

炭素繊維強化樹脂板を接着した圧縮鋼板の極限強度解析

Ultimate strength analysis of steel plates strengthened by carbon fiber reinforced polymer strips

宇井 崇*, 汐待公二郎**, 西村宣男***, 鈴木博之****

Takashi UI, Kojiro SHIOMACHI, Nobuo NISHIMURA, Hiroyuki SUZUKI

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

**** 工博 明星大学教授 理工学部 土木工学科 (〒191-8506 東京都日野市程久保 2-1-1)

Elasto-plastic buckling behavior of steel plates strengthened by carbon fiber reinforced polymer strips under compressive loading is investigated. First, non-linear buckling analysis program SABOL-ORTH using 20 node isoparametric solid element is developed, for this type laminate. Secondary, validity of this analysis program is confirmed to make a comparison between proposed method and existing research's result. Finally, the influence of the fiber orientation and the strengthening side (concave or convex side) upon buckling load is investigated by analysis using this program.

Key Words: carbon fiber reinforced polymer strip, strengthening, buckling, laminates

キーワード: 炭素繊維強化樹脂板, 補強, 座屈, 積層板

1. はじめに

本文では、3次元有限要素解析により検討した結果に基づいて、炭素繊維強化樹脂板 (CFRP 板) を片面に一層接着した圧縮鋼板の極限強度特性について述べる。

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。このため、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含浸・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^{1,2)}、そのための検討の一環として CFRP 板を接着した圧縮鋼板の基本的な力学特性について解析的検討を行っている³⁾。

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⁴⁻⁶⁾や積層梁の座屈に関する研究⁷⁾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^{8,9)}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 板を接着した鋼板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 概要

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な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 SABOL¹⁰⁾ 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。ここでは、SABOL-ORTH に特有の事項として直交異方性材料の応力解析法について述べた後、圧縮鋼板の弾塑性座屈問題への本解析手法の適用性について検討する。

2.2 直交異方性材料の応力解析

(1) 直交異方性材料の材料マトリックス

直交異方性材料の応力解析を実施するにあたって、直交異方性の材料マトリックスを導入する必要がある。直交異方性の材料マトリックスは下記のように表される¹¹⁾。

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{13} & Q_{23} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここに、 $Q_{11} \sim Q_{66}$ は下記の通りである。

$$Q_{11} = \frac{1}{E_y} \left(\frac{1}{E_z} - \frac{\nu_{yz}^2}{E_y} \right) / A$$

$$Q_{22} = \frac{1}{E_z} \left(\frac{1}{E_x} - \frac{\nu_{zx}^2}{E_z} \right) / A$$

$$Q_{33} = \frac{1}{E_x} \left(\frac{1}{E_y} - \frac{\nu_{xy}^2}{E_x} \right) / A$$

$$Q_{12} = \frac{1}{E_z} \left(\frac{\nu_{zx}\nu_{yz}}{E_y} + \frac{\nu_{xy}^2}{E_x} \right) / A$$

$$Q_{13} = \frac{1}{E_y} \left(\frac{\nu_{xy}\nu_{yz}}{E_x} + \frac{\nu_{zx}^2}{E_z} \right) / A$$

$$Q_{23} = \frac{1}{E_x} \left(\frac{\nu_{xy}\nu_{zx}}{E_z} + \frac{\nu_{yz}^2}{E_y} \right) / A$$

$$Q_{44} = G_{xy}, \quad Q_{55} = G_{yz}, \quad Q_{66} = G_{zx}$$

ただし、

$$A = \frac{1}{E_x E_y E_z} \times \left(1 - 2\nu_{xy}\nu_{yz}\nu_{zx} - \frac{E_x}{E_z}\nu_{zx}^2 - \frac{E_y}{E_x}\nu_{xy}^2 - \frac{E_z}{E_y}\nu_{yz}^2 \right)$$

