

## 木材めり込み挙動のアイソパラメトリック有限要素解析 (その16) クーロン摩擦を考慮したいくつかの数値解析テスト(続)

木質材料 弾塑性解析 アイソパラメトリック要素  
接触分離 摩擦

正会員 ○上野 拓也\*<sup>1</sup> 正会員 上辻真由香\*<sup>2</sup>  
正会員 光井 周平\*<sup>3</sup> 正会員 近藤 一夫\*<sup>4</sup>

表1 材料定数

種類	記号	材料定数	種類	記号	強度値
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$E_L$	7350	縦圧縮 強さ	$F_{Lmax}$	27.5
	$E_R$	590			
	$E_T$	290	単軸	$F_L$	24.75
せん断 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{LR}$	637	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	$F_R$	2.80
	$G_{RT}$	15		$F_T$	1.40
	$G_{TL}$	343	せん断	$G_{LR}$	637
ポアソン比	$\nu_{LR}$	0.40	降伏応力 (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{RT}$	15
	$\nu_{RT}$	0.60		$G_{TL}$	343
		$\nu_{TL}$	0.90		

### 1. 緒言

本研究は、伝統的木造建築架構の解析を行う際の部材接合部の適切なバネ特性の算定方法の確立を主要な目的に、木材めり込み挙動の詳細な有限要素解析を行おうというものである。前2報では、部材どうしの接触分離現象の評価にクーロン摩擦を考慮した場合の解析を行うための準備として、接合要素の導入とクーロン摩擦を考慮したその定式化を行い、機能検証を含めたいくつかの数値実験を行った。

本報では、全面圧縮試験体、柱一通し貫接合部について、接触面にクーロン摩擦を適用した場合のいくつかの数値解析を行い、その影響、効果について調査した結果について報告する。

### 2. 全面圧縮試験体の弾塑性解析

#### 2.1. 解析対象とそのモデル化

解析対象は、図1に示すような全面圧縮試験体であり、この試験体は平面応力状態にあるものとして、2次元応力解析を行う。樹種はスギを想定しており、用いた材料定数を表1に示す。尚、ひずみ硬化を考慮した場合の接線係数は、 $R$  (半径) 方向、 $T$  (接線) 方向直成分については、表1のヤング係数の1/50とし、一方、 $L$  (繊維)

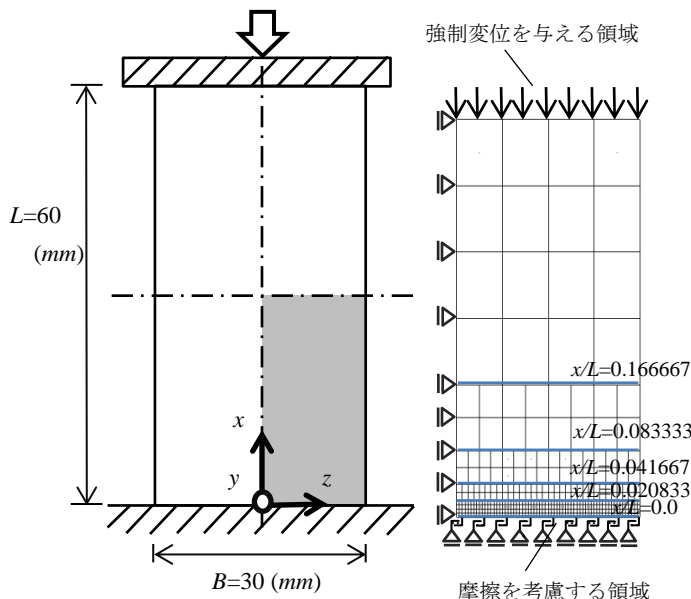


図1 解析対象

図2 解析モデル

方向直成分とせん断成分については、ひずみ硬化はないものとしている。

採用した解析モデルを図2に示す。用いた要素形は、節点選択機能を有する9節点四角形要素であり、対称性を利用して、図1の灰色の領域にあたる、1/4を解析している。境界条件は図2に示すとおりで、試験体の底面と支持板が接する領域には、接合要素を挿入している。剛性評価、エネルギー積分には、2次元要素については、 $(3 \times 3)$ のサンプリング点を有する *Gauss-Legendre* の求積法を、一方、接合要素については、サンプリング点3の *Lobatto* の求積法を用いている。なお、本報に示す数値実験では、試験体の異方性主軸を図1に示す座標軸と一致させ、 $L-R$  面内で加圧した場合について解析を行っている。

