

## CFRP 板接着による鋼板パネルの強度と変形能の改善に関する基礎的研究

宇井 崇\*, 汐待公二期\*\*, 西村宣男\*\*\*

\*工修 片山ストラテック (株) 技術開発部 (〒551-0021 大阪府大阪市大正区南恩加島 6-2-21)

\*\* 大阪大学大学院 工学研究科博士前期課程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

\*\*\* 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科 土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

CFRP 板は炭素繊維と樹脂とを固化させて板状にした複合材料で、鋼板と比較して軽量で施工性に優れ、かつ高強度で腐食しないなどの特徴をもつ。本研究では、この CFRP 板を鋼製橋脚の耐震補強等に適用するための検討の一環として、CFRP 板を接着した補剛圧縮鋼板パネルの強度と変形能に関して解析的な検討を実施した。幅厚比がやや大きくて変形能が不足している補剛圧縮鋼板パネルを対象に、CFRP 板を接着した場合の強度と変形能の改善効果に関して解析的に調査した結果、縦補剛材の剛比が道路橋示方書に規定されている必要剛比にはほぼ等しい補剛圧縮鋼板パネルに対しては、板パネルを補強するよりも補剛材を補強する方が効果的であることが明らかとなった。

*Key Words: CFRP strip, strengthening, buckling, laminates, stiffened plate*

## 1. はじめに

CFRP 板は炭素繊維と樹脂とを固化させて板状にした複合材料で、鋼板と比較して軽量で施工性に優れかつ高強度で腐食しない等の特徴をもつ。このような利点を活かして、構造物の補修・補強材料として今後幅広く使用されることが期待される材料である。CFRP 板と同種の材料として炭素繊維シートがあるが、これは施工現場においてエポキシ樹脂を浸透・固化させて使用する点が CFRP 板と異なる。この炭素繊維シートは RC 橋脚の耐震補強や RC 床版の補修・補強等、主に RC 構造物の補修・補強工事に既に多く使用されている。

一方、鋼構造物に対してこのような複合材料を使用して補強をした事例はまだあまり見られないようである。著者らは CFRP 板を鋼製橋脚の耐震補強等に適用するための検討を進めており<sup>1)</sup>、そのための検討の一環として CFRP 板を接着した圧縮鋼板パネルの基本的な力学特性について解析的検討を行っている<sup>2)</sup>。

CFRP 板を接着した鋼板は積層板としての特性を持ち、この特性に着目した検討が必要となる。積層複合材料の大変形挙動を扱った研究としては、積層円筒シェルの座屈に関する研究<sup>3)</sup>や積層梁の座屈に関する研究<sup>4)</sup>がある。しかし、積層板については面外荷重による大変形問題を扱った研究<sup>5)</sup>はあるものの、面内圧縮荷重による座屈問題を扱ったものは見られない。ここでは CFRP 板を接着した補剛圧縮鋼板パネルの面内圧縮荷重による座屈変形挙動について、積層板としての特性に着目しながら 3 次元直交異方性立体要素を用いた有限要素法により解析的に検討する。

## 2. 解析方法

## 2.1 解析手法とその座屈問題への適用性

## (1) 解析手法

一般に積層板では面内力が作用する場合であっても、その部材端部近傍において層間応力を生じ、3 次元な応力状態になることが知られている。このような層間応力を考慮した積層板の有限要素解析を行うにあたっては板の解析で通常用いられているシェル要素ではなく、ソリッド要素を用いる必要がある。本研究では、20 節点アイソパラメトリックソリッド要素を使用した直交異方性を含む積層板の座屈強度解析プログラム SABOL-ORTH を開発し、これを使用して解析を実施した。SABOL-ORTH は大阪大学土木構造研究室で高力ボルト摩擦接合継手の限界状態を解析するために以前より使用されてきた弾塑性有限要素解析プログラム SABOL<sup>10)</sup> に、直交異方性要素と座屈解析機能を付加したプログラムである。

