

RCはり部材の衝撃実験における 衝撃荷重の計測と波形処理法

別府万寿博¹・小暮幹太²・酒巻 勝³・大野友則⁴

¹正会員 博(工) 防衛大学校建設環境工学科 助手 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

²正会員 博(工) 防衛施設庁建設部建設企画課 (〒162-8861 東京都新宿区市谷本村町 5-1)

³修 (工) 防衛庁幹部学校指揮幕僚課程学生 (〒153-8933 東京都目黒区中目黒 2-2-1)

⁴正会員 工博 防衛大学校建設環境工学科 教授 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

衝撃荷重を受ける構造物の設計では、衝撃力作用時の最大応答と静的荷重が作用するときの最大応答との比を動的荷重係数 (D.L.F.: Dynamic Load Factor) として定義し、その値を用いて衝撃力を静的な荷重に置き換えて取り扱う場合が多い。しかし、時間的に変化する荷重・変位や応力の最大値だけに着目する設計手法では、衝突荷重に対する安全性が十分に検討されているとは言えない。そこで本研究では、耐衝撃設計を確立する上で不可欠である「信頼性のある衝撃実験データを得る」という観点から、まず、実験における衝撃荷重の計測に関する諸問題と計測波形の処理方法について考察している。すなわち、RCはり部材を対象として低速度の重錘落下衝撃実験を行い、得られたデータに基づいて具体的な衝撃荷重の計測とその処理方法、および処理データの妥当性について検討している。

Key Words : RC beam, impact load, impact test, data processing, low-pass filter

1. はじめに

衝撃荷重を受ける構造物の設計を行う際には、衝撃力作用時の最大応答と静的荷重が作用するときの最大応答との比を動的荷重係数 (D.L.F.: Dynamic Load Factor) として定義し、その値を用いて衝撃力を静的な荷重に置き換えて取り扱う場合が多い。しかし、時間的に変動する変位や応力の最大値だけに着目する設計手法では、衝突荷重作用直後の極めて短時間内に発生する高次振動や応力波の発生による影響に対して、安全性が十分に検討されているとはいえない¹⁾。このため、耐衝撃設計法を確立するには、衝撃力特性を明らかにし、これを適正に評価することが必要不可欠である。この観点から、設計に関する基礎的あるいは応用的な研究が実験と解析の両面から進められている。

衝撃荷重下における衝撃現象は、一般に“ソフトな衝撃”と“ハードな衝撃”に分類され²⁾、被衝突体の諸元が同じでも衝撃力特性が全く異なる場合がある。これは、衝撃力や破壊モードが、衝突条件 (衝突体の重量・剛性・形状および衝突速度、被衝突体の剛性や境界条件など) に依存するため、実際に生じる衝撃力は衝撃実験で確認することが必要になる。しかしながら、衝撃実験においても衝撃力の計測法や計測されたデータ波形の処理方法および処理を行う際の評価指標の設定については、いずれも十分に検討されているとは言えない現状にあり、

多くの問題が残されている。

衝撃実験における衝撃力の計測では、一般に荷重変換器 (ロードセル) で直接計測するか、計測した衝突体の加速度に衝突体の質量を乗じたものを換算衝撃力として求める方法が用いられている。しかし、計測された衝撃荷重波形には高周波成分の波が含まれるため、計測された波形のままでは衝撃力特性の評価や解釈を行うことが困難な場合が少なくない。そのため、実験結果から衝撃力特性を把握するために、通常は簡便な平滑化によるデータ波形の処理を行っている。この際、計測条件 (機器の性能、サンプリング間隔など) や波形特性を十分に考慮しないまま波形処理を行うと、処理の方法によっては発生した最大衝撃荷重を過大あるいは過小に評価することになる。衝撃実験に関わる手法 (載荷方法、計測法、波形処理法、結果の評価法など) が標準化されていない現状では、衝撃力特性とその評価の相違は、試験体自体の諸元 (強度など) のばらつきとともに、研究者の間で各個に行われる実験の方法や波形処理の違いなどの人為的誤差に起因することがわかっている。

本研究は、耐衝撃設計を確立する上で不可欠である「信頼性のある衝撃実験データを得る」という観点から、まず、実験における衝撃荷重の計測に関する諸問題と計測波形の処理方法について考察するものである。すなわち本研究では、基礎的かつ重要な問題とされながらも、従来ほとんどの実験研究では検討や議論が不十分であっ

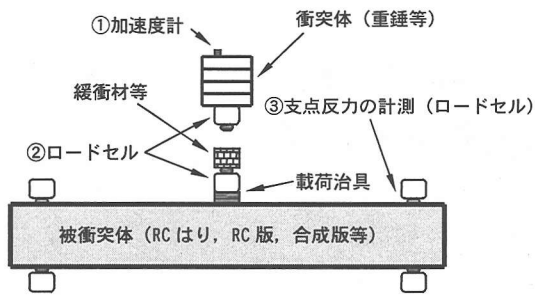


図-1 衝撃荷重の計測方法

た波形処理の方法に焦点を置いている。ここでは、RC はりに対する重錘落下方式の低速衝突実験を行い、得られた衝撃力データに基づいて、具体的な衝撃荷重の計測とその処理方法および処理データの妥当性について検討する。

2. 衝撃荷重の計測における諸問題

図-1 は、衝撃実験において部材に作用する衝撃力を計測する種々の方法の例を模式的に示したものである。計測器の設置の状況や用いる計測器の性能の違いを除けば、実験で一般に用いられる衝撃力の計測は、次のいずれかに該当している。

