打突試験による伝統木造架構の振動性状の評価に関する実験的研究

—平等院翼楼の部分モデルによる検討—

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EVALUATION OF A DYNAMIC CHARACTERISTIC
OF TRADITIONAL WOODEN FRAME BY IMPACT TEST

In the case of a partial model of the wing corridor of Byodo-in temple

幸村 徹也*, 西川 英佑**, 西澤 英和***

Tetsuya KOUMURA, Eisuke NISHIKAWA and Hidekazu NISHIZAWA

This study paid its attention to vibration observation at the actual place as the way that we could investigate a structural characteristic of cultural assets building quickly. We performed vibration test of a frame model of traditional shrines and temples building and added examination. The results from the examination are as follows.

- ① we have clarified the following the behavior of the frame after a shock precisely by sampling the data with high frequencies.
- ② we have verified the effectiveness of the multiple points observation system.

Keywords : wooden architecture, vibration test, sight observation

木造建築、振動実験、現地観測

結言

平成7年兵庫県南部地震以降、文化財建造物の保存修理事業に際して、対象建造物の耐震特性を明らかにするとともに、構造性能が不足する場合には、文化財としての価値を保全しつつ適切な構造対策を施すことが求められるようになった。しかしながら、社寺建築や民家をはじめとする伝統木造建造物は、地域性や歴史性を反映して構造形態や構築法に多様性が大きい。更に修理時期を迎えた歴史的建造物はほぼ例外なく、様々な劣化損傷を受けている。このようにもともと構造特性に個性が強く、さらに劣化の予想される文化財建造物の構造特性をいかに把握するかは保存工学上の重要な課題となっている。

一般に、文化財建造物の保存修理では、本工事に先立って修理方針の策定や修理設計の基礎資料の収集を目的として、詳細な実測や損傷調査などが行なわれる。本研究はこのような調査に際して迅速に実施しうる手法として、現地での振動観測に着目し、伝統的な社寺建築を対象としたモデル実験を通して検討を加えたものである。既存建物の振動特性を把握するために常時微動観測や起振試験はよく行なわれているが、前者を外乱の強い現場で適用するには制約が多い。また後者は機材設置上の負担が少なくない。

しかしながら、伝統木造建築はRC造やSRC造などに比べて、躯体重量が軽いと、人力による打突など簡単な方法で計測上十分な強さの振動を与えることができる。本研究はこのような観点から、小さな衝撃力を木造架構の様々な位置に加えて、その応答を多点観測することにより、架構の振動性状をどの程度評価しうるのかについて実験的に検討した。

なお、最近このような衝撃的な載荷試験や地震動の観測手法に関して、防衛大学校の大野、室蘭工業大学の岸らは、観測波形のサンプリング速度の重要性について指摘している^{1), 2), 3)}。すなわち、従来の研究では通常数百 Hz のサンプリング速度で加速度や歪の測定が行なわれてきたが、このような低いサンプリング周波数を用いることで、衝撃直後に生じる極めて大きな応答波形が検出されないこと、さらに地震動の観測においても高周波のサンプリングを行なうと、従来考えられていたよりも遥かに大きな衝撃加速度が検出されることを明らかにしている。本研究では、このような研究に着目し、数キロ Hz のサンプリング速度での多点振動計測を試みた。

本研究ではまず木材の単純梁で高周波数サンプリングの振動実験を行い、続いて平等院翼廊をモデルとした架構での振動実験を行なった。

* 俣石本建築事務所 工修

** 東京工業大学大学院理工学研究科 博士後期課程・工修

*** 京都大学大学院工学研究科 講師・工博

Ishimoto Architectural & Engineering Firm, M. Eng.

Graduate School of Engineering Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

Lecturer, Kyoto University, Ph. D.

1. 木材の単純梁の打突試験

木造架構モデルの実験に先立って、軽い打突によってどのような現象が観測されるのかを検討するため、木材の単純梁を用いて種々のサンプリング周波数の観測結果について考察した。

1.1. 実験概要

・試験体

図1に実験のセットアップを示す。幅10cm 成17cm 長さ4mのベイマツの試験体を両端でピン支持した。

・実験内容

試験体の上端中央軸線上に、ピエゾ抵抗型加速度計を1m間隔で5台設置した。点①・②には材軸方向、点③・④・⑤には材直交方向の振動を観測するように設置した。点A（木材の中央部）を直交方向に、点B（木材の端部）を材軸方向にゴムハンマーで軽く打突し、打突時の応答加速度波形を20kHzのサンプリングで0.45秒間観測した。

1.2. 実験結果と考察

・打突直後の応答波形

図2は点Aを打突した時の点④で観測した打突直後の応答波形とそのデータを10個・100個置きを選んで作成した2kHz・200Hzサンプリングの波形を比較したものである。また200Hzに関してはサンプリングの開始時刻を2.5msずらして2種類作成した。

