

伝統木造軸組の実大静的・動的実験のシミュレーション

Analytical Simulations of Full-Scale Static and Dynamic Tests of Traditional Wooden Frames

棚橋 秀光¹・鈴木 祥之¹

Hideaki Tanahashi and Yoshiyuki Suzuki

¹立命館大学教授 グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

¹ Professor, Ritsumeikan University, Global Innovation Research Organization

This paper deals with the analytical simulation of static and dynamic loading tests of full-scale traditional wooden frames. At first, the authors try to simulate the observed restoring force characteristics of column-tie beam joints based on the elasto-plastic Pasternak model, and then, simulate the static and dynamic loading tests of traditional wooden frames by summing up the restoring force characteristics of all joints and $P-\Delta$ effects due to column rocking. The analytical simulations and collapse failure mechanism are discussed for prevention of collapse of traditional wooden frames and the effectiveness of the simulations is shown.

Key Words : traditional wooden frames, joints, elasto-plastic Pasternak model, static and dynamic loading test

1. はじめに

わが国には貴重な文化財を含む多くの伝統的な木造建築物が残っており、その維持・保存のための適切な耐震性能評価と耐震補強は全体に立ち遅れている。

伝統木造建築物の耐震要素としては、太い柱の傾斜復元力、仕口の回転めり込み抵抗、土壁・板壁のせん断抵抗などがあるが、柱貫仕口（接合部）に代表される回転めり込み抵抗が最も変形性能に富む耐震要素で、その挙動はめり込みの弾塑性復元力特性に支配される。そのめり込みの力学的特性を解明するために、筆者らは、木材相互の部分的な圧縮に対してパステルナーク・モデル（PM と略す）を適用し、直交異方性木材のめり込み変位の定式化を行った¹⁾²⁾。さらに木材の横圧縮特有の歪硬化現象に着目してめり込みの降伏メカニズムを解明し、PM を弾塑性パステルナーク・モデル（EPM と略す）に拡張し、剛性増大・低下を統一的に表す剛性関数を用いて仕口の弾塑性復元力特性を簡潔な形で定式化した³⁾⁴⁾。

しかし、実際の仕口にはさまざまなタイプや詳細があり、地域や時代による違いも少なくない。従って実際の仕口に適用し、架構全体の復元力特性と崩壊メカニズムを解明する課題は、貴重な文化財の耐震性能評価・耐震補強を検討する上で極めて重要である。

一方で、伝統木造の構造メカニズムとその復元力特性を解明するために、京都大学防災研究所にて実大架構の振動台実験と静的水平載荷実験⁵⁾⁶⁾が行われ、横架材の仕口の復元力、柱の傾斜復元力、組物の挙動などに関する貴重な実験データと知見が得られている。しかし、木材の材料定数・強度と仕口詳細に基づいた解析的な耐震性能評価は重要な課題として残っている。

そこで、本研究では、EPM 解析を3種類の仕口の復元力特性に適用し、その累積により伝統木造架構全体の復元力特性を求め、柱の傾斜に伴う正負の $P-\Delta$ 効果を加算して、実大静的・動的実験結果のシミュレーションを行うことにより解析的な耐震性能評価と崩壊メカニズムの解明を試みる。

2. 実大静的・動の実験

(1) 静的・動の実験の概要

京都大学防災研究所にて実施された振動台実験および静的水平載荷試験では、わが国の伝統木造軸組の代表的な構成と仕口をもつ実大試験体を基本にして、耐震要素の効果を解明するために、いくつかの要素を組み合わせた実験が1999年から2003年にかけて4期にわたり行われた⁵⁾⁶⁾。その中より横架材や各部の力の釣合関係、柱傾斜復元力特性の把握を主な目的とした第3期以降の表1の各試験体より、試験体A、C、D、Eを解析対象とした。各試験体は表の○印の要素から構成されることを示す。

試験体Aは標準となる試験体で、図1に示すように、4本の円柱と3種類の横架材、組物、桁梁を持つ軸組で、柱脚は礎石の上にダボ・接続金具なしで設置している。横架材は上から頭貫、内法貫、足固めで、仕口内では直交方向との取り合いでホゾ高さが半分程度になっており、楔の有無はあるが金具は用いていない。柱頭には斗・肘木から成る組物が載り、最上部の桁梁上には、実際の屋根重量に相当するプレキャストコンクリート板の錘(109.6kN)を固定して、実在の建物重量を再現している。

試験体Cは、試験体Aより内法貫を除いたもの、試験体Dは同じく内法貫、足固めを除いたもの(図2に示す)、試験体Eは頭貫のみ除いたもので、横架材の有無の組み合わせにより、各々の抵抗要素を定量的に把握することを意図したものである。

表1 試験体一覧

試験体	組物	頭貫	内法貫	足固め	足固め火打梁
試験体A	○	○	○	○	○
試験体B	○	○	○	○	
試験体C	○	○		○	○
試験体D	○	○			
試験体E	○		○	○	○
試験体F			○	○	○

