

(27) 衝撃実験計測データのフィルター処理方法に関する考察

A STUDY ON PROCESSING PROCEDURES OF FILTERING FOR IMPACT TEST DATA

酒巻 勝^{*}, 喜多龍一郎^{**}, 小暮幹太^{***}, 藤掛一典^{****}, 大野友則^{*****}

Masaru SAKAMAKI, Ryuichiro KITA, Kanta KOGURE, Kazunori FUJIKAKE and Tomonori OHNO

^{*} 防衛大学校理工学研究科学生 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)^{**} 防衛大学校理工学研究科学生 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)^{***} 工修 防衛大学校研究員 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)^{****} 工修 防衛大学校助手 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)^{*****} 工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239 横須賀市走水1-10-20)

キーワード：衝撃実験データ，フィルター周波数，ノイズ除去，ローパスフィルター
 (impact test data, cut-off frequency, noise removal, low-pass filter)

1. はじめに

衝撃外力を受ける構造物の耐衝撃性および衝撃応答特性を検討するために、構造部材を対象とした衝撃実験が数多く行われている。それらの衝撃実験方法は、研究者の判断や目的に応じて様々であり、現象の計測方法・計測データの処理方法についても統一された見解がなく、研究者の経験的判断に委ねられているのが現状である。将来的には統一された見解のもとに適切かつ標準的なデータ処理システムの確立が望まれる。

通常、衝撃実験により得られる計測データには種々の原因により高周波ノイズが含まれる。よって、計測データから真の情報を得るためには、ノイズを除去する必要がある。これまでに計測データの処理に使われてきたノイズ除去の方法を大別すると、計測データをA-D変換する前に電気的アナログフィルター機能を用いて低周波成分のみを抽出する方法と計測データをA-D変換後、コンピュータに収録してデジタルフィルター処理を行う方法に分けることができる。ここで、フィルター処理前の計測データの原波形を保存できること、設定したフィルターあるいはフィルター周波数が適切でない場合、設定を変えて再度処理を行うことができる等の利点から、最近ではコンピュータを利用した各種のデジタルフィルター処理(特にFFTローパスフィルターや移動平均法)が衝撃実験に盛んに適用されている。しかし、FFTローパスフィルターや移動平均法をデータ処理に適用する場合、フィルター周波数あるいは平滑化点数の設定は、各研究者の経験的判断によるところが大きく、過去の研究においても計測データに含まれるノイズを合理的に除去するためのフィルター処理について言及しているものは極めて少ないといえる。これは、計測データに含まれる高周波ノイズを定量的に特定することが一般的に困難であるからである。このような状況において、工学的に妥当な処理を行うためには、ある一定の基準のもとに真の信号とノイズを定義、区別し、その基準によってフィルター処理を行うことが重要であると考えられる。この基準は、フィルター処理の目的により定まるものである。ここで、ノイズを定量的に除去できるフィルターが必要になってくる。また、“工学的に妥当なデータ処理”とは、衝撃実験によって得られる各計測データをそれぞれの目的に応じてフィルター処理を行うことを指す。

本研究では、まず、衝撃現象の計測データに適用すべき最適なデジタルフィルターを選定している。次に、工学的に妥当性のあるフィルター処理方法について考察している。また、現段階において最適と考えられるフィルター処理システムを提案している。

2. 最適なフィルターの選定

デジタルフィルターを用いたノイズ除去方法の分類を図-1に示す^{1) 2)}。衝撃実験計測データに対するノイズ除去の目的は、衝撃現象特有の高周波ノイズの除去にあるので、図-1に示すノイズ除去方法のうち周波数領域においてフィルター関数を設定できる周波数領域法(FFT ローパスフィルター)が最も適用性が高いと考えられる³⁾。一般に、FFTを用いたデジタルフィルターには、2つの方法が考えられる。1つは、周波数領域においてフィルター関数を設定し、これをフーリエ逆変換した関数を重み関数において時間領域においてコンボリューション演算(重み付き移動平均処理)を行う時間領域処理型⁴⁾である。もう1つの方法は、データをいったん周波数領域に変換し、これにフィルター関数をかけ合わせてフィルター処理し、再び時間領域に逆変換する周波数領域処理型²⁾である。通常、土木・建築の分野で用いられる方法は、後者の周波数領域処理型である。