である。

(2) 直交異方性材料の応力解析

アイソパラメトリック要素を用いた有限要素解析において、等方性の要素を用いた応力解析を行う場合には親要素を全体座標系に写像することによって全体座標系の剛性方程式が直接的に得られる。直交異方性の要素を用いた場合であっても材料の主軸が全体座標系に一致していれば等方性の場合と同様の手法で差し支えない。しかしながら、異方性の要素で材料の主軸が全体座標系と一致しない場合には、材料の主軸がどの方向を向いているのかということ意識する必要がある。ここでは、材料主軸が要素座標系に固定されている場合を考える。この場合、いったん要素座標系での剛性マトリックスを作成した後、座標変換を施しながら全体座標系での剛性マトリックスを組み立ててゆく必要がある¹¹⁾。

全体座標系 $X-Y-Z$ から要素座標系 $x-y-z$ への座標変換は要素座標軸の方向余弦により次式のように表わされる。

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = [L] \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 $[L]$ は座標変換マトリックスであり、次のように表わされる。

$$[L] = \begin{bmatrix} \cos(x, X) & \cos(x, Y) & \cos(x, Z) \\ \cos(y, X) & \cos(y, Y) & \cos(y, Z) \\ \cos(z, X) & \cos(z, Y) & \cos(z, Z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{l_x\}^T \\ \{l_y\}^T \\ \{l_z\}^T \end{bmatrix} \quad (3)$$

いま要素上の節点座標より要素座標系をプログラムで内部的に計算することを考える。例えば、図-1のように3つの節点を適当に選び（それらを点1, 2, 3とする）、これらの3点を用いて要素座標系を定義する。まず、点1から点2の方向を x 軸とする。次に点1, 2, 3を含む平面と垂直に z 軸を定め、さらに両軸と右手座標系をなすように y 軸を定める。

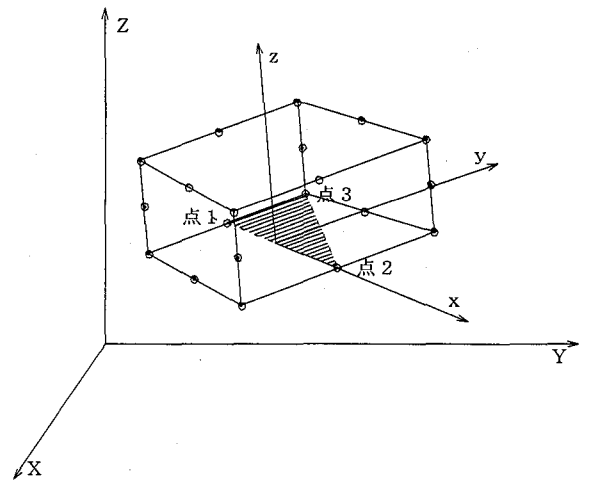


図-1 全体座標系 $X-Y-Z$ と要素座標系 $x-y-z$

各点の全体座標系での座標値を $X_i, Y_i, Z_i (i=1, 2, 3)$ とすると, $\{l_x\}$ は点1, 点2の座標値より次式のように計算される。

$$\{l_x\} = \{A\} / \{A\} \quad (4)$$

ここで,

$$\{A\} = \begin{Bmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\|\{A\}\| = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2 + (Z_2 - Z_1)^2} \quad (6)$$

である。 $\{l_z\}$ は次のようになる。

$$\{l_z\} = \{\{A\} \times \{B\}\} / 2S = \frac{1}{2S} \begin{Bmatrix} A_2 B_3 - B_2 A_3 \\ A_3 B_1 - B_3 A_1 \\ A_1 B_2 - B_1 A_2 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

ここで,

$$\{B\} = \begin{Bmatrix} X_3 - X_1 \\ Y_3 - Y_1 \\ Z_3 - Z_1 \end{Bmatrix} \quad (8)$$

$$2S = \sqrt{(A_2 B_3 - B_2 A_3)^2 + (A_3 B_1 - B_3 A_1)^2 + (A_1 B_2 - B_1 A_2)^2} \quad (9)$$

である。また, $\{l_y\}$ は次のようになる。

$$\{l_y\} = \{l_z\} \times \{l_x\} = \begin{Bmatrix} l_{z2} l_{x3} - l_{x2} l_{z3} \\ l_{z3} l_{x1} - l_{x3} l_{z1} \\ l_{z1} l_{x2} - l_{x1} l_{z2} \end{Bmatrix} \quad (10)$$