20kHz(太線)・2kHz(細線)の波形はほぼ同じであるが、サンプリングの点を口と●で示した200Hzの波形は適切に観測できていない。また200Hzの波形はサンプリングのタイムラグによって大きく異なることが分かる。200Hzのサンプリングの最大加速度はサンプリングのわずかな2.5msのラグによって約50%の誤差が生じる可能性があることが分かった。

・打突直後の振動の伝達

点Aを直交方向に打突したときの打突直後の点③・④・⑤の応答加速度波形を図3に、点Bを材長方向に打突したときの打突直後の点①・②の応答加速度波形を図4に示す。図3・図4の各波形の第1波から振動の伝達にかかる時間を図中の矢印のようにして求め、加速度計の設置点間の距離を除し振動の伝達速度を求めた。

点Aを材直交方向に打突した時の伝達速度は1100 m/s、点Bを材軸方向に打突した時の伝達速度は4900 m/sとなった^{注1)}。

・梁の曲げ振動

図5に点Aを打突した時の点④の20kHz・0.45秒間の材直交方向の観測加速度波形を示す。また、その波形のフーリエスペクトルを図6に示す。

これより打突直後に約150Hzで弦のように振動し、この振動は打突後約0.2秒で減衰することが分かる。そして、その後に続く約20Hzの振動が試験体の全体的な振動であると考えられる^{注2)、注3)}。

前者の約150Hzの振動について考察を行なう。別途行なった静的載荷実験より得た試験体の曲げ剛性EI、重量測定から得た試験体の密度 ρ を用いて試験体の弦としての固有振動数の理論値を式(1)で求める。

図1 セットアップ

図2 サンプリング周波数の異なる打突直後の応答加速度

図3 点Aを打突直後の点③・④・⑤の材直交方向の応答加速度

図4 点Bを打突直後の点①・②の材軸方向の応答加速度

図5 点Aを打突後の点④の応答加速度

・試験項目

打突試験

図 10 に示すように鉄骨反力床上に架構を設置した。約 15kg (架構モデルの約 1%) の打突用の重りを振り子状に吊り、床面より約 2m の高さに於いて頭貫のみいれた Y1 構面を打突した。

図 11 に示す点①～⑤の各点に於いて梁間方向 (X 方向)・桁行方向 (Y 方向) に加速度計を、図 12 に示す 6 箇所に変位計を設置した。観測は 500Hz のサンプリングで 16.4 秒間、2kHz のサンプリングで 2.0 秒間、10kHz のサンプリングで 0.8 秒間の 3 パターンを行なった。

静的載荷試験

図 13 に示すように打突試験と同じセットアップとした。打突点と同じ高さに於いてデジタル制御型の機械式加力装置により静的水平加力を行ない、加力中に各点の変位を測定した。尚、載荷点は反力台のモジュールの制約により梁間の中央とした。

写真 1 平等院鳳凰堂翼廊モデル

図 10 打突試験の設置図

図 11 加速度計の配置

図 12 変位計の配置

図 13 静的載荷試験の設置図

2.2 実験結果と考察

・サンプリング周波数が積分精度に与える影響

図 14 は打突した時の点①で 2kHz のサンプリングで観測した桁行方向の応答加速度と、そのデータを 4 個・10 個置きを選んで作成した 500Hz・200Hz のサンプリングの応答加速度をそれぞれ 2 回時間積分して応答変位としたものである。また同図に変位計で同一点で観測した応答変位を示す。

500Hz・200Hz のサンプリングでは応答加速度が適切に観測されておらず、時間積分して応答変位を求めると大きく誤差を持ってしまふことが分かる。それに対し 2kHz のサンプリングの場合では変位計の観測値とほぼ一致しており、高周波数サンプリングによって積分精度が大幅に向上することを確認された。

・打突後の応答波形

2kHz で観測した打突後の点①の桁行方向の応答加速度を図 15-a に示す。又、これを時間積分した応答速度を図 15-b に、さらに時間積分した応答変位を図 15-c に示す。

打突直後から図 15-a～図 15-c の図中の点線よりも左側の約 0.1 秒間では、100～300Hz の高周波数の振動が卓越している。これは加速波形で顕著であるが、速度波形や変位波形にもその影響が認められる。この区間では部材中に波動が何回も往復しつつ、高周波成分が急速に減衰していくと考えられる。

一方、点線より右側では、3～5Hz の周波数の振動が卓越している。これは架構全体に振動が伝わり、全体が一体となって自由振動を始めていると考えられる。

以下にこの 2 つの状態それぞれについて結果を考察していく。

・打突直後の振動の伝達

図 16-a・図 16-b は架構を打突後、衝撃的な波形が架構の各部にどのように伝播するか検討したもので、図 16-a は点②・④、図 16-b は点③・⑤に対しそれぞれ打突点近傍の点①の応答加速度と比較したものである。

