

2方向面内力を受ける補剛板の極限強度に関する実験的研究

北田俊行*・中井 博**・宮坂佳洋***・古田富保****

本研究では、補剛材間の板パネルの局部座屈が卓越する補剛板供試体6体に、2方向面内圧縮力、あるいは、縦方向圧縮力のみを作用させた座屈実験結果を行っている。そして、まず、実験結果と弾塑性有限変位解析による結果との比較を通じて、2方向面内力を受ける補剛板の極限強度特性を明らかにしている。つぎに、既に理論的研究によって提案されている極限強度の相関曲線の妥当性について検討している。

Keywords : stiffened plate, ultimate strength, buckling, biaxial in-plane forces, experimental study.

1. ま え が き

最近、鋼橋においては、長大化に伴って2方向面内力を受ける補剛板としての座屈照査が必要となる構造要素がよく用いられるようになってきている。

しかしながら、わが国の道路橋示方書¹⁾では、2方向面内力を受ける補剛板の設計基準が設けられていないため、合理的な設計法を確立することが急務となってきている²⁾⁻⁴⁾。

2方向面内力を受ける無補剛板、および補剛板の極限強度を解析的に求め、これらの極限強度の相関曲線を提案した研究は、これまでにいくつか報告されている^{2), 5)}。しかしながら、2方向面内力を受ける鋼板の極限強度について実験的に研究した例が少ない。このうち、無補剛板に関しては、Beckerら⁶⁾、およびStonorら⁷⁾の研究しか見当たらない。また、補剛板に関する研究はさらに少なく、実橋（アーチ橋）の鋼床版をモデルに、補剛材方向（以下、縦方向と呼ぶ）に引張力と補剛材直角方向（以下、横方向と呼ぶ）に圧縮力とを作用させた補剛板の極限強度に関する実験的研究³⁾があるのみである。理論的研究によって提案された補剛板の極限強度の相関曲線の妥当性を確認するためには、さらに2方向面内圧縮力を受ける補剛板、および剛比の小さい縦補剛材を有する補剛板⁸⁾などの実験を行う必要がある。

そこで、本文は、文献3)の実験で用いられたものと同一寸法、同一材料で製作された補剛板供試体に、2方向面内圧縮力、および縦方向の圧縮力のみを作用させた

座屈実験結果を報告する。そして、文献3)の研究結果も総合し、2方向面内力を受ける補剛板供試体の極限強度特性を明らかにするとともに、文献2)等で提案されている相関曲線の妥当性について検討する。

このために、文献3)の座屈実験装置に改良を加え、2方向面内圧縮力、および縦方向のみの圧縮力を作用させることが可能な実験装置を開発し、6体の補剛板供試体について座屈実験を行った。さらに、補剛板供試体に含まれる初期不整の性状を明らかにするために、座屈実験用供試体と同一寸法、および同一溶接条件のモデルの残留応力、ならびに全供試体の初期たわみの測定も行った。また、これらの補剛板供試体を対象に、実測された初期不整を考慮した弾塑性有限変位解析⁹⁾を行い、解析結果と座屈実験結果とを比較し、考察を加える。

2. 実験概要

補剛板に作用させる2方向面内力は、次の4通りの組合せとした。

- (1) 縦方向に引張力、また横方向に圧縮力を同時に作用させる場合³⁾
- (2) 横方向圧縮力のみを作用させる場合³⁾
- (3) 縦、および横の2方向から圧縮力を同時に作用させる場合
- (4) 縦方向圧縮力のみを作用させる場合

ただし、(1)と(2)との座屈実験は、すでに文献3)の研究で行われたものである。今回の研究では、新たに(3)と(4)との実験を実施した。

(1) 補剛板供試体

座屈実験用供試体（以下、実験供試体と呼ぶ）は、ある実橋の横桁、横リブ、および縦桁で囲まれた補剛板パネルの1/3縮尺模型とした。代表的な実験供試体の形状・寸法を、図-1に示す。

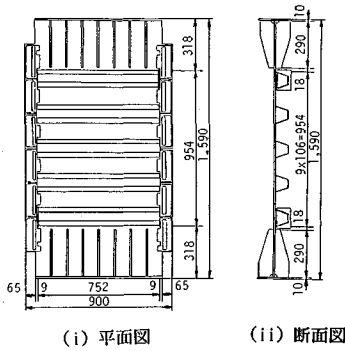
補剛材の断面形状による耐荷力特性を比較するため、

* 正会員 工博 大阪市立大学助教授 土木工学科
(〒558 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

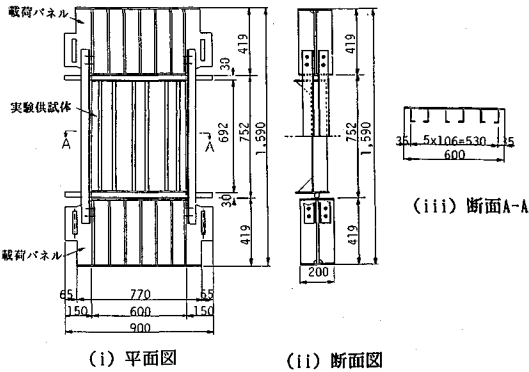
** 正会員 工博 大阪市立大学教授 土木工学科

*** 正会員 阪神高速道路公団・神戸建設部 甲子園工事事務所長

**** 正会員 大阪市立大学大学院工学研究科 研究生(横河工事(株))



(a) 2方向から圧縮力を作させる実験供試体 (CCT)



(b) 縦方向圧縮力のみを作させる実験供試体 (CNO)

図-1 実験供試体 (単位: mm)

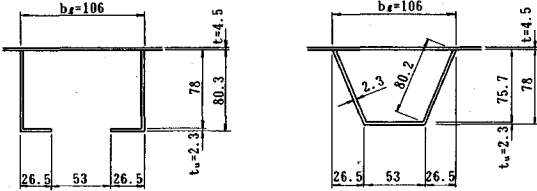


図-2 補剛材断面 (単位: mm)

図-2に示す閉断面 (トラフリブ), および開断面の縦補剛材を用いた2種類の実験供試体について実験した。

さらに, 実験供試体に含まれる残留応力分布を明らかにするため, 残留応力測定用の供試体 (以下, 残留応力供試体と呼ぶ) も製作した。表-1には, これら実験供試体, および残留応力供試体の内訳を示す。