要素座標系での要素剛性マトリックス $[K_E]$ は次式により全体座標系での要素剛性マトリックス $[K_G]$ に変換される。

$$[K_G] = [T]^T [K_E] [T] \quad (11)$$

ここで, $[T]$ は座標変換マトリックス $[L]$ を用いて次のように表わされる。

$$[T] = \begin{bmatrix} [L] & 0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & [L] & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & [L] & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \cdots & [L] \end{bmatrix}$$

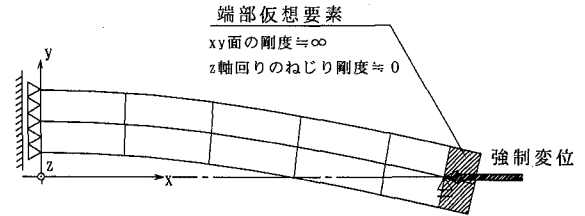


図-2 端部仮要素

2.3 端部仮要素

ソリッド要素を用いた解析では単純支持された載荷部の境界条件の設定に工夫を要する。端面に一樣な強制変位を与えると, 強制変位により面外曲げに対する拘束が生じることになるので, 図-2に示すように線状の強制変位を与える必要がある。しかし, このときにただ線上の強制変位を与えるだけでは, 載荷辺に局部的な変形を生じ単純支持の条件を満足するものとはならない。そこで, この局部的な変形を防止して単純支持の条件を保つ目的で, 図-2に示すような xy 面の剛性が解析対象構造物の剛性に比較して十分に大きく, また z 軸回りのねじり剛性が十分に小さな仮要素を設けて解析を実施する。

2.4 数値計算過程

数値計算は Updated Lagrangian 法により定式化を行っており, Newton-Raphson 法による収束計算を実施している。全体的な計算の流れは図-3に示すとおりである。

最初に解析に必要なデータを読み込む。次に, 与えられたデータに基づいて要素剛性マトリックスを作成する。この際には要素に固定された材料の主軸と全体座標系との傾きを考慮するため, 2.2 (2)に示した要素座標系から全体座標系への座標変換をあわせて実施している。ここで作成された要素剛性マトリックスを全体剛性マトリックスにアセンブルするとともに, 増分強制変位に相当する荷重ベクトルをセットして全体剛性方程式を作成し, これを掃き出し計算により解くことで増分変位を計算する。続いて応力を計算し, 節点座標を更新する。最後に不釣り合い力を計算し, 収束判定を行う。収束条件が満足されれば解析結果を出力した後, 次のステップへと計算を進めていく。大きな不釣り合い力が生じて収束条件を満足しない場合には, 剛性マトリックスを再作成するとともに, 不釣り合い力を荷重ベクトルにセットして計算を繰り返す。

2.5 本解析手法の座屈問題への適用性検討

鋼-CFRP 積層板の解析の先立って, 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, Coan¹²⁾ および小松・北田ら¹³⁾ 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-4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

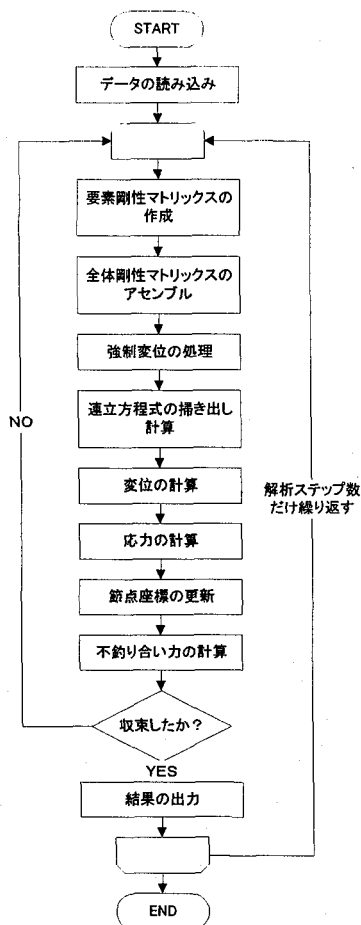


図-3 数値計算過程

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 10mm 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。

Coan は本モデルを対象に面内圧縮力を受ける板の大たわみ挙動の級数解を導いている。また、小松・北田らは残留応力も考慮した板要素の弾塑性座屈解析法を開発し Coan と同じモデルを用いて比較解析を実施するとともに、残留応力のある場合とない場合の弾塑性挙動についても解析している。

