

1. はじめに

橋梁に適用する免震ゴム支承の地震時性能の実験的検証、非線形復元力モデルの確認等の課題に対して、ハイブリッド実験は有効な手法であると考えられる。ハイブリッド実験には、運動方程式の数値積分結果の信頼性を低下させる安定性・精度・誤差伝播等の要因の影響が顕著に現れることから、その理論的あるいは実験的評価もまた活発に研究されてきた。本研究では、免震橋梁の地震応答のシミュレーションを想定した、免震支承のハイブリッド実験の状況を想定した上で、橋梁の適切な数値モデル化の方針の確認を目的とした検討を行った。

免震橋梁の地震時性能の検討においては、橋脚の損傷に伴う塑性化が主要な判断基準となるほか、その非線形応答がまた免震支承の挙動と影響を及ぼし合うメカニズムが着目点となる。そこで、(1) 橋脚の非線形性をもたらす、理論的な線形の場合と比較した場合の相違 (2)自由度数が数値積分の安定限界や誤差伝搬に与える影響、の2点を検討した。

2. ハイブリッド実験の誤差、数値積分法の安定性

ハイブリッド実験では、実験により得られた復元力の計測値をフィードバックし、次のステップにおいて加力装置により変位を与えるプロセスを繰り返す。図1に示すように、実験に伴う载荷装置の制御誤差や計測誤差などの誤差発生源の大きさが無視できないものであることが一つの特徴である。

また、ハイブリッド実験における数値積分の信頼性を決定する要因として安定性、精度がまず挙げられ、それらの決定要因は、線形系においては数値積分の安定条件や精度解析などにより理論的に求められている。ハイブリッド実験でしばしば採用される最も基本的な数値積分法である中央差分法は、条件安定な陽的解法であり、安定条件は、構造物の最高次固有振動数 ω_{max} と、積分時間刻み Δt を用いて、式(1)で表されることが知られている。

$$\omega_{max} \Delta t \leq 2 \tag{1}$$

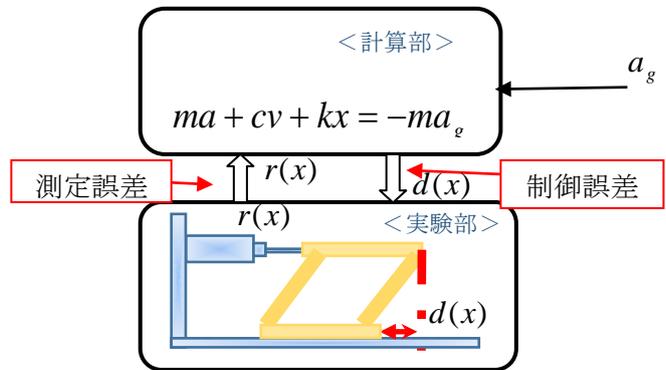


図1. ハイブリッド実験の概念図

3. 解析条件

図2に示すように、典型的な連続桁橋の橋軸方向の動的応答を表現する1基の中間橋脚とその上部構造部分に縮約したものを想定する。最も基本的な検討を行うため、橋脚部を、指定するNヶの等間隔区間に分割することで生成される多質点せん断ばね系モデルを仮定し、地盤および基礎の影響は無視している。比較のため、免震支承、橋脚部分の復元力特性が線形の場合とバイリニア非線形の場合について計算している。変位制御誤差と荷重計測誤差は、ステップ間の相関のない一様分布と仮定し、時間ステップごとに乱数により与えた。

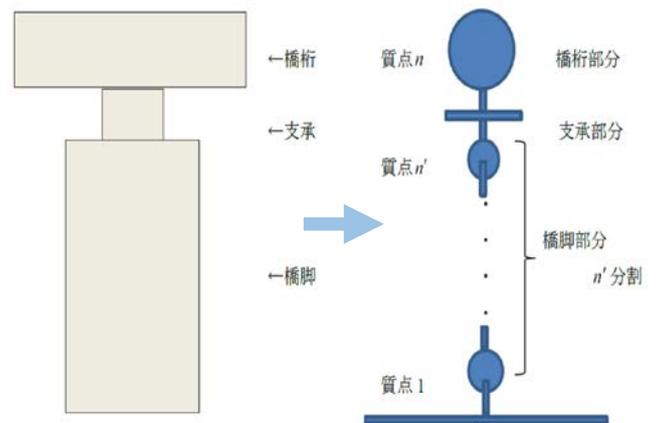


図2. 対象構造物と橋梁モデル

4. 解析結果

(1) モデルの非線形性の影響

実験結果の発散の有無とハイブリッド実験モデルの設定の関係を整理したものを図3に示す。横軸は自由度数 $N+1$ 、縦軸は $\omega_{\max} \Delta t$ の値を表している。非線形の場合は、線形の場合よりも小さい $\omega_{\max} \Delta t$ の値で応答が発散する結果となっている。図4に6自由度、非線形で、 $\Delta t=0.0025s$ および $\Delta t=0.005s$ のケースについて、支承相対変位の変位時刻歴応答を示す。この場合での $\omega_{\max} \Delta t$ の値はそれぞれ、 $\omega_{\max} \Delta t=0.62635125$ 、 $\omega_{\max} \Delta t=1.2527025$ であった。また、非線形モデルの場合、応答が発散しなくても、 $\omega_{\max} \Delta t$ の値が1程度より大きくなると、応答の精度が低下する。

