

石川島播磨重工 正員 樋口 徹 京都大学工学部 正員 白石成人
京都大学工学部 正員 古田 均

1. まえがき 過去の実験的・理論的研究から、継手部・支承部のすべりなどといった橋梁構造物の減衰要因個々の特性は、かなり強い非線形性を有していると考えられる。ところが通常の橋梁の減衰特性評価は、種々の要因に基づく減衰効果を全て粘性減衰に換算した形で行われている。本研究は橋梁の減衰特性をより正確に把握するために、より現実にかちい精密な振動モデル式を考え、その評価手法について検討を加えたものである。まず、基礎となる振動方程式において、各減衰要因によるエネルギー散逸効果と同一の時間特性をもって系に仕事をする等価な減衰力を各要因別に定義する。このモデル式による減衰特性の評価法として、システム位相特性に着目したパターン認識的な方法と、直接パラメータを推定する方法について検討した。

2. 基礎振動方程式の誘導 各減衰要因別に等価な減衰力を定義することにより、系の減衰特性のモデル化を行う。ただし、ここでは簡単のためにモード間の連成等は考慮しない。一般に、s次振動モードに関する等価1自由度系における減衰要因iの換算減衰力 F_{si} は次式で与えられる。

$$-\int_t^{t+\Delta t} F_{si}(t) d\psi_s = \Delta W_{si}(t \sim t+\Delta t) \quad (1)$$

ここで、 ψ_s : 基準座標、 $F_{si}(t)$: s次モードでの減衰要因iに関する換算減衰力、 $W(t \sim t+\Delta t)$: s次モードでの時刻tからt+ Δt における減衰要因iによるエネルギー散逸量。

実橋の減衰要因は、地盤に散逸するエネルギー、空力減衰等を除けば、大部分が部材接触面の相対変位による摩擦として特徴づけられる。このような換算減衰力は以下のように与えることが出来る。

$$-F_{ss}(t) \dot{\psi}_s \equiv \mu P_i(t) \int_{SA} |\dot{L}_{si}(x, t)| dx \quad (2)$$

ここで、 μ : 摩擦係数、 $P_i(t)$: 接触圧力、 x : 局所座標、 SA : すべり領域、 L : 相対変位。つぎに支承変位による減衰効果を単純ばりについて検討する。基準座標 ψ をスパン中央点の初期つりあい状態からの鉛直変位とし、振動モード形状を正弦曲線で近似する。このとき、振動中の水平変位を $L(t)$ 、支点反力を $R(t)$ とすると、換算減衰力 $F_{ss}(t)$ は

$$-F_{ss}(t) = \mu_{ss} R_0 \alpha \beta \{ S_1 + (S_1 S_3 - S_2) \psi - S_2 S_3 \psi^2 \} \quad (3)$$

ただし、

$$S_1 = \frac{\pi}{l} (h - \frac{\pi}{2} \phi_0), \quad S_2 = \frac{\pi^2}{2 l^2}, \quad S_3 = \frac{EI R^3}{R_0 l^3}, \quad \alpha = \begin{cases} 1 & (S_1 - S_2 \psi > 0) \\ -1 & (S_1 - S_2 \psi < 0) \end{cases}, \quad \beta = \begin{cases} 1 & (\dot{\psi} > 0) \\ -1 & (\dot{\psi} < 0) \end{cases}$$

R_0 : 初期支点反力、 l : スパン長、 h : 桁高、 ϕ_0 : スパン中央初期変位、 μ_{ss} : 支承部摩擦係数

以上の結果を基に得られた共振時の運動方程式を以下に示す。

$$m_{eq} \ddot{\psi}_s + A_1 \dot{\psi}_s + \beta [A_2 \dot{\psi}_s^2 + A_3 \dot{\psi}_s^2 + A_4 \alpha \{ S_1 + S_2' \psi_s + S_3' \psi_s^2 \} + A_5 (1 + S_3 \psi_s) + A_6] + K \psi_s = P(t) \quad (4)$$

ただし、 $A_1 \sim A_6$ は定数で、 A_1 は粘性減衰力項、 A_2 は空気力項、 A_3 は継手部の摩擦に関する項、 A_4 は支承水平変位摩擦に関する項、 A_5 は支承回転変位摩擦に関する項、 A_6 は A_6 に関するもので接触圧力が一定の場合の項。

3. 位相特性に着目した減衰評価尺度 減衰要因を大きく3つのものに分類する。すなわち、粘性減衰と振動の増加に伴い小さくなるもの(低次減衰力)、振動の増加に伴い大きくなるもの(高次の減衰力と呼ぶ)