ここで、両者のフィルターの性能を確認するために簡単な数値実験を行った。図-2に示す正弦波(ここで振幅=400G、周波数=200Hzとする)の波形を真の信号とし、これに乱数を用いて適当なノイズ波形を重ねて作成した模擬の不規則波形(図-3)から真の信号を抽出することを試みた。なお、信号データの時間間隔は $\Delta t=20 \times 10^{-6} \text{sec}$ とした。まず、図-3に示す波形をフーリエスペクトル解析すると図-4のようになる。フィルター処理後の波形を図-5に示す。周波数領域法の場合、フィルター周波数 $F(\text{Hz})$ としては、真の信号の周波数である 200Hz に約 100Hz の余裕をもたせた $F=300\text{Hz}$ のところで時間領域処理型、周波数領域処理型ともに概ね真の信号を抽出することができた。しかし、周波数領域処理型の場合、図-5に示すように、この方法特有のリンク効果⁵⁾と呼ばれる誤差がデータの最初と最後に生じるためローパスフィルターとして用いる場合には時間領域処理型が最適であるといえる。また、真の信号の周波数に

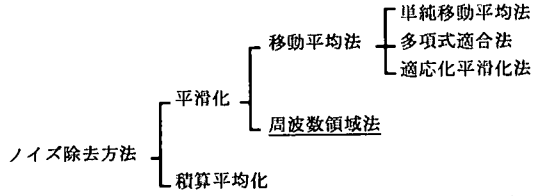


図-1 ノイズ除去方法の分類

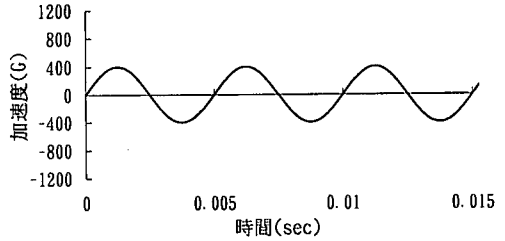


図-2 真の信号の波形(200Hz)

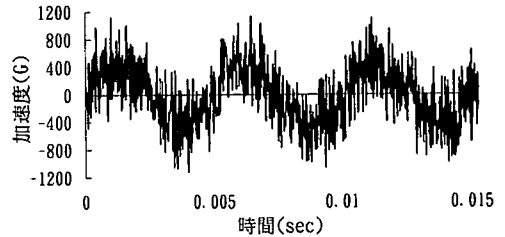


図-3 ノイズを含む信号の波形

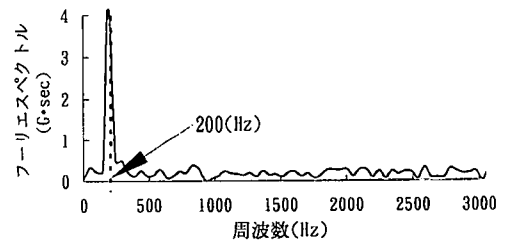


図-4 スペクトル解析

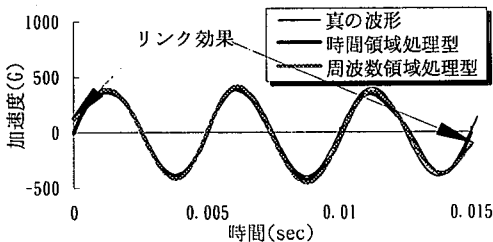


図-5 フィルター処理波形(F=300Hz)

