

集成材部材連結部の衝撃応答解析に基づく動的剛性評価について

Estimation of Dynamic Flexibility of Connecting Joint of Beams with Glued Laminated Timbers by Impulse Response Analysis

○山本亮* 岩崎正二** 出戸秀明** 五郎丸英博*** 宮本裕**
YAMAMOTO Ryo, IWASAKI Shoji, DETO Hideaki,
GOROMARU Hidehiro and MIYAMOTO Yutaka

ABSTRACT The purpose of this paper is to clarify the dynamic characteristics of connecting joints of arched pedestrian bridge with laminated timbers. The behavior of connecting joints of this structure was described by 2-dimensional elastic spring model. The dynamic coefficients of the flexible element were estimated from the numerical impulse response analysis by means of using the measured acceleration waves of dynamic impact test for beam with a connecting joints.

Keywords: 集成材、部材連結部、バネ要素、衝撃応答解析
glue laminated timber, connecting joint, spring element, impulse response analysis

1. はじめに

近年、集成材を主材料とする木橋が公園などを中心に架設されるようになってきた。この背景には、木材加工技術の進歩に伴い、木材を集成材として利用することにより強度・品質が安定し長期耐久性に優れた大断面長大材の制作が可能になったことが挙げられる。また、木橋は鋼材やコンクリートなどの工業的材料とは異なり、地域特有の木材を用いることができるので、完成した構造物は地域のランドマークとしての役割を果たすことが可能である。さらに、集成材を用いた木橋が数多く建設されることで、その地域の木材資源の有効的活用がなされ、地域の活性化に役立つと同時に、今後、間伐材や不良材を用いた集成材の使途が広がることで、多大な経済効果があると考えられる。

集成材はひき板を積層圧縮接着して工業的に生産されるため、長大材や湾曲材が比較的容易に製造できるという利点がある。しかし、長大材や湾曲材は工場からの運搬が困難であることから、数部材に分割し現場で連結することが一般的である。そのため集成材を用いた木橋は、各部材の接合部のほかに、分割された部材をつなぐ連結部が必要となり、その連結位置や連結方法が、構造物の静的及び動的特性に多大な影響を与えることが考えられ、その剛性評価は重要な問題となる。しかし、このような状況のもとで、木橋を対象とした接合部及び連結部に関する研究報告^{1)~6)}は多くはなく、木橋連結部の静的及び動的特性を早急に明らかにしておくことが重要である。

著者らは文献4)において、木歩道橋の振動実験と振動解析を実施し、連結部の有無やその連結部の部材接合条件が解析結果に相違をもたらすことを明らかにしている。また、木歩道橋の部材連結部にバネ要素を用いるモデル化を提案し、そのバネ定数を決定する方法として固有振動数の数値解析値を実測値に収束させる最適化手法を提案した。しかし、この連結部剛性評価法は、構造物の架設後にしか適用できない。

*岩手大学大学院工学研究科

(〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5)

**岩手大学工学部建設環境工学科

(〒020-8551 盛岡市上田4丁目3-5)

***日本大学工学部土木工学科

(〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1番地)

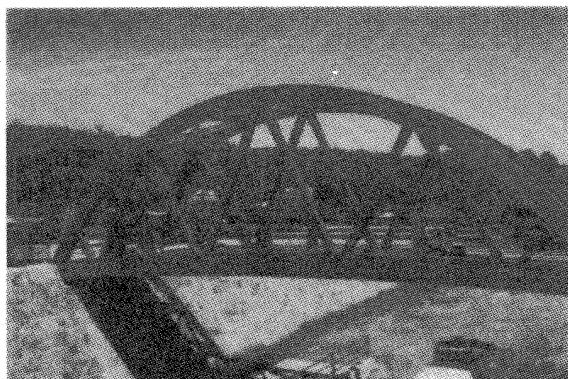
この問題を解決するために、文献5)では文献4)と同様に、岩手県下閉伊郡田野畠村思惟大橋コミュニティ公園内に架設された、集成材を主材料とする下路式アーチ形式歩道橋（思惟公園1号橋）（写真一1）の部材連結部に着目し、連結部を含む実物大の集成材梁試験体（写真一2）を製作し、静的及び動的局部試験を行うことにより連結部の静的及び動的バネ定数を求め、連結部の剛性評価を試みた。その際、動的局部実験では試験体を2本のロープで吊り、打撃ハンマーにより縦打撃実験と曲げ打撃実験を行い、得られた実測固有振動数と動的ヤング係数を振動数方程式に代入して動的バネ定数を逆算する数値解析手法（逆算手法）を提案した。