図-5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 P_y で除して無次元化した値を、横軸は初期たわみ w_0 を含む板中央のたわみ (w_0+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。

3. 解析モデル

3.1 概要

解析モデルは図-6に示すように中心面を単純支持した鋼板にそれよりやや小さい CFRP 板を接着したモデルである。

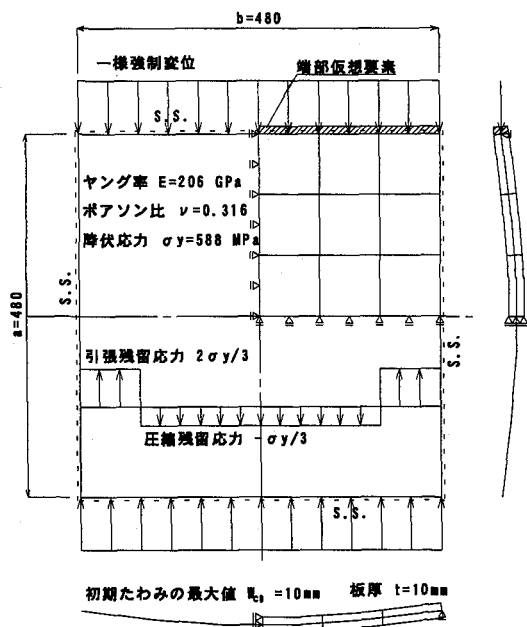


図-4 比較解析用モデル

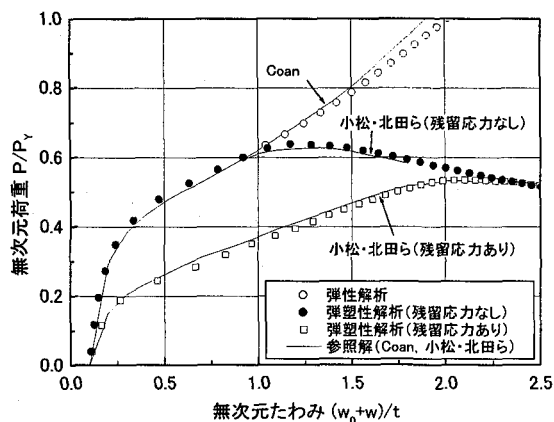


図-5 比較解析結果

構造および荷重の対称性を考慮して、 $1/4$ 部分領域のみをモデル化する。寸法・諸元の設定については、まず表-1のように鋼板の幅厚比パラメータ R_{FS} を種々変えた7つの圧縮鋼板モデルを基本解析モデルとして設定し、それらに CFRP 板を接着面 (凸面あるいは凹面) および繊維方向 (圧縮軸方向あるいは圧縮軸直角方向) を変えて接着した4種類の補強モデルを設定した。ここで、鋼板の幅厚比パラメータ R_{FS} は次式で定義される量である。

$$R_{FS} = \frac{b}{t_s} \sqrt{\frac{\sigma_y \cdot 12(1-\nu^2)}{E \cdot k\pi^2}} \quad (12)$$

ここに、 b : 板幅, t_s : 鋼板の板厚, σ_y : 鋼材の降伏応力, E : 鋼材の弾性係数, ν : ポアソン比, k : 座屈係数 (=4.0: 周辺単純支持板) である。

なお、鋼板の板厚 t_s と CFRP 板の厚さ t_c との板厚比は $t_c/t_s=0.10$ を、また接着剤層の厚さは $t_a=0.5\text{mm}$ を基本としたが、それらのパラメータを変えたモデルについても解析を実施した。解析ケース名の付け方は図-7に示す規則に従うものとし、必要に応じて板厚比などを併記するものとする。