本実験的研究においては, 横方向からの圧縮応力を受けたときに, 縦補剛材が弾性座屈モードの節となり, 補剛材間の板パネルの座屈が支配的となる補剛板を研究の対象とした。そして, 補剛板の座屈耐荷力に関するパラメーターを, できる限り対象とした実橋の補剛板パネルと一致させるように実験供試体を設計した。表-2は, 実橋補剛板パネルと実験供試体との座屈耐荷力に関係す

表-1 補剛板供試体の内訳と記号

(a) 実験供試体		
補剛材の種類	開断面	閉断面 (トラフリブ)
応力状態		
縦方向引張+横方向圧縮	TCO*	TCT*
横方向圧縮のみ	NCO*	NCT*
2方向圧縮	CCO	CCT
縦方向圧縮のみ	CNO, CEO	CNT, CET
CNT, CNOは中立軸載荷, その他は板パネル中央面載荷 *: 文献3)の研究において実施		

(b) 残留応力供試体		
補剛材の種類	開断面	閉断面 (トラフリブ)
対応する応力状態		
縦方向圧縮のみ	RSO-1*	RST-1*
その他の応力状態	RSO-2	RST-2
*: 文献3)の研究において実施		

表-2 実橋補剛板パネルと実験供試体との座屈関連パラメーターの比較

比較項目	モデル		実験供試体 ②		相似率 (①:②)	
	実橋補剛板 ①	開断面	閉断面	開断面	閉断面	閉断面
板パネル板厚 t (mm)	14.0	4.304	4.304	3.25:1	3.25:1	
補剛材板厚 t_s (mm)	6.0	2.090	2.090	2.87:1	2.87:1	
板パネル長さ a (mm)	2343	752	752	3.12:1	3.12:1	
補剛材間隔 b (mm)	330	106	106	3.11:1	3.11:1	
アスペクト比 $\alpha = a/b$	7.09	7.09	7.09	1.00:1	1.00:1	
幅厚比 b/t	23.57	24.63	24.63	0.96:1	0.98:1	
幅厚比 b/t ラマータ	R_t (縦圧縮)	0.513	0.492	0.492	1.04:1	1.04:1
	R_t (横圧縮)	1.007	0.964	0.964	1.04:1	1.04:1
補剛材と板 A' の面積比 δ	0.471	0.479	0.489	0.98:1	0.98:1	
補剛材と板 A' の剛比 γ	898.3	890.3	863.4	1.01:1	1.04:1	
補剛材の細長比 A' ラマータ λ	0.326	0.314	0.320	1.04:1	1.02:1	
I_s / I_{req}	1.424	1.390	1.347	1.02:1	1.08:1	

ここに,

$$R_t = \sqrt{\sigma_y / \sigma_{ort}}, \quad R_t = \sqrt{\sigma_y / \sigma_{ort}}$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \frac{a}{r_s}}, \quad \gamma = \frac{I_s}{b_1 \cdot t_s^3 / 12}, \quad \delta = \frac{A_s}{b_1 \cdot t}$$

A_s : 補剛材一本の断面積 (閉断面の場合は, その1/2)
 r_s : 補剛材一本の回転半径
 I_s : 板パネル表面まわりの補剛材一本の断面二次モーメント (閉断面の場合は, その1/2)
 I_{req} : 必要最小断面二次モーメント (縦方向圧縮応力が作用した場合)
 $\sigma_{ort}, \sigma_{ort}$: それぞれ縦方向, および横方向圧縮応力のみが作用した場合の板パネルの弾性座屈応力度

るパラメーターを比較したものである。

(2) 載荷装置

図-3には, 実験に用いた載荷装置を示す。載荷装置には, 鉛直圧縮力を導入するための600 tf (5,880 kN) ジャッキ1台, および水平方向の引張力, あるいは圧縮力が導入できる25 tf (245 kN) ジャッキ12台を使用している。そして, 実験供試体を鉛直軸, あるいは水平軸まわりに90度回転させることにより, 4通りの2方向面内力を載荷できるようにした。

a) 2方向面内圧縮力の載荷方法

本載荷装置による圧縮力の導入方法を, 図-4を用いて説明する。

2方向面内圧縮力を受ける実験供試体の座屈実験における横方向の圧縮力は, 600 tf (5,880 kN) ジャッキ①1台で導入する。縦方向圧縮力は, 25 tf (245 kN) 引張ジャッキ⑫12台に油圧をかけ, その引張力をロードセ

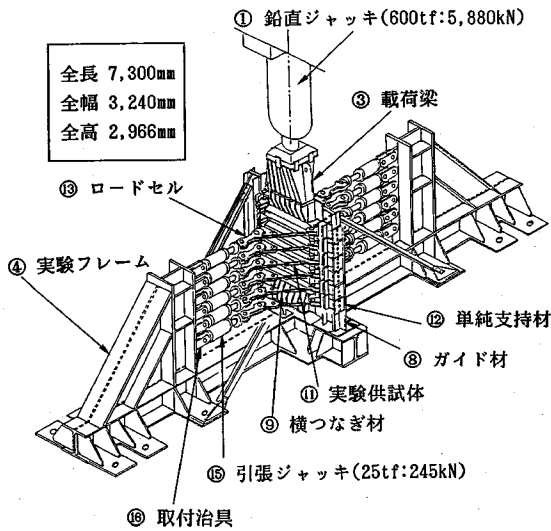


図-3 荷重装置

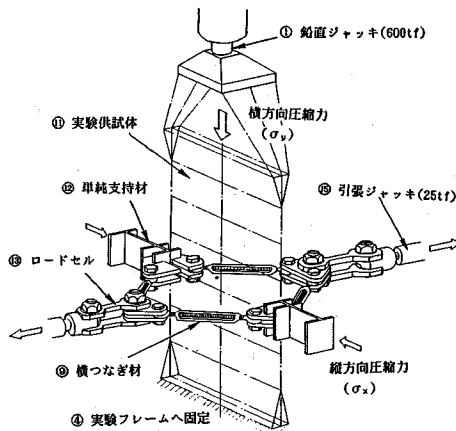


図-4 2方向圧縮力の荷重方法

ル⑬、横つなぎ材⑨、および単純支持材⑫を通じて実験供試体に導入する。すなわち、横つなぎ材⑨と実験供試体⑪とがトラス構造を形成するので、実験供試体の縦方向に圧縮力が導入される。このとき、図-5に示すように、ガイド材⑧により、単純支持材⑫の側方変位を拘束し、同時に実験供試体⑪と横つなぎ材⑨とのなす角度 θ を一定のまま保持することにより、実験供試体の縦方向には、一様な圧縮応力が導入される。本座屈実験では、降伏点 σ_Y の約半分(表-6参照)の縦方向面内圧縮応力度 σ_x を導入することを目標とした。これを保持した状態で、横方向の面内圧縮応力度 σ_y を漸増して、実験供試体を極限状態に至らせしめた。