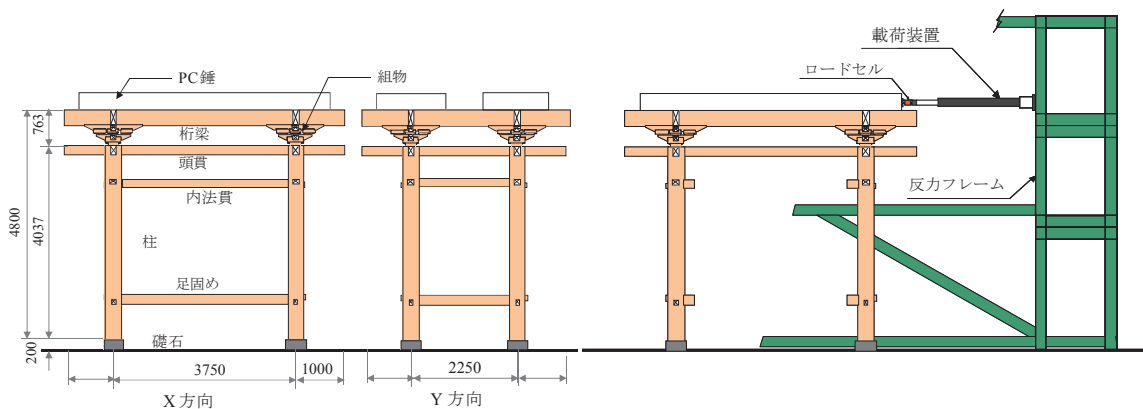


図1 試験体A

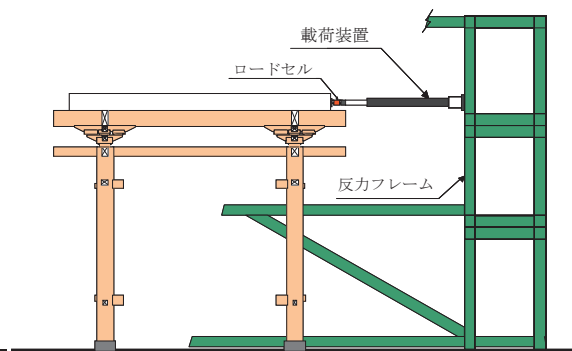


図2 試験体Dと水平載荷実験セットアップ

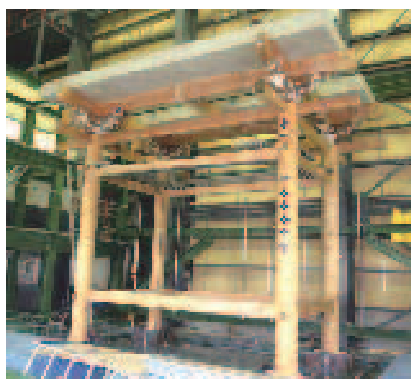


図3 振動台上の試験体A



図4 水平載荷中の試験体D

(2) 動的加振および静的水平載荷

振動台実験では桁梁に固定したPC板の上に加速度計と変位計、貫・柱に歪ゲージを設置して、試験体A、

C、Eを主な加振対象とした。固有振動数・減衰定数などの動的特性は、常時微動計測・スワイプ試験・自由振動試験などより求められている⁵⁾⁶⁾。地震入力には3次元6自由度加振可能な振動台において、代表的な地震波形として、El Centro NS 1940で最大加速度250~450cm/s²、JMA Kobe NS 1995で最大加速度700~818cm/s²などの加振を行っている。

試験体Dでは、振動台実験と静的水平荷重実験がほぼ同等な復元力特性が得られることを確認した上で、柱傾斜復元力特性を把握することを目的として図2のように、PC板を載荷装置で左右に押し引きすることで、静的水平荷重実験を行い、錘80.9kNの増加による柱傾斜復元力特性の影響も調べた。水平変位は最大300mmまで加力し、大変形時の復元力特性を求めている。

実験に用いた樹種と材料定数の平均値を表2に示す。めり込み解析に必要な横圧縮ヤング係数や降伏応力度は無いため、既往のデータを参考にしてシミュレーションに用いている。

表2 材料と平均の材料特性

部材	樹種	曲げヤング係数 (GPa)	密度 (g/cm ³)	含水率 (%)
柱	ヒノキ	6.85	0.484	13.7
組物	アサメラ	—	0.765	—
ダボ	アサメラ	—	0.765	—
桁梁	ダグラスファー	7.75	0.535	10.0
頭貫	ダグラスファー	9.12	0.511	9.2
内法貫	ダグラスファー	10.52	0.567	9.9
足固め	ダグラスファー	10.71	0.540	11.2
楔	ヒノキ	—	—	—
火打ち梁	ダグラスファー	—	—	—

