

シアリング接合を用いた杉集成材と鋼板によるハイブリッド部材の
力学的挙動に関する実験研究EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR
OF GLULAM TIMBER-STEEL COMPOSITE MEMBER USING SHEAR-RING CONNECTOR堀井 健史*¹, 坂田 弘安*², 竹内 徹*³, 鈴木 達人*⁴, 中村 博志*⁵

Takeshi HORII, Hiroyasu SAKATA, Toru TAKEUCHI,

Tatsuto SUZUKI and Hiroshi NAKAMURA

Massive amount of Japanese cedar trees planted in Japan in 1950's are recently ready to be cut for usage, and various techniques utilizing such domestic cedar are required. However, for cedar timber has less stiffness and strength than Douglas fir, combination with steel to provide composite members will be one of the effective methods to expand the structural variations. Thin steel plate is sandwiched between two cedar glulams using shear-ring connectors and bolts. This study is aimed at developing this composite member.

Axial compression tests and bending tests were conducted to determine the compression and bending characteristics.

We proposed equations for estimating the strength and buckling mode, and demonstrated their prediction capability with sufficient accuracy.

Keywords: Composite Member, Shear-Ring connector, Compression Tests, Bending Tests, Buckling

ハイブリッド部材, シアリング接合, 部材軸圧縮実験, 部材曲げ実験, 座屈

1. 序

1.1 研究の目的と背景

1950年代に植樹した国産杉材が大量伐採時期にあるが、消費は国内需要1億m³の20%以下に低迷し、森林荒廃の原因となっている。従来の主要消費先であった在来構法住宅が減少し、多様な構法が普及している中で、米松などと比べて剛性・耐力が低い為、大型構造物などの多様な構法に対し競争力が発揮できない。そこで近年、杉材を鋼材とを組み合わせてハイブリッド化し、部材としての性能向上を図ろうとする試みがなされている。

既往の研究では、楠らが杉材の曲げ剛性を用いて鋼板の座屈を拘束することの有効性を実験により示している^{1)~3)}。杉材と鋼板の接合には接着剤やボルト接合を用いており、接着剤を用いて杉材と鋼板を一体化した場合においては、鋼板の圧縮降伏耐力と同等の耐力を発揮できることを報告している。

このような木材と鋼板のハイブリッド部材を設計する上で次の2つの考え方がある。

- ① 鋼板が全ての軸力・曲げを負担し、木材は座屈拘束材としての働き。
 - ② 鋼板と木材が共に軸力・曲げを負担し、複合材として働く。
- ハイブリッド部材を屋根材に使用した場合、母屋材・仕上げ材を

木質材と接合する場合が多く、本研究では②の方針に基づくハイブリッド部材の提案を行う。木質材と鋼板の接合方式には接着剤やボルト接合の他にドリフトピン接合など種々あるが、本研究ではその一例として、組立・分解が容易でせん断力の伝達機構が比較的単純なシアリング接合を取り上げ、他の接合方式にも展開できる一般耐力評価式の誘導を試みる。

ハイブリッド部材に対して、部材軸圧縮・部材曲げ実験を行い、座屈拘束効果を中心とした力学的挙動を把握した上で、耐力評価式を提案する。

1.2 ハイブリッド部材

1.2.1 ハイブリッド部材の構成

図1に本研究で取り扱うハイブリッド部材を示す。ハイブリッド部材は、スパン30mの張弦梁上弦材を想定し、2/5スケールとして試験体及び外力の設定を行う。端部から鋼板に伝達された軸力・曲げは、シアリングを介して杉集成材に伝達され、鋼板・杉

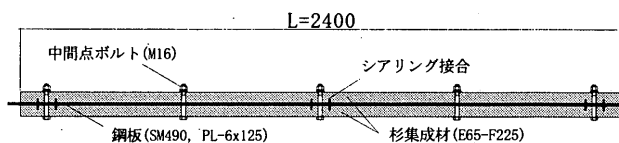


図1 ハイブリッド部材(2/5スケール)

*¹ 元 東京工業大学 大学院生・修士(工学)
(現 大成建設)

*² 東京工業大学建築物理研究センター 助教授・工博

*³ 東京工業大学建築学科 助教授・博士(工学)

*⁴ 新日本製鐵(株) 工修

*⁵ 新日本製鐵(株) 博士(工学)

Former Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Assoc. Prof., S.E.R.C., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Build. Engng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Building Construction Div., Nippon Steel Co., M. Eng.

Building Construction Div., Nippon Steel Co., Dr. Eng.

集成材が複合材として外力に抵抗する。但し、鋼板と杉集成材の剛性の比率より殆どの外力は鋼板で伝達され、このため杉集成材のクリープに対して特別な配慮が不必要となり、鋼板の座屈補剛材としての機能が主体となる。

1.2.2 シアリング接合

杉集成材と鋼板の接合部を図2に示す。鋼板の表裏面にSTK400鋼管(外径76.3, 管厚3.2, 深さ18mm, 以下, シアリングと呼ぶ。)をすみ肉溶接し, 杉集成材にはNC加工により図に示す大きさのリングざぐりを設ける。リングざぐりにシアリングを嵌め込みバネ座金が閉じるまで, M16の六角中ボルトで締め付けて集成材と鋼板を一体化させる。この接合方式をシアリング接合と呼ぶことにする。

2. シアリング接合部要素実験

2.1 シアリング接合部要素の概要

シアリング接合の剛性に関する基本的なデータを得る為に, シアリング接合部要素実験を行った。表1に試験体に用いた材料の力学的性質, 表2に試験体一覧, 図3に試験体を示す。パラメータは, ①支圧部以下の長さ h , ②集成材の材厚 t , ③载荷である。各パラメータ毎3体ずつ実験を行い, ボルト接合のみの試験体も3体実験を行った。実験結果はこの3体の平均を示す。

支圧部以下の長さ h は, 図3に示すようにリングざぐりの外縁間内の距離とし, $h=200, 648\text{mm}$ の2種類とした。集成材の材厚

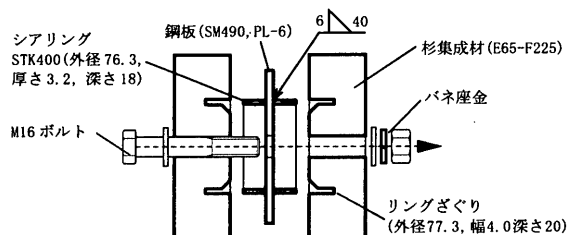


図2 杉集成材と鋼板の接合部

表1 材料の力学的性質

鋼板引張試験 SM490	破断伸び 22[%]	降伏強度 433 [MPa]	引張強度 551 [MPa]
集成材曲げ試験 杉E65-F225	曲げ弾性係数 [GPa]	曲げ強さ [MPa]	含水率[%] 気乾比重
X-X	7.0	43.0	14.0
Y-Y	6.0	42.0	0.38

