

日本鋼管(株) 正会員 藤澤 伸光
同上 正会員 津村 直宜

まえがき 橋梁の振動試験法の一つに常時微動を利用する方法がある。常時微動法は簡便という利点を有する半面、作用外力がランダムかつ未知なため、解析結果がデータの統計的変動の影響を受け易いことが欠点であり、固有振動(振動数, モード)の同定が容易でない場合も少なくない。本稿は, 筆者らが扇島連絡橋(3区間連続2箱桁橋, 50+84+50 m)の常時微動のデータの解析にあたって遭遇したこの種の問題とその処理について報告し, 今後の同種の試験の参考に供するものである。

計測の概要 本橋は2箱桁橋でねじれ振動の発生が予測されたので, ねじれおよびたわみの3次程度までの振動を求めることを目標に, 図1のように測点を配置した。但し, 計測器の制限から表1のように3ケースに分割して全体の振動を計測することとし, 同一の計測器配置で4回ずつ, 計12回の計測を行なった。なお, 計測は橋梁上を一般車輛

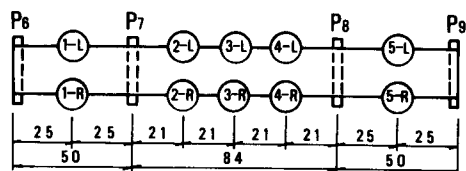


図1 測点の配置

が走行する状態で行なった。表1 測定ケースと測点

	1-L	1-R	2-L	2-R	3-L	3-R	4-L	4-R	5-L	5-R
ケース1	-	-	○	○	○	○	○	○	-	-
ケース2	○	○	-	-	○	○	-	-	○	○
ケース3	○	○	○	○	-	-	-	-	○	○

○が測定した点を示す。

パワー・スペクトルの平均化処理 図2に測定されたパワー・スペクトルの例を示す。図には最終的に決定された固有振動数も併記した。図からも明らかなように, 常時微動から得られたスペクトルでは固有振動に対応するピークが常に自明とは限らず, 一般には, 多数のスペクトルを比較しながら工学的判断を加味して固有振動数を決定することになる。図2の例では, 固有振動でないにも拘わらず4 Hzに強いピークが生じていること, 高次振動に対応するピークが明瞭でなく特にねじれ2次のピークが全く現れていないこと等が具体的に固有振動数を定める際の障害となろう。周知の通り, このような現象はスペクトルの統計的変動として理解されるものである。本測定では, 測定時にはデータ収録だけを行ない解析は事後としたため, 統計的不安定性を改善するためにデータ量を増すことは不可能であった。そこで, ここでは同時に測定された異なった測点のスペクトルの平均をとることを考えた。モード解析法に従い, 若干の仮定を認めれば, 任意の測点のパワー・スペクトル $S(x, f)$ は次式で表わされる。

$$S(x, f) = \sum_i \phi_i^2(x) \cdot S_{qi}(f) + S_n(f)$$

ここに ϕ_i はモード函数, S_{qi} , S_n は基準座標 Q_i および雑音 $n(t)$ のパワー・スペクトルである。上式より特定のモードの寄与が卓越するスペクトルのピーク付近では, 雑音成分を除けば場所 x によらずスペクトルの形状は相似となる。よって, 異なった測点のスペクトルであっても, それらを平均することによって, 求めるべきピークを保存しながら統計的不安定性を改善することが可能と考えられる。

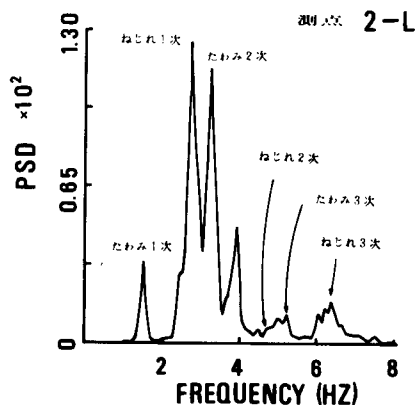


図2 パワー・スペクトルの例

結果は図3に示した通りで、非常に安定した滑らかなスペクトルが得られた。特に後述のねじれとたわみの振動に分離した後求めたスペクトルには、1～3次のピークが極めて明瞭に現れている。一測定例ではあるが、このことは図2に見られる不安定性の原因が主として雑音或いは雑音と見なせるような特性を持った振動、具体的には各測点間で互いに無相関な振動にあることを意味するものと考えられよう。