#### 2.2. 全面圧縮試験体の変形挙動に及ぼす摩擦の影響

本項では、摩擦係数をパラメトリックに変化させて単調載荷及び繰返し載荷解析を行い、全面圧縮試験体の変形挙動に及ぼす摩擦の影響を調査した結果について報告する。尚、試験体の加圧方向は  $L$  (繊維) 方向とし、部材のひずみ硬化を考慮している。

まず、単調載荷を行った場合の結果を示す。試験体底面の摩擦条件を、摩擦係数 0.015625, 0.03125, 0.0625, 0.125, 0.25, 0.5, 摩擦なしとしたそれぞれの場合について、見かけの応力-ひずみ関係を図3に示す。ここに、見かけの応力は鉛直荷重値を加圧面積で除した値、見かけのひずみは鉛直方向変位を試験体高さで除した値としている。尚、摩擦係数 0.03125 は、弾性解析において滑り出しが生じる限界値である。また、摩擦係数が 0.0625 及び 0.125 の場合について、見かけのひずみが 0.01 及び 0.02 の時点の変形状態及び接触状況を図4に示す。尚、

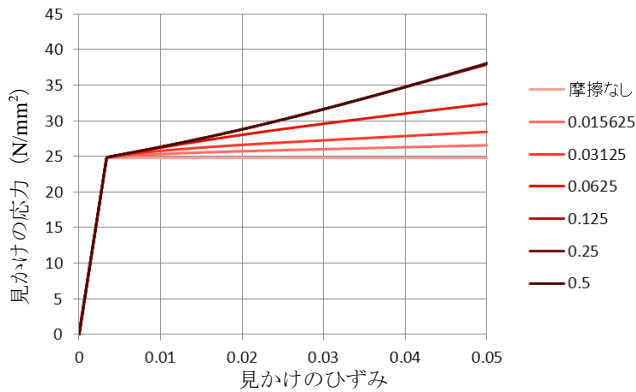


図3 見かけの応力-ひずみ関係

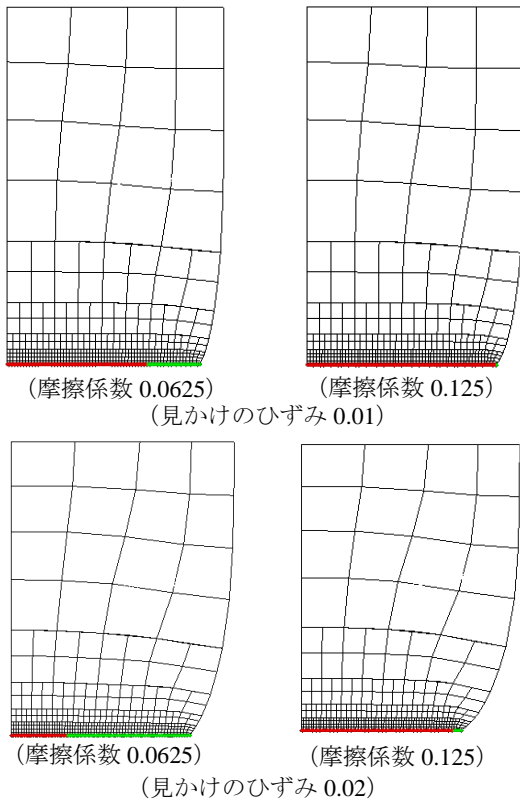


図4 変形状態及び接触状況

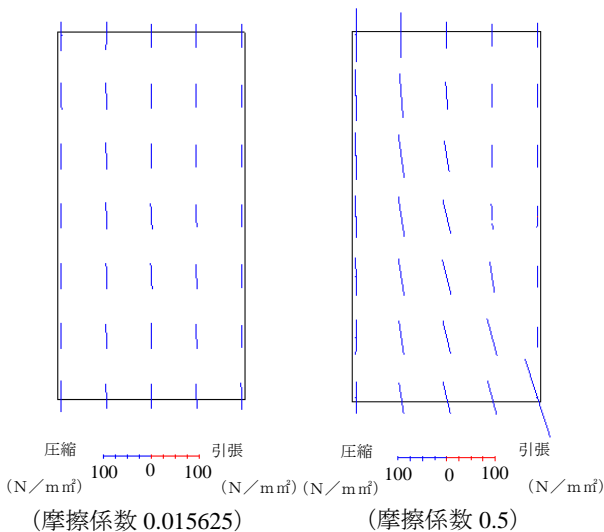


図5 主応力分布

変形量は 5 倍に拡大しており、接触状況の赤丸は接触付着状態、緑丸は接触滑り状態、無印は分離状態にある点を示す。さらに、摩擦係数 0.015625 及び 0.5 の場合について、見かけのひずみ 0.04 の時点における主応力分布を図 5 に示す。図中、青線が圧縮応力を、赤線が引張応力を表す。