(1) 衝突体の質量と加速度から衝撃力を求める方法

衝突体に設置した図中①の加速度計で衝突時に衝突体に生じる加速度 a を計測し、そのデータに衝突体自身の質量 m を乗じて、これを換算衝撃荷重 $P(=ma)$ とする。この方法は、ロードセルを使用することができない場合、あるいは衝突体が被衝突体に比べて十分に剛で衝突速度が比較的小さい場合などに幅広く用いられている。比較的簡便な計測方法であるため、他の計測方法と併用されることが多い。

(2) 荷重変換器 (ロードセル) を用いて直接計測する方法

図中②に示すように、ロードセルを衝突体に固定して一体化させ、ロードセルの受圧部を被衝突体に直接衝突させて荷重を計測する。一方、衝突体の先端形状が衝撃荷重特性に及ぼす影響を調べる場合には、ロードセルと一体化した任意形状の載荷治具を被衝突体上に固定し、これを変形に追従できるように被衝突体と一体化させ、衝突体をロードセル受圧部に衝突させて衝撃荷重を計測する方法も用いられる³⁾。

ロードセルや加速度計のような機器を用いて直接的

に衝撃荷重を計測する方法では、衝突体と被衝突体相互の剛性や衝突体の形状および衝突体自身や計測器内部に生じる波動伝播および振動の影響などを受ける。近藤ら⁴⁾は、通常の静的実験で使用されているひずみゲージ変換方式のロードセルを衝撃実験に用いる場合について、重複反射理論を用いて検討している。その結果、ロードセルの構造上の問題から、入力波形 (衝撃力波形) とは大きく異なった波形が出力されることを指摘している。

一方、衝撃力波形に含まれる高周波成分を機械的に濾波する目的で、衝突体と被衝突体の間に緩衝材を設置する場合がある。しかしながら、低速の衝突問題を扱う場合には、用いる緩衝材の種類によって被衝突体に入力される衝撃力特性が著しく変わることがある⁵⁾。この方法ではフィルタリングの効果を適切に制御できないために、あまり好ましい方法とは言えない。

(3) 支点反力から衝撃荷重を評価する方法

衝突点における衝撃力を計測器で直接計測する方法とは別に、衝突点から離れた被衝突体の支点部に設置したロードセルを用いて支点に生じる支持反力を計測することにより、作用した衝撃荷重を評価する方法も報告されている⁶⁾ (図-1 の③)。

一般に、物体の衝突による被衝突体の衝撃現象を簡易な数値解析によって検討する際、下記に示す通常の運動方程式が用いられる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P(t) \quad (1)$$

いま、この方程式の左辺各項を $F_I(t)$ 、 $F_D(t)$ 、 $F_S(t)$ を用いて表せば、任意の時刻 t における力のつりあいは、次式のように表される。

$$F_I(t) + F_D(t) + F_S(t) = P(t) \quad (2)$$

ここで、左辺第1項を慣性抵抗力、第2項を粘性減衰力、第3項を衝撃抵抗力と呼ぶ。右辺は、外力としての衝撃力である。式(2)の左辺第3項は被衝突体自身が強度として衝撃に抵抗する力、すなわち、被衝突体の復元力特性に依存する抵抗力で、静的載荷実験における部材の曲げやせん断強さに相当する。

佐治ら⁷⁾は、小型のモルタルはり試験体を対象とした衝撃実験において、粘性減衰力 $F_D(t)$ は $F_I(t)$ 、 $F_S(t)$ に比べて極めて小さいので $F_D(t) = 0$ と仮定したうえで、①第3項を静的曲げ強さに対応する意味で“衝撃曲げ強さ”、②第1項の慣性抵抗力を含んだ全衝撃抵抗力 ($= F_I(t) + F_S(t)$) を“衝撃曲げ耐力”と定義して評価している。図-1 で示した衝撃荷重の計測方法と比較すると、加速度計およびロードセルで直接計測する方法では、被衝突体の慣性抵抗力の影響を含んだ衝撃 (曲げあるいはせん断) 耐力を計測することになる。慣性抵抗力は反力にも含まれるが、一般に衝突点近傍で卓越し、支点においてはその影響は比較的小さいものと思われる。したが

表-1 計測方法の相違と波形特性

番号	計測方法	波形特性・問題点など
1	衝突体の加速度(図-1①)を用いた換算衝撃荷重	①衝撃継続時間中に高周波成分が多く計測される ②計測は簡便であるが、波形処理を施さないと評価が困難である
2	衝突体の荷重(ひずみ変換式あるいは圧電素子式ロードセルによる直接計測)(図-1②)	①最大衝撃力到達時間の前後に高周波成分が多く計測される ②偏当たりの影響を受けやすい ③ロードセルの受圧部の形状・大きさに依存する
3	緩衝材等を伝わって被衝突体に作用する伝達衝撃力(図-1③)	①高周波成分は濾波できるが、その制御が難しい ②処理方法が確立されていない(上記2つの計測方法との相関性が不明確)
4	支点の位置でロードセルにより計測する衝撃荷重(図-1④)	①衝突点での計測より荷重応答が鈍い ②高周波振動の影響が少ない ③衝突の条件によっては評価できない場合がある

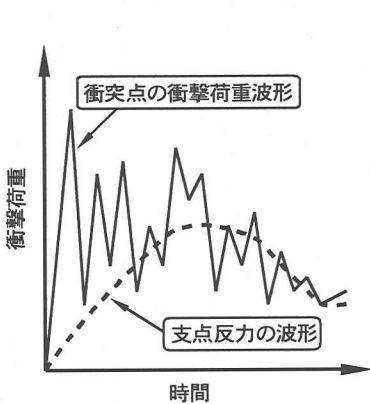


図-2 衝突点荷重と支点反力の波形特性の違い(模式図)