たわみモードとねじれモードの干渉 上述のようにして固有振動数を決定した後、パワー・スペクトルのピークの大きさとクロス・スペクトルの位相を用いる一般的な方法でモード形を決定した。ただし、本測定では、ねじれとたわみの両振動を同時に捉えるために橋梁の両側に測器を配置しているので、まず図1に示した全測点に関して、言わば立体的なモード形を求めた後に、たわみ振動では両側の測点の和から、ねじれでは差から各々のモード形を計算した。結果の一例として、ねじれの1次および2次モードを図5に示す。図から明らかなように、いずれも対称な3径間連続桁のモードとして予想される形とは著しく異なったものとなっている。結論を先に示せば、このようなモード形が算定された理由は、固有振動数の近接したたわみ振動とねじれ振動の干渉であった。一般に固有振動に対応するピーク付近では、構造物上の任意の2点間の位相差は比較的安定して0或いは π 付近の値をとることが多いが、ねじれ振動とたわみ振動が同時に発生している場合は、図4に示したように、桁の両側の測点間の位相差 α は0でも π でもない中間的な値をとることになる。しかも、ねじれ振動とたわみ振動の独立性から α はケースごとにランダムに変化するので、クロス・スペクトルの位相が0と π のどちらに近いことによってモード縦距の符号を決定するという通常の方法では正確なモード形が得られないのである。また、今回のように測定を複数回に分割した場合は、各測定ケースに共通する測点での値を基準に全体のモード形を求めることになるが、測定ケースによってたわみ振動とねじれ振動の大きさの比が変わるため、モード形算定における誤差は更に拡大される。異次数モード間の干渉は、同一振動、たとえばたわみ振動どうしても若干は存在するが、たわみとねじれのように互いに独立な振動では偶然に固有振動数が接近する可能性が高いわけであり、ねじれ剛性の小さい2主桁橋等の測定ではこの点に十分注意が必要と言えよう。この問題の解決は容易で、時系列データ或いは複素フーリエ係数の段階で桁の両側の測点のデータに加減算を施してたわみとねじれの振動に分離した後にパワー・スペクトルを求めるようにすればよい。図6はこのようにして求めたモード形で、3径間連続桁のモードとして妥当な結果と言えよう。本測定以後、筆者らはアナログ式の加減算器を用いてこのような振動の分離を行なうようにしており、好結果を得ている。

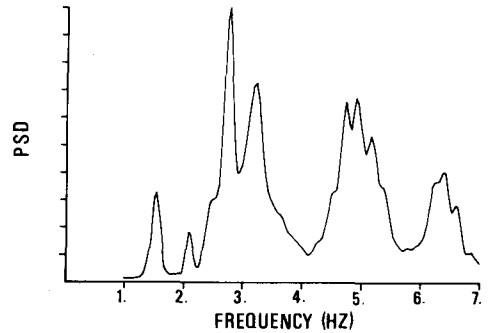


図3(a) 平均化スペクトル（分離前）

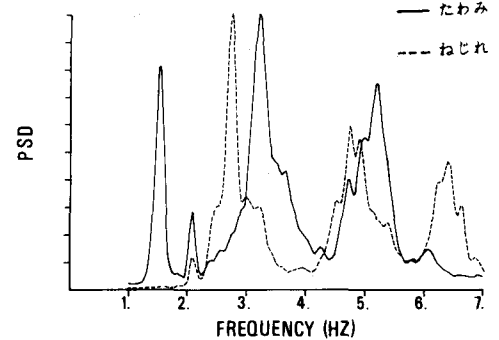


図3(b) 平均化スペクトル（分離後）

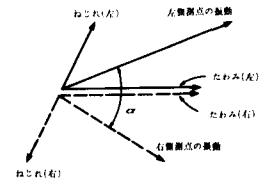


図4 ねじれとたわみの合成

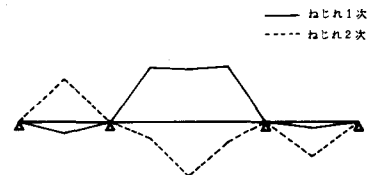


図5 原信号によるモード

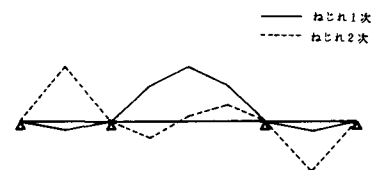


図6 分離した信号によるモード