実験供試体の支持側辺(横方向の支持辺)においては、補剛板のたわみのみを拘束し、支持側辺まわりのたわみ角を拘束しない単純支持としての境界条件が近似的に満

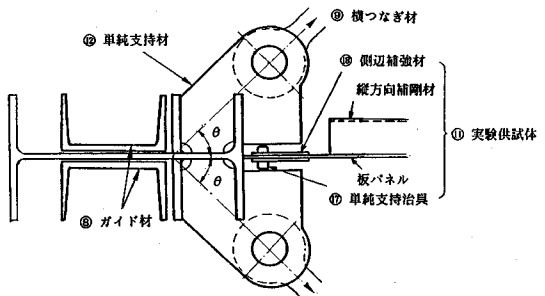


図-5 側辺単純支持治具の詳細

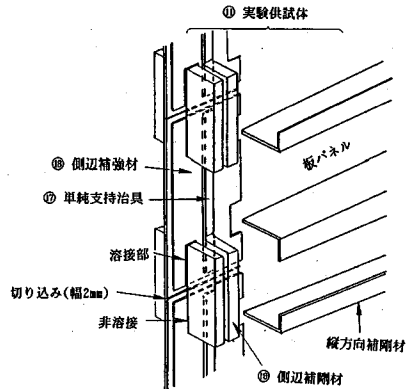


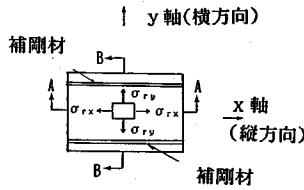
図-6 実験供試体の支持側辺の詳細

足されるようにしている。すなわち、図-5に示すように、実験供試体に溶接接合された単純支持治具⑬が、単純支持材⑫により側方支持されている。さらに、支持側辺まわりの板パネルのたわみ角は、単純支持治具⑬の近傍で拘束される構造となっている。しかし、板パネルの曲げ剛度は縦方向補剛材の曲げ剛度に比して小さいので、補剛材としての支持側辺は、ほぼ単純支持の境界条件を満たすようにしている。また、図-6に示すように、支持側辺付近の単純支持治具⑬、および側辺補剛材⑩が、横方向の圧縮力を受け持たないように、212 mm 間隔で、幅 2 mm の切り込みを設けた。なお、板厚 20 mm の側辺補剛材⑩は、切り込みの位置で支持側辺の腰折れ現象を防止するために設けた部材である。この側辺補剛材も、横方向の圧縮力を分担しないように、切り込みの線を中心として、側辺補剛材の上側、あるいは下側半分は、隅肉溶接を行っていない。

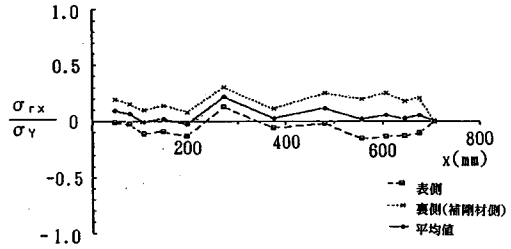
b) 縦方向圧縮力みの荷重方法

縦方向圧縮力のみを作用させる実験供試体の座屈実験においては、600 tf (5,880 kN) ジャッキ①1台により圧縮力を導入し、縦方向面内圧縮応力度 σ_x を漸増させ、実験供試体を極限状態に至らせしめた。

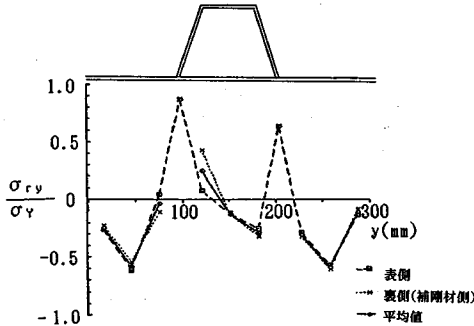
縦方向圧縮力のみを作用させる実験供試体の4体のうち2体は、図-7(a)に示すように、補剛板の中立軸上



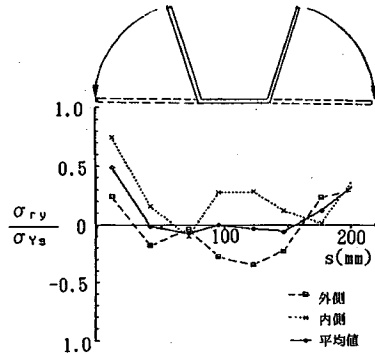
(a) 残留応力度の記号



(c) 板パネルの残留応力度 σ_{ry} の縦方向分布 (断面A-A)



(b) 板パネルの残留応力度 σ_{ry} の横方向分布 (断面B-B)



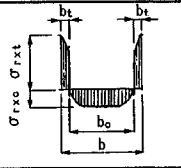
(d) 補剛材の残留応力度 σ_{ry} の横方向分布 (断面B-B)

図-9 残留応力分布 (残留応力供試体 RST-2)

表-5 残留応力の最大値と分布幅の平均値

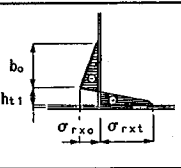
(a) 板パネルの縦方向残留応力の最大値と横方向分布幅(3 σ の平均値)

