

ロッキング免震支承(RIBS)を用いた橋梁の地震応答特性評価

東北大学 学生会員 ○田尻 佳大

東北大学 正会員 何 昕昊

東北大学 正会員 運上 茂樹

1. はじめに

従来のゴム系免震支承は地震応答変位の増加に伴い、下部構造に伝わる反力も増加するため、想定を超える地震動が作用した場合に、下部構造の最大応答変位を制御することが困難である。そこで本研究では、最大反力を支承の高さと幅によって調整するとともに、ロッキング振動に伴う底面での衝突によってエネルギー吸収を図る新しいロッキング免震支承(RIBS)を提案し、RIBSを用いた橋梁を対象に、その動的特性や最大応答の制御効果を解析的に検討した。レベル2設計地震動と正弦波による強制振動を作用させた場合に、RIBSの各種パラメータに応じた上部構造と橋脚の最大応答に対する免震効果について考察した。

2. RIBS のコンセプト

提案する RIBS は Rocking Isolation Bearing System の略であり、通常時はピン支承として機能する一方で、地震が発生した場合に支承がロッキング運動することによって図-1(a)のように橋梁の免震化、すなわち長周期化とエネルギー吸収を図るという免震支承である。実用上、RIBSは図-1(b)に示すように、3つの平面によって形成された下沓に配置される。2つの傾斜面は、支承の過度の回転を抑制して転覆の懸念を回避するために設計された。底板の2つの角部は、図-1(c)に示すように、多角形または丸形に設計され、回転の角での応力集中を回避するためである。また、RIBSの復元力特性とエネルギー吸収特性は図-1(d), (e)に示す。

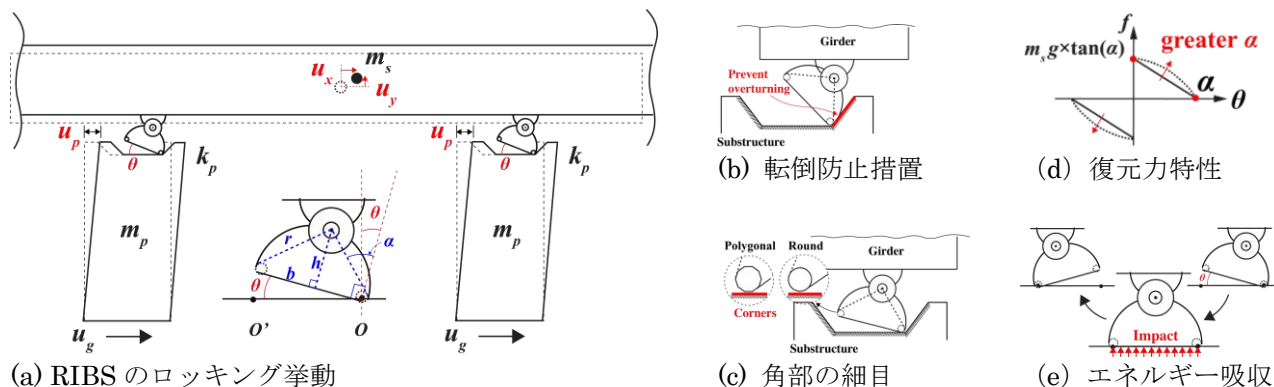


図-1 RIBSを用いた橋梁ロッキング挙動と構造細目

3. 解析方法

図-1に示すように、橋軸方向に、RIBSとそれによって支持された剛体桁、線形弾性橋脚からなるモデルを作成し、数値解析にはMATLAB R2021aを用いた。支承底面での衝突係数は、He^(1,1)らの研究により、システムの角運動量と水平方向の運動量を同時に保存するモデルを用いた。モデル全体の挙動は、支承におけるロッキングの回転角 θ と橋脚の水平変位 u_p で表すことができる。そこで、 θ と u_p に関する非線形2階微分方程式を解くことによって解析を行う。

重要となるパラメータは、支承の角度 α と長さ r (図-1参照)、橋脚に対する桁の質量比 $\beta = m_s/m_p$ 、橋脚の固有周期 T_p の4つである。本論では $\alpha = 35^\circ$ 、 $\beta = 5$ 、 $r = 0.9\text{m}$ 、 $T_p = 0.5\text{s}$ とした場合の結果について示す。

様々な周期(0.1~2s)を仮定した正弦波を入力した場合と地震動を入力した場合について検討した。地震動加速度として、道路橋の耐震設計において標準波として用いられるレベル2地震動の全18波形(I-I-1, I-I-2, ..., II-III-3)を用いた。

キーワード 免震支承, ロッキング, 地震応答, 強制振動

連絡先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL:022-795-7449 FAX: 022-795-7448

4. レベル2 設計地震動に対する最大応答特性

解析結果を図-2に示す。橋脚の最大変位について、固定支承の結果を青で、RIBSの結果を橙で示した。いずれの入力地震動に対しても、橋脚変位を低減することができたが、15番(タイプ2,II種地盤)の地震動に対してのみRIBSの転倒が生じた。応答低減率は、表-1に示すように地盤種別によっても異なり、I種地盤などの固い地盤に対して特に有効であることが分かった。