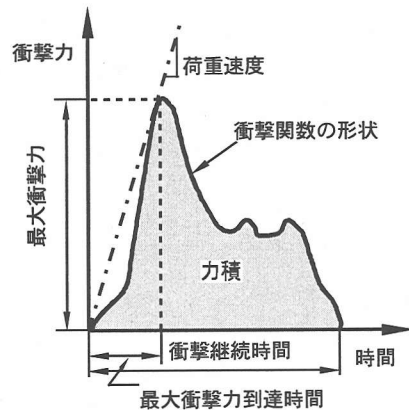


図-3 衝撃荷重波形を評価する用語⁹⁾

って、支点反力を計測する方法では、被衝突体の変形に伴う抵抗力、すなわち衝撃曲げ(あるいはせん断)強さを計測することに対応させて考えることができる。

物体が構造物に高速度で衝突するときの現象を除けば、低速度の衝突では曲げやせん断といった被衝突体の全体的な応答が主要な問題となることが多い。そのため、低速度の衝突条件では、図中の③の計測方法による衝撃曲げ(あるいはせん断)強さによって評価する方が、衝撃現象をエネルギー論的に考察する場合には都合が良い場合もある⁹⁾。しかしながら、慣性抵抗力を含んだ形で計測される衝撃荷重(①もしくは②の計測方法の場合)と慣性抵抗力を含まない衝撃荷重(③の計測方法の場合)では、図-2に示すように計測される波形が著しく異なることがわかっていて、すなわち支点反力は、衝突点の衝撃荷重波形と比べると載荷直後の高周波成分が少なく、全体的に滑らかな波形形状であり荷重値も小さい。また低速度の衝突条件においても、局所的な破壊現象が生じ

る場合には、衝突点から離れた位置では衝撃反力がほとんど発生しないため⁹⁾衝撃力の評価ができないこともある。ロードセルを支点治具上に設置する困難さからも、③の計測方法は衝突点での衝撃荷重の計測を補完する方法と言える。

図-3は、衝撃荷重波形の特性を評価するために用いられる一般的な用語を示したものである⁹⁾。この中でも、力積と衝撃継続時間は、構造物の衝撃挙動に大きな影響を与える指標であることが知られている。表-1に、計測方法の相違が波形特性(衝撃荷重の評価指標)に及ぼす影響や問題点をまとめている。実験における衝撃現象の計測にはこの他にもさまざまな問題点が指摘¹⁰⁾されており、いわゆる“正しい衝撃荷重”の計測や評価を行うことは極めて困難である。

本研究で行う衝撃実験では、以上のような衝撃荷重の計測上の諸問題を考慮した上で、図-1①および②(表-1の番号1および2)の方法で低速衝突時の衝撃荷重の計

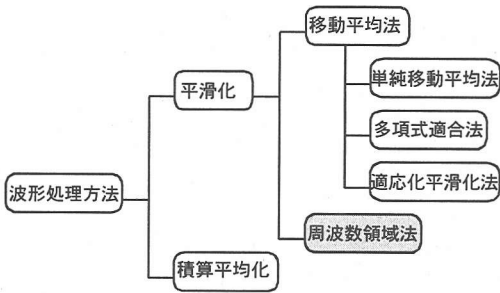


図-4 波形処理方法の分類

測を実施している。

3. 波形処理方法の分類と特徴

計測波形に対する代表的な処理方法とその特徴について概説する。衝撃波形や応答特性を調べる上で不必要と考えられる高周波成分(便宜上、ノイズと呼んでいる)をフィルタリングして、必要な周波数成分からなる波形を得る方法は、一般に図-4のように分類されている。ここでは、従来から衝撃実験データに適用されている移動平均法と周波数領域法の概要について述べる。

(1) 移動平均法

中野ら¹¹⁾は、落石等の衝撃実験に用いる計測システムおよびデータの処理方法について検討を行っている。その結果、計測器の応答周波数やデジタルデータを取り込む際に用いるサンプリング間隔等の計測システム上の諸問題を指摘した上で、計測時には電気的な(計測器の内部回路による)アナログフィルタを設定しないで取り込み、その後デジタルデータに対して単純移動平均法を適用する方法が最良であると報告している。

一方松葉ら¹²⁾は、図-4に示す処理方法の特徴を比較し、低速・中速域の衝撃実験によるデータ波形に対しては多項式適合法による平滑化処理が適切であると報告している。中野らおよび松葉らの処理方法は、いずれも図-4に示した分類では移動平均法の範疇にある。

移動平均法は、測定データの任意の測定値 $x(i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) に対し $(2k+1)$ 個の離散点からなる重み関数 $w(n)$ ($n=-k, \dots, -1, 0, 1, \dots, k$) を用いてその近傍 $(2k+1)$ 点で重み付き平均をとり、データを平滑化する方法である。平滑化されたデータ列を $y(i)$ とすると、次式で定義される。

$$y(i) = \frac{1}{W} \sum_{-k}^k w(n)x(i+n) \quad (3a)$$

$$W = \sum_{-k}^k w(n) \quad (3b)$$

単純移動平均法は、重み関数として最も単純な矩形関数を用いる場合である。多項式適合法は、測定データの任意の測定値をその近傍で最小2乗法により多項式曲線で近似し、それと適合させるように重み関数を設定する方法である。重み関数の形は多項式の次数により異なり、平滑化点数に応じた係数表が準備されている¹³⁾。