しかし、文献4)の最適化手法ではバネ定数の算出に木橋全体の固有振動数を得るための振動実測が必要である。また、文献5)の逆算手法ではバネ定数の算出に必要な固有振動数を求めるため、連結部を含む実物大の集成材梁試験体を作製し室内的打撃実験が必要である。従って両手法とも、現場の局部打撃試験による実測加速度応答波形のように固有振動数が求めにくい波形の場合には、適用しにくくと思われる。

そこで本論文では、最初に打撃ハンマーにより衝撃力を受ける連結部を有する集成材梁試験体の衝撃応答解析をバネ要素を用いて行い、得られた加速度応答波形と打撃試験による加速度応答波形を比較検討した。また、連結部の剛性の変化が衝撃応答にどのような影響を及ぼすかについてバネ定数を変化させて検討を行った。これらの結果をふまえて本論文では、数値解析による加速度応答波形を実測による加速度応答波形に収束させるようにバネ定数を推定する手法を提案する。本手法では加速度応答波形そのものを使ってバネ定数の推定を行うため、前述の最適化手法や逆算手法のように境界条件や固有振動数などによる制約がなく、実験及び実測による加速度応答波形が求まれば、バネ定数を推定することができるという利点がある。本論文では提案した手法を連結部を有する集成材梁試験体の曲げ打撃問題に適用し、本手法により推定したバネ定数と逆算手法によるバネ定数の比較検討を行った。

2. 部材連結部のバネ要素を用いたモデル化

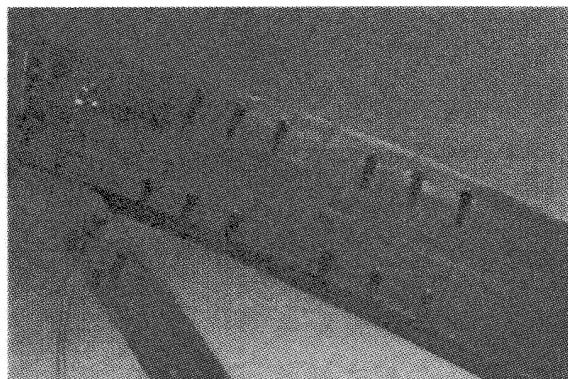
本論文の対象である思惟公園1号橋の部材連結部は、写真一2に示すように集成材内に $1000 \times 60 \times 9$ (mm)の鋼板4枚を挟んで、両側から12本のボルトで固定する鋼板挿入型ボルト接合となっている。1号橋の連結部はアーチ部と下



写真一1 思惟公園1号橋



写真一2 ボルトを外した状態の部材連結部



写真一3 1号橋・部材連結部

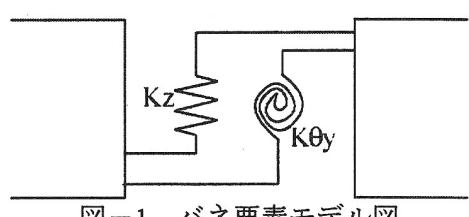


図-1 バネ要素モデル図

弦材に計8ヶ所設置されているが、写真—3に示すように他の部材との接合はなく、長大部材だけの極めてシンプルな構造となっている。本論文では、文献5)と同様に集成材梁試験体の曲げ打撃問題を取り扱うため、また、1号橋の部材連結部は半剛結の特性を有するものと考え、図—1に示す2次元バネ要素にモデル化し解析を行った。

このバネ要素の剛性マトリックスは次式のように表される。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_z & 0 & -K_z & 0 \\ 0 & K_{\theta_y} & 0 & -K_{\theta_y} \\ -K_z & 0 & K_z & 0 \\ Sym. & & & K_{\theta_y} \end{bmatrix}$$

