

十分に剛でない縦補剛材を有する補剛板の横方向圧縮強度に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF INSUFFICIENTLY
STIFFENED PLATES UNDER TRANSVERSE COMPRESSION北田俊行^{*}, 中井 博^{**}, 古田富保^{***}, 秦野啓司^{****}

By Toshiyuki KITADA, Hiroshi NAKAI, Tomiyasu FURUTA, and Keiji HATANO

The study deals with the ultimate strength of transversely compressed plates with longitudinal stiffeners which are not so rigid that the local buckling does not occur in the plate panels between them. Firstly, two stiffened plate models were tested. Also proposed is an approximate method for predicting the ultimate strength of these kind of stiffened plates through the parametric study by means of the elasto-plastic and finite displacement analysis. Finally, this approximate method is verified by comparing with the test results.

1. まえがき

幅員の広いニールセン・アーチ橋や斜張橋の鋼床版では、橋軸(縦)方向の面内力以外に、橋軸直角(横)方向に対しても横桁の圧縮フランジとしての大きな面内圧縮力が生じる。このような場合、従来、あまり重要視されなかった鋼床版の座屈照査が必要となる。この種の問題に対処するために、著者ら¹⁾は、すでに2方向面内力を受ける補剛板の簡易計算法を提案している。しかし、その計算法においては、補剛板に横方向圧縮力が作用した場合の座屈モードは、縦補剛材位置で節となるものと仮定している。したがって、座屈モードが縦補剛材位置で節とならないような場合は取り扱えない。ところが、座屈に対する縦補剛材の剛度が不十分である鋼床版も、かなりの割合で存在することが、文献²⁾で報告されている。それ故、十分に剛でない縦補剛材を有する補剛板の横方向圧縮強度特性を明らかにし、その簡易計算法を開発する必要がある。

そこで、まず本研究では、この種の補剛板に横方向圧縮力が作用した場合の終局強度特性、および終局状態に至るまでの挙動を明らかにするために、2体の補剛板供試体を用いた座屈実験を行った。つぎに、弾性座屈理論、および弾塑性有限変位理論を用いたパラメトリック解析を行い、このような補剛板の横方向圧縮強度の簡易計算法について検討した。最後に、簡易計算法の妥当性については、実験結果と対比させながら考察を加えた。

* 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)
** 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)
***	大阪市立大学大学院	研究生	(横河工事部)	(〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)
****	大阪市立大学大学院	院 生	工学研究科土木工学専攻	(〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

2. 座屈実験

(1) 実験供試体

文献3)の実験では、実験供試体の補剛材剛比 γ_1 を必要最小剛比 γ_1^* (弾性座屈モードが縦補剛材位置で節となるに必要な最小の剛比¹⁾)の1.4倍とし、補剛材取付け位置で弾性座屈の座屈モードが節となるように実験供試体を設計している。それに対し、本実験では、補剛材の寸法を小さくし、補剛材剛比が文献3)の剛比の約1/4程度、すなわち必要最小剛比の0.38倍になるように実験供試体を設計した。さらに、文献3)の実験結果との比較・考察が容易になるように、文献3)の実験と本実験とで、実験条件をなるべく変えずに、補剛材寸法のみを変更することにした。

表-1には、実験供試体の内訳を示す。実験に用いた座屈実験装置は、文献3)の装置と同じものである。補剛材の断面形状による耐荷力特性を比較するために、閉断面補剛材を用いた供試体と、開断面補剛材を用いたものについて実験を行った。

実験供試体の形状・寸法を、図-1～図-3に示す。

表-1 実験供試体の内訳と記号

補剛材の種類 γ_1/γ_1^*	開断面	閉断面	備考
0.38	MNCO	MNCT	本実験
1.40	NCO	NCT	文献3)
γ_1^* : 弾性座屈理論による必要最小剛比			