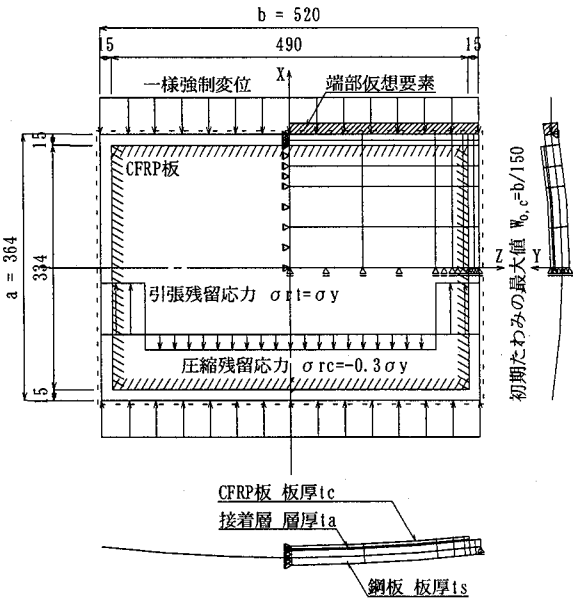


図-6 解析モデル

表-1 基本解析モデルの諸元

モデル名	板幅 b(mm)	長さ a(mm)	板厚 t _s (mm)	幅厚比 パラメータ R _{FS}
R067	520	364	14	0.670
R072	520	364	13	0.721
R078	520	364	12	0.781
R085	520	364	11	0.852
R094	520	364	10	0.937
R104	520	364	9	1.042
R117	520	364	8	1.172

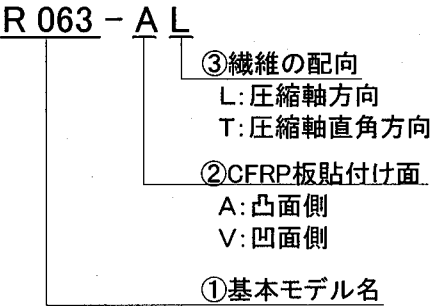


図-7 解析ケース名の付け方

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	ν_{xy}	0.30	0.38	0.34
	ν_{yz}	0.30	0.38	0.38
	ν_{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)	σ_y	235	----	----

3.2. 残留応力

鋼板の残留応力は図-6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 $\sigma_{rc}=-0.3\sigma_y$ 、引張残留応力 $\sigma_{rt}=\sigma_y$ とする。

3.3 初期たわみ

板の初期たわみは式 (13) の二重三角級数で仮定する。なお、初期たわみの最大値 $W_{0,c}$ は板幅 b の $1/150$ とする。

$$W_0 = W_{0,c} \cos \frac{\pi}{a} X \cos \frac{\pi}{b} Z \quad (13)$$

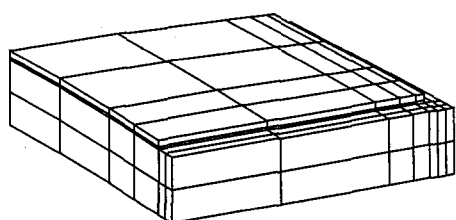
3.4 材料定数

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¹⁴⁾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。

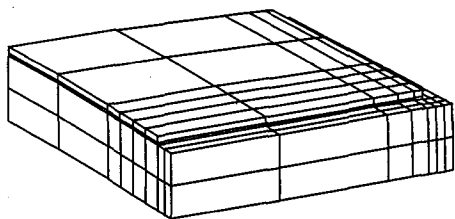
3.5 最適要素分割の検討

本解析を開始する前に、最適要素分割を把握するための予備検討を実施する。接着層では端部において応力分布に特異性がみられるため、端部近傍での要素分割をどのようにするかが大きな問題となる。ここでは、図-8に示すように初期要素分割（要素分割1）より順次 CFRP 板端部近傍の要素を細分化してゆき、応力分布が収束する要素分割を見いだす。

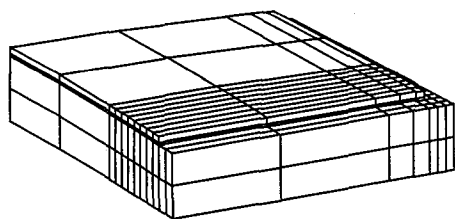
CFRP 板の材端側において、圧縮軸 X 方向に沿った接着層のせん断応力分布図を各要素分割に対して描くと図-9の通りである。これより、要素分割1では他とややずれがあるが、要素分割2から要素分割4の応力分布は同様と見なせる。したがって、本解析では要素分割3を採用するものとする。



