

剛体ばねモデル解析を用いた桁橋の構造減衰特性 に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON STRUCTURAL DAMPING CHARACTERISTICS OF PLATE GIRDER BRIDGE EMPLOYING RIGID-BODY SPRING MODEL ANALYSIS

中島章典¹・土岐浩之²

Akinori Nakajima and Hiroyuki Doki

¹正会員 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (〒 321 宇都宮市石井町 2753)

²学生会員 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (〒 321 宇都宮市石井町 2753)

In designing a bridge structure, we must deal with dynamic problems due to earthquakes, wind action and moving vehicles, and therefore we must consider the structural damping caused by various factors adequately. From now on, however, the effect of an individual damping factor on the total damping characteristics of the bridge structure is not known well.

In this paper, in order to investigate the structural damping characteristics of the plate girder bridge, the complex eigenvalue analysis is conducted using rigid-body spring model taking into account the damping properties which are resulted from material of concrete and steel themselves, friction of movable support, and friction and nonlinear behavior of the interface between the steel girder and the concrete slab.

Key Words : structural damping characteristics, plate girder bridge, material damping, Coulomb damping, rigid-body spring model, complex eigenvalue analysis

1. はじめに

構造物、特に、橋梁構造物の設計に際しては地震、風、交通振動などの動的問題に対処しなければならず、このような動的問題を検討する場合には、その中に減衰の影響を適切に考慮する必要がある。橋梁構造物の減衰は、構造物の内部減衰、支点における摩擦、部材結合部のすべり、空気抵抗などによるエネルギーロス、基礎への逸散などが原因で起こると指摘されている¹⁾。ところが、橋梁の動的問題に対する設計に際しては、実橋の振動実験を通して得られた橋梁全体の低次の振動モードに対する減衰特性が利用されているのが現状であり、この観点から、橋梁の減衰に関する貴重なデータが提示されている^{2),3)}。しかし、実測される減衰の大きさにはばらつきも多く、それらの理由を説明するためにも、橋梁の減衰性状をもう少し根本に立ち返って検討する必要があると考えられる。

このような立場から、例えば、川島らは可動支承部の摩擦力が斜張橋の構造減衰特性に及ぼす影響を解析的に検討する⁴⁾とともに、斜張橋の模型実験を実施して、部材の内部減衰、支承の摩擦力による減衰をそれぞれ分離してエネルギー的に評価し検討した⁵⁾。また、米田は可動支承部の摩擦力による減衰が連続箱桁橋やローゼ桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響を、複素固有値解析を行って検討し、可動支承部の摩擦力による構造減衰を支配する無次元パラメータを提示した⁶⁾。最近、山口らは振動減衰のより一般的なエネルギー的評価法

を鶴見つばさ橋の実橋振動実験結果に適用して、橋梁の減衰特性の把握に対するエネルギー的評価法の妥当性を確かめるとともに、斜張橋の減衰特性を詳細に検討した⁷⁾。角本、梶川らも吊床版歩道橋を対象として、エネルギー的評価法に基づいてその減衰特性を検討した⁸⁾。しかし、材料の内部減衰を評価するロスファクターなどについては、実験結果に基づいて評価する必要がある、今後このようなデータの蓄積が必要とされている。

ところで、鋼橋梁形式の最も基本的な桁橋の減衰に影響を及ぼす因子として、コンクリート床版と鋼桁を結合するずれ止め部の非線形挙動および摩擦力によるエネルギーロスも考えられる。

そこで本研究は、鋼桁とコンクリート床版からなる桁橋を対象として、その減衰要因として、可動支承部の摩擦力、ずれ止め部の非線形挙動およびコンクリート床版と鋼桁との摩擦力によるエネルギーロス、さらに、コンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰のみを考慮し、これらの減衰要因が桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響を剛体ばねモデルの考え方を用いた複素固有値解析により検討した。この解析手法では、上述のような各減衰要因を粘性減衰としてのみ考慮できるが、それぞれの減衰要因を任意の位置、大きさに設定できる利点がある。ここでは、車両走行による桁橋の振動レベルの減衰問題を念頭において、桁橋の可動支承部の摩擦力、ずれ止め部の非線形挙動およびコンクリ

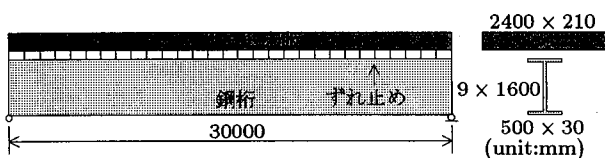


図-1 解析モデル

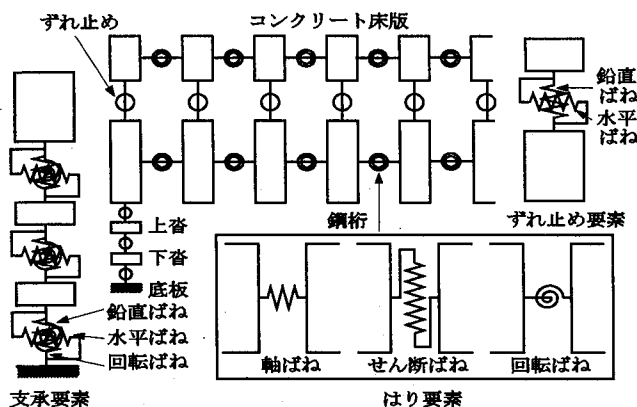


図-2 剛体間ばね要素

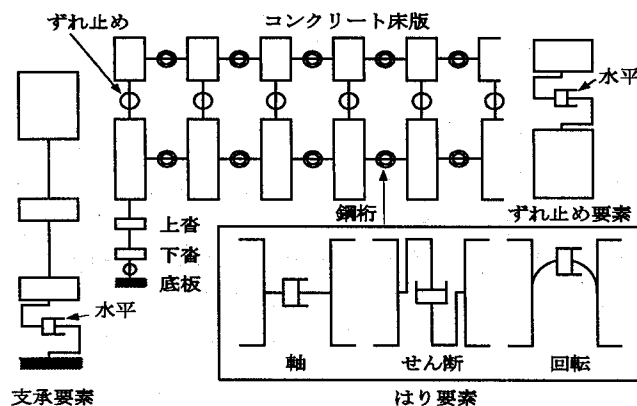


図-3 ダッシュポットを用いた減衰要素

ト床版と鋼桁との摩擦によるエネルギーロス、あるいはコンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰が桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響について基礎的な検討を行った。

