

(133) 常時微動を用いた橋梁の振動特性の推定

(財) 鉄道総合技術研究所

富田 健司

〃

中村 豊

(株) システム・アクト デザイナーズ

西永 雅行

1. はじめに

地震防災対策および施設管理を行う上で、橋梁の桁の振動を把握することはきわめて重要である。これまで、桁の健全度は、衝撃や列車・自動車の荷重などの外力に対する応答を見ることによって判断されてきた。しかし、外力に対する応答は、桁のみならず支承部分や基礎地盤などの影響を受けており、これらの影響を評価できなければ、桁の健全度を的確に判断することはできない。また、外力を作用させるためには一般的に大がかりな装置や設備が必要となる。

ここでは、簡便に測定できる常時微動を用いて、支承部や基礎地盤の影響を的確に見積もり、桁の健全度を判定する際に必要な桁そのものの振動特性を的確に把握できる方法を検討したので報告する。

2. 基本的な考え方

地盤などの影響をすべて支点部の境界条件に集約できるものとし、主として単純梁で構成される橋梁を対象に、桁の固有振動数、支点状況（支点の水平方向および上下方向のバネ係数など）などの振動特性を簡便・的確に推定する手法を示す。以下、上下方向 V を説明するが、橋軸直交水平方向 H とも同様である。

スパン中央に質量 m が集中した単純梁を考える。スパン中央に作用する荷重 P に対するこの梁のスパン中央のたわみ δ は、つぎのように与えられる。

$$\delta = P/K$$

ここに、 $K=48EI/L^3$ であり、 E 、 I 、 L はそれぞれヤング率、断面 2 次係数、スパン長である。

P としてスパン中央に集中した重量 $w (=mg, g: \text{重力加速度})$ をとると、 $\delta = mg/K = g/\omega^2$ となる。ここに、 $\omega (= (K/m)^{1/2})$ はこの梁の固有円振動数である。

ところで、重量 W が橋軸方向に一樣に分布した分布質量梁の固有円振動数 ω_B は、つぎのように与えられる。

$$\omega_B = \{\pi^4 EIg / (L^3 W)\}^{1/2}$$

分布質量梁を中央に有効質量 We が集中した等価な梁に置き換えて考えると、 $\omega_B^2 = 48EI / (L^3 We)$ であるから、 $e = 48/\pi^4 \approx 0.49$ となる。つまり、梁の重量のほぼ半分が有効質量としてスパン中央に集中すると考えられる。このとき、スパン中央のたわみは、 $\delta_B = g/\omega_B^2$ となる。

(1) 固有振動数と支承上下バネ係数

この梁の支点部が上下バネで支持されているとき、梁の中央で計測された卓越円振動数 ω_2 は、 $\omega_2 < \omega_B$ となる。これは、スパン中央のたわみ δ_2 が、支点部のバネのたわみを含んで見掛け上大きくなったためである。すなわち、図-1 を参照して、

$$\omega_2^2 = g/\delta_2, \quad \delta_2 = \delta_B + (\delta_1 + \delta_3)/2$$

ここに、 $\delta_1 = (M_1 + M_2/2)/K_1$, $\delta_3 = (M_3 + M_2/2)/K_3$

梁の振動をスパン中央点2と支点上端点1（または点3）で計測した場合、点2と点1（または点3）のフーリエスペクトル比のピーク円振動数 ω_{21} （または ω_{23} ）は、つぎのように表される。

$$\omega_{21}^2 = g/\delta_{21}, \quad \delta_{21} = \delta_2 - \delta_1 = \delta_B + (-\delta_1 + \delta_3)/2$$

$$\omega_{23}^2 = g/\delta_{23}, \quad \delta_{23} = \delta_2 - \delta_3 = \delta_B + (\delta_1 - \delta_3)/2$$

したがって、 $\delta_B = (\delta_{21} + \delta_{23})/2$

ゆえに、 $1/\omega_B^2 = (1/\omega_{21}^2 + 1/\omega_{23}^2)/2$

つまり、梁の固有振動数は、点1、2、3の振動の測定結果から推定できる。いうまでもないが、点2の卓越振動数は必ずしも梁の固有振動数とはならない。なお、 $K_1 = K_3$ の場合、 $\omega_B = \omega_{21} = \omega_{23}$ となる。

これらの関係式を用いれば、梁の振動測定結果をもとに、梁の固有振動数 $F_B (= \omega_B/(2\pi))$ 、両支点のバネ係数 K_1 、 K_3 をつぎのように算定することができる。

$$1/F_B^2 = (1/F_{21}^2 + 1/F_{23}^2)/2$$

$$K_1 = 4\pi^2 (M_1 + M_2/2) / (1/F_B^2 - 1/F_{21}^2) / g$$

$$K_3 = 4\pi^2 (M_3 + M_2/2) / (1/F_B^2 - 1/F_{23}^2) / g$$

ここに、 $F_2 = \omega_2/(2\pi)$ 、 $F_{21} = \omega_{21}/(2\pi)$ 、 $F_{23} = \omega_{23}/(2\pi)$