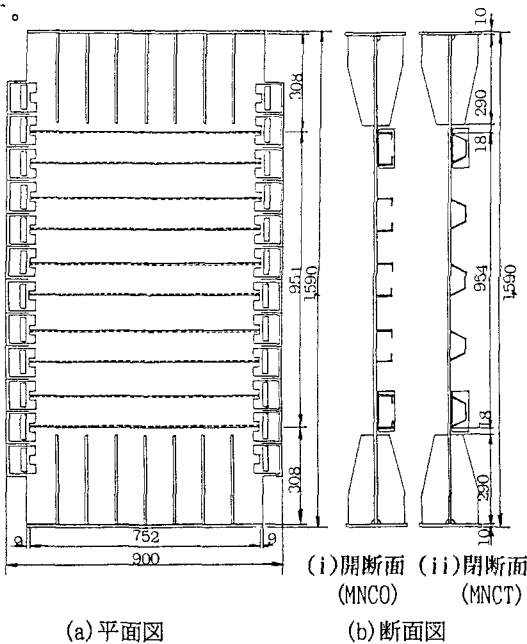


図-1 実験供試体(単位:mm)

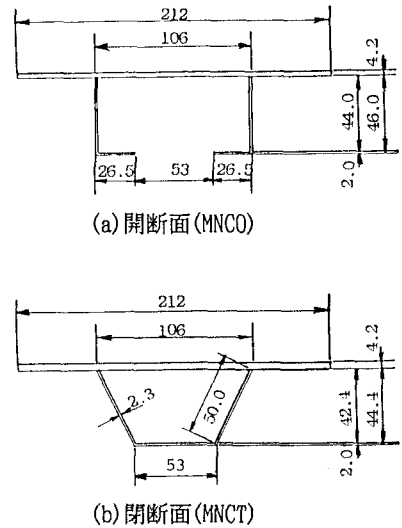


図-2 補剛材の断面(単位:mm)

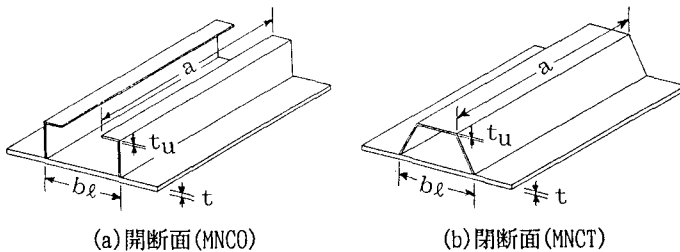


図-3 供試体の板パネル、および補剛材の寸法記号

(2) 引張試験

実験供試体に用いた鋼板の引張試験結果を、表-2に示す。

表-2 引張試験結果

供試体名	板厚 t (mm)	ヤング係数 E × 10 ⁵ (kgf/cm ²)	ポアソン比 μ	せん断弾性係数 G × 10 ⁵ (kgf/cm ²)	降伏点 σ _y (kgf/cm ²)	引張強度 σ _u (kgf/cm ²)	伸び率 ΔL/L (%)
MNCO, MNCT	4.193	2.178	0.275	8.541	2,605	3,407	37.68
	2.033	2.130	0.268	8.399	4,027	5,000	25.42
NCO*, NCT*	4.304	2.120	0.271	8.330	3,000	4,800	31.90
	2.090	2.240	0.260	8.870	3,070	3,840	34.80
*:文献3)の供試体					(1kgf/cm ² =0.098MPa)		

(3) 実験供試体の断面諸定数と機械的性質

表-3には、実験供試体の座屈耐荷力に関係するパラメータを比較して示す。表-3によると、今回の実験供試体のR_sの値は、文献3)のそのの1.3倍程度となっていることがわかる。

なお、この表においては、

$$R_p = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{crp}}} \dots (1)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{crs}}} \dots (2)$$

$$\delta = \frac{A_s}{b_1 t} \dots (3)$$

としている。ここに、

σ_{crp}:補剛材間の板パネルの横方向弾性座屈応力度

σ_{crs}:実験供試体の横方向弾性座屈応力度

A_s:補剛材一本の断面積(閉断面の場合は1/2の値)

σ_y:板パネルの降伏点

(4) 実験供試体の初期たわみ

板パネルの初期たわみは鋼尺(精度1/10mm)、および隙間ゲージを用いて測定した。着目した初期たわみは、図-4に示す補剛材間の板パネルの初期たわみ、および補剛材の初期たわみの2種類とした。測定結果を、表-4に示す。この表によると、板パネルの初期たわみは、すべて道路橋示方書で定めるb₁/150を下回っていた。