応力-ひずみ関係より、摩擦係数が大きいほど耐力が大きくなり上昇した。降伏後の二次剛性を見ると、摩擦係数 0.0625 までは緩やかに低下するものの、摩擦係数 0.125 以上では緩やかに上昇するという現象が見られた。尚、0.125 以上の場合には、ほとんど同様な挙動となる。接触状況より、摩擦係数 0.0625 までは、载荷に伴う滑り領域の拡大が見られるが、0.125 では滑りがほとんど生じないことから、剛性、耐力の変化は試験体底面の滑り領域の大きが大きく影響していることが分かる。また、主応力分布より、試験体全体にわたって部材内部の応力の流れが大きく変化していることから、载荷に伴う部材変形後の摩擦による拘束効果の影響が顕著に見られることが分かった。

次に、摩擦係数 0.0625, 0.25 とした場合について、見かけのひずみが 0.02 の時点で逆载荷とする、繰返し载荷をした場合の変形挙動を調査した。見かけの応力-ひずみ関係を図 6(a),(b)に、グラフ中のマーカーで記した①～⑤の時点における図 2 の青色の線で示したライン上の試験体内部の z 方向垂直応力分布を図 8(a),(b)に示す。また、摩擦係数 0.25 の場合については、同時点における接触状況を図 7 に示す。尚、図 8 中の値は L 方向降伏応力  $F_L$  で無次元化した値である。

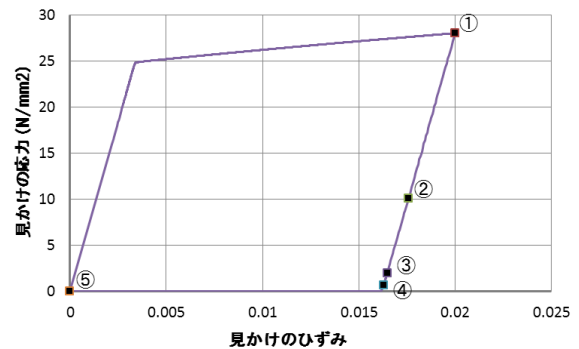


図6. (a) 見かけの応力-ひずみ関係(摩擦係数 0.0625)

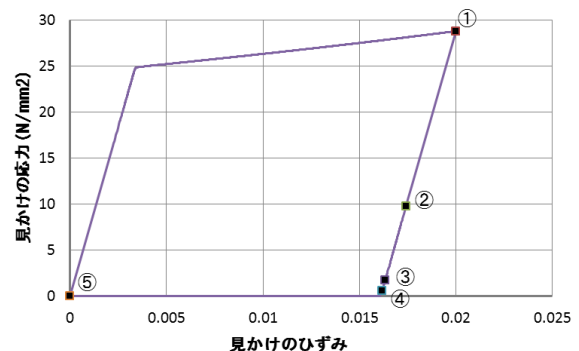


図6. (b) 見かけの応力-ひずみ関係(摩擦係数 0.25)

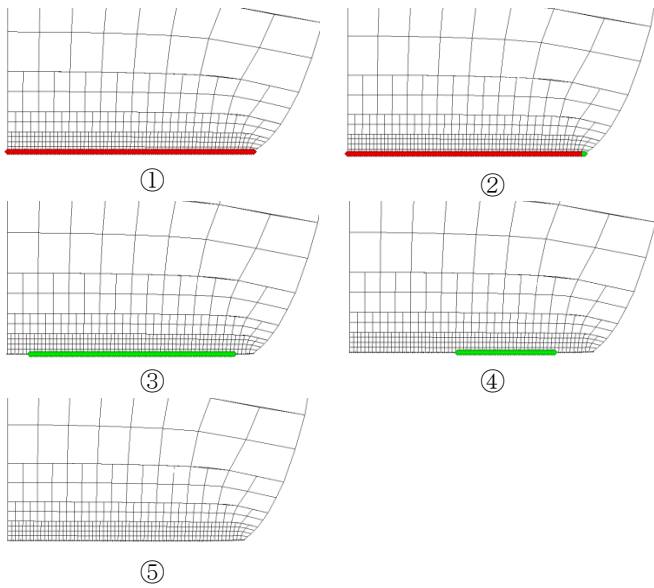


図7 接触状況(摩擦係数 0.25)

