実験モード解析のための加振方法*

(第2報, 速度フィードバックバースト不規則波加振法の提案)

白井正明^{*1}, 山口正勝^{*2}, 長松昭男^{*2}

Excitation Techniques for Modal Testing

(2nd Report, Proposition of Velocity Feedback Burst Random Excitation)

Masaaki SHIRAI, Masakatsu YAMAGUCHI and Akio NAGAMATSU

Burst random excitation is one of the most popular excitation techniques for frequency response function measurement. But in the case of very lightly damped structures, the leakage error can be a serious problem. In this paper, we propose a new excitation technique in which the system response after the random signal is turned off is actively controlled by velocity feedback such that the response quickly decays to zero within the time window. Comparing the results using this new method with the usual burst random excitation, the coherence functions are shown to be greatly improved by this new method, not only at resonant frequencies but also at antiresonant frequencies.

Key Words: Vibration, Experimental Modal Analysis, Excitation Techniques, Frequency Response Function, Coherence Function, Velocity Feedback

1. 緒 言

実験モード解析を成功させるためには信頼性の高い周波数応答関数を得ることが不可欠であり, そのためには対象物の性質に応じて適切な加振方法を選択することが必要である⁽¹⁾.

加振方法には多くの種類がある. この中には第1報⁽²⁾で提案したように, 加振器を対象物に固定せずに加振する方法もあるが, 最も一般的なのは加振器を対象物に固定して広帯域を同時に加振する方法であり, 使用する波形の性質から繰返し波加振法と不規則波加振法に分けることができる.

前者は, 具体的には, 高速掃引正弦波, 疑似不規則波, 多重正弦波など, FFT装置の時間窓長さを周期とする繰返し波を加振信号として使用するものである. このため, 有限フーリエ変換の際に漏れ誤差⁽³⁾を生じないこと, 波高率が小さいことなどが大きな利点であり, 対象物が線形でさえあれば非常に良い結果が得られる. が, 対象物に非線形性が存在する場合はその影

響をそのまま受けしてしまうことが欠点である.

後者は, 本来周期を持たない純不規則波を用いるものである. このため, 対象物の持つ非線形性の影響を平均化によって軽減できることが大きな特徴となっている.

ただし, 純不規則波を有限フーリエ変換する際には漏れ誤差を生ずるので, それを防ぐために, 純不規則波を時間窓の中で部分的に発生させた, いわゆるバースト不規則波⁽⁴⁾の形で使用するのが普通である. このようにすることで加振力波形はもちろん, 対象物の応答波形についても, 不規則波で励起されたのちの自由振動が時間窓の内側で減衰してその振幅が十分に小さくなる. したがって, 時間窓長さを周期とする繰返し波と考えることができ, 漏れ誤差の発生が抑えられることになる.

しかしながら, このようにして漏れ誤差を十分に小さくできるか否かは, 対象物の自由振動の振幅が時間窓内で十分に小さくなるか否か, すなわち, 構造物の減衰能の大小に大きく依存している. したがって, 軽減構造物の場合には不規則波の発生時間を短くすることが必要であり, それでも漏れ誤差を十分には防止できないことがしばしば起きてしまう.

そこで本研究では, バースト不規則波加振時の構造

* 平成2年7月12日 1990 Dynamics and Design Conferenceにおいて講演, 原稿受付 平成4年1月28日.

^{*1} 正員, 日本鋼管(株)(〒210 川崎市川崎区南渡田町1-1).

^{*2} 正員, 東京工業大学工学部(〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1).

物の自由振動を加振器にフィードバックすることによって自由振動を短時間に減衰させる新しい方法を提案する。そして、この方法を用いれば軽減衰構造物の場合でも漏れ誤差の発生を防ぐことができ、したがって不規則波加振法の利点を保ったまま繰返し波加振法に近い精度での計測が可能であることを実験で示す。

2. 速度フィードバックバースト 不規則波加振法

バースト不規則波で励振された構造物は、加振力が零になった後は自由振動を行う。この際作用する減衰力には加振器の受動的ダンパとしての作用なども含まれるが、主体は構造物自身の内部減衰である。したがって、軽減衰構造物の場合、時間窓内では自由振動が十分に減衰しない。

そこで、この自由振動を加振器にフィードバックすることにより、能動的に制振することを考える。制御方式にはさまざまな方法が考えられるが、系の減衰を大きくすればよいのであるから速度フィードバックを行うのが最も簡単であり、センサを加振点と同置とすれば安定な制御が期待できる。

具体的には、図1のように通常の周波数応答関数計測の機器構成に、さらにもう一つの加速度計と積分器内蔵のチャージ増幅器を追加する。この出力である速度信号を加振器にフィードバックするには、従来のバースト不規則波加振法(以後、従来法と呼ぶ)では純不規則波をオン/オフするためのスイッチのようなものがあると考えられるので、これがオフになったときだけ速度信号が加振器に入力されるようにしておけばよい。ただし、フィードバックゲインを調整し、位相を反

転するために反転増幅器を通しておく。

このように測定系の変更はわずかであり、測定対象に与える影響は加速度計の質量だけである。しかもその位置は加振点に固定されているので、移動が必要な測定用加速度計に比べれば影響は小さい。さらに、力検出器と制御用加速度計の代わりにインピーダンスヘッドを用いたり、加振器そのものをセンサとする工夫を行えば、対象物にまったく影響を与えないようにすることも可能である。

3. 提案した方法の効果

提案した方法(以下、VFBR法と呼ぶ)の効果を確認するために、二つの対象物について実験を行った。一つは回転機械の台板の模型であり、鋼板を溶接して製作した一体構造物であるので低次モードの減衰係数比は0.1%程度と小さい。もう一つは乗用車のホワイトボディであり、低次モードの減衰係数比は1%前後である。