X-X: ラミナ積層面に直交に载荷, Y-Y: ラミナ積層面に平行に载荷

表2 接合部要素試験体一覧

試験体	载荷	支圧部以下の長さ	集成材断面
01 Rh200t45-T	単調引張载荷	200	2□-45x150
02 Rh200t45-C	単調圧縮载荷	200	2□-30x150
03 Rh200t30-C		648	2□-45x150
04 Rh648t45-C		200	2□-45x150
05 ボルト接合			

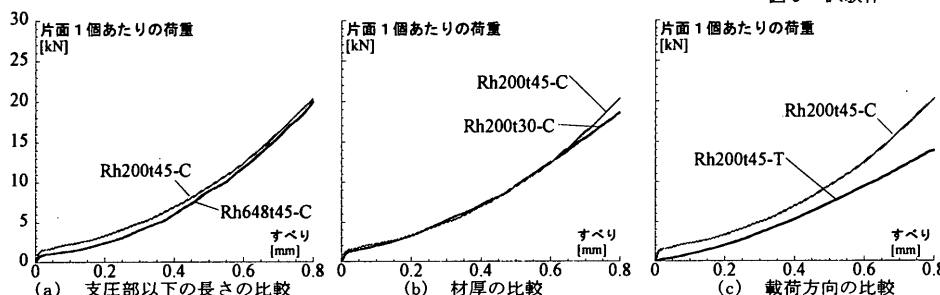


図5 シアリング1個あたりの荷重-すべり関係

t は $t=30, 45\text{mm}$ の2種類とした。Rh200t45-Tは単調引張载荷を行い, その他の試験体については全て単調圧縮载荷を行った。载荷速度は 0.5mm/sec 以下とした。

図4に示すようにシアリング間における鋼板の変位 Δ_1 と集成材の変位 Δ_2 を計測し, シアリング1個あたりのすべり Δ を式(1)で算出した。

$$\Delta = \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{2} \quad \dots (1)$$

2.2 実験結果

図5にシアリング片面1個あたりの荷重すべり関係を示す。式(1)で算出したすべりは, 上下のシアリング接合のすべりの平均値であるが, 実験では, すべりは片側だけが進行する傾向が見られた。ここでは, Rh200t45-Cを標準試験体とし, 他の試験体と比較した。

[支圧部以下の長さと材厚(図5(a), (b))]

支圧部以下の長さ h で比較すると, Rh200t45-CとRh648t45-Cとでは, 剛性はほぼ同じであった(図5(a))。Rh200t30-CとRh200t45-Cで材厚 t で比較すると, 剛性に顕著な違いは見られなかった(図5(b))。このことから, 本研究ではハイブリッド部材におけるシアリング接合部の剛性は, 支圧部以下の長さ h 及び材厚に関わらず一定とする。

[圧縮载荷と引張载荷(図5(c))]

単調圧縮载荷を行ったRh200t45-Cと単調引張载荷を行ったRh200t45-Tを比較すると, 単調引張载荷の場合, 剛性・耐力は単調圧縮载荷の場合に比べ低い(図5(c))。これより, 引張荷重を受け, 縁空きが短い箇所では注意をすることがわかる。

以上のことから, ハイブリッド部材におけるシアリング接合部の剛性 K_s は図6に示すように圧縮荷重を受ける場合は, Rh200t45-Cの最大耐力の80%に対する割線剛性 K_{rc} とし, 引張荷重を受ける場合は, Rh200t45-Tの最大耐力に対する割線剛性 K_{rt} とする。また, ボルト接合部の剛性も, 片面1個あたりの荷重すべり関係から直線域の剛性 K_b とする。

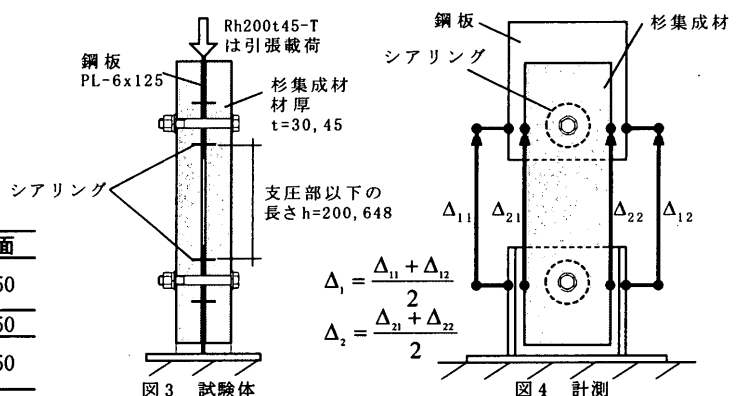


図3 試験体

図4 計測

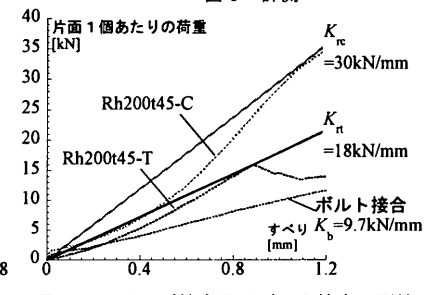


図6 シアリング接合及びボルト接合の剛性

3. 部材圧縮実験

図7に示す実験装置で単調圧縮載荷(0.01mm/sec)を行った。

3.1 試験体

材料の力学的性質を表3に示し、表4に試験体一覧、図8に試験体を示す。パラメータは集成材の曲げ剛性とシアリング接合数である。鋼板の降伏荷重 P_{ys} と2枚の集成材を一体とみなしたオイラー荷重 P_{cr-i} とを式(2)、(3)で計算した場合に、 $P_{cr-i}/P_{ys}=0.4, 0.8, 1.6$ の3種を用意した。なお、式(3)中の P_{cr-d} は集成材を別々とみなしたオイラー荷重である。シアリング接合を等間隔3, 4, 7箇所配置した。IIIBはシアリング接合を等間隔3箇所配置し、中間点でボルト接合したものである。加力端および反力端の鋼板を挟み込んだ剛性の高い加力治具と端部集成材との隙間は両端部とも5mmとした。

$$P_{ys} = \sigma_{ys} \cdot t_s \cdot b_s \quad \dots (2)$$

$$P_{cr-i} = \frac{\pi^2 EI_i}{L^2}, \quad P_{cr-d} = \frac{\pi^2 EI_d}{L^2} \quad \dots (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{但し, } EI_i &= 2 \cdot E_w I_{wd} + E_s I_s + E_w A_w \frac{e^2}{2} \\ EI_d &= 2 \cdot E_w I_{wd} + E_s I_s \\ I_{wd} &= \frac{b_w \cdot h_w^3}{12}, \quad I_s = \frac{b_s \cdot t_s^3}{12} \\ A_w &= h_w \cdot b_w, \quad A_s = t_s \cdot b_s, \quad e = h_w + t_s \end{aligned} \right\} \quad \dots (4)$$