2. 解析モデルおよび解析方法

本研究では、図-1に示すようなコンクリート床版と鋼桁間にずれ止めを有する単純桁橋を解析モデルとし、これを剛体ばねモデルを用いて離散化した。複素固有値解析を行うにあたっては、解析モデルの剛性、質量および減衰マトリックスが必要となる。そこで以下では、剛体ばねモデルの考え方によって桁橋の解析モデルを離散化して得られる剛性、質量および減衰マトリックスの誘導方法を示す。

2.1 桁橋の剛体ばねモデル

一般に、コンクリート床版と鋼桁からなる桁橋の解析モデルを剛体ばねモデルの考えによって離散化する

場合⁹⁾、図-2のようにコンクリート床版および鋼桁をいくつかの剛体要素に分割し、それぞれコンクリート床版および鋼桁同志の剛体要素をはりばね要素で結合し、コンクリート床版および鋼桁間にはずれ止めばね要素を取り付けることによってモデル化する。このような考え方に基づく桁橋モデルに対して固有振動解析あるいは車両走行による動的応答解析が既に実施されており、剛性および質量マトリックスが誘導されている^{10),11)}ので、ここでは、剛性マトリックスおよび質量マトリックスの誘導方法は省略する。ただし本研究では、可動支承部の摩擦力の影響を考慮することが必要となるので、以下に支承のモデル化の詳細を示す。

支承部は複数ローラー支承を対象として図-2中に示すように、上査、下査および底板の3つの剛体要素と鉛直ばね、水平ばねおよび回転ばねからなる3組のばね要素を用いて簡易にモデル化した。上段のばね要素は鋼桁下フランジと上査とのボルト固定を、中段のばね要素は回転ばねで回転ヒンジを、下段のばね要素は水平ばねで支承の可動および固定を表し、底板は固定した。また、はり要素および支承要素の質量は、分割した剛体要素の重心点にその並進運動質量および回転慣性が作用するものとして算定した。

一方、可動支承部の摩擦力に起因する構造減衰特性、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する構造減衰特性あるいはコンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰特性を検討する立場から、図-3に示すように各剛体要素間に長さの無視できるダッシュポットを配置してそれぞれの減衰要因をモデル化した。コンクリート床版と鋼桁の軸、せん断、および曲げによる軸変形成分に起因する材料内部減衰を考慮するために、橋軸方向に分割した同一部材の剛体要素間に軸ダッシュポット、せん断ダッシュポットおよび曲げ変形に対応する回転ダッシュポットを設けた。また、可動支承部の摩擦力に起因する減衰を表すものとして、支承要素の下査と底板間に水平ダッシュポットを設けた。さらに、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する減衰を考慮するために、コンクリート床版と鋼桁間に水平ダッシュポットを設けた。以上のようなダッシュポットを組み合わせることによって、それぞれの減衰要因が桁橋の減衰性状に及ぼす影響を容易に検討することができる。そこで以下に、複素固有値解析を実施する際に必要となる減衰マトリックスの誘導方法を説明する。

2.2 減衰マトリックスの誘導

上述のように、剛体ばねモデルの中に種々のダッシュポット要素を配置することによって、コンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力あるいは可動支承部の摩擦力に起因する構造減衰を考慮することができる。

まず、図-3に示す桁橋の鋼桁あるいはコンクリート

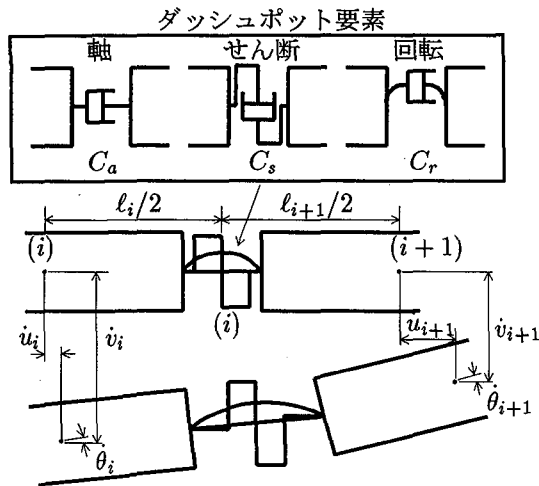


図-4 はり部材のダッシュポット要素

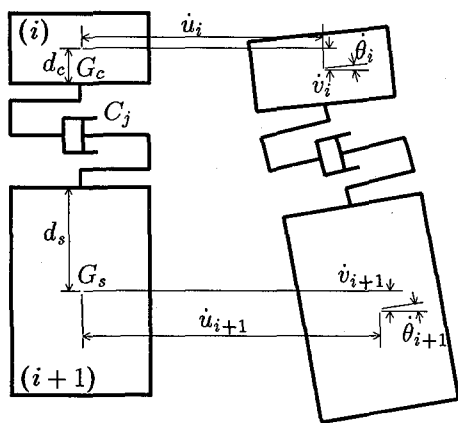


図-5 ずれ止め部のダッシュポット要素

床版の材料内部減衰を表す軸、せん断および回転ダッシュポットを用いた場合の減衰マトリックスの誘導方法を示す。図-4に示すように、粘性減衰係数 C_a , C_s , C_r を有する軸、せん断および回転ダッシュポットの両側の剛体要素 (i) , $(i+1)$ の重心点において、速度 $(\dot{u}_i, \dot{v}_i, \dot{\theta}_i)$, $(\dot{u}_{i+1}, \dot{v}_{i+1}, \dot{\theta}_{i+1})$ が生じたとすれば、それぞれのダッシュポットに作用する相対速度は、

