鋼板挿入集成材梁の有限要素弾塑性解析

Elasto-plastic FEM analysis of steel-plate-inserted glulam-beams

千田 知弘*・後藤 文彦**・薄木 征三***・佐々木 貴信****
CHIDA Tomohiro, GOTOU Humihiko, USUKI Seizo, SASAKI Takanobu

*秋田大学博士後期課程, 生産・建設工学専攻（〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1）
**博（工） 秋田大学助手, 工学資源学部土木環境工学科
***工博 秋田大学教授, 工学資源学部土木環境工学科
****博（工） 木材高度加工研究所 秋田県立大学准教授 (〒016-0876 能代市字海詠坂 11-1)

In recent years various types of hybrid structures of steels and glulams such as steel-plate-inserted glulam-beams are adopted for timber road bridges. While experimental studies are typical methods to evaluate the load-carrying capacity of the hybrid structures, experiments have limitations of scale, time, money and so on. This is the reason why we hope development of numerical studies. In this study we show one of the elasto-plastic FEM analysis of steel-plate-inserted glulam-beams using free GPL-license FEM program CalculiX. We model the glulam and steel parts by isoparametric 8 node brick elements as orthotropic materials. We can show to a certain extent that the FEM modeling well evaluate the behavior of the hybrid beams within the range before the tension side glulam breaks.

Key Words : *glulam, GLT, hybrid structure, FEM, CalculiX, GPL*
キーワード：集成材，*GLT*，ハイブリッド構造，有限要素法，*CalculiX, GPL*

1. はじめに

近年, 環境や景観への配慮, ランドマーク性など, 様々な面から木橋が見直されてきている中で, 集成材に鋼板を挿入して接着補強したハイブリッド型の構造も試みられている[1)2)3)4)]. 木材は比強度の面からは軽くて優れた材料と言えるが, 道路橋などの大型の構造物に用いるには鋼材と組み合わせて補強する必要がある. 本研究で取り上げる鋼板を集成材梁の上下縁部に鉛直に挿入接着して補強したハイブリッド梁の場合, 鋼板が曲げ剛性を増加させるとともに, 鋼板を両脇から挟む集成材が, 鋼板の横倒れを防いでおり, 鋼板と集成材がそれぞれの長所で短所を補う構造となっている.

コンクリート・鋼の複合構造などと同様に, 集成材・鋼の複合材料においても異種材料間の応力伝達を適切にモデル化することは一般に難しく, 耐荷力を予想するには多くの実験を行うことが要求される. しかし, 実験には規模や時間, ケース数, 経済上の制約があるのはもちろんだが, 例えば異種材料界面での局所的な応力状態などを測定する困難もあり, やはり数値解析による性能予測のノウハウが蓄積されることも望まれている.

最近は ANSYS[5)]や Marc[6)]など商用の汎用有限要素解析ツールが発展したこともあり, こうした汎用ツールによる各種の複合構造の解析も試みられるようになってきた. とはいえ商用の汎用ツールは高額で, ソースレベルでの検証や改良ができないという難点がある. 無償かつオープンソースの汎用ツールもいくつか公開されるようになってきているが, こうしたフリーの汎用ツールを利用して複合構造の応力解析・耐荷力解析を誰でも手軽なプラットホームで一定のレベルで行えるようになるなら, 各種の数値解析のノウハウを共有・集約していく上で有益である.

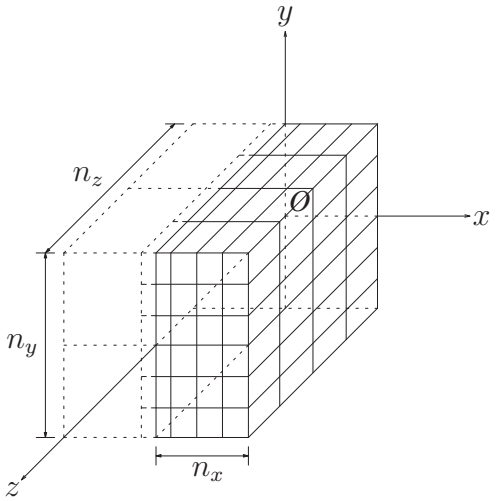
そこで本研究では, 実際に複数の鋼板挿入集成材梁の実験を行うとともに, GPL ライセンスのフリーの有限要素解析ツール CalculiX[7)]を用いて, 実験モデルの弾塑性解析が一定レベルで可能であるかどうかを確認し, 各種鋼板挿入梁の耐荷力性能について考察する.

2. 数値解析手法

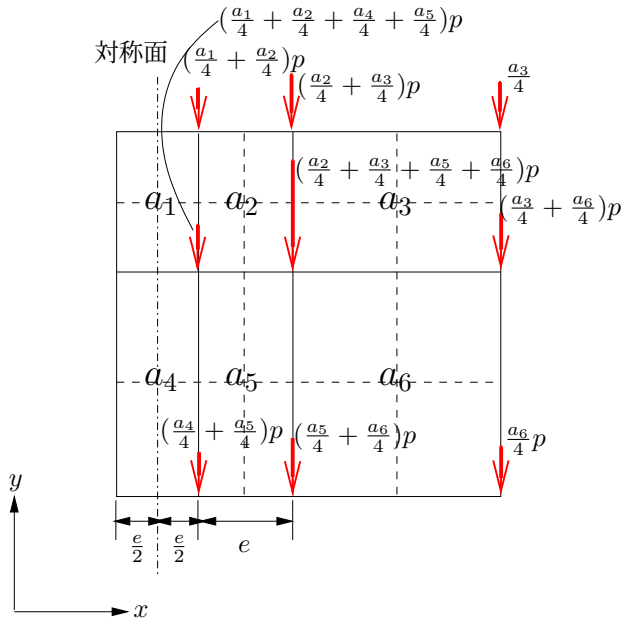
2.1 構造モデル

ここでは, 有限要素解析ツール CalculiX を用いて, 鋼板挿入集成材梁をモデル化する方法について説明する. 集成材と鋼板を部分ごとに大きさの異なる立方体で分割し, それぞれの立方体を 8 節点 24 自由度のアイソパラメトリック要素 (C3D8) でモデル化する. 集成材部材は局所的にばらつきのある材料であり，また，実験で用いた集成材は上下に強度の強い部材を配した異等級材料であるが，ここでは全体にばらつきを平均化した直交異方性材料とみなし, ラミナ一枚ごとに要素を設定するといったことは特に考慮しない. 鋼板挿入集成材梁は, 単純支持梁としての利用が想定されているが, 面内曲げに対する耐荷力を有限要素解析するのであれば, 対称条件から単純支持梁の半分を片持ち梁とみなすことも可能なので, 本解析では要素数の節約のため, 片持ち梁をモデル化してみる. 図-1 に示すように, 片持ち梁の固定端側の断面の図心を原点にとり, 板厚方向に x 軸, 桁高方向