但し σ_{ys} :鋼板の降伏強度, E_s :鋼板のヤング係数, E_w :集成材の曲げ弾性係数, t_s :鋼板の材厚, b_s :鋼板の幅, h_w :集成材の成, b_w :集成材の幅

3.2 実験結果概要

表5に部材軸圧縮実験結果一覧を示し、IVシリーズとIII-1.6の荷重材軸変形関係、最大耐力時の面外変位、最大耐力時の座屈性状をそれぞれ図9、図10、図11に示す。

[初期剛性]

初期剛性は全試験体で鋼板の剛性と同等であった。 $P_{cr-i}/P_{ys}=0.8, 1.6$ では、軸変形がすすむにつれ剛性が高まる傾向が見られた。シアリング接合数が多いほどこの傾向は顕著に見られた。シアリング接合が利き始めて、集成材も軸力を負担したためと考えられる。

[座屈モード (図10, 11)]

軸圧縮力を受ける場合の座屈モードは大きく分けて、全体で弾性座屈を起こす場合と、端部シアリングよりも外側で局所的な座屈を起こす場合の2つに分類できた。

1) 全体で弾性座屈 (図11(a), (b))

$P_{cr-i}/P_{ys}=0.4, 0.8$ は、全体で弾性座屈を起こして剛性が低下した。III-1.6は図11(d)に示すように、端部シアリングと中央部シアリングの間で鋼板が高次波形の座屈を起こしたが、後に耐力評価を行う際には全体で弾性座屈を起こしたものとして分類する。

2) 端部で局所的な座屈 (図11(c))

IIIB-1.6, IV-1.6は図11(c)に示すように端部のシアリングと加力治具の間で、鋼板が局所的な座屈を起こし、急激に耐力が低下した。

[最大耐力]

1) 全体で弾性座屈

全体で弾性座屈を起こした試験体の耐力は、集成材を一体とみなしたオイラー荷重 P_{cr-i} と別々とみなしたオイラー荷重 P_{cr-d} の間の値 $0.4P_{cr-i} \sim 0.8P_{cr-i}$ である。図12に最大耐力とシアリング接合数の関係を示す。シアリング接合数を増やすほど座屈拘束が有効に働いたことが分かるが、シアリング接合数が4程度で頭打ちになるこ

表3 材料の力学的性質

鋼板引張試験	破断伸び	降伏強度	引張強度
SM490	22[%]	407 [MPa]	517 [MPa]
集成材曲げ試験 杉E65-F225	表1に同じ		

表4 部材軸圧縮実験試験体一覧

試験体名	鋼材 SM490	杉集成材 E65-F225	P_{cr-i}/P_{ys}	シアリング接合数
III-0.4	PL-6x125 $\lambda_s=1333$	2□45x150 $\lambda_s=65$ $\lambda_d=133$	0.4	等間隔3箇所
IIIB-0.4				等間隔3箇所+中間点ボルト
IV-0.4				等間隔4箇所
VII-0.4				等間隔7箇所
III-0.8	PL-6x125 $\lambda_s=1333$	2□60x150 $\lambda_s=49$ $\lambda_d=100$	0.8	等間隔3箇所
IIIB-0.8				等間隔3箇所+中間点ボルト
IV-0.8				等間隔4箇所
VII-0.8				等間隔7箇所
III-1.6	PL-6x125 $\lambda_s=1333$	2□76x150 $\lambda_s=39$ $\lambda_d=77$	1.6	等間隔3箇所
IIIB-1.6				等間隔3箇所+中間点ボルト
IV-1.6				等間隔4箇所

P_{cr-i} :集成材を一体とみなしたオイラー荷重, P_{cr-d} :集成材を別々とみなしたオイラー荷重,
 P_{ys} :鋼板の降伏荷重, λ_s :鋼板の細長比, λ_i :集成材を一体とした細長比, λ_d :集成材を別々とした細長比

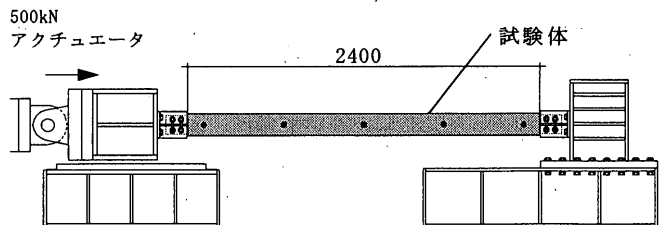


図7 載荷装置 [部材圧縮実験]

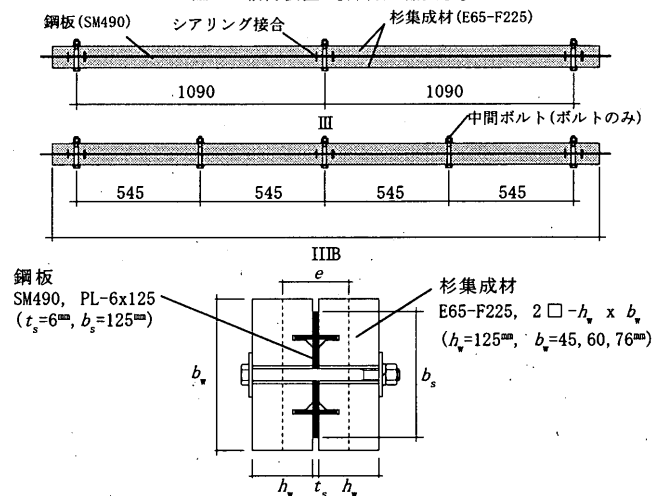


図8 試験体 [部材圧縮実験]

表5 部材軸圧縮実験実験結果一覧

試験体	座屈性状	最大耐力 [kN]
III-0.4	全体で弾性座屈	62
IIIB-0.4	全体で弾性座屈	54
IV-0.4	全体で弾性座屈	59
VII-0.4	全体で弾性座屈	78
III-0.8	全体で弾性座屈	121
IIIB-0.8	全体で弾性座屈	130
IV-0.8	全体で弾性座屈	177
VII-0.8	全体で弾性座屈	181
III-1.6	シアリング間で高次波形の座屈	180
IIIB-1.6	端部で局所的な座屈	235
IV-1.6	端部で局所的な座屈	239