## (2) 本解析手法の座屈問題への適用性検討

解析プログラム SABOL-ORTH の座屈問題への適用性の検討を行うために、Coan<sup>11)</sup> および小松・北田ら<sup>12)</sup> による既往の研究との比較解析を実施した。解析モデルは図-1 に示す初期たわみを有する周辺単純支持の正方形等方性板であり、材料定数は図中に示したとおりヤング率  $E=206\text{GPa}$ 、ポアソン比  $\nu=0.316$ 、降伏応力  $\sigma_y=588\text{MPa}$  である。初期たわみは中央で最大値  $10\text{mm}$  をとる正弦半波の波形で与えている。なお、構造および荷重の対称性を考慮して 1/4 部分領域モデルにより解析を実施した。なお端部辺に強制変位を与えることにより載荷しているが、これによる載荷辺の局所的な変形を防止して単純支持の条件を保つ目的で、 $xy$  面の剛性が解析対象

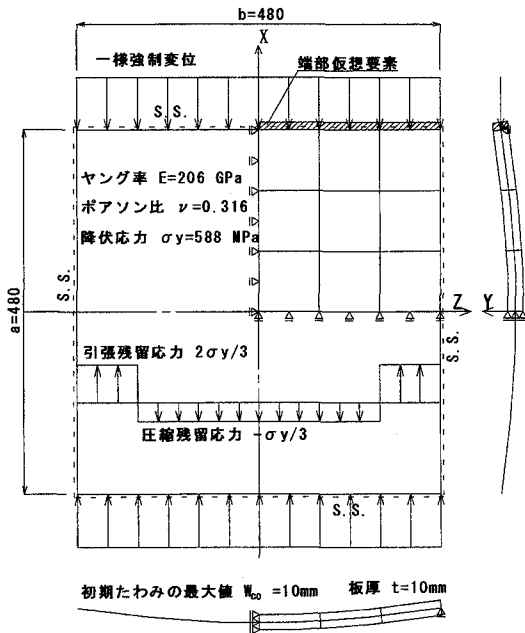


図-1 比較解析用モデル

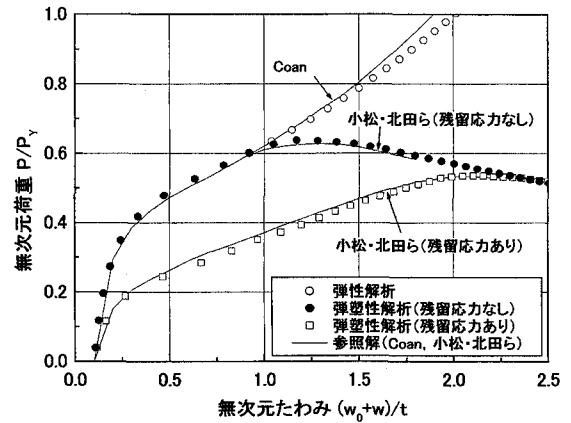


図-2 比較解析結果

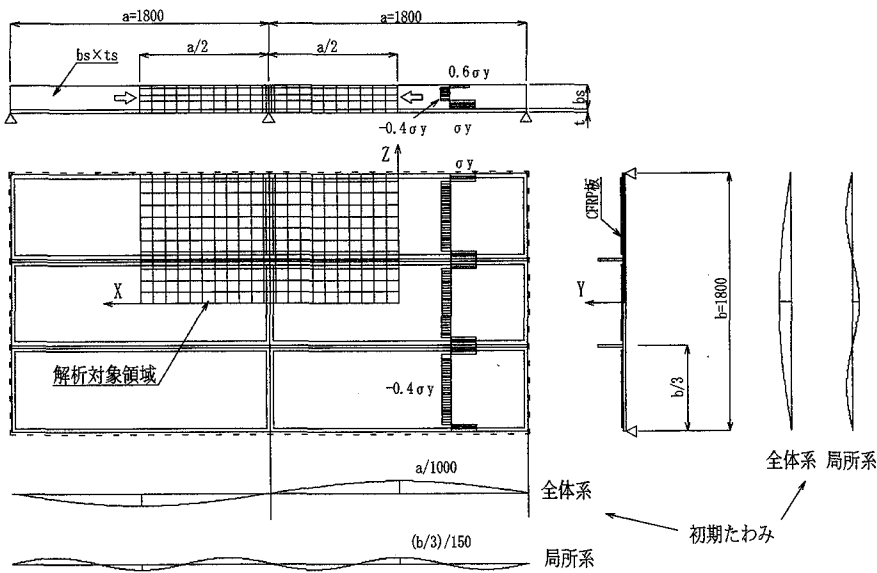


図-3 解析モデル

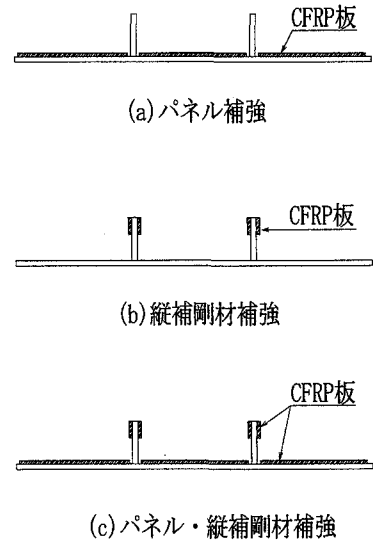


図-4 補強方法

構造物の剛性に比較して十分に大きく、またz軸周りのねじり剛性が十分に小さな仮想要素を設けて解析を実施している。

図-2に、解析により得られた荷重-たわみ関係を既往の研究結果とあわせて示す。縦軸は荷重Pを降伏荷重Pyで除して無次元化した値を、横軸は初期たわみw<sub>0</sub>を含む板中央のたわみ(w<sub>0</sub>+w)を板厚tで除して無次元化した値を示している。弾性解析、弾塑性解析ともに既往の研究結果と良好に一致しており、本解析プログラムが座屈解析に適用可能であることが確認された。

## 2.2 解析モデル

### (1) 解析モデルの寸法諸元

図-3に示すような2本の縦補剛材を有する連続補剛板を考え、これに対して図-4に示されるような3種類の補強方法を適用したモデルを考える。パネル補強(図-4(a))は縦補剛材で囲まれる板パネルに15mmの隙間をあけてCFRP板を接着したモデル、縦補剛材補強(図-4(b))は縦補剛材に100mm幅のCFRP板を接着したモデルである。両補強を併用したパネル・縦補剛材補強モデル(図-4(c))も考える。なお、モデル化にあたっては、構造および荷重の対称性を考慮して図-3に示される部分領域を解析対象とする。

表-1に解析モデルの寸法・諸元を示す。基本のモデ

