

大阪大学工学部 正会員 前田幸雄

川田工業(株) 正会員 前田研一

川田工業(株) 正会員 西土隆幸

1. まえがき F. Leonhardt¹⁾は、斜索橋が特有のシステムダンピングによって主桁の鉛直たわみ振動に対する高い動的安定性を有すること、種々の実橋および模型実験の結果を例として報告している。(かくながら、その要因については未だ推測の域を出ないものであると思われる。このような観点から、著者らは前回²⁾に、システムダンピングの支配的な要因を新たに定義し、その妥当性は検証するとともに、走行荷重による振動における効果についての報告を行っている^{3), 3)}。本文は、前回に定義した要因の基礎である部分構造の内部共振現象をさらに追究し、システムダンピングの要因をより明確に改めて定義した後、この要因を応答解析において評価するための構造対数減衰率の算定法、さらには、これらの妥当性の検討について述べるものである。

2. システムダンピングの要因の再定義 部分構造としての主桁とケーブルの固有円振動数が近接する場合、いわゆる内部共振が起こり、全体構造としては、各々の相似な振動成分が異なる比率で連成し、固有円振動数の近接した、2種の固有振動モードを生じることが知られている。著者らは、前にこれらの2種のモードに対応する自由振動項のbeating現象を斜索橋の支配的な要因として定義したが、その際に妥当性の検証のために適用した走行荷重による振動の場合と異なり、beating現象のみでは説明できない場合もあることは明らかである。すなわち、例えば、たわみ風琴振動の場合、beating現象が直接にたわみ風琴振動の発達を抑制する効果はなく、エネルギーを逸散なくに見かけの振幅が低減されることによって空力減衰項による負減衰が大きくなり、定常状態での最大振幅は内部共振はほとんど起こさないものと比較して逆に幾分か大きくなると考えられるからである。

かくながら、部分構造の内部共振現象をさらに追究すれば、図-1に示すような、ケーブル一種の減衰吸振器(damping absorber)としての役割を果すことは、次のようにして確かめられる。すなわち、説明の便宜上、図-2に示す簡単なケーブル構造を対象とすれば、自由減衰振動の運動方程式は、

$$\begin{bmatrix} m_1 + \frac{1}{2}m_2 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 & 0 \\ 0 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

なる式で与えられる。(したがって、図-3、4に示す両者のモデルをえ、 $x_1 = X_1 e^{i\omega t}$, $x_2 = X_2 e^{i\omega t}$ とて導かれる振動数方程式を解けば、2種の相似連成振動モードに対応する複素固有値の近似値が次式のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= i \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \omega_0 \pm \sqrt{\omega_0^2 \left\{ 1 - \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)^2 \right\} + \alpha} \\ \omega_2 &= i \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right) \omega_0 \pm \sqrt{\omega_0^2 \left\{ 1 - \left(\frac{h_1 + h_2}{2} \right)^2 \right\} - \alpha} \end{aligned} \right\} \quad \alpha = \{ k_{11} + m_1 \omega_0^2 \} (k_{22} / m_2) \quad (2)$$

ここに、 ω_0 は両者のモデルについて等しいとした固有円振動数である。

ゆえに、ここに改めて、内部共振に起因する自由振動項のbeating現象のみならず、ケーブルの減衰吸振器としての作用を併せて、斜索橋のシステムダンピングの支配的な要因として定義する。

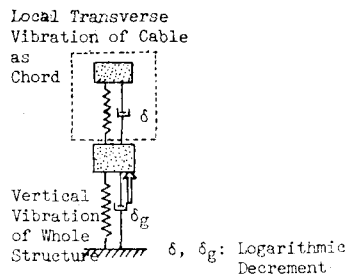


図-1 減衰吸振器 (damping absorber)

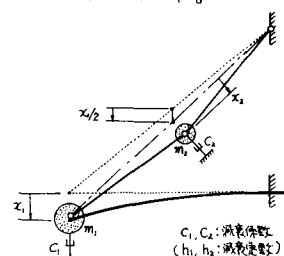


図-2 ケーブル構造

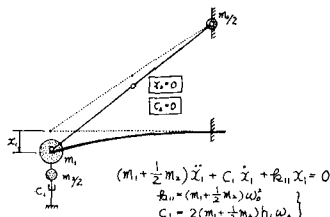


図-3 ケーブルの振動型を無視したモデル

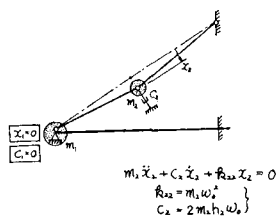


図-4 ケーブルの振動型をのみモデル

3. 内部共振を考慮した構造対数減衰率の算定法

改めて定義した要因に応答解析において評価するためには、内部共振による2種の相似連成振動モードに対応する構造対数減衰率を算定する必要がある。ケーブルの横振動を無視したモデルの構造対数減衰率 δ_g とケーブルの横振動のみのモデルの δ_c との平均値をそのまま各々に適用することも考えられるが、内部共振の度合いを反映できない。そこで、ここでは、2種の相似連成振動モードを $\{\Phi_i\}$, $\{\Phi_j\}$ で表わし、近接する固有円振動数 ω_i , ω_j として、次式で算定することを提案する。

$$\left. \begin{aligned} 2h_k \omega_k &= 2(\delta_g/2\pi)\omega_k\{\Phi_{a,g}\}^T\{\Phi_{a,g}\}/\{\Phi_g\}^T\{\Phi_g\} \\ &\quad + 2(\delta_c/2\pi)\omega_c\{\Phi_{a,c}\}^T\{\Phi_{a,c}\}/\{\Phi_c\}^T\{\Phi_c\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\delta_k = 2\pi h_k \quad (k=i, j)$$