$$\dot{\zeta} = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i \quad (1)$$

$$\dot{\xi} = \dot{v}_{i+1} - \dot{v}_i - (l_{i+1}\dot{\theta}_{i+1}/2 + l_i\dot{\theta}_i/2) \quad (2)$$

$$\dot{\phi} = \dot{\theta}_{i+1} - \dot{\theta}_i \quad (3)$$

となる。したがって、1組のはりダッシュポット要素による消費エネルギー U_d は、

$$U_d = (C_a\dot{\zeta}^2 + C_s\dot{\xi}^2 + C_r\dot{\phi}^2)/2 \quad (4)$$

と表せる。式(4)に式(1), (2), (3)を代入することにより、結果的に、この系の消費エネルギーをダッシュポット要素両側の剛体要素重心点の速度ベクトルによって表すことができ、以下の式を用いて減衰による一般化力が求められる。

$$\frac{\partial U_d}{\partial \dot{\mathbf{u}}} = \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{u}} \quad (5)$$

ここに、 $\dot{\mathbf{u}}$ は、はりダッシュポット要素 (i) の両側の剛体要素 (i) , $(i+1)$ の重心点の速度ベクトルであり、次式で与えられる。

$$\dot{\mathbf{u}} = \{\dot{u}_i, \dot{v}_i, \dot{\theta}_i, \dot{u}_{i+1}, \dot{v}_{i+1}, \dot{\theta}_{i+1}\}^T \quad (6)$$

したがって、式(5)によりはりダッシュポット要素の減衰マトリックス $\mathbf{C}_b$ が求められる。この減衰マトリックスのゼロでない上三角項の成分を示せば、以下のようになる。

$$\begin{aligned} C_{b11} &= C_a, & C_{b14} &= -C_a \\ C_{b22} &= C_s, & C_{b23} &= C_s l_i/2 \\ C_{b25} &= -C_s, & C_{b26} &= C_s l_{i+1}/2 \\ C_{b33} &= C_s l_i^2/4 + C_r, & C_{b35} &= -C_s l_i/2 \\ C_{b36} &= C_s l_i l_{i+1}/4 - C_r, & C_{b44} &= C_a \\ C_{b55} &= C_s, & C_{b56} &= -C_s l_{i+1}/2 \\ C_{b66} &= C_s l_{i+1}^2/4 + C_r \end{aligned}$$

次に、ずれ止め部の減衰マトリックスを求める。図-5に示すようにずれ止め部の非線形挙動および摩擦力によるエネルギーロスを粘性減衰係数 C_j を有するダッシュポットを用いてモデル化する。2つの剛体 (i) , $(i+1)$ はそれぞれコンクリート床版、鋼桁を表している。それぞれの剛体の重心点において速度 $(\dot{u}_i, \dot{v}_i, \dot{\theta}_i)$, $(\dot{u}_{i+1}, \dot{v}_{i+1}, \dot{\theta}_{i+1})$ が生じたものとすれば、ずれ止め部のダッシュポットの相対速度は、

$$\dot{\zeta} = \dot{u}_{i+1} - \dot{u}_i - d_c \dot{\theta}_i - d_s \dot{\theta}_{i+1} \quad (7)$$

のように求められる。したがって、1つのずれ止め部のダッシュポットによる消費エネルギー U_d は、

$$U_d = C_j \dot{\zeta}^2/2 \quad (8)$$

と表される。式(8)に式(7)を代入して、再び式(5)を適用すれば、ずれ止め部の減衰マトリックス $\mathbf{C}_j$ が次のように求められる。

$$\mathbf{C}_j = \begin{bmatrix} C_j & 0 & d_c C_j & -C_j & 0 & d_s C_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & d_c^2 C_j & -d_c C_j & 0 & d_c d_s C_j & \\ & & C_j & 0 & -d_s C_j & \\ Sym. & & & 0 & 0 & \\ & & & & d_s^2 C_j & \end{bmatrix}$$

ここで、速度ベクトル $\dot{\mathbf{u}}$ は式(6)で与えられる。また、図-5に示すように d_c はずれ止め取付け位置からコンクリート床版の剛体要素重心までの距離を表し、 d_s は同じく鋼桁の剛体要素重心までの距離である。

