木造スペースフレームの線形弾性解析に及ぼす部材軸剛性のばらつきの影響に関する研究

STUDY ON EFFECT OF DISPERSION OF AXIAL STIFFNESS OF MEMBERS ON LINEAR ELASTIC ANALYSIS OF WOODEN PREFABRICATED TRUSS

瀧野 敦夫^{*1}, 今井 克彦^{*2}, 畔柳 歩^{*3}

Atsuo TAKINO, Katsuhiko IMAI and Ayumu KUROYANAGI

A wooden prefabricated truss system utilizing Japanese medium- and low-quality timbers has been developed in order to promote the effective use of these timbers. The purpose of this study is to evaluate the effect of the dispersion of stiffness of members on the stress magnitude and displacement in designing the wooden prefabricated truss. Monte Carlo analysis revealed the maximum stress of the members to be 1.2 times greater than the stress analyzed by the standard Young's modulus (E_0) due to the dispersion of Young's modulus. The maximum displacement of nodes is also greater than the displacement analyzed by E_0 . It is suitable to use the 5% lower limit of Young's modulus based on full-size tests of timbers considering the deformation of nodes.

Keywords : Wooden prefabricated truss, Dispersion, Stiffness of members, Young's modulus, Monte Carlo method

木造スペースフレーム, ばらつき, 部材軸剛性, ヤング係数, モンテカルロ法

1. はじめに

筆者らは、木材利用促進の一手法として、国産心持ち木材を用いた木造スペースフレームシステムの開発を行っている^{1)~5)}。スペースフレーム部材には、一般の木材市場に大量に流通している中品質の心持ち一等材料を用いている。しかし、これらの木材のほとんどが一般に欠点と言われている節や乾燥亀裂を材表面に多く有しており、強度やヤング係数に関する品質管理も特に行われていない。大規模木造建築物に使われることが多い集成材では、ラミナの曲げヤング係数を実測することにより木材のヤング係数のばらつきを制御しているが、製材品に対しては、打撃音法によるヤング係数の推定手法の研究^{例え(6),7)}や、製材の日本農林規格⁸⁾の機械等級区分法等の品質管理に関する研究や規格類があるにも関わらず、実際の現場における普及度は非常に低い。

木材は、強度やヤング係数といった材料特性に関して非常にばらつきの大きい材料である。一般の構造解析において、部材の軸剛性は部材応力や変形を決定する重要な変数であるため、軸剛性のばらつきが及ぼす影響について数値的に評価することは非常に重要なことである。そこで、本研究では既に筆者らが行っている実大材料試験^{9),10)}や接合部実大試験^{4),5)}の結果に基づき、木材のヤング係数や接合部変形のばらつきを考慮したモンテカルロ法による線形弾性解

析を行い、部材の軸剛性のばらつきが及ぼす部材応力や変形への影響について検証する。

2. 解析方法

2.1 木材のヤング係数

木質構造設計規準・同解説¹¹⁾(以下、設計規準と呼ぶ)及び木質構造限界状態設計指針(案)・同解説¹²⁾(以下、限界指針と呼ぶ)には、ヤング係数に関してそれぞれ次の記述がある。

設計規準:「そこで、樹種ごとの弾性係数の分布を正規分布と仮定し、以下の式によって、信頼水準75%における50%下側許容限界値を算出し、(以下略)」

限界指針:「木材強度、弾性係数、接合耐力のそれぞれの分布は2母数ワイブル分布(2Pワイブル分布)を採用することとした。」

そこで本論では、これらの規準類に基づき正規分布と2母数ワイブル分布の2つの分布形について乱数を発生させ、検討を行った。

筆者らが行った兵庫県産のスギ、ヒノキの心持ち材の実大試験より得られたヤング係数を図1に、基本統計量を表1に示す。図中には、ヤング係数の正規分布曲線及び2母数ワイブル分布曲線を併記した。また、設計規準に記載されている基準弾性係数(E_0 , $E_{0.05}$)及び正規分布と仮定した場合の信頼水準75%における5%下側許

^{*1} 大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 助教・工修

^{*2} 大阪大学フロンティア研究センター 特任教授・工博

^{*3} ㈱竹中工務店 工修

Assistant Prof., Dept. of Global Architecture, Osaka Univ., M. Eng.