表-1 解析モデルの寸法諸元

解析モデル	板パネル b×t	縦補剛材 bs×ts	板パネル 補強 tc	縦補剛材 補強 tc
[1] R7	1800×19	140×16	---	---
[2] R7p			1.2	---
[3] R7p2			2.4	---
[4] R7-s			---	1.2
[5] R7-s2			---	2.4
[6] R7p-s			1.2	1.2
[7] R7p2-s2			2.4	2.4

(単位：mm)

表-2 解析で使用する材料定数

材料定数	記号	鋼板	接着剤	CFRP 板
弾性係数 (GPa)	$E_x$	200	3.1	150
	$E_y$	200	3.1	10
	$E_z$	200	3.1	10
ポアソン比	$\nu_{xy}$	0.30	0.38	0.34
	$\nu_{yz}$	0.30	0.38	0.38
	$\nu_{zx}$	0.30	0.38	0.0227
せん断弾性係数 (GPa)	$G_{xy}$	77	1.1	3.1
	$G_{yz}$	77	1.1	1.1
	$G_{zx}$	77	1.1	1.1
降伏応力(MPa)	$\sigma_y$	355	---	---

ルとなる無補強モデルのR7については、幅厚比がやや大きく変形能が不足している補剛材を想定して、縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ  $R_R$  が0.7、縦補剛材剛比  $\nu$  と道路橋示方書<sup>13)</sup>に規定される必要剛比  $\nu_{req}$  の比  $\nu/\nu_{req}$  がほぼ1.0になるように寸法諸元を設定した。

ここに、縦補剛材間の板パネルの幅厚比パラメータ  $R_R$  は次式で定義される量である。

$$R_R = \frac{b}{nt} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k\pi^2}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (1)$$

ここに、 $b$ ：板幅、 $t$ ：鋼板パネルの板厚、 $\sigma_y$ ：鋼材の降伏応力、 $E$ ：鋼材の弾性係数、 $\nu$ ：ポアソン比、 $n$ ：縦補剛材で囲まれる板パネルの数 ( $n=3$ ) である。

また、補強モデルについては、基本モデルに対して1.2mm厚ないしは2.4mm厚のCFRP板を接着したものを考える。

### (2) 残留応力

鋼板の残留応力は図-3に示すように自己平衡型の矩形分布形状にモデル化する。ここで圧縮残留応力は  $\sigma_{rc} = 0.4\sigma_y$  とする。