さらに、図-6を参考にして、可動支承部の摩擦力に起因する構造減衰を、粘性減衰係数 C_h を有するダッシュポットを用いてモデル化した場合の可動支承部の

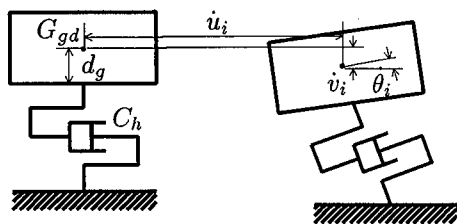


図-6 可動支承部のダッシュポット要素

減衰マトリックスを求める。ここで、図中の剛体は支承部の下沓を示している。この剛体の重心点において速度 \$(\dot{u}_i, \dot{v}_i, \dot{\theta}_i)\$ が生じたものとすれば、可動支承部のダッシュポットの相対速度は、

$$\dot{\zeta} = -\dot{u}_i - d_g \dot{\theta}_i \quad (9)$$

と求められる、したがって、可動支承部のダッシュポットによる消費エネルギー \$U_d\$ は、

$$U_d = C_h \dot{\zeta}^2 / 2 \quad (10)$$

と表される。式 (10) に式 (9) を代入し、式 (5) を適用すれば、可動支承部の減衰マトリックス \$C_h\$ が以下のように得られる。

$$C_h = \begin{bmatrix} C_h & 0 & d_g C_h & -C_h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & d_g^2 C_h & -d_g C_h & 0 & 0 \\ & & & C_h & 0 & 0 \\ Sym. & & & & 0 & 0 \\ & & & & & 0 \end{bmatrix}$$

ここで、図-6 に示すように \$d_g\$ は下沓下面から下沓の剛体要素重心までの距離である。

2.3 複素固有値解析¹²⁾

以上のように、剛体ばねモデルの考え方によって、桁橋の各要素の減衰マトリックスを誘導することができるので、一般的な手法に従って、構造物全体の剛性、質量および減衰マトリックスを組み立てれば、以下のような構造物全体の自由振動の運動方程式が定式化できる。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = 0 \quad (11)$$

ここで、\$M\$、\$C\$、\$K\$ は、それぞれ桁橋構造全体の質量マトリックス、減衰マトリックスおよび剛性マトリックスである。式 (11) において \$u = Y e^{i\lambda t}\$ とおけば、\$Y\$ に関する同次方程式が得られる。この同次方程式の係数行列式の値を 0 に等置することによって、以下の複素固有値問題の式が得られる。

$$|K + i\lambda C - \lambda^2 M| = 0 \quad (12)$$

したがって、過減衰および臨界減衰の範囲を除いて、式 (12) を満足する固有値 \$\lambda_n\$、固有ベクトル \$\psi_n\$ が以下のよ

うに求められる。

$$\lambda_n = \alpha_n \pm i\beta_n \quad (13)$$

$$\psi_n = \psi_n^{Re} \pm i\psi_n^{Im} \quad (14)$$

ここで、\$\alpha_n\$、\$\beta_n\$ は \$n\$ 次固有値の実部、虚部であり、\$\psi_n^{Re}\$、\$\psi_n^{Im}\$ は \$n\$ 次固有ベクトルの実部、虚部である。これらの値を以下の式に代入することによって、固有円振動数 \$\omega_n\$、減衰比 \$\xi_n\$、\$n\$ 次振動モードの変位ベクトル \$\gamma_n\$ およびその位相差 \$\theta_n\$ を算定することができる。

$$\omega_n = \sqrt{\alpha_n^2 + \beta_n^2} \quad (15)$$

$$\xi_n = \frac{-\alpha_n}{\sqrt{\alpha_n^2 + \beta_n^2}} \quad (16)$$

$$\gamma_n = \sqrt{(\psi_n^{Re})^2 + (\psi_n^{Im})^2} \cos(\omega_n t + \theta_n) \quad (17)$$

$$\theta_n = \tan^{-1}(\psi_n^{Im} / \psi_n^{Re}) \quad (18)$$

3. 複素固有値解析の結果および考察

ここでは、以上のように得られた各マトリックスを用いて、桁橋のコンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰、可動支承部の摩擦力、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力が桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響を検討するために、これらの減衰要因の粘性減衰係数を個々に変化させて複素固有値解析を行った。ただし、桁橋の解析モデルは図-1 のような断面を持つスパン 30m の単純桁橋とし、これを橋軸方向に 30 分割した。また、ずれ止めを表す 1 つの水平ばね定数に、特に断らない限り合成桁に相当する程度の 2.16GN/m を用いた。さらに、支承部の固定を表す部分の並進、回転ばね定数には非常に大きいばね定数 (980GN/m, 980GNm) を、可動やヒンジの条件を表す並進、回転ばね定数には非常に小さいばね定数 (9.8kN/m, 9.8kNm) を仮定した。

3.1 可動支承部の摩擦力に起因する構造減衰特性

可動支承部の摩擦力に起因する桁橋の構造減衰特性を把握するため、図-3 に示す支承要素の下沓と底板間に設置した水平ダッシュポットの粘性減衰係数を、小さい領域から大きい領域で変化させて複素固有値解析を行い、桁橋の減衰比を算定し構造減衰特性を検討した。つまり後述する式 (25) を参考にすると、可動支承部の摩擦力 \$F\$ および固有円振動数 \$\omega\$ が一定ならば、粘性減衰係数を小さい領域から大きい領域に変化させることは、可動支承部の振動振幅 \$a\$ を大振幅から小振幅で変化させたのと同じである。ただしここでは、コンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する構造減衰は考慮していない。