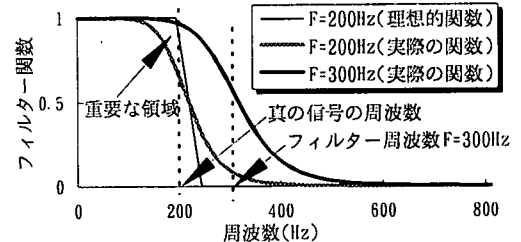


図-6 フィルター関数の比較

対し、設定するフィルター周波数としてはこれに 100Hz を加えた値に設定するという理由は、本研究において使用するフィルターのフィルター関数の形状特性に起因する問題である。図-6 に示すように真の信号である 200Hz の振幅成分を残すためには、実際に設定するフィルター関数の形状特性から約 100Hz の余裕を与えた $F=300\text{Hz}$ に設定しなければならないことが分かる。また、移動平均法とくに多項式適合法(2・3 次式)は平滑化点数を N とすると $F=1/(N \cdot \Delta t)$ のローパスフィルターに相当し、フィルター周波数が決まれば適用可能であることがすでに分かっている³⁾。本研究では、工学的に妥当性が高いと考えられる FFT ローパスフィルター(時間領域処理型)を用いて以下の考察を行う。

3. 計測データの適正処理に関する考察

3.1 フィルター処理の方針

一般に、衝撃実験によって得られる計測データの波形は、その計測器の種類、実験条件等に応じて変化し、複雑な形状を示す。計測データとしては、ロードセルにより得られる荷重データ、加速度計により得られる加速度データ、変位計により得られる変位データ、ひずみゲージによって得られるひずみデータなどがあるが、これらは①真の信号とノイズ成分が区別可能なもの、②真の信号とノイズ成分を容易に区別できないもの、および③区別するには工学的、経験的な判断を必要とするもの、の3種類に分けることができる。得られるデータの波形形状にこのような差が生じる理由としては、用いる計測器に固有の周波数特性や感度の相違があることが考えられる。そのため、計測データに応じた処理方法を確立しなければならない。井元ら⁶⁾は FFT ローパスフィルターを用いる際に選択するフィルター周波数設定の目安として、図-7 に示すような変曲点周波数を用いている。すなわち、フィルター周波数をパラメータとして連続的にフィルター処理を行い、処理後のデータの振幅平均値を求めていくと、ある周波数から急激に減少(増加)する現象が生じる。真の信号が有する振幅平均値に対して処理データの平均値が大きく減少(増加)するような処理は好ましくないことから、勾配が急激に変化する点を変曲点と定義し、そのときの周波数(変曲点周波数 F_{min})をフィルター周波数の目安とした。数値実験のように、真の信号が確認されている場合の結果から、フィルター周波数としては真の信号の周波数に 100Hz を加えた値を用いれば良いことが分かっている。そこで、真の信号に含まれる周波数帯の上限が変曲点周波数であるとした場合、

$$F(\text{Hz}) = F_{min}(\text{Hz}) + 100(\text{Hz})$$

ここで、変曲点周波数は、真の信号とノイズを分離する基準である。変曲点を利用したフィルター処理の物理的意味は、時間応答波形の面積を大きく変化させない限界のフィルター処理であるので、これは、部材の全体応答(2次応答)に直接影響のある低周波成分を抽出することを意味する。よって、

本研究においては、部材の全体応答(2次応答)に直接影響のある低周波成分を真の信号と定義し、全体応答にほとんど影響のない高周波成分を含む種々の高周波ノイズを新たにノイズと定義する。本研究では、このフィルターを用いて各計測データに対する適正なフィルター処理システムを提案する。ここで、本研究で使用した計測器の性能表を表-1に示す。