### (3) 初期たわみ

初期たわみについては図-3に示すように補剛板全体のたわみモード  $w_{G0}$  と縦補剛材間の板パネルの局所的なたわみモード  $w_{L0}$  の和として与える。

$$w_0(x, z) = w_{G0}(x, z) + w_{L0}(x, z)$$

$$w_{G0}(x, z) = \frac{a}{1000} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{\pi z}{b}\right)$$

$$w_{L0}(x, z) = \frac{(b/n)}{150} \cos\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi z}{b}\right)$$

### (4) 材料定数

解析に用いる材料定数は表-2に示す通りである。CFRP板の材料定数としては、炭素繊維およびエポキシ樹脂の代表的な材料定数を用いて複合則<sup>14)</sup>により計算した値を使用する。接着剤の材料定数としてはエポキシ樹脂の値を使用する。なお、CFRP板およびエポキシ樹脂の破損は考えず、完全な弾性挙動を仮定した。また、鋼板については完全弾塑性体として扱う。

## 3. 解析結果および考察

### 3.1 荷重-変位挙動と変形モード

#### (1) パネル補強

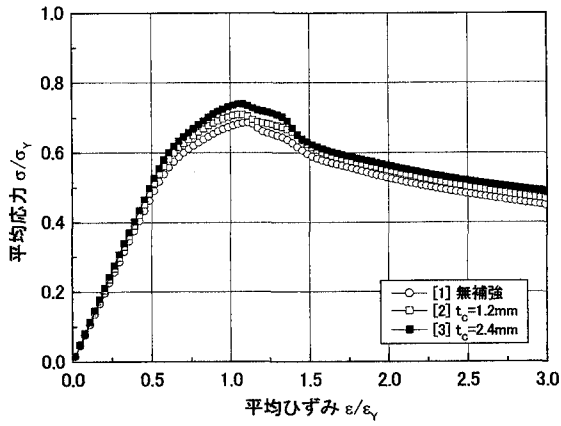
パネル補強した場合の荷重-変位関係を平均応力-平均ひずみ曲線の形で図-10(a)に示す。これより、CFRP板厚を大きくすることで補強効果は若干大きくなるものの、パネル補強による強度および変形能の改善効果はあまり大きくないことが分かる。これは、CFRP板厚  $t_c$  と鋼板パネル厚  $t$  との板厚比が、R7-pで0.063、R7-p2で0.126と小さいこともあるが、縦補剛材剛比が道路橋示方書の規定による必要最小値レベルと比較的小さく、十分な補剛効果が得られないことにより補剛板全体の座屈に対する抵抗性が不足していることによるものと考えられる。

このため、図-11(a)の変形モード図に示されるように、初期には縦補剛材を節とするような局所的な変形モードが卓越した形で座屈するが、変形の進行にともなって補剛板の全体座屈モードが卓越した変形状態に移行する。

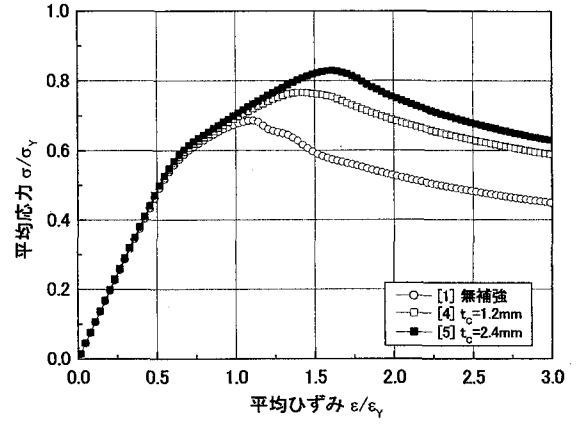
#### (2) 縦補剛材補強

縦補剛材を補強した場合には、図-10(b)の平均応力-平均ひずみ曲線に示されるように、前述のパネル補強の場合と異なり比較的大きな強度と変形能の改善効果が見られる。これは縦補剛材の補強によって、補剛効果が大きくなったことによるものと考えられる。ただし、CFRP板厚を大きくした場合には除荷曲線の傾きがやや大きくなり、縦補剛材のみを過度に補強するのはあまり効果的とはいえない。