(2) ローラー支承の固着による影響の算定（支承水平バネ係数）

ローラー支承が固着した状態を水平バネ K で表す。 $K=0$ のとき完全ローラー、 $K=\infty$ のとき完全ヒンジ（完全固着）となる。この状態の梁は1次不静定である。支承部に不静定力 N を作用させて、有効質量 We と不静定力 N により生じた支承部の変位 δ を算定し、この変位により発生する支承部のバネ力 $K\delta$ と不静定力 N のつりあいから N をつぎのように確定することができる（図-2参照）。なお、このときの梁のたわみ曲線としては、分布質量梁の振動モードを用いた。

$$N = -\pi We l / (24h_0) / \alpha$$

ここに、 $\alpha = 1 + 4I/(Ah^2) + 4EI/(Kl h^2)$ 、 A は梁の断面積、 h_0 は梁の下端から中立軸までの高さである。

計測が容易で支承部の水平バネと密接に関係した量として、支承上部とスパン中央の橋軸方向の相対変位の2倍をスパン中央のたわみ量で除した量 β を定義する。

$$\beta = -2\pi (h - h_0) [1 - 2\{3h/4 - h_0 - I/(2Ah_0)\} / \{\alpha (h - h_0)\}] / \{l(1 - \pi/4/\alpha)\}$$

この式において、 α 以外、いいかえれば K 以外の各変数は計測可能であり、これにより支承部の固着度が判断できる。なお、このときのスパン中央における卓越振動数 F_B は、つぎのように表される。

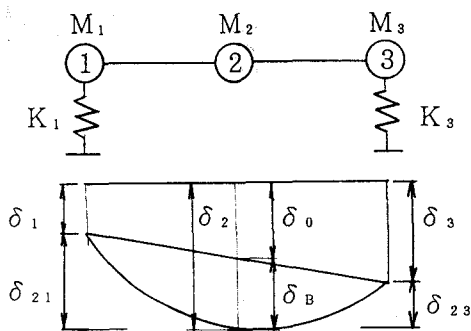


図-1 桁のたわみと
支承上下バネのたわみ

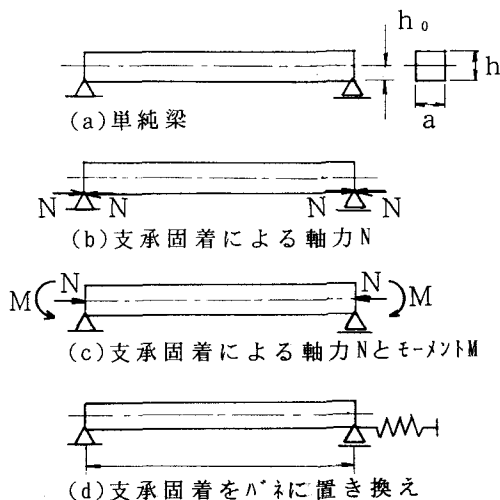


図-2 支承固着の単純梁

Fp = Fg / (1 - π / 4 / α) ^ 0.5

3. 計算機シミュレーションによる検証

同一の特性を持つ梁を異なる支承条件のもとで周波数応答解析を行った。点1, 2, 3の応答値から梁の固有振動数や支承部のパネ係数を算定する目的で、図-3に示すFEMモデルを用いて周波数応答を計算した。各モデルに対する各部位のパネ係数の設定値とそれを用いて求めた梁の固有振動数の理論値, FEM解析結果の梁両端部とスパン中央における梁の卓越振動数, ならびにそれから算出した両支承部の上下方向パネ係数をまとめて表-1に示す。

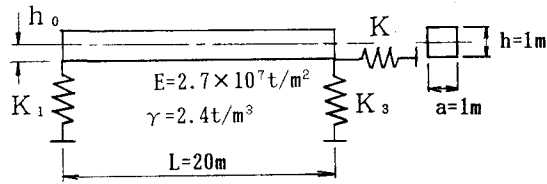


図-3 FEMモデル

表-1 理論計算値とFEM計算値との比較

モデル	パネ係数設定値 (t/m)			梁の固有振動数 F2の理論推定値 (Hz)	FEM解析結果卓越振動数 (Hz)			算出パネ係数 (t/m)	
	K1	K3	K		F21	F2	F23	K1	K3
A	∞	∞	∞	3.7	—	3.7	—	∞	∞
B 1	4,000	∞	∞	3.4	4.0	3.4	—	4,200	∞
B 2	2,000	∞	∞	3.2	4.4	3.2	—	2,200	∞
C 1	4,000	4,000	∞	3.2	3.9	3.3	3.9	3,900	3,900
C 2	2,000	4,000	∞	2.9	4.0	3.0	4.4	2,100	4,400
D 1	4,000	4,000	100	3.2	3.8	3.4	3.8	4,800	4,800
D 4	4,000	4,000	100,000	3.2	5.1	4.1	5.1	4,800	4,800