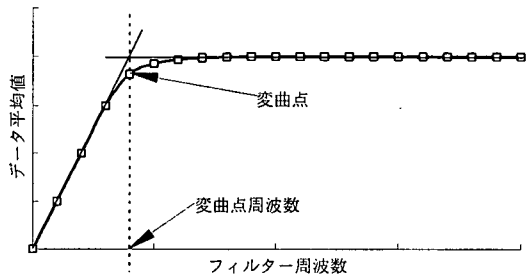


図-7 データ平均値とフィルター周波数との関係

表-1 各計測器の性能

計測器名称	測定範囲	仕様	備考
圧電型加速度計	10, 000G	固有周波数：60 kHz 分解能：2.0 G	PCB 社製 (305A3)
光学式非接触変位計	0~100mm	応答周波数：500 kHz 分解能：100 μm	YA-MAN 社製 (MODEL-7000C)
レーザ式非接触変位計	0~200mm	応答周波数：915 Hz 分解能：50 μm	KEYENCE 社製 (LB-300)
ひずみゲージ式ロードセル	50tf	固有周波数：10 kHz	共和電業社製 (LC50-TI)
圧電型ロードセル	45tf	固有周波数：30 kHz	PCB 社製 (229A)

3.2 フィルター処理システムの提案

まず、未処理の計測データに対し変曲点周波数の算定を試みる。次に、これに 100Hz を加えてフィルター周波数を設定する。同時に、周波数領域においてスペクトル解析、場合によっては時間的なスペクトル分布の変化すなわちランニングスペクトル解析を行い⁷⁾、最適なフィルター周波数を設定する。また、処理後のデータの妥当性を確かめるためにデータ変換(例えば、加速度⇄変位、加速度⇄荷重)及び FFT バンドパスフィルターによる周波数帯域分析等を行い必要に応じてフィードバックが可能であり、このシステムを用いることにより現段階において最適のフィルター処理が可能である。これを図示すると図-8 のようになる。本研究では、このようなフィルター処理システムを提案する。

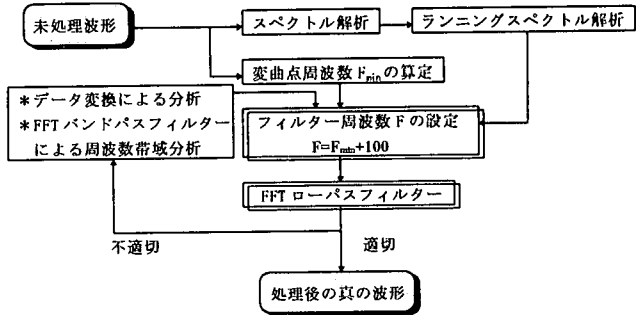


図-8 フィルター処理システム

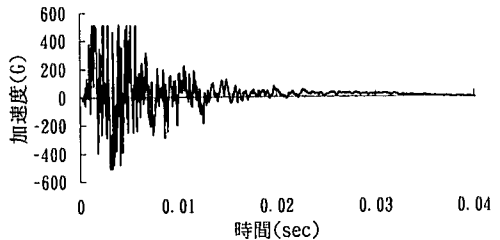


図-9 加速度と時間との関係

3.3 フィルター処理の一例(加速度応答波形)

図-9 は、鉄筋コンクリートはりに対して行った落錘衝突実験(衝突速度 7.7m/sec、重錘重量 200kg)で得られた重錘の加速度波形である。ここで使用した加速度計は、PCB 社製の圧電素子電圧出力型加速度計(固有周波数 60kHz、分解能 2.0G)である。図-9 の加速度データに対して波形振幅の平均値とフィルター周波数の関係を図示すると図-10 のようになる。これより、変曲点周波数は $F_{min}=180\text{Hz}$ であるのでフィルター周波数は、 $F=300\text{Hz}$ でよい。次に、加速度応答のスペクトル解析を図-11 に示す。この場合、周波数領域においてフィルター周波数を設定するのは困難である。また、衝突初期に高周波が集中しておりランニングスペクトル解析により時間的なスペクトル分布の変化が顕著に現れないので、フィルター周波数を周波数領域において評価するのは困難である。図-12 は、 $F=300\text{Hz}$ のフィルター処理波形である。ここで、加速度応答(加速度～時間関係)を 2 回積分すると変位応答に変換されることから、 $F=300\text{Hz}$ で処