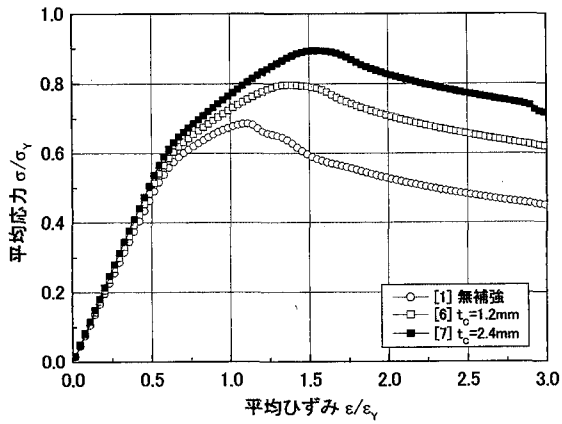
また変形モードについては、図-11(b)に見られるように、縦補剛材を節とした局所的な変形モードが卓越した初期座屈モードを保ったまま変形が進行する。



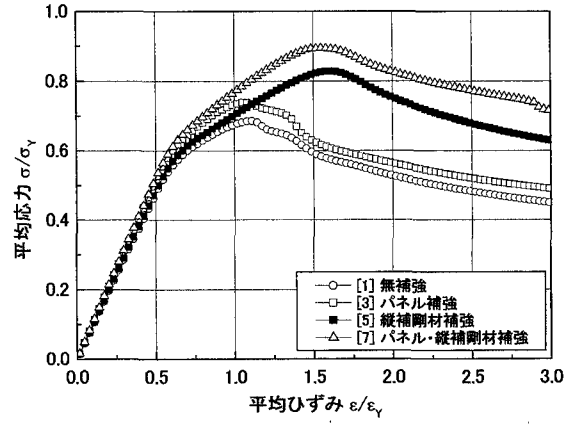
(a) パネル補強



(b) 縦補剛材補強

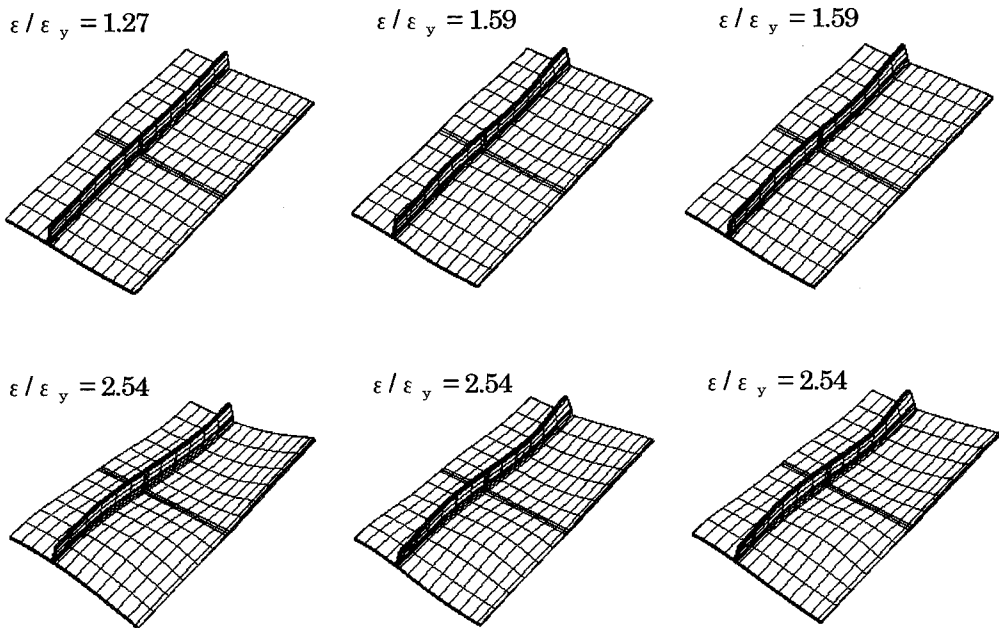


(c) パネル・縦補剛材補強



(d) 補強方法による比較

図-10 平均応力-平均ひずみ関係



(a) パネル補強 (R7-p)

(b) 縦補剛材補強 (R7-s)

(c) パネル・縦補剛材補強 (R7-p-s)