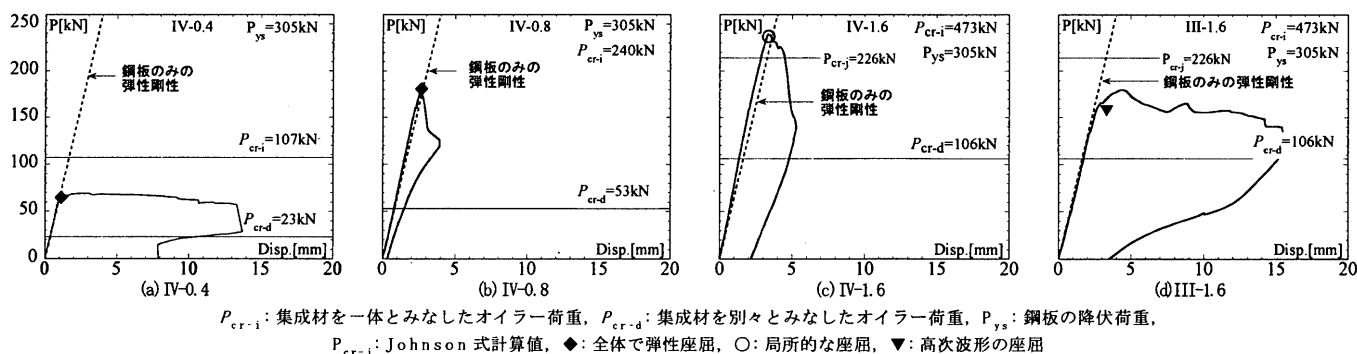


図9 荷重材軸変位

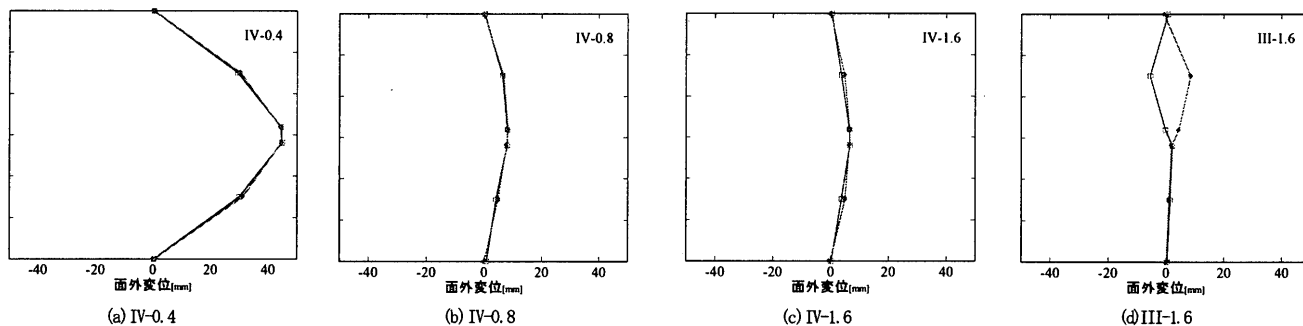


図10 最大耐力時の面外変位

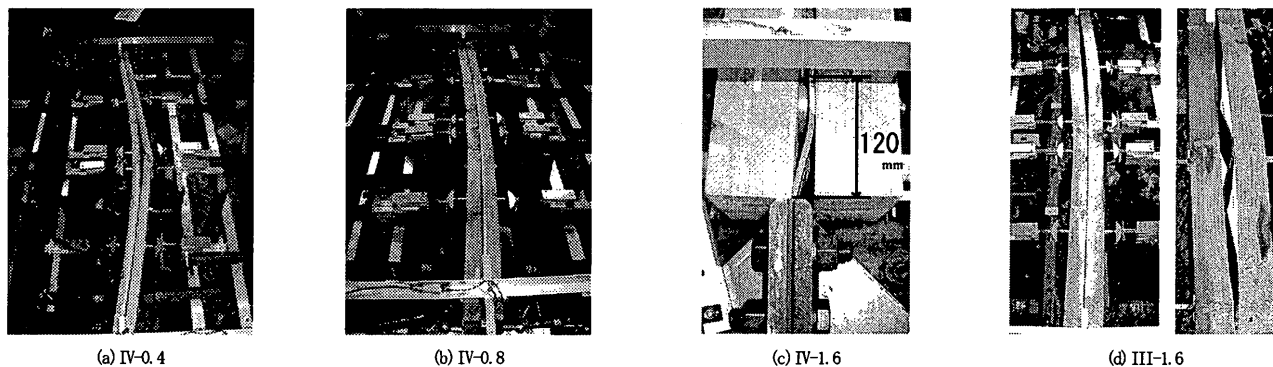


図11 座屈性状

とも分かる。 $P_{cr-i}/P_{ys}=0.4, 0.8$ において、III と IIIB の最大耐力を比較すると顕著な差が見られないが、IV の最大耐力は、IIIB の 1.3 倍程度となっている。このことから、シアリング接合を用いた方が、ボルト接合を用いた場合よりも座屈拘束効果が向上することが分かる。

2) 端部で局所的座屈

端部で局所的な座屈を起こした IIIB-1.6 と IV-1.6 の最大耐力は、座屈性状から境界条件を図 13 のように加力治具側を固定端、シアリング接合側を水平移動自由、回転固定であると考え、Johnson の放物線式⁴⁾で 226kN と算定できた(図 9(c), P_{cr-j})。つまり、端部の局所的な座屈に対し、シアリング接合で回転は拘束できるが、杉集成材自体に、局所的な座屈を拘束する効果を期待できない事が分かる。[軸力の分布]

図 14 に IV-1.6 の载荷荷重 50kN 時における軸力分布を示す。軸力は杉集成材、鋼板の上下面で計測したひずみ度から求めた。鋼板端部に集中した軸力が部材内に向かうにつれ減少し、集成材の負担する軸力が増加する傾向が見られた。部材中央部では载荷荷重の 10 ~ 15% 程度を集成材が負担した。図 15 に示す鋼板側面のひずみ度分布からは、鋼板端部に集中したひずみ度が端部シアリングを介して極所的に減少する傾向が見られた。