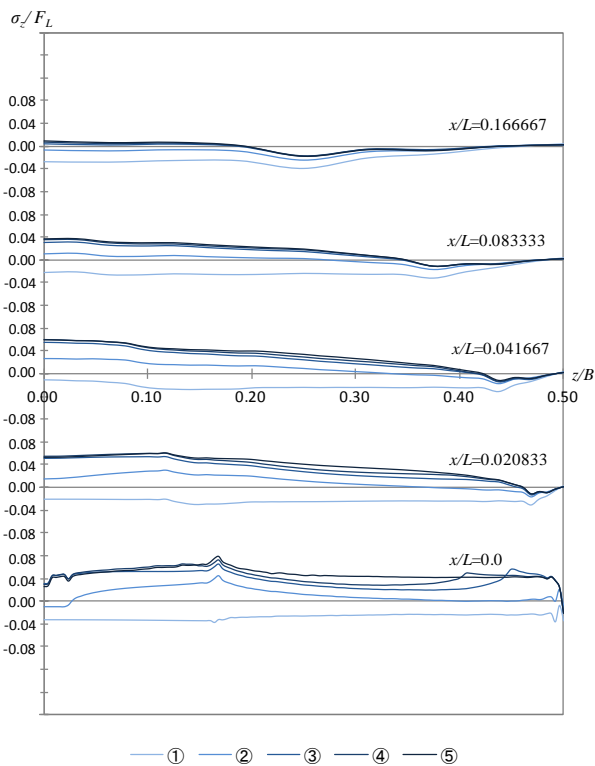


図8. (a) z方向垂直応力分布(摩擦係数 0.0625)

接触状況より、逆載荷後、最大荷重時まで接触付着状態にあった点が接触滑り状態へと変わり、その後徐々に分離している。また、摩擦係数の値が大きいほど、特にz方向(横方向)垂直応力の分布に違いが見られ、圧縮力を抜いていく際にも変形挙動に大きく影響を及ぼすことが分かった。

### 3. 柱-通し貫接合部の弾塑性解析

#### 3.1. 解析対象とそのモデル化

続いて、図9に示すような柱-通し貫部分架構を対象に、変形挙動に及ぼす摩擦の影響を調査した結果を示す。

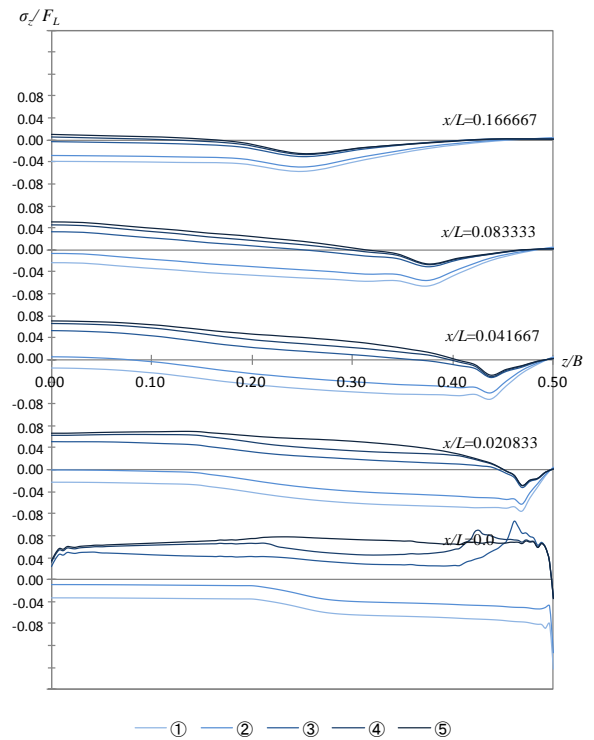


図8. (b) z方向垂直応力分布(摩擦係数 0.25)