表-3 実験供試体の諸元

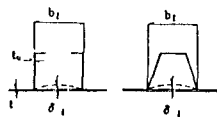
比較項目	モデル	実験供試体			
		MNCO	MNCT	NCO*	NCT*
板パネル板厚	t (mm)	4.193	4.193	4.304	4.304
補剛材板厚	t _u (mm)	2.033	2.033	2.090	2.090
板パネル長さ	a (mm)	752	752	752	752
補剛材間隔	b ₁ (mm)	106	106	106	106
アスペクト比	α=a/b ₁	7.09	7.09	7.09	7.09
板パネルの幅厚比	b ₁ /t	25.28	25.28	24.63	24.63
板パネルの幅厚比パラメータ	R _p	0.899	0.899	0.979	0.979
補剛材の幅厚比パラメータ	R _u	1.148	1.145	0.892	0.895
弾性座屈の座屈半波長	b _u (mm)	190.8	190.8	136.3	136.3
補剛材と板パネルの面積比	δ	0.368	0.389	0.479	0.489
補剛材と板パネルの剛比	γ ₁	27.38	22.90	100.55	97.99

*:文献3)の供試体

表-4 実験供試体の初期たわみの最大値

供試体	MNCO	MNCT	NCO*	NCT*
初期たわみ				
板パネル δ _{1max} /b ₁	1/393	1/177	1/252	1/282
補剛材 δ _u max/a	1/418	1/356	1/301	1/752

*:文献3)の供試体



(a) 板パネルの初期たわみ

(b) 補剛材の初期たわみ

図-4 実験供試体の板パネル、および補剛材の初期たわみ

(5) 座屈実験結果

a. 横方向圧縮応力-ひずみ曲線

座屈実験により得られた横方向圧縮応力-ひずみ曲線の代表的なものを、図-5～図-6に示す。これらの図で、縦軸は、補剛材直角方向の平均圧縮応力度 σ_y を降伏点 σ_y で無次元化した値である。そして、横軸は、補剛材直角方向のひずみ ϵ_y を降伏ひずみ ϵ_y で無次元化した値としている。また、実線は供試体表側（補剛材のない側）に貼付したひずみゲージの値で、点線は供試体裏側に貼付したひずみゲージの値である。

これらの図より、終局状態に至るまでの挙動については、以下のようなものである。すなわち、開断面補剛材を有する補剛板、および閉断面補剛材を有する補剛板も、低荷重段階より面外曲げひずみが生じ、終局状態を迎えていることがわかる。

以上のように実験供試体の形状による差異は、ほとんどないことがわかる。

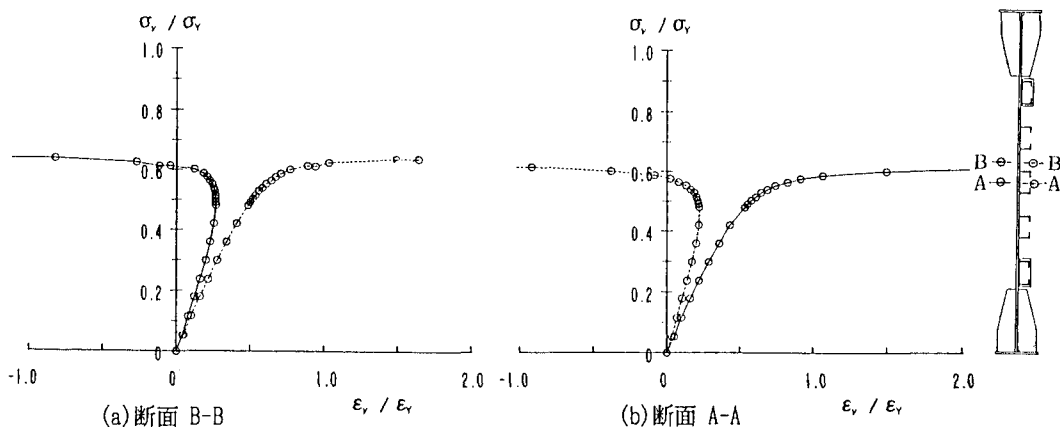


図-5 作用圧縮応力-ひずみ曲線(実験供試体MNC O)