の3種類を考える。図1、2はシステム全体の減衰値を一定に保ち、高次減衰力と粘性減衰力の比率を、低次減衰力と粘性減衰力の比率を変化させたときの位相特性の変化を示している。これらの図から明らかなように、粘性減衰力のみが働いている場合、入力と出力は1/4周期の一定の位相差が生じているのに対し、低次および高次の減衰力が働いている場合には位相に変化が生じる。このことは、粘性減衰力が入力とは逆の位相を有した正弦波となっているのに対し、高次減衰力、低次減衰力は入力とは全く異なった時間特性をもって系に作用していることから説明できる。このように卓越する減衰力の特性により、系の位相特性が変化することから、位相特性に注目して新たな減衰評価尺度が得られる可能性があると思われる。ただし、ここで系の位相特性とは、式(4)を対象とする場合、変位、速度、加速度、時刻または入力を軸とする4次元空間における解の挙動を意味している。これらの諸量を組み合わせて減衰特性を最もよく表すものとして、図3に示す（入力）と（慣性力+復元力）からなる表現方法を採用した。これは、減衰力として粘性減衰力のみが働いている系の共振振動時においては、粘性減衰力は入力に対し全く逆の位相を有した正弦波となることから、図3のように横軸は常に0となり、一周期を通じ常に慣性力と復元力がつりあい状態を保ち、粘性減衰力のみが正弦波外力に抵抗しているという事実に基づいている。図3、4にそれぞれ低次減衰力および高次減衰力が卓越する場合

を示す。図3では直線的な変化が見られるのに対し、図4では曲率が生じている。これは、高次減衰力の大きさが変位の2乗に比例していることによると考えられ、これらの図が両者の減衰特性を特徴的に表現していることがわかる。

4. あとがき

本研究においては、実橋の減衰特性をより正確に評価することを目的として、各減衰要因の影響をより現実的な形で振動方程式に導入することを試みた。新たに提案した減衰特性評価図は、シミュレーション結果に対しては減衰特性の違いを明確に表すことがわかった。

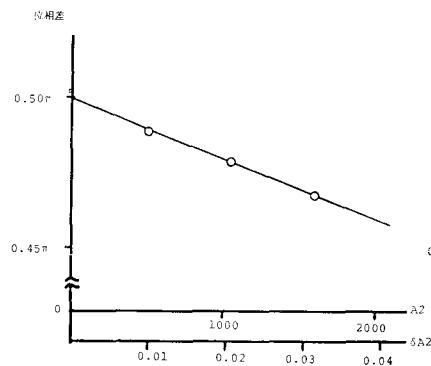


図1 位相特性の変化(1)

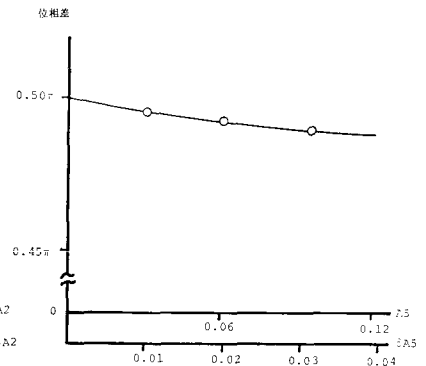


図2 位相特性の変化(2)

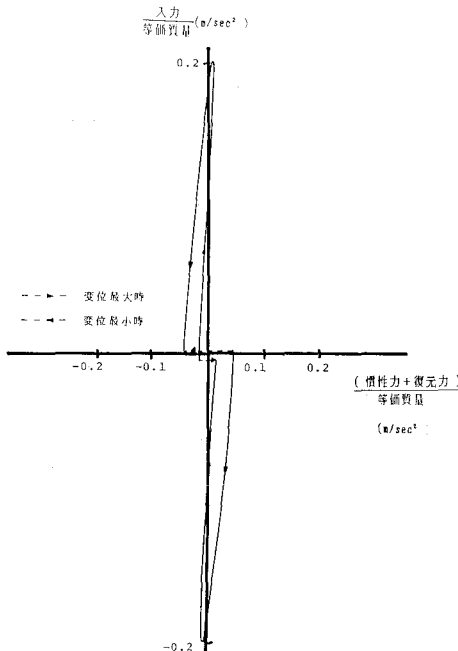


図3 低次減衰力が卓越した場合の位相図

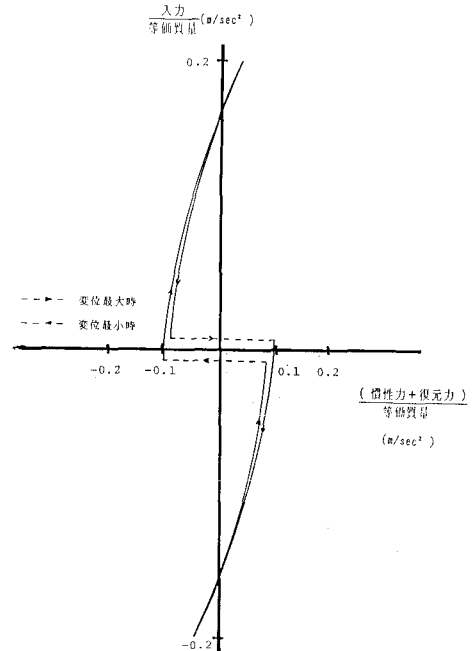


図4 高次減衰力が卓越した場合の位相図