供試体	$\frac{b_i}{b}$	$\frac{\sigma_{rxt}}{\sigma_y}$	$\frac{b_o}{b}$	$\frac{\sigma_{rxo}}{\sigma_y}$
RSO-1	0.223	0.017	0.554	-0.602
RST-1	0.238	0.721	0.519	-0.412
RSO-2	0.211	1.016	0.547	-0.489
RST-2	0.211	0.728	0.578	-0.485
平均	0.221	0.869	0.550	-0.497



(b) 補剛材の縦方向残留応力の最大値と横方向分布幅(左右の平均値)

供試体	$\frac{h_i}{h}$	$\frac{\sigma_{rxt}}{\sigma_y}$	$\frac{h_o}{h}$	$\frac{\sigma_{rxo}}{\sigma_y}$
RSO-1	0.418	0.775	0.582	-0.135
RST-1	0.415	0.405	0.585	-0.105
RSO-2	0.453	0.705	0.547	-0.125
RST-2	0.653	0.450	0.347	-0.050
平均	0.485	0.584	0.515	-0.104



側) へたわむ (いわゆる, やせ馬的な) 曲げタイプの残留応力も生じていることがわかる。

図-9 (d) に示す補剛材の残留応力度 σ_{rx} に関しては, 板パネルとの溶接接合部付近で, 大きな引張残留応力が生じている。そして, その他の部分では, 最大で約 $0.1 \sigma_y$ (表裏の平均値) の圧縮残留応力が生じていた。補剛材内では引張の残留応力が卓越しているが, 板パネルも含む補剛材全体では, 自己平衡の条件をほぼ満足していた。

4. 座屈実験

(1) 終局状態に至るまでの挙動

a) 荷重-ひずみ曲線

座屈実験により得られた荷重-ひずみ曲線の代表例を, 図-10~15 に示す。これらの図で縦軸は, 横方向, あるいは縦方向の平均圧縮応力度 σ_y , または σ_x を降伏点 σ_y で無次元化した量である。横軸は, それぞれの方向のひずみ ϵ_y , あるいは ϵ_x を降伏ひずみ ϵ_y で無次元化した量にとっている。また, 実線は実験供試体の表側 (補剛材のない側) に貼付したストレインゲージの値で, 点線は裏側に貼付したストレインゲージの値である。

まず, 実験供試体 CCO では, 図-10 に示すように, 隣接する板パネルの表裏のひずみ (A, および B) が, $\sigma_y/\sigma_y = 0.5$ 付近で急増し, 符号も異なっている。この図, および後述する残留たわみ波形などの実測結果より, この実験供試体では, 補剛材間の板パネルの局部座屈が卓越して極限状態に至ったことがわかる。

また, 実験供試体 CCT でも, 図-11 に示すように, 同じ理由から補剛材間の板パネルの局部座屈が卓越して極限状態に至ったことがわかる。

つぎに, 図-12~13 より, 実験供試体 CEO と CET とでは, 載荷段階の初期の状態から, 偏心載荷により補剛板に大きな面外曲げひずみが発生し, これが漸増して極限状態に至っている。すなわち, これらの実験供試体

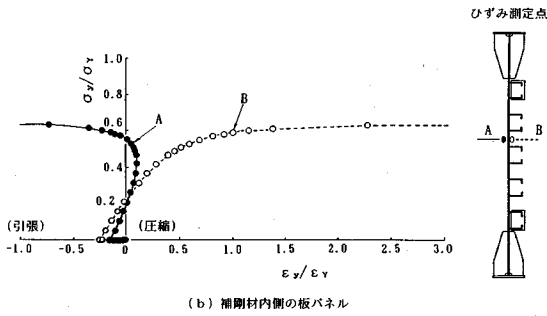
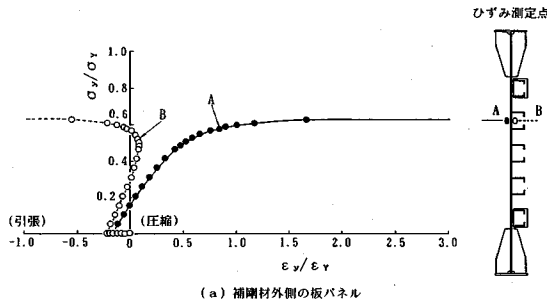


図-10 荷重-ひずみ曲線 (実験供試体 CCO)

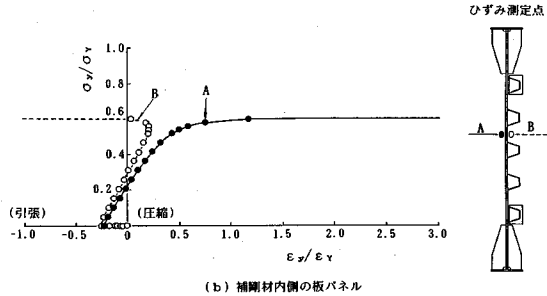
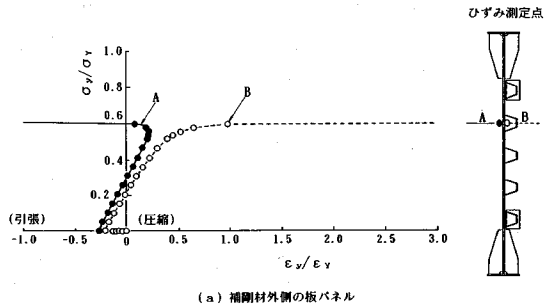


図-11 荷重-ひずみ曲線 (実験供試体 CCT)

では、全体座屈が卓越していたことがわかる。

さらに、図-14~15より、実験供試体 CNO と CNT とでは、補剛板としての中立軸に载荷しているため、極限状態直前まで実験供試体に大きな偏心曲げひずみは発生せず、極限状態付近で閉断面補剛材の先端（閉断面補剛材では天端）の面外曲げひずみが急増していることがわかる。

b) たわみ分布

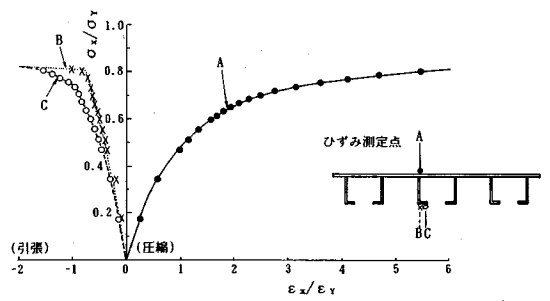


図-12 荷重-ひずみ曲線 (実験供試体 CEO)