各観測点に於ける桁行方向の応答加速度について、各点への第 1 波から伝達にかかる時間を図 16 の図中の矢印のように求め図 17 に示す。点②・④までの伝達時間から各方向への伝達速度を求めると梁間方向が 1000m/s、桁行方向が 2700m/s となる。波動が端部から端部まで到達し、反射波が帰ってくるまでは梁間方向で 4.4 ms、桁行方向で 2.2 ms だから周波数にして約 230Hz、約 450Hz となる。

また、点①・③の波形を比較すると図 16-b の点③の波形では黒丸で示すように約 110Hz の波が打突後に振幅を増幅していることが分かる。

図 17 打突後の桁行方向の振動の伝達時間

図 14 サンプリング周波数の異なる積分変位

図 15-a 点①の桁行方向の応答加速度

図 15-b 点①の桁行方向の応答速度

図 15-c 点①の桁行方向の応答変位

図 16-a 打突直後の点①・②・④の桁行方向の応答加速度

図 16-b 打突直後の点①・③・⑤の桁行方向の応答加速度

・打突直後の振動の周波数特性

10kHz で観測した打突後の点①・②・③での桁行方向の応答加速度のフーリエスペクトル図 18 に示す。図中に示すように約 60Hz と約 110Hz にピークが判読できる。約 110Hz の振動は前項で指摘したように打突直後に梁中央部点③で増幅していることから、梁の面内方向の曲げ振動であると考えられる。

・架構の自由振動の周波数特性

次に架構の自由振動の特性を見るために 500Hz のサンプリングで 16 秒間観測した結果について考察する。変位計により観測した Y1 構面の桁行方向の応答変位を図 19 に示す。観測範囲での最大値が 0.19cm、二乗平均が 0.01cm だった。

自由振動時の桁行方向に観測した点①と点④、点②と⑤、更に梁間方向に観測した点①と点②、点④と点⑤の観測加速度波形はほぼ同じ性状を示した。そこで各構面の応答加速度として①・Y (Y1)、②・Y (Y2)、①・X (X1)、③・X (X2)、④・X (X3) で観測した結果を見ていく。

桁行方向の各構面のフーリエスペクトルを図 20-a に、梁間方向の各構面のフーリエスペクトルを図 20-b に示す。図 18 で求めた打突直後のスペクトルよりも低周波数でのピークが大きく、2.0Hz・2.8Hz・3.7Hz・10.7Hz の 4 つのピークを判読できる。これを順に架構の 1 次、2 次、3 次、4 次の固有振動数とする。

図 20-a・20-b のフーリエスペクトルから求めた架構の各固有振動数の振動モードを図 21 に示す。振動モードから 1 次振動は梁間方向 (X 方向) の並進振動、2 次振動は架構の振れ振動、3 次振動は桁行方向 (Y 方向) の並進振動、4 次振動は水平構面のせん断変形振動であることが分かる。

2 次の振れ振動が顕著に観測されたのは Y1・Y2 の構面の貫の段数が異なるために桁行方向の構面の剛性が偏在しているからであると考えられる。また、4 次の水平構面のせん断変形振動が観測されたことは、この架構では剛床が仮定できないことを示唆する。

・振動特性に基づく架構の力学モデル

図 22 のように架構をモデル化した。梁間方向の X1・X2・X3 の構面の剛性は等しいと仮定できる。従って、ここでは桁行方向のみの力学特性を考え、剛心も桁行方向の構面の剛性バランスによって決まるとした。

図 18 打突直後の点①・②・③の桁行方向のフーリエスペクトル

図 19 打突後の Y1 構面の桁行方向の応答変位

図 20-a 桁行方向の各構面のフーリエスペクトル

図 20-b 梁間方向の各構面のフーリエスペクトル

図 21 架構の振動モード

この力学モデルの運動方程式を式(2)・式(3)で表す。

$$-\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1+k_3 & -k_3 & k_3 l \\ -k_3 & k_2+k_3 & -k_3 l \\ k_1 e_x & k_2 e_x & k_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \theta \end{bmatrix} \cdots \text{式(2)}$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \omega^2 \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \theta \end{bmatrix} \cdots \text{式(3)}$$

ω :各固有振動数における角速度

$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \theta \end{bmatrix}$:各固有振動数における振動モード

図22 架構の力学モデル

重量 $m_1 \cdot m_2$ は全重量を半分ずつとし、800kg とした。観測結果から得た2次・3次・4次の各固有振動数の角速度・振動モードと近い特性を持つように力学モデルのY1構面の剛性 k_1 、Y2構面の剛性 k_2 、水平構面の剛性 k_3 、架構のねじれ回転剛性 k_θ を算出する^{注4)}。