ところで、衝撃実験で得られる計測データの特徴は、現象に無関係あるいは考察する上で不必要と考えられる高周波成分が含まれていることである。これをどのような判断基準に基づいて平滑化するかが問題となる。移動平均法は一般に広く用いられている演算処理で、大部分は周波数領域法における低域通過フィルタリング(ローパスフィルタ)に相当する。この方法は、比較的滑らかな(低周波数の)信号から成る波形を抽出することを目的としていることから、衝撃実験データに対する一つの処理方法としては適していると考えられる。

移動平均法において最も重要な問題は、式(3)における重み関数 $w(n)$ の形の決定である。重み関数の選択は、理想的には、得られた計測波形の中に含まれている信号成分(評価可能な成分)と雑音(ノイズ)成分の特徴をあらかじめ推定して、信号成分だけを歪みなく再現できるように決定する必要がある。しかしながら、衝撃荷重波形のノイズは不規則で非定常的であり、衝撃現象と相関性がない場合が多い。したがって、計測波形を信号成分とノイズ成分に区別することは実際的には極めて困難であり、重み関数の選択基準を定めることは非常に難しい。また移動平均法は、基本的には計測波形の時間領域における処理である。したがってこの処理の結果に対して、どの程度の高周波成分が濾波されているのかを再度周波数領域で調べる必要がある。場合によっては、重み関数を再検討する必要も生じる。

(2) 周波数領域法

周波数領域法では、濾波する周波数を設定した後で所望のフィルタ関数を選択する手順がとられるため、周波数領域において波形処理による定量的な影響を直接考察できる点が特徴である。図-5に、周波数領域法で用いられるフィルタの設計手順と重み関数の一例を示す。周波数領域法を衝撃実験データに適用させる処理手順については、Holzer・Brownの研究例がある¹⁴⁾。Holzer・Brownの方法は、計測データをフーリエ変換し、周波数領域で計測器(例えば、ロードセル)の周波数応答関数によって計測器が共振している部分をカットし、これをフーリエ逆変換してフィルタリング処理する方法である。Holzer・Brownの検討では、計測器が共振する周波数帯

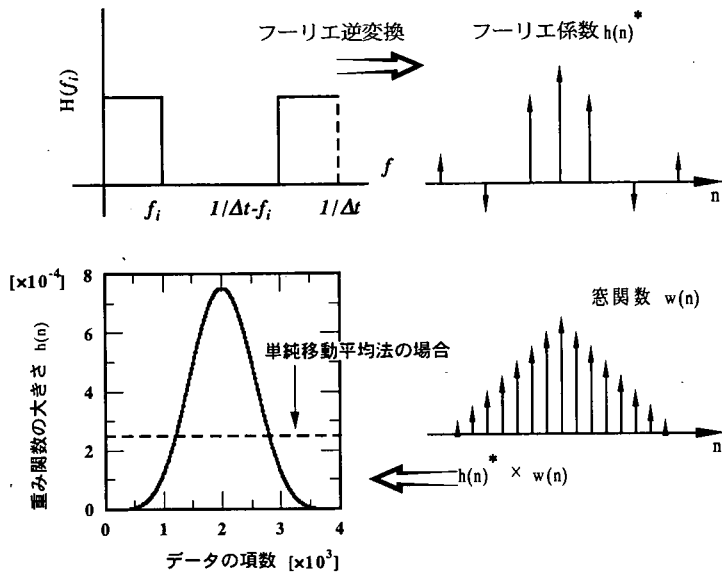


図-5 フィルターの設計手順と重み関数の一例

について具体的な記述がないため、共振成分を選択するための判断基準が不明である。

4. 衝撃荷重の計測と波形の特性

計測した衝突体の加速度に衝突体の質量を乗じて求める換算衝撃荷重あるいは衝突体に取り付けたロードセルで直接計測した衝撃荷重は、いずれも衝突時に作用する衝撃力として評価されるが、両者の計測波形は大きく異なることがわかっている。また、衝撃応答は、載荷条件の相違により全体的なものや局部的なものがあり、2つの異なる応答性状が混在する衝撃荷重の計測では、計測器の設置方法などにも十分注意した上で、衝突体加速度および衝撃荷重の波形処理について検討することが必要である。ここでは、RCはりに対して低速衝突実験を行い、衝撃荷重の計測方法および実験で得られたデータの特徴について比較、検討を行う。

(1) RCはりに対する低速衝突実験の概要

a) 実験装置と試験体

実験装置の概要を、図-6 に示す。実験は、図-7 に示す寸法・諸元を有する複鉄筋RCはりを、スパン1mのローラー支点治具上に設置し、スパン中央に重錘を落下させた。支分部は衝突時の跳ね返りを防止するため、上部から三角形断面の挟み具で押さえている。図-8 は、この試験体の静力学特性を調べるために衝突実験と同じ載

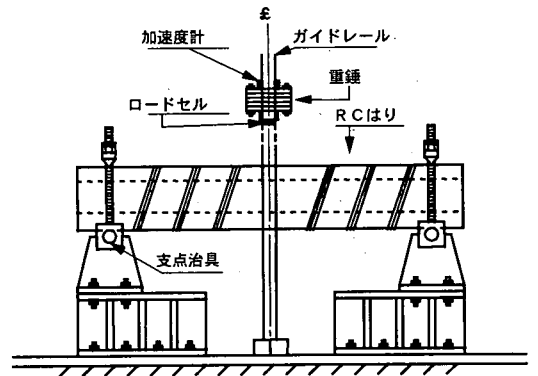
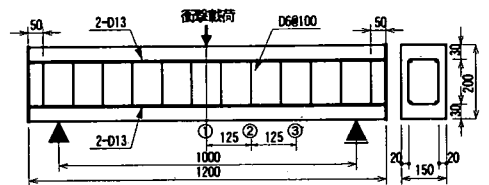


