

I - 19 衝撃応答解析に基づく集成材部材連結部の動的剛性評価

岩手大学工学部 学生員 ○伊賀 隆幸 山本 亮
 岩手大学工学部 正 員 岩崎 正二 出戸秀明 宮本 裕
 日本大学工学部 正 員 五郎丸英博

1. はじめに

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一方で、部材に分割し現場で連結することが一般的である。このため集成材橋は各部材の接合部の他に、分割された部材をつなぐ連結部が必要となり、その剛性評価は設計上重要な問題となる。

著者らは文献 1) において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。この問題を解決するために文献 2) では、連結部を含む実物大の集成材梁試験体を作成し、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を提案した。本論文では、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の衝撃応答解析を逆算したバネ定数を用いて行い、数値解析の応答加速度波形が実測応答加速度波形に近似することを示すとともに連結部の剛性が衝撃応答にどのような影響を及ぼすかを検討した。

2. 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 $\{Q(t)\}$ を受ける構造全体の運動方程式は式 (1) で表わされる。

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

ここで、 $[M]$ ：質量マトリクス (n 行 n 列)、 $[K]$ ：剛性マトリクス (n 行 n 列)、 $\{w\}$ ：節点変位ベクトル、またドットは時間に関する微分を表わす。

式 (1) の解を固有ベクトルからなるマトリクス $[V]$ と一般化座標 $\{z\}$ で表わすと式 (2) のようになる。

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

式 (2) を式 (1) に代入し、 $[V]^T$ を左側から乗じると、直交関係により 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、 $M_r^* = \{V_r\}^T [M] \{V_r\}$ 、 $K_r^* = \{V_r\}^T [K] \{V_r\}$ 、 $P_r^* = \{V_r\}^T \{Q(t)\}$ 、 $\{V_r\}$ はマトリクス $[V]$ の r 番目の固有ベクトルを表わす。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、 $n_r = \sqrt{K_r^*/M_r^*}$ は固有値、 V_{jr} は $[V]$ の j 行 r 列要素を表わしている。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の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、固有振動数 n_r を $n_r' = n_r \sqrt{1 - h^2}$ と式 (4) 中の積分内を書換えればよいことになる。従って、式 (2) における s 番目の点の変位は式 (5) のようになる。

$$w_s(t) = \sum_{r=1}^n \frac{V_{sr} V_{jr}}{M_r^* n_r'} \int_0^t P(\tau) e^{-h n_r \tau} \sin n_r'(t - \tau) d\tau \quad (5)$$

3. 数値計算例と考察

数値計算例として、図-1に示すように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を取り上げた。文献 2) における打撃試験では幅 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による衝撃力を加え、他端に取り付けたピックアップにより加速度応答波形を測定した。打撃試験により得られた打撃波形・加速度応答波形を図-2に示す。この試験により得られた動的ヤング係数 E 、動的せん断バネ定数 K_z 、動的回転バネ定数 $K_{\theta y}$ はそれぞれ $E = 7.129 \times 10^4 (\text{kgf/cm}^2)$ 、 $K_z = 1.56 \times 10^4 (\text{kgf/cm})$ 、 $K_{\theta y} = 4.95 \times 10^8 (\text{kgf} \cdot \text{cm/rad})$ である。また周波数応答関数を求め、このピーク値からハーフパワー法によって減衰定数 $h = 0.02943$ を求めた。

これらの値を用いて衝撃応答解析を行った。要素分割図を図-3に示す。要素③はバネ要素であり、せん断バネ定数・回転バネ定数の両方が与えられる。ここで、モデル化に際しては、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ている。この理由は両端自由梁のモデル化では固有振動数が 2 次以上で試験結果とかけ離れた値となり、2 点支持梁でモデル化すると 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。

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。解析結果を図-4に示す。

図-4 より加速度応答波形が実測応答波形と近似することがわかった。このことは数値解析の加速度応答波形を実測応答波形に近似させる手法によっても連結部の動的剛性を推定できることを示している。そのためには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。せん断、回転の両方のバネ定数をそれぞれ $10^4 \sim 10^{13}$ の範囲で変化させ、加速度応答の最大値をプロットしたのが図-5 である。 K_z は $10^5 \sim 10^9$ の範囲で、 $K_{\theta y}$ は $10^6 \sim 10^9$ の範囲で最大値が大きく変化しているのがわかる。またバネ剛性を大きくしていった場合、連結部のない場合の最大値に収束することが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 出戸秀明, 五郎丸英博, 岩崎正二, 宮本裕, 土田貴之, 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.

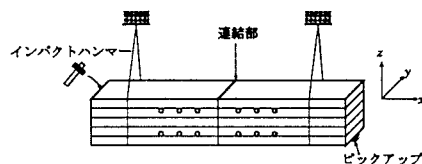


図-1 曲げ打撃試験概要

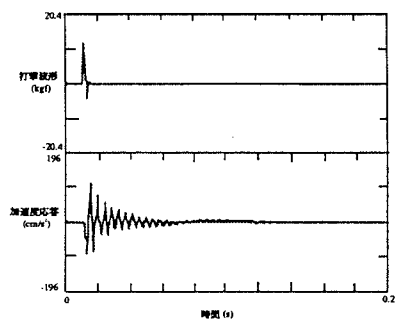


図-2 実測打撃波形・加速度応答波形

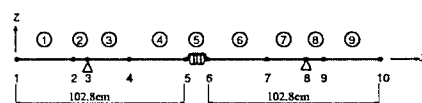


図-3 要素分割図

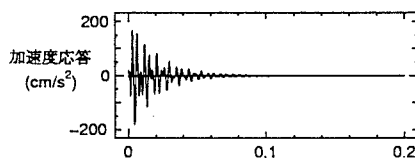


図-4 数値解析による加速度応答波形

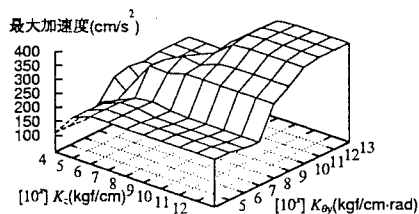


図-5 バネ定数の変化による最大加速度の変化