に y 軸, 梁軸方向に z 軸をとる．弱軸について対称な断面を解析する際は yz 面で 2 分割された梁の半分を解析対象とする．



図–1 要素分割



図–2 載荷方法 (自由端面)

境界条件は, 固定端断面 (xy 面) 上にある節点の z 方向変位を拘束, 固定端 x 軸上にある節点の y 方向変位を拘束, 対称面 (yz 面）上にある節点の x 方向変位を拘束する．固定端で, 節点の x, y 方向変位を許しているのは, 対称面となる単純支持梁の中央部とみなしているためである．載荷は, 例えば中央集中荷重を受ける単純支持梁の半分を対称条件から片持ち梁として解いていると考えるならば, 片持ち梁自由端での載荷荷重は単純支持梁の反力に相当すると考えられる．そのような考えから, 自由端面の中立軸上なり下縁なりに載荷した場合, 応力が集中する載荷箇所付近の要素分割をかなり細かくしないと精度が悪くなるので, ここでは単純支持梁の反力との対応は特に考慮せずに荷重を自由端面の各節点に分散させて載荷することにする．具体的には, 載荷荷重 P を断面積 A で除した $p = \frac{P}{A}$ を, 各節点に隣接する要素の断面積に応じて載荷することとする (図-2). 例えば, 2, 3, 5, 6 要素に隣接する節点にはそれぞれ, $\frac{a_3}{4}p$〜$(\frac{a_2}{4}+\frac{a_3}{4}+\frac{a_5}{4}+\frac{a_6}{4})p$ を載荷する．ここに a_3〜a_6 は, 節点に隣接する要素の自由端面の面積である．なお, CalculiX は, 拘束された節点には載荷できないので, 断面弱軸の対称条件から図-1 のような半解析をする場合, 対称面上にある節点には載荷することができない．すると, 節点の隣接要素の面積に応じた荷重分配をする場合, yz 面付近の荷重密度が, 他の部分に比べて薄くなってしまうのを避けるため, yz 面上に隣接する要素は, 図-2 のように x 方向に隣接する要素に比べて x 方向の幅を半分 $(\frac{e}{2})$ にする．$\frac{e}{2}$ にする理由は，本解析において，同じ材料の中で基本的に等間隔にメッシュを切っているためである．なお，このモデルは，全体解析において x 方向の要素分割を奇数分割にし，その中央の要素を対称面で 2 分割したモデルと同じである．よって，このモデルを対称面で分割せずに全体解析として解いても全く同じ解析値を得られることを確認している．

2.2 材料モデル

CalculiX では, 等方性材料と異方性材料を組み合わせて解くこともできるようになってはいるようだが, 本解析において, 鋼材を等方性材料, 集成材を直交異方性材料としてモデル化すると, 計算がいつまでも収束しないという状況が見られたので, 集成材部分も鋼板部分も直交異方性材料としてモデル化し, それぞれに 9 つずつの材料定数を与える．集成材のひずみ-応力関係は次式で与えられる．

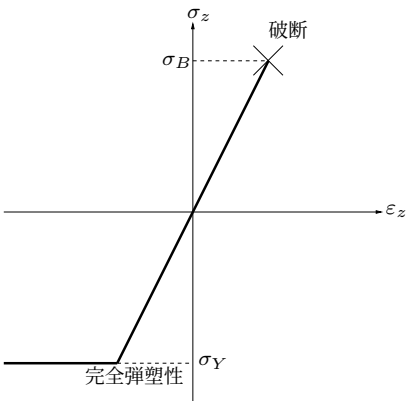
$$\begin{pmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{xz}\\ \gamma_{yz}\end{pmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0\\ -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}}\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\\ \tau_{xz}\\ \tau_{yz}\end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに，E_x，E_y，E_z は，それぞれ x，y，z 方向の圧縮・引張に対するヤング率，G_{xy}，G_{xz}，G_{yz} は，それぞれ xy 面，xz 面，yz 面のせん断変形に対するせん断弾性係数，ν_{zx}，ν_{yx} は，x 方向の単純圧縮，引張対し，それぞれ $-\frac{E_z\varepsilon_z}{E_x\varepsilon_x}$，$-\frac{E_y\varepsilon_y}{E_x\varepsilon_x}$，で定義されるポアソン比，$\nu_{xy}$，$\nu_{zy}$ は，y 方向の単純圧縮，引張対し，それぞれ $-\frac{E_x\varepsilon_x}{E_y\varepsilon_y}$，$-\frac{E_z\varepsilon_z}{E_y\varepsilon_y}$，で定義されるポアソン比，$\nu_{xz}$，$\nu_{yz}$ は，z 方向の単純圧縮，引張対し，それぞれ $-\frac{E_x\varepsilon_x}{E_z\varepsilon_z}$，$-\frac{E_y\varepsilon_y}{E_z\varepsilon_z}$，で定義されるポアソン比である．

集成材の各材料定数は，$E_x = E_y = \frac{E_z}{25}$，$G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = \frac{E_z}{15}$，$\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yx} = \nu_{yz} = 0.016$，$\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.04$ と近似することができる[8]ので，直交異方性材料である集成材であっても，軸方向ヤング率 E_z が得られれば，すべての材料定数が近似できる．鋼材に付いては，E，ν，$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ の値を 9 つの材料定数に代入している．実際に CalculiX で鋼材だけの梁を，

等方性材料として解析した場合，直交異方性材料として解析した場合を比較すると，両者の値は有効数字 5 桁の精度を得られる．

CalculiX では Von Mises-Huber の降伏条件を用いて塑性を考慮することができる．集成材は, 圧縮に対しては塑性域があるが, 引張に対しては破断までほぼ線形の挙動を示す．CalculiX では, このように圧縮・引張に対して非対称な材料モデルを設定することはできないため, ここでは少しでも実際のモデルに近づけるべく, 梁の中立軸より圧縮側と引張側とで集成材の材料モデルを区別することにする．中立軸より圧縮側の集成材には図-3 のような完全弾塑性でモデル化し, 引張側は線形弾性体とする．引張側の破断荷重は, 出力ファイルの軸応力の値を見て判断する．鋼板については, 通常の完全弾塑性モデルを用いる．