ここに、 $\{\Phi_{a,c}\}$ はケーブルの横振動成分のみを、 $\{\Phi_{a,g}\}$ はその成分を除いたものを表わしている。さらに、 $\{\Phi_g\}$ はケーブルの横振動を無視したモデルのモードを表わし、 ω_g は固有円振動数である。また、 $\{\Phi_c\}$ は、固有円振動数が ω_c であるケーブルの横振動のみのモデルのモードを表わしている。なお、構造対数減衰率はあくまでも仮定値であることを考えれば、2種の相似連成振動モードに従来の一般的な値の δ_g を単に適用することもある一つの考え方であると思われる。

4. 定義した要因と構造対数減衰率の算定法の妥当性

定義した要因の妥当性を検討するために実施した実験試験例(図-5)の結果の一部を図-6、表-1に示す。ただし、図-6は前回にも示したものである。さらに、前回に同様に示した図-7の固有振動モード、円振動数の計算値を用いて、各次のモードに対応する構造対数減衰率を算定した結果を表-2に示す。ここに、 δ_g , δ_c の仮定値は表-1のグラウト前での値を参照し、0.03, 0.04とした。表-2からは、グラウト後の2種の相似連成振動モードの算定値の和が、 $\delta_g + \delta_c$ に一致することがわかる。

5. あとがき 以上のことから、本文で改めて定義した要因が斜張橋のシステムダンピングの支配的な要因であることが再確認でき、この要因に応答解析において評価するための構造対数減衰率の算定法が妥当であることを検証できたといえる。なお、定義した要因によるシステムダンピングがマルチケーブル型斜張橋のたわみ風琴振動に及ぼす効果については、別に報告⁵⁾している。最後に、常に適切な御助言を頂いた、棘野伊藤 学教授、嵯峨山山口宏樹講師および細田保田雅彦氏、成井 信氏に対し、心より御礼を申し上げます。

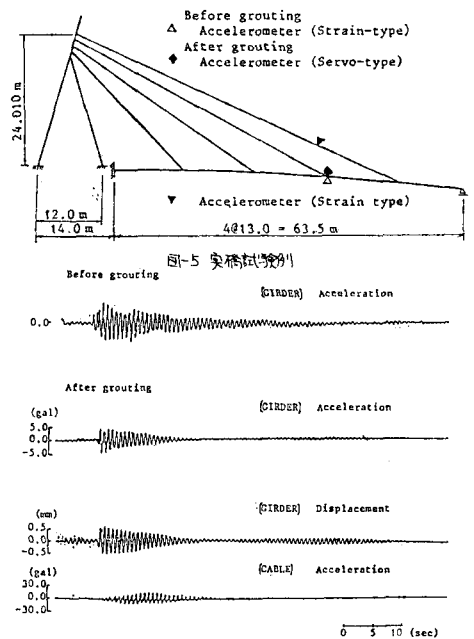


図-5 実験試験例

表-1 対数減衰率の実測値

測定位置	測定方法	対数減衰率
落下試験	ケーブル上	0.027
	ケーブル下	0.065
振動試験(ケーブル上)	ケーブル上	0.043
	ケーブル下	0.092

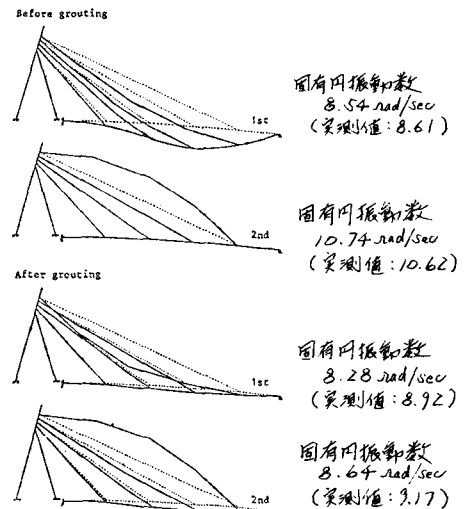


図-6 グラウト前後の落下試験における記録波形

表-2 構造対数減衰率の算定値

次数	モード	構造対数減衰率
ケーブル上	1st	0.030
	2nd	0.040
ケーブル下	1st	0.027
	2nd	0.023

図-7 固有振動モード、円振動数の計算値

<参考文献> 1) Leonhardt, F. et al.: Cable-Stayed Bridges, IABSE SURVEYS, 5-13/80, (1980). 2) 前田・前田・越後: 斜張橋のシステムダンピングの要因の定義と実験試験, 第37回土木学会年次学術講演会講演要旨集, 1982. 3) 前田・前田・藤本: マルチケーブル型斜張橋におけるシステムダンピング効果, 土木学会第37回年次学術講演会講演要旨集, 1982. 4) 野田・越後・伊藤: わすき橋(PC斜張橋)の動特性試験について, 土木学会第37回年次学術講演会講演要旨集, 1982. 5) 前田・前田・米田: マルチケーブル型斜張橋のたわみ風琴振動におけるシステムダンピング効果, 土木学会第38回年次学術講演会講演要旨集, 1983.