかった。このようにして種々のR値について極限強度の非超過確率5%点、さらに1%点および10%点を縦補剛材本数別に求めた。その結果を図-7に示す。図中的一点鎖線は道示の耐荷力曲線、二点鎖線はDAST-Ri-012²⁵⁾の圧縮板の耐荷力曲線である。また、過去の実験値^{26)~31)}についても併せてプロットした。なお、図中の極限強度は縦補剛材の初期たわみとして半波長の初期たわみ波形の振幅 δ_{01} を用いて求められたものである。これは補剛板の極限強度が縦補剛材の初期たわみ δ_{01} に大きく支配されることから、縦補剛材の最大初期たわみ量 δ_0 を用いるより合理的であると思われる。図中の極限強度の近似曲線を次式に示す。

ただし、係数については表-5に示す。

図より縦補剛材本数による極限強度の差が大きいことがわかる。非超過確率の値が小さくなるに従い極限強度曲線は低下するが、図-7(b)に示す非超過確率5%点が実験値の下限値を捉えているようである。

図-7(a) には実験データより得られた吉浪・大村³²⁾

表-5 圧縮補剛板の極限強度の近似曲線の係数

系数	非超滤速率 0 点点			非超滤速率 6 点点			非超滤速率 1 点点		
	n_{p1}	n_{p2}	n_{p3}	n_{p1}	n_{p2}	n_{p3}	n_{p1}	n_{p2}	n_{p3}
A_S	0.996	0.996	1.000	0.997	0.998	0.998	0.999	0.998	0.996
B_S	0.373	0.136	0.192	0.399	0.181	0.155	0.342	0.095	0.031
C_S	-1.294	-0.979	-1.164	-1.363	-1.126	-1.185	-1.314	-1.061	-1.125
D_S	0.577	0.405	0.507	0.615	0.488	0.531	0.609	0.479	0.533

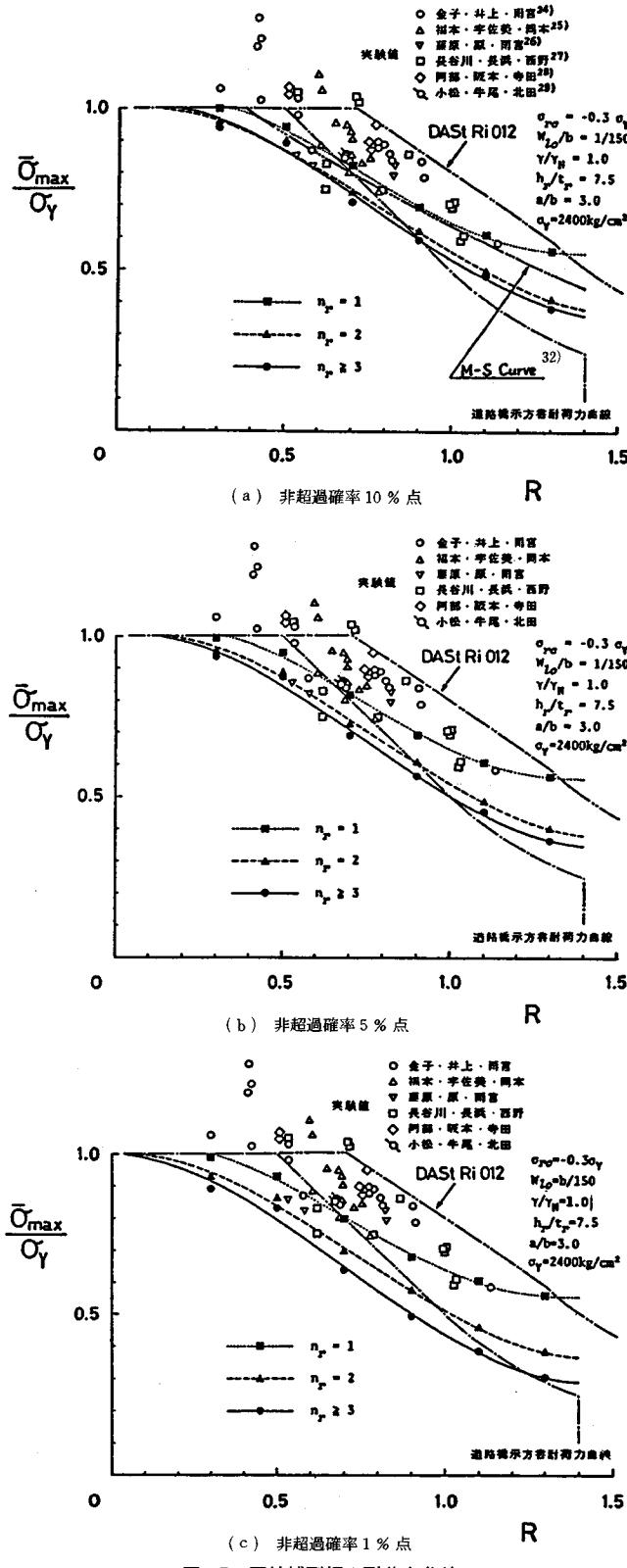


図-7 圧縮補剛板の耐荷力曲線

の *M-S* 曲線を三点鎖線で示した。この曲線は $n_r=1$ の場合の極限強度曲線と比較的よく一致しており、本研究で得られた極限強度曲線の傾向をよく表わしている。正規分布だと *M-S* 曲線は非超過確率 15 % 点であるが、分布形がはっきりしないため断定できないが、 n_r が大きくなると耐荷力を過大評価する可能性があると思われる。これは実験データに含まれる実験供試体の縦補剛材本数があまり多くないことが一因と考えられる。