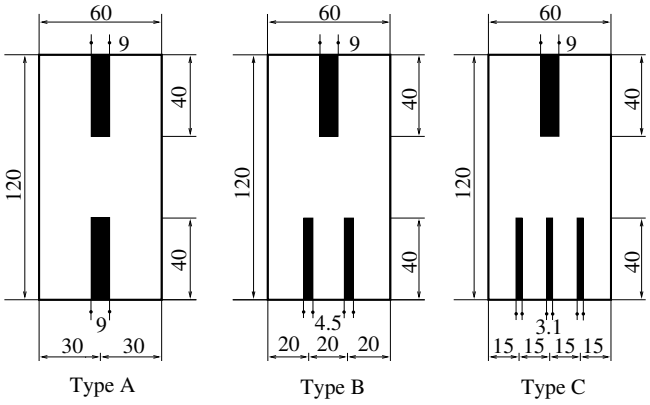


図–3 集成材の弾塑性モデル

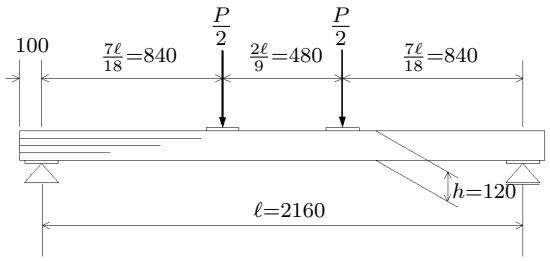
2.3 比較モデル

本研究では, このような数値モデル化の妥当性を検討するため, 実際に実験に用いられた集成材のみの梁と鋼板挿入集成材梁を 2.1, 2.2 節の手法でモデル化し解析してみる．実験の詳細については別報[9] に示されているので, ここでは寸法や形状についてのみ簡単に説明する．集成材は JAS 規格 E96.2 のスギを用い, 鋼材は SS400 を用いた．梁の外形は図-4 に示すように, 幅 $b = 6$cm, 桁高 $h = 12$cm, 軸長 $\ell = 216$cm の集成材梁の中央上下に, $b_s \times h_s = 0.9 \times 4$cm の鋼板を挿入したもの (Type-A) を基準とし, この梁と鋼板の部分の断面二次モーメントが等しくなるように, 圧縮側の鋼板はそのままに, 鋼板を引張側に二本 (Type-B), 三本挿入 (Type-c) した 3 タイプと, 鋼板を挿入しない梁の計 4 タイプのモデルを用意し実験を行った．具体的には, 二本挿入する場合は, 幅 $b_s \times h_s = 0.45 \times 4$cm の二本の鋼板を, 集成材の幅 6cm を三等分するように両端から 2cm の箇所に挿入する．三本の場合は, $b_s \times h_s = 0.31 \times 4$cm の三本の鋼板を, 集成材の幅 6cm を四等分するように中央に一本, その左右 1.5cm の箇所に挿入する．鋼板はエポキシ系接着剤 (ペンギンセメント#1031) で接着しているため, 実際には鋼板を挿入した溝の幅は, 鋼板の幅よりも 2mm 程度広くなっている．

荷重は, 集成材のみの梁においては載荷部のめり込みを防ぐため図-5 のような二点載荷とし，各鋼板挿入集成材梁においてはスパン中央部に一点載荷とする．ひずみはスパン中央部にひずみゲージを貼り測定し, たわみに関しては中央部のたわみを測定する．なお, 荷重試験は, 供試体が破壊するまで載荷する．



図–4 3 種の実験体の断面図 (単位 mm)



図–5 二点載荷の場合の載荷方法 (単位 mm)

2.4 収束性

本解析で用いるような立体要素は回転自由度を持たないため, 梁の曲げなどを解析する場合には, じゅうぶんな要素分割を行わないと精度が悪い．2.3 節のような二点載荷の集成材のみのモデルと梁中央に一点載荷した場合の集成材のみのモデルのそれぞれについて 2.1 に示したように梁の半分を片持ち梁としたものを解析し，要素分割数とたわみの収束の関係を調べる．2.2 節と 2.3 節の曲げ試験により求めた集成材の曲げヤング率は 4.1 に詳述するが，ここでは，要素分割数とたわみの収束の関係を調べたいだけなので，集成材の材料定数は, E96.2 材の公称値を参考に，軸方向 (z 方向) の引張・圧縮ヤング率 $E_z = 9.43$GPa, 軸直角方向 (x, y 方向) の引張・圧縮ヤング率 $E_x = E_y = 0.3772$GPa, せん断弾性係数 $G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 0.629$GPa, ポアソン比 $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yx} = \nu_{yz} = 0.016$, $\nu_{zx} = \nu_{zy} = 0.4$ とする．自由端に 2.1 節のように $P = 2000$N を分散させて載荷し, x, y, z 方向の要素分割数 n_x, n_y, n_z を変化させた場合の自由端部図心のたわみを表-1 に示す．なお, 一点載荷の場合と二点載荷の場合では精度に差が無かっ

たので，ここでは一点載荷の場合のみを示す．

表–1 n_x, n_y, n_z を変化させた場合の集成材部材のたわみ

分割数	たわみ v (cm)		
n_x, $\frac{n_y}{2}$, $\frac{n_z}{10}$	$n_x \times 24 \times 120$	$6 \times n_y \times 120$	$6 \times 24 \times n_z$
1		1.07795	1.03049
2	1.09052	1.08507	1.07299
3	1.09046	1.08740	1.08177
4	1.09042	1.08802	1.08516
5	1.09038	1.08906	1.08690
6	1.09035	1.08945	1.08796
7		1.08973	1.08868
8		1.08965	1.08919
9		1.09008	1.08959
10		1.09019	1.08989
11		1.09028	1.09015
12		1.09035	1.09035