図-6 重錘落下衝撃実験の概要



(単位：mm)

図-7 RCはり試験体の概要

表-2 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			セメント	水	細骨材	粗骨材
10	52.0	42.8	333	173	754	998

表-3 計測項目および計測器の性能・諸元

計測項目	名称	性能・諸元
荷重	ひずみゲージ式 一般用圧縮型ロードセル LC-50TE	共和電業製 測定範囲：50tf (490.3kN) 固有振動数：10kHz 先端形状：直径56mm, 緩い曲率あり
	圧電型衝撃用ロードセル 229A	PCB製 測定範囲：0~45.7tf (448kN) 共振周波数：30kHz 先端形状：直径20mm, 平面
加速度	圧電型加速度計 305A04	PCB製 測定範囲：+10000G~5000G 共振周波数：60kHz
変位	レーザ式変位センサ LB-300	KEYENCE製 測定範囲：300±100mm 応答性：915Hz
A/D変換	マルチチャンネル・トランジェント・アナライザ	Nicolet製 MultiProシステム 垂直分解能：12bit サンプリング間隔： 10μsec (max:1μsec)

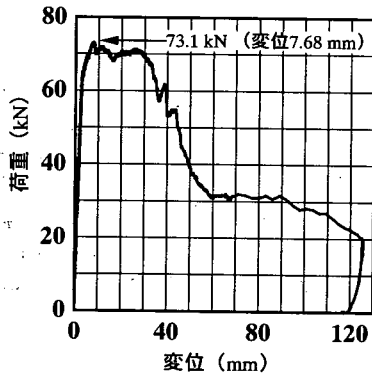


図-8 RCはりの荷重～変位関係（静的載荷）

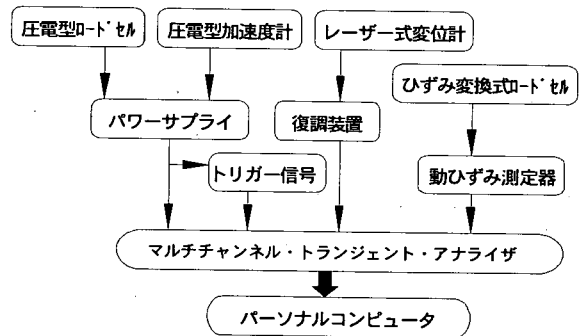


図-9 計測システム

荷治具を用いて行ったRCはりの静的載荷時の荷重～変位関係である。せん断スパン比が小さく ($a/d=2.8$), 鉄筋量が比較的多い (鉄筋比: 0.94%) RCはりであったため, 小さい変形 (変位量 7.68 mm) で最大耐力 73.1 kN (7.46 tf) を示した後, 斜め引張破壊して終局状態となっている。なお, 実験時 (材齢 75 日) のコンクリートの圧縮強度は 35.9N/mm^2 (367 kgf/cm^2), RCはりの質量は約 90 kg であった。コンクリートの配合を表-2 に示す。

b) 計測

本実験の計測システムを図-9に, 計測項目および計測器の性能・諸元を表-3に示す。主な計測項目は, 重錘下部に固定したロードセルで計測される衝撃荷重と重錘上部に固定された加速度計で計測した重錘加速度, および図-7の①, ②および③の位置に生じるRCはりの変位と応答加速度である。データのサンプリング間隔 Δt は $10\ \mu\text{sec}$ である。なお, 電源ラインに発生するノイズを除去するために, ノイズカットトランス (ELGAR 製 HIT-1.0R) を使用している。

表-4 実験ケース

名前	重錘質量 (kg)	衝突速度 (m/s)	重錘の運動エネルギー (kJ・m)	計測に用いたロードセル
ケース1	100	6	1.80	ひずみ式 (静的用)
ケース2	100	6	1.80	圧電型 (衝撃用)
ケース3	300	3.46	1.80	ひずみ式 (静的用)

c) 実験ケース

実験ケースを表-4に示す。実験はいずれも単一衝突（衝撃力の載荷が1回だけ）の条件で行った。ケース1とケース2は、重錘質量をRCはりの質量とほぼ等しい100 kgとし、ケース3では3倍の300 kgである。ケース1では通常用いられているひずみ変換式のロードセル（以下、これを静的用ロードセルと呼ぶ）を、ケース2では衝撃荷重の計測専用の圧電型ロードセル（以下、これを衝撃用ロードセルと呼ぶ）を用いて計測し、ロードセルの応答性や種類の違いが荷重波形特性に及ぼす影響を調べている。

また、重錘質量および衝突速度が荷重波形特性に及ぼす影響を調べるために、ケース3は、ケース1およびケース2と衝突時の重錘の運動エネルギーが等しくなるように衝突速度を設定している。なお、衝突速度を設定するため、予め同一諸元のRCはり試験体に対して衝突速度を徐々に大きくして載荷を行う繰り返し衝突実験を行っている（重錘質量100 kg、衝突速度1,2,3および6 m/s）。この結果から、単一衝突によって試験体スパン中央に10～20 mm（支持スパンのおよそ1～2%）程度の残留変位を生じさせる衝突速度として6 m/sを決定した。このときの衝突速度 v はいずれのケースも重錘の落下高さ h （ $v = \sqrt{2gh}$, g : 重力加速度）から求めている。