Prof., Frontier Research Center, Osaka Univ., Dr. Eng.

Takenaka Corporation, M. Eng.

<引張・圧縮試験> <ヒノキ> <座屈試験>

<引張・圧縮試験> <スギ> <座屈試験>

図1 実大試験より得られた木材のヤング係数

表1 実大試験より得られた木材のヤング係数の基本統計量

材種	試験種別	試験件数	最小値 (kN/mm ²)	最大値 (kN/mm ²)	変動 係数 (%)	正規分布 平均値 μ	正規分布 標準偏差 σ	2母数ワイブル分布 尺度母数 η	2母数ワイブル分布 形状母数 m
スギ	引張・圧縮	165	4.01	11.71	17.11	7.21	1.23	7.70	7.13
	座屈	140	3.96	11.41	20.57	6.71	1.38	7.23	5.95
ヒノキ	引張・圧縮	165	7.39	16.29	14.88	10.71	1.59	11.37	7.97
	座屈	129	4.34	14.29	14.83	9.44	1.40	10.03	7.85

容限界値 ($E_{\text{exp}, 0.05}$) も図中に併記した。なお、ヤング係数は全ての試験において、変位計を用いて測定した軸方向変形より得られた応力度-ひずみ度関係曲線の直線部分の傾きから求めている。スギ、ヒノキともに座屈試験から得られたヤング係数の平均値は、引張及び圧縮試験から得られたヤング係数の平均値に比べて低く、約90%の値となっている。

2.2 部材モデル

接合部詳細を図2に、解析に用いた部材モデルを図3に示す。部材モデルは、節点バネを考慮した線材を考え、さらにそれを一つの線材に置換したモデルとした。線材の等価ヤング係数は、図4に示す直列モデルを考え、引張荷重作用時と圧縮荷重作用時についてそれぞれ次式より算出する。

$${}_iE_e = \frac{1}{\frac{A_w}{n \cdot \ell} \left(\frac{1}{K_i} + \frac{1}{K_j} \right) + \frac{1}{E_w}} \quad (1)$$

$${}_cE_e = \frac{E_w}{\frac{2.4 \cdot A_w \cdot \phi_{ED}}{\ell \cdot A_{ED}} + \frac{1}{\eta}} \quad (2)$$

ここで、 ${}_iE_e$: 引張荷重作用時の部材の等価ヤング係数

A_w : 木材の断面積, n : ラグスクリーの本数, ℓ : 節点間距離

K_i, K_j : 部材両端のラグスクリー1本当たりの引張バネ定数

E_w : 木材のヤング係数

${}_cE_e$: 圧縮荷重作用時の部材の等価ヤング係数

ϕ_{ED} : エンドディスクの直径, A_{ED} : エンドディスクの接触面積

η : 座屈によるヤング係数の低減係数 ($\eta=0.9$)

図2 接合部詳細

図3 部材モデル

図4 等価ヤング係数算定用の直列モデル

部材両端のラグスクリー1本当たりの引張バネ定数(以下、引張バネ定数と呼ぶ)は、木材のヤング係数とは相関性が低いためそれぞれ独立した変数とした。一方、木材へのめり込み変形による圧縮バネ定数は、木材のヤング係数とは相関性が高いため、接合部圧縮試験より得られた次式の関係を用い、木材のヤング係数に対して従属変数としている。