5. 正弦波強制振動に対する応答特性

(1)パラメータに応じた最大応答特性

入力した正弦波の周期(0.1~2s)における支承の回転角と橋脚の変位の最大値を求め、応答スペクトルを作成した。さらに、先述したパラメータ α, r, β, T_p と正弦波の振幅を変更して、パラメータによる最大応答の違いを検討した。固定支承の場合は正弦波の周期0.5sの場合に共振状態となったが、RIBSを用いた場合では共振が抑制された。橋脚の長周期化に伴って0.7s~1.0s付近では固定支承よりも応答値が大きくなったが、固定支承の共振変位よりは小さくなっている。さらに、 $r = 0.5m$ の場合には、RIBSは転倒を起こしたが、 $r = 0.9, 1.5m$ の場合には回転角が抑えられ、転倒は発生しなかった。

(2)最大応答と位相の関係

上記の解析において、支承の回転量と橋脚の変形量が最大値に達するときの支承(桁)と橋脚の位相差を、ヒルベルト変換を利用して算出した。また、 $\alpha = 35^\circ, r = 0.9m$ とした。支承と橋脚の位相差が $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ の場合について、モデルの挙動イメージを図-3に示す。支承回転角と橋脚変位の位相差を図-4に示す。周期0.7~1.0sにおいて橋脚が最大変位に達するときの位相差が 80° 近くに集中した。また、ロッキング振動が発生する際の位相差の平均値は 70° 近くに集中した。これは、支承の回転角と橋脚の変位が同時に大きくなることは発生しにくく、共振の抑制につながることを示している。一方で、支承回転角が最大になるときの位相差にはばらつきがある。

7. まとめ

今回の研究で検討したRIBSを用いた橋梁は、レベル2設計地震動の下で、固定支承と比べて橋脚の最大変位を40%程度減少させることができる。また、免震の効果は地盤種別によっても異なり、固い地盤の方がより有効であることが分かった。また、ロッキング振動が発生するときの支承回転角と橋脚変位の平均位相差は 70° 近くに集中しており、支承の回転角と橋脚の変位が同時に大きくなることは発生しにくく、共振の抑制につながることを分かった。なおRIBSに転倒が発生するケースも確認され、効果的な転倒防止機構は今後の課題である。

参考文献

- 1.1) He Xinhao, Unjoh Shigeki : Development of rocking isolation bearing system (RIBS) to control excessive seismic responses of bridge structures. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1-24, 2021

表-1 橋脚最大変位の低減率 (%)

	GC1	GC2	GC3	Average
Type I	41.2	36.2	30.1	35.8
Type II	40.2	36.9	31.9	36.3

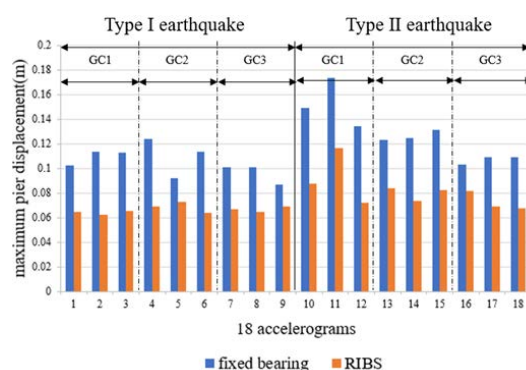


図-2 レベルII地震動入力下の橋脚最大変位
($\alpha=35^\circ, e_1$)

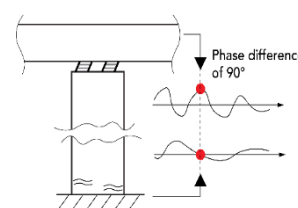


図-3 支承と橋脚の位相差

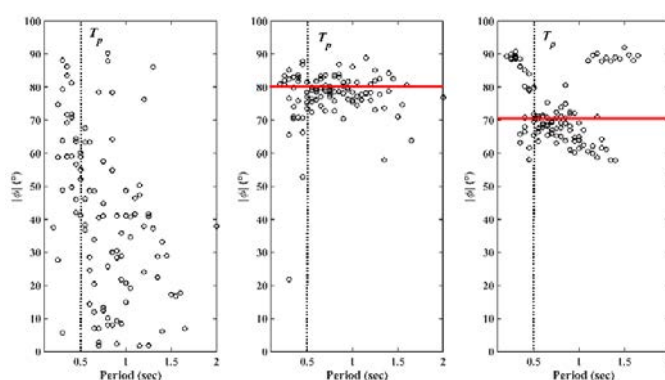


図-4 支承回転角と橋脚変位の位相差 (左図: 支承回転角が最大になるときの位相差; 中図: 橋脚が最大変位に達するときの位相差; 右図: ロッキング振動中の平均値)