

地震時要求性能および制約条件を考慮した免震ゴム支承の設計法の提案

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○豊岡 亮洋

1. はじめに

ゴム支承を用いた橋梁の免震設計においては、まず常時の照査を満足する支承スペックを決定し、その後地震応答解析により修正設計を行うことが一般的な流れである。しかし、免震ゴム支承は地震時の非線形挙動によりその制震効果を発揮するデバイスであり、常時で決めたスペックが必ずしも地震時の構造物の要求性能（最大応答塑性率や支承部の最大応答変位など）を満足するとは限らない。そこで、免震支承のスペックと地震時の応答の関係を明確にできれば設計の初期段階で免震構造の導入の可否を判断する際にも有用な情報を与えると考えられる。そこで本報告では、地震時の最大応答や制約条件を満足する免震ゴム支承の特性を算定し、これを実現する免震ゴム支承のスペックを逆算する手法を提案する。

2. 対象構造物と計算方法

図1に示す杭基礎により支持された鉄道RC橋脚構造¹⁾の線路方向を解析対象とし、支承部に鉛プラグ入り積層ゴム支承を4基適用することを想定する。本構造で支承部を固定としたときのプッシュ・オーバー解析結果を図2に示す。支承部固定の場合の等価固有周期 T_{eq} は 1.09 秒である。また、当該地盤の固有周期は 0.48 秒（G3 地盤）であり、支承部を固定とした場合、非線形スペクトル法による最大応答塑性率は 6.88（最大耐力点を超過）となった。この最大応答塑性率すなわち損傷を免震化により低減することを考える。

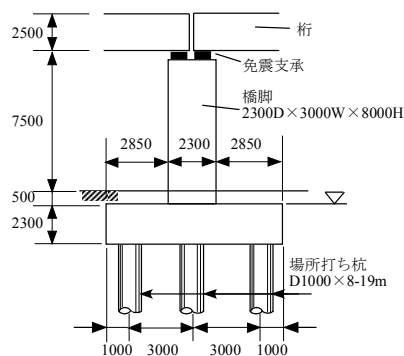


図1 免震化を想定する橋梁

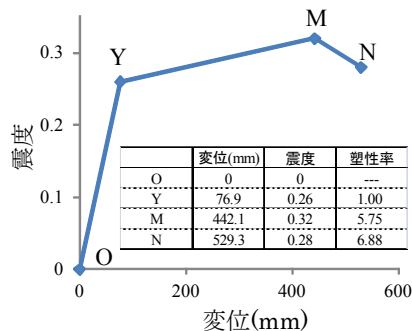


図2 橋脚・基礎の非線形特性

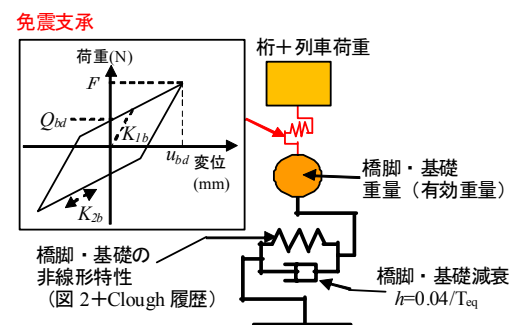


図3 非線形解析モデル

この橋梁の1次モード非線形特性を表現するため、図1の構造を図3の2自由度系モデルに置換した。桁は当該橋梁が支持する重量および地震時列車荷重（EA-17 分布荷重×0.2）を与えた質点とした。橋脚・下部構造は、橋脚重量および基礎の有効重量を考慮し、1次モード振動に適合させるため重量を0.3倍して質点として考慮した。この桁と橋脚の間に免震ゴム支承を設置することを想定し、図3に示すバイリニアモデルで表現した。橋脚・基礎の非線形特性は、図2のO-Y-M点を骨格曲線とし、初期剛性は等価固有周期 T_{eq} に一致するように設定した。履歴特性は Clough モデルを用い、減衰は周期依存減衰を橋脚・基礎部のみに考慮した²⁾。このモデルに対して、地表面設計地震動（L2 地震動スペクトル II(G3)²⁾）を作用させて解析を行った。

3. 要求性能から定まる制約を考慮した設計条件の算定

免震ゴム支承の特性はバイリニアモデルの二次剛性 K_{2b} 、降伏荷重 Q_{bd} 、最大応答変位 u_{bd} により決定することができるため、以下では K_{2b} 、 Q_{bd} をパラメータとして網羅的に動的解析を実施し、橋脚の最大応答塑性率および支承部の最大応答変位 u_{bd} を算定した。なお、初期剛性 $K_{1b}=6.5 \cdot K_{2b}$ として算定した³⁾。

図4は免震支承1基あたりの二次剛性および降伏荷重と、橋脚・基礎の最大応答塑性率の関係を示す。図5は免震支承の最大応答変位に関する同様の結果を示す。これらの図から、支承部の剛性を低下させるほど橋