ここで、 K_y ：せん断バネ、 K_{θ_y} ：回転バネを表している。また、バネ要素においては質量マトリックスは考慮しない。

3. 衝撃応答解析理論

Bernoulli-Euler梁要素とバネ要素を重ね合わせると、打撃ハンマーによる衝撃力 $\{Q(t)\}$ を受ける集成材梁試験体の構造全体の運動方程式は式(1)で表される。

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{w}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{w}\} = \{Q(t)\} \quad (1)$$

ここで、 $[\mathbf{M}], [\mathbf{K}]$ はそれぞれn行n列の質量マトリックス及び剛性マトリックスを、 $\{\mathbf{w}\}$ は未知節点変位ベクトルを、またドットは時間に関する2階微分を表す。

動的変位 $\{\mathbf{w}\}$ を固有ベクトルから成るマトリックス $[\mathbf{V}]$ と一般化座標 $\{\mathbf{z}\}$ で表すと式(2)となる。

$$\{\mathbf{w}\} = [\mathbf{V}]\{\mathbf{z}\} \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入し、 $[\mathbf{V}]^T$ を左側から乗じると、固有ベクトルの直交性より、次のようなn個の非連成運動方程式が得られる。

$$M_r^{*} \ddot{z}_r + K_r^{*} z_r = P_r^{*}(t) \quad (r=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

ここで、 $M_r^{*} = [\mathbf{V}_r]^T [\mathbf{M}] [\mathbf{V}_r]$ 、 $K_r^{*} = [\mathbf{V}_r]^T [\mathbf{K}] [\mathbf{V}_r]$ 、 $P_r^{*} = [\mathbf{V}_r]^T [Q(t)]$ はそれぞれr次振動の換算質量、換算バネ定数、換算外力を表す。 $[\mathbf{V}_r]$ はマトリックス $[\mathbf{V}]$ のr番目の固有ベクトルを表す。

今、j点に衝撃力 $P(t)$ が作用する場合、 $z_r(0) = \dot{z}_r(0) = 0$ の初期条件で式(3)を解くと式(4)のようになる。

$$z_r(t) = \frac{1}{M_r^{*} n_r} \int_0^t V_{jr} P(\tau) \sin n_r(t-\tau) d\tau \quad (4)$$

ただし、 n_r はr次の固有円振動数、 V_{jr} は $[\mathbf{V}]$ のj行r列要素を表している。一方、構造系の動的問題を理論的に扱う場合には、減衰定数を考慮に入れることによって実際的な物理現象を表現することが可能となる。このことから、各振動モードに対して減衰定数 h が一定であると仮定すれば、固有円振動数 n_r を $n'_r = n_r \sqrt{1-h^2}$ とし式(4)中の積分内を書き換えればよいことになる。従つて、式(2)におけるs番目の変位は式(5)のようになる。

$$w_s(t) = \sum_{r=1}^n \frac{V_{sr} V_{jr}}{M_r^{*} n'_r} \int_0^t P(\tau) e^{-hn_r(t-\tau)} \sin n'_r(t-\tau) d\tau \quad (s=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

4. 曲げ打撃試験の概要と結果

文献5)における曲げ打撃試験では幅22cm、高さ45cm、長さ205.6cmの集成材梁試験体が用いられ、両端自由梁曲げ1次振動モードの節となるところをロープで吊り、一端へ打撃ハンマー

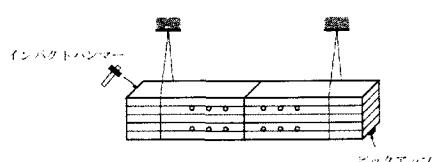


図-2 曲げ打撃試験概要

一による積層方向に垂直な衝撃力を加え、他端に取りつけたピックアップにより加速度応答波形を測定した(図-2参照)。打撃試験より得られた打撃波形、加速度応答波形を図-3に、逆算された動的特性値を表-1に示す。また、FFTアナライザによる解析から固有振動数は表-2のように求められた。

5. 衝撃応答解析に基づくバネ定数の推定法

前述したように文献5)における逆算手法によるバネ定数の算出法では、実橋での局部打撃試験のように、実測加速度応答波形から固有振動数が明確に求められないような場合にはバネ定数を算出できないという問題点がある。そこで本論文では、曲げ打撃試験による加速度応答波形に衝撃応答解析から得られる加速度応答波形が近似するようにバネ定数を収束させる手法を提案する。具体的な手順は以下のように行う。

