

# 斜め補剛材を有する I 形ばりの挙動特性\*

永藤 壽宮\*<sup>1</sup>・吉川 諒\*<sup>2</sup>

## The Behavior Of The I-Section Beam With Slant Stiffener

NAGATO Toshimiya and YOSHIKAWA Ryoh

It is generally known that web with a slant stiffener has shear strength bigger than perpendicular stiffener.

Such the web with a slant stiffener are effective for the middle shoe of continuation beam, but there is the article of Yonezawa (1978) in Japan, Dubas (1986) in foreign country, but there are few studies about web with a slant stiffener.

The study is aimed for elucidating the behavior of the I-section beam with slant stiffener by using SolidWorks. This example of Analysis is done with initial imperfection.

キーワード：斜め補剛材，橋梁，耐荷力

### 1. 緒 言

垂直補剛された腹板を斜めに補剛すると，せん断に対して高い座屈強度が発揮できる．このような斜め補剛材プレートガーターは連続ばりの中間支点近傍に有効であるが，これの耐荷力に関する研究は，日本では米沢ら(1978)の論文があり，国外で数編の文献[Dubas et al.1986]等があるが，絶対数として少ない．

本研究では，初期たわみや残留応力を有する斜め補剛材における弾塑性挙動を文献 1 に示す米沢らの実験と同様のモデルを使用して，弾塑性有限変位解析 シミュレーション (Solidworks) を実施して，斜め補剛効果とその挙動を解明することを目的としている．

### 2. 解析仮定

#### 2-1 解析仮定

補剛材の有無別に解析モデルとして，補剛材を持たないタイプ，垂直補剛材を持つタイプ，そして 図 1 に示すように文献 1 の米沢等と同じ斜め補剛材モデルを持つタイプと 3 つ作成し解析を行った．

\*2012 年 3 月 6 日土木学会中部支部で発表

\*1 環境都市工学科教授

\*2 鹿児島大学工学部学生

原稿受付 2012 年 5 月 20 日

次に補剛材別に補剛材の剛性を変化させるため，補剛材高さを 40mm, 30mm, 20mm と 3 種類のタイプを作成した．

また補剛材角度を 2 種類に変化させて 45° と 37° のタイプを作成した．

初期たわみは，文献 2 から前述した図 2 に示すたわみ形状を用いた．それぞれ局所モード初期たわみとして  $\omega_0 = b / 150$ ，全体モード初期たわみとして  $\omega_0 = b / 1000$  とした．

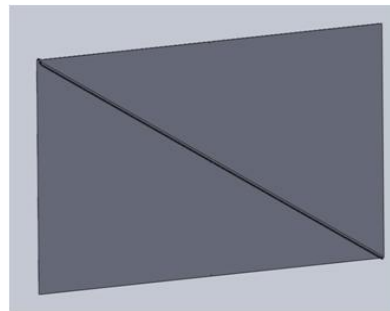


図 1 解析モデル外観

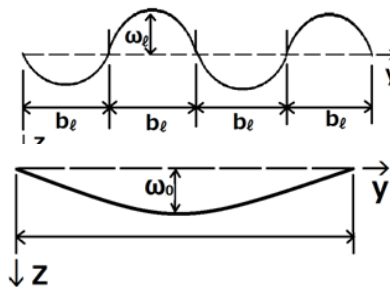


図 2 初期たわみ形状

初期たわみを含むモデルの最大曲率部 $\omega_0$ に関してはモデル幅 $b=800\text{mm}$ から $\omega_0 = 800 / 150 = 5.333\text{mm}$ から最大曲率部 $\omega_0$ が $5.333\text{mm}$ となるモデルを作成する

図3は局所モード:Web Aである。Web Aの斜め補剛材は設置場所が編曲点にあり、赤い線の通りに盛り上がっており、青い線でくぼんでおり斜め補剛材自体は曲がっていない。図4は全体モード:Web Bである。Web Bの斜め補剛材は最大曲率点に設置されており斜め補剛材自体も曲がっている。