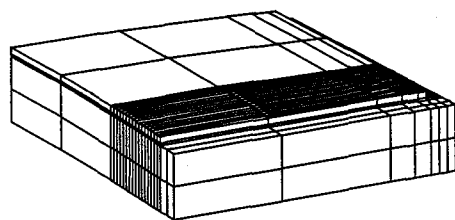
(a) 要素分割 1



(b) 要素分割 2



(c) 要素分割 3



(d) 要素分割 4

図-8 要素分割

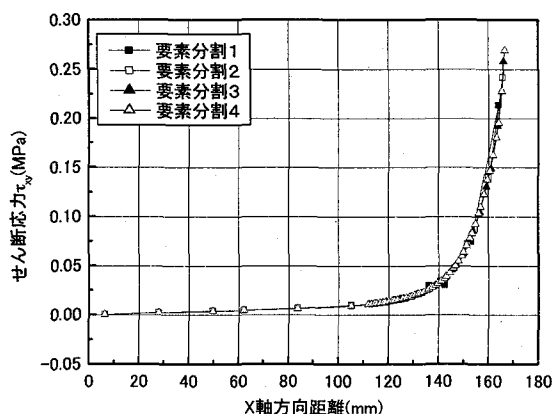


図-9 最適要素分割の検討

4. 解析結果および考察

4.1 荷重-変位挙動

荷重-変位挙動の一例を図-10(a)～(c)に示す。これらは鋼材の幅厚比パラメータが(a)0.67, (b)0.85, (c)1.17の各ケースについて板厚比を0.10とした場合の解析結果を示したものである。CFRP板を接着した場合には、鋼板のみの場合に比較して強度が上昇し、最大荷重以降の除荷曲線の傾きも若干ながら緩やかとなる。補強方法による違いをみると、繊維方向を圧縮軸方向にし、かつ初期たわみの凹面側に接着したケース(-VL)が最も補強効果が大い。これはCFRP板の圧縮軸方向剛性が繊維方向を圧縮軸直角方向にしたケース(-AT, -VT)に比較して大きく圧縮荷重の分担が大きくなるうえに、凹面側にCFRP板があると積層板としての図心が圧縮軸側に寄り偏心曲げモーメントが小さくなるためである。繊維方向が圧縮軸方向であっても凸面側にCFRP板を接着したケース(-AL)では、逆に偏心モーメントが大きくなるため、-VLほどの補強効果は発揮されない。一方、繊維方向を圧縮軸直角方向にしたケース(-AT, -VT)ではCFRP板の圧縮軸方向剛性は小さいが、圧縮直角方向剛性が面外たわみを抑止する効果により-ALと同程度の補強効果が発揮される。

4.2 接着層のせん断応力分布特性

接着層Z軸方向端部におけるせん断応力分布を図-11に示す。これはほぼ同じ荷重レベルでR085シリーズの各ケースのせん断応力を比較したものである。どのケースでも中心側ではせん断応力がほとんど0であるが、X軸方向端部において大きなせん断応力が生じており、積層板の境界層端部に応力の特異性がみられることが確認される。繊維方向の違いにより比較すると、荷重直角方向よりも荷重方向に繊維がある方が端部においてせん断応力が3～4倍程度大きくなっているが、これは補強板(CFRP板)側に流れる力がより大きくなるためだと考えられる。補強面の違いにより比較すると繊維方向が荷重方向のケースではほぼ同様のせん断応力分布を示すが、同じ荷重レベルでは凸面補強の方が若干大きなせん断応力が生じている。繊維方向が荷重に直角方向では凹面、凸面で応力分布の全体的傾向が異なる。

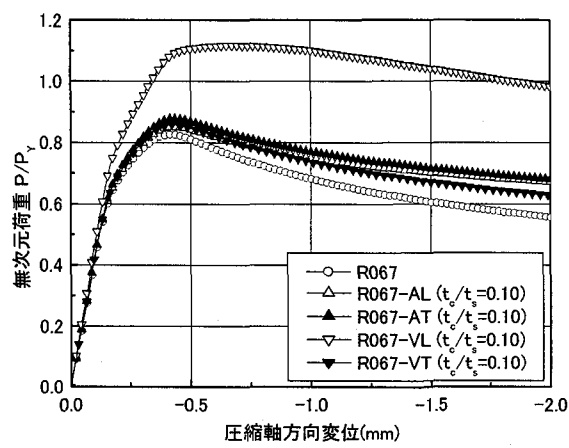
4.3 極限強度特性

図-12に鋼板の幅厚比パラメータ R_{fs} と極限強度 P_U との関係を示す。ただし、縦軸の強度は鋼材の降伏強度 P_Y で除して無次元化してある。これより4.2で述べた各ケースの極限強度の相対的な関係が解析した範囲内で一般的に成立していることが分かる。