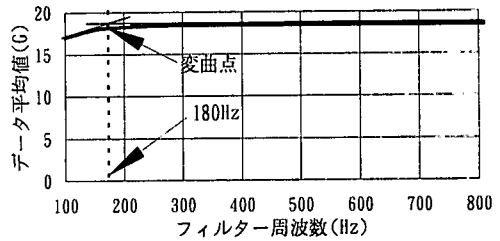


図-10 変曲点周波数の算定

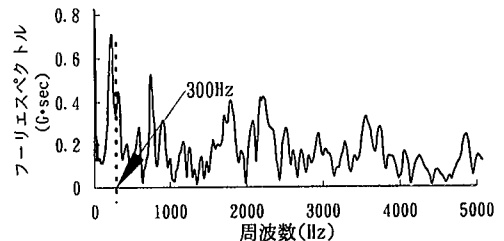


図-11 スペクトル解析

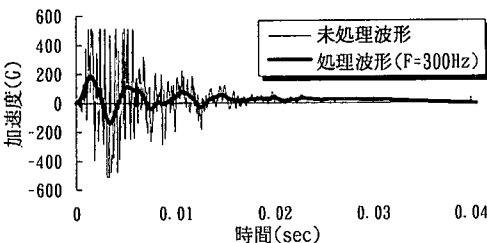


図-12 フィルター処理波形

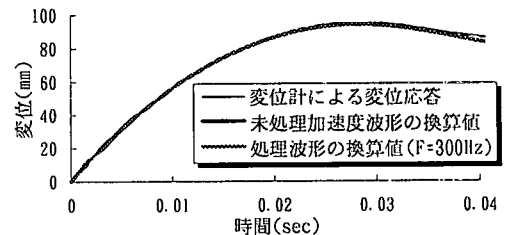


図-13 変位換算波形

理した波形の変位換算波形が変位計によって記録された変位応答波形に比べ著しく異なってしまうのは好ましくない。このような観点に立ち、変位変換による評価を試みた。まず、図-9 の加速度波形および図-12 のフィルター処理波形に対し、2回積分を行って得られた変位の波形をそれぞれ図-13 に示す。また図-13 には、変位計により計測した変位波形との比較を示している。図-13 によりこの3つの変位波形はほぼ一致していることが分かる。よって、この場合、 $F=300\text{Hz}$ のフィルター処理波形は妥当であるということが分かる。

4. 結論

本研究により得られた成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 衝撃実験計測データに適用するデジタルフィルターとしては、FFT ローパスフィルター(時間領域処理型)が最も適用性が高いことが分かった。
- (2) フィルター処理の目的を「構造部材の全体応答(2次応答)に直接影響のある波形成分を抽出する」と定義すれば、変曲点を利用した処理が可能である。
- (3) 現段階において最適と考えられるフィルター処理システムを提案した。

参考文献

- 1) 松葉美晴、他：“衝撃実験における測定方法についての一考察”、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集、土木学会、pp.1-6、1993.
- 2) 南茂夫：科学計測のための波形データ処理、CQ出版社、1986.
- 3) 酒巻勝、他：“衝撃実験データの適正処理方法についての一考察”：土木学会第22回関東支部技術研究発表会講演概要集、pp.72-73、平成6年度.
- 4) 三谷政昭：デジタルフィルタデザイン、昭晃堂、1987.
- 5) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994.
- 6) 井元勝慶、他、“重錘落下衝突を受けるRCはり部材の衝撃挙動と衝撃応答解析における材料の非線形特性”、構造工学論文集、Vol.41A、pp.1201-1212、1995.
- 7) 酒巻勝、他：“衝撃実験計測データのノイズ除去に関する一考察”、土木学会第50回年次学術講演会概要集第1部(B)、pp.1066-1067、平成7年度.