Web A, Web Bのモデルでの曲線はsin-curveを採用した。

曲線の式に関しては次に示す通りである

WebA:

$$(800/150) * \sin((t * \pi) / \text{SQR}((800^2) + (1000^2)) * (20/41))$$

WebB:

$$(800/150) * \sin((t * \pi) / \text{SQR}((800^2) + (1000^2)))$$

残留応力は、残留応力を考慮する際に残留応力は座屈設計ガイドライン、箱型断面に用いる代表的な残留応力を参考にした。このモデルではリブの残留応力は考慮していない。

炭素鋼の引張降伏応力度が $\sigma_y = 2852.69\text{N/mm}^2$ なため圧縮応力度は引張降伏応力度の0.3倍の応力の $\sigma_{rc} = 84.81\text{N/mm}^2$ になる。板パネルに断面方向には図4に示すように、また正面方向には図5に示すように作用しているものとしている。図6で灰色は引張降伏応力 $\sigma_y$ 、青色は圧縮で $0.3\sigma_y$ が作用しているものとした。

ウェブ厚については2.3mm, 5.0mm, 7.5mmの3種類作成し解析を実行した。

解析はSolidWorksの弾塑性解析とし、降伏判定式はVon-Misesを用いた。収束はNeton-Raphson法を用いることとした。

境界条件は、図7に示すように1辺完全固定、3辺単純支持としてI型断面のせん断と曲げをうけるモデルとし実施した。材料はSS400とし材料特性は表1に示す。

以上の条件で、荷重、補剛材剛度や補剛材の配置を変化させて、耐荷力特性や補剛材やウェブの挙動を観察して、斜め補剛材の有効性などの種々のデータを提供するものとする。

### 3. 解析結果と考察

#### 3-1 残留応力を考慮しないモデル

図8は、各モデルにそれぞれの荷重を載荷した場合に生じる最大応力を表している。黄色で囲った部

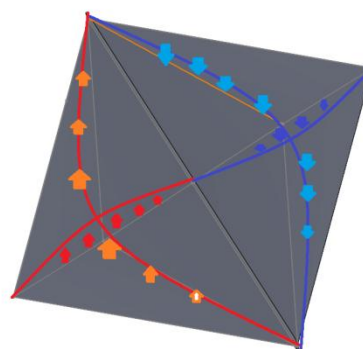


図3 初期たわみ形状 (局所)

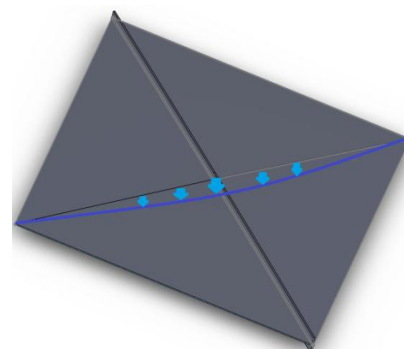


図4 初期たわみ形状 (全体)

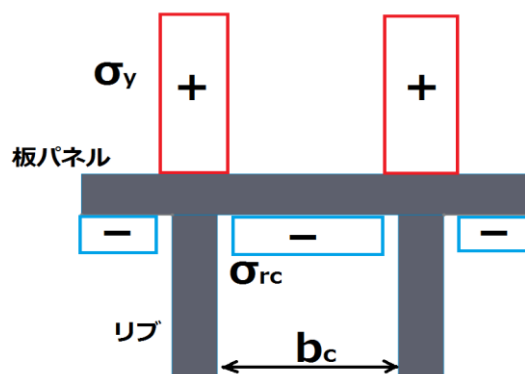


図5 残留応力度 (断面方向)

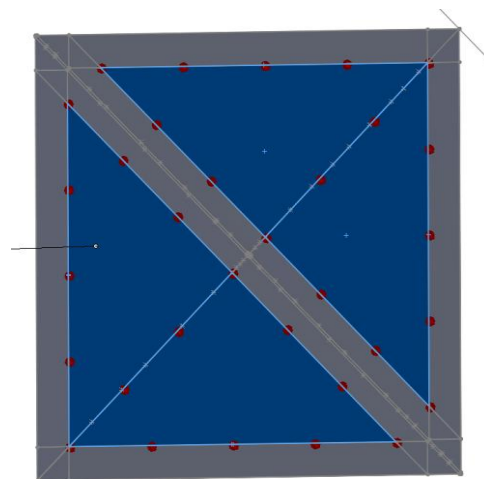


図6 残留応力度 (正面方向)

分の線がウェブ B（全体モードの初期たわみを持つ）の荷重応力曲線である。

その図から観察できることは、荷重が  $1e+003N$  から  $1e+004N$  にかけて最大応力が著しく増加している。この著しい増加から  $1e+004N$  あたりでウェブが弾性域から塑性域に達したと考える。また  $1e+004N$  以降はウェブの塑性域に達する部分が増加していき、最大応力増加は緩やかになったと考える。

