実験モード解析のための加振方法*

(第1報, 不規則連続打撃法の提案)

白井正明^{*1}, 田鍋 実^{*1}

Excitation Techniques for Modal Testing (1st Report, Proposition of Random Impact Method)

Masaaki SHIRAI and Minoru TANABE

When we measure the frequency response functions of a light and small structure by random excitation, the rotatory inertia of the exciters and the force transducers attached to the structure will influence the results of the test. On the other hand, impact testing using a hand-held hammer can avoid the influence caused by fixing the exciters to the structure, but this method doesn't work well on a nonlinear system, and it is also impossible to use in multiple-input excitation. In this paper, a new excitation technique is proposed which uses electrodynamic exciters as impact hammers and randomly generated impulses as driving signals. Comparing the results obtained by the new technique and by the usual method of random excitation shows that, in the case of single-input excitation, the new technique is more reliable. Furthermore, in the case of multiple-input excitation, the correlation between the excitation forces of the new technique is decreased so much, that the accuracy of the measurements must increase.

Key Words: Vibration, Measurement, Modal Analysis, Excitation Techniques, Frequency Response Function

1. 緒 言

実験モード解析では、まず加振実験によって対象物の周波数応答関数を計測し、その後種々の解析作業を行う。したがって、実験モード解析が成功するか否かは、ひとえに加振実験の精度にかかっていると言っても過言ではない。

周波数応答関数計測のための加振方法には、打撃法、広帯域波加振法(いわゆるランダム加振法)、正弦波加振法などがあるが、このうち最も一般的な広帯域波加振法では対象物の特性に合わせて、純不規則波、バースト不規則波、疑似不規則波などの加振波形を使い分けることができるので、適切な波形を採用すれば多くの場合は比較的信頼性の高い結果を得ることができる⁽¹⁾。

しかしながらこの加振法では、対象物にロードセルを介して加振機を固定することが必要であり、このため往々にして次のような不都合が生ずる。

(1) 小形・軽量構造物の場合、ロードセルや加振機を取付けることによって対象物の特性を変化させて

しまう。

(2) 対象物が、超小形、大形、特殊形状、特殊材料、高価などの理由により加振機取付けが困難なことがある。

(3) 無相関多点同時加振⁽²⁾を行うとき、加振信号(純不規則波あるいはバースト不規則波)が無相関であっても加振力間の相関は十分小さくはならない。

このうち、(1)、(2)のような場合には、広帯域波加振法に代えて打撃法を使うことになるが、信頼性・再現性などが低下する可能性が高いことや非線形性の影響を受けやすくなることは避けられない。また、言うまでもなく、多点同時加振法には対応できず、(3)の問題を解決することはできない。

そこで本研究では、新しい加振法として不規則連続打撃法とそのための装置を提案し、この方法が上記の広帯域波加振法の問題点を解決するものであることを実験で確認する。

2. 不規則連続打撃法

緒言で述べたように加振機を対象物に固定する限り、その影響が対象物に及ぶのは防げない。この点では手持ちハンマを用いる打撃法が優れている。

ところで、大形構造物など、周波数帯域が低くデー

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月4日。

^{*1} 正員、日本鋼管(株)(〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1)。

タのサンプリング間隔が長くなる場合、すなわちデータ取込み時の時間窓が長くなる場合には、その時間窓内で多数回の打撃を行えば、加振エネルギーがより大きくなり、同時に加振力波形の波高率が小さくなるなどの理由により実験精度を向上できることが知られている。

そこで、この方法の適用範囲を広げ、さらに精度を向上するために、次のような工夫を行う。

まず、打撃には手持ちハンマの代わりに何らかのアクチュエータを用いる。すなわち、外部からのパルス状の信号に従って電磁気や空気圧などの作用により短時間で往復運動するものを用いて対象物を打撃する。

次にこれを駆動するためのパルス信号列を作る必要があるが、このパルスの間隔を不規則にするために図1のような構成でパルスを発生する。すなわち、入力信号がしきい値を超えるたびにパルスを発生するようなパルス列発生装置を用意し、これに入力信号として純不規則波を与える。この結果、パルス列発生装置からは定常不規則な間隔でパルスが出力される。図2に、パルス列発生装置に入力した純不規則波とその結果発生したパルス列の例を示す。

