

I-659

免震橋模型の非線形地震応答シミュレーション

建設省土木研究所 正会員○長島 博之
 建設省土木研究所 正会員 川島 一彦
 建設省土木研究所 正会員 長谷川金二
 首都高速道路公団 正会員 池内 武文

1. まえがき： 免震装置は非線形な履歴特性を有するが、これをバイリニア型の履歴特性を有するばねにモデル化し非線形動的解析した場合には、どの程度の精度まで地震時応答を再現できるかを免震橋模型を用いた振動台実験結果と比較することにより検討したので、この結果を報告する。

2. 解析対象とした免震橋模型の振動台実験：

解析対象とした免震橋模型は写真1に示す支間長6m、桁重量39.8tで、振動台上に固定された高さ2.5mの鋼製橋脚2基によって支持されている。また、免震装置としては鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB)及び高減衰ゴム支承の2種類を用い、それぞれ、1橋脚当り2個の免震支承で桁を支持した。実験では正弦波による共振振動実験及び地震波加振実験を行った。地震波としては、1978年宮城県沖地震による開北橋近傍地盤上の記録(以下、開北橋記録と呼ぶ)と1983年日本海中部地震

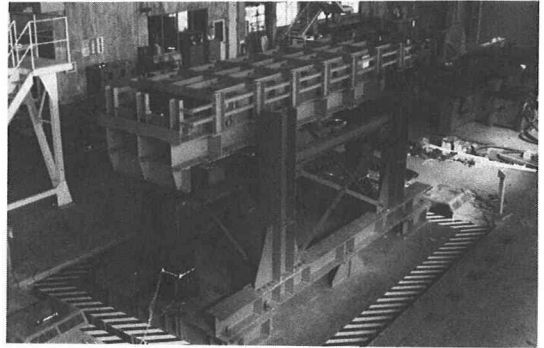


写真1 振動台上にセットされた免震橋模型

による八郎潟干拓堤防上の記録の時間軸を1/2に縮めた記録(以下、八郎潟記録と呼ぶ)を用いた。表1は解析に用いた地震波加振実験結果を後述する解析結果と合わせて示したものである。

3. 解析手法及びバイリニア型ばねへのモデル化： 免震支承の荷重～変位関係をバイリニア型ばねへモデル化するには、バイリニア型ばねの降伏荷重 Q 、1次剛性 k_1 及び2次剛性 k_2 を定めなければならない。これらを定める手法としては種々検討されているが、本解析では、免震支承の履歴特性をバイリニア型ばねとして評価した非線形動的解析手法によってどの程度の精度まで免震橋の地震時応答を再現できるかがポイントであるため、バイリニア型ばねへモデル化する際の各パラメータは、共振振動実験から得られた免震支承の荷重～変位関係を忠実に再現できるように定式化することとした。従って、バイリニア型ばねの降伏荷重 Q 、1次剛性 k_1 及び2次剛性 k_2 は、免震支承に生じたせん断変形の関数として表すこととした。各パラメータは、免震支承の履歴ループから、降伏荷重 Q は履歴ループが荷重軸と交わる点の平均値、2次剛性 k_2 は降伏荷重 Q と最大変位を結ぶ直線の勾配、1次剛性 k_1 は降伏荷重 Q 及び2次剛性 k_2 によって表わされる等価粘性減衰定数と履歴ループの等価粘性減衰定数が等しくなるような勾配として求めた。このようにして求めた各パラメータは免震支承に生じるせん断変形の関数としておおむね次式により表わされる。

$$Q = \begin{cases} 53.6 + 120. u_e - 16.9 u_e^2 + 0.664 u_e^3 & (0.05\text{cm} \leq u_e \leq 5.3\text{cm}) \text{ LRBの場合} \\ 49.5 + 139. u_e - 15.8 u_e^2 & (0.1\text{cm} \leq u_e \leq 3.6\text{cm}) \text{ HDRの場合} \end{cases} \quad (1)$$

$$k_1 = \begin{cases} 695. + 508. u_e^{-1} & (0.05\text{cm} \leq u_e \leq 5.3\text{cm}) \text{ LRBの場合} \\ 926. + 618. u_e^{-1} - 34.1 u_e^{-2} & (0.1\text{cm} \leq u_e \leq 3.6\text{cm}) \text{ HDRの場合} \end{cases} \quad (2)$$

$$k_2 = \begin{cases} 110. + 268. u_e^{-1} & (0.05\text{cm} \leq u_e \leq 5.3\text{cm}) \text{ LRBの場合} \\ 323. + 253. u_e^{-1} - 11.2 u_e^{-2} & (0.1\text{cm} \leq u_e \leq 3.6\text{cm}) \text{ HDRの場合} \end{cases} \quad (2)$$

解析では上記のパラメータを入力して非線形動的解析を行えばよいが、本解析に用いたプログラムではバイリニア型ばねの値をせん断変形に応じて変化させることはできないため、 u_e をバイリニア型ばねの各パラメータを定める際の基準となる免震支承のせん断変形と考えて次式により与える。

$$u_e = c_{NL} \cdot u_{max} \quad (4)$$

ここで、 u_{max} ：地震時に生じた免震支承の最大変位、 c_{NL} ：等価係数、である。本解析では、非線形動的解析の際のイテレーションは行わず等価係数 c_{NL} のとり方を検討することとした。また、免震橋模型の免震支承以外の減衰はレイリー減衰により考慮した。レイリー減衰の定数としては、橋脚の減衰定数を0.02、

