

第 I 部門

鉄道橋の支点追加補強工法に伴う固有振動数変化の評価

大阪大学工学部

学生員 ○篠崎 秀太

鉄道総合技術研究所

正会員 松岡 弘大

大阪大学大学院工学研究科

正会員 貝戸 清之

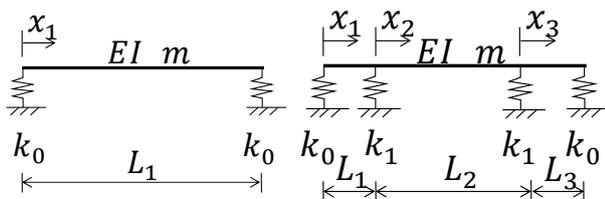
1. はじめに

近年、鉄道橋においては建設から数十年が経過し、構造性能の低下に起因した問題が顕在化しはじめています。具体的な例として高速鉄道におけるコンクリート鉄道橋のひび割れが進行し、固有振動数が低下したことで、走行列車の加振周期と一致する共振が生じ、大振幅振動が励起される事例が複数報告されている。共振が生じた橋梁に対しては、一時的な対策として桁中間に新たに臨時の支点を仮設し、スパンを短縮することで固有振動数を上昇させ、共振を抑制する手法が報告されている²⁾。しかし、支点追加補強の効果は追加位置や追加支点の支持剛性に大きく依存するが、理論的な背景は詳細に検討されていないため、施工時に試行錯誤のうへ仮設しているのが現状となっている。

そこで本研究では、共振が生じた橋梁の現有性能推定と支点追加補強効果を同時に推定する簡便な手法の構築を目的とし、多点弾性支持された梁理論と MCMC 法による方法論を提案する。また、文献¹⁾に見られる実橋梁を想定し、提案手法により支点追加補強工法の有効性について確認を行う。

2. 多径間弾性支持梁のモデル化と補強効果の算定

図-1 に対象とする支点追加補強の理論モデルを示す。補強前は、径間長 L のオイラーベルヌーイ梁がバネ係数 k_0 のばねで両端支持される。桁の曲げ剛性を EI 、および単位長質量を m はスパンを通じて一定とした。支点



(a) 支点追加補強前 (b) 支点追加補強後

図-1 支点追加補強前後の補強モデル

追加により既存支点から距離 ΔL の位置にバネ係数 k_1 のばねを新たに追加し、固有振動数および共振速度を向上させることが支点追加補強の目的となる。径間の振動形状を表現する式(1)は系の自由振動に関する運動方程式の解を仮定し変形することにより、

$$\frac{d^4}{dx_i^4} \phi_{n,i}(x_i) - \beta_n^4 \phi_{n,i}(x_i) = 0 \quad (1)$$

$$\beta_n^4 = \omega_n^2 \frac{m}{EI} \quad (2)$$

となる。したがって、境界条件を満たす β_n を求める問題に帰着される。具体的な β_n の算定は、新たに定義する行列 $\Gamma(\beta_n)$ とその行列式に関する条件(式(3))から算定することができる。

$$|\Gamma(\beta_n)| = 0 \quad (3)$$

なお、補強前の1スパンの場合、 $\Gamma(\beta_n)$ は、

$$\Gamma(\beta_n) = \begin{bmatrix} \Gamma(\beta_{n,1}) \\ \Gamma(\beta_{n,2}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Gamma(\beta_{n,1}) = \begin{bmatrix} -Y_a^n & 0 & Y_b^n & 0 \\ k_0 & -Y_a^n & k_0 & Y_a^n \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\Gamma(\beta_{n,2})$$

$$= \begin{bmatrix} Y_a^n \sin(\beta_n L) - k_0 \cos(\beta_n L) & -Y_b^n \cos(\beta_n L) \\ -Y_a^n \cos(\beta_n L) - k_0 \sin(\beta_n L) & -Y_b^n \sin(\beta_n L) \\ Y_a^n \sinh(\beta_n L) - k_0 \cosh(\beta_n L) & Y_b^n \cosh(\beta_n L) \\ Y_a^n \cosh(\beta_n L) - k_0 \sinh(\beta_n L) & Y_b^n \sinh(\beta_n L) \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

となる。なお、 $Y_a^n = EI\beta_n^3$ 、 $Y_b^n = EI\beta_n^2$ 、上付き T は転置操作を示す。補強後は追加支点が二点導入されるため、3スパンとなる。この場合の $\Gamma(\beta_n)$ は、式(4)の上2行と下2行の間に追加支点の境界条件を含め4行の行列を追加し、12行12列の行列となる。