3. 構造メカニズム

(1) 仕口・組物の詳細と構造メカニズム

試験体Aの仕口・組物などの詳細を図5の左側に示し、右側には水平力 Q が左から作用する場合の各部の力のつりあいと変形関係を示し、仕口のめり込みによる伝統構法特有の構造メカニズムを図解する。また、架構全体のモーメント分布は、上部の組物、最下部の大斗と下部の貫構造とが柱頭接触面で繋がり、その連続条件により、架構の復元力が基本的に異なってくる。そこで、試験体を2層系の架構とみなして、上部の組物層、下部はフレームと独立柱に分離して応力分布と変形の間関係を試験体A、Dについて図6、7に図示する。

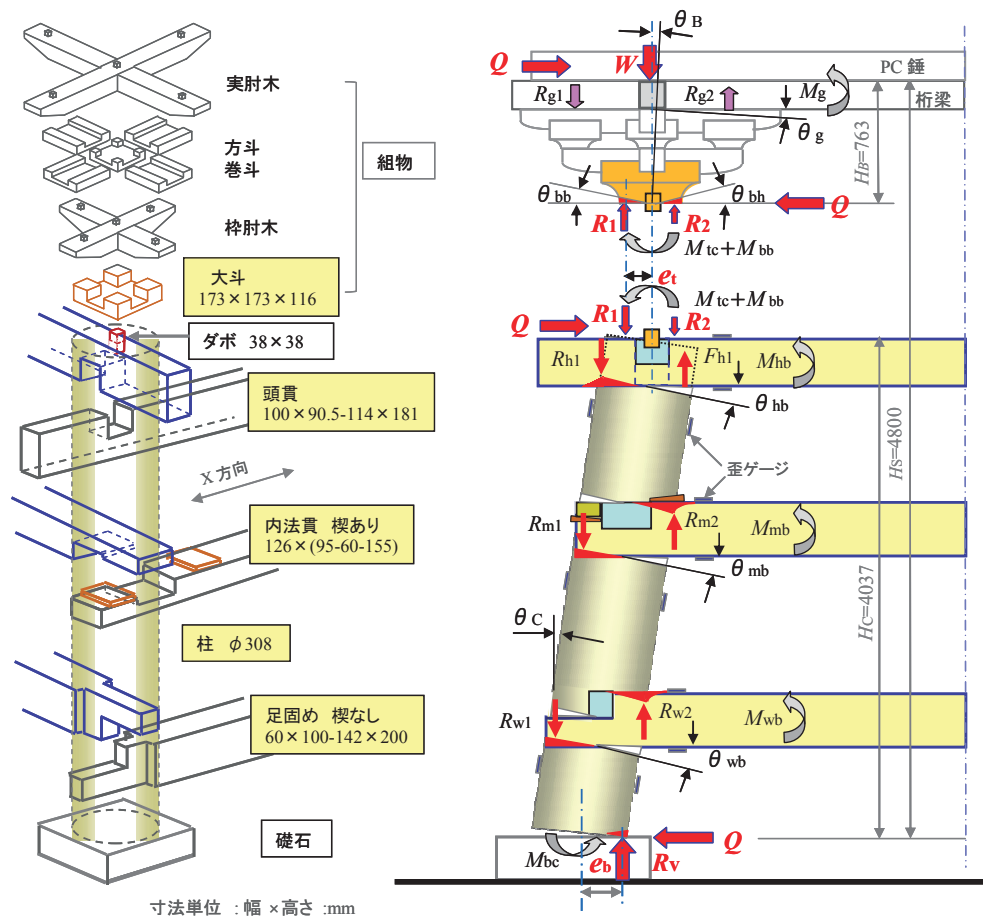


図5 試験体Aの構造詳細と構造メカニズム

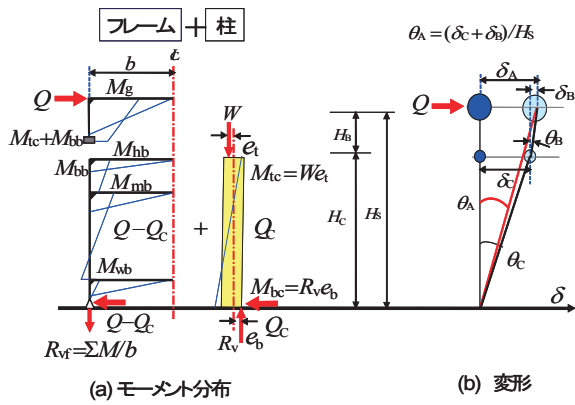


図6 試験体Aの応力分布と変形

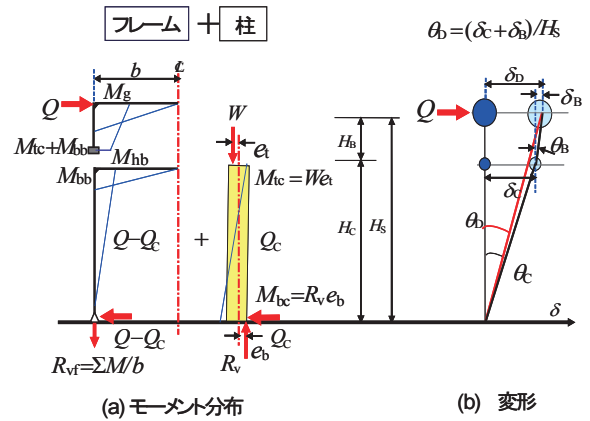


図7 試験体Dの応力分布と変形

他の試験体は貫の有無の組合せに応じて同様に考える。

試験体 A の場合、内法貫では、めり込み (図5の赤三角形) に対応した反力 R_{m1} , R_{m2} (赤矢印) が発生し、貫の曲げモーメント M_{mb} となり、その時の貫のめり込みのみによる回転角が θ_{mb} で、それ以外の変形要素を含むフレーム全体の変形角 θ を(1)式により求める。詳細は文献⁴⁾⁷⁾によることとし、今回の試験体の仕口では、ホゾの変形がかなり卓越することが特徴で、ホゾの片持ち梁としての曲げ変形を追加している。

$$\theta = \theta_p + \theta_b + \theta_c + \theta_s + \theta_t \quad (1)$$

ここで、 θ_p : めり込みのみによる回転角、 θ_b, θ_c : 貫、柱の曲げによる回転角、 θ_s, θ_t : 仕口 (ホゾ) のせん断変形、曲げ変形による回転角である。

(2) 柱の傾斜復元力

図5の柱脚の挙動に注目すると、回転を拘束するものがないため、水平力 Q が左から作用して柱が θ_c だけ傾斜すると、柱脚の左エッジは浮き上がり、全重量 W が右エッジに作用して、エッジに若干のめり込み (赤三角部分) が発生するとともに、礎石からの反力 $R_v = W \pm R_{vf}$ を受けて、エッジ反力中心の復元モーメント $M_{bc} = R_v e_b$ が作用する。