また、図-4は、ローラー支承をさまざまなパネ係数をもつ水平パネで拘束した場合のβ値の変化を、FEM計算値と上述の理論値とで比較したものである。これらの結果を総合すると、前節で述べた基本的考え方が正しいことが分かる。

4. 実橋への適用例

ここでは、提案した方法により、常時微動を用いて実際の橋梁の振動特性を測定調査した例を示す。常時微動の測定には、(財)鉄道総合技術研究所の“PIC”を使用した¹⁾。図-5に示すように、桁

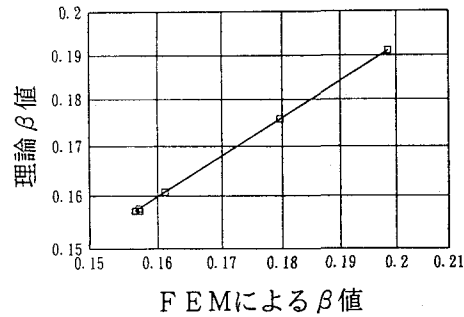


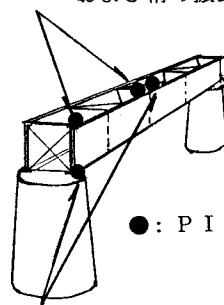
図-4 FEMによるβ値と理論計算によるβ値の比較

中央部と支承部の常時微動を同時測定し、周波数分析をはじめとする解析処理を施した²⁾。

ここで取り上げるA橋梁は、寒冷地の廃線に残っていた橋梁である。供用45年間、供用廃止後5年が経過している。測定時にはレールとまくらぎは既に撤去されていた。両橋台と4 P上の5 Bの沓は破損こそ認められなかったものの、経年劣化による固着がすすんで、桁を強く拘束していたと思われる。それ以外のすべての沓には破損、浮き上がりといった異状が認められ、水平方向の拘束は弱くなっていたと考えられる。

常時微動の実測値から各沓の上下方向Vと橋軸直交水平方向H Tのバネ係数を算出すると図-6のようになる。沓の実状が数字からも読み取れる。

(2) の方法による水平方向バネ係数
および桁の振動数の測定



●: PICセンサの設置位置

(1) の方法による上下方向バネ係数の測定

図-5 実橋における測定位置

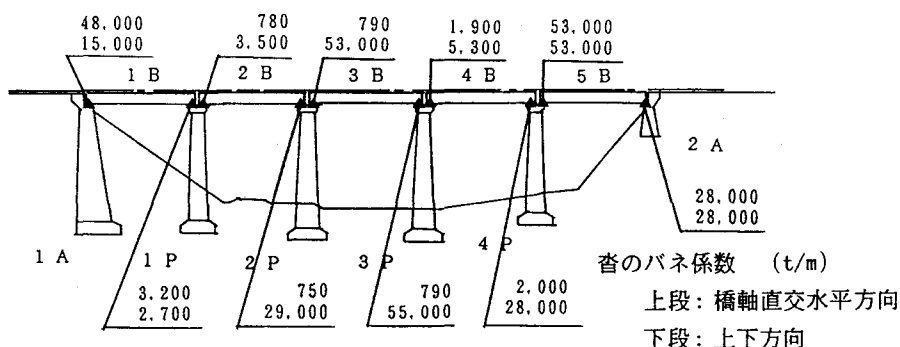


図-6 A橋梁の上下方向・橋軸直交水平方向バネ係数

5. まとめ

ここでは、常時微動を用いて橋梁の振動特性を的確に把握する方法を提案した。構造物の振動特性からその構造物の健全度を調査することは合理的であると思われる。しかし、桁中央で卓越する振動数は支承条件や基礎地盤の条件によって大きく変化するので、こうした振動だけで桁の健全度を評価するのは問題がある。誤った評価をしないために、支承条件や基礎地盤の特性を的確に把握しておく必要がある。

提案した方法の妥当性をFEMを用いたパラメータ解析により検証するとともに、実橋での常時微動測定にもとづいて、支承条件を含めた桁の特性が的確に推定できることを確認した。今後、多くの事例を分析することによって、よりの確で簡便な健全度評価手法として確立させる計画である。

謝 辞 : 常時微動測定にあたり便宜を図っていただいたJR北海道の関係者に謝意を表する。

参考文献

- 1) 中村・小島・新谷：携行型振動測定器 PICの開発，土木学会第42回年次学術講演概要集 I，1987年 9 月
- 2) 中村・富田・渡邊・西永：1993年釧路沖地震の被害箇所と常時微動の関係，第22回地震工学研究発表会講演概要，土木学会耐震工学委員会，1993年 7 月