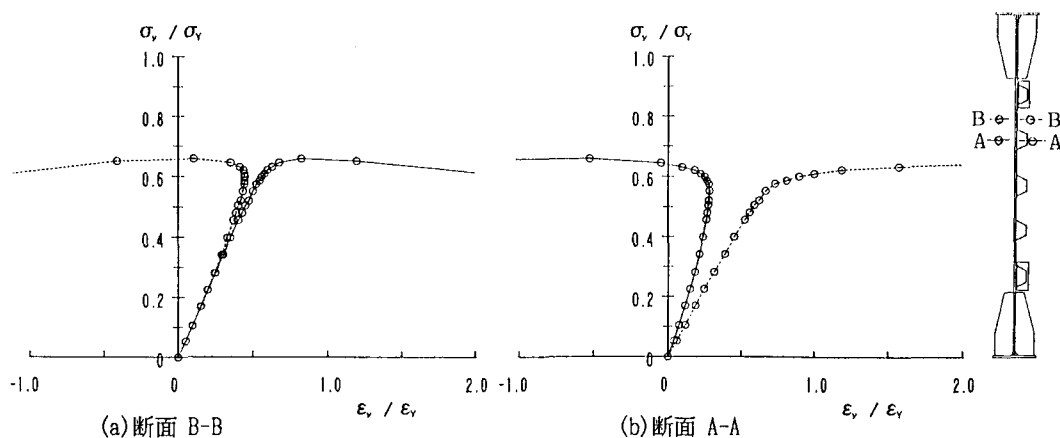
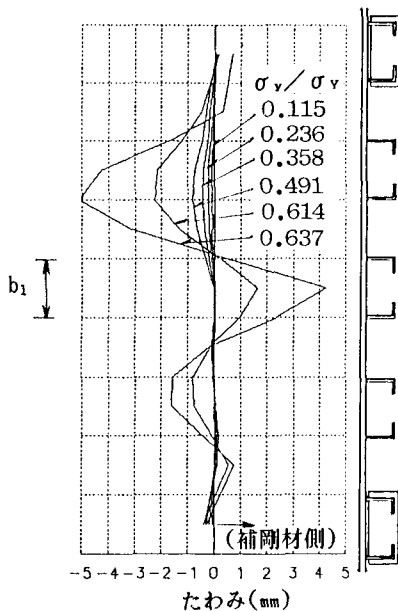


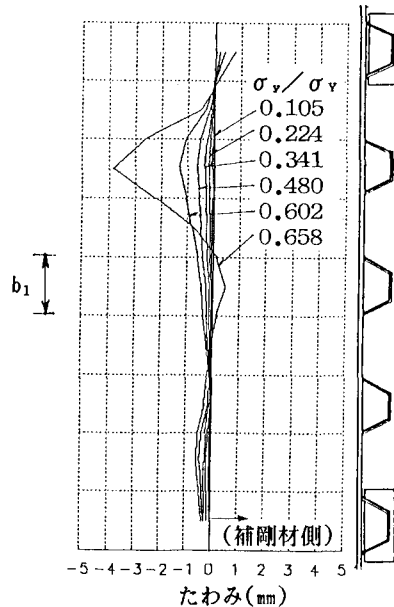
図-6 作用圧縮応力-ひずみ曲線(実験供試体MNC T)

b. たわみ分布

実験供試体の終局状態に至るまでの中央横断面(断面D-D)のたわみ分布を、図-7に示す。この図より、いずれの実験供試体も、最大の座屈波形の半波長は、板パネル幅 b_1 の約2倍程度となっている。これは、表-3に示した弾性座屈モードの半波長にほぼ等しいことを意味する。