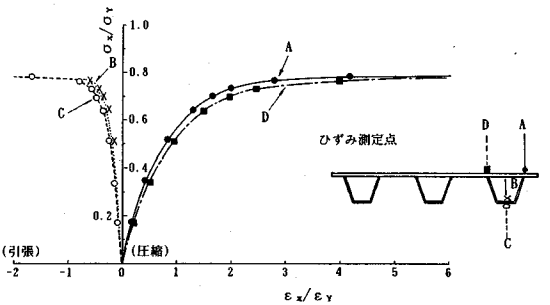


図-13 荷重-ひずみ曲線 (実験供試体 CET)

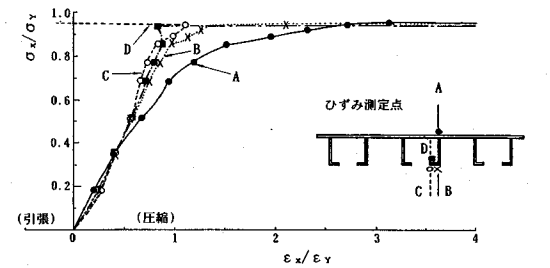


図-14 荷重-ひずみ曲線 (実験供試体 CNO)

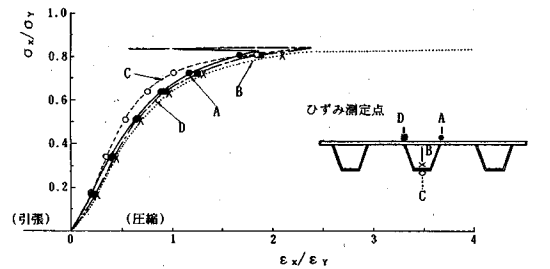


図-15 荷重-ひずみ曲線 (実験供試体 CNT)

図-16~17 から、極限状態付近で、実験供試体 CCO、および CCT では、上側から 2 番目の補剛材内部の板パネルにおいて、補剛材間を 1 半波長とする局部座屈波形が卓越していたことがわかる。

つぎに、図-18~19 から、実験供試体 CEO、および CET では、载荷段階の初期から、補剛板全体が柱の座

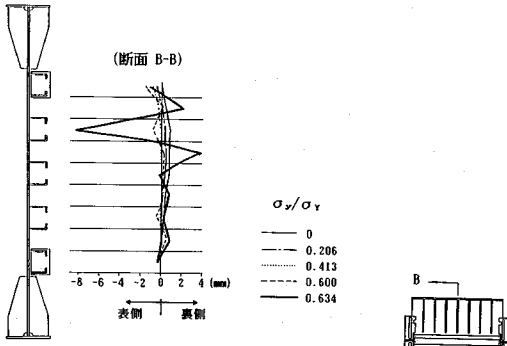


図-16 荷重-たわみ分布図 (実験供試体 CCO)

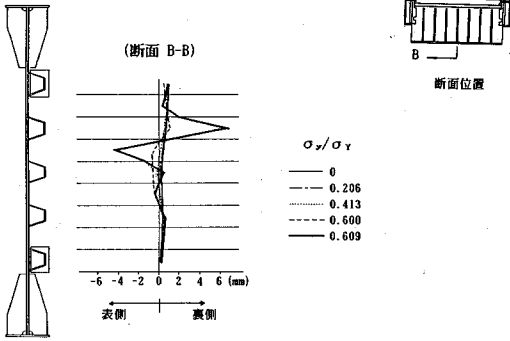


図-17 荷重-たわみ分布図 (実験供試体 CCT)

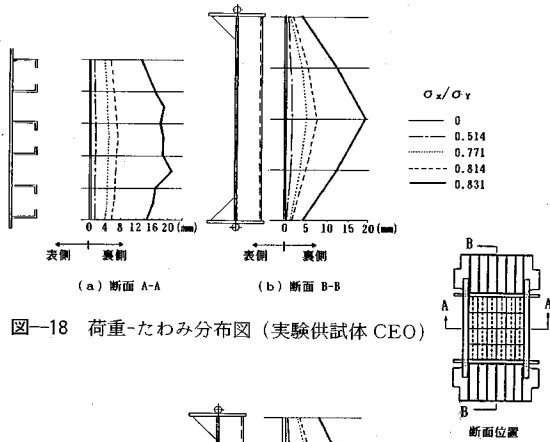


図-18 荷重-たわみ分布図 (実験供試体 CEO)

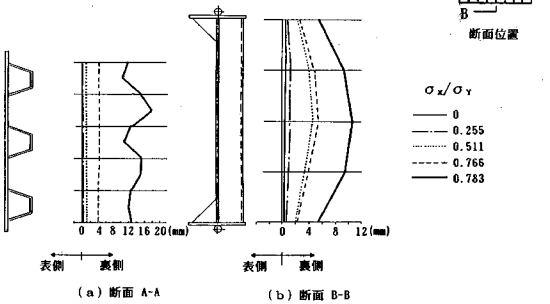


図-19 荷重-たわみ分布図 (実験供試体 CET)

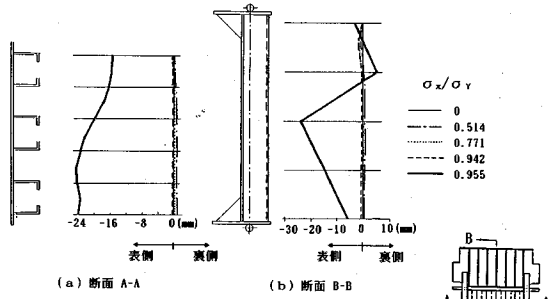


図-20 荷重-たわみ分布図 (実験供試体 CNO)