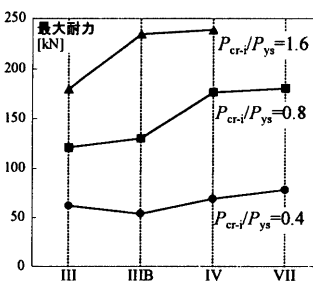


図12 最大耐力とシアリング接合数

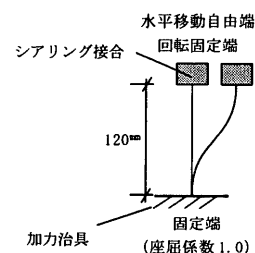


図13 端部の境界条件

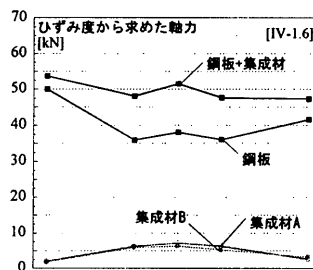


図14 軸力分布

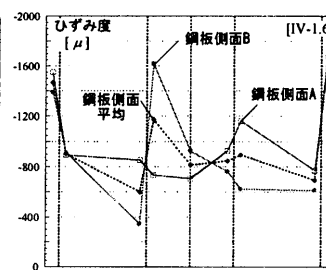


図15 鋼板側面のひずみ度分布

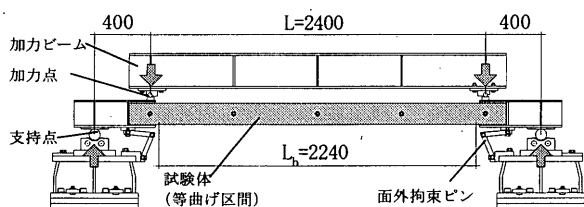


図 16 実験装置

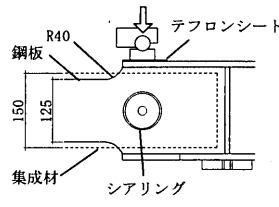


図 17 加力点付近詳細

表 6 材料の力学的性質

鋼板引張試験	破断伸び	降伏強度	引張強度
SM490	22[%]	433 [MPa]	551 [MPa]
集成材曲げ試験	表1に同じ		
杉E65-F225			

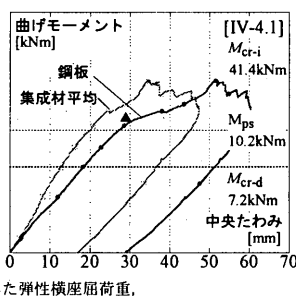
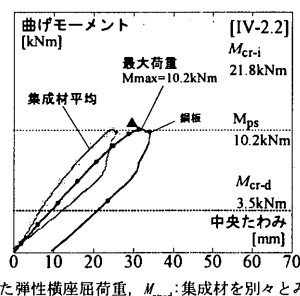
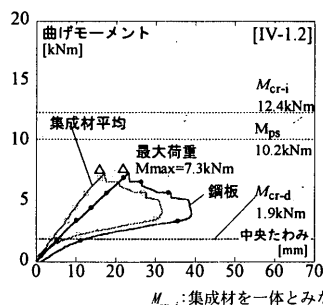
表 7 部材曲げ実験試験体一覧

試験体	鋼板	集成材	M_{cr-i} [kNm]	M_{cr-d} [kNm]	シリング接合数
IIIB-1.2	SM490	E65-F225	12.4	1.9	3箇所+中間点ボルト
IV-1.2	PL-6x125	2口-28x150	$\lambda_i=125$	$\lambda_d=277$	4箇所
IIIB-2.2	$\lambda_i=1333$	2口-35x150	21.8	3.5	3箇所+中間点ボルト
IV-2.2	M_{ps}		$\lambda_i=102$	$\lambda_d=222$	4箇所
IIIB-4.1	$=10.2[kNm]$	2口-45x150	41.4	7.2	3箇所+中間点ボルト
IV-4.1			$\lambda_i=81$	$\lambda_d=172$	4箇所

λ_i : 鋼板の細長比, λ_i : 集成材が一体とした細長比, λ_d : 集成材が別々とした細長比 M_{ps} : 鋼板の全塑性モーメント, M_{cr-i} : 集成材が一体とした弾性横座屈荷重, M_{cr-d} : 集成材が別々とした弾性横座屈荷重

表 8 部材曲げ実験結果一覧

試験体	座屈モード	座屈変形時の 曲げモーメント[kNm]
IIIB-1.2	全体で横座屈	6.8
IV-1.2	全体で横座屈	7.2
IIIB-2.2	端部鋼板が局所的な座屈	11.1
IV-2.2	端部鋼板が局所的な座屈	10.2
IIIB-4.1	端部鋼板が局所的な座屈	10.5
IV-4.1	端部鋼板が局所的な座屈	10.5



M_{cr-i} : 集成材を一体とみなした弾性横座屈荷重, M_{cr-d} : 集成材を別々とみなした弾性横座屈荷重,

M_{ps} : 鋼板の全塑性モーメント, Δ : 全体で弾性横座屈, $\blacktriangle$: 局所的な座屈

図 18 曲げモーメント-中央たわみ関係

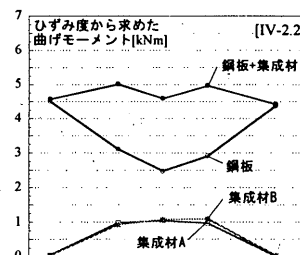


図 19 曲げモーメント分布
[IV-2.2, 荷重6kNm時]

4. 部材曲げ実験

図 16 に示す装置で 4 点曲げ実験を行った。図 17 に示すように力には鋼板のみに加え、等曲げ区間 2400mm を試験体とした。加力点直下にはシリング接合を配置した。

4.1 試験体

表 6 に材料の力学的性質を、表 7 に試験体一覧を示す。パラメータは集成材の曲げ・ねじり剛性とシリング接合数である。集成材を一体とした弾性横座屈荷重を M_{cr-i} 、鋼板の全塑性モーメントを M_{ps} とし、式(5)、(6)で計算した場合に $M_{cr-i}/M_{ps}=1.2, 2.2, 4.1$ となる 3 種の断面を用意した。

$$\left. \begin{aligned} M_{cr-i} &= \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_i \cdot GJ_i} \sqrt{1 + \pi^2 \chi_i} \\ M_{cr-d} &= \frac{\pi}{L_b} \sqrt{EI_d \cdot GJ_d} \sqrt{1 + \pi^2 \chi_d} \end{aligned} \right\} \quad \dots (5)$$

$$\left. \begin{aligned} J_i &= qp_i^3 \left[\frac{16}{3} - 3.36 \frac{p_i}{q} \left(1 - \frac{p_i^4}{12q^4} \right) \right] \\ J_d &= 2 \cdot qp_d^3 \left[\frac{16}{3} - 3.36 \frac{p_d}{q} \left(1 - \frac{p_d^4}{12q^4} \right) \right] \end{aligned} \right\} \quad \dots (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \chi_i &= \frac{E_w I_{wi}}{GJ_i} \left(\frac{2p_i}{2L_b} \right)^2, \quad \chi_d = 2 \cdot \frac{E_w I_{wd}}{GJ_d} \left(\frac{2p_d}{2L_b} \right)^2 \\ q &= \frac{b_w}{2}, \quad p_i = \frac{t_s + 2h_w}{2}, \quad p_d = \frac{h_w}{2} \end{aligned} \right\}$$