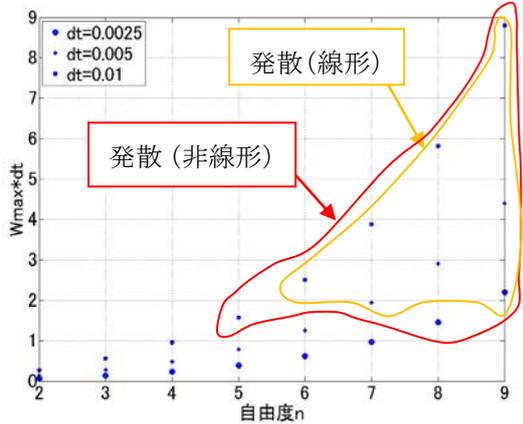


図3. $\omega_{\max} \Delta t$ と発散の関係

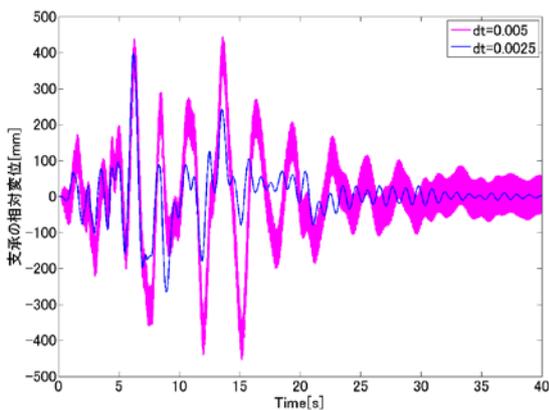


図4. 6自由度, 支承の相対変位の時刻歴応答変位

(2) モデルの自由度数の影響

自由度数による支承変位時刻歴の比較を図5に、

自由度数6の場合について、橋桁の絶対加速度応答と入力加速度のフーリエ変換の比により求めた、周波数領域での応答倍率を図6に示す。

いずれも $\Delta t=0.005s$ としている。図5より、自由度数による応答の変化は自由度数5以下の場合には小さいのに比べ、自由度数6の場合では著しい短周期小振幅振動が生じる。図6を見ると短周期振動に卓越しているのは4, 6次モードと判断される。

本来は、自由度数が大きいモデルの方がハイブリッド実験による応答シミュレーションの精度は高くなるが、ハイブリッド実験における実験誤差と誤差伝搬の効果を考慮すると、自由度数を一定以上大きくすることで本来は存在しない高次モードの励起が生じる。免震支承を対象とした場合、このような载荷では支承に本来は存在しない頻繁な繰返し载荷が与えられ、エネルギー吸収性能や復元力特性の適切な評価の目的には望ましくないものとなる。モデルの設定にあたって考慮する必要がある。

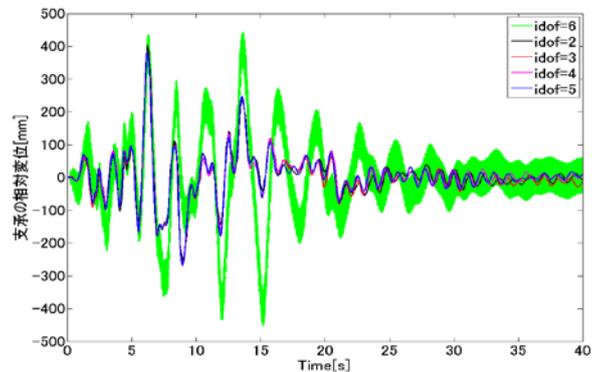


図5. 支承の相対変位の時刻歴応答変位

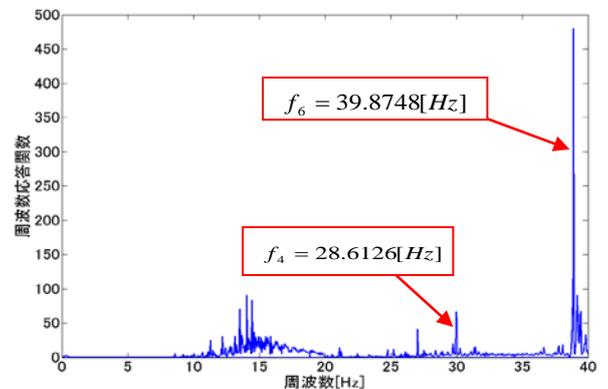


図6. 周波数領域での応答倍率