って環境振動をシミュレートすることが難しくなってくる。いずれにしても、対象物の置かれた環境を十分考慮した環境試験としての振動試験を行なうことがたいせつである。

参 考 文 献

- 1) HARRIS, C. M. and CREDE, C. E.: Shock and Vibration Handbook, 2nd Ed., McGraw-Hill (1976).
- 2) MIL-STD-810 C: Environmental Test Methods,

10 March (1975).

- 3) MIL-STD-202 E: Test Methods for Electronic and Electrical Component Parts, 16 April (1973).
- 4) BECK, C. J., Jr.: Improved Vibration Design and Test Procedure for Aircraft, SAE National Aerospace Engineering and MFG Meeting, Oct. (1974).
- 5) WIGNOT, J. E.: A Novel Triaxial Vibration Test Technique, Proc. Int. Symposium Space Technol Science (1973).

Co-Quad Analyzer による振動試験*

松 原 芳 矩**・菅 原 正 彦**

1. ま え が き

構造物に生ずる変形または応力の大きさは、加振力の大きさが一定であっても、その周波数によって異なってくる。これが振動現象の特徴であるといえよう。

一般に、振動状態は、いくつかの基本的な振動状態を組み合わせたものとして表わされるため、基本的な振動状態がどうなっているのかを明確にすることが振動問題解明の中心課題となる。固有振動数、固有モード、ダンピングの3個の値により、この基本的な振動状態を完全に表現できることから、これらを計測によって求めようとするのが振動試験の大きな目的である。

これらの項目をより正確に求めるため、当工場では数年前から Co-Quad Analyzer を使った振動試験を実施している。

本文は、これまでに得られた試験実績をもとに設定してきた試験方法についての、具体的内容や特徴などを紹介するものである。

2. Gain-Phase, Co-Quad, Vector Plot について

固有振動数、固有モード、ダンピングを求めるときは、単位加振力に対する応答(周波数応答関数 $H(f)$)が必要となる。第1図に示すように、この関数は、本来、らせん状の立体的な曲線と考えられる。これを平面上で表現するため、次の方法が行なわれている。

(1) Gain および Phase

(2) Coincidence (Co) および Quadrature (Quad)

(3) Vector Plot (ナイキスト線図)

ある周波数における周波数応答関数は、2次元のベクトルであり、Gain-Phase と Co-Quad の間には第2図に示すような関係がある。また、この図の表現方法でベクトル先端の軌跡をプロットしたものが Vector Plot であり、周波数はパラメーターとして表わされる。

Coincidence は加振力と同じ位相の成分であり、in-phase component, 実数成分, $\cos$ 成分ともいわれる。Quadrature は加振力と 90° 位相のずれた成分であり、out-of-phase component, 虚数成分, $\sin$ 成分ともいわれる。

Co-Quad Analyzer は Coincidence および Quadrature により周波数応答関数を求めるための解析装置である。従来の解析装置ではベクトルの大きさと位相角が求まり、第1図の(1)の形で結果が得られる。これに対し、Co-Quad Analyzer ではベクトルの成分が求まり、第1図の(2)または(3)の形で結果が得られる。実際の計測例を第3図、第4図、第5図に示す。

2.1 1自由度系の振動状態(第1図参照) ここでは、通常の航空機構造物程度のダンピングを有する1自由度振動系を想定しており、この場合には以下のように述べても実用上問題ないと考えられる。ダンピングが大きい場合には、必ずしも以下のとおりには限らないので注意を要する。

Gain-Phase によって表わした場合には固有振動数において Gain がピークとなり、位相は 90° となる。ダンピングは Gain のピークの形状から求まる。

Co-Quad によって表わした場合には固有振動数において Coincidence は零となり Quadrature で応答が表現される。また、このときに Quadrature はピーク

* 昭和52年12月16日原稿受理 On the Vibration Test Using a Co-Quad Analyzer

** 川崎重工(株)岐阜工場技術部 Yoshinori MATSUBARA and Masahiko SUGAWARA

第1図 各方法による $H(f)$ の表現

第2図 Gain-Phase と Co-Quad の関係

となるが、その形状は Gain-Phase における Gain のピークよりも鋭いものになっており、固有振動数の計測に有利である。ダンピングは固有振動数の前後に現われる Coincidence のピークから求まる。

Vector Plot によって表わした場合には周波数応答が一つの円となって求まる。固有振動数においては Quad 軸 (Y 軸) を通過するとともに、周波数変化に対する周速度変化が最大となる。これは固有振動数付近でベクトルの絶対値が大きくなると同時に、その角度変化も大きくなるためである。このため、固有振動数のおおよその位置は簡単に求まるが、周波数がパラメーターとなっているため、その正確な値は求めやすいとはいえない。

2.2 モードの分離 ある周波数における多自由度の振動状態は、各モードのその周波数における応答ベクトルの和として表現される。また、固有振動数で加振しても他のモードの影響により、単一モードの振動状態とはならない場合が多い。この場合にはモードの

分離が必要となるが、各方法におけるモード分離は次のとおりである。

Gain-Phase においては、ベクトル和がたんなる Gain や Phase の和として表わされないため、得られた計測データから直接モードを分離することはできない。したがって正確に固有モードを求めようとする、得られる応答が固有モードとなるように加振する必要がある。この場合、多点加振という方法も考えられるが、試験装置が複雑かつ高価になるのが難点であろう。