図-11 変形モード

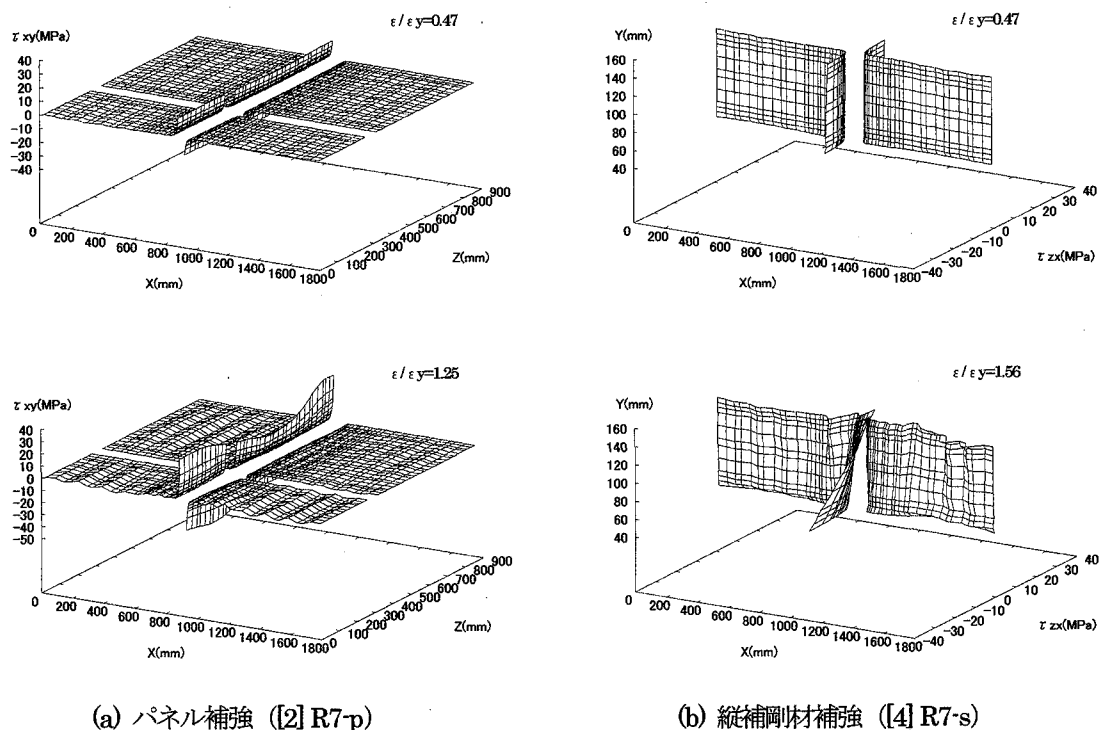


図-12 接着層のせん断応力分布

### (3) パネル・縦補剛材補強

パネル・縦補剛材をともに補強した場合の平均応力-平均ひずみ曲線を図-10(c)に示す。この場合にも、縦補剛材補強の場合と同様に大きな補強効果が得られる。座屈モードについても、縦補剛材を節とした局所的な変形が卓越したモードとなり、かつ初期座屈モード形状を保持したまま変形が進む。

### (4) 補強方法による比較

平均応力-平均ひずみ曲線を補強方法により比較すると図-10(d)に示すとおりである。パネル補強と縦補剛材補強とを比較すると、縦補剛材補強の方が効果的な補強方法であることが分かる。ただし、縦補剛材のみを補強するのではなく両補強法を併用することで、より補強効果が高まる。これは、補剛板の全体座屈と縦補剛材間の局部座屈の両者に対する抵抗性をバランスよく改善できるためであると考えられる。

## 3.2 接着層のせん断応力分布特性

接着層のせん断応力分布を図-12に示す。これらの図にみられるようにせん断応力は接着層の自由端部側に集中して生じ、初期段階においては板幅方向ないしは縦補剛材の高さ方向にほぼ一様な応力分布となっている。また、変形の進行にともなって端部応力は大きくなるが、座屈変形が生じると面外変形が大きくなった部分の応力は抜けて、変形の小さい単純支持端や縦補剛材の付け根付近に応力が集中する傾向が見られる。