図-7 に可動支承部の粘性減衰係数 \$C_h\$ と桁橋の減衰比 \$\xi_n\$ の関係を示す。縦軸は減衰比を、横軸は粘性減衰

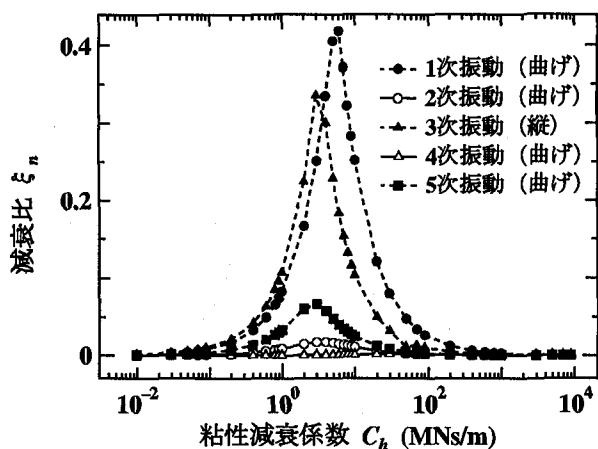


図-7 可動支承部の粘性減衰係数と減衰比の関係

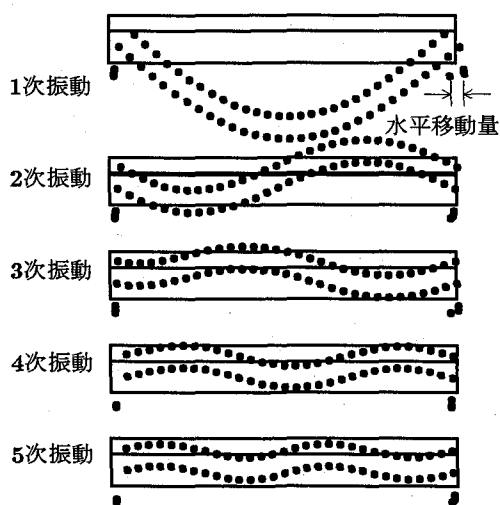


図-8 可動支承部の粘性減衰係数を 1.0MN·s/m とした場合の振動モード

係数の大きさを表し、1次から5次振動までの値を示している。この図から、可動支承部の摩擦力に起因する減衰比は、粘性減衰係数が大きくなるにつれて増加し、ある粘性減衰係数で最大になった後に減少する可動支承部の摩擦力に起因した減衰特有の振幅依存性を示していることがわかる⁶⁾。また、粘性減衰係数を変化させた場合の減衰比の最大値は1次振動で最も大きく次に、3次振動、5次振動の順になっている。ここで、可動支承部の粘性減衰係数を 1.0MN·s/m とした場合の振動モードを図-8 に示すが、図-7 と対応させると1次振動の対称モードで減衰比の最大値は大きく、2次の逆対称モードでは減衰比の最大値は小さいことがわかる。これらの傾向は、米田によって行われた連続箱桁橋やニールセン型ローゼ桁橋に関する同様の解析的検討の結果⁶⁾や山口らによって行われた鶴見つばさ橋の振動実験において得られた結果⁷⁾と一致している。

ただし、3次、4次、5次振動ではその振動モードが複雑なモード形を示しており、振動モードの形のみか

ら可動支承部の摩擦力に起因した減衰の大小を判断することはできない。

そこで、図-8 のように求めた n 次振動モードの変位ベクトル γ_n を用い、以下の式に基づいて減衰比 ξ_n を算出してみる。

$$\xi_n = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{V_D}{V_{max}} \right) \quad (19)$$

$$V_D = \pi C_h a^2 \omega_n \quad (20)$$

$$V_{max} = \frac{1}{2} \gamma_n^T K \gamma_n \quad (21)$$

ここに、 V_D 、 V_{max} はそれぞれ n 次振動モードにおける可動支承部の摩擦力に起因する減衰力によって失われるエネルギーおよび構造系のひずみエネルギーの最大値を表している。また、 C_h 、 a および ω_n はそれぞれ対応する粘性減衰係数、可動支承部の振動振幅、固有円振動数である¹³⁾。粘性減衰係数 C_h を 1.0MN·s/m とし、式(19)、(20)、(21)を用いて求めた各振動次数の減衰比を算出すると、1次、2次、3次振動に対して 0.852×10^{-1} 、 0.846×10^{-2} 、 0.115 となり図-7の結果にほぼ一致した。したがって、各振動モードの減衰比の大きさは、可動支承部の移動量のみではなく、構造系のひずみエネルギーと可動支承部の減衰エネルギーの相対的な大きさで考える必要のあることが確認できる。以上の検討から、ここで用いた剛体ばねモデル解析によって桁橋の可動支承部の摩擦力による構造減衰特性を明らかにできることがわかった。

3.2 ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する構造減衰特性

ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する構造減衰特性を把握するため、図-3 に示すずれ止め部の水平ダッシュボットの粘性減衰係数 C_j を変化させて複素固有値解析を行い、桁橋の構造減衰特性を検討した。ここでは、桁橋長手方向位置の全部のダッシュボットの粘性減衰係数を一様に变化させた。また、コンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰、可動支承部の摩擦力に起因する構造減衰は考慮していない。図-9 に合成桁橋（ずれ止めの水平ばね定数を 2.16GN/m）を対象として、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力による減衰を表す粘性減衰係数 C_j と桁橋の減衰比 ξ_n の関係を示す。この図より、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する桁橋の減衰比の最大値は、1次振動で最も小さく、高次になるほど大きくなっていることがわかる。これは、同じ粘性減衰係数の値では、高次振動モードになるほどずれ止め部の変形が大きくなるためであると考えられる。また、ずれ止め部の粘性減衰係数 $C_j = 1.0\text{MN} \cdot \text{s/m}$ の場合に、複素固有値解析を行って得られる変位ベクトルを用い、式(19)、(20)、(21)の考え方を適用して算出した減衰比の値は、1次、2次、3次振動に対して 0.707×10^{-4} 、 0.605×10^{-3} 、 0.139×10^{-2}