- 1) バネ定数を粗く変化させた数パターンについて衝撃応答解析を行う。
- 2) 実験加速度応答波形及び1)で解析した全加速度応答波形に対し、波形の極大値、極小値(ピーク値)を求める。
- 3) ピーク値は(+)側、(-)側の両側で求まるので、その両方の包括線に対して、 $\ddot{w} = ae^{-bt}$ でフィッティングを行い、(+)側、(-)側の a, b の値 a_p, b_p, a_m, b_m を求める。
- 4) ピーク値間の時間間隔を求め、その平均値 t_a を求める。
- 5) 実験値の $a_{pe}, b_{pe}, a_{me}, b_{me}, t_{ae}$ と、各解析パターンの $a_{pc}, b_{pc}, a_{mc}, b_{mc}, t_{ac}$ との差 Δ を式(6)によって求め、 Δ が最小となるバネ定数のパターンを探査する。

$$\begin{aligned}\Delta_e &= \frac{|a_{pe} - a_{pc}|}{a_{pe}} + \frac{|b_{pe} - b_{pc}|}{b_{pe}} + \frac{|a_{me} - a_{mc}|}{a_{me}} + \frac{|b_{me} - b_{mc}|}{b_{me}} \\ \Delta_t &= \frac{|t_{ae} - t_{ac}|}{t_{ae}} \\ \Delta &= \Delta_e + \Delta_t\end{aligned}\quad (6)$$

- 6) 1)～5)の手順を繰り返すことにより、バネ定数の範囲を狭めていく、最適バネ定数を求める。

上述した a_p, a_m の値は応答の振幅により変化するため全体の振幅の大きさを示しており、 b_p, b_m の値は応答の減衰の傾向を示している。しかし、振幅の大きさと減衰の傾向だけでは、波形の周期を考慮できないため、それを t_a の値により考慮している。なお、加速度応答波形のピー

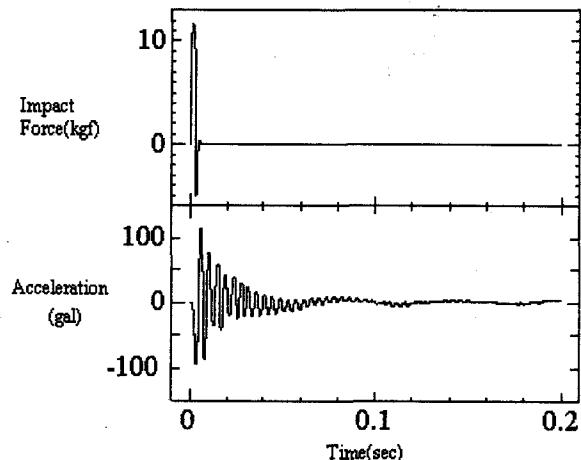


図-3 曲げ打撃試験結果

表-1 曲げ打撃試験より逆算された値

動的ヤング係数 : E	$7.129 \times 10^4 (\text{kgf/cm}^2)$
動的せん断バネ定数 : K_i	$1.56 \times 10^4 (\text{kgf/cm})$
動的回転バネ定数 : K_θ	$4.95 \times 10^4 (\text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^2)$
減衰定数 : h	0.02943

表-2 曲げ打撃試験による固有振動数 (Hz)

1次	216
2次	346
3次	1048
4次	1182

ク値の包括線を今回は ae^{-bt} の簡単な関数で近似したが、波形が複雑な場合には、他の関数を用いる必要がある。

6. 解析結果と考察

最初に文献5)における集成材梁試験体が積層方向に垂直に曲げ打撃を受ける場合(図-2参照)を対象として衝撃応答解析を行い、加速度応答波形を求め図-3に示す実験加速度応答波形と比較検討する。解析に用いた数値を表-3に、要素分割図を図-4に示す。要素⑤は連結部に用いるバネ要素であり、バネ定数などは表-1の結果を用いる。ここで、試験体のモデル化に際しては、図-4に示すように両端自由梁としてではなく、2点支持梁としてモデル化を行った。この理由は両端自由梁モデルでの固有振動数が2次以上で試験結果とかけ離れた値となり、2点支持梁モデルでは2次以上の固有振動数についても試験結果と一致するためである。これは、試験体をロープで吊した位置に支承が生じたためと考えられる。