桁及び免震支承の減衰定数を0としてひずみエネルギー比例減衰から算出される一次及び二次のモード減衰定数とレイリー減衰が一致するように定めた。ここで、橋脚の減衰定数は、免震支承の代りに固定・可動支承を用いた振動台実験から求めたものである。

4. 解析結果： 図1は、LRBを用いた免震橋に開北橋記録を入力した場合の桁の加速度及び桁の相対変位を示したものである。また、最大応答値に着目して実験値と解析値を比較すると前出の表1ようになる。ここで、式(3)の等価係数としては0.7と1.0の2ケースとした。これによると、解析により求めた応答値は実験値の特徴をよく再現しており、最大応答値に注目すると、実験値に対して大部分が0.9～1.1の範囲に収まっている。ただし、LRBを用いて八郎瀉記録を入力した場合には、解析値は実験値に比較して1.5倍程度大きくになっている。この原因については今後検討が必要である。

5. 結論： 等価係数 c_{NL} を0.7及び1.0として式(1)～(3)により推定した免震支承の降伏荷重、1次剛性及び2次剛性を用いた非線形動的解析により、免震橋の動的応答を精度良く再現することができる。LRB及びHDRの2種類の免震装置に対して強度を2段階に変化させた2種類の地震波加振実験に対するシミュレーションを行った結果では、等価係数 c_{NL} による応答値の違いはほとんどなかった。

なお、本研究のうち模型振動台実験は土木研究所と首都高速道路公団との共同研究として、また、免震橋の動的解析は、建設省官民連帯共同研究「道路橋の免震構造システムの開発に関する研究」の一環として実施したものである。

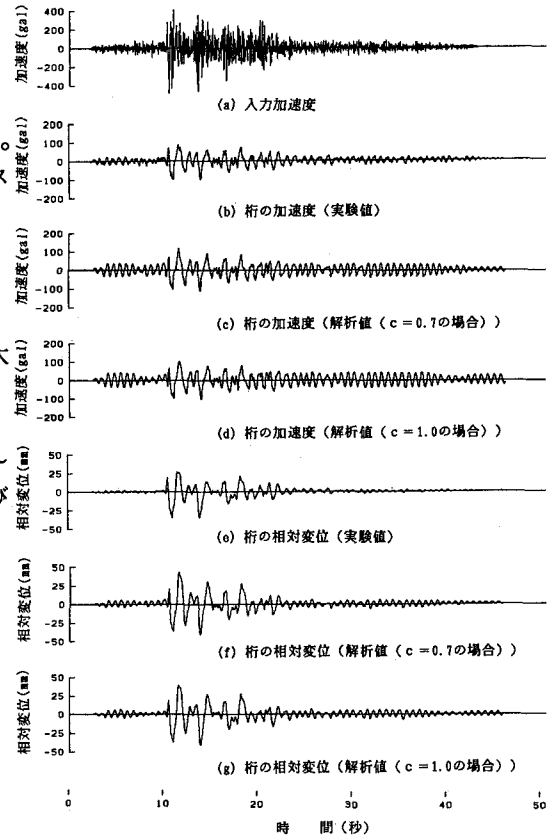


図1 桁の応答加速度及び相対変位に対する実験値と解析値の比較（開北橋B記録、LRB）

表1 非線形動的解析により求めた免震橋模型の最大応答値と実験値の比較

免震装置	入力地震動		入力最大加速度 (gal)	実験値		解析値			
				けたの最大加速度 (gal)	けたの最大相対変位 (mm)	C _{NL} =0.7の場合		C _{NL} =1.0の場合	
						けたの最大加速度 (gal)	けたの最大相対変位 (mm)	けたの最大加速度 (gal)	けたの最大相対変位 (mm)
LRBを用いた場合	開北橋記録	A	273.2	72.5	21.0	92.2(1.27)	25.3(1.20)	83.6(1.15)	25.7(1.22)
		B	481.3	101.0	35.8	118.3(1.17)	43.4(1.21)	102.7(1.02)	40.4(1.13)
	八郎瀧記録	A	85.1	81.7	26.1	123.7(1.51)	40.3(1.54)	97.3(1.19)	34.1(1.31)
		B	115.6	110.2	41.6	148.4(1.35)	60.7(1.46)	123.0(1.12)	53.8(1.29)
HDRを用いた場合	開北橋記録	A	276.4	124.6	18.6	128.6(1.03)	22.1(1.19)	116.5(0.93)	20.7(1.11)
		B	484.7	181.9	33.1	172.3(0.95)	34.4(1.04)	156.9(0.86)	31.7(0.96)
	八郎瀧記録	A	83.1	102.7	14.0	95.0(0.93)	15.6(1.11)	93.6(0.91)	15.4(1.10)
		B	111.5	170.4	30.4	189.9(1.11)	39.3(1.29)	185.3(1.09)	39.8(1.31)
()内の平均						1.17	1.26	1.03	1.18

()内は実験値との比を示したものである。