一方同様に黄色で囲った部分以外の曲線がウェブ A（局所モードの初期たわみを持つ）の荷重応力曲線である。ウェブ A に関してウェブ B に比べ最大応力の値が小さいことがわかる。

図 9 の荷重ひずみ曲線図から同様にウェブ B が塑性域に達したと思われる  $1e+004N$  からひずみが著しく増加している。この最大ひずみの増加からもウェブ B が塑性域に達したことが伺える。

その図中でまた黄色で囲った部分以外の曲線を観察するとこのグラフから最大ひずみの増加幅に関してもウェブ B に比べひずみの増加幅が小さいことがいえる。この原因としてウェブ A とウェブ B の形状の違いが考えられる。ウェブ A とウェブ B の大きな違いとして補剛材の設置状況の違いがある。

ウェブ B の斜め補剛材は斜め補剛材自体が最大変曲点に設置してあり、斜め補剛材自体も曲がっている。それに比べウェブ A は変曲点にあたる部分に斜め補剛材が設置されている。

このことにより斜め補剛材に変形がない。以上のことからウェブ A の斜め補剛材に変形がなかったことにより斜め補剛材は剛性効果を発揮したといえる。

### 3-2 補剛材角度と残留応力を考慮しないモデル

ウェブの一部が降伏域を迎える荷重として以下の順でならべられるような結果が得られた。上に行くほどウェブの一部が降伏域を迎える荷重が大きくなる。

ウェブ 800×1000×2.3+補剛材設置角度 38.7 度

ウェブ 800×800×2.3 +補剛材設置角度 45 度

ウェブ 800×1000×2.3+垂直補剛材

ウェブ 800×1000×2.3（補剛材なし）

以上の結果から一番上にある補剛材設置角度 38.7 度のモデルが降伏点を迎える荷重が大きいたことがわかる。補剛材設置角度 38.7 度はモデル形状としては固定からの荷重点までの距離が 1000mm。補剛材設置角度 45 度のモデルで 800mm である。曲げモーメントは力の大きさと作用点から固定端までの距離に比例するため、長さ 800mm に比べ 1000mm がモーメントの大きさは大きくなる。しかし、解析の結果は異なっているためアスペクト比を小さくすることによって応力分布が大きく変わることがいえる。

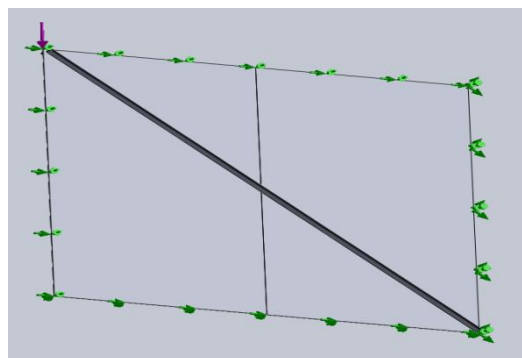


図 7 境界条件

表 1 材料特性

材料	SS400
X 方向の弾性係数	205000 N/mm <sup>2</sup>
XY 内面のポアソン比	0.29 N/A
降伏強さ	282.69 N/mm <sup>2</sup>
X 方向の熱膨張率	1.2e <sup>-5</sup> K
質量密度	7858 kg/m <sup>3</sup>
硬化係数	0.85 N/A