数値解析に際しては、打撃力 $P_{max}=11\text{kgf}$ 、打撃継続時間 $P_t=0.002\text{sec}$ の矩形パルスで衝撃力を与え、 $dt=0.0002\text{sec}$ の時間刻みで解析を行った。変位と加速度の応答解析結果を図-5に示す。図-3と図-5と比較すると、数値解析より得られた加速度応答波形が、実験より得られた値よりも若干大きめに出てはいるが、概ね一致する結果となった。また、表-4より3次、4次の固有振動数についても、表-2の実験値とほぼ一致していることがわかった。

次に、せん断、回転の両バネ定数を変化させて解析を行うことにより、連結部の剛性が衝撃応答にどのような影響を与えるかを検討した。図-6は両バネ定数を、それぞれ、 $10^4\sim10^{13}$ の範囲で変化させた解析結果であり、縦軸に加速度応答の最大値をプロットしたものである。解析結果より、せん断バネ定数 K_z は $10^5\sim10^9$ (kgf/cm)の範囲で、回転バネ定数 $K_{\theta y}$ は $10^6\sim10^{10}$ ($\text{kgf}\cdot\text{cm}/\text{rad}$)の範囲で加速度応答の最大値が大きく変化していることがわかる。またせん断及び回転のバネ常数を大きくしていくと、連結部のない場合の最大値に収束することが明らかになった。

次に、本論文で提案した手法を用いて、連結部のバネ定数の推定を行い、文献5)の逆算手法による結果と比較する。表-5に、2つの手法

表-3 曲げ振動解析諸元

長さ	$l = 205.6\text{cm}$
断面積	$A = 990.0\text{cm}^2$
断面2次モーメント	$I = 167062.5\text{cm}^4$

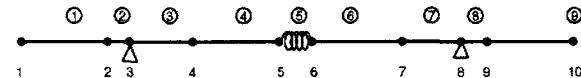


図-4 衝撃応答解析要素分割図

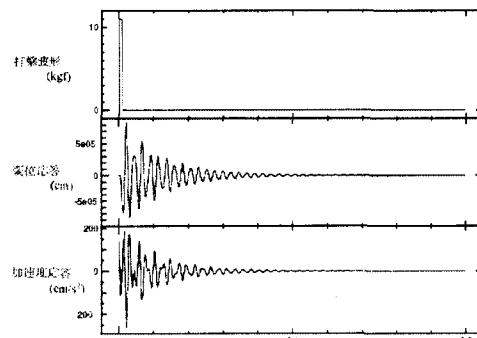


図-5 衝撃応答解析結果

表-4 曲げ振動解析による固有振動数 (Hz)

1次	216
2次	346
3次	1032
4次	1178

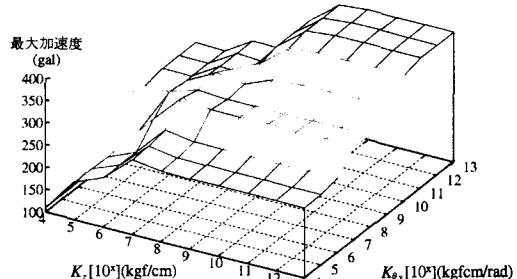


図-6 最大加速度の変化

表-5 バネ定数の比較

	逆算手法	本手法
せん断バネ定数 K_z (kgf/cm)	1.56×10^4	1.9×10^4
回転バネ定数 $K_{\theta y}$ ($\text{kgf}\cdot\text{cm}/\text{rad}$)	4.95×10^8	6.0×10^8

表-6 固有振動数の比較 (Hz)

次数	実験値	逆算手法	本手法
1次	216	216	237
2次	346	346	348
3次	1048	1032	1037
4次	1182	1178	1188