いずれの場合も自由自由支持とし、外乱などによる影響を少なくするために大きめの加振力を与えるとともに、加速度計もなるべくノイズレベルが低いものを選択した。

最初に回転機械の台板模型についての実験結果を説明する。図2は従来法、図3はVFBR法であり、いずれも上が加振波形、下が応答の速度波形である。バー

図1 速度フィードバックバースト不規則波加振法の機器構成

図2 バースト不規則波加振法における時間波形

図3 提案する方法における時間波形

スト波の発生時間は時間窓の約 40% であるが、従来法では応答の自由振動の減衰はわずかであり、時間窓の最後まで大きな振幅が残っている。これに対し、VFBR 法では応答波形は時間窓内でほぼ減衰しており、速度フィードバックの効果が明らかである。

これらの状態で測定した周波数応答関数の大きさとコヒーレンス関数を図 4 に示す。破線が従来法、実線が VFBR 法であり、比較のために繰返し波で加振した結果を点線で示している。

従来法では反共振点だけではなく共振点においてもコヒーレンスが低下しており、応答波形の漏れ誤差のために信頼性が低下していることを示している。それに対して VFBR 法の場合には共振点におけるコヒーレンスが 1 になるなど、繰返し波とほぼ同等の結果が得られている。

ところで、従来法ではバースト波の発生時間が測定結果に大きな影響を与える。そこで、バースト時間を 20, 40, 60% に変化させて VFBR 法と比較した結果が図 5, 6 である。ただし、いずれもコヒーレンス関数および周波数応答関数のナイキスト線図 (50-100 Hz) を示している。これらの図から、バースト時間の長短に関わらず従来法より VFBR 法のほうがコヒーレンスの低下が少ないのはもちろんのこと、従来法ではナイキスト線図に再現性がなく、この点からも VFBR 法が優れていることがわかる。

次に、ホワイトボディの実験について説明する。図 7, 8 は従来法 (破線) と VFBR 法 (実線) を比較した

図 4 繰返し波加振法 (点線), バースト不規則波加振法 (破線), 提案する方法 (実線) で測定した周波数応答関数の大きさとコヒーレンス関数

ものである。ただし、図 7 はバースト時間が 60%, 図 8 はバースト時間が 80% の場合である。この例では減衰係数比が 1% 前後であるために、バースト時間が

図 5 バースト不規則波加振法で測定した周波数応答関数とコヒーレンス関数

図 6 提案する方法で測定した周波数応答関数とコヒーレンス関数

図7 バースト不規則波加振法(破線)と提案する方法(実線)で測定した周波数応答関数とコヒーレンス関数, バースト時間が60%の場合

図8 バースト不規則波加振法(破線)と提案する方法(実線)で測定した周波数応答関数とコヒーレンス関数, バースト時間が80%の場合

60%であれば, 従来法でも共振点でのコヒーレンス低下はみられないが, VFBR法では, 反共振点付近も含め, 全体のコヒーレンスが改善されている。

また, バースト時間が80%の場合には従来法では共振点でのコヒーレンス低下がみられるが, VFBR法ではそのようなことがなく, 全体的にバースト時間が60%の場合の従来法より高いコヒーレンス値が得られている。

以上のように, VFBR法では, 軽減衰構造物の場合でも漏れ誤差の発生がなく, 繰返し波加振法に近い精度での測定が可能である。また, 従来法の適用が可能な構造物の場合でも, 反共振点を含めた全体のコヒーレンスを高くすることができ, 実験の信頼性をさらに高められることがわかる。

なお, 本実験では, 加振力を十分な大きさとし, また, 加速度計もノイズレベルの低いものを使用したために, バースト時間の長短による加振エネルギーの大小の影響は現れていないようである。しかしながら通常の実験では十分な加振力が得られなかったり, 加速度計の質量付加の影響を軽減するために小形で低感度の加速度計を使用することも多い。そのような場合には, VFBR法によってバースト時間を長くすることは測定系全体のSN比の向上に寄与するところが多い。

また, 無相関多点同時加振実験の場合には相関の高い自由振動部分が短くなるので加振力間の関連度が低くなり, より精度の高い周波数応答関数を求めること

ができる。

4. 結 言

周波数応答関数計測に広く用いられているバースト不規則波加振法の最大の欠点であった軽減衰構造物の場合の漏れ誤差の発生を, 構造物の自由振動を加振器に速度フィードバックすることによって改善する方法を提案し, その効果を実験で確認した。

この結果, 減衰が非常に小さな構造物でも漏れ誤差の影響を全く受けない周波数応答関数測定ができること, 従来のバースト不規則波加振法が適用可能な程度に減衰が大きい構造物の場合でもコヒーレンスをさらに改善できることやバースト時間をより長くできることなどが確認された。

したがって, 本加振法を用いれば, 従来困難であった軽減衰かつ非線形性を無視できない構造物の実験, あるいは, 軽減衰構造物の無相関多点同時加振実験などを高精度にしかも容易に行うことが可能になる。

文 献

- (1) 白井, モード解析における実験技術-周波数応答関数の測定方法, 機習教, No. 890-35 (1989), 43.
- (2) 白井・田鍋, 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), 機論, 55-509, C (1989), 7.
- (3) Bendat, J. S. and Piersol, A. G. *Random Data-Analysis and Measurement Procedures*, (1971), 316, Wiley Interscience.
- (4) Olsen, N., *Burst Random Excitation, Sound and Vibration*, 11 (1983), 20.