柱頭では、同様に水平力 Q が作用すると、今回の試験体では、組物は剛な桁梁と一体となってほぼ水平に保たれるため、柱の傾斜に伴い、大斗尻の右エッジが浮き上がり、大斗尻の左エッジに荷重が集中してめり込みが発生し、その反力中心の復元モーメント $M_{tc} = W e_t$ が作用する。それらの合計

$M_{tc} + M_{bc} = W e_t + R_v e_b \cong W(e_t + e_b) = W D_e$ が柱の傾斜復元力となる。この傾斜復元力の抵抗メカニズムの基本的な点はすでに解明⁸⁾⁹⁾されている。ここでは、その復元力 Q と水平変位 x の関係にパラメータ α, β を導入して一般化して、図8と提案式を(2)-(4)式に示す。

$$0 \leq x / D_e < \alpha : \quad Q = \frac{\beta W}{\alpha H} x \quad (2)$$

$$\alpha \leq x / D_e < 1 - \beta : \quad Q = \frac{\beta W D_e}{H} \quad (3)$$

$$1 - \beta \leq x / D_e : \quad Q = \frac{W D_e}{H} \left(1 - \frac{x}{D_e}\right) \quad (4)$$

ここで、 α : 有効柱幅に対する降伏変位の比、 β : 柱頭・柱脚のめり込みによる復元力低減係数であり、文

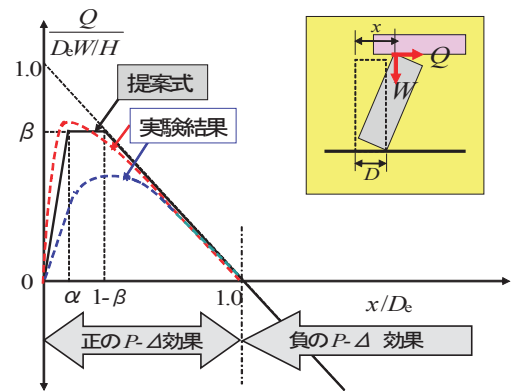


図8 柱の傾斜復元力

献¹⁰⁾では $\alpha=0.1$, $\beta=0.8$ である。柱頭・柱脚の回転中心と鉛直荷重の作用間の距離の合計 $e_t+e_b=D_e$ を有効柱幅と称し、柱が剛体であれば、実際の柱幅と見なせるが、実際は柱エッジの若干のめり込みや丸み、繰り返し载荷による劣化、大斗尻のめり込みなどにより、 α , β は载荷履歴により変動する値となり、実験的に確認する。参考に、既往の実験結果では図8に示すように $\beta=0.85\sim 0.57$ 程度⁸⁾⁹⁾である。また、水平変位が有効柱幅 D_e 以内では復元力が期待できるが、それを超える変位に対しては転倒をもたらすメカニズムに逆転するので、(4)式はその正負の $P-\Delta$ 効果を統一的に表現したものである。