(a) 実験供試体MNC O

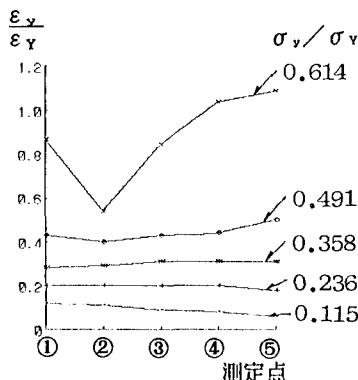


(b) 実験供試体MNC T

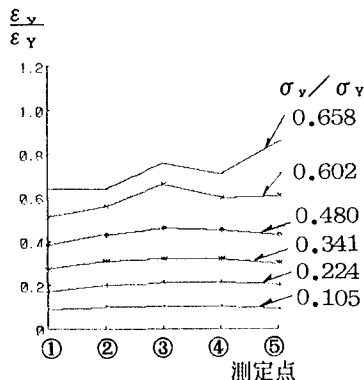
図-7 たわみ分布

c. ひずみ分布

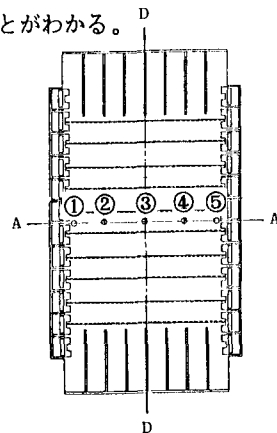
実験供試体の終局状態に至るまでの中央縦断面(A-A)の表裏の平均ひずみの分布状態を、図-8に示す。この図より、低荷重段階では、いずれの供試体においても、ひずみは、ほぼ一様に分布している。しかし、終局状態近傍では、中央部分が座屈し、側辺部のひずみが大きくなっていることがわかる。



(a) 実験供試体MNC O



(b) 実験供試体MNC T



(c) 着目断面

図-8 補剛材直角方向の面内ひずみ ϵ_v の補剛材方向の分布

d. 平均圧縮応力度-縮み曲線

実験供試体の横(補剛材直角)方向の平均縮みと平均圧縮応力度との関係を、図-9に示す。この図において、 u は平均縮み量、 u_v は降伏平均縮み量である。この図より、両供試体とも終局状態直前まで、線形挙動を示していることがわかる。また、設計上重要な面内剛性の変化については、両供試体で大差ないことがわかった。さらに、閉断面補剛材を有する実験供試体の方が、開断面補剛材を有するものに比べて、終局状態以降の強度低下量が大きいことがわかる。

e. 崩壊状況

実験供試体MNCOの崩壊状況を、写真-1に示す。この写真は、同供試体中央部をクローズアップしたものであり、補剛材間の板パネルと補剛材とが座屈変形している様子がよくわかる。

f. 終局強度

実験供試体の終局荷重を、表-5に示す。この表より、両供試体の実験終局強度はほとんど差異がなく、補剛材の種類による強度差は少ないことがわかる。また、補剛材の寸法を小さくした今回の実験終局強度は、補剛材寸法の大きい文献3)の実験終局強度とあまり差異がないことがわかる。この点についての考察は、理論解析結果とともに、後述の3 (3)で行う。

3. 弾塑性有限変位解析

(1) 解析モデルおよび解析法

本研究では、文献4)で開発された有限要素法による圧縮補剛板の弾塑性有限変位解析用のプログラムを用いて、パラメトリック解析を行った。本解析においては、文献2)を参考にして、解析モデルのアスペクト比 α 、幅厚比 b_1/t 、鋼材の降伏点 σ_y 、および補剛材剛比と必要最小剛比との比 γ_1/γ_1^* の範囲を設定した。

なお、今回のパラメトリック解析では、開断面補剛材を有する補剛板を対象とした。しかしながら、閉断面補剛材を有する補剛板の場合でも、ねじり剛性を無視し、閉断面補剛材一本に対する、断面積と断面2次モーメントとを、それぞれ1/2にした2本の開断面補剛材に理想化すれば、近似的に本解析結果が利用できるものと考えられる。