$$K_c = \frac{E_w \cdot A_{ED}}{1.2 \cdot \phi_{ED}} \quad (3)$$

ここで、 K_c : 圧縮バネ定数

なお、引張バネ及び圧縮バネのモデル化についての検討は、畔柳らが行った接合部試験の結果^{4),5),13)}を参照した。

2.3 許容耐力

部材の許容耐力は、部材、接合部における各要素の耐力を比較検討し、最小となる値から引張部材及び圧縮部材についてそれぞれ決定している。現行のシステムにおいて、接合金物、木材の丸棒径やラグスクリー本数との組み合わせを考慮すると、引張部材はラグスクリー引抜き耐力が、圧縮部材は木材の座屈耐力とエンドディスク接触面の木材の圧縮耐力のうちの小さい方が許容耐力となる。エンドディスク接触面における木材の圧縮破壊は、粘りのある破壊性状を示すが、ラグスクリー引抜き破壊及び木材の座屈破壊は、ともに脆性的な破壊を生じることから、引張部材及び圧縮部材は降伏域を持たない弾性部材と仮定した。

部材の短期許容耐力 f_i は、次式より求めた。

$$f_i = \frac{2}{3} F \quad (4)$$

ここで、 F : 基準強度

各破壊性状に対応する基準強度は、実大試験の結果^{9),10)}から求めた信頼水準75%における5%下側許容限界値を基に決定しており、圧縮部材については、設計規準に記載されている甲種構造材3級の値を基に各々の許容耐力を算出している。

2.4 解析モデル

解析モデルは、実際の木造スペースフレームシステムの設計手順

に従って決定した。解析モデルを図5、図6に示す。形状は、圧縮卓越型のアーチ状二層立体トラス構造（以下、アーチトラスと呼ぶ）と梁型の平板状二層立体トラス構造（以下、平板トラスと呼ぶ）の2種類とした。アーチトラスは、スパン40m、ライズ5mのものを基本形状とし、基本形状からライズを5mずつ上げたものの合計3種類とした。平板トラスは、スパン22mのものを基本形状とし、基本形状より±2mずつスパンを変化させたものの合計3種類とした。使用した部材一覧を表2に、部材長の平均値及び細長比の平均値を表3及び表4に示す。表内に示す“X方向下弦材端部”とは、X方向の下弦材の両端3モジュールずつを表し、“X方向下弦材一般部”とは、X方向の下弦材の両端3モジュール以外の部分を表す。ラグスクリューの有効ネジ長さは、M12の場合170mm、M16の場合235mmである。また、表3及び表4に各部材の圧縮時における許容耐力を併記した。“座屈”は、木材の座屈耐力を示し、“E-disk”はエンドディスク接触面の木材の圧縮耐力を示す。アーチトラスは両端ピン支持とし、平板トラスは片側ピン、片側ローラー支持とした。

荷重条件は、「固定荷重+地震荷重（以下、D+Kと呼ぶ）」と「固定荷重+積雪荷重（以下、D+Sと呼ぶ）」の2種類とし、表5に示す荷重条件を設定した。荷重は、トラス上面の見付面積に基づき算定し、全て上弦節点に節点荷重として与えた。

表2 使用部材一覧

形状	位置	接合金物形状 (接合金物径)-(接合ボルト径)	ラグスクリュー (ラグスクリュー径)-(本数)	丸棒径 (木材)
アーチトラス	上弦材Y方向	φ92-M12	M12×3	φ120
	上弦材X方向	φ110-M16	M16×4	φ150
	下弦材Y方向	φ92-M12	M12×3	φ120
	X方向下弦材端部	φ140-M20	M16×3	φ180
	X方向下弦材一般部	φ110-M16	M16×4	φ150
	ウェブ	φ92-M12	M12×3	φ120
平板トラス	上弦材Y方向	φ92-M12	M12×3	φ120
	上弦材X方向	φ110-M16	M16×4	φ150
	下弦材Y方向	φ92-M12	M12×3	φ120
	下弦材X方向	φ167-M24	M16×8	φ210
	ウェブ	φ92-M12	M12×3	φ120

2.5 乱数

一つの解析ごとに独立した3個の乱数を部材の数だけ発生させ、式(1)及び式(2)における木材のヤング係数(E_w)、引張バネ定数(K_i , K_j)にそれぞれ割り当てる。乱数の発生は、Numerical