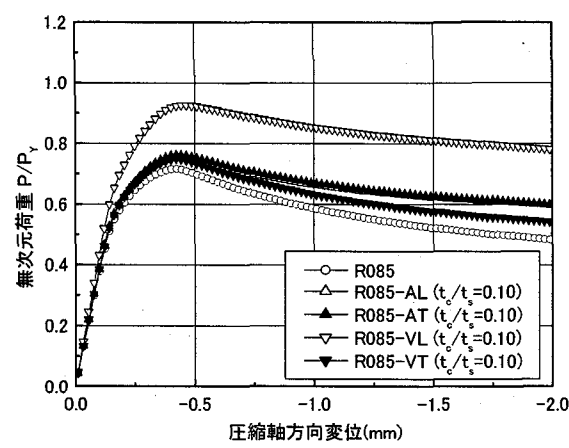
4.4 板厚比の影響

荷重-変位挙動に及ぼす板厚比 t/t_s の影響について調べるために、解析ケースR067-VLについて t/t_s を0.04から0.10の範囲で変化させ解析を実施した。その結果得られた荷重-変位曲線を図-13に示す。これより、

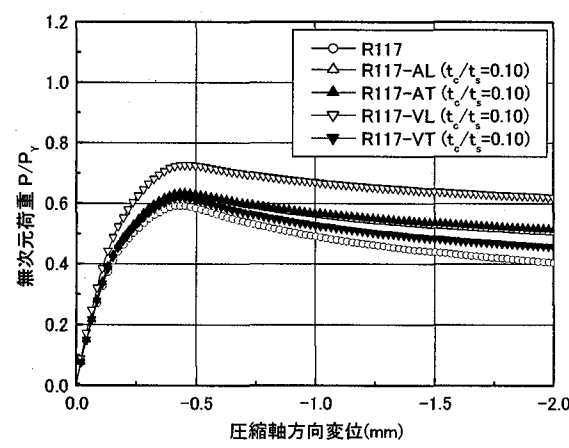
板厚比を上げると極限強度が上昇し、極限強度以降の除荷曲線の傾きも緩やかになる。このように板厚比が極限強度と変形性能に及ぼす影響は大きい。