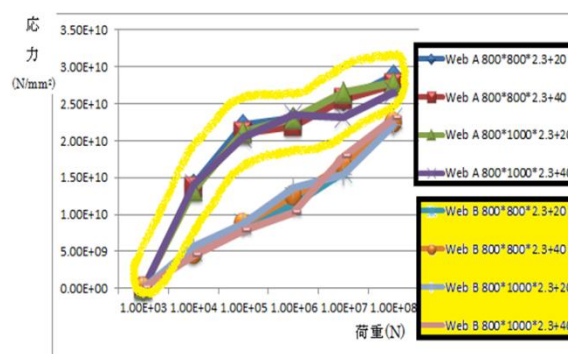


図 8 荷重応力図

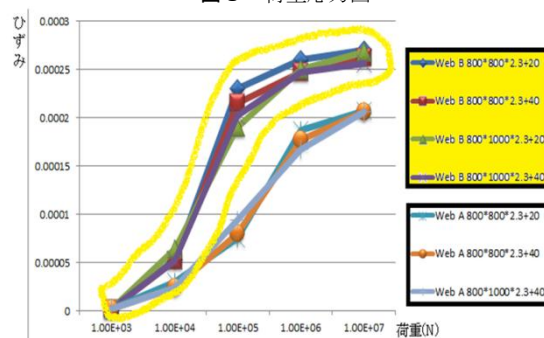


図 9 荷重ひずみ図

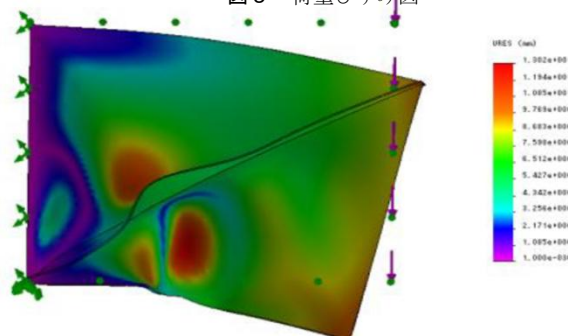


図 10 荷重変形図

次に変位図を比較する．例として荷重状態，補剛材高さが同じ状態でのモデルを比較対象に選定する．

図 10 はウェブ A800×1000×2.3 で斜め補剛材高さが 40mm である．そこに 1e+004N を載荷した時の変形図を 10 倍表示したものである．

図 10，図 11 の違いとしては補剛材設置角度とアスペクト比の違いで変位が大きく違うのがわかる．

さらに補剛材高さを変化させることによりウェブの一部が降伏点を迎える荷重が異なっている．補剛材高さ 20mm と 40mm を比較した場合，補剛材高さ 20mm に比べ 40mm がウェブの一部が降伏点を迎える荷重が大きい．しかし補剛材高さが高くなることによって変位が増大することが変形図からいえる．

図 12，図 13 は拘束条件，荷重状態，ウェブの形状が局所モードのモデルである．

図 12 は，ウェブ A800×1000×2.3 で補剛材高 20mm のモデルに 1e+008N を載荷させた場合の変形図を 10 倍表示したものである．

図 13 は，ウェブ A800×1000×2.3 で補剛材高さ 40mm のモデルに 1e+008N を載荷させた場合の変形図を 10 倍表示したものである．

以下の 2 つの変形図から変形の大きさの違いを観察できる．

### 3-3 残留応力を考慮したモデル

残留応力を含むモデルの解析結果として各モデルにそれぞれの荷重を載荷して場合の最大応力を計算した．各モデルの最大応力の傾向として最大応力の若干の減少がいくる．炭素鋼の塑性域での特性として，応力の緩やかな増加からのゆるやかな減少に移行し座屈に至るものである．ここから最大ひずみの増加傾向を検討する必要がある．

次に各モデルにそれぞれの荷重を載荷した場合の最大ひずみを表 2，表 3 に示すように各ウェブ厚ごとで 3 種類の補剛材高さを持つ板について計算した．

各モデルは残留応力によって既に塑性域への移行が終わっているものとみなし，最大ひずみの増加が観察されることを予想される．しかし，最大ひずみの増加傾向として荷重が増加していくことに伴って最大ひずみの減少が各モデルで確認できる．先ほどの最大応力の検討を行った結果，最大応力の減少が確認できた．ここで最大ひずみの増加が確認することができれば，炭素鋼の塑性域での特性を認めることができる．

しかし，最大ひずみの減少が確認されたので，最大ひずみ表は参考データとしての採用をしない．

図 14 は，荷重状態，拘束条件，補剛材高さ，アスペクト比が図 15 と同じであるが，図 14 はウェブ厚が 2.3mm，図 15 はウェブ厚 7.5mm となっている．