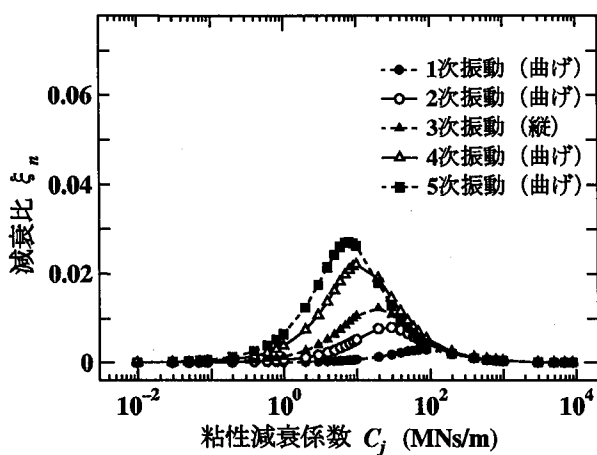


図-9 ずれ止めの粘性減衰係数と減衰比の関係 (合成桁橋)

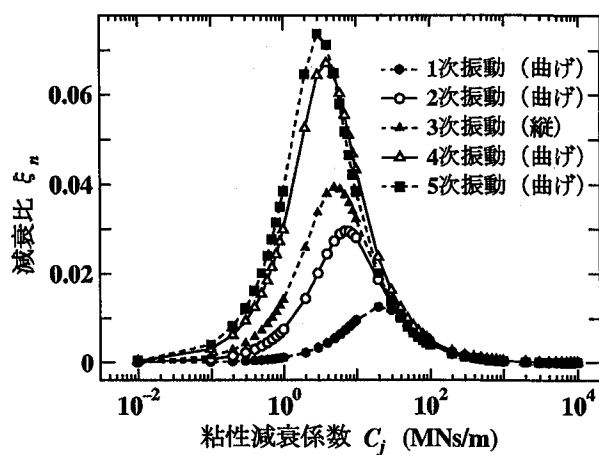


図-10 ずれ止めの粘性減衰係数と減衰比の関係 (非合成桁)

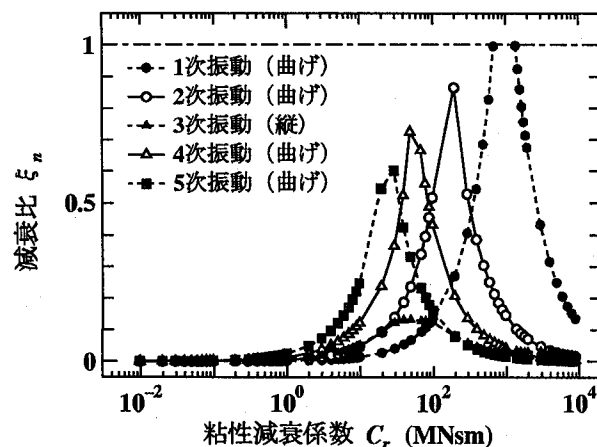


図-11 コンクリート床版の回転ダッシュポットの粘性減衰係数と減衰比の関係

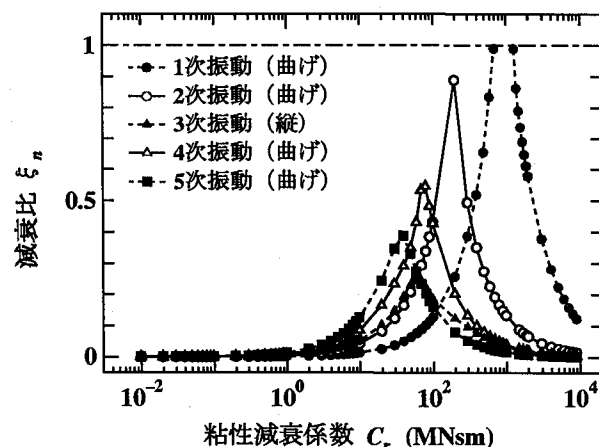


図-12 鋼桁の回転ダッシュポットの粘性減衰係数と減衰比の関係

となり図-9の結果にはほぼ一致することが確かめられる。

次に、非合成桁橋（ずれ止めの水平ばね定数を 0.49GN/m ）を対象として、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力による減衰を表す粘性減衰係数 C_j と桁橋の減衰比 ξ_n の関係を図-10 に示す。この場合も合成桁橋の場合と同様に、減衰比の最大値は1次振動で最も小さく、高次になるほど大きくなっている。また、図-9 と図-10 を比較すると、合成桁橋の場合よりも非合成桁橋の場合の方が、いずれの振動次数においても、粘性減衰係数 C_j のほとんどの範囲で減衰比は大きいことがわかる。このことは、合成桁橋よりも非合成桁橋の場合の方が、ずれ止めのずれ止め剛度が小さいためにずれ止め部の相対ずれ変位量が大きいためから説明できる。

ただし、非合成桁橋の場合においても、低次の振動次数の減衰比の最大値は、可動支承部の摩擦力に起因する低次の振動次数の減衰比の最大値よりも小さいことがわかる。

3.3 コンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰特性

構造物の減衰には、構成材料の内部減衰も影響すると考えられる。そこで、桁橋を構成するコンクリート床版および鋼桁の内部減衰が構造系の構造減衰特性に及ぼす影響を、内部減衰をモデル化したコンクリート床版および鋼桁の軸、せん断、回転の各ダッシュポットの粘性減衰係数を変化させて検討した。ただし基礎的検討の立場から、桁橋の長手方向の各ダッシュポットの粘性減衰係数は一様に変化させ、可動支承部の摩擦力、ずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する構造減衰は考慮していない。

