

インフォギャップ・ロバストネス関数を用いた 免制震橋梁のロバスト性の検討

阿南工業高等専門学校 正会員 ○井上貴文 阿南工業高等専門学校 正会員 森山卓郎

1. はじめに

不確定性が高い地震外力に対してロバスト性の高い構造システムの重要性が指摘されている^{1), 2)}。ここでのロバスト性は、パラメータ変動に対する頑強さを意味する²⁾。免震構造と制震構造を組み合わせることによりロバスト性に優れた橋梁構造を実現できる可能性が示されているが³⁾、亟原ら⁴⁾は、免震支承と制震ダンパーを併用した橋梁システムを対象とし、そのロバスト性に及ぼす免震・制震デバイスの特性の影響について地震応答解析により検討を行っている。一方、竹脇²⁾は、構造物の有するロバスト性を表現するために、インフォギャップ・ロバストネス関数⁵⁾を用いた方法を提案している。本研究では、インフォギャップ・ロバストネス関数を用いることにより免制震橋梁のロバスト性を検討した。

2. 免制震橋梁の加速度応答倍率

本研究では、免制震橋梁を図-1に示すように線形2質点2自由度系としてモデル化した。制震ダンパーは粘性減衰により表している。モデルの応答変位は図-2のようになり、それぞれ矢印の向きを正にとっている。ここでは、調和外力に対する定常応答を求める。橋脚の質量を表す質点 m_1 の運動方程式は以下のように表される。

$$m_1 \ddot{y}_1 + (k_1 + k_2)y_1 - k_2 y_2 + (c_1 + c_2)\dot{y}_1 - c_2 \dot{y}_2 = -m_1 \ddot{y}_0 \quad (1)$$

また、上部構造の質量を表す質点 m_2 の運動方程式は以下のようになる。

$$m_2 \ddot{y}_2 + c_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1)y_1 + k_2(y_2 + y_1) = -m_2 \ddot{y}_0 \quad (2)$$

調和外力を $y_0 = a_0 e^{i\omega t}$ とし、特解を $y_1 = A_1 e^{i\omega t}$ 、 $y_2 = A_2 e^{i\omega t}$ としてこれらを解くと、質点1についての加速度応答倍率が以下のように求まる。

$$\left| \frac{y_0 + \ddot{y}_1}{\ddot{y}_0} \right| = \left| \frac{m_1 \omega^2 (-m_2 \omega^2 + c_2 i \omega + k_2) - m_2 \omega^2 (-k_2 - c_2 i \omega)}{\{-m_1 \omega^2 + (k_1 + k_2) + (c_1 + c_2) i \omega\} (-m_2 \omega^2 + c_2 i \omega + k_2) - (-k_2 - c_2 i \omega)^2} + 1 \right| \quad (3)$$

3. インフォギャップ・ロバストネス関数を用いた検討

地動に関する不確定性は、地動入力加速度のPSD関数の変動により表すこととした²⁾。竹脇⁶⁾により地動入力加速度のPSD関数の上限値 \bar{s} が有限値として与えられたときの極限外乱は長方形関数として与えられることが示されていることから、ここでは、地動入力加速度のPSD関数は矩形PSD関数とした。竹脇²⁾と同様に、このPSD関数の上限値 \bar{s} に不確定性が存在するものとし、これを S とした。矩形PSD関数に関する不確定性を、