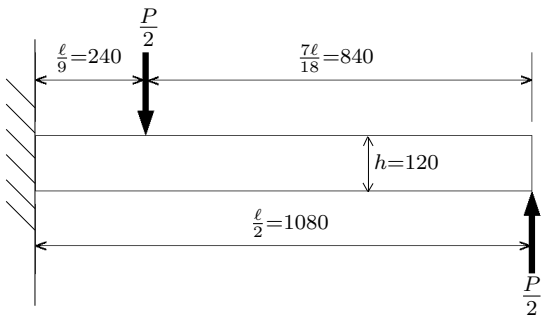
$n_x \times n_y \times n_z = 6 \times 24 \times 120$ の要素分割で，たわみは有効数字 4 桁の精度で 1.090cm に収束している．この値は，せん断変形によるたわみを考慮しない初等梁理論によるたわみ 1.030cm よりは 6% ほど小さい．一方，せん断変形によるたわみをせん断補正係数 k を $\frac{5}{6}$ として次式で考慮した[10]たわみは 1.088cm となり，ほぼ一致している．

$$v = \frac{P\ell^3}{3EI} + \frac{P\ell}{GkA} \tag{2}$$

つまり，FEM で求めた梁のたわみにはせん断変形による影響が 6% 程度あると考えられる．

2.5 解析モデル

2.3 節に示した集成材のみの梁と各種の鋼板挿入集成材梁を，2.1, 2.2 節に示したように図-6 のような片持ち梁としてモデル化し解析してみる．



図–6 二点載荷の場合の片持ち梁のモデル

実験で得られた集成材のみの梁の荷重-たわみの関係から軸方向ヤング率 E_z を求めてみる．図-6 の梁の右端のたわみは次式で与えられる．

$$v = \frac{679(\frac{P}{2})(\frac{\ell}{2})^3}{2187E_bI} \tag{3}$$

集成材は局所的にばらつきの大きい材料なので，弾性域であっても荷重-たわみ曲線は完全な線形とはならない．そこで弾性域だけのデータを取りだし，式-(3) を用いて曲げヤング率 E_b を最小二乗法で算定する．さて，せん断変形を考慮した片持ち梁のたわみは，軸方向ヤング率 E_z を用いて次式のように表せる．

$$v = \frac{679(\frac{P}{2})(\frac{\ell}{2})^3}{2187E_zI} + \frac{7(\frac{P}{2})(\frac{\ell}{2})}{9GkA} \tag{4}$$

式-(3) と式-(4) を等値することで，曲げヤング率 E_b から軸方向ヤング率 E_z が求まる．実験では集成材のみの梁の破壊試験を 3 ケース行ったが，1 ケースは横ねじれ座屈してしまったと思われるので，残る 2 ケースの結果からそれぞれ軸方向ヤング率 E_z を求め，それぞれの値を用いて解析する．

鋼材 (SS400) の材料定数は，ヤング率 $E = 210$GPa, せん断弾性係数 $G = 80.8$GPa, ポアソン比 $\nu = 0.3$ とする．ただし，これらの材料定数は 2.2 節で述べたように，CalculiX に入力する際には，直交異方性材料の 9 成分の材料定数として与えている．要素分割数は，2.4 節で考察したように，集成材のみの材料で有効数字 4 桁の精度が得られる $n_x \times n_y \times n_z = 6 \times 24 \times 120$ を用いる．ただし，局所的な応力の大きさを知りたい場合などは，要素分割数を適宜増やして解析を行う．各モデルにおける具体的な分割数は，後述する．

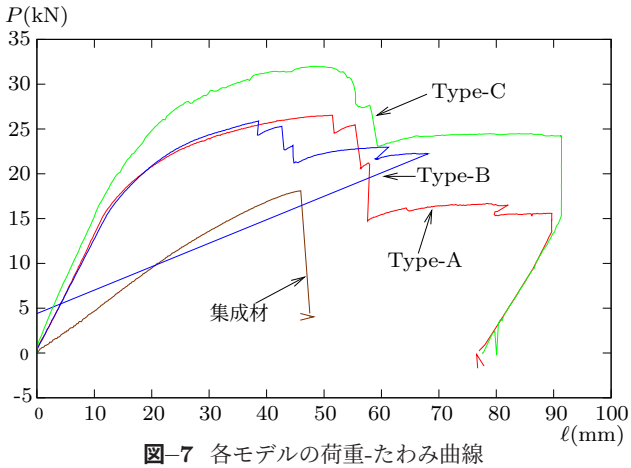
無載荷状態の中立軸より圧縮側の集成材部分の要素の降伏応力 σ_{yg} は，集成材のみの梁の実験値の荷重-たわみ曲線の弾性域の線形性が失われる箇所の荷重を用いて，次式に代入して 2 ケースそれぞれで σ_{yg} 算出し，応力-ひずみ関係は完全弾塑性モデルを用いる．

$$\sigma_{yg} = \frac{M}{I}y = \frac{7P\ell}{36I}y \tag{5}$$

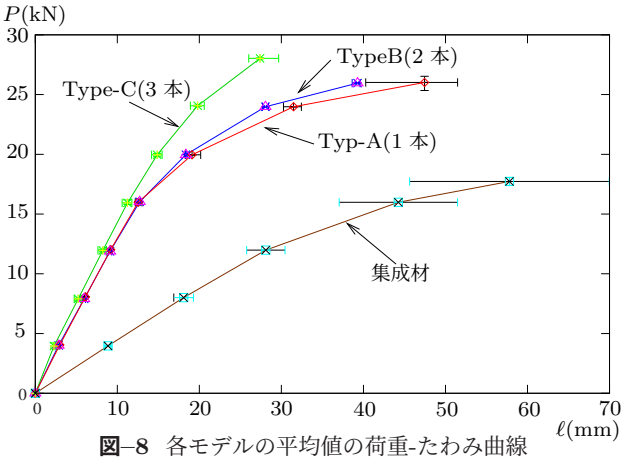
引張側の集成材の破断については，集成材のみの梁の 2 ケースそれぞれの破弾荷重時の最大応力を引張曲げ強度 σ_{bg} とし，各鋼板挿入集成材梁の解析を行う際は，いずれかの節点の軸方向応力がその値に達したときに破断したと判定することとする．一方，鋼材は，引張側・圧縮側ともに完全弾塑性モデルを用い，降伏応力 σ_{ys} は，Type-A，B，C の挿入鋼板厚によって異なるミルシートの値：309MPa(9mm), 317MPa(4.5mm), 380MPa(3.1mm) を用いた場合と，すべての板厚に対して公称値 235MPa を用いた場合とを比較する．

