

多々羅大橋でのケーブル連成振動の減衰効果に関する解析的検討

埼玉大学大学院 学生員 西村隆義
 埼玉大学大学院 学生員 堤 和彦
 本四公団 正会員 山口和範

埼玉大学工学部 正会員 山口宏樹
 埼玉大学工学部 正会員 松本泰尚

1. はじめに

多々羅大橋は世界最大の斜張橋であり、そのケーブルも長尺化して、固有振動数は極めて低い。これにより、斜張橋の主要振動モードにおいて連成するケーブルの本数が増加し、全体に占めるケーブル重量の割合も大きいことから、ケーブル連成振動が橋全体に与える影響は大きくなる。このことを背景として供用以前に行われた実橋振動実験¹⁾においても、多くの振動モードにおいてケーブル連成振動の発生が認められ、それと同時に減衰が低下していることが観察された。これは、減衰が極めて小さい長尺ケーブルが連成し、全体系の減衰を引き下げたと考えられる。そこで本研究では、ケーブルの低減衰性を陽に導入した減衰の影響解析を試みた。

2. 多々羅大橋の振動特性とケーブルの連成

図1に、実橋振動実験で行われた8つの主要振動モード（鉛直、水平は対称1次、逆対称1次、対称2次、ねじれは対称1次、逆対称1次）について固有振動数と対数減衰率の関係をを示す¹⁾。ケーブルの固有振動数は0.25Hz（図1の縦線）以上であり、水平対称1次モード以外では、多くのケーブルに連成振動が発生した。図2には固有値解析²⁾で求められた鉛直逆対称1次モードにおける、ケーブルの連成状況を示す。

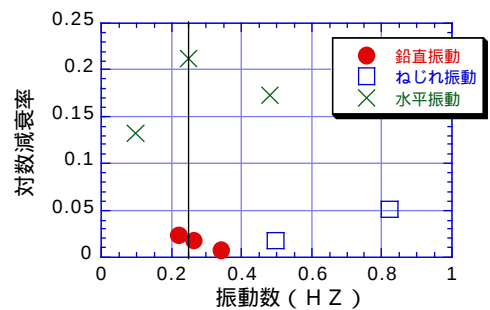


図1 多々羅大橋の振動特性

図1より明らかなように、各振動モードで異なる減衰値が計測されており、固有振動数との際だった関係は見られない。なお、水平モードの減衰が大きいのは、フェアリング・ボルト接合部における摩擦による影響と推定されている¹⁾。

3. 部分構造合成法に基づいた斜張橋の減衰解析法

ケーブルの連成振動が減衰に与える影響に着目するため、部分構造合成法に基づき、固有値解析²⁾から得られたn次のモードベクトル U_n を桁・塔とケーブルの2つの部分構造に分解する。

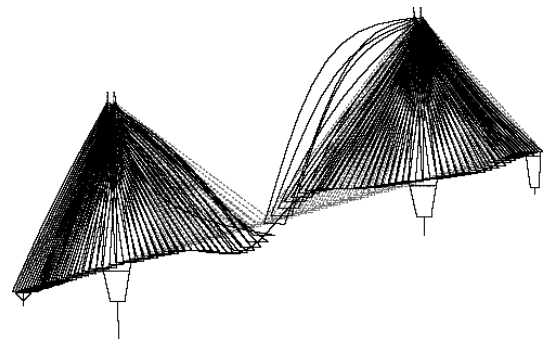


図2 モード図（鉛直逆対称1次モード）

$$U_n = \begin{bmatrix} f_n^G \\ 0 \end{bmatrix} q_n^G + \begin{bmatrix} 0 \\ f_n^C \end{bmatrix} q_n^C = \begin{bmatrix} \ddot{U}_n^G \\ 0 \end{bmatrix} q_n^G + \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{U}_n^C \end{bmatrix} q_n^C \quad (1)$$

ここで、添え字 G, C は桁・塔、ケーブルを意味し、 q_n はモード変位である。これを斜張橋の運動方程式に代入してモード解析法を適用すれば、n 次モードに対する2自由度系としての減衰自由振動方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{m}_n^{GG} & m_n^{GC} \\ \ddot{m}_n^{CG} & m_n^{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_n^G \\ \ddot{q}_n^C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{c}_n^{GG} & 0 \\ 0 & \ddot{c}_n^{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_n^G \\ \dot{q}_n^C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{k}_n^{GG} & k_n^{GC} \\ \ddot{k}_n^{CG} & k_n^{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_n^G \\ q_n^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 m_n , k_n は、全体系質量マトリクス及び剛性マトリクスと(1)で定義したn次のモードマトリクスから得られたn次モード質量及びn次モード剛性であり、ともに桁・塔及びケーブルの部分構造の連成項を意味する非対角項が存在する。一方、減衰マトリクスについては桁・塔及びケーブルに対応する対角項のみを考え、連成項は無視できるものと仮定している。各部分構造のモード減衰係数 c_n は、各部分構造のモード減衰比 γ_n を用いて

キーワード：斜張橋，減衰，ケーブル連成振動，部分構造合成法

連絡先：〒338-8570 浦和市下大久保 255 TEL：048-858-3552 FAX：048-858-7374

次式により評価した．

$$c_n^{GG} = 2m_n^{GG} \dot{x}_n^G W_n \quad c_n^{CC} = 2m_n^{CC} \dot{x}_n^C W_n \quad (3)$$