これに対し、Co-Quad, Vector Plot では、得られた計測データからある程度他のモードの影響を取り除くことができるため、比較的簡単な加振方法で正確な固有モードを求めることが可能である。

Co-Quad においては、計測によって得られる Co および Quad は各モードの Co および Quad の線型結合として表わされること、および、固有モードで振動しているとき、Coincidence は零となり、Quadrature の計測結果がそのまま固有モードとなることから、モードの分離は、計測によって得られた結果をもとに連立一次方程式を立て、これを解くという作業になる。

Vector Plot においては、単一モードに対する軌跡が円になること、および、構造物の振動における固有振動数付近の軌跡が単一モードの軌跡に近い円弧とな

第3図 Gain-Phase による計測例

第4図 Co-Quad による計測例

ることから、モードの分離はグラフ上の円弧に最もよく合う円を求める作業になる。これを第5図に示す。

3. 試験方法

これまでわれわれが設定してきた振動試験の手順を第6図に示す。その特徴は、インパクト加振と Co-

Quad Analyzer を採用した点にあり、加振方法は通常行なわれている一点加振である。

3.1 インパクト加振 これは加振力をパルスで与え（たとえば、人間が供試体のあちこちを適当に手でドンドンたたき）、このときの周波数分析結果を平均処理する方法である。実際の計測例を第7図に示

第5図 Vector Plot による方法

- (a) 通常の方法。周波数がわかりにくい
 (b) タイマーにより点線で求める。周波数がわかりやすくなる
 (c) モード分離を実施。振動特性が求まる

第6図 振動試験手順

す。この方法の特徴は以下のとおりである。

- (1) 固有振動数だけが容易に求まる (これまでの例では3人程度で半日もあれば十分)。
- (2) 必要な計測機材は、センサー1個とリアルタイムアナライザー (周波数分析機) である。
- (3) 加振機を使用するときに問題となる加振質量の影響がない。

実際に試験を行なったときの印象からいうと、「ドンとたたけばすぐにわかる」方法である。ただし、特定のモードを強調させないようにするため、いろいろな場所をたたくとか、たたく時間間隔を一定にしないなど、加振力を不規則に与えたり、供試体の固有振動数によってたたき方を変えるなどの注意が必要である。通常の構造物において問題となる周波数は、ほとんどの場合 200 Hz 以下であり、いままでの試験結果からみれば問題ない。

また、さらに試験を簡単にするため、超小型加速度センサーを両面接着テープにより供試体に取り付けることも行なっている。この方法は、加速度センサーの数が少ない場合のモード計測にも適している。

まずこの試験を実施し、固有振動数のある位置をもれなく把握した後にスweep加振や定常加振に移るのが適当である。

3.2 Co-Quad Analyzer の使用 前述のように、振動特性を求めるときには Co-Quad や Vector Plot がモード分離の面で有効であることから、スweep加振、定常加振はこれらの方法によって行なう。

このなかでとくに問題となるのは、前述のごとく、Vector Plot において周波数がわかりにくいことである。

これに対し、われわれは、X-Y プロッターのペンの上げ下げをタイマーによってコントロールし、グラ

第7図 インパクト加振による計測例

フを点線で描かせるようにした (第5図参照)。このようにすると、グラフの周速の変化状態が明確になり、周波数カウンターと対応させることにより、そのときの周波数もわかりやすくなる。なお、データ整理の都合上、1枚の用紙に描かせる周波数の範囲は、せいぜい4~5個の固有振動数が入る程度にとどめたほうがよい。

4. あとがき

構造物の振動特性を求める場合には、以上述べた方法で試験を実施するのが適当と考えている。

実際の振動現象は加振力と振動特性の相互作用であり、通常問題となるのは振動レベルとか振動応力の大きさである。この面から考えると、本文ではあまり強調されなかった Gain-Phase による表現方法は、直感的かつ現実的であり、これが現在もお多用されている理由の一つであろう。しかし、振動特性そのものの

より厳密な究明が要求される場合には以上に述べた手法も有効であろう。この意味で、今後さらに経験を増し、この解析装置を振動現象の解明に役立てるとともに、試験技術と解析技術の相補をさらに押し進め、より手軽で信頼性のある振動試験技術の確立をはかる必要がある。

参考文献

- 1) KENNEDY, C. C. and PANCU, C. D. P.: Use of Vectors in Vibration Measurement and Analysis, Journal of Aerospace Sciences, Vol. 14, No. 11 (1947), pp. 603-625.
- 2) STAHL, C. V. Jr.: Phase Separation Technique for Ground Vibration Testing, Aerospace Eng., Vol. 21, No. 7, July (1962), pp. 56-96.
- 3) KELLER, A. C.: Vector Component Techniques; A Modern Way to Measure Modes, Sound & Vibration (Reprint)

訂正とお詫び

本誌第26巻第294号, pp. 377-384に掲載の論文 奥出宗重氏著「円柱の伴流渦に関する実験的研究 (第2報) カルマン渦列の再配列」中, p. 378の第1図が再校の段階で上下逆向きとなり、そのまま印刷されてしまいました。当方の不注意により不体裁な誤りを生じましたことをお詫び申し上げます。(編集部)