

モード解析による構造物・地盤の伝達関数の推定に関する基礎検討

(公財)鉄道総合技術研究所 正会員 ○権藤 徹
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 横山 秀史
 (公財)鉄道総合技術研究所 正会員 野寄 真徳

1. はじめに

構造物における地盤振動の低減対策を検討するためには、地盤振動の大きさに支配的な影響をもつ構造物部位を特定する必要がある。これらを特定するためには、加振力の入力点がある構造物から地盤振動の出力点がある地盤までの伝達関数を把握することが重要である。構造物・地盤の伝達関数を求める方法として、数値解析上で点加振を行い直接計算する方法（以下、点加振解析）がある。しかし、この解析は全入力点に1点ずつ点加振を行うため、計算に長時間を必要とする。

そこで本研究では、より短時間で構造物・地盤の伝達関数を求めるため、構造物・地盤連成系のモード解析（以下、連成モード解析）により伝達関数を推定するための基礎検討を行った。ここでは、連成モード解析と点加振解析により求めた伝達関数を比較した結果について報告する。

2. モード解析と伝達関数

モード解析と伝達関数の関係について整理する¹⁾。任意自由度 m に加振力 $P_m(\omega)$ を入力したとき、任意自由度 l で出力される加速度 $A_l(\omega)$ は式(1)で表される。 Φ_n は質量正規化した n 次モードベクトル、 ξ_n は n 次モード減衰比、 ω_n は n 次モード固有角周波数である。なお、式(1)は比例減衰を仮定している。

$$A_l(\omega) = \sum_{n=1}^N -\omega^2 \frac{\Phi_{ln} \Phi_{mn}}{(-\omega^2 + i2\xi_n \omega_n \omega + \omega_n^2)} P_m(\omega) \quad (1)$$

式(1)より、加振力 $P_m(\omega)$ の入力点である自由度 m から加速度 $A_l(\omega)$ の出力点である自由度 l までの伝達関数 $G_{lm}(\omega)$ とモードベクトルの関係式は式(2)となる。

$$G_{lm}(\omega) = \frac{A_l(\omega)}{P_m(\omega)} = \sum_{n=1}^N \frac{-\omega^2}{(-\omega^2 + i2\xi_n \omega_n \omega + \omega_n^2)} \Phi_{ln} \Phi_{mn} \quad (2)$$

式(2)の $-\omega^2 / (-\omega^2 + i2\xi_n \omega_n \omega + \omega_n^2)$ は動的応答倍率である。 $\xi_n = 0.02$ として、固有角周波数比 $\beta (= \omega_n / \omega)$ に対する動的応答倍率の変化を図1に示す。 β が0.5より

小さい場合、動的応答倍率は概ね0であることが確認できる。つまり、 n 次モード固有角周波数 ω_n と求める伝達関数の角周波数 ω の比が0.5より小さい場合、 n 次モードが伝達関数に与える影響はほとんど無いと考えられる。そこで、今回は求める伝達関数の周波数の2倍以下の周波数帯域にある振動モードを考慮して、伝達関数を推定することとした。

3. 検討方法

連成モード解析と点加振解析は、SuperFLUSH/3DS（(株)構造計画研究所）を用いて行った。鉄道の桁式高架橋区間を対象とした。解析モデルを図2に示す。

点加振解析では、入力点は高架橋T1～T4にある左右の各レール締結装置の位置とし、計241点である。また、出力点は高架橋柱P2の中心から橋軸直角方向に9.5m離れた地盤上の位置とした。点加振解析により求めた伝達関数を図3に示す。4.52Hzにピークを確認できる。

連成モード解析では、地盤インピーダンスを構造物に付加することで構造物・地盤連成系とした。地盤インピーダンスは周波数依存性を有するが、今回は「静的地盤ばね」を想定して0.1Hzにおける実部の値を構造物の剛性に付加することとした。なお、連成モード解析を行うときには減衰を考慮せず、式(2)により伝達関数を推定するときに減衰を与えることとした。すべてのモード減衰比は0.02とした。

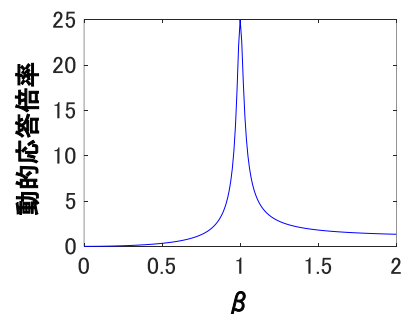


図1 動的応答倍率の変化

キーワード モード解析、伝達関数、地盤振動

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 防災技術研究部 地質 TEL042-573-7265

図3より、伝達関数のピークは4.52Hzであることから、4.52Hzの伝達関数を連成モード解析により推定することとした。4.52Hzの2倍である9.04Hz以下の周波数帯域にある振動モードを考慮することとした。