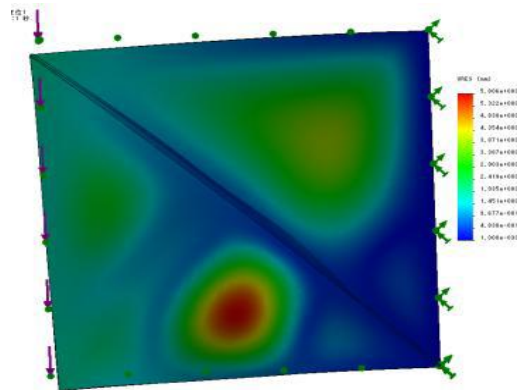


図 11 荷重変形図

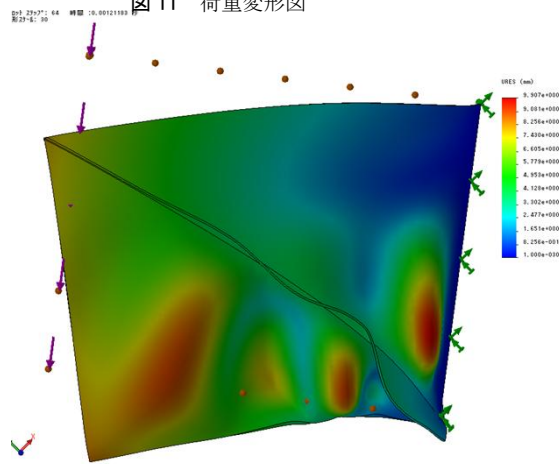


図 12 荷重変形図

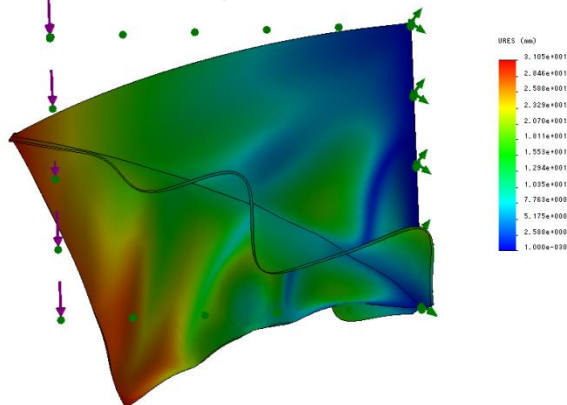


図 13 荷重変形図

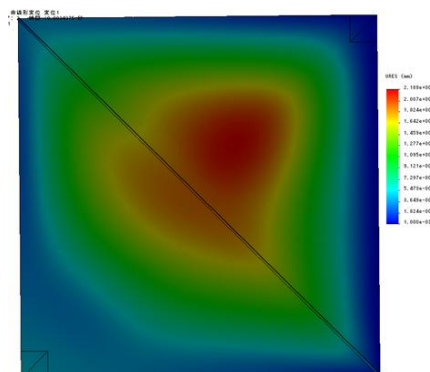


図 14 荷重変形図

両モデル共通して図から中央部の変位が大きいことが観察できる。このことから補剛材の効果はあまり見られないといえる

図 16 から図 18 は共通して荷重状態, 拘束条件, 補剛材高さ, アスペクト比が同じである。図 16 はウェブ厚が 2.3mm, 図 17 がウェブ厚 5.0mm, 図 18 がウェブ厚 7.5mm となっている。

両モデルの最大変位, 最小変位の値の設定が異なるためわかりにくいだがウェブ厚 2.3mm のほうが補剛効果は大きい結果が得ている。両モデル共通して, 斜め補剛材を挟んで 2 つに変位分布が分かれており補剛材の剛性効果が観察できる。このことから残留応力を考慮した場合においてもウェブ B に比べウェブ A が剛性効果が高いといえる。

表 2 最大ひずみ (ウェブ厚 2.3mm)

荷重	ウェブ厚 2.3mm		
	補剛材高さ 20mm	補剛材高さ 30mm	補剛材高さ 40mm
0	0.000405701	0.0253853	0.0400093
250	0.00240135	0.0341596	0.0400086
500	0.000480734	0.0253843	0.0317736
750	0.000480734	0.0253838	0.0317728
1000	0.000493446	0.0205181	0.0317709
2500	0.000480734	0.0205155	0.00695926
5000	0.000492555	0.00322012	0.00695764
7500	0.000480734	0.00321966	0.00695632
10000	0.000480734	0.00321921	0.00695632
25000	0.000480734	0.00317526	0.00694677
50000	0.000480734	0.00321191	0.00693299
75000	0.000480733	0.00320736	0.00691967
100000	0.000480733	0.00308489	0.0136014

表 3 最大ひずみ (ウェブ厚 5.0mm)

荷重	ウェブ厚 5.0mm		
	補剛材高さ 20mm	補剛材高さ 30mm	補剛材高さ 40mm
0	0.00368136	0.815409	0.0390338
250	0.00368136	0.815396	0.0110261
500	0.00368136	0.815384	0.0110259
750	0.00368136	0.815372	0.0110258
1000	0.00368136	0.815359	0.0110257
2500	0.00368136	0.815285	0.0110253
5000	0.00368136	0.815161	0.0110245
7500	0.00368136	0.815038	0.0110237
10000	0.0109844	0.814914	0.011023
25000	0.0109844	0.814174	0.0110184
50000	0.0109844	0.812947	0.0110107
75000	0.0237704	0.811726	0.011003
100000	0.0237704	0.0399627	0.00360096

