

橋梁模型の振動センシングと過渡応答解析との比較

愛媛大学 学生員 ○森山朗成 田村健悟
愛媛大学 非会員 中村蒼嗣, 正会員 丸山泰蔵 中畑和之

1. はじめに

デジタルツインが様々な分野で導入されつつあり、土木分野も例外ではない¹⁾。デジタルツインとは、センサー等から取得したデータをもとに、仮想空間上でその挙動を双子のように再現し、解析や分析結果を実空間にフィードバックする技術である。これまで、橋梁の健全性を評価するために振動特性に基づいた手法が提案されてきたが²⁾、今後、振動データが多点多でセンシングされ、それらが実時間でデジタルツインと連動することを想定すると、固有振動数だけでなく時間領域での挙動を整合させておく必要がある。ここでは橋梁の3次元形状を考慮し、振動による過渡応答を再現するデジタルツインを志向する。そのための基礎検討として、まずは精緻な橋梁模型を作成し、その動的挙動をモデル化することを目的とする。模型で計測した振動波形（過渡応答）と数値モデルから得られた振動波形の比較を行った結果を報告する。

2. 橋梁模型の振動計測

本研究では、図-1に示すようなアルミ合金 (A5052) 製の単純桁橋の模型を作成した。床版は桁は一体化したものとし、上部構造と下部構造はステンレス製のボルトを用いて固定している。また、ニードルベアリングを挟むことでローラー支承も再現できる。

図-2に示すように、橋梁模型の床版上に3つのセンサを設置し、床版中心をハンマーで打撃したときの各点で加速度を計測する。ここでは、富士セラミックス社の加速度センサ (SAR11SCG) を用いた。計測開始はハンマーの打撃をトリガーとし、加速度波形を1.5s間計測した。橋梁模型の境界条件を変えた2パターンを

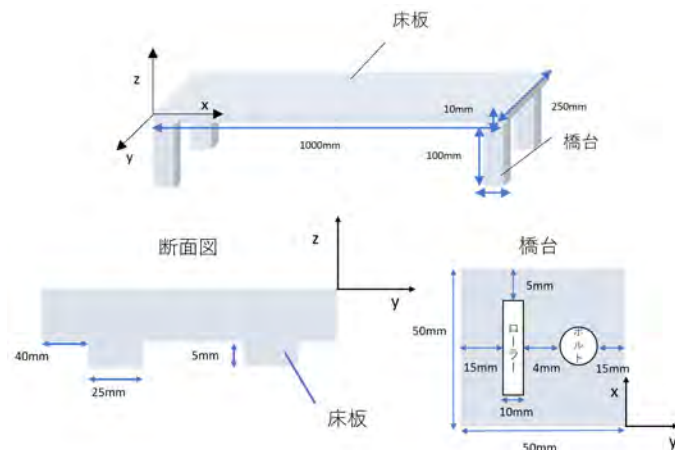


図-1 橋梁模型の寸法図



図-2 打撃位置とセンサ位置①～③

考える。1つは両端を完全に固定した両端固定の場合（モデルA）であり、もう一つは片側のボルトを緩めてローラーとした場合（モデルB）である。

ハンマリング試験の結果の例を図-3(a)に示す。それぞれのセンサで得られた加速度波形をフーリエ変換し、フーリエスペクトルを求めたものが図-3(b)である。図-3(b)では3つのピーク振動数が観測されている。次節では、モデルAとBの数値モデルを作成し、実験を模擬できているかを調べる。

3. 橋梁模型の数値モデル

模型と同じ形状を3次元ソリッドモデルで再現した。ここでは、床版の密度を 2680kg/m^3 、ヤング率を $6.8 \times 10^{10}\text{Pa}$ 、ポアソン比を 0.33 とした。振動を解析するために有限要素解析の Ansys Workbench を用いた。メッシュサイズは平均 5mm、モデルの節点数は 139531、要素数は 36613 であり、床版は六面体、桁は四面体によりメッシュ分割されている。

まず、モーダル解析を行い、固有振動数を求めて、実験値との比較を行った。モデルAでは、1次曲げの固有振動数が 48.7Hz、2次曲げは 127Hz、3次曲げは 305Hz となった。また、モデルBでは、1次曲げの固有振動数は 32.5Hz、2次曲げは 126Hz、3次曲げは 280Hz となった。実験結果と数値解析の比較結果を表-1と2に示す。1次曲げ固有振動数の相対誤差は1%以下であり、2次曲げでも5%程度であることから、周波数領域では良好な近似を示している。

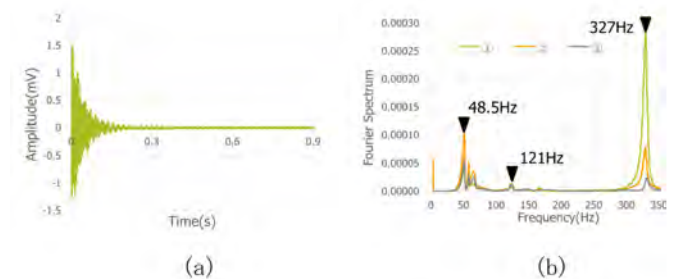


図-3 モデルAの実験結果 (a) 時刻歴波形 (計測点2) (b) フーリエスペクトル

表 1 数値解析と実験値の比較結果 (モデル A)