図5 解析モデル（アーチトラス）

図6 解析モデル（平板トラス）

表3 部材長の平均値及び細長比の平均値の一覧（アーチトラス）

	アーチトラス (ライズ: 5m)						アーチトラス (ライズ: 10m)						アーチトラス (ライズ: 15m)					
	上弦材		下弦材		ウェブ		上弦材		下弦材		ウェブ		上弦材		下弦材		ウェブ	
	X方向	Y方向	X方向端部	X方向一般部	Y方向		X方向	Y方向	X方向端部	X方向一般部	Y方向		X方向	Y方向	X方向端部	X方向一般部	Y方向	
部材本数	76	60	18	36	38	228	76	60	18	36	38	228	76	60	18	36	38	228
部材長 (平均値)	2400.5	2400.0	2313.4	2313.4	2400.0	2321.3	2739.5	2400.0	2574.7	2574.7	2400.0	2400.9	3205.2	2400.0	2976.6	2976.6	2400.0	2527.5
細長比 (平均値)	64	80	51	62	80	77	73	80	63	66	80	80	85	80	73	76	80	84
許容耐力 (圧縮)	E-disk	座屈	E-disk	E-disk	座屈	座屈	座屈	座屈	E-disk	E-disk	座屈	座屈	座屈	座屈	座屈	座屈	座屈	座屈

表4 部材長の平均値及び細長比の平均値の一覧（平板トラス）

	平板トラス (スパン: 20m)					平板トラス (スパン: 22m)					平板トラス (スパン: 24m)				
	上弦材		下弦材		ウェブ	上弦材		下弦材		ウェブ	上弦材		下弦材		ウェブ
	X方向	Y方向	X方向	Y方向		X方向	Y方向	X方向	Y方向		X方向	Y方向	X方向	Y方向	
部材本数	36	30	24	18	108	40	33	27	20	120	44	36	30	22	132
部材長 (平均値)	2500.0	2400.0	2500.0	2400.0	2358.5	2444.4	2400.0	2444.4	2400.0	2343.9	2400.0	2400.0	2400.0	2400.0	2332.4
細長比 (平均値)	67	80	48	80	79	65	80	47	80	78	64	80	46	80	78
許容耐力 (圧縮)	E-disk	座屈	E-disk	座屈	座屈	E-disk	座屈	E-disk	座屈	座屈	E-disk	座屈	E-disk	座屈	座屈

表5 荷重条件

単位面積当たりの自重	441 (N/m ²)
単位面積当たりの積雪荷重	784 (N/m ²)
層せん断力係数	0.3

Technologies Random Generator for Excel (NtRand) ver.2.01 (ニューメカルテクノロジー株式会社製)を用いて行った。使用する乱数は、正規乱数とワイブル乱数の2種類とした。正規乱数は、Mersenne Twister 法¹⁴⁾、Box-Muller 法^{例えば15)}に基づき計算し、ワイブル乱数は、Mersenne Twister 法、逆関数法^{例えば15)}に基づき計算した。乱数発生に用いた統計値を表6に示す。木材のヤング係数は、実大引張・圧縮試験を参照し、引張バネ定数は、接合部引張試験を参照している。

2.6 解析方法

解析には、剛性マトリクス法を利用した汎用骨組解析ソフトMultiframe 4D (Formation Design Systems 社製)を用いて、線形弾性解析を行った。本論で行った解析のパラメータ一覧を表7に示す。3章で述べる各節において、各々のパラメータを組み合わせた解析を行い、網掛けの部分についての比較検討を行った。“乱数割当て変数”の欄において、 E_w 、 K_i 、 K_j のいずれかの内、表内に記載している変数にのみ乱数を割当て、それ以外の変数には表8に示す設計用基準値を全ての部材に与え、解析を行った。各解析ごとに100サンプルずつ解析を行った。