## 5. 結論

以上、本文では耐震の面で強度と変形能が不足していると考えられる補剛圧縮鋼板パネルを想定して、幅厚比パラメータが0.7とやや大きく、かつ縦補剛材の剛比も道路橋示方書に規定される必要最小値に等しい補剛圧縮鋼板パネルを対象に、CFRP板を接着することによる強度と変形能の改善効果に関して、3次元有限要素法を用いて解析的に検討した結果について述べた。本解析の範囲内で得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) 縦補剛材の剛比が道路橋示方書に規定されている必要剛比と同程度の場合には、板パネルを補強するよりも縦補剛材を補強する方が、強度と変形能の改善に効果的である。
- 2) ただし、縦補剛材のみを過度に補強するよりも、縦補剛材の補強と板パネルの補強とを併用して補剛板の全体座屈と縦補剛材間パネルの局部座屈の両者に対する抵抗性をバランスよく改善する方がより補強効果大きい。
- 3) 接着層のせん断力は自由端部に集中して生じており、変形の進行にともなって端部のせん断力は大きくなるが、座屈が生じると変形の大きな部分の応力は抜けて、変形の小さな部分に応力が集中する傾向が見られる。

なお、今回の解析では接着層の剥離については考慮しなかったが、せん断応力が集中する自由端部から剥離が生じると急激に補強効果を失うことになる。このため、接着層の剥離に関する検討は不可欠であり、応力集中の低減方法に関する検討とも合わせて、今後さらに検討を進める必要がある。

#### 参考文献

- 1) 鈴木博之・西村宣男・袴田文雄：既設鋼製橋脚の炭素繊維強化樹脂板による耐震補強，第54回土木学会年次学術講演会講演概要集 第1部(B)，450-451，2000.
- 2) 永崎央輔・鈴木博之・西村宣男・袴田文雄：炭素繊維強化樹脂板により補強された既設鋼製橋脚の繰り返し載荷試験，第55回土木学会年次学術講演会 講演概要集，2001.
- 3) 汐待公二朗・宇井崇・西村宣男・鈴木博之：炭素繊維強化樹脂板を接着した圧縮鋼板の座屈解析，第55回土木学会年次学術講演会 講演概要集，2001.
- 4) Bauld, Jr, N.R. and Khot, N.S. : A Numerical and Experimental Investigation of the Buckling Behavior of Composite Panels , Computers & Structures, Vol.15, No.4, 393-403, 1982.
- 5) Sheinman, I., Shaw, D. and Simites, G.J. : Nonlinear Analysis of Axially-Loaded Laminated Cylindrical Shells, Computers & Structures, Vol.16, No.1-4, 131-137, 1983.
- 6) Jun, S.M. and Hong, C.S. : Buckling Behavior of Laminated Composite Cylindrical Panels under Axial Compression, Computers & Structures, Vol.29, No.3, 479-490, 1988.
- 7) Adan, M. and Sheinman, I. : Effect of Stretching-Bending Coupling and Shear Deformations on Post-Buckling Behavior of Laminated Beams, Computers & Structures, Vol.30, No.3, 609-613, 1988.
- 8) Chang, T.Y. and Sawamiphakdi, K. : Large Deformation Analysis of Laminated Shells by Finite Element Method, Computers & Structures, Vol.13, No.3, 331-340, 1981.
- 9) Kim, Y.H. and Lee, S.W. : A Solid Element Formulation for Large Deflection Analysis of Composite Shell Structures , Computers & Structures, Vol.30, No.1/2, 269-274, 1988.
- 10) 亀井義典：高力ボルト摩擦接合継手の限界強度に関する解析的研究，大阪大学学位論文，2000.
- 11) Coan, J.M. : Large Deflection Theory for Plates with Small Initial Curvature Loaded in Edge Compression, Journal of Applied Mech., Vol.8, No.2, Jun, 1951.
- 12) 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，No.244, 1-14, 1975.
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，平成8年12月.
- 14) 森田幹郎・金原勲・福田博：複合材料，日刊工業新聞，1988.

(2001年12月7日受付)

## A BASIC STUDY ON STRENGTH AND DUCTILITY OF STEEL PANELS STRENGTHENED BY CFRP STRIPS

Takashi UI, Kojiro SHIOMACHI and Nobuo NISHIMURA

CFRP strips are a composite board, consisting of carbon fiber embedded in epoxy resin base. This material has high strength and is extremely light so that its intended use is for retrofitting of structures. In this paper, an analytical examination was executed in order to conduct research on the strength and ductility of steel stiffened panels strengthened by CFRP strips. Analytical results shows that stiffened plates whose longitudinal stiffener has been strengthened has higher strength and ductility than those stiffened plates whose plate panel has been strengthened.