具体的には、図-10に一例を示す補剛板モデルを対象とした。その際、解析モデルの長さ b_0 は、弾性座屈解析により求まる座屈モードの1半波長に相当するパネル長さとした。したがって、補剛材の寸法によって b_0 は異なり、本解析では、板パネル幅 b_1 の1.5倍、2倍、および3倍の b_0 を有する解析モデル(それぞれ1.5パネルモデル、2パネルモデル、および3パネルモデルという)を用いた。また、縦補剛材間の板パネルを取り出した周辺単純支持の板パネルモデルも解析の対象とした。なお、縦補剛材が必要最小剛比 γ_1^* 以上の剛比を有している補剛板でも、初期たわみや弾塑性を考慮した場合、座屈モードが縦補剛材位置で節とならない場合のほうが、低い横方向圧縮強度を与える可能性もある。このような場合を想定し、補剛材剛比 γ_1 が γ_1^* より大となる場合には、板パネルモデル以外に、1.5パネルモデルについての解析も行った。また、解析モデルには、図-10に示す全体的な初期たわみ波形と局所的な初期たわみ波形を考慮した。しかし、残留応力は、無視している。

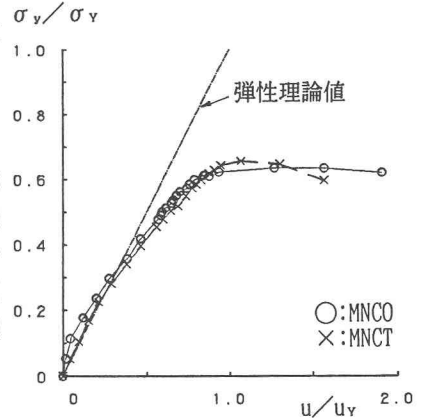


図-9 作用圧縮応力-縮み曲線

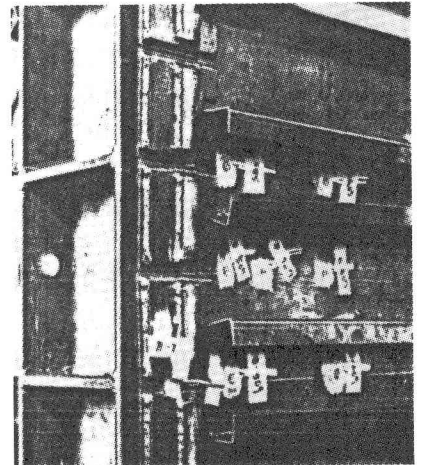


写真-1 崩壊状況(実験供試体MNCO)

表-5 実験終局荷重

供試体	終局荷重 $P_{max}(tf)$	降伏荷重 $P_v(tf)$	P_{max}/P_v (σ_{ymo}/σ_y)
MNCO	52.3	82.1	0.637
MNCT	54.0		0.658
NCO*	65.0	99.4	0.654
NCT*	62.5		0.629
*: 文献3) 供試体			(1tf=9.8kN)

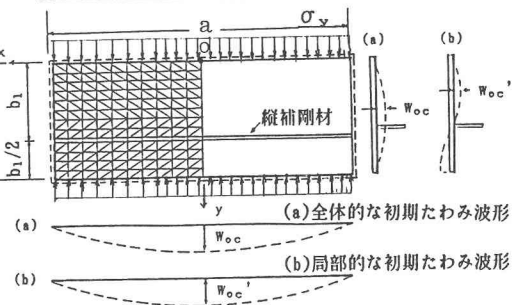


図-10 解析モデルの一例(1.5パネルモデル)

解析は、両載荷辺に一樣な相対面内変位を導入して行った。そのため、終局状態での載荷辺における平均圧縮応力度 σ_{ymo} を、横方向圧縮強度とした。

(2) 横方向圧縮強度の簡易計算法

弾塑性有限変位解析の結果を用いて、パラメトリック解析した範囲内で $\sigma_{ymo}/\sigma_{ymp}$ を、縦横比 α 、幅厚比 b_1/t 、鋼材の降伏ひずみ σ_y/E 、および γ_1/γ_1^* の関数として重回帰分析を行い、次式を得た。

$$\frac{\sigma_{ymo}}{\sigma_{ymp}} = 0.842 - 0.00578\alpha + 0.00114\frac{b_1}{t} + 17.7\frac{\sigma_y}{E} + 0.1047\frac{\gamma_1}{\gamma_1^*} \quad \dots(4)$$

ここに、 σ_{ymp} は、補剛材間の板パネルの横方向圧縮強度である。また、式(4)の係数の有意水準は、1~5% (信頼度99~95%)であり、近似式の標準偏差は $\sigma=0.0127$ であった。