3. 結果と考察

3.1 乱数種別による影響

乱数に正規乱数及びワイブル乱数を用いた場合の結果を比較した正規化順位曲線を図7、図8に示す。変数は、木材のヤング係数のみとした。ここで最大軸力部材の軸力比とは、応力解析により発生した軸力が最大であった部材における短期許容耐力に対する軸力の比の値のことである。なお図中に示す破線は、木材のヤング係数、引張バネ定数ともに定数として解析した場合の結果（以下、基準値と呼ぶ）である。剛性マトリクス法では、各節点での力の分配は部

材の剛性に比例して行われるため、一様に均一なヤング係数を与えた場合に比べ、ばらつきを考慮したモデルの方が全体的に最大軸力が増加する傾向にある。最も増大した軸力比は、基準値と比べ2割程度高い値となっている。しかし、ほぼ全ての場合において正規乱数とワイブル乱数の違いによる結果に大きな差は見られなかった。図1において、正規分布曲線と2母数ワイブル分布曲線の違いは非常に小さく、どちらの分布曲線も材料試験の分布に対して誤差を生じていることを考慮すると、解析において正規乱数とワイブル乱数を用いる差はほとんどないと考えられる。そのため、材料試験より得られたヤング係数の分布は、一般的な分布曲線である正規分布と仮定すればよいと言える。

表6 乱数の発生に用いた統計値

材種	変数	正規乱数		ワイブル乱数	
		平均値	標準偏差	尺度母数	形状母数
スギ	E_w	7.21	1.23	-	-
	K_i, K_j	10.71	1.59	11.37	7.97
ヒノキ	M12	93.67	16.69	-	-
	M16	111.26	14.44	-	-

表7 解析パラメータ一覧

節	形状	荷重条件	木材材種	乱数割当て変数	乱数種別
3.1	アーチ・5 平板・22	D+K D+S	ヒノキ	E_w	正規 ワイブル
3.2	アーチ・5 平板・22	D+K D+S	ヒノキ	E_w, K_i, K_j	正規
3.3	アーチ・5, 10, 15 平板・20, 22, 24	D+K D+S	ヒノキ	E_w	正規
3.4	アーチ・5 平板・22	D+K D+S	ヒノキ スギ	E_w	正規

表8 設計用基準値

材種	E_w (kN/mm ²)	K_i, K_j	
		M12 (kN/mm)	M16 (kN/mm)
スギ	7.0	80.0	100.0
ヒノキ	11.0	80.0	100.0

図7 乱数種別による最大軸力部材の軸力比の正規化順位曲線 (アーチトラス・ライズ5m / 変数: 木材のヤング係数)

図8 乱数種別による最大軸力部材の軸力比の正規化順位曲線 (平板トラス・スパン22m / 変数: 木材のヤング係数)

3.2 節点パネの影響

木材のヤング係数及び引張バネ定数のどちらか一方あるいはその両方を変数とした場合を比較した正規化順位曲線の一例を図9に、標準的な部材における各要素の荷重と変形量との関係を図10に示す。乱数には正規乱数を用いた。なお、図10の縦軸は部材の軸力を表し、正は引張軸力を、負は圧縮軸力を示す。また、図10内の破線に囲まれる範囲は、木材のヤング係数と引張バネ定数をそれぞれ $8 \sim 13 \text{ kN/mm}^2$, $60 \sim 120 \text{ kN/mm}$ の範囲で変動させた場合の部材変形の変動幅を表している。圧縮部材については、引張バネ定数のみを変数とした場合の最大軸力部材の軸力比はほとんど変動しておらず、基準値とほぼ同じ値であった。これは、圧縮バネ定数が木材のヤング係数のみに依存した変数であるため、引張バネ定数の影響をほとんど受けていないことによるものである。また引張部材についても、最大軸力部材の軸力比はほぼ同様の傾向が見られ、大きな引張軸力が生じる平板トラスにおいても、引張バネ定数のみを変数とした場合の変動幅は非常に小さい結果となっている。これは、図10に示すように、木材のヤング係数のみを変動させた場合に比べ、引張バネ定数のみを変動させた場合の方が荷重-変形関係における変動幅が小さくなっているためであり、引張バネ定数のばらつきが構造物全体に及ぼす影響は非常に小さく、設計時に特に考慮する必要がないことが分かる。