ここで桁・塔の減衰比は，桁・塔単体の振動実験が不可能なため，ケーブル連成振動の影響が小さい鉛直，ねじれ，水平の全体系各対称一次モードの減衰実測値を用い，その減衰要因が桁・塔の部分構造の減衰であると仮定して求めた．一方，ケーブルの減衰比は，振動実験値³⁾から対数減衰率 $c=0.001, 0.003, 0.005$ の3通りと仮定した．なお，これとは別に，ケーブルの減衰比を桁・塔と同じ対数減衰率に仮定し，減衰が均一な全体系の減衰特性との比較を行っている．

式(2)について複素固有値解析を行えば，各部分構造の減衰性の違いが反映された全体モード減衰比が評価される．なお，固有値は2組求められるが各部分構造モード変位間の位相差が0に近いものが物理的に意味を有すると考え，それを抽出して考察を加えた．

4．ケーブル連成振動が橋全体の減衰に及ぼす影響

解析結果を実験値と共に図3～5に示す．上述したように，桁・塔の減衰比についてはそれぞれの対称1次モードから同定しているため，鉛直，ねじれ，水平各振動についての対称1次モード減衰比は実験値と解析値で一致する．また，ケーブル部分構造の減衰比を桁・塔部分構造と同じに設定した場合，どのケースも全体系モード減衰比はその値となって減衰のモード依存性は認められない．

図3の鉛直振動については，対称2次モードで解析値と実験値にやや差があるものの，モード次数が上がるにつれ，対数減衰率が低下する結果が得られている．ケーブル単体の減衰の違いに着目すると，ケーブルの連成が少ない対称1次モードでは全体系減衰にほとんど変化はないが，連成性の強い対称2次モードでは，ケーブル減衰が低下するにつれ，全体系減衰も低下している．以上のことから，ケーブル自体の減衰が小さいほど，また連成性が強いほど，斜張橋の全体系減衰を低下させてしまうと言える．

図4のねじれ振動については，逆対称1次モードで解析値は実験値よりやや小さいものの，対称1次モードよりも減衰が大きくなり，全体系減衰の傾向を示すことができたと考えられる．

図5の水平振動については，桁・塔の減衰比を仮定した対称1次モードでは実験値と解析値に差がないが，他のモードでは差は非常に大きく，振動次数に対する減衰変化の傾向も示せていない．これは，ケーブルの連成よりも前述したフェアリングの摩擦の影響に拠るところが大きいためと考えられる．

5．結論

本研究では多々羅大橋につき，部分構造合成法に基づいてケーブルの減衰を別途考慮する減衰解析を行った．その結果，鉛直振動とねじれ振動についてはケーブルの連成振動が大きいほど全体系の減衰を低下させる傾向を示すことができたが，水平振動については他の要因の影響が大きく，これをどう評価するかが課題として残った．

【参考文献】1)真鍋ら：多々羅大橋の実橋振動実験，橋梁と基礎，pp27-30，1999.5 2)西村：多々羅大橋のケーブル連成振動と構造減衰に関する研究，埼玉大学卒業論文，1999.3 3)藤原ら：多々羅大橋ケーブル制振対策，橋梁と基礎，pp16-19，1999.5

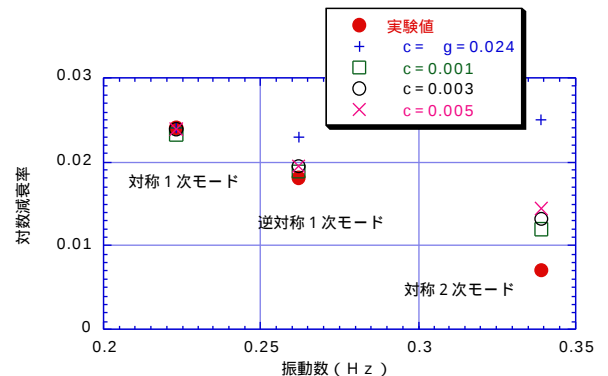


図3 鉛直モードでの固有振動数と対数減衰率の関係

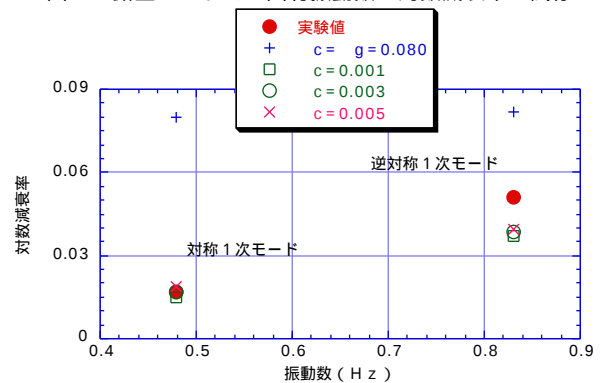


図4 ねじれモードでの固有振動数と対数減衰率の関係

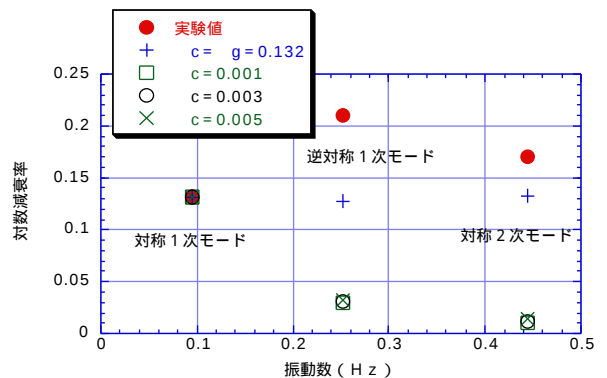


図5 水平モードでの固有振動数と対数減衰率の関係