また、本研究で得られた極限強度曲線は道示の耐荷力曲線と傾向がはっきり異なる。

5. 圧縮補剛板の初期たわみの許容値とその測定検査法に関する考察

(1) 初期たわみの許容値の設定について

縦補剛材の初期たわみは最も支配的な δ_{01} で評価するのが合理的であるから δ_{01} を用いて許容値を設定する必要がある。次の 2通りの設定方法が考えられる。

- 初期たわみ δ_{01} の正側の超過確率 5 % 点 $\delta_{01}^{+0.05}$ を許容値とする方法

正側を許容値とした理由は次の 2点である。

- 図-3に示した補剛板の解析モデルにおいて考慮した縦補剛材の初期たわみモードは、横補剛材位置で節となる正弦波形で表わされ、正側および負側とも同じ大きさとなるモード C (表-3 参照) である。
- 初期たわみ δ_{01} の負側では、絶対値が正側の $\delta_{01}^{+0.05}$ を超過する確率はわずかに 0.01 % にすぎない。

- 道示に規定される耐荷力を確保できる初期たわみ δ_{01}^{spec} を算定し、これを許容値とする方法。

(2) 初期たわみ測定検査法に関する考察

図-1 および図-2より明らかなように、 δ_{01} は Δ_{sx} で置き換えることができる。したがつて、縦補剛材上の初期たわみを三角級数に分解して δ_{01} を求めなくても IDWR の規定のようにゲージ長を定めて測定される初期たわみ Δ_{sx} により、初期たわみの測定検査を行うことができる。

6. 結論

- 縦補剛材の初期たわみは、板パネル側(負側)に比し補剛材側(正側)の方でかなり大きい傾向を示した。各国示方書の許容値を超

過する確率を求めた結果、正側では道示の圧縮材の規定、負側ではIDWRの規定値が最も厳しく、超過確率はそれぞれ13.0%および0.2%であった。その他の示方書においては、対応する測定値の超過確率は最大1.8%であった。

(2) 初期たわみの確率モデルとしてワイブル分布が適している。

(3) 縦補剛材の横倒れ初期たわみについて、道示およびIDWRの規定値を超過する頻度を求めた結果、IDWRに比較して道示の規定値の方が厳しいという傾向が認められた。

(4) 頻度分布図および相関図より、縦補剛材の正弦半波長の初期たわみ波形の振幅 δ_{01} は、IDWRの測定法に基づく初期たわみ量 Δ_{sx} で代用することができる。

(5) 縦補剛材の初期たわみにより極限強度が支配される。

(6) 解析モデルに多リブモデルを用いて、実橋における初期たわみと残留応力を考慮した圧縮補剛板の極限強度曲線を統計学的手法に基づき求めた。さらに、簡単で精度の良い極限強度の基本曲線の近似式をRの3次多项式で提示した。

(7) 初期たわみの許容値の設定方法について考え方を示した。

(8) 初期たわみの測定検査法に関する考察を加え、初期たわみ δ_{01} の代わりにIDWRに基づいて測定される初期たわみ Δ_{sx} により初期たわみの測定検査を行うことができる事を示した。