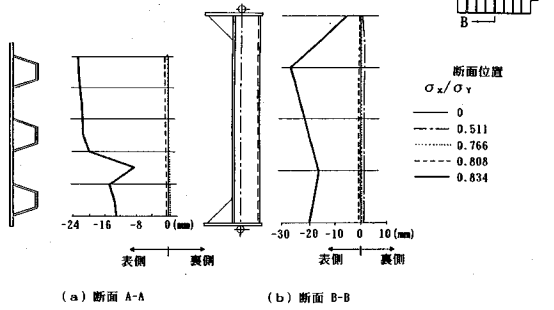


図-21 荷重-たわみ分布図 (実験供試体 CNT)

屈のような変形のたわみ波形（以下、柱状のたわみ波形という）が発生し、これが漸増して極限状態に至ったことがわかる。

さらに、図-20~21 から、実験供試体 CNO、および CNT では、極限状態付近まで、ほとんどたわみが発生せず、極限状態付近で、突然、補剛板全体としての大きな座屈波形が生じたことがわかる。

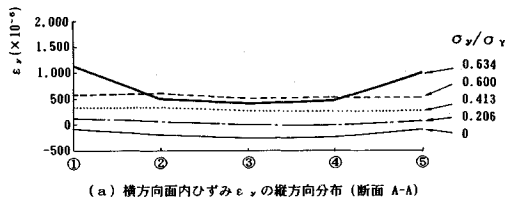
c) ひずみ分布

実験供試体の横断面、および縦断面のひずみ分布を図-22~23 に示している。

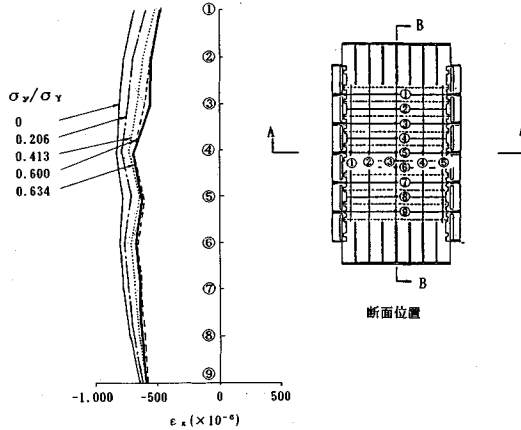
まず、図-22 (a)、および図-23 (a) より、2方向面内圧縮力を受ける実験供試体における横方向の面内ひずみ ϵ_y の縦方向の分布形は、これらのひずみが降伏ひずみに達するまでほぼ一様であり、期待するひずみ分布が実験供試体に再現されていたことがわかる。ただし、極限状態付近では、ひずみ分布が若干乱れている。

つぎに、図-22 (b)、および図-23 (b) より、2方向面内圧縮力を受ける実験供試体における縦方向面内ひずみ ϵ_x の横方向分布形は、極限状態付近で一様でなくなるが、極限状態に至るまで、ほぼ一様であり、期待したひずみ分布が実験供試体に導入されていたことがわかる。なお、極限状態に近づくのに伴って、 ϵ_x の値が小さくなるのは、漸増する ϵ_y によって、ポアソン比の影響による引張側に向かう ϵ_x が発生するためである。

(2) 崩壊状況

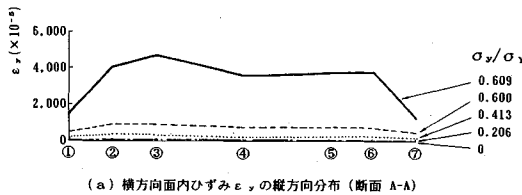


(a) 横方向面内ひずみ ϵ_y の縦方向分布 (断面 A-A)

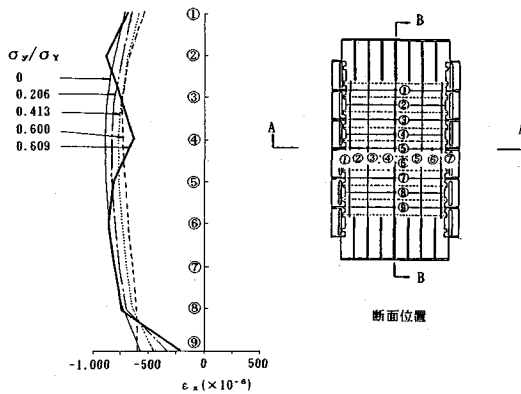


(b) 縦方向面内ひずみ ϵ_x の横方向分布 (断面 B-B)

図—22 ひずみ分布図 (実験供試体 CCO)



(a) 横方向面内ひずみ ϵ_y の縦方向分布 (断面 A-A)

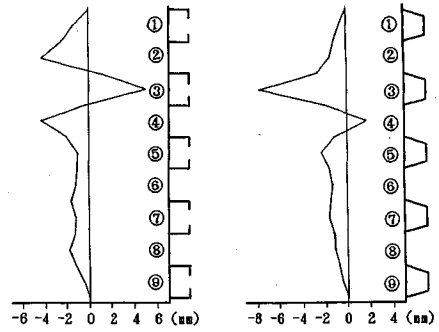


(b) 縦方向面内ひずみ ϵ_x の横方向分布 (断面 B-B)

図—23 ひずみ分布図 (実験供試体 CCT)

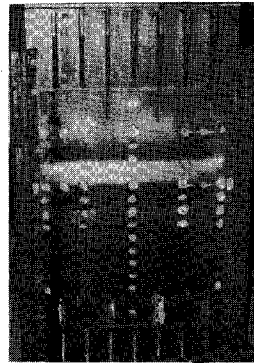
実験供試体 CCO と CCT とでは、図—24 などから、板パネルの局部座屈が卓越して崩壊したことがわかる。

写真—1～2には、実験供試体 CCT、および CEO の崩壊状況を示す。写真—2の実験供試体 CEO では、柱状の全体座屈モードが卓越していた。また、中央部には、

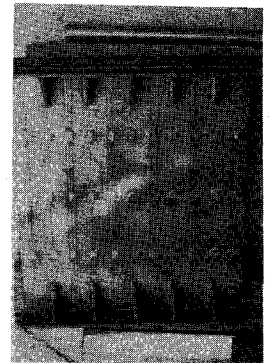


(a) 実験供試体 CCO (断面 B-B) (b) 実験供試体 CCT (断面 B-B)