(3) 架構全体の応力分布と変形

試験体を上部の組物層、下部の貫架構と独立柱に分離した応力分布と変形の関係より、既往のつりあい関係式⁹⁾を拡張して(5)–(7)式に示す。

$$\text{フレーム} : \quad QH_C = M_{tc} + M_{bc} + M_{hb} + M_{mb} + M_{wb} + M_{bb} \quad (5)$$

$$\text{柱} : \quad Q_C H_C = M_{tc} + M_{bc} = W e_t + R_v e_b \cong W D_e \quad (6)$$

$$\text{組物層} : \quad QH_B = M_g - M_{tc} - M_{bb} \quad (7)$$

ここで、 M_{bb} は組物の復元力が大斗と柱頭接触部のめり込みによって架構の復元力に寄与する成分で、傾斜復元力による柱頭のモーメント M_{tc} とは区別する。柱頭では組物、頭貫の挙動は複雑で、大斗・頭貫の回転変形により上部荷重 W がそのまま大斗の左エッジに作用するとは限らないため、便宜的に図5では R_1, R_2 ($W=R_1+R_2$)の二つの成分に分けて示している。

組物については今回の実験では、構成する斗・肘木の変形・応力の実測は行われてはいないが、組物全体としての復元力は得られており、シミュレーションの手がかりとする。

4. 実験結果とシミュレーション

(1) 柱傾斜復元力特性

試験体Dにて、錘を80.9kN増加させた場合の復元力の増加を(2)(3)式で評価すると図9のように、 $\alpha=0.2$, $\beta=0.5$ が適合した。柱は当初から同じものを使用しており、繰り返し载荷により柱脚のめり込みや磨耗の影響がかなりあると推察され、D、Eの試験体のシミュレーションではその影響を考慮する。

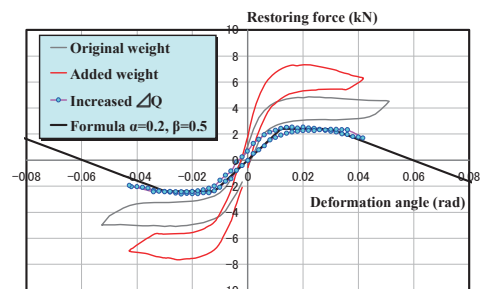


図9 錘増加による柱傾斜復元力(試験体D)

(2) 仕口の復元力特性

頭貫、内法貫、足固めの仕口の振動台実験による復元力特性は分離して得られており、それをEPMの定式化に基づいてシミュレーションした¹⁰⁾ものが、図10～図12である。めり込みのみの回転角、ホゾのせん断・曲げ変形を含む仕口の回転角、柱・貫の曲げ変形を考慮した変形角の復元力特性のグラフを各々示す。ホゾのせん断・曲げ変形の比率がかなりあることが分かる。ここで、EPM解析のパラメータは、 $E=300\text{MPa}$, $G=200\text{MPa}$, $\varepsilon_y=0.015$, $\sigma_y=4.5\text{MPa}$, $\gamma H=4$, $\eta=2$, $C=20$, $\mu=0.5$ とした。ただし、頭貫は図5に示すように、めり込み反力 R_{h1} が摩擦 F_{h1} により直交する頭貫を介してつりあうと考えられ、その挙動は複雑で今後の解明を待とし、 $\varepsilon_y=0.01$, $\sigma_y=3.0\text{MPa}$ 、正載荷 $C=30$ 、負載荷 $C=8$ とするとよく整合する。

足固め、内法貫の初期剛性は仕口のがたつきなどの要因でかなり小さく、0.01rad付近からめり込みによる剛性が発揮される。

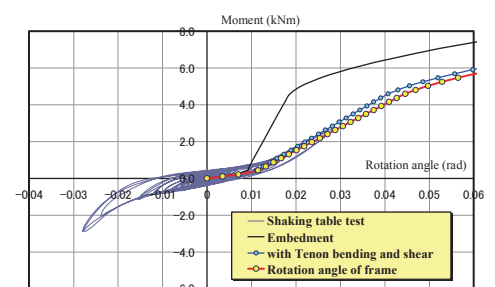


図10 足固めの復元力特性のシミュレーション

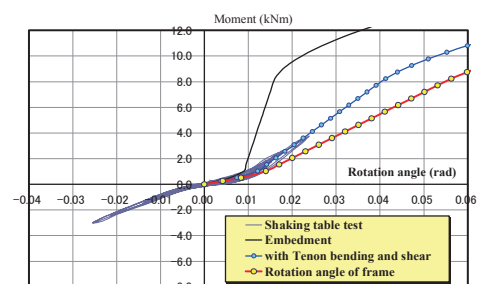


図11 内法貫の復元力特性のシミュレーション

逆に頭貫は初期剛性が高いがすぐ降伏し、復元力特性のループが大きいことから、摩擦ダンパの機能を持つと推察される。正負の復元力が非対称なのは仕口の構成が非対称であることに起因する。これらの架構全体のシミュレーションには、(1)式に従い、横架材の復元力特性に柱・貫の曲げ変形を考慮した変形角を用いる。