3. 実験結果

2.3 節で比較対象とした実験モデルについては，別報[9] に詳述してあるが，ここでは簡単に結果に触れておく．鋼板挿入集成材梁 Type-A, Type-B, Type-C の破壊までの荷重-たわみ曲線を集成材のみの結果とともに図-7 に，各モデルの平均値の荷重-たわみ曲線を最大値と最小値を誤差棒で表したものを図-8 に示す． 破壊試験は 1 つのタイプにつき 3 ケースずつ行ったが，ここでは代表的な 1 ケースについて示す．集成材のみの梁と比べると，鋼板挿入された梁ではそのぶん剛性が上



図–7 各モデルの荷重-たわみ曲線



図–8 各モデルの平均値の荷重-たわみ曲線

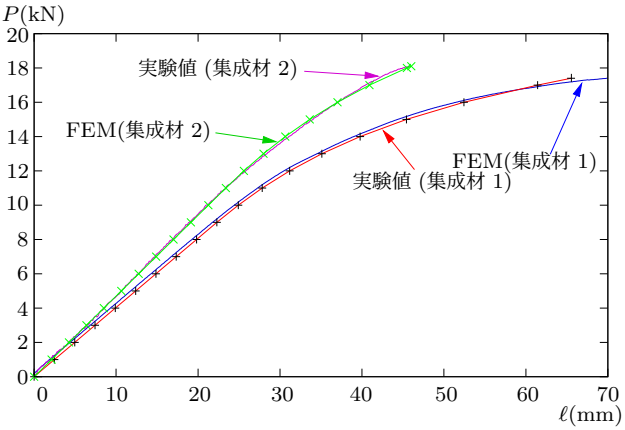
がっているが，引張側の集成材縁部に破断が生じる時のたわみ自体は，集成材のみの梁と特には変わらない．例えば Type-B では，集成材のみの梁よりも小さいたわみで破断が始まっている．もっとも集成材のみの梁では，引張側の縁部に破断が発生した途端に一気に耐力を失って破壊するのに対し，鋼板挿入された梁では，縁部の集成材に破断が生じてもすぐには破壊せずに，さらに深部の集成材部分の破断が生じるまで荷重に抵抗する．このため，鋼板挿入集成材梁では，最終的に耐力を失うまで，集成材が破断するごとに図のような階段状の曲線を示しながら破断に至る．つまり，鋼板挿入は，梁の剛性を上げるだけではなく，破壊を緩やかにする効果を有している．図には全ての試験ケースを示していないが，Type-A，Type-B では，集成材の破断が始まった後の耐力にばらつきがあり，中には集成材の縁部が破断した直後にすぐに耐力を失う梁もあった．一方，Type-C では，集成材の破断が始まった後の耐力のばらつきは小さく，いずれの試験ケースでもじゅうぶんな耐力を保ってから破壊に至った．Type-A, Type-B については，弾性域での挙動，降伏点，破断荷重が類似しており，Type-C だけが挙動がやや異なる．各モデルは剛性が等しくなるように鋼板挿入されているが，Type-C のみ，なんらかの原因で剛性が上がってしまったのではないかと考えられる．鋼板は同じ SS400 でも，薄いほど降伏点が高くなる傾向があるため，Type-C の方が鋼板の降伏点が高くなるとしても，線形弾性域で既に剛性が高いのには他の原因があろう．これについては 4. 章で，解析結果から，この原因を考察してみることにする．図-8 を見る限り，鋼板の枚数が増えれば，各モデルのばらつきは減る傾向にあり，剛性も上がっているようだ．

4. 実験モデルの弾塑性解析

4.1 集成材梁のみの弾塑性解析

2.1~2.5 節に示した手法で，2.3 節の集成材のみの梁の比較モデルを CalculiX で弾塑性解析する．

まず，2.5 で示した方法で実験に用いられた 2 本 (以降，集成材 1，集成材 2 と呼ぶ) の集成材梁の軸方向ヤング率 E_z と降伏点 σ_{yg} を求めると，集成材 1 では軸方向ヤング率 $E_z = 9.553$GPa・降伏点 $\sigma_{yg} = 26.366$MPa，集成材 2 では軸方向ヤング率 $E_z = 11.13$GPa・降伏点 $\sigma_{yg} = 32.55$MPa という値がそれぞれ得られた．以後この二つの値を用いて弾塑性解析を行う．集成材 1 の破壊荷重 17.4kN まで解析を行った結果と，集成材 2 の破壊荷重 18.1kN まで解析を行った結果を，それぞれに対応する実験値とともに図-9 に示す．



図–9 集成材のみの梁の実験値と解析値の荷重-たわみ曲線

本解析では，2.1 節に示したように，実験に用いた集成材部材が異等級材料であり，かつ集成材が元来局所的なばらつきを持つ材料であるといったことを考慮しておらず，また，2.5 節に示したように実験から得られた曲げヤング率だけを用いて，直交異方性材料の 9 成分を近似で求めて解析を行った．それにもかかわらず，集成材 1 の実験値と解析値，集成材 2 の実験値と解析値は，ともに高い相関性が得られている．図からは読みとりづらいが，集成材 1 の実験値の荷重は 0 から始まっておらず切片を持ち，その分わずかではあるが解析値と平行移動したような一定誤差があるが，これは実験の際，載荷装置と測定装置がコンピューターで連動しておらず，測定装置の起動は，載荷装置が供試体に接触したと目視できたときに手動でスタートさせたために生じたタイムラグのためである．実験値を 0 から始まるように図を調整し重ねることも可能だが，今回は実験値と解析値の挙動を追うことと，曲げ強度を FEM 解析値から推定することが目的なので，無理に合わせることはしていない．集