但し、 G : 集成材のせん断剛性 ($E_w/15$)⁵⁾

また、座屈長さは、図 17 に示すように鋼板端部に R40 の加工をしており、鋼板平行部の長さ $L_p=2240$ mm とした。シリング接合数はシリング接合を等間隔 4 箇所配置した IV シリーズ及び、等間隔 3

箇所配置し、中間点においてボルトのみの接合部を併用した IIIB シリーズとした。

4.2 実験結果

表 8 に部材曲げ実験結果一覧を、図 18 に曲げモーメント-中央たわみ関係を示す。中央たわみは集成材、鋼板各々別々に計測したものである。鋼板のみに力を加えた為、鋼板の変位が先行した。

[座屈モードと座屈荷重]

曲げを受ける場合の座屈モードは大きく分けて、全体で弾性横座屈を起こす場合と、端部で局所的な座屈を起こす場合に 2 つに分類できた。

1) 全体で弾性横座屈

$M_{cr-i}/M_{ps}=1.2$ シリーズは曲げモーメント 6.3kNm で、全体で弾性横座屈を起こして最大耐力に達した(図 18 Δ)。座屈荷重は集成材を一体とみなした場合の 50%程度である。

2) 端部で局所的な座屈

$M_{cr-i}/M_{ps}=2.2$ と 4.1 シリーズは共に鋼板端部が局所的な座屈をして剛性が低下した(図 18 $\blacktriangle$)。座屈荷重は鋼板の全塑性モーメント $M_{ps}=10.2$ kNm と同等であった。

[曲げモーメントの分布]

図 19 に IV-2.2 の荷重 6kNm 時における曲げモーメントの分布を示す。曲げモーメントは、鋼板及び集成材の上下面で計測したひずみ度から計算した。鋼板の負担する曲げモーメントは部材内に向かうにつれて減少し、集成材の負担する曲げモーメントが増加する傾向が見られた。部材中央部では集成材が全体曲げモーメントの 15% を負担した。

5. 耐力評価式

ハイブリッド部材の曲げ剛性は、シアリング接合部のせん断変形の影響を受け、荷重条件・部材の位置により一定ではない。そこで、図20に示すように、集成材と鋼板が単位長さ当り K のせん断剛性によって接合されている場合を考える。後藤⁸⁾、松本⁹⁾と同様に、集成材の負担する軸力 Q の増分 dQ は集成材と鋼板のすべり s によって生じ、すべり s の変化分 ds/dx は鋼板と集成材の接触面におけるひずみ度の差に等しいと仮定して、集成材の負担する軸力 Q に関する微分方程式とハイブリッド部材の曲げ剛性を導出する。このハイブリッド曲げ剛性を用いた弾性圧縮座屈及び横座屈に対する耐力評価式と、局部座屈評価式を組合わせたハイブリッド部材の耐力評価式を提案する。提案する耐力評価式の適合性を実験値と比較して確認する。

5.1 曲げ剛性の導出

図21にハイブリッド部材の断面、図22に応力状態、図23に断面内のひずみ度分布を示す。図20において、部材端からの距離を x と定義する。また、図20、21において2本の集成材の条件は同じであるとする。図23において、集成材及び鋼板の各要素毎に平面保持の仮定が成立すると仮定する。

ある微小区間 dx における集成材の軸力の増分 dQ は、鋼板と集成材のすべり s によって生じると仮定すれば、

$$dQ = K \cdot dx \cdot s \quad \dots (7)$$

単位長さあたりのすべり ds/dx は、鋼板と集成材の接触面における鋼板のひずみ度 ε_s と集成材のひずみ度 ε_w の差に等しいと仮定すると、

$$\frac{ds}{dx} = \varepsilon_w - \varepsilon_s \quad \dots (8)$$

ここに、

$$\varepsilon_w = -\frac{M_w}{E_w I_{wd}} \cdot \frac{h_w}{2} + \frac{Q}{E_w A_w}, \quad \varepsilon_s = +\frac{M_s}{E_s I_s} \cdot \frac{t_s}{2} \quad \dots (9)$$

但し、 M_w : 集成材の負担する曲げモーメント

M_s : 鋼板の負担する曲げモーメント

式(7)と(8)より、集成材の負担する軸力 Q に関する微分方程式(10)が導かれる。

$$\frac{d^2 Q}{dx^2} - K \cdot \alpha \cdot Q = -K \cdot \beta \cdot M \quad \dots (10)$$

ここに、

$$\alpha = \frac{EI_i}{EI_d E_w A_w}, \quad \beta = \frac{e}{2EI_d} \quad \dots (11)$$

但し、 M : 断面全体で負担する曲げモーメント

また、鋼板と集成材の曲率 $1/\rho$ が同じと仮定すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} &= \frac{M_w}{E_w I_{wd}} = \frac{M_s}{E_s I_s} = \frac{2 \cdot M_w + M_s}{2 \cdot E_w I_{wd} + E_s I_s} \\ &= \frac{M - Q \cdot e}{EI_d} \end{aligned} \quad \dots (12)$$

従って、ハイブリッド部材の曲げ剛性 EI_c は、

$$\left. \begin{aligned} EI_c &= \mu \cdot EI_d \\ \mu &= \frac{M}{M - Q \cdot e} \end{aligned} \right\} \quad \dots (13)$$