図-11 には、コンクリート床版の回転ダッシュポットのみを考慮した場合のコンクリート床版の回転ダッシュポットの粘性減衰係数 C_r と桁橋の減衰比 ξ_n の関係を示している。また、図-12 には、鋼桁の回転ダッシュポットのみを考慮した場合について、鋼桁の回転ダッシュポットの粘性減衰係数 C_r と桁橋の減衰比 ξ_n の関係を示している。これらの図から、コンクリート床版あるいは鋼桁の回転ダッシュポットの粘性減衰係数が桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響は、縦振動が支配的な

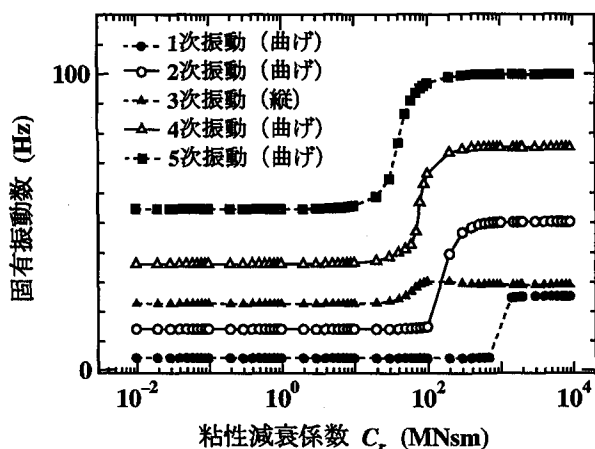


図-13 鋼桁の回転ダッシュポットの粘性減衰係数と固有振動数の関係

振動モードを除いて、粘性減衰係数が大きい領域では低次の振動次数で大きく、逆に粘性減衰係数が小さい領域では高次の振動次数で大きくなっていることがわかる。この理由は、それぞれの回転ダッシュポットの粘性減衰係数が大きくなるにつれて高次の曲げ変形が起こりにくくなるためであると考えられる。また、両図中の点線は臨界減衰を表しており、1次振動の過減衰の領域は示していない。

一方図-13には、鋼桁の回転ダッシュポットの粘性減衰係数と桁橋の固有振動数の関係を示す。この図より、すべての振動次数において、ある粘性減衰係数の値で固有振動数は急激に増加しており、高次の振動次数ほど小さい粘性減衰係数の値で変化している。また、この図と図-12を対比すると、各振動次数とも固有振動数が変化する領域で、減衰比が大きくなっていることがわかる。

さらに、1次振動に着目すると、粘性減衰係数が $10^3 \text{ MNm}\cdot\text{s}$ の付近で、振動数が急激に変化しており、この領域は過減衰の範囲に対応していることがわかる。

ところで、鋼桁およびコンクリート床版の軸変形およびせん断変形に起因する内部減衰が桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響を検討した結果、それらによる内部減衰は、曲げ変形に起因する内部減衰に比べてかなり小さい値になっていたため、ここではそれらの結果を省略する。

4. 各減衰要因の構造減衰寄与率の検討

これまででは、各減衰要因を単独で考慮した場合の構造減衰特性を検討した。しかし、実際の減衰は各減衰要因が単独で作用するのではなく、すべての減衰要因が組み合わさって作用している。そこで、各減衰要因に対してそれぞれ実橋の挙動に近いと考えられる粘性減衰係数を適用して複素固有値解析を行い、各減衰要

因が構造全体の減衰特性に寄与する割合を検討する。

まず、コンクリート床版あるいは鋼桁の材料による内部減衰エネルギー D は、以下のようにそれぞれの部分のひずみエネルギー V に比例した形で表されることが指摘されている⁷⁾。

$$D = 2\pi\eta V \quad (22)$$

ここで、 η はロスファクターであり、また、コンクリート床版あるいは鋼桁のひずみエネルギー V は、例えば固有値解析を実施した際の振動モードに基づいて求めることができる。さらに、粘性減衰係数 C を有する系の1サイクルの間の減衰エネルギー V_D は式(20)によって与えられ、これを式(22)と等値すれば、以下の式により材料の内部減衰をモデル化したダッシュポットの粘性減衰係数 C の値が決定される。

$$C = \frac{2\eta V}{\omega a^2} \quad (23)$$

ここで、 ω は対象としている振動次数の固有円振動数であり、 a はそのときの着目ダッシュポット位置の対応する振動振幅で、この値も上述の振動モードから決定することができる。

一方、可動支承部の摩擦力あるいはずれ止め部の非線形挙動および摩擦力に起因する構造減衰をモデル化したダッシュポットの粘性減衰係数の決定方法を示す。摩擦力による1サイクルの消費エネルギー V_f は、

$$V_f = 4Fa \quad (24)$$

と表される¹³⁾。ここで、 F 、 a はそれぞれ着目位置の摩擦力および振動振幅である。これを式(20)と等値すれば、その位置の粘性減衰係数 C は、

$$C = \frac{4F}{\pi\omega a} \quad (25)$$

と求められる。したがって、着目位置の摩擦力および振動振幅が与えられれば、対応する粘性減衰係数 C の値が定まる。

以上の考え方に基づいて、各減衰要因に対応する粘性減衰係数を具体的に決定するためには、振動振幅などの値を求めなければならないが、ここでは1次振動モードのみについて検討する。図-1に示す解析モデルのスパン中央に大型車重量の1/2程度の集中荷重98kNが静的に作用した場合の可動支承部の水平移動量およびずれ止め部の相対ずれ変位量を算出した。その結果、可動支承部の水平移動量が1.83mm、支点付近で得られるずれ止めの最大相対ずれ変位量は $1.23 \times 10^{-2} \text{ mm}$ となった。この場合、桁橋のたわみは1次振動モードに比較的近似していると考えられる。また、この場合の可動支承部の摩擦力は支点反力(死荷重+集中荷重)に支承の摩擦係数(0.05)¹⁴⁾を乗じて求められ、ずれ止