(3) 組物の復元力特性

組物の復元力特性は、レーザー変位計による組物層の層間変形を組物高さで除した層間変形角と組物層の加速度から求められており、図13に試験体AとDの場合を示す。初期剛性は1833kN/rad程度で、試験体Dは4kNで降伏するが、その要因は現段階では不明である。組物は、構成する斗・肘木・ダボの回転、曲げ・せん断変形、めり込み変形、摩擦とスリップなどが複合して挙動するが、試験体Aでは、15kNまでの測定範囲ではほぼ弾性状態である。この剛性は既往の組物の実験結果^{11) -13)}よりかなり小さく、組物自身の挙動だけでなく、組物を支持または拘束する境界条件に依存し、単独では評価できない特性がある。

本解析では、既往の組物の実験^{11) -13)}と同様に大斗尻のめり込みの塑性変形が明確に認められたことに着目して、大斗尻と柱頭の接触部の挙動が組物の挙動を支配すると考え、図14に示すように大斗の上に剛な桁梁と一体となった等価な柱が載っていると見なす。組物の復元力特性に相当する等価な柱の断面を設定し、大斗のめり込み抵抗 $M_{tc} + M_{bb}$ をEPM解析で、 $B=173\text{mm}$, $L=86.5\text{mm}$, $H=116\text{mm}$, $E=450\text{MPa}$, $\varepsilon_y=0.022$:A(0.004:D), $\gamma H=\infty$, $\mu=0$, $\eta=2$, $C=20$:A(200:D)とした。さらに、桁梁は剛性の高いPC板と一体になっているため、 $\theta_c \cong 1.5\theta_B + \theta_{bb}$ と仮定し、図15に示す θ_c の復元力特性を用いており、初期剛性は680kN/rad程度である。

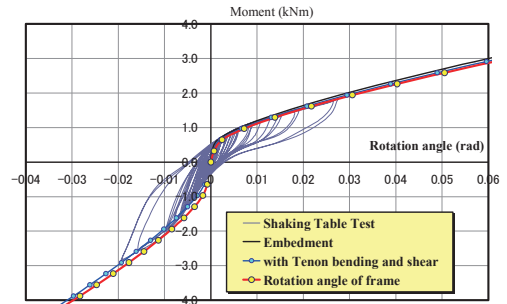


図12 頭貫の復元力特性のシミュレーション

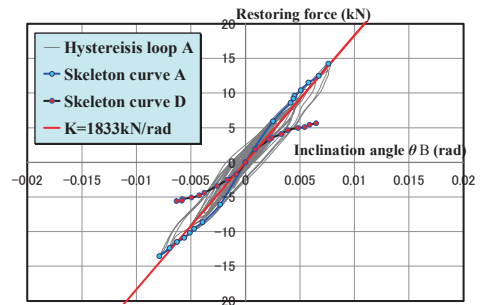


図13 組物の復元力特性

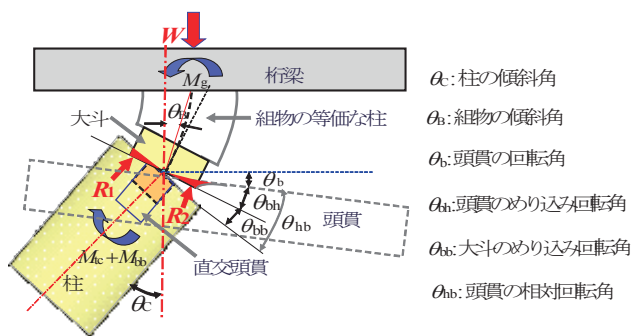


図14 組物の等価な柱と大斗の変形とメカニズム

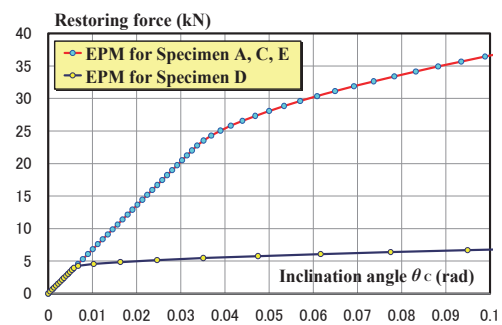


図15 組物のEPMシミュレーション

(4) フレームの復元力特性

図16、17に試験体AとDの架構の復元力特性の履歴ループと骨格曲線を示す。試験体Dの動的復元力特性は静的スケルトンカーブと概ね重なり静的水平載荷でも動的な特性の把握が可能であることが確認されている。これらの実験の復元力特性に対して、(1)式による柱・貫の曲げ変形などを含めた復元力特性、組物の復元力特性、柱の傾斜復元力を全て加算することにより、試験体A、C、D、Eの復元力特性のシミュレーションを行い、図18-21に重ねて示す。ここで、柱の傾斜復元力のパラメータは、実験の繰り返しの履歴の経過を考慮して、試験体Aに対し $\alpha=0.1$, $\beta=0.7$ 、試験体Cに対し $\alpha=0.1$, $\beta=0.6$ 、試験体D、Eに対し $\alpha=0.2$, $\beta=0.5$ とした。