3.3 形状の変化による影響

アーチトラスのライズを変化させた場合の最大軸力部材の軸力比を比較した正規化順位曲線を図11に示す。変数は木材のヤング係数のみとし、乱数には正規乱数を用いた。全てのモデルにおいて同じ部材配置であるにも関わらず、最大軸力部材の軸力比が異なっているのは、図12に示すように形状の違いにより軸力が最大となる部材の位置が異なるためである。しかし、図13に示すように発生した最大軸力の基準値に対する増大率で見た場合には、全てのモデルにおいてほぼ同様の傾向が見られ、最大軸力の増大率は1割から2割程度となっている。

次に、平板トラスのスパンを変化させた場合の最大軸力部材の軸力比を比較した正規化順位曲線の一例を図14に、基準値に対する最大軸力の増大率の正規化順位曲線を図15に示す。変数は木材のヤング係数のみとし、乱数には正規乱数を用いた。平板トラスにおける最大軸力部材の発生箇所は、スパン中央部の上弦材及び下弦材であった。アーチトラスと同様に、最大軸力の増大率はスパンの違いによってほとんど差が見られなかった。しかし、圧縮部材と引張

部材とを比較すると、引張部材の方が変動幅が小さくなる傾向が見られた。これは、図10からも分かるように木材のヤング係数だけを変数とした場合、引張部材の方が圧縮部材より部材変形の変動幅が小さくなっているためであり、このことは式(2)を求める際に圧縮バネ定数を木材のヤング係数の従属変数としたことに起因している。平板トラスはアーチトラスに比べ引張部材が多く発生することから、このような傾向が平板トラスのみに見られたと考えられる。

3.4 節点の鉛直方向変位の変動

節点の鉛直方向変位の最大値を示した正規化順位曲線を図16、図17に示す。変数は木材のヤング係数のみとし、乱数には正規乱数を用いた。図中に示す実線及び破線は、木材のヤング係数を一律に与えた場合の結果を示し、実線が設計規準における基準弾性係数 (E_0 , $E_{0.05}$) によるもので、破線が実大引張・圧縮試験より得られた試験結果の5%下限値 ($E_{\text{exp}, 0.05}$) によるものである(図1参照)。解析結果は、ほぼ全ての場合において E_0 を用いて解析した結果を上回った。 E_0 は統計値のほぼ中央値を示しているにも関わらず、解析結果が全て E_0 の結果を上回っていることから、構造物全体が局所的に低いヤング係数の影響を大きく受けていると考えられる。また、 $E_{0.05}$ を用いて解析した結果と比較すると、ヒノキでは解析結果のほぼ上限値を示し、スギでは解析結果の上限値を大きく上

<木材のヤング係数 (E_w) のみを変動させた場合>

<引張バネ定数 (K_i , K_j) のみを変動させた場合>

図10 標準的な部材における荷重と変形の関係

図9 各変数ごとの解析結果による最大軸力部材の軸力比の正規化順位曲線の一例(正規乱数)

図 11 形状の違いによる最大軸力部材の軸力比の正規化順位曲線 (アーチトラス / 変数: 木材のヤング係数・正規乱数)

図 12 アーチトラスにおける最大軸力部材の位置

図 13 基準値に対する最大軸力の増大率の正規化順位曲線 (アーチトラス / 変数: 木材のヤング係数・正規乱数)

図 14 形状の違いによる最大軸力部材の軸力比の正規化順位曲線 (平板トラス / 変数: 木材のヤング係数・正規乱数)

図 15 基準値に対する最大軸力の増大率の正規化順位曲線 (平板トラス / 変数: 木材のヤング係数・正規乱数)

図 16 鉛直方向変位の最大値の正規化順位曲線 (アーチトラス・ライズ 5m)

図 17 鉛直方向変位の最大値の正規化順位曲線 (平板トラス・スパン 22m)

回る結果となった。また、 $E_{exp, 0.05}$ を用いた解析結果では、ヒノキ、スギともに最大値に対して同程度の安全率を保証しており、設計に用いる際の妥当な数値であると言える。