算出した結果、Y1構面の剛性は約3.5(kN/cm)、Y2構面の剛性は約5.0(kN/cm)、水平構面のせん断剛性は約16.0(kN/cm)となり、この時力学モデルの振動特性は観測値との振動数の誤差が最大で9%、モード比の誤差が最大で6%となった。

・復元力の計算値と静的載荷実験結果の比較

静的載荷実験で求めた架構の復元力特性と打突試験結果から算定した各通りの初期剛性を比較する。

まず、図23-aに2kNまで静的載荷を行なった時の各柱頭の軌跡を示す。また図23-bに架構を打突した後0.15秒間の加速度波形を積分して求めた変位軌跡を示す。与えた変形量は静的載荷実験の方が打突試験よりも大きく、載荷点・打突点は多少異なるが、両者とも振れを伴った並進運動の軌跡を示し同様の変形性状を持っていることが分かる。

次に、作成した力学モデルを用いて静的載荷実験と同様の載荷条件下での各構面の復元力特性を求め、静的載荷実験結果と図24-a・図24-bで比較する。参考までに図24-aにY1構面の応答変位の最大値が示してある。

図23-a 静的載荷時の各点の軌跡

図23-b 打突試験時の各点の軌跡

図24-a 載荷荷重とY1構面の桁行方向の変位の関係

図24-b 載荷荷重とY2構面の桁行方向の変位の関係

結語

木材の単純梁と平等院翼廊をモデルとした立体架構を対象に打突試験を行った結果、下記の諸点が明らかになった。

- 1) 高周波数のサンプリングで振動観測を行なうと、打突直後に高周波の縦波や横波の伝播が明瞭に観測された。この過渡的な振動は打突後 100～200ms で急速に減衰して、以後自由振動領域に移るようである。
- 2) 高周波数でサンプリングすることで積分精度が飛躍的に向上し、観測した加速度波形から変位波形を精度良く求めることができた。
- 3) 架構の自由振動から高次の振動モードを把握し、架構の各通りの剛性を求める方法を提案した。静的載荷試験結果と比較した所、両者の剛性は層間変形角 1/1000 位の範囲でほぼ一致した。

注

注 1) 等方弾性体を仮定した時の試験体の疎密波・せん断波の伝達速度の理論値について考察する。式(4)・式(5)に文献 4) p. 131 のアカマツの特性を用いて疎密波・せん断波の伝達速度の理論値を求める。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{1+\nu} \cdot \frac{1}{1-2\nu}} \quad \dots \text{式(4)}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \dots \quad \text{式(5)}$$

V_p : 疎密波の伝播速度

V_s : せん断波の伝播速度

E : ヤング係数: 120ton/cm²

G : せん断係数: 0.45ton/cm²

ρ : 密度: 510kg/m³

ν : ポアソン比: 0.4

疎密波の伝播速度が約 7000m/s、せん断波の伝播速度が約 300m/s となった。

注 2) 20Hz の振動は、試験体がわずかにねじれていることにより支持点ががたつき、起こっていると考えられる。

注 3) 図 5 の加速度波形に 20Hz の振動の包絡線をフィットさせると、減衰定数は 1.2% となる (図 25-a)。さらにその波形から 20Hz の振動波形を取り除き 150Hz の振動の包絡線をフィットさせると、減衰定数は 2.2% となった (図 25-b)。

注 4) 観測結果の固有振動数・モードを、モードの回転角 θ を未知数とした状態で運動方程式に代入し、 $k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ を θ の関数として求める。2 次・3 次・4 次の観測結果についてそれぞれ解くと、 θ の関数となった $k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ の関係から $k_1=4.5 \sim 5.5$ kN/cm、 $k_2=3.3 \sim 3.6$ kN/cm、 $k_3=15.0 \sim 18.0$ kN/cm となることが分かる。この結果から得られた各剛性の近似値を剛性マトリクスに代入し固有振動数・モードを検算することで、振動結果と最も近似する剛性を求めた。

参考文献

- 1) 大野友則, 井元勝慶: 衝撃的地震動の計測・記録における問題点 直下型地震による構造物の衝撃破壊の解明と防止策に関するワークショップ前刷り, pp165～171, 1999.12
- 2) 岸徳光, 三上浩, 安藤智啓: RC 柱の横衝撃耐荷性に関する実験的研究, p86-97, 1999.12
- 3) 土木学会 構造工学シリーズ 15, 衝撃実験・解析の基礎と応用, 2004.3
- 4) 木材工業ハンドブック編集委員会: 改訂 3 版 木材工業ハンドブック, p.131, 1991.3

図 25-a 20Hz の振動の減衰

図 25-b 150Hz の振動の減衰

(2005年7月10日原稿受理, 2006年3月7日採用決定)