

における計算誤差を計測することで、縮約化に必要となる自由度数、すなわち基底ベクトルの数が推定することにした。縮約化後のある周波数領域における応答は、フーリエ変換を用いて次のように表わすことができる。

$$\tilde{\mathbf{u}}_n(\omega) = \left[-\omega^2 \mathbf{M}_n + i\omega \mathbf{D}_n + \mathbf{K}_n \right]^{-1} \tilde{\alpha}(\omega)$$

段階的に基底数を増加させながら周波数応答解析を行い、その前後での応答の差を近似誤差と定義することにした。そして、予め設定する周波数領域に対して、近似誤差が許容誤差の範囲内に収まるまで基底数を増加させることにした。この方法を用いれば、簡易的ではあるが周波数領域における精度を保障した解析を行うことが可能となる。

また、入力する地震波形の周波数帯が同じ問題であれば、基底ベクトルを再評価する必要はないことから、複数の地震動に対する過渡応答解析を実施する際には、大幅な計算時間の低減が期待できる。

3. 解析例

解析対象とする連続箱桁橋の諸元を説明する。図-1、図-2 にそれぞれ橋梁全体、橋脚の寸法を、図-3、図-4 に各支承構造の寸法と要素分割図を示す。また、表-1 に材料パラメータまとめた。モデルの総自由度数と要素数は両支承構造でそれぞれ約 145 万個、約 39 万個であり、六面体双一次要素で分割した。入力地震動は、兵庫県南部地震（JR 西日本鷹取駅構内地盤上観測）と東日本大震災（仙台観測）での観測加速度の 3 方向成分を変位データに変換し、橋脚下部に強制変位として与えた。時間積分として Newmark-β 法を使用し、時間増分は 0.01sec に固定している。入力変位の時間応答をフーリエ変換した結果、両地震動の主な振動成分は 0~50Hz 程度であったことから、精度を確保すべき目標周波数帯を 50Hz と設定し、周波数応答解析を通して必要となる有効自由度（=直交基底ベクトルの数）を同定した。その結果、鋼製ヒンジ支承モデル時の有効自由度は 60、積層ゴム支承モデルでは 54 と評価された。上記の有効自由度数により縮約化を行い、過渡応答解析を行った結果を以下に示す。図-5 に鋼製ヒンジ支承モデルに兵庫県南部地震を入力した際の p1 点における橋軸方向変位応答を示す。縮約化を行わない通常の FEM 解析結果も併せて示しているが、近似の妥当性が確認できた。また、図-6 に積層ゴム支承モデルに両地震動を入力した際の支承構造の上下端における変位応答結果を示す。同図より明らかなように、いずれの地震動を入力した際にも上部構造と下部構造では異なる振動を示すアイソレーションが起きており、この結果、図-7 に示すような応力低減効果が期待できるものと考えられる。

最後に計算効率について整理する。本例題では通常の FEM 解析では 2, 3 週間程度を要したのに対し、KS-MOR では事前解析による有効自由度数の決定過程を含めても 3 日で解析が終了することができた。

4. 結論

本研究では、KS-MOR 法による縮約化解析の精度および計算時間を左右する有効自由度数の決定方法を提案し、具体的な 3 次元橋梁モデルによる FEM との比較検証を通してその有効性を確認した後に、入力地震による積層ゴム支承を有する橋梁全体系の地震時応答の差異を解析した。

表-1:各材料の物性値

	ヤング率 [Gpa]	ポアソン比 [-]	密度 [kg/m ³]
steel	210	0.30	7874
rubber	0.01	0.50	910
concrete	30	0.17	2300

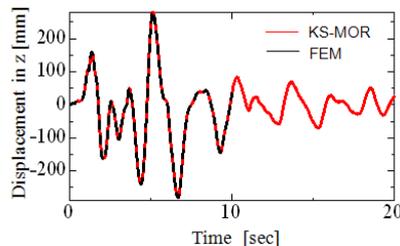
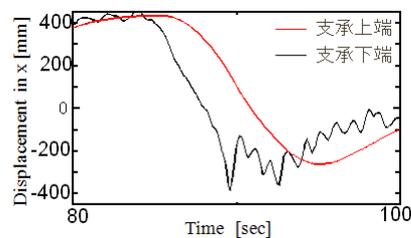
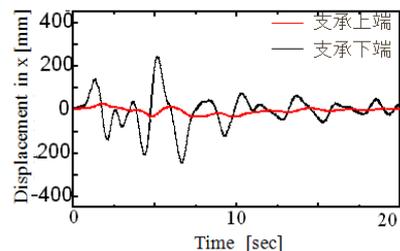


図-5 P1 点変位応答 (ヒンジ支承)

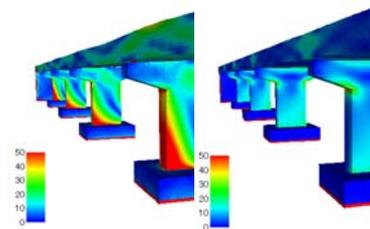


(a) 東日本大震災



(b) 兵庫県南部地震

図-6 積層ゴム支承の変位応答



(a) 鋼製ヒンジ (b) 積層ゴム

図-7 支承による応力分布の差異 (東日本大震災・100sec)