4. 検討結果

連成モード解析結果のうち、9.04Hz以下の周波数帯域にある1~18次モードを考慮して、式(2)より4.52Hzの伝達関数を推定した。振動モードごとに推定した伝達関数を図4に示す。4.52Hzの伝達関数に寄与が大きい振動モードは10次~13次モードであることがわかる。

また、これら振動モードごとに推定した伝達関数を合成して求めた伝達関数の分布を図5-(a)、点加振解析により求めた伝達関数の分布を図5-(b)に示す。両方の伝達関数の分布を比較すると、振幅が大きい構造物部位は整合しているが、振幅の値は異なっていることがわかる。この理由としては、地盤インピーダンスの周波数依存性を考慮していないことが考えられる。今回は「静的地盤ばね」を想定して0.1Hzにおける地盤インピーダンスを構造物に付加したが、実際には付加する地盤インピーダンスの周波数と連成モード解析の固有周波数は一致している必要があると考える。

なお、地盤インピーダンスの周波数依存性を考慮するためには、実部だけでなく虚部の値も構造物に付加する必要があるため、減衰を考慮したモード解析を行う必要がある。

5. まとめ

構造物・地盤連成系のモード解析と点加振解析により求めた構造物・地盤の伝達関数の分布を比較した結果、振幅が大きい構造物部位は整合したが、振幅の値は異なる結果となった。この理由としては、地盤インピーダンスの周波数依存性を考慮していないことが考えられるため、今後これらを考慮したモード解析の検討を行う。

参考文献

1) 貝戸清之, 松岡弘大, 渡辺勉, 曾我部正道, 藤野陽三: 走行列車荷重下における鉄道橋桁の動的応答の特性とその利用, 土木学会論文集F, Vol.66, NO.3, 382-401, 2010
2) 山口宏樹: 構造振動・制御, テキストシリーズ土木工学【8】巻, 共立出版, 1996

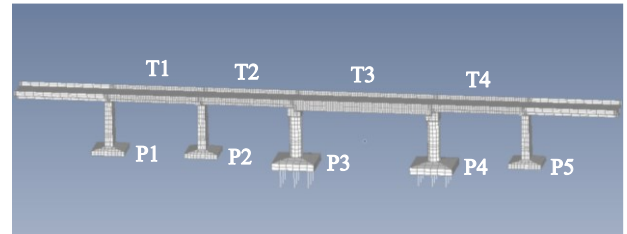


図2 解析モデル

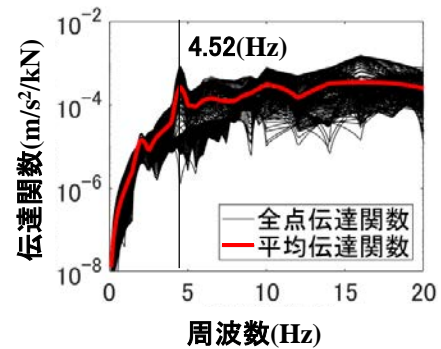


図3 点加振解析による伝達関数

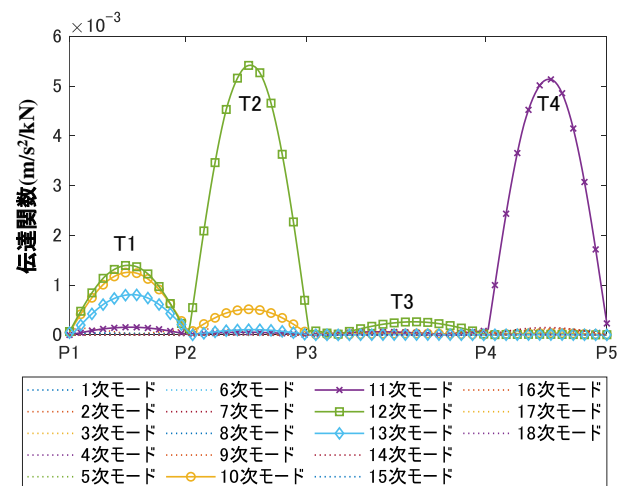
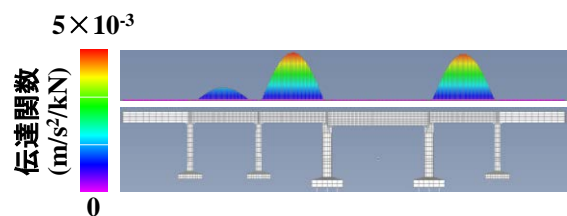
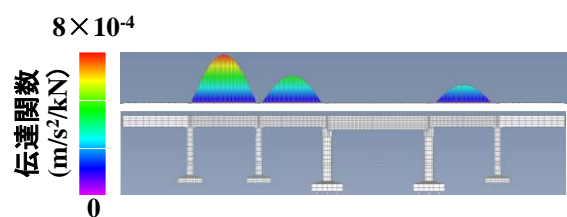


図4 振動モードごとに推定した伝達関数(4.52Hz)



(a) 連成モード解析



(b) 点加振解析

図5 伝達関数の振幅分布(4.52Hz)