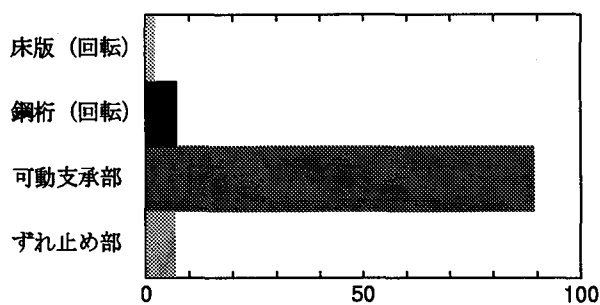


図-14 各減衰要因の減衰寄与率

め部の摩擦力はコンクリート床版分の死荷重に鋼板とコンクリートの摩擦係数 (0.65) ¹⁵⁾ を乗じて算定した。

一方、コンクリート床版および鋼桁の内部減衰はそれぞれ回転ダッシュポットによる減衰作用のみを考慮し、そのロスファクターは既往の研究^{7),16)}に基づいていずれも 0.01 と仮定して、コンクリート床版および鋼桁の回転ダッシュポットの粘性減衰係数を決定した。ただし、コンクリート床版および鋼桁のひずみエネルギーの算定および各回転ダッシュポット位置の振動振幅は、非減衰時の固有値解析によって得られる 1 次振動モードを用いた。

以上のようにして求められた粘性減衰係数を持つ各減衰要因をすべて考慮したときの減衰比を 100 とし、それぞれの減衰要因が単独に作用したときの減衰比の割合を図-14 に示す。これより、1 次振動モードでは、可動支承部の減衰作用が桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響が支配的であることがわかる。

5. おわりに

本研究では、コンクリート床版と鋼桁からなる桁橋を対象として、可動支承部の摩擦力、ずれ止め部の非線形挙動およびコンクリート床版と鋼桁との摩擦力によるエネルギーロス、さらに、コンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰が桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響を容易に検討できる剛体ばねモデル解析手法を提示した。そして、この解析モデルを用いた複素固有値解析を実施して、可動支承部の摩擦力、ずれ止め部の非線形挙動およびコンクリート床版と鋼桁との摩擦力によるエネルギーロス、あるいはコンクリート床版および鋼桁の材料内部減衰のそれぞれが桁橋の構造減衰特性に及ぼす影響を検討した。

その結果、それぞれの減衰要因が桁橋の構造減衰特性に及ぼす定性的な影響を把握することができた。また、それぞれの減衰要因が組み合わさって作用した場合に、桁橋の 1 次振動モードの構造減衰特性の大きさと各減衰要因の寄与率を概算し、可動支承部の減衰作用が支配的であることを示した。

参考文献

- 1) 伊藤学, 片山恒雄: 橋梁構造の振動減衰, 土木学会論文集, 第 117 号, pp.12-22, 1965.5.
- 2) 加藤雅史, 島田静男: 橋梁実測振動特性の統計解析, 土木学会論文報告集, 第 311 号, pp.49-58, 1981.7.
- 3) 山口宏樹, 伊藤学, 坂本邦宏, R. アディカリ: 斜張橋の振動減衰に関するデータベース構築と性状分析, 鋼構造年次論文報告集, 第 1 巻, pp.359-364, 1993.7.
- 4) Kawashima, K. and Unjou, S.: Damping characteristics of cable-stayed bridges associated with energy dissipation at movable supports, *Proceedings of JSCE*, No.404/I-11, pp.145-152, 1989.4.
- 5) 川島一彦, 運上茂樹, 角本周: 耐震設計に用いる斜張橋の減衰定数の推定法, 橋梁と基礎, pp.35-40, 1990.5.
- 6) 米田昌弘: 橋梁の可動支承部における摩擦力に起因した構造減衰特性に関する 2, 3 の考察, 土木学会論文集, No.492/VI-23, pp.137-145, 1994.6.
- 7) 山口宏樹, 高野晴夫, 小笠原政文, 下里哲弘, 加藤真志, 加藤久人: 斜張橋振動減衰のエネルギー評価法と鶴見つばさ橋への適用, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.217-227, 1996.7.
- 8) 角本周, 梶川康男, 岡村隆敏: 吊床版橋の振動使用性照査における減衰特性の影響, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集第 1 部 (B), I-B229, pp.458-459, 1997.9.
- 9) Kawai, T.: Some consideration on the finite element method, *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol.16, pp.81-120, 1980.
- 10) 中島章典, 阿部英彦, 倉西茂: 合成桁橋のずれ止め剛度の変化およびその範囲が固有振動数に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.957-964, 1991.3.
- 11) 中島章典, 池川真也, 土橋健治, 阿部英彦: 非合成桁橋スラブ止めの動的水平せん断伝達伝達性状と疲労強度, 鋼構造年次論文報告集, 第 2 巻, 1994.11.
- 12) 山口宏樹: 構造振動・制御, 共立出版, 1996.5.
- 13) 小坪清真: 土木振動学, 森北出版, 1976.1.
- 14) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 丸善, 1990.2.
- 15) 園田恵一郎, 鬼頭宏明, 浜本雄司: 鋼板・コンクリート合成板における鋼板の付着特性に関する実験的研究, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, 第 I 部, CS5-3, pp.86-87, 1992.9.
- 16) 角本周, 前田研一, 梶川康男, 黒野雅利: 近接固有振動数を有する吊床版歩道橋の振動使用性に関する検討, 橋梁交通振動に関するコロキウム論文集, PART B, pp.207-214, 1995.11.

(1997 年 9 月 26 日 受付)