このようなパルス列を用いて加振を行えば、その加振力は従来の手持ちハンマによる打撃法の加振力に比べ、波高率が小さくなるなど、より不規則波に近い性

格になることが期待できる。また再現性などが向上することは言うまでもない。この加振法を、以下、純不規則連続打撃法と呼ぶことにする。

なお、この加振力やその結果生ずる振動応答は純不規則波加振の場合と同様に有限フーリエ変換時に漏れ誤差を伴う。そこで、図1の点Aあるいは点Bにゲートを設けることによって図2のパルス列がデータ取込みの時間窓長さより短い時間だけ連続するようにした。こうすることにより、加振力波形と応答波形の値は、バースト不規則波の場合と同様、時間窓の初めで零、時間窓の終わりでもほぼ零となり、漏れ誤差の発生を抑制することが可能になる。以下、この加振法を短時間不規則連続打撃法と呼び、純不規則連続打撃法と合わせて不規則連続打撃法と総称する。

3. 不規則連続打撃法と従来の加振法の比較

3.1 単点加振の場合 これらの新しい加振法の実用性を確認するために、まず単点加振の場合について従来の加振法（純不規則波加振法およびバースト不規則波加振法）との比較実験を行う。用いる供試体はタイヤチューブ上に置いた $500 \times 900 \times 5$ mm のアルミニウム板および定盤に固定した小形乗用車用エンジンのオイルパンの2種類である。

これらの供試体について、従来の加振法では図3のような状態で、また不規則連続打撃法では同じ加振機をアクチュエータとして用いて図4のような状態で加振を行う。周波数応答関数計算時の加算平均回数は32回、使用する時間窓関数は、連続波の場合はハニング窓、それ以外は方形窓とした。

図5～8にアルミニウム板の結果を、図9～12にオイルパンの結果を示す。ここで図5、図9が従来の純不規則波加振法、図6、図10が従来のバースト不規則波加振法、図7、図11が純不規則連続打撃法、図8、図12が短時間不規則連続打撃法であり、いずれも(a)が

図1 不規則波発生装置とパルス列発生装置

図2 パルス列発生装置に入力した純不規則波（上）とその結果得られた不規則パルス列（下）

図3 従来の加振法

図4 不規則連続打撃法

加振力波形, (b)が応答加速度波形, (c)が関連度関数, (d)が周波数応答関数(イナータンス)の大きさである。

これらの図から, 次のようなことがわかる。

(1) 図5~8の周波数応答関数はほとんど同じ形であり, どの計測方法でもほぼ同様の結果が得られている。ただし, 図5, 図7では, 漏れ誤差のために関連度関数が共振点で低下している。これに対し, 図6, 図8では共振点の関連度がほぼ1になっており, 漏れ誤差が少なくなっていることがわかる。また, 共振点における周波数応答関数の大きさ〔たとえば, 23 Hzのモードでは図5が $34.3 \text{ m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$, 図6が $38.9 \text{ m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$, 図7が $36.7 \text{ m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$, 図8が $38.9 \text{ m}/(\text{N} \cdot \text{s}^2)$ 〕からも, このことが確認できる。

なお, 図6に比べ, 図8のほうが反共振点での関連度の低下が大きいのは, それぞれの波形からわかるように後者の加振エネルギーが前者より小さいからである。

(2) 図9~12についても関連度関数については(1)と同様のことが言える。ただし, 図10ではバースト波を用いているにもかかわらず, 共振点で関連度がやや低下している。これは, 従来の加振法では共振振動数において加振力が低下するために, 相対的に雑音の影響が大きくなったためと思われる。

また, 周波数応答関数の形を見ると図9, 10と図11, 12とはやや異なっている。これは, 前者にはロードセルを介して加振機を取付けている影響が現れるためと考えられる。したがって, 不規則連続打撃法を用いるほうが対象物の特性を, より正しく測定できると言える。アルミニウム板の場合にこのような差が現れなかったのは, オイルパンに比べ等価質量が大きいいため, 相対的にロードセルや加振機の影響を受けにくかったためであろう。

以上の結果, 不規則連続打撃法は, 加振機やロードセルを対象物に固定しなくて良いにもかかわらず, 従来の加振法とほぼ同等以上の精度での計測が可能であることが確認された。

なお, バースト不規則波加振法を用いるとき, 特に減衰の小さい構造物では, 加振信号が零になった後も構造物の自由振動が長く続くので, 振動応答が時間窓内で十分減衰し切らず漏れ誤差が発生することがある。この点は短時間不規則連続打撃法も同様であるが, 加振機による制振力が作用しない分だけ, 従来の加振法に比べて不利である。

3・2 無相関多点同時加振の場合 次に無相関多点同時加振の場合を検討する。

多入力多出力系の周波数応答関数マトリックス $[H]$ は次式で与えられる。

$$[H] = [G_{xy}] [G_{xx}]^{-1} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, $[G_{xy}]$ は入力と出力間のクロスパワーマトリックス, $[G_{xx}]$ は入力のパワースペクトルマトリックスである。