キーワード 免震橋梁, 地震時要求性能, 免震ゴム支承の設計

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター TEL:042-573-7336

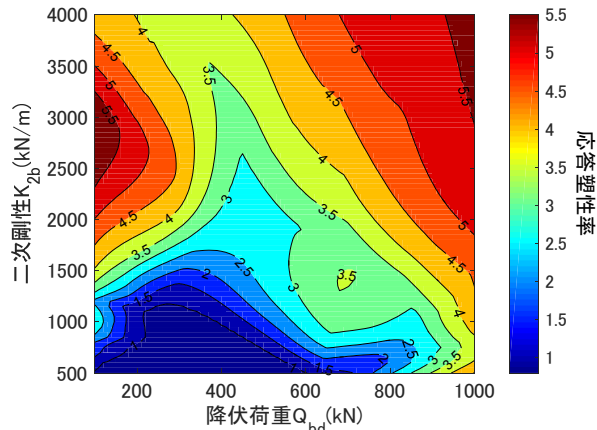


図4 最大応答塑性率と免震ゴム支承特性の関係

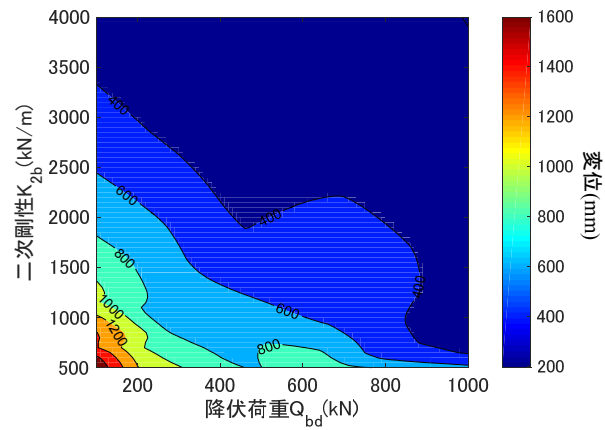


図5 支承部最大変位と免震ゴム支承特性の関係

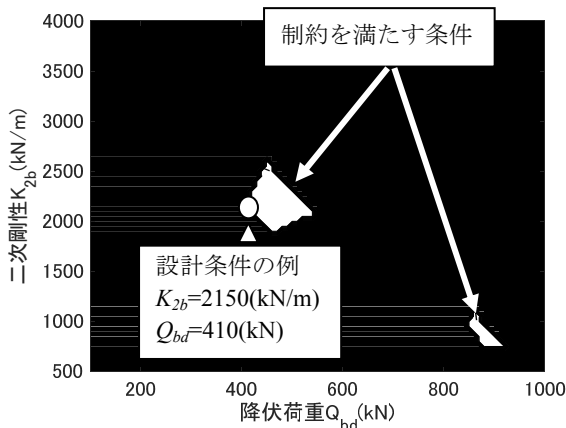


図6 制約条件を満たす免震ゴム支承の条件

鉛プラグの設計

$$\text{鉛プラグ面積(mm}^2\text{)} \quad A_p = Q_{bd} \times 1000 / q_0$$

$$\text{鉛プラグ径(mm)} \quad D_p = 2\sqrt{A_p / (n_p \pi)}$$

支承寸法の設計

$$\text{総ゴム厚(mm)} \quad \sum t_e = u_{bd} / \gamma$$

$$\text{ゴム平面積(mm}^2\text{)} \quad A_e = \frac{\{K_{2b} u_{bd} + Q_{bd} \times 1000\} - A_p q}{G \gamma}$$

$$\text{有効平面寸法(mm)} \quad a(=b) = \sqrt{A_e + A_p}$$

図7 LRB の設計式

脚・基礎の損傷は低減されるが、支承部の変位は増加するため、免震ゴム支承のパラメータを確定するためには、構造物側の制約条件を考慮する必要がある。これを踏まえ、図6には、図4および図5について、橋脚・基礎の最大応答塑性率、および支承部の最大応答変位に上限制約を設けた場合、両者の制約を満たす免震ゴム支承の二次剛性および降伏荷重の組合せを示す。上限制約は実際の設計条件から決める必要があるが、ここでは試算例として最大応答塑性率は3以下、支承部の最大応答変位は400 (mm)以下を条件とした。図6の白領域が要求性能を満足する条件であり、この範囲でバイリニアモデルを設定することで、応答塑性率および支承の最大変位の制約を満足することができる。この領域のどの点を採用するかは任意性があるが、ここでは制約条件下においてなるべく支承サイズを小さくすることを目的として、降伏荷重が最小となる $K_{2b}=2150$ (kN/m)、 $Q_{bd}=410$ (kN)の条件を設定した。このとき、最大応答変位 $u_{bd}=392$ (mm)、最大応答塑性率は2.98となった。

4. 鉛プラグ入り積層ゴム支承の試設計

以上により設定したバイリニアモデルを発揮する支承スペックを算定する。これは、一般的な鉛プラグ入り積層ゴム支承の設計を逆にたどることで算定する。設計式を図7に示す。ここで最大せん断ひずみ $\gamma=250\%$ 、ゴムのせん断弾性係数 $G=1.0$ (N/mm²)、鉛プラグ本数 $n_p=5$ とした。また、 q, q_0 (N/mm²)は文献3)によった。この結果、地震時の要求性能から定まる免震ゴム支承の有効平面寸法 $a, b=715$ (mm)、鉛プラグ直径 $D_p=111$ (mm)、ゴム総厚 $\sum t_e=157$ (mm)と算定された。ゴム1層厚の最大値は一次形状係数の制約から算定することができる。この設計条件を元に常時の照査を実施し、必要に応じて修正設計を行い支承の形状を決定することになる。

5. まとめ

地震時における制約条件を満足する免震ゴム支承の特性を算定する手法を提案した。なお、図4および図5は、対象橋梁の諸元から簡易な計算で算定することが可能であり、対象構造物についてこれらの図を作成しておくことで、最大応答塑性率の低減効果など、免震化の効果を本設計前に把握することができる。

参考文献：1) 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物 照査例 鉄筋コンクリート橋脚（杭基礎）平成19年、2) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計 平成24年、3) (公社) 日本道路協会 道路橋支承便覧 平成16年。