ここで μ を等価曲げ剛性係数と定義する。等価曲げ剛性係数 μ 及び集成材の負担する軸力 Q は、断面全体で負担する曲げモー

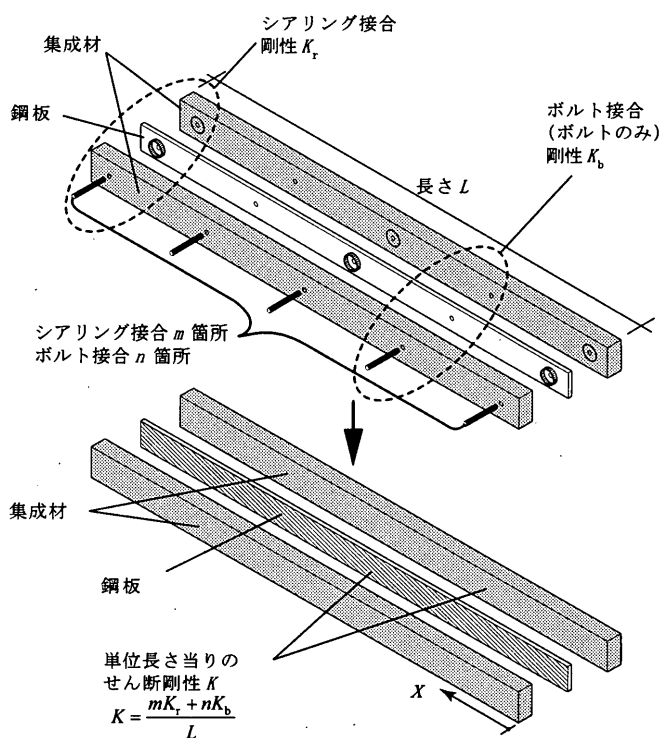


図20 ハイブリッド部材

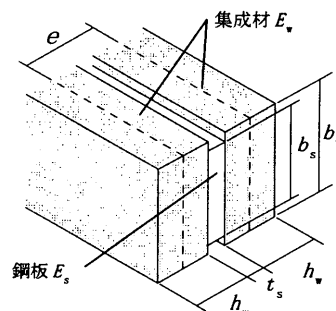


図21 断面

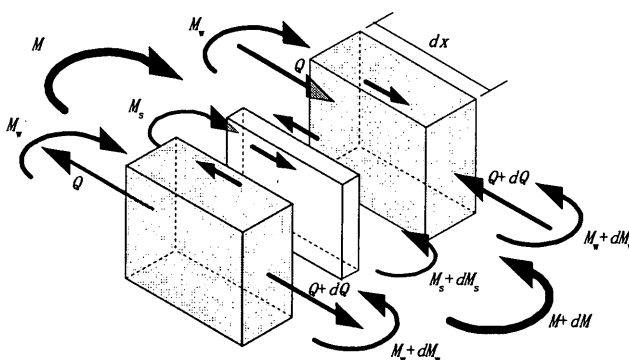


図22 応力の状態

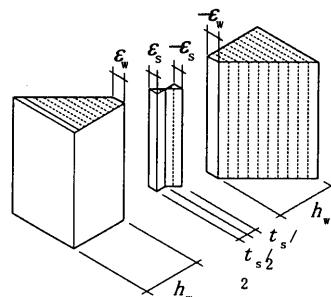


図23 断面内のひずみ度分布

ント M の関数である。これは、ハイブリッド部材の曲げ剛性 EI_c が、荷重条件・部材の位置によって変動することを表している。本研究では、ハイブリッド部材の曲げ剛性 EI_c を等分布荷重 w を受ける単純梁の中央部を対象とし、 $M = wL^2/8$ とする。この時、式(10)は($x=0$ で $Q=0$)と($x=L/2$ で $dQ/dx=0$)の境界条件を満たすことになり、集成材の負担する軸力 Q を求め、式(13)に代入すれば、ハイブリッド部材の曲げ剛性 EI_c は、

$$EI_c = \mu \cdot EI_d \quad \dots (14)$$

但し、

$K \neq 0$ の時、

$$\mu = \frac{EI_i}{EI_d + \frac{4E_w A_w e^2}{K \cdot \alpha \cdot L^2} \left\{ 1 - \cosh \frac{\sqrt{K\alpha} L}{2} + \tanh \frac{\sqrt{K\alpha} L}{2} \sinh \frac{\sqrt{K\alpha} L}{2} \right\}} \quad \dots (15)$$

$K=0$ の時、

$$\mu = 1 \quad \dots (16)$$

と表される。

5.2 耐力評価式

1) 軸圧縮力を受ける場合

式(14)で求まるハイブリッド部材の曲げ剛性を用いて弾性座屈荷重を求めるのに、座屈が生じる時の状態を図24に示すようにモデル化する。図24(a)に示すように軸圧縮部材が臨界荷重 P_{cr} に達して δ だけ面外へはらみだしている時、中央部の曲げモーメントは $M_{mid} = P_{cr} \delta$ である。この状態を、図24(b)に示すように中央集中荷重 P_h が作用していて、剛性 K_h のバネが座屈を拘束していると考え、 P_h と K_h は、図24(c)に示す等分布荷重 w が作用している場合を考え、 $P_h = wL$ 、 $K_h = 384EI_c/(5L^3)$ とする。中央部の曲げモーメントを $wL^2/8 = M_{mid}$ として、 P_{cr} について解くと、

$$P_{cr} = \frac{96EI_c}{L^2} \quad \dots (17)$$

とかける。

また、端部の局所的な座屈は Johnson の放物線式⁴⁾で評価できたから、軸圧縮力を受ける場合の耐力 P_{cr} 評価式は式(18)とする。

$$\left. \begin{aligned} P_{cr} &= \min(P_{cr1}, P_{cr2}) \\ P_{cr1} &= \sigma_{cr-j} \cdot A_s, \quad P_{cr2} = \frac{96EI_c}{L^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots (18)$$

ここで、

$$\sigma_{cr-j} = \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda_s}{\Lambda_s} \right)^2 \right\} \sigma_{ys} \quad (\text{Johnson の放物線式}^4)) \quad \dots (19)$$

但し、 σ_{cr-j} : 座屈応力度、 σ_{ys} : 鋼板の降伏応力度、 λ_s : 鋼板の細長比、 Λ_s : 鋼板の限界細長比 (境界条件は図13に示す通りとする。)

2) 曲げを受ける場合

弾性横座屈荷重については、軸圧縮力を受ける場合と同様に一体性が低減されていると考え、等価曲げ剛性係数 μ を、集成材を別々とみなした弾性横座屈荷重 M_{cr-d} に乗ずる。端部の局所的な座屈は鋼板の全塑性モーメントで評価できたから、曲げを受ける場合の耐力 M_{cr} 評価式は式(20)とする。

$$\left. \begin{aligned} M_{cr} &= \min(M_{cr1}, M_{cr2}) \\ M_{cr1} &= \sigma_y \times \frac{t_s \cdot b_s^2}{4}, \quad M_{cr2} = \mu \cdot M_{cr-d} \end{aligned} \right\} \quad \dots (20)$$