いま、理論式による両端弾性支持された梁の固有振動数 f の算定過程を、

$$f = F(\theta) \quad (7)$$

$$\theta = (EI, k_0) \quad (8)$$

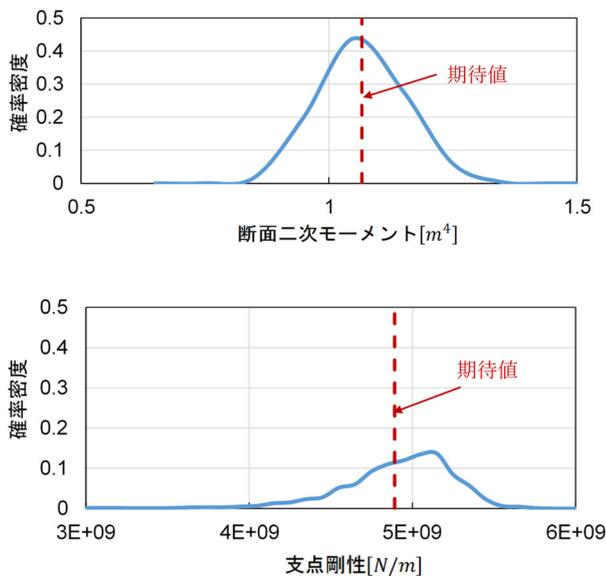


図-2 MCMC法で得られたパラメータの事後分布
(上：断面二次モーメント 下：既存支点剛性)

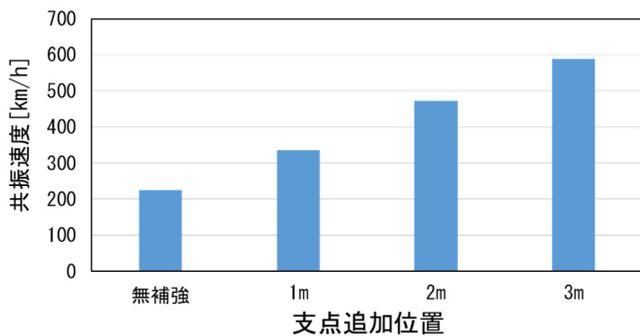


図-3 事後分布の期待値を用いた場合の補強効果の例
(追加支点剛性が既存支点剛性と同じ場合)

と関数で表し、MCMC法により尤度を、

$$\mathcal{L} = N(D|F(\theta), \sigma^2) \quad (9)$$

と設定し、パラメータベクトル θ の事後分布を推計する。このパラメータベクトル θ の事後分布を考慮して補強効果を計算することにより、補強効果を確率分布として得ることができる。補強後の固有振動数の算定を、

$$f' = F'(\theta') \quad (10)$$

$$\theta' = (EI, m, k_0, k_1, \Delta L) \quad (11)$$

として表現すれば、MCMC法によって得られたパラメータベクトル θ の事後分布を利用することで、補強後の固有振動数の算定を行うことができ、走行列車の加振振動数との比較から補強効果を見積もることができる。

3. 適用事例

ここでは、橋長30mのPRC桁を適用事例として、提案手法の有効性を検証する。対象とした桁は、PRC構

造を有する複線単純桁であり、これまでいくつかの同種の橋梁で共振が生じたことから、すでに多くの文献で検討されている。特に文献¹⁾では、列車通過後の残留波形の分析から、固有振動数の季節変動および振幅に依存した変動を明らかにしている。文献¹⁾より、冬季と夏季で0.2Hz程度、振幅により0.1Hz程度の変動が固有振動数に生じることが報告されている。また固有振動数は列車通過時に2.5Hz程度まで低下するため、実測データ D は平均2.5Hz、標準偏差0.2Hzで固有振動数が変動すると仮定し、正規分布に従い固有振動数をサンプル発生させて推計を行った。

図-2にMCMC法によって得られたパラメータの事後分布を示す。赤色の破線でパラメータの期待値を表す。この期待値を用いて支点追加補強工法による補強効果の算定を行った。

図-3にMCMC法により推定した事後分布の期待値を適用し、無補強及び既存支点から1m、2mおよび3mの位置に既存支点と同じ支点剛性を有する支点を追加した場合の共振速度を示す。追加支点の位置と共振速度の関係及び無補強時と比較したときの共振速度向上効果を理論式について計算することにより確認した。

4. おわりに

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 補強前の両端弾性支持梁についてのMCMC法により得たパラメータベクトル θ を用いて、補強効果を推定する手法を提案した。
- パラメータベクトル θ の期待値を用いて補強効果を推定することで、支点追加位置と補強効果の関係を確認した。

今後は補強設計に適用するために、実データでの有効性の検証および走行解析まで踏まえた補強効果の評価法について今後、検討を進める予定である。

【参考文献】

- 1) 中須賀淳貴, 水谷司, 山本悠人, 内田雅人, 蘇迪, 長山智則, 藤野陽三: 新幹線高架橋PRC桁の大振幅振動メカニズムの解明と構造特性の長期トレンドの分析, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp. 42-49, 2016
- 2) 曾我部正道, 松本信之, 藤野陽三, 涌井一, 金森真, 宮本雅章: 共振領域におけるコンクリート鉄道橋の動的設計法に関する研究, 土木学会論文集, No. 724, pp. 83-102, 2003