	1次曲げ	2次曲げ	3次曲げ
実験値(Hz)	48.5	121.0	327.0
ANSYS(Hz)	48.7	127.2	305.0
誤差(%)	-0.4	-4.9	7.2

表 2 数値解析と実験値の比較結果 (モデル B)

	1次曲げ	2次曲げ	3次曲げ
実験値(Hz)	32.2	120.0	294.0
ANSYS(Hz)	32.5	126.0	280.0
誤差(%)	-0.9	-4.8	5.0

4. 過渡応答解析

本節では、過渡応答解析について検討を行った。過渡応答解析を行うには、減衰パラメータが必要となる。ここで、減衰比は自由減衰振動を行った実験で得られる振幅から求まる。

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{a_n}{a_{n+m}} = \frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (1)$$

ここで、 δ は対数減衰率、 ζ は減衰比、 a_n は n 番目の振動波形の振幅を表す。減衰比を求めるために使用した振幅 a_n として、最大加速度が得られてから10波目までを利用した。次に、過渡応答解析に用いる入力信号は、式(2)を用いて計算した振動数30~500Hzの成分を足し合わせて作成した³⁾。

$$f(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} (\alpha - 0.5) e^{-\alpha} \alpha = \left(\frac{\pi(t-t_s)}{t_p} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 t_s は時間域波形での最大振幅に対応する時間であり、 t_p はフーリエ変換域で最大振幅を示す時の振動数に対応する時間である。作成した波形を図-4に示す。

ANSYSを用いて、モード重ね合わせ法により過渡応答解析を行った。時間ステップは1msとした。3次曲げ固有振動数までの振動を比較対象とするため、モード重ね合わせ法では350Hz以下の3つのモードを用いた。モデルAの計測点②における時刻歴波形の比較結果を図-5に示す。減衰していく様子は概ね一致したが、位相がずれていたり、高周波の振動が再現できていないことが分かる。計算では3次曲げ振動

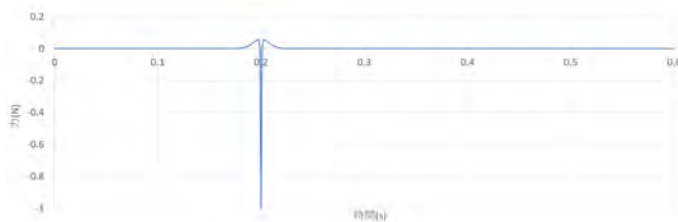


図-4 数値解析に入力する信号

モードまでしか考慮していないため、実験波形の高周波振動については模擬できない。

次に、数値モデルで、固定位置を若干ずらした結果を図-6に示す。この結果、固有振動数は数%程度変化したが、図-5と比較すると、図-6の波形は0.1s以降の位相が実験波形に近似している。打撃直後の波形の不整合は、入力信号が実際のものとは異なることが主な原因として考えられる。

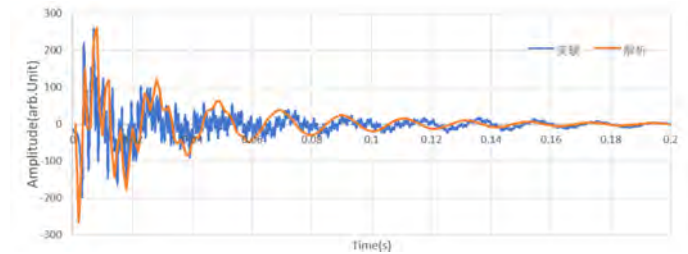


図-5 モデル A の時刻歴波形の比較結果

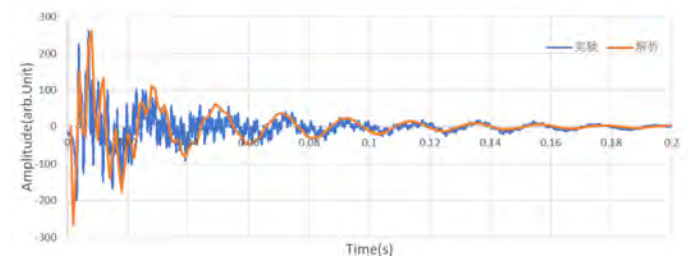


図-6 モデル A の時刻歴波形の比較結果 (境界条件変更)

5. おわりに

橋梁のデジタルツインの実現を志向して、本研究では基礎検討として、橋梁模型に対する振動の時刻歴応答のモデル化を試みた。過渡応答を模擬するには、減衰パラメータだけでなく、入力加振の波形などの設定が必要となる。過渡応答解析では、境界条件を変更すると、波形の位相も変化するなどの現象がみられた。今後は、こういった複合的な要素の関連を明らかにするとともに、モデル化の精度向上を試みたい。

参考文献

- 1) 田中友悠, 山口愛加, 窪田諭: 土木施工現場デジタルツインを志向した現場情報の定義と利活用について, 情報処理学会第84回全国大会, pp.4-673 - 4-674, 2022.
- 2) 宮下剛, 玉田和也, 劉翠平, 岩崎英徳, 長井正嗣: 振動を利用した健全性診断に向けた実橋梁の損傷と動特性変化, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.68, No.2, pp.367-383, 2012.
- 3) 室野剛隆, 佐藤忠信: 非線形応答スペクトル群に適合した設計地震動波形の作成方法, 土木学会論文集, A1 (構造・地震工学), Vol.70, No.2, pp.161-175, 2014.