図—24 実験終了後の実験供試体の残留たわみ波形



写真—1 実験終了後の実験供試体 CCT



写真—2 実験終了後の実験供試体 CEO

補剛材間の板パネルの局部座屈波形も認められる。

一方、実験供試体 CNO、および CNT では、写真—3～4に示すように、補剛材に大きな局部座屈波形が残留しており、これらの局部座屈が起因して、補剛板全体が極限状態に至ったことがわかる。

(3) 極限強度に関する考察

a) 座屈実験結果

今回、および文献3)の座屈実験結果をまとめたものを、表—6に示す。この表より、以下のことがわかる。

① 閉断面 (トラフリブ) 補剛材を有する補剛板の極限強度は、開断面補剛材のものよりも、若干低かった。

② 横方向から圧縮力を受ける実験供試体の極限応力度 σ_{ym} は、圧縮力のみを受ける実験供試体で最も高く、引張力と圧縮力、および2方向圧縮力を受ける実験供試体においては、わずかに低い値となった。すなわち、縦方向の作用力の存在による横方向の極限応力度 σ_{ym} の低下が小さく、今回の実験では、相関性は強く現れなかった。これは、本実験供試体の板パネルの幅厚比が、 $b_1/t = 24.6$ と比較的小さく、相関性が現れにくい領域の補剛板であったためと考えられる²⁾。

③ 実験供試体 CEO、および CET については、載荷辺で補剛材に荷重が導入されないため、縦方向の極限

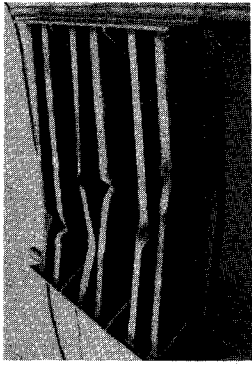


写真-3 実験終了後の実験供試体 CNO



写真-4 実験終了後の実験供試体 CNT

表-6 実験供試体の極限荷重・強度集約表

実験供試体名	極限荷重		極限強度	
	縦方向 $P_{x \max}$ (tf)	横方向 $P_{y \max}$ (tf)	縦方向 σ_{xm}/σ_y	横方向 σ_{ym}/σ_y
TCO*	-90.0	64.6	-0.500	0.652
TCT*	-90.0	58.0	-0.500	0.583
NCO*	-	65.0	-	0.654
NCT*	-	62.5	-	0.629
CCO	102.0	61.5	0.521	0.634
CCT	102.0	59.0	0.567	0.609
CNO	111.5	-	0.955	-
CNT	98.0	-	0.834	-
CEO	97.0	-	0.831 (1.225)	-
CET	92.0	-	0.783 (1.162)	-

(*)は、 σ_{xm} を板パネルの断面積で計算した値、*:文献3)の研究で実施

圧縮応力度 σ_{xm} は、板パネルのみの断面積を用いて計算した場合についても求めた¹¹⁾。この場合の極限圧縮応力度は、降伏点よりも大きくなっていることがわかる。補剛材の全断面積を用いて評価した σ_{xm} は、中立軸上载荷の実験供試体 CNO、および CNT より小さくなる。しかし、板パネルのみの断面積を用いて評価した σ_{xm} は、中立軸上载荷の実験供試体の σ_{xm} よりも大きくなっていることがわかる。すなわち、文献 11) の理論解析による結論と同様に、横補剛材、あるいは横リブ位置で縦補剛材が連続していない偏心補剛材の場合も、補剛材の断面を無視し、板パネルの断面のみが有効であるとみなして作用圧縮応力度を求めるならば、従来どおり中立軸上载荷の柱モデルによる極限応力度を用いて強度は、安全側に評価されることがわかる。

b) 弾塑性有限変位解析との比較

初期不整を有する補剛材の解析モデルを想定し、数値解析を行って実験結果に考察を加えてみる。初期たわみには、表-4 の各供試体における板パネルの最大初期たわみ δ_1 、および補剛材の初期たわみ δ_0 を用いた。また、表-5 から、板パネルの縦方向の圧縮残留応力度を $-0.35 \sigma_y$ と仮定した。

表-7 極限強度の実験値と解析値との比較

供試体名	実験における極限強度			解析における極限強度			$\textcircled{7} = \textcircled{3} / \textcircled{6}$
	$\textcircled{1}$ 縦方向 σ_{xm}/σ_y	$\textcircled{2}$ 横方向 σ_{ym}/σ_y	$\textcircled{3} = \sqrt{\textcircled{1}^2 + \textcircled{2}^2}$	$\textcircled{4}$ 縦方向 σ_{xm}/σ_y	$\textcircled{5}$ 横方向 σ_{ym}/σ_y	$\textcircled{6} = \sqrt{\textcircled{4}^2 + \textcircled{5}^2}$	
TCO*	-0.500	0.652	0.822	-0.343	0.525	0.627	1.311
TCT*	-0.500	0.583	0.768	-0.464	0.443	0.642	1.197
NCO*	0	0.654	0.654	0	0.502	0.502	1.303
NCT*	0	0.629	0.629	0	0.522	0.522	1.205
CCO	0.521	0.634	0.821	0.492	0.556	0.742	1.106
CCT	0.567	0.609	0.832	0.504	0.621	0.800	1.040
CNO	0.955	0	0.955	0.872	0	0.872	1.095
CNT	0.834	0	0.834	0.892	0	0.892	0.935
CEO	0.831	0	0.831	0.828	0	0.828	1.000
CET	0.783	0	0.783	0.828	0	0.828	0.946

この解析モデルに各々の組合せ応力が作用する場合の極限応力度 σ_{xm} (縦方向極限圧縮応力度)、および σ_{ym} (横方向極限圧縮応力度) を、弾塑性有限変位解析⁹⁾により求めた。この解析結果と実験結果との極限強度を比較したものを、表-7 に示す。