(a) R067 シリーズ



(b) R085 シリーズ



(c) R117 シリーズ

図-10 荷重-圧縮軸変位関係

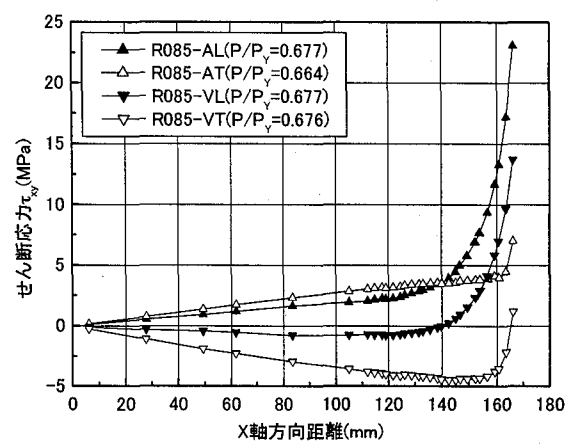


図-11 接着層のせん断応力分布

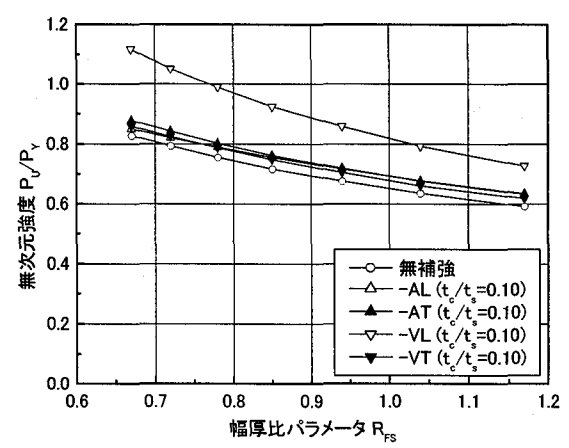


図-12 極限強度特性

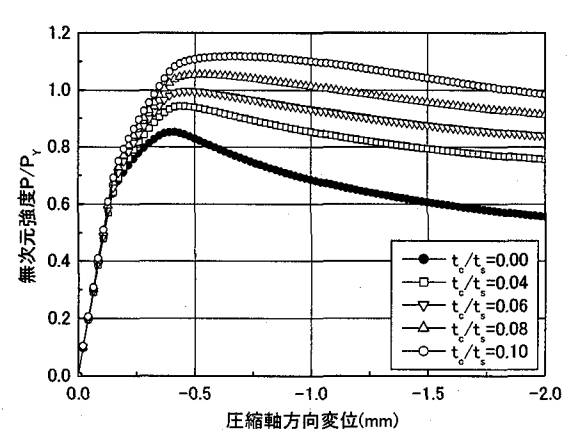


図-13 板厚比の影響 (R067-VL)

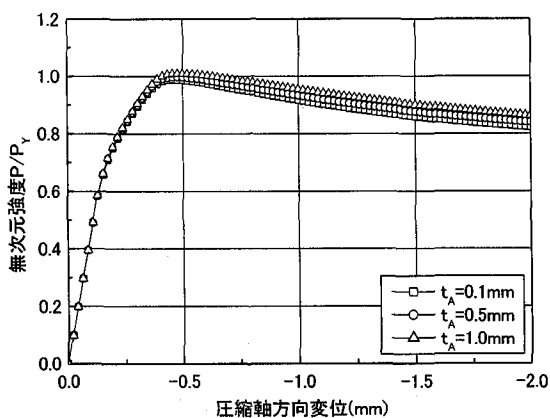


図-14 接着剤層厚の影響 (R067-VL)

4.5 接着剤層厚の影響

次に、荷重-変位挙動に及ぼす接着剤層厚の影響について調べるために、解析ケース R067-VL において接着剤層厚 t_a を変化させて解析を実施した。接着剤層厚としては 0.1mm, 0.5mm, 1.0mm の3ケースを考えた。荷重-変位曲線を3ケースで比較すると図-14 の通りである。これより、接着剤層の荷重-変位挙動に及ぼす影響は小さいことが分かる。

5. 結論

以上、本文では炭素繊維強化樹脂板 (CFRP 板) を片面に一層接着した圧縮鋼板の極限強度特性に関して、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が、得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- 1) 繊維方向が荷重方向で、凹面側に CFRP 板を接着したケースで極限強度が最も大きくなり、その他のケースでは大きな差は見られない。
- 2) 積層板の接着層端部は応力の特異性を有しており、その端部において大きなせん断応力が働いている。とくに繊維方向が荷重方向のケースでその傾向が大きく、同じ荷重レベルで比較すると繊維方向を荷重に対して直角にしたケースの3~4倍程度のせん断応力が働くことを確認した。
- 3) CFRP 板と鋼板との板厚比が極限強度に与える影響は大きい。板厚比を大きくすると極限強度が上昇するとともに、最大荷重以降の除荷勾配も緩やかになる。
- 4) 接着剤層の厚さの違いが CFRP 板を接着した鋼板の極限強度に及ぼす影響は小さい。

なお、CFRP 板を鋼製橋脚の耐震補強等に利用するためには、接着層の剥離に関する問題や端部に集中するせん断応力の低減方法、CFRP 板の破損に関する問題、繰り返し荷重を受ける場合の強度と変形能等について今後明らかにしていく必要がある。

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)，450-451，1999。
- 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返し載荷試験，第56回土木学会年次学術講演会 講演概要集，2001。
- 3) 汐待公二郎・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56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 Simitses, 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) 座古勝・松本金矢：複合材料の挙動解析，朝倉書店，1998。
- 12) 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.
- 13) 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。
- 14) 森田幹郎・金原勲・福田博：複合材料，日刊工業新聞，1988。

(2001年9月14日受付)