(2) 時間領域における波形特性

図-10に、RCはりに対する各試験ケースにおいて、ロードセルで直接計測された衝撃荷重の波形と衝突体の加速度から求められる換算荷重の波形を示す。なおケース3については、スパン中央で計測されたRCはりの変位～時間関係も示している。

一般に、剛体の衝突によって生じる衝撃荷重は、衝突直後急激に立ち上がる最大衝撃力と、これが急激に減衰して振動しながら継続する荷重の2つの段階から衝撃波形の形状が構成される。図に示す衝撃荷重は、いずれの条件下でもこれと類似した荷重～時間波形を示している。

図-10(a)-1)の静的用ロードセルによる荷重波形と、同図(b)-1)の衝撃用ロードセルによる荷重波形を比較すると、最大衝撃力の大きさが異なる（ケース1：294 kN、ケース2：255 kN）ことと、ケース1には最大荷重以降の波形に振幅の小さい高次の周波数成分の波が含まれて

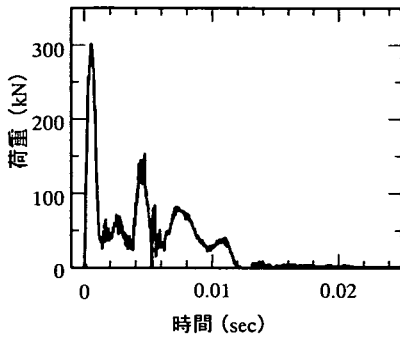
いることがわかる。しかし、全体的な衝撃波形の形状や力積値（ケース1：0.764 kN・sec、ケース2：0.725 kN・sec）などに顕著な違いはない。したがって、本実験の範囲（低速度の衝突）であれば、最大衝撃力を除いた衝撃力特性の評価に与えるロードセルの違いによる影響は少ないと言える。同図(c)のケース3（衝撃入力エネルギーが同一で重錘質量がケース1の3倍）とケース1を比較すると、最大衝撃力の到達時間はほぼ等しい（ケース1：0.53 msec、ケース3：0.64 msec）が、衝撃継続時間が大きく異なっている（ケース1：約11 msec、ケース3：約21 msec）。ケース3の最大衝撃力は186 kNで、これはケース1の60%程度の大きさである。また、最大荷重以降の荷重の振幅はケース1に比べて小さく、衝撃波形の形状は著しく異なることがわかる。

一方、加速度計によって計測された衝突体の加速度から求めた換算荷重波形は、何らかの波形処理を施さないと最大衝撃力などの波形特性を評価することは極めて困難である。図-10(a)と(b)を比較すると、ロードセルの違いによって、加速度データに基づく換算荷重波形の形状も著しく異なっている。これは、ロードセルの先端形状、すなわち衝突接触面の形状の違いによって、重錘に励起される振動特性に違いが生じるためと思われる（表-3参照）。

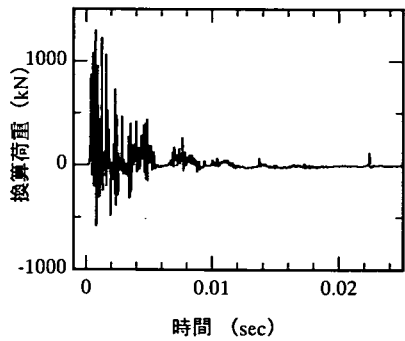
ここで、ケース3のRCはりスパン中央の変位応答と衝撃力波形を比較すると、最大衝撃力到達時の変位は、1.6 mmであり、微小な変位しか生じていない。変位応答の最大値は、20.14 mmで、これは最大衝撃力到達時刻以降の衝撃継続時間内で生じている。すなわち、載荷初期に計測される最大衝撃力は、いわゆる試験体の変形にともなう衝撃曲げ強さとしてではなく、慣性抵抗力を含んだ衝撃曲げ耐力として評価されるべきものであると言える。

(3) 周波数領域における波形特性

次に、ロードセルおよび加速度計により計測された荷重および加速度データの振動数領域における特性について考察する。図-11に、ロードセルによって直接計測された衝撃荷重および加速度データを用いた換算荷重（いずれも計測時間0～50 msec、データ間隔10 μ sec）のフーリエスペクトルを示す。図-11(a)に示すロードセルに