次に、近似式から、ほぼ、標準偏差 2σ だけ低減した安全側の横方向圧縮強度を評価する以下の簡易式を求めた。

$$\frac{\sigma_{ymo}}{\sigma_{ymp}} = 0.839 - \frac{\alpha}{120} + \frac{b_1/t}{885} + 17.7\frac{\sigma_y}{E} + 0.1047\frac{\gamma_1}{\gamma_1^*}, (0.3 < \frac{\gamma_1}{\gamma_1^*} \leq 2.0) \dots(5)$$

式(5)によって求めた $\sigma_{ymo}/\sigma_{ymp}$ と弾塑性有限変位解析による $\sigma_{ymo}/\sigma_{ymp}$ とを比較したものを、図-11に示す。この図より、近似式(5)が安全側で実用的な結果を与えることがわかる。

また、式(5)は、残留応力を考慮せずに導いたものである。しかし、板パネルの横方向圧縮強度 σ_{ymp} に、文献1)で示されている残留応力を考慮した値を用いることで、残留応力、および初期たわみの両者を有する補剛板に対しても適用できるものと考えられる。

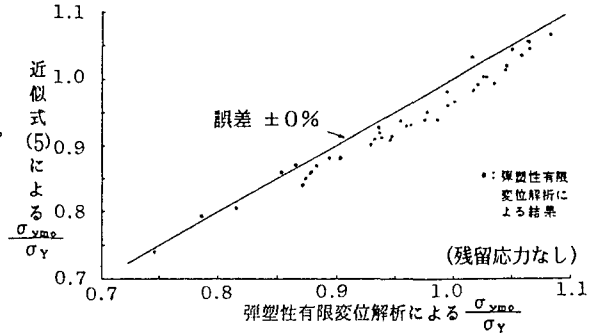


図-11 式(5)を用いた横方向圧縮強度の検証

なお、式(5)の適用は、表-6に示す範囲内に限定される。さらに、閉断面補剛材を有する補剛板で、横リブ位置で補剛材内部の板パネルが横リブと接合されていない場合には、補剛材内部の板パネルが柱状に座屈し、このパネルによって横方向圧縮強度が決定される場合が多いので、このような場合には、式(5)は適用できない。

表-6 式(5)のパラメータの適用範囲

パラメータ	適用範囲
α	7~20
b_1/t	20~40
σ_y	2,400~4,600
γ_1/γ_1^*	0.30~2.00

(3) 簡易計算法による実験結果の考察

十分に剛でない縦補剛材を有する実験供試体の横方向圧縮強度は、縦補剛材間の板パネルの横方向圧縮強度を文献1)によって求め、この強度を提案式(5)により低減することによって得られる。

まず、文献1)の耐荷力曲線を用い、縦横比 $\alpha=7.09$ 、また降伏点 $\sigma_y=2,400\text{kgf/cm}^2$ (235.2MPa)、 $3,200\text{kgf/cm}^2$ (313.6MPa)、 $3,600\text{kgf/cm}^2$ (352.8MPa)、および $4,600\text{kgf/cm}^2$ (450.8MPa)の板パネルの横方向圧縮強度 σ_{ymp} を求めた。つぎに、式(5)を用いて、今回の実験供試体に対応する $\gamma_1/\gamma_1^*=0.38$ の補剛板の横方向圧縮強度 σ_{ymo} も計算した。そして、 σ_{ymp}/σ_y 、および σ_{ymo}/σ_y と板パネルの幅厚比パラメータ R_p との関係を重回帰分析で2次曲線に回帰した。それらを、実験結果とともに、図-12に示す。なお、図中の板パネルの回帰耐荷力曲線(σ_{ymp}/σ_y)は、次式で与えられる。

$$\frac{\sigma_{ymp}}{\sigma_y} = 1.228 - 0.809R_p + 0.155R_p^2, (0.85 \leq R_p \leq 1.05) \quad \dots(6)$$