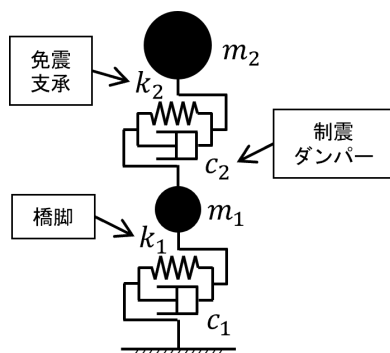


図-1 線形2質点2自由度系

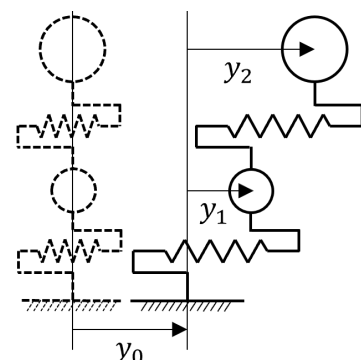


図-2 応答変位

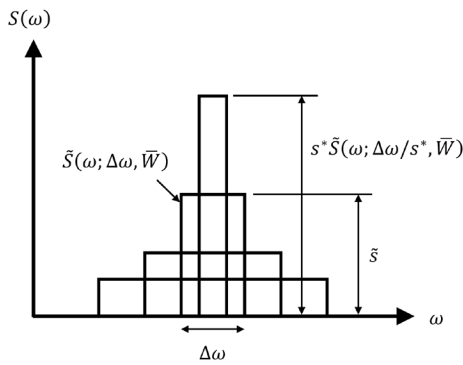


図-3 矩形 PSD 関数のインフォ-ギャップ
不確定性モデル²⁾を参考に作成

表-1 免制震橋梁のパラメータ

$m_1(t)$	120
$m_2(t)$	600
$k_1(\text{kN/m})$	28400
$k_2(\text{kN/m})$	16500
$c_1(\text{kN} \cdot \text{s/m})$	100
$c_2(\text{kN} \cdot \text{s/m})$	400

インフォ-ギャップ不確定性モデル²⁾を用いることとし、荷重の集合を次式のように表現する。

$$L[\alpha_S, \tilde{S}(\omega; \Delta\omega, \bar{W})] = \left\{ S(\omega) = s^* \tilde{S}(\omega; \Delta\omega/s^*, \bar{W}) : s^* = s/\bar{s} \left| \frac{s-\bar{s}}{\bar{s}} \right| \leq \alpha_S \right\}, \alpha_S \geq 0 \quad (4)$$

ここで、 α_S は変動の幅、 $\tilde{S}(\omega; \Delta\omega, \bar{W})$ は振動数幅も含む公称の矩形 PSD 関数の形状を表している。 $\Delta\omega$ は公称の円振動数幅であり、また、 \bar{W} は PSD 関数の振動数域での積分値であり一定であると考える。(4)式に示したインフォ-ギャップ不確定性モデルを用いて、インフォ-ギャップ・ロバストネス関数 $\hat{\alpha}_S$ は次式により表される²⁾。

$$\hat{\alpha}_S(\mathbf{k}, f_c) = \max \left\{ \alpha_S \left| \left[\max_{S \in L(\alpha_S, \tilde{S})} f(S, \mathbf{c}, \mathbf{k}) \right] \leq f_c \right. \right\} \quad (5)$$

ここで、 f は系の応答量を表し、 f_c は許容応答量を表している。(5)式は、性能要求を満たす不確定性レベル α_S の最大値がインフォ-ギャップ・ロバストネス関数 $\hat{\alpha}_S$ であることを意味している。

ここでは、免制震橋梁の応答量として、前章で示した質点1の加速度応答を考えて検討を行った。矩形 PSD 関数からフーリエ振幅スペクトルを求め、(1)式に示す加速度応答倍率より質点1の加速度応答を算出した。免制震橋梁のパラメータは、表-1に示すように設定した。許容加速度は、 $0.1(\text{m/s}^2)$ とした。公称の矩形 PSD 関数のパラメータとしては、文献²⁾に基づき、El Centro NS (Imperial Valley Earthquake 1940)に相当するものとして、 $\bar{W} = 0.139(\text{m}^2/\text{s}^4)$ 、公称 PSD 振幅 $\tilde{S} = 0.0165(\text{m}^2/\text{s}^3)$ と設定した。検討の結果、このケースでは、インフォ-ギャップ・ロバストネス関数 $\hat{\alpha}_S$ の値は、6.06となった。

4. おわりに

本研究では、免制震橋梁を線形2質点2自由度系としてモデル化し、インフォ-ギャップ・ロバストネス関数を適用することにより、免制震橋梁のロバスト性を検討した。今後の課題として、インフォ-ギャップ・ロバストネス関数の最大化に関して検討を行うことがあげられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築構造設計における冗長性とロバスト性（応用力学シリーズ 12），丸善，2013。
- 2) 竹脇出：不確定性を有する構造物のロバスト性の非確率的評価法，日本建築学会構造系論文集，第581号，pp.55-61，2004。
- 3) 松田哲夫，五十嵐晃，上田卓司，宮崎貞義，松田宏：免制震すべりシステムを適用した橋梁における支承部デバイス機能に関する一考察，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68，No.4，pp.L_683-L_696，2012。
- 4) 亟原和弥，井上貴文，中田成智：免震支承と制震ダンパーを併用した橋梁システムのロバスト性に関する研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.78，No.4，印刷中。
- 5) Ben-Haim, Y.: Information-gap decision theory: decision under severe uncertainty, Academic Press, San Diego, 2001.
- 6) 竹脇出：確率論に基づく新しい critical 外乱法，日本建築学会構造系論文集，第533号，pp.69-74，2000。