部材の寸法は、柱が120(mm)角、貫が幅40(mm)×せい120(mm)とする。樹種は、柱、貫ともにスギを想定し、材料定数は表1の値を採用しており、又、ひずみ硬化を考慮している。解析モデルを図10に示す。柱が上下別に大きく剛体回転するのを防ぐために貫側面の柱も考慮し、交差部でアイソパラメトリック要素が二重になるようにモデル化している。境界条件は、柱の上下端は中央のみ鉛直・水平の両方向の変位を拘束し、その他の節点は水平方向の変位を拘束した。荷重条件については、貫の左右両端中央の節点に逆対称に鉛直方向の強制変位を与えている。尚、赤いライン上で接触分離・滑り付着の状態変化を考慮しており、接触面の柱の両端では、貫へのめり込みを考慮して完全付着状態として評価した。

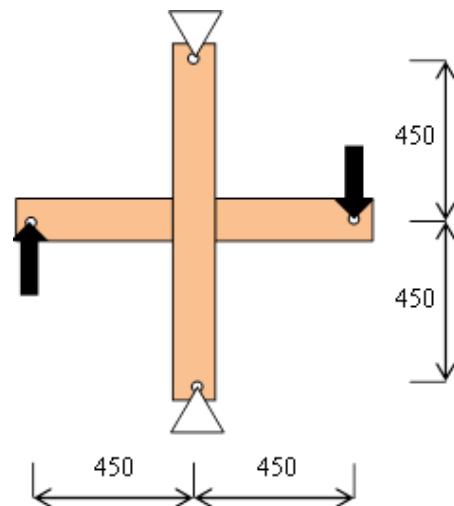


図9 解析対象

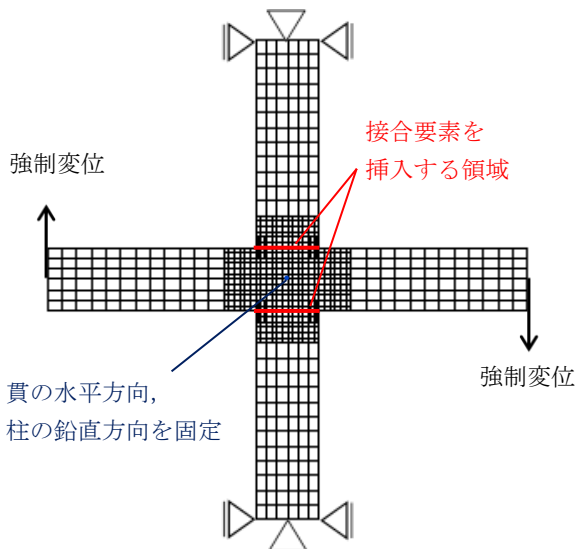


図10 解析モデル

### 3.2. 柱一通し貫接合部の変形挙動に及ぼす摩擦の影響

貫と柱の両端をそれぞれ結んだ直線の成す変形角が  $\pm 1/240$ ,  $\pm 1/120$ ,  $\pm 1/60$ ,  $\pm 1/30$  (rad)となる値の強制変位を与える漸増振幅繰返し载荷解析を行った。図11に、柱一通し貫接合部における曲げモーメントと相対回転角の関係について、摩擦係数をパラメトリックに変化させた場合の結果を示す。ここに、接合部部分での貫材軸線両端を結んだ線の回転量で定義する貫の回転量から貫との接触面における柱側の回転量を差し引いた値を相対回転角としている。また、図11中のマーカーで記した時点の降伏域の進展状況を図12に、また、摩擦係数0.3の場合について、滑りが生じている点の接合要素の法線方向と接線方向の内力関係を図13に示す。摩擦係数を大きくすると、剛性、耐力は共に上昇した。また、降伏域の進展状況では、摩擦の大きい方が貫に生じている降伏域は接触