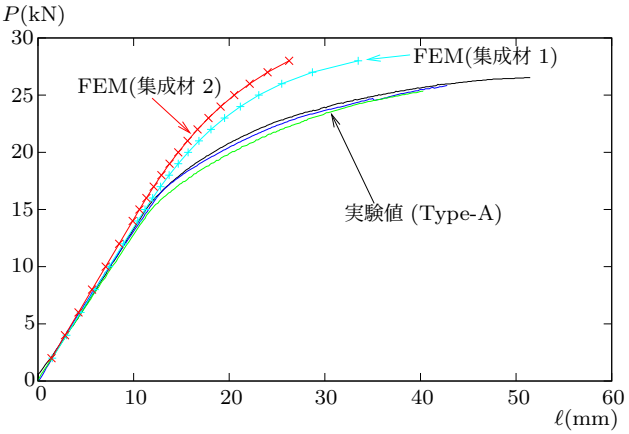
成材 1 の実験値と解析値においては，破断荷重より 1kN ほど低い荷重から実験値と解析値の間に少し大きめの誤差が表れるが，これは実験で用いられた集成材は実際には異等級材料であるので，降伏することによって断面が減少する過程で，外側の強度の強い部材が全て降伏し，剛性が下がったためと考えられる．それ以外においては弾性域はもちろんのこと，塑性域においても FEM 解析は実験をじゅうぶんにモデル化できている．よって，次の 4.2 節において集成材 1 と集成材 2 の解析値を用いて鋼板挿入の 3 つのモデルに対し弾塑性解析を試みる．なお，集成材 1 では解析値における引張側の最大軸方向応力 σ_{max} は 74.53MPa，集成材 2 では，65.55MPa が得られが，これらを破断応力とする．せん断応力に関しては，各々 4.15MPa，2.96MPa という値が断面減少後の引張側の中立軸から得られるが，供試体はせん断破壊していないことから，比較に用いるのみとする．

4.2　実験値を用いた鋼板挿入集成材梁の弾塑性解析

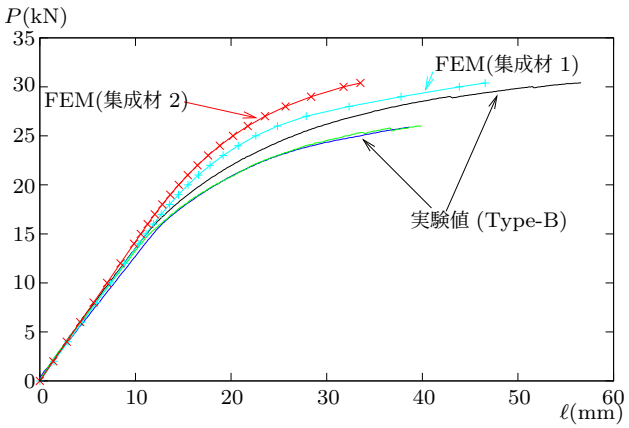
2.1~2.5 節に示した手法と，4.1 節で得られた材料定数を用いて，2.3 節の鋼板挿入集成材梁の比較モデルを CalculiX で弾塑性解析する．

上下に鋼板が一本ずつ挿入された Type-A の 3 ケースの実験値と，集成材 1，2 の材料定数を用いた Type-A の FEM 解析値を図-10 に，上に一本，下に二本鋼板が挿入された Type-B の 3 ケースの実験値と，集成材 1，2 の材料定数を用いた Type-B の FEM 解析値を図-11 に，上に一本，下に三本鋼板が挿入された Type-C の 3 ケースの実験値と，集成材 1，2 の材料定数を用いた Type-C の FEM 解析値を図-12 に示す．

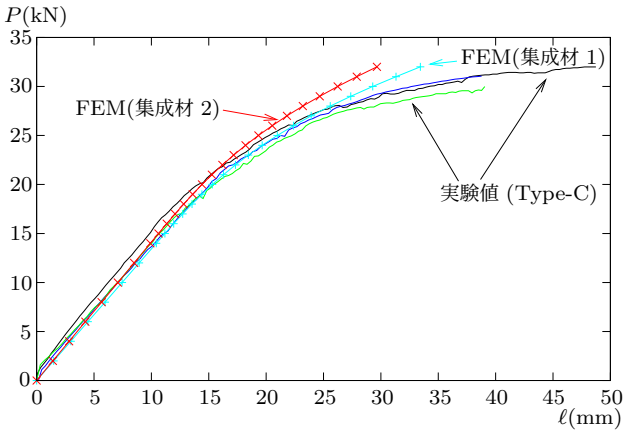
まず目に付くのが，Type-A では実験値と解析値が鋼板が降伏したのを境に，著しく乖離していくのに対し，Type-B，Type-C と下部挿入鋼板の数が多くなるにつれて，実験値と解析値の誤差が減っている．これは，支点部分のめり込みの影響だと思われる．集成材の曲げ破壊試験を行う場合，JAS 規格では支点部のめり込みを防ぐために二点載荷で行うように定められているが，鋼板挿入集成材の曲げ試験に関する規定は存在せず，試験機の容量 (100kN) 内でせん断破壊ではなく，確実に曲げ破壊を発生させたいこと，鋼板挿入により剛性が上りめり込みは生じないと予想されたこと，などから今回は一点載荷で行った．各図をみる限り，全てのタイプにおいて，鋼板が降伏する前までは，確かに鋼板挿入の効果でめり込みは生じていないようだが，鋼板が降伏し，剛性が落ちるとめり込みを生じるようだ．Type-A から Type-C につれて誤差が小さくなる理由は，鋼板挿入条件の違いによる影響も考えられるが，2.5 節で述べたように，鋼板の板厚によって Type-A と Type-B は近い降伏点 (309MPa と 316MPa) であるのに対し，Type-C は大幅に大きい降伏点 (380MPa) であることから，鋼板の板厚によって降伏点が異なることの影響の方が強いだろう．実際，図-12 において，解析値と実験値が乖離しはじめる直前の 26kN での解析値をみてみると，3 本挿入



図–10　荷重-たわみ曲線 (Type-A)



図–11　荷重-たわみ曲線 (Type-B)



図–12　荷重-たわみ曲線 (Type-C)

されている鋼板のうち，外側の二本が降伏していないのに対し，乖離しはじめる 27kN では，全ての鋼板が降伏している．Type-B の実験値のうち一本だけが高い剛性を維持しているが，これはたまたまめり込みが少なかったためと思われる．これらのことを検証するためには，載荷方法を二点載荷とするなどし，再実験する必要があるだろう．しかし，Type-C においては実験値と解析値は鋼板が全て降伏するまでは，集成材の圧縮側が降伏した後もかなり近い挙動を示しており，集成材のみの梁同様，鋼板挿入集成材梁においても FEM 解析は実験をある程度モデル化できていると思われる．