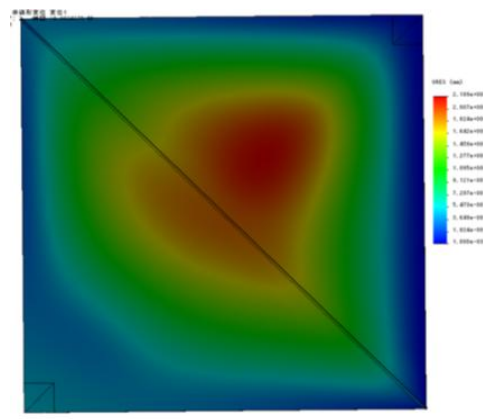


図 15 荷重変形図

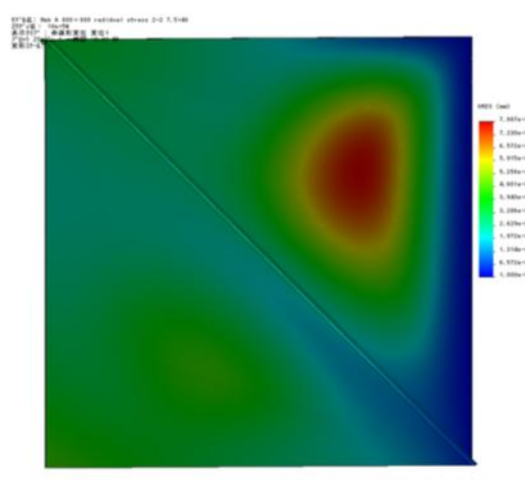


図 16 荷重変形図

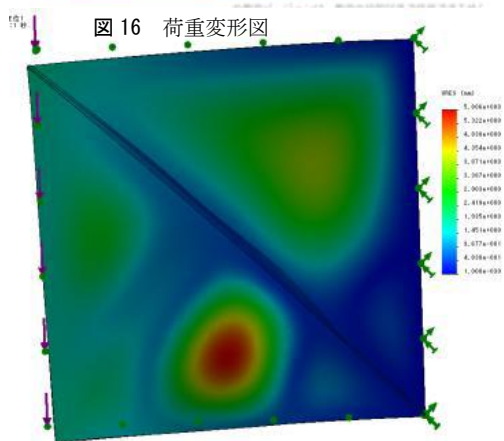


図 17 荷重変形図

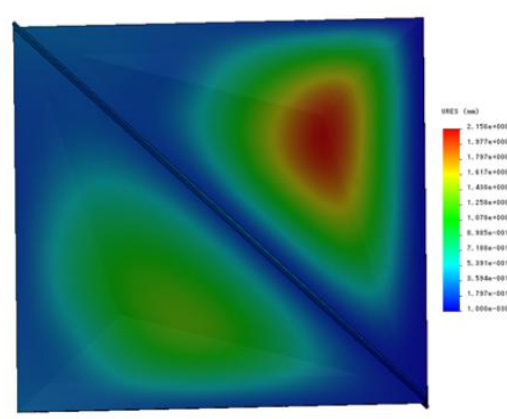


図 18 荷重変形図

## 4. 結 論

### 4-1 残留応力を考慮しない場合

(1) 斜め補剛材の有効性は、初期たわみ形状、板のアスペクト比と補剛材剛度のパラメーターに大きく関与し、それらを考慮する事により、実現可能な補剛形式といえる。

(2) 斜め補剛材の荷重耐荷力挙動特性は、初期たわみに大きく影響を受けており、特に局所モードに比べ全体モードがその補剛効果を低下させている。

### 4-2 残留応力を考慮する場合

(1) 最大応力データと最大ひずみデータの採用できるようなデータ取得に至らなかった。

(2) 残留応力を考慮した場合でも考慮しない補剛効果が得られている。

### 4-3 今後の展開

斜め補剛材設置における初期たわみ・残留応力分布の実測実験などを実施する必要がある。それらを基により精度の高い解析を実施する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 米沢博, 三上市蔵, 堂垣正博, 宇野裕恵: 斜め補剛板を有するプレートガーターのせん断耐荷力, 土木学会論文報告集, No. 286, 1978, P17-27
- 2) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, 改訂第2版, 2005