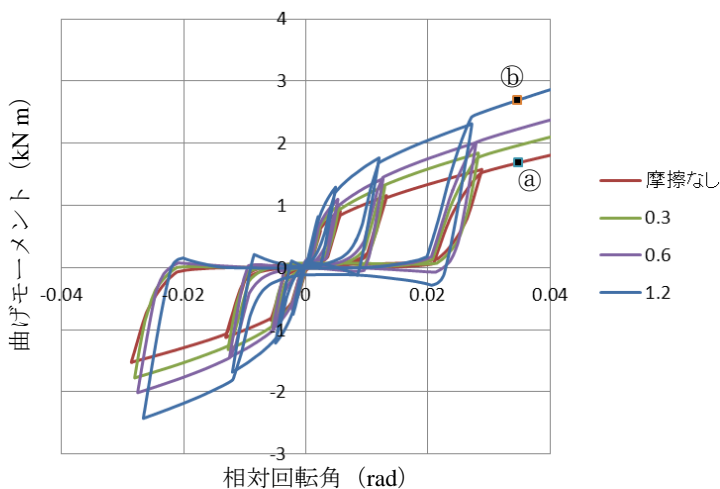


図11 曲げモーメントー相対回転角関係

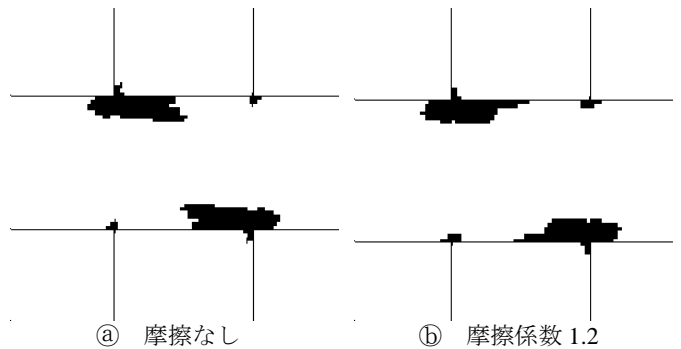


図12 降伏域の進展状況

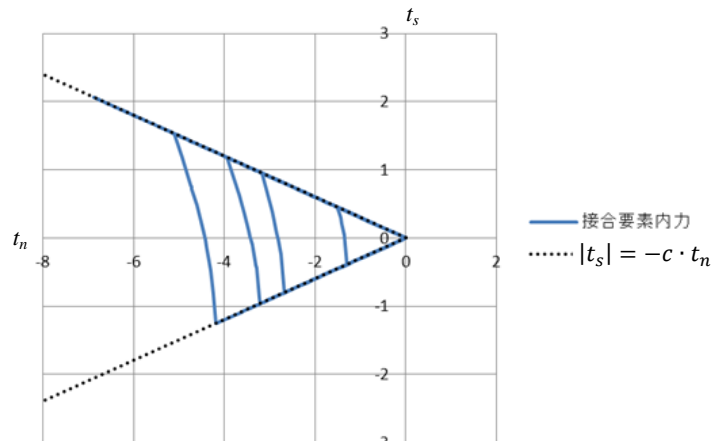


図13 接合要素内力分布(摩擦係数0.3) ( $t_n - t_s$  関係) 面に沿って横に広く進展しており、摩擦による拘束効果が変形挙動に及ぼす影響は大きいことが分かる。一般的な木材どうしの摩擦係数は0.2~0.4程度<sup>1)</sup>であるので、数値解析上では、摩擦を考慮しない場合に比べ1.2倍程度の耐力上昇が見込めると考えられる。また、図13より、载荷の方向が変化するに伴い、滑りの向きも変化する現象が見られた。図11において、摩擦を考慮した場合、履歴が原点へ戻る途中で摩擦がない場合と異なった傾向を示すのは、滑りの向きの変化に伴う接触面に生じるせん断力の向きの変化によるものと思われる。

## 4. 結び

本報(その16)では、全面圧縮試験体、柱一通し貫接合部の弾塑性解析を行い、摩擦を考慮したときの接触分離・滑り付着の状態変化が変形挙動に及ぼす影響、効果について調査した。

### 参考文献

- 1) 孟 慶軍, 平井卓郎, 小泉章夫: 木材と各種構造用面材との摩擦係数, 木材学会誌 Vol.54, No.5, p.281-288, 2008

\*1 広島大学大学院工学研究科建築学専攻 大学院生  
 \*2 コーナン建設株式会社 修士(工学)  
 \*3 呉工業高等専門学校建築学分野 助教・博士(工学)  
 \*4 広島大学大学院工学研究院 准教授・工博

\*1 Graduate Student, Graduate School of Eng., Hiroshima Univ.  
 \*2 Cohnan Kensetsu INC., M.Eng  
 \*3 Assistant Prof., National Institute of Technology, Kure College, Dr. Eng.  
 \*4 Associate Prof., Faculty of Eng., Hiroshima Univ., Dr. Eng.