表より、実験による極限強度は、解析による極限強度に比して $-7 \sim 31\%$ の値となっていたことがわかる。

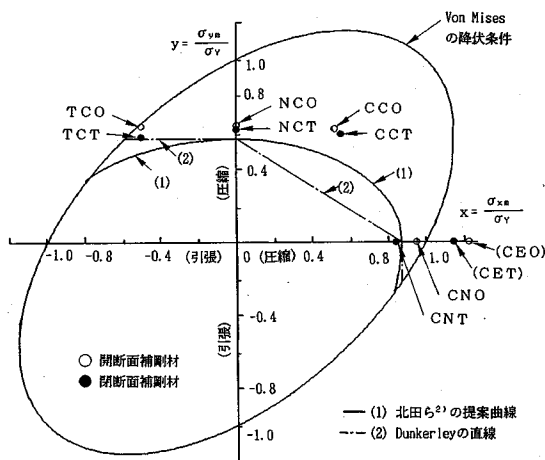
つぎに、図-25 に示す極限強度の相関曲線 (1) は、文献 2) で提案されている相関式を用いて求めたものである。図中には、Dunkerley の直線相関式 (2) もプロットし、これらと実験結果とを比較している。

すなわち、Dunkerley の直線相関式 (2) は、第一象限 (2 方向圧縮) では極限強度をかなり安全側に見積る相関式であることがわかる。一方、文献 2) の相関曲線も、実験結果に対して安全側に位置する実用的な相関曲線となっていることがわかる。第二象限 (引張+圧縮) では、(1) は (2) よりも、若干の安全側に位置している。しかし、(2) は、実験値に対して少し危険側の値を与えている。このように、文献 2) の相関曲線は、第一、および第二象限にわたって、実験結果に対してほぼ安全側の極限強度を推定していた。

5. ま と め

補剛材供試体に、2 方向面内力を作用させた座屈実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 文献 2) の相関曲線は、極限強度の実験値に対して、ほぼ安全側の極限強度を推定することがわかった。
- 2) 2 方向面内圧縮力を受ける 2 体の実験供試体 (1 体は開断面補剛材、他は閉断面補剛材を有する) の極限状態近傍では、補剛材間を 1 半波長とする局部的な座屈波形が卓越していた。
- 3) 縦方向にのみ圧縮力を受ける 4 体の実験供試体のうち、補剛材の板パネルの中央面上に载荷した実験供試体においては、载荷段階の初期から、偏心曲げに起因する補剛材全体の大きなたわみ波形が発生し、これが漸増して極限状態に至った。これに対して、補剛材の中立軸上に载荷した 2 体の実験供試体では、極限状態直前まで、



図一25 極限強度の実験値と相関曲線との比較

たわみがほとんど発生せず、最終的に、補剛材の局部座屈発生とともに極限状態に至った。

4) 開断面補剛材と閉断面（トラフリブ）補剛材を有する補剛板においては、極限強度特性、および極限状態に至るまでの挙動については、両者で大きな差異はなかった。ただし、極限強度に関しては、開断面補剛材を有する補剛板よりも、閉断面補剛材を有する補剛板の方が、今回の実験の場合、若干低くなった。

5) 実測の初期たわみ、および残留応力を参考にして定めた初期不整を有する実験供試体に対する弾塑性有限変位解析による極限強度は、実験結果に比して7～31%の値であった。

6) 板パネルの中央面上に載荷される偏心実験供試体で、縦方向の作用圧縮応力度 σ_x を、板パネルのみの断面積を用いて評価すれば、耐荷力の照査は、補剛板の中立軸上に載荷される場合を対象とした通常の縦方向圧縮強度を用いて安全側に評価できることがわかった。

謝 辞：本研究を遂行するに当たり、阪神高速道路公団 鈴木 巖氏、同 中本 覚氏、および駒井鉄工（株）堀和英氏には、種々ご支援頂いた。また、今回の実験では、

大林組(株)佐田荘一氏（当時大阪市立大学大学院院生）の協力を得た。ここに、記し深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ．鋼橋編，丸善，1990年2月。
- 2) Kitada, T., Nakai, H., and Furuta, T. : Ultimate strength and interaction curve of stiffened plates subjected to biaxial in-plane forces, Proceedings of JSCE, Structural Eng./Earthquake Eng., No.437/I-17, pp.19～28, Oct. 1991.
- 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. 36 A, 土木学会，pp. 77～105, 1990年3月。
- 4) 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. 34 A, 土木学会，pp. 203～214, 1988年3月。
- 5) Dier, A.F. and Dowling, P.J. : The strength of plates subjected to biaxial forces, Behaviour of Thin Walled Structures, Edited by J. Rhodes and J. Spence, Elsevier, pp.329～353, 1984.
- 6) Becker, H., Goldman, R. and Pazweycki : Compressive strength of ships hull girders, Part I-Un-stiffened plate : Ship Structure Committee Technical Report SSC-217, 1970.
- 7) Stonor, R.W. P., Bradfield, C.D., Moxham, K.E. and Dwight, J.B. : Tests of plates under biaxial compression, Technical Report No.CUED/C-Struct/TR.98, Department of Engineering, University of Cambridge, 1983.
- 8) 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，Vol. 24, No. 10, pp. 47～55, 1990年10月。
- 9) 小松定夫・北田俊行・宮崎清司：残留応力および初期たわみを有する圧縮板の弾塑性解析，土木学会論文報告集，第244号，pp. 1～14, 1975年12月。
- 10) IDM委員会：鋼橋部材の形状初期不整と耐荷力の統計学的研究，日本鋼構造物協会，Vol. 16, No. 170, pp. 10～43, 1980年4月
- 11) 奈良 敬・北田俊行・遠藤 港：縦補剛材が横補剛材を貫通していない補剛板の圧縮強度，土木学会第44回年次学術講演会概要集，Ⅰ，pp. 226～227, 1964年10月。

(1990. 12. 10 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON ULTIMATE STRENGTH OF STIFFENED PLATES SUBJECTED TO BIAXIAL IN-PLANE FORCES

Toshiyuki KITADA, Hiroshi NAKAI, Yoshihiro MIYASAKA and Tomiyasu FURUTA

The ultimate strength of steel plates with longitudinal stiffeners of open or closed cross-section subjected to bi-axial in-plane forces is experimentally investigated in this study. Six stiffened plate specimens corresponding to 1/3 times a stiffened plate panel of the steel deck plate in an actual bridge were tested by using an experimental apparatus newly developed for this study. The test results verify an interaction curve for the ultimate strength which has been developed by the authors for predicting the ultimate strength of stiffened plates under biaxial in-plane forces.