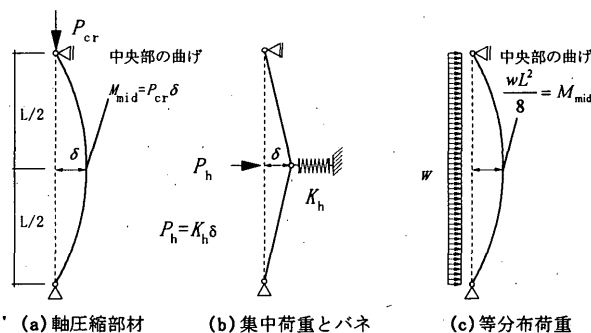


図24 軸圧縮部材の座屈状態のモデル化

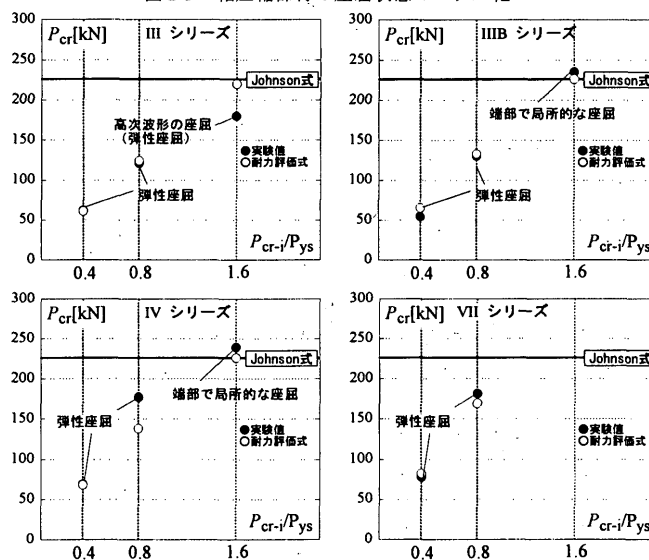


図25 耐力評価式と実験値の比較 [部材軸圧縮実験]

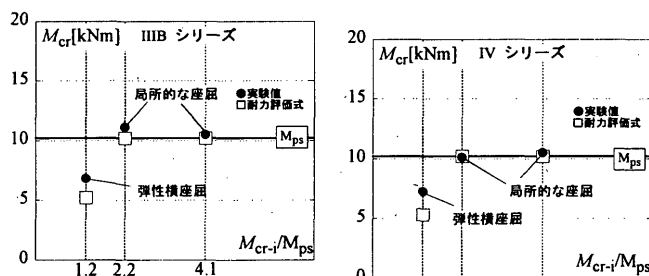


図26 耐力評価式と実験値の比較 [部材曲げ実験]

3) 集成材と鋼板の接触面の単位長さあたりのせん断剛性

集成材と鋼板の接触面の単位長さあたりのせん断剛性 K は式(21)を用いる。

$$K = \frac{mK_r + nK_b}{L} \quad \dots (21)$$

但し、 K_r : シアリング接合のせん断剛性 (図6 参照)

K_b : ボルト接合のせん断剛性 (図6 参照)

m : シアリング接合数、 n : ボルト接合数

但し、縁空きの短い部材端のシアリング接合に関しては、 K_r は K_{rc} と K_{rt} の平均値とし、部材内側のシアリング接合に関しては、 $K_r = K_{rc}$

5.3 実験結果との適合性

部材軸圧縮実験の耐力評価式と実験値の比較を図25に、部材曲げ実験の耐力評価式と実験値の比較を図26に示す。耐力評価式と実験値は良い対応を示しており、本研究で提案する耐力評価式により本研究に用いたプロポーシヨンの部材に対しては、耐力算定及び座屈モード判別が可能である。

6. 結

シアリング接合を用いた杉集成材と鋼板によるハイブリッド部材を提案した。これに対して、部材軸圧縮実験・曲げ実験を行い、鋼板の座屈拘束効果を中心とした力学的挙動を明らかにし、耐力評価法を提案した。以下に得られた知見をまとめる。

1. 実験により、提案するシアリング接合を用いて、杉集成材で鋼板の座屈を拘束できることを示した。
2. 軸圧縮力を受ける場合、座屈モードは大きく分けて、全体で弾性座屈を起こす場合と端部で鋼板が局所的な座屈を起こす場合の2つに分類できた。最大耐力は、全体で弾性座屈を起こす場合、集成材を一体としたオイラー荷重と別々としたオイラー荷重の間の値で、シアリング接合数を増やすほど座屈拘束効果が有効に働いた。端部で局所的な座屈を起こす場合はJohnsonの放物線式で耐力評価ができた。
3. 曲げを受ける場合、座屈モードは、全体で弾性横座屈を起こす場合と端部で鋼板が局所的な座屈を起こす場合の2つに分類できた。最大耐力は全体で弾性横座屈を起こす場合は集成材を一体とした場合の弾性横座屈荷重と別々とした場合の弾性横座屈荷重の間の値であった。端部で局所的な座屈を起こす場合の座屈耐力は、鋼板の全塑性モーメントと同等であった。
4. シアリング接合のせん断剛性を用いて等価曲げ剛性を表現し、ハイブリッド部材の弾性圧縮座屈及び弾性横座屈に対する耐力評価式を提案した。この耐力評価式と端部の局所的な座屈評価式の組合せによって、ハイブリッド部材の耐力を精度良く評価できることを示した。

[謝辞]

播設計室 播繁氏、樋口聡氏には、ハイブリッド部材の開発に関する貴重なご助言、ご意見を戴きました。ここに、感謝の意を表します。

新日本製鐵株式会社・博士(工学) 佐伯英一郎氏には、本研究の意義を御理解戴くと共に、多大なるご協力を戴きました。ここに、感謝の意を表します。

東京工業大学建築物理研究センター教授・工学博士 和田章先生には、本研究をすすめるにあたり貴重な御助言を戴きました。ここに、感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 楠寿博, 津村千香子, 金子洋文, 杉内章浩, 奥野智久: 木材と鋼板を組み合わせた合成部材の圧縮強度実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, P61-62, 2001.9
- 2) 楠寿博, 津村千香子, 杉内章浩, 奥野智久: 木材と鋼板を組み合わせた合成部材の圧縮強度実験(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, P163-164, 2002.8
- 3) 杉内章浩, 津村千香子, 楠寿博, 奥野智久: 木材と鋼板を組み合わせた合成部材の圧縮強度実験(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-1, P165-166, 2002.8
- 4) 日本建築学会: 鋼構造座屈設計指針, 日本建築学会, 2000.2
- 5) 藤本盛久編著: 鉄骨の構造設計(全改訂2版), 技報堂出版, 1982.6
- 6) Warren C. Young: Roak's Formula for Stress and Strain (6th Edition), 1989
- 7) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説-許容応力度・許容耐力設計法-, 日本建築学会, 2002.10
- 8) 後藤一雄: 曲げ剛性の大きい弦材をせん断変形のともなう機構で結び付けた合成ばりについて, 日本建築学会論文報告集 第63号, 1959.10
- 9) 松本芳紀, 山田孝一郎, 上嶋賢治: 鋼板補強木造ばりの挙動に関する理論的研究 その1 鋼板補強木造ばりの弾性挙動, 日本建築学会構造系論文報告集 第430号 1991.12, P19-29

(2004年3月26日原稿受理, 2004年6月23日採用決定)