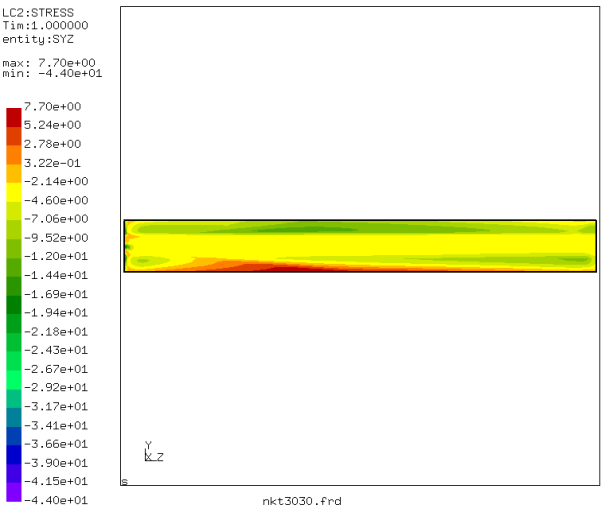
さて，集成材 1，集成材 2 の材料定数を用いた解析値にだけ目を向けると，いずれの場合も集成材のみの梁

のときと比べ，集成材の材料定数の違いによる影響が軽減されている．とはいえ，弾性域においては，両者の1.5MPa ほどのヤング率の差が，図上で確認できるほど全体の剛性に影響している．この二つのヤング率に対する弾性域での剛性と，実験値の剛性を比べると，Type-A と Type-B の剛性はいずれのケースも集成材 1 のものに近く，Type-C では，2 ケースが集成材 1 に 1 ケースが集成材 2 に近い剛性を示す．3. 章で Type-C の剛性が高いことに触れたが，集成材ほどのばらつきを持つ材料を用いた場合，鋼板挿入によりばらつきを減らすことができても，剛性に無視できないほどの差を生じさせるためと思われる．

降伏後においては，集成材梁のみの梁の場合，破断時に 1.5 倍ほどあったたわみの差が，鋼板を挿入することによってかなり縮小していることが分かる．

4.1 節で得られた破断応力を用いて，各 Type の解析値の破断荷重を求めてみる．なお，ここでは，あくまでも性能予測として破断荷重を求めており，応力が一致する荷重を直接求めることはしていない．Type-A においては，集成材 1 の場合，荷重 27kN で σ_{max} が 65.4MPa，28kN で 79MPa，集成材 2 の場合，27kN で 59MPa，28kN で 66MPa となり，ともに 27kN と 28kN の間で破断荷重に達する．Type-B においては，集成材 1 の場合，28kN で 74.0MPa，29kN で 88.5MPa，集成材 2 の場合，28kN で 62.8MPa，29kN で 70.8MPa となり，どちらも 28kN を少し越えたくらいで破断荷重に達する．Type-C においては，集成材 1 の場合，33kN で 70.2MPa，34kN で 74.5MPa，集成材 2 の場合，31kN で 62.4MPa，32kN で 66MPa となり，ともに他のタイプよりも大きな荷重まで抵抗する．しかし，破断荷重における各タイプの違いにおいても，鋼板の降伏点の違いによるものと考えられる．

さて，せん断応力について考察してみる．ここでは一例として，集成材 2 を用いた Type-C の，破断荷重より約 2kN 少ない荷重 30kN 載荷時の対称面 (yz 面) からみた τ_{yz} の分布を CalculiX 付属のグラフィックツール CalculiX GraphiX で可視化したものを図-13 に示す．図の左側の固定端では，中立軸を拘束しているため非常に高い値がでてしまっているが，拘束条件の影響がでないと思われる，固定端から $\frac{1}{3}$ 以上右の部分に着目してみると，梁の中央部にある集成材部のせん断応力 τ_{yz} は，集成材 2 の破断荷重時の最大せん断応力 2.98MPa を越える 3MPa 以上の値になっている．この値は自由端側にいっても変わらない．破断荷重の直前の 31kN 載荷時には，この値は 4MPa 以上を優に越える．この傾向は集成材 1，2 にかかわらず，すべてのタイプで見受けられ，破断荷重より数 kN 低い荷重ですでに集成材のみの梁の破断時の最大せん断応力 τ_{yz} を越えてしまっている．これは，鋼板挿入により梁全体の剛性は集成材のみの梁に比べて 4 倍も大きくなるが，せん断剛性の方は，集成材のみの梁に比べてそれほど大きくはならないためにせん断変形が集成材部分に集中しているせいかもしれない．例えば，鋼板部分と集成材部分で平均化した曲げ剛性と，集成材部分のせん断剛性とを用いて式-4 のたわみを計算すると，式-4 の第 2 項のせん断変形によるたわみは，第 1 項の曲げ変形によるたわみの 18% 程度にもなる[3]．つまり，鋼板挿入集成材梁は剛性を非常に上げる効果はある反面，せん断変形の大きい異方性の強い梁だと言えるかもしれない．