式(1)を計算するためには, 入力信号間の関連度が1であってはならない。このため通常は, 互いに無相関な純不規則波あるいはバースト不規則波を加振信号として用いることが行われている⁽²⁾。

ここでは, バースト不規則波加振法と短時間不規則連続打撃法とを比較する。供試体としては3・1節で説明したアルミニウム板を用い, 板上の2点(点1, 2とする)を同時に加振し, そのうちの1点(点1)で応答加速度を測定した。

まず, 図13はバースト不規則波加振法の場合であり, 図13(a)が二つの加振力間の関連度関数, 図13(b)が二つの加振力と応答加速度との間の多重関連度関数, 図13(c)が点1の加振力と点1の加速度間の周波数応答関数の大きさ, 図13(d)が点2の加振力と点1の加速度間の周波数応答関数の大きさである。互いに無相関なバースト不規則波を加振信号としたにもかかわらず, 加振力間の関連度関数は一部の振動数で大きな値を示している。この振動数は, 周波数応答関数の大きさからわかるように供試体の共振点である。すなわち, もとの加振信号が無相関であっても, 供試体に作用する加振力は供試体の固有振動の影響を受けるために無相関ではなくなってしまうのである。

これに対し, 短時間不規則連続打撃法の場合は, 加振機が供試体に接触する時間が非常に短いため, そのような影響をほとんど受けない。このため, 図14(a)に示すように加振力間の関連度関数が十分に小さい値となる。多入力多出力系の周波数応答関数の推定精度は加振力間の関連度関数が小さいほど向上する⁽³⁾⁽⁴⁾ので, 少なくともこの点では短時間不規則連続打撃法のほうが有利である。

また, 入出力間の多重関連度関数を比較すると, 短時間不規則連続打撃法[図14(b)]のほうが全周波数域にわたってわずかに低下しているようであるが, 大きな差ではなく, 実用上は従来の加振法[図13(b)]に比べて特にそん色はない。

したがって, 短時間不規則連続打撃法は, 無相関多点同時加振の場合, 従来の加振法より高い精度の周波数応答関数が得られる可能性がある。

4. 結 言

実験モード解析における周波数応答関数計測のための新しい加振方法として、不規則連続打撃法を提案し、

これを従来の加振法と比較した。この結果、本加振法は、次のような特徴を持つことが明らかとなった。

(1) 単点加振の場合、従来の加振法と同程度の質の周波数応答関数が得られる。しかも、加振機やロー

図5 アルミニウム板の純不規則波加振の結果

図7 アルミニウム板の純不規則連続打撃加振の結果

図6 アルミニウム板のバースト不規則波加振の結果

図8 アルミニウム板の短時間不規則連続打撃加振の結果

ドセルを対象物に固定する必要がないので、それらの影響が対象物に及ぶのを避けることができる。

(2) 無相関多点同時加振の場合はさらに、加振力

間の関連度を、従来の加振法に比べて大幅に小さくすることができる。

(3) 純不規則連続打撃法では漏れ誤差を伴うが、

図9 オイルパンの純不規則波加振の結果

図10 オイルパンのバースト不規則波加振の結果

図11 オイルパンの純不規則連続打撃加振の結果

図12 オイルパンの短時間不規則連続打撃加振の結果

図 13 バースト不規則波による多点同時加振の結果

図 14 短時間不規則連続打撃による多点同時加振の結果

短時間不規則連続打撃法を用いれば、これを避けることができる。

したがって、本加振法を用いることにより、従来、実験が困難であった特殊な構造物の実験が容易になり、同時に周波数応答関数推定精度の向上が期待できる。

なお、本報においては、打撃用のアクチュエータとして通常の動電形加振機を利用したが、実用上は、より簡単な構造のもので十分であり、その代わりにストロークを長くするなどしたほうが使いやすく、また適用範囲も広がるであろう。不規則連続打撃法をより実用的なものとするためには、このようなアクチュエー

タの開発が必要になると思われる。

文 献

- (1) 白井, モード解析における実験技術, 機習教 640 回, (昭 62), 77.
- (2) Allemang, R. J., Rost, R. W. and Brown, D. L., Multiple Input Estimation of Frequency Response Functions, *Proc. 2nd. Int. Modal Anal. Conf.*, (1984), 710.
- (3) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., *Random Data-Analysis and Measurement Procedures*, (1971), Wiley-Interscience.
- (4) 森村・坂田, 伝達関数の精度に関する一考察, 機習教 640 回, (昭 62), 123.