による結果を示す。本手法により求まったせん断と回転のバネ定数は逆算手法より求まった結果に比べてやや大きめに算出されている。次に、それらのバネ定数を用いて固有振動数を計算した結果を表-6に示す。表-6より本手法の結果は、実測値と比較して1次固有振動数については若干の差が認められるものの、2次以上に関しては、非常によく一致していることがわかる。最後に図-7に、曲げ打撃試験、逆算手法、本手法から求まった、それぞれの加速度応答波形を示す。本手法は、実測値と比較してピーク値が大きめに出ているが、波形は概ね一致しているように思われる。

7. 結論

本論文は、集成材部材連結部をバネ要素としてモデル化し、打撃ハンマーにより衝撃を受ける連結部を有する集成材梁試験体を対象とした衝撃応答解析を行い、バネ定数の変化が衝撃応答に与える影響を明らかにするとともに、新たなバネ定数推定法を提案し、その有効性を検討したものである。バネ定数の変化の影響では、加速度応答波形の最大値が大きく変化するバネ定数の範囲が存在することが確認された。本論文で提案した衝撃応答解析に基づくバネ定数推定法は、実験結果や逆算手法の結果とほぼ一致することから、連結部を有する集成材梁の曲げ打撃問題に対して有効であることがわかった。しかし、本手法が実橋における局部曲げ打撃試験結果に対して適用できるかどうかはさらなる研究が必要と思われる。従って、今後は実橋連結部の局部打撃実験を実施し、得られた加速度応答波形に本手法を応用することにより、本手法の実橋への有効性について検討していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 横川和人、福田裕、今野和近、木造橋に用いた継手システムの実験的研究、構造工学論文集、Vol.37A, pp.1075-1082, 1991
- 2) 佐々木直也、坪田張二、丸山則義、小林創、大断面集成材とケーブルによるハイブリッド・ドーム構造の開発（その3）一大断面集成材接合部の曲げ載荷実験一、鹿島技術研究年報、第39号、pp.103-106, 1991
- 3) 薄木征三、小松幸平、鍵和田功、佐々木貴信、集成材アーチリブのII形挿入鋼板を用いたドリフトピン接合、構造工学論文集、Vol.41A, pp.915-922, 1995
- 4) 出戸秀明、五郎丸英博、岩崎正二、宮本裕、土田貴之、集成材を用いたアーチ形式歩道橋の振動実測と解析、構造工学論文集、Vol.40A, pp.1321-1330, 1994
- 5) 出戸秀明、五郎丸英博、岩崎正二、宮本裕、山口隆之、集成材木歩道橋の連結部の実大局部実験と解析、構造工学論文集、Vol.41A, pp.923-933, 1995
- 6) 林川俊郎、須志田健、小幡卓司、佐藤浩一、GAを用いた木造アーチ形式歩道橋の構造同定に関する研究、構造工学論文集、Vol.44A, pp.1211-1218, 1998

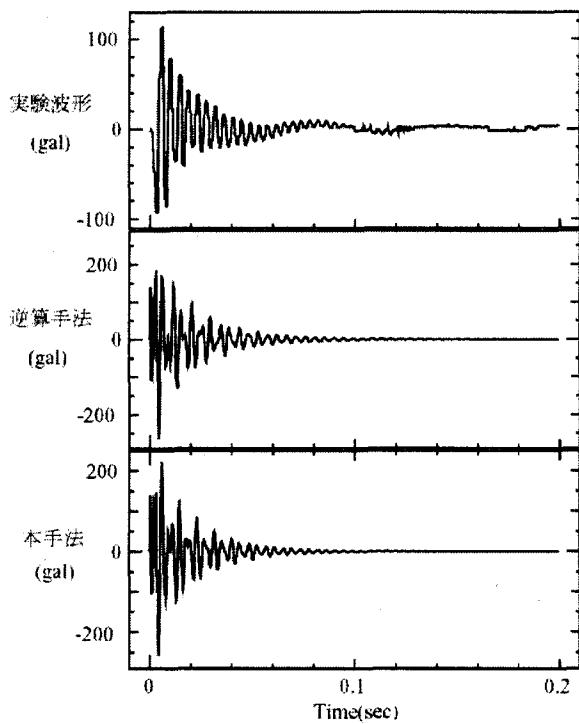


図-7 加速度応答波形の比較