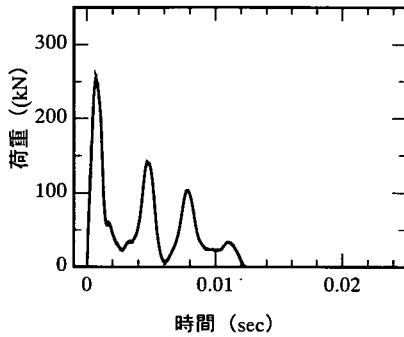


1) 静的用ロードセル

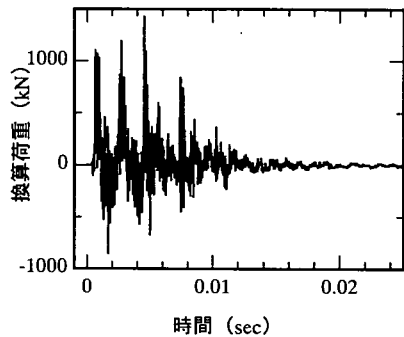


2) 加速度から換算

(a) ケース1

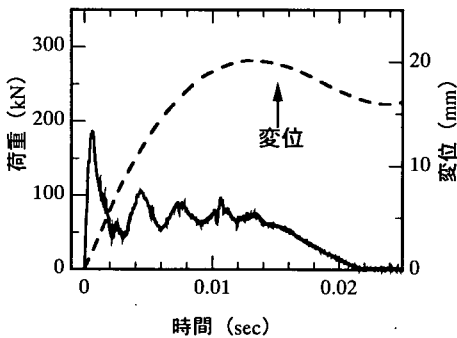


1) 衝撃用ロードセル

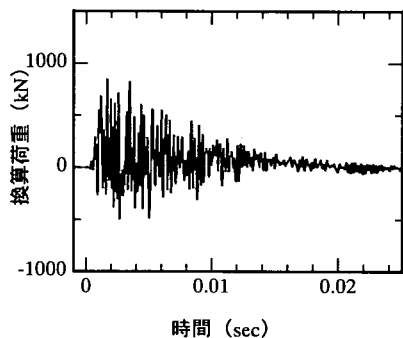


2) 加速度からの換算

(b) ケース2



1) 静的用ロードセル



2) 加速度からの換算

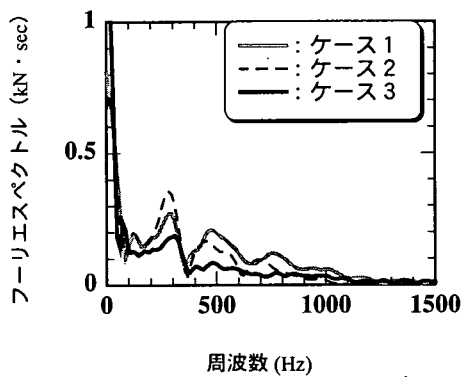
(c) ケース3

図-10 衝撃荷重波形

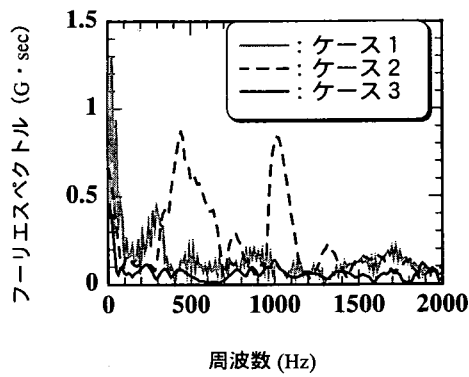
よる荷重のフーリエスペクトルは、いずれのケースも 300 Hz 前後に卓越する周波数成分が認められる。重錘質量が 300kg であるケース3の場合は、全般的に高周波成分の割合が他の2つのケースに比べて少ない。また、応答性の高い衝撃用ロードセルで計測したケース2に比べて、静的用ロードセルで計測したケース1には、350 Hz 以上の周波数成分がわずかであるが多く含まれている。静的用ロードセルの計測データに高周波成分がより多く含まれる理由として、衝突時にロードセル内部で生じる応力波や高次の過渡的な振動を、受感部に貼付した

ひずみゲージが検出することによる影響が考えられる。これらは、衝突後やや遅れて生じるRCはりの弾塑性応答とは無関係な波形成分とみなすことができる。

図-11(b)に示す加速度波形のフーリエスペクトルには、同図(a)の荷重波形のフーリエスペクトルと比べて、RCはりの全体応答(低次振動)とは無関係な、あるいは応答特性を調べる上で不必要とみなせる高周波成分がより多く含まれている。とくに、重錘質量が 100kg であるケース1では低周波成分のスペクトルも大きく、さらにケース2では、ケース1とは異なる周波数(500 Hz およ

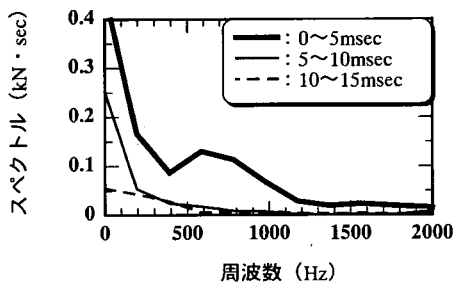


(a)ロードセル

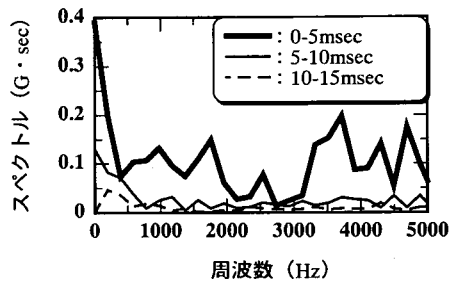


(b)加速度

図-11 計測波形のフーリエスペクトル

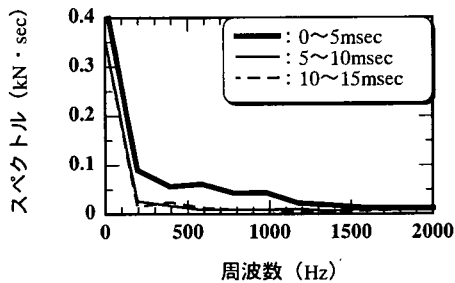


1)ロードセル

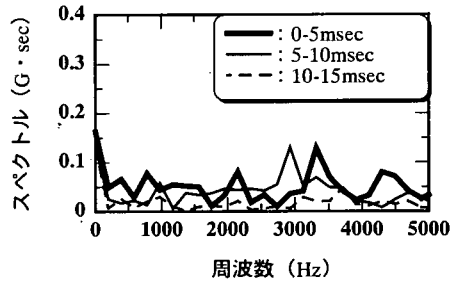


2)重錘加速度

(a) ケース1



1)ロードセル



2)重錘加速度

(b) ケース3

図-12 ランニングスペクトル

び 1000 Hz) も卓越していることがわかる。

ここで、最大衝撃力が発生する前後とそれ以降の領域を時間で区分して、荷重の時刻歴波形を 5 msec 毎の時間間隔で区切り、それぞれの時間帯ごとにスペクトル(ランニングスペクトル)を求めてみる。図-12 は、ケース1およびケース3における荷重および加速度データ(図-10 の(a), (c))のランニングスペクトルを示したものである。いずれのケースも高周波成分は载荷後 5 msec の間に卓越し、RC はりの変位応答が最大となる時刻(5 msec~10 msec)で高周波成分が減少している。とくに、