7. あとがき

本論文の作成にあたり、日本鋼構造協会関西地区委員会のIDM委員会（小松定夫委員長）において収集された初期たわみ測定データを利用させて頂いた。関係各位に対して深甚の謝意を表する次第である。また、大阪市立大学工学部土木工学科の北田俊行助教授のご協力に対し感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 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実験的研究、土木学会論文報告集、第265号、pp.25~35、1977年9月。
- 2) Leonhardt, F. and Hommel, D. : The Necessity of Quantifying Imperfections of All Structural Members for Stability of Box Girders, Proc. Int. Conf. Steel Box Girder, pp.5~13, 1973.
- 3) Cullington, D. W. and Beales, C. : Residual Stresses and Distortions Measured during Construction of the Milford Haven Bridge, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol.12, No.2, pp.123~129, April, 1977.
- 4) Ellis, L. G. : A Statistical Appraisal of the Measured Deformations in Several Steel Box Girder Bridges, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 12, No. 2, pp. 97~106, April, 1977.
- 5) 加藤隆夫・石岡英男・中西正昭：広幅員鋼床版2主桁橋における初期不整、橋梁と基礎、Vol.13, No.6, pp.29~35, 1979, およびNo.7, pp.38~43, 1979.
- 6) 安川 康・池上 博・大南亮一：船殻部材の許容歪量に対する信頼性理論の適用、日本造船学会論文集、第138号、1975年12月。
- 7) Goodman, R. A. and Mowatt, G. A. : Allowance for Imperfections in Ship Structural Design, The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, Vol. 12, No. 2, pp. 153~162, April, 1977.
- 8) Carlsen, C. A. and Czukko, J. : The Specification of Post-Welding Distortion Tolerances for Stiffened Plates in Compression, The Structural Engineer, Vol. 56 A, No. 5, 1978.
- 9) Goodman, R. A. and Mowatt, G. A. : Application of Strength Research to Ship Design, Steel Plated Structures, edited by P. J. Dowling et al., Crosby Lockwood Staples, London, 1977.
- 10) Massonnet, Ch. : Tolerances in Steel Plated Structures, IABSE Surveys, S-14/80, pp.49~76, Mar., 1980.
- 11) Fisher, M. und Harre, W. : Ermittlung der Traglastkurven von einachsig gedrückten Rechteckplatten aus Baustahl der Seitenverhältnisse $\alpha \leq 1$ mit Hilfe von Versuchen. (Teil I und II), Der Stahlbau, J. 47, H. 7, S. 199~204 und H. 8, S. 239~247, 1978.
- 12) Bradfield, C. D. : Test on Single Plates under In-Plane Compression with Controlled Residual Stresses and Initial Out-of-Flatness, University of Cambridge, Technology Report CUED/C-Struct, TR78, 1979.
- 13) 上田幸雄・中長啓治・森山修司：溶接初期不整を有する矩形板の圧壊強度に関する研究（第4報）、日本造船学会論文集、第159号、pp.282~294、1986年6月。
- 14) 上田幸雄・矢尾哲也・中村和博：溶接初期不整を有する矩形板の圧壊強度に関する研究（第1報）、日本造船学会論文集、第148号、pp.222~231、1980年12月。
- 15) 上田幸雄・矢尾哲也・中村和博：溶接初期不整を有する矩形板の圧壊強度に関する研究（第2報）、日本造船学会論文集、第149号、pp.306~313、1981年6月。
- 16) 上田幸雄・矢尾哲也・中長啓治・田中義照・半田和久：溶接初期不整を有する矩形板の圧壊強度に関する研究（第3報）、日本造船学会論文集、第154号、pp.345~355、1983年12月。
- 17) 三上市藏・牧野晴一・井上佳巳・伊藤吉信：鋼補剛板耐荷力実験数値データベースの構築（第2報）、昭和62年度関西支部年次学術講演会講演概要、I-58、1987年4月。
- 18) 小松定夫編：鋼橋部材の形状初期不整と耐荷力の統計学的研究、JSSC, Vol. 16, No. 179, pp. 10~43, Apr., 1980.
- 19) Weibull, W. : A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics, pp. 293~297, Sep., 1951.

- 20) 真壁 肇：ワイル分布の使い方—信頼性のための統計的解析，日本規格協会，1966.
- 21) 宇野利雄：数理統計学演習，共立出版，1973.
- 22) Interim Design and Workmanship Rules, Part I-IV, Report of the Committee-Appendix, Inquiry into the Basis of Design and Method of Erection of Steel Box Girder Bridges, Department of the Environment, London, 1973.
- 23) 小松定夫・北田俊行：補剛された圧縮板の弾塑性有限変位挙動の一解析法，土木学会論文報告集，第 296 号，pp. 1~12, 1980 年 4 月.
- 24) 奈良 敬・小松定夫・北田俊行：連続補剛板の極限圧縮強度特性に関する研究，土木学会論文集（掲載予定）。
- 25) Deutscher Ausschuss für Stahlbau-Richtlinien : DAStr-Ri-012, 1978.
- 26) 金子忠男・井上啓一・雨宮栄一郎：補剛された板の圧縮耐荷力に関する実験的研究（第 2 報），土木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集，I-146, 1976 年 10 月.
- 27) Fukumoto, Y., Usami, T. and Okamoto, Y. : Ultimate Compressive Strength of Stiffened Plates, The ASCE Speciality Conference on Metal Bridge, St. Louis, November 12-13, 1974.
- 28) 藤原 稔・原 道彦・雨宮栄一郎：補剛された板の圧縮耐荷力に関する実験的研究，土木学会第 30 回年次学術講演会講演概要集，1975 年 10 月.
- 29) 長谷川彰夫・長浜正孝・西野文雄：圧縮を受ける補剛された板の座屈強度，土木学会論文報告集，第 236 号，1975 年 4 月.
- 30) 阪本謙二・阿部英彦・寺田博昌：補剛材つき板の座屈に関する研究，土木学会第 31 回年次学術講演会講演概要集，I-130, 1976 年 10 月.
- 31) 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，pp. 47~61, 1976 年 11 月.
- 32) 吉浪康行・大村 裕：実験データより見た補剛板の圧縮耐荷力について，構造工学論文集，Vol. 33 A, pp. 161~170, 1987 年 3 月.

(1987.6.1・受付)