4. まとめ

アーチ状二層立体トラス構造及び平板状二層立体トラス構造においてスペースフレーム部材の軸剛性のばらつきが設計時の応力、変形に与える影響についてモンテカルロ法に基づいた解析による検証を行った。以下に結論を示す。

- (1) 正規乱数、ワイブル乱数の違いによる解析結果の差はほとんど見られなかった。材料試験より得られたヤング係数の分布は、一般的な分布曲線である正規分布と仮定すればよい。
- (2) ラグスクリュー引抜き変形による引張バネ定数のばらつきは、解析結果にほとんど影響しない。
- (3) アーチ状二層立体トラス構造物及び平板状二層立体トラス構造物において、本論の範囲内では、形状の違いによらず木材のばらつきによる最大軸力の設計値に対する増大率は1～2割程度である。
- (4) 変形を検討する際は、実大材料試験より得られたヤング係数の5%下限値を用いる必要がある。

参考文献

- 1) 今井克彦, 藤田宜紀, 脇山広三, 辻岡静雄, 藤本益美, 渡辺英樹, 稲田雅宣, 寺崎美智子: 小中径木の材料学的基礎研究及びこれを用いた空間構造の開発について - その1～5, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp1～10, 2001.9
- 2) 今井克彦, 藤田宜紀, 脇山広三, 辻岡静雄, 藤本益美, 稲田雅宣, 瀧野敦夫, 福留弘子: 丸太の材料基礎実験及びこれによる空間構造の開発に関する研究 - その1～3, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp157～162,

2002.8

- 3) 今井克彦, 藤田宜紀, 脇山広三, 辻岡静雄, 藤本益美, 稲田雅宣, 瀧野敦夫, 福留弘子: 小中径木の材料機械的特性とこれに基づくスペースフレームの開発に関する研究 - その1～2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp477～480, 2003.9
- 4) 畔柳歩, 辻岡静雄, 瀧野敦夫, 脇山広三, 今井克彦: 小中径木を用いたスペースフレーム接合部の圧縮・引張性能に関する実験的研究 - その1～2, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp265～268, 2005.9
- 5) 畔柳歩, 瀧野敦夫, 片谷昌寛, 愛野将児, 辻岡静雄, 脇山広三, 今井克彦: 互換性のある接合部を有する木造スペースフレームの引張性能に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1, pp85～86, 2006.9
- 6) 藤田晋輔, 宮内正文, 服部芳明, 山之内清竜, 馬田英隆: 打撃音法によるスギ製材品のヤング係数の評価法 (Ⅲ), 木材工業 Vol. 50 No.4, pp.160～165, 1995.4
- 7) 長尾博文, 鷲野剛三, 加藤英雄, 田中俊成: 樹幹内のヤング係数分布に基づいた製材品の強度推定 - カラマツへの試み -, 木材学会誌 Vol.49 No.2, pp59～67, 2003.3
- 8) 日本農林規格: 木材編 - 針葉樹の構造用製材, 2001.11
- 9) 瀧野敦夫, 今井克彦, 古川忠稔, 辻岡静雄, 藤本益美: 国産心持ち木材の引張強度特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 No.611, pp.119-124, 2007.1
- 10) 瀧野敦夫, 今井克彦, 辻岡静雄: 小中径木丸棒の座屈耐力評価に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 No.617, pp.137-143, 2007.7
- 11) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2006.12
- 12) 日本建築学会: 木質構造限界状態設計指針 (案)・同解説, 2003.10
- 13) 畔柳歩: 小中径木を用いたスペースフレームの設計法に関する研究, 大阪大学大学院工学研究科修士論文, 2007.3
- 14) M.Matsumoto, T.Nishimura: Mersenne Twister: A623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator, ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation Vol.8 No.1, pp.3-30, 1998.1
- 15) 脇本和昌: 乱数の知識, 森北出版株式会社, 1970

(2007年4月10日原稿受理, 2007年8月17日採用決定)