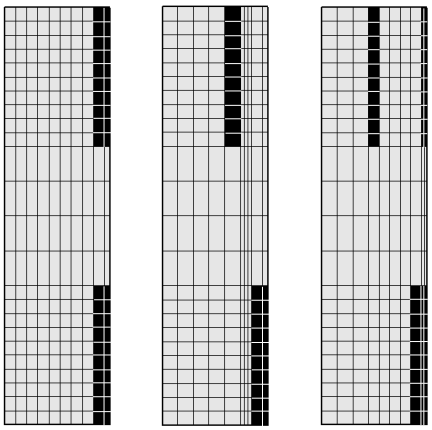


図–13 対称面 (yz 面) からみた τ_{yz}

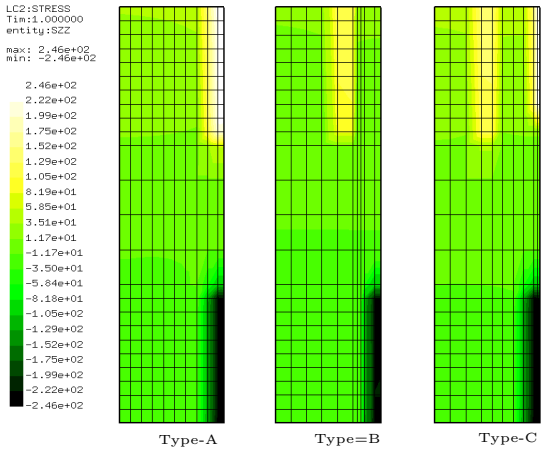
4.3 公称値を用いた鋼板挿入集成材梁の弾塑性解析

Type-A, B, C の鋼材配置の違いによる応力分布を比べてみたいが，鋼板の降伏点の違いを排除するため，すべての板厚の鋼板の降伏点に公称値を用いた解析について，引張側集成材降伏時の応力分布を比較してみる．Type-B, Type-C において, 引張側の鋼板に挟まれた集成材の応力分布をより詳しく見るために，すべてのモデルの x 方向の要素分割数を 6 から 10 に増やし, 全体で $n_x \times n_y \times n_z = 10 \times 24 \times 120$ で行う．ただし，いずれの要素分割数でも荷重-たわみ曲線には特に差は現れない各 Type ごとの具体的な要素分割を図-14 に示す．引張側の集成材が降伏するモデルにおいて，引張側の集成材の縁部が降伏したと思われる荷重 20kN 時の各モデルの固定端の軸方向応力 σ_z と面内曲げで生じるせん断変形に対応するせん断応力 τ_{yz} の分布を, CalculiX 付属のグラフィックツール CalculiX GraphiX で可視化し，図-15～ 図-16 に示す．なお，色スケールのグラデーションは，白黒印刷を考慮して，cgx 本来のものを修正して描画している．なお，片持ち梁として解析したため，図の上部が引張側となる．鋼板挿入梁では，鋼板と集成材のひずみ分布はさほど変わらない[11] ので，軸応力は，ヤング率の大きい鋼板部分が引張側も圧縮側も最も大きくなる．鋼板に隣接する集成材部分は，圧縮側でやや応力の集中が見受けられるようでもあるが，挿入鋼板の数によって特に大きな差が現れているようには見受けられない．一方，せん断応力 τ_{yz} の分布に関しては，やはり鋼

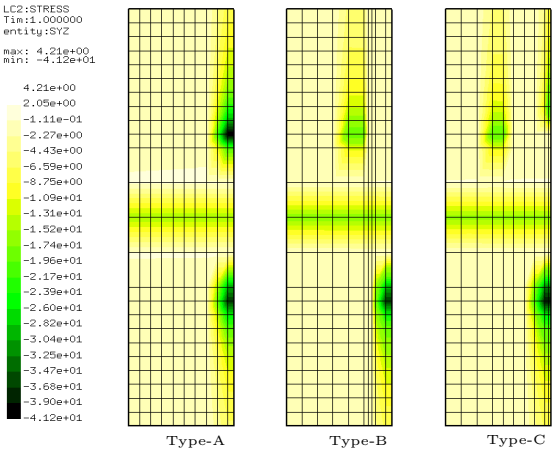
板部分が応力が大きくなっているが，引張部の挿入鋼板の枚数が多い方が，鋼板部への応力の集中が緩和されているのが分かる．



図–14 各種梁の具体的な要素分割



図–15 固定端に働く軸応力 σ_z



図–16 固定端に働くせん断応力 τ_{yz}

5. まとめ

本研究では，鋼板挿入集成材梁の引張側集成材破断までのメカニズムを，フリーの有限要素解析ツール CalculiX を用いて弾塑性モデル化し，破壊試験で用いられた集成材のみの梁と 3 種の鋼板挿入集成材梁の解析を行った．集成材のみの梁の解析では，2 本の実験値より軸方向ヤング率 E_z，降伏点 σ_{yg} をそれぞれ求め，それらの値を用いて FEM 解析を行ったが，線形弾性域の挙動，降伏してからの非線形域の挙動ともに，解析値と実験値は高い相関性が得られた．その解析値を用いて行った 3 種の鋼板挿入集成材梁の解析では，実験において鋼材降伏後に支点付近でめり込みが生じており，線形弾性域では各梁ともに解析値と実験値は高い相関性が得られたが，降伏後の挙動を比較するには至らなかった．しかし，めり込みの少なかった Type-C の非線形域での挙動で解析値と実験値は高い相関性が得られたことから，鋼板挿入集成材梁においても，FEM 解析値は実験値をある程度モデル化できていると思われる．今後は鋼板挿入集成材の実験においても，めり込みが生じないと思われる二点載荷で実験を行うなどの工夫が必要であろう．また，本モデルでは，集成材の縁部破断後の断面減少による軟化は表現できないので，実験結果に見られるような，集成材縁部破断後に段階的に耐力を失うような挙動をモデル化するには，断面欠損のモデルなどを導入していくことが今後の課題である．とはいえ，完全にフリーな汎用ツールだけを用いても，複合構造に対して今回 示したレベルの有限要素解析を行い一定の数値予測ができることが示せた．

参考文献

1) 佐々木貴信・薄木征三・後藤文彦・飯島泰男：集成材・鋼床版ハイブリッド木橋の温度・ひずみ測定に関する考察，構造工学論文集，Vol.49A
2) KISS Lajos，USUKI Seizo,SASAKI Takanobu：Experimental and analytical study on steel deck-glulam beam hybrid birdge behavior, 構造工学論文集, Vol.52A
3) GOTOU Humihiko, CHIDA Tomohiro, USUKI Seizo：Estimation of shear modulus by FEM bending simulation of wood beams，WCTE 2006, Conference Proceedings, 9th World Conference on Timber Engineering, 2006 (CD-ROM).
4) KISS Lajos, USUKI Seizo,GOTOU Humihiko：Experimental verification of ultimate bending strength of glulam-steel hybrid beam, J. Structural Eng., JSCE, Vol.50A, pp.891-896, (2004).
5) http://www.ansys.com/
6) http://www.loc.gov/marc/
7) http://www.calculix.de/
8) 日本建築学会：木構造計算基準・同解説
9) 薄木征三，千田知弘，佐々木貴信，後藤文彦：集成材-複数挿入鋼板型ハイブリッド桁の曲げ弾塑性挙動に関する実験と解析, 構造工学論文集，Vol.53A, 2007.
10) 千田知弘・後藤文彦・平間匠・橋本崇史・薄木征三：せん断変形を伴う梁の横ねじれ座屈, 第 5 回 木橋技術に関するシンポジウム論文報告集
11) 薄木征三・後藤文彦・キッシュ ラオシュ：挿入リブ鋼板で補剛した集成材の曲げ耐荷力, 構造工学論文集，Vol.49A

(2006 年 9 月 11 日 受付)