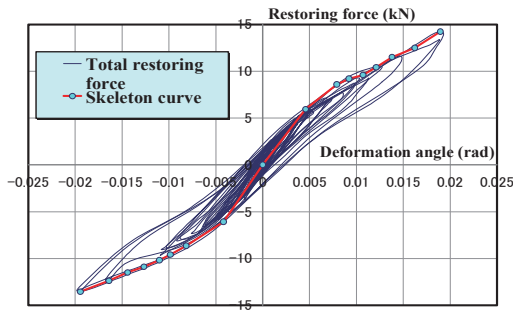


図1 6 試験体AのEl Centro NS 250 cm/s² 入力時の復元力特性

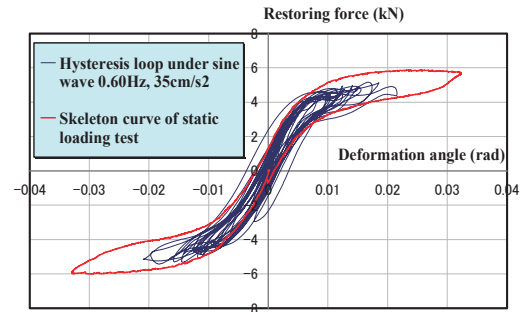


図1 7 試験体DのSine波0.6 Hz, 35 cm/s² 入力時の復元力特性

また、これらのシミュレーションでは、3種類の横架材の有無によるフレームの復元力特性を含めて、全体に弾性範囲では実験結果を概ね追跡できているが、降伏後は M_{bb} を考慮した場合と無視した場合とで差が開き、何らかの形で M_{bb} を考慮しないと、実験結果と整合しない。特に、試験体Dで柱幅を超える $1/12=0.08\text{rad}$ の大変形でも唯一の横架材である頭貫の復元力を含めても復元力がゼロになるところが、3kN程度存在し崩壊しなかった実験結果を説明できない。 $M_{tc}+M_{bb}$ には大斗尻のダボのめり込み抵抗も考えられるが、オーダーが小さいため本解析では考慮していない。さしあたって、図14の仮説に基づき $M_{tc}+M_{bb}$ をシミュレーションしたが、今後、理論的・実験的にそのメカニズムを解明することが課題である。

なお、限界耐力計算法¹⁰⁾に本シミュレーションを適用して、地震入力と関連させて崩壊シミュレーションを行う⁴⁾ことは容易であるが、シミュレーションの精度をあげるには、地震入力の適切な評価とともに、使用材料の樹種とめり込みに関連する材料特性(横圧縮ヤング係数・横圧縮降伏応力度など)を年輪傾角依存性を考慮して適切に評価する^{14) 15)}ことが重要であることを指摘したい。

また、試験体Dは0.04rad以上で復元力が低下し始めてグラフが負勾配となり崩壊の可能性が高いが、他の試験体との大きな違いは、柱傾斜復元力の負勾配を補って降伏後の復元力を維持するだけの横架材の復元力が不足することにある。その背景に、歪硬化による横架材の降伏後のめり込み復元力増大が崩壊防止に決定的な役割を果たすという崩壊メカニズムの存在が明らかになる。