なお、式(6)の、それぞれの係数の有意水準は、1%(信頼度99%)であった。

図-12より、文献3)(NCO、およびNCT)、ならびに今回(MNCO、およびMNC T)の実験結果は、ともに式(6)の少し上側に位置していることがわかる。

しかしながら、今回の実験結果は、それに対応する $\gamma_1/\gamma_1^*=0.38$ の耐力力曲線よりは、かなり安全側に位置している。これは、補剛材剛比を小さくした効果よりも、実験供試体に包含される初期たわみ波形や残留応力分布が、文献3)や今回のパラメトリック解析で対象としたものよりも、強度を上昇させる方向に作用したためと考えられる。いずれにしても、式(6)、および式(4)を用いて求める補剛板の横方向圧縮強度は、安全側の実用的な値となることが、今回の実験的研究によって明らかとなった。

4. まとめ

十分剛でない縦補剛材を有する補剛板の横方向圧縮強度特性を調べるため、2体の補剛板供試体による座屈実験、および弾塑性有限変位解析によるパラメトリック解析を行った。その結果、以下に示す結論を得た。

- i) 補剛材剛比 γ_1 が必要最小剛比 γ_1^* の0.38倍の補剛板供試体は、補剛材間隔の2倍程度の座屈半波長を有する座屈モードで終局状態に至った。
- ii) しかし、その終局強度は、 $\gamma_1 = 1.4\gamma_1^*$ の補剛板供試体の終局強度(文献3)のもの)とあまり差異がなかった。
- iii) これは、 γ_1 を小さくしたことによる強度低下よりも、 $\gamma_1 = 0.38\gamma_1^*$ の補剛板供試体に包含される初期たわみ分布や残留応力分布による強度低下量が、 $\gamma_1 = 1.4\gamma_1^*$ の補剛板供試体の場合より、小さく出たためと思われる。
- iv) 開断面補剛材と閉断面補剛材の補剛板供試体については、終局強度特性、および終局状態に至るまでの挙動に大きな差異は認められなかった。
- v) 弾塑性有限変位解析に基づいて、十分剛でない縦補剛材を有する補剛板の横方向圧縮強度の近似推定法を開発した。
- vi) この方法により求めた推定値は、実験結果に比較して、若干安全側で実用的な値となった。

なお、本研究の実験を行うに当たり、横河工事㈱より支援を受けた。また、解析の遂行には、当時、大阪市立大学学生 中出秀之君(現在・住友生命保険相互会社)の協力を得た。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 北田俊行・中井 博・古田富保・鈴木宏昌：2方向面内力を受ける補剛板の極限強度に関する研究、構造工学論文集、Vol. 34A、土木学会、1988年3月、pp. 203～214
- 2) 中井 博・北田俊行・鈴木 巖・古田富保：トラフリブを有する鋼床版の実績調査、橋梁と基礎、第24巻、第10号、1990年10月、pp. 47～55
- 3) 北田俊行・中井 博・宮坂佳洋・古田富保・秦野啓司：補剛材方向に引張力、補剛材直角方向に圧縮力を受ける補剛板の極限強度に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol. 36A、土木学会、1990年3月、pp. 135～144
- 4) 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手法、土木学会論文報告集、第296号、1980年4月、pp. 1～12

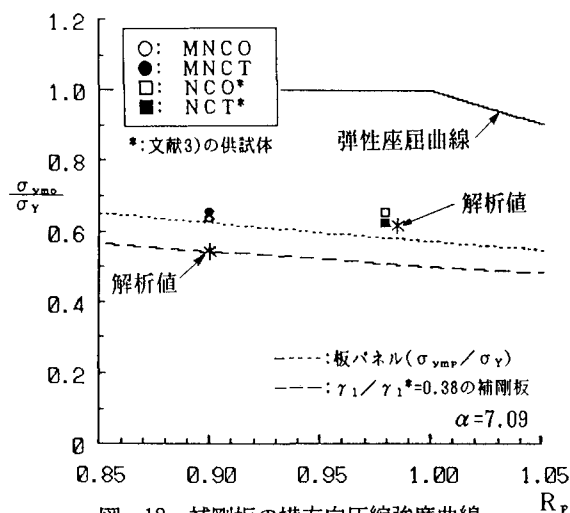


図-12 補剛板の横方向圧縮強度曲線

(1990年10月12日 受付)