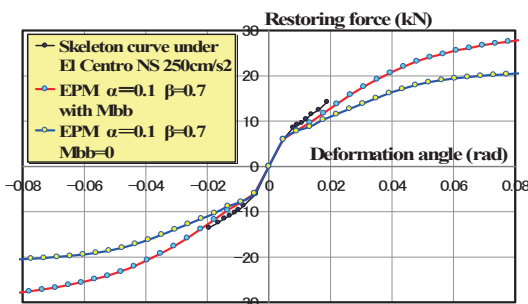


図1 8 試験体Aの復元力特性のシミュレーション

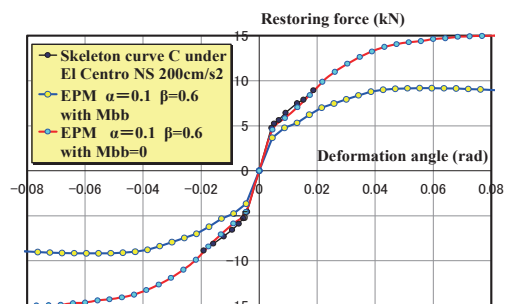


図1 9 試験体Cの復元力特性のシミュレーション

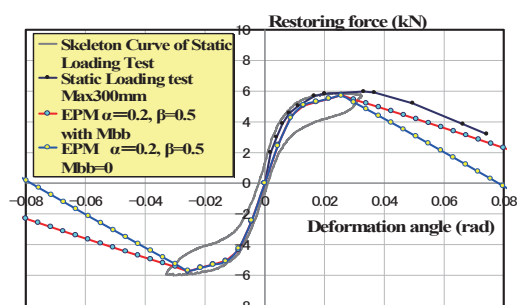


図2 0 試験体Dの復元力特性のシミュレーション

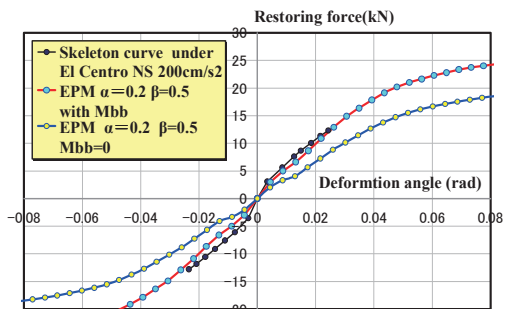


図2 1 試験体Eの復元力特性のシミュレーション

5. まとめ

伝統木造軸組の仕口の回転復元力に EPM 解析を適用して、柱の傾斜復元力と合せて、フレーム全体の実大静的・動的実験のシミュレーションを試み、崩壊メカニズムを検討した。主な結論と今後の課題をまとめる。

1. 弾塑性パステルナーク・モデルを用いて 3 種類の貫仕口の復元力特性のシミュレーションを行い、適切なパラメータの設定により、実験データと整合することを確認した。
2. いくつかの貫仕口の復元力特性を累積し、柱・貫の変形を含めてフレームとしての復元力特性を求め、柱の傾斜復元力を加算して、4 種類のフレームの静的・動的実大実験のシミュレーションを行い、かなりの精度で実験結果の追跡が可能であることを示した。あわせて、伝統木造軸組の変形性能を理論的に裏付けるとともに、崩壊のメカニズムを明らかにした。
3. 柱頭と組物の接触部の力学メカニズムは現段階では十分解明できておらず、本研究ではひとつの仮説として実験結果の裏づけとしたが、今後引き続き理論的・実験的な解明を行う必要がある。
4. 各樹種のめり込みに関連するパラメータ、特に最も基本となる横圧縮ヤング係数と横圧縮降伏応力度は、既往のデータをもとに仮定したが、材料実験・めり込み実験などに基づくより精度良いシミュレーションを目指す必要がある。

謝辞

榊前野建築設計・前野将輝博士には、有益な情報と貴重なご意見を頂いた。ここに深く感謝します。本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(S) (課題番号 19106010、研究代表：者鈴木祥之) による。

参考文献

- 1) 棚橋秀光・清水秀丸・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく直交異方性木材の部分圧縮による弾性表面変位，日本建築学会構造系論文集，No.609, pp.129-136, 2006.11.
- 2) 棚橋秀光・清水秀丸・堀江秀夫・楊 萍・鈴木祥之：パステルナーク・モデルに基づく有限長直交異方性木材の弾性めり込み変位，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.625, pp.417-424, 2008.3.
- 3) Tanahashi, H., Okamura, M. and Suzuki, Y.: Simple formulation of elasto-plastic embedment behavior of orthotropic wood considering densification, *Proc. 10th World Conference on Timber Engineering*, Miyazaki, Japan, 2008.6.
- 4) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造建築物の崩壊シミュレーション，歴史都市防災論文集，Vol.3, pp.35-42, 2009.6.
- 5) Maeno, M., Suzuki, Y., Ohshita, T. and Kitahara, A.: Seismic response characteristics of traditional wooden frame by full-scale dynamic and static tests, Paper No.1184, *Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, 2004.
- 6) Suzuki, Y. and Maeno, M.: Structural mechanism of traditional wooden frames by dynamic and static tests, *Structural Control and Health Monitoring 2006*, Vol.13, pp.508-522, 2005.
- 7) 棚橋秀光・鈴木祥之：伝統木造の各種仕口の復元力特性シミュレーション，日本地震工学会大会 2009 梗概集，pp.330-331, 2009.11.
- 8) 坂静雄：社寺骨組の力学的研究（第 1 部 柱の安定復元力），日本建築学会論文集，pp.252-258, 1941.4.
- 9) Kawai, N.: Column rocking resistance in Japanese traditional timber buildings, *Proc. International Wood Engineering Conference*, 1-183-190, 1996.
- 10) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会：伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアルー限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法，学芸出版社，2004.
- 11) 林知行・軽部正彦・原田真樹・高橋好夫・木村勉：日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.267-268, 1998.9.
- 12) 藤田香織・木村正彦・大橋好光・坂本功：静的水平加力試験に基づく伝統的木造建築の組物の履歴モデルと剛性評価，日本建築学会構造系論文集，No.543, pp.121-127, 2001.5.
- 13) 楠寿博・長瀬正・木林長仁・林良彦・植田哲司：伝統木造建築における斗組の構造特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No.592, pp.129-136, 2005.6.
- 14) Tanahashi, H. and Suzuki, Y.: Seismic resisting mechanism and formulation of traditional timber joints in Japan, *Proc. 10th International Conference on Structural Safety and Reliability*, pp.3275-3282, Osaka, Japan, 2009.9.
- 15) 棚橋秀光・鈴木祥之：木材の年輪傾角によるめり込み強度の分布特性、第 60 回日本木材学会大会研究発表要旨集，H18-0900, 2010.3.