ロードセルの計測波形はその傾向が顕著である。すなわち、衝突によって生じる衝撃荷重および重錘加速度は、高次の振動を含む载荷初期の状態から、被衝突体の全体変形にともなって低周波成分で構成される振動数特性へと時間的に変化することがわかる。

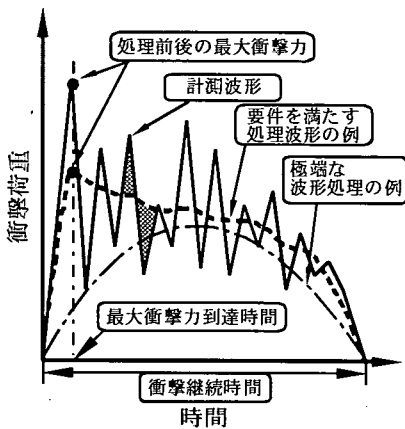


図-13 計測波形と処理波形の相違 (概念図)

5. 周波数領域法を応用した波形処理の方法

(1) 波形処理に求められる要件

計測された衝撃荷重の波形に対する考察結果をまとめると、次のようになる。

- ① 力積の大小と衝撃継続時間は、損傷の程度や衝撃力特性を評価する指標として重要である。
- ② 最大衝撃力到達時間は、応答性に関わらずば一定の値を示す。
- ③ 衝突体の加速度から算定される換算衝撃力の波形は、振幅が大きい高次の振動成分からなる波形で、計測された波形のままでは衝撃力の大きさを評価できない。
- ④ 本研究で用いた計測システムおよび限られた実験条件からだけでは、計測器の性能 (応答性能) が衝撃力波形に及ぼす影響 (共振の影響等) や衝撃力作用後の試験体の応答特性を定量的に評価することはできない。

したがって、波形処理の方針は、「物理的および工学的に妥当性のある波形を得る」ことに焦点を置くことが必要である。この際、上記の考察結果から、「衝撃力波形の中の重要な評価指標を極力歪めないため」の波形処理方法を選択し、その妥当性について検討する必要がある。

ここで、「重要な評価指標を極力歪めない波形処理」とは、上記4項目のうち、波形特性に関する①および②に対して、その特性を極端に歪めないように波形を処理する方法である。すなわち、波形処理に当たって考慮すべき要件として、次の3つの項目が挙げられる。

- a. 力積値を (極端に) 変えない
- b. 衝撃継続時間を変えない

c. 最大衝撃力到達時間を変えない (立ち上がりの位相を変えない)

図-13 に、衝撃力波形 (計測波形) と波形処理後の波形 (処理波形) を模式的に示す。上記 a~c の要件を満たすように処理された波形は、図中の破線のようになることは容易に推定できる。計測波形は処理波形曲線を骨格として上下に振動しながら次第に減衰する波形である。このとき、衝撃継続時間内の衝撃荷重~時間曲線で囲まれる面積の総和 (力積) は計測波形と処理波形で等しくなる。図中には、計測波形を衝撃継続時間を半周期とする正弦波で近似した極端な波形処理の例を一点鎖線で示している。この場合、計測波形とは全く異なる物理量 (振幅、力積) を評価することになる。すなわち上記 a の力積を変えないという要件を処理後の波形が満たすには、計測された衝撃荷重波形の振幅平均値を変えない範囲で波形処理を行うことが必要である。

(2) 提案する波形処理法

本研究では、高周波成分をフィルタリングするローパスフィルターを用いた周波数領域法による波形処理方法を選択する。周波数領域法による処理手順については、前述の Holzer・Brown¹⁴⁾の方法があるが、波形特性に関する考察結果④から、計測器の共振周波数から応答特性を特定するのは困難である。そこで、以下に示す手順によって処理に用いるフィルター周波数を決定する方法について検討する。

いま、ローパスフィルターの周波数 f_i で処理された離散データの各値を X_{fi} 、時系列データの総数を N とすれば、A/D 変換による離散データから構成される衝撃力波形データの平均値 \bar{X}_f は、次式で与えられる。

$$\bar{X}_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{fi} \quad (4)$$

式(4)によって求められる波形処理後のデータ平均値 \bar{X}_f をローパスフィルターの周波数 f_i を逐次に変化させて求め、データ平均値 \bar{X}_f と波形処理に用いたフィルター周波数 f_i の関係で示すと図-14 のように表される。

図から、処理を周波数が大きい方から行えば、データ平均値 \bar{X}_f がほぼ一定値を示す範囲から \bar{X}_f が急に減少する境界が存在することがわかる。これは、計測波形 (荷重、加速度) の多くが、低周波の成分で構成された波形 (便宜的にこれを、基本波形と呼ぶ) の上に振幅や周波数成分の異なる種々の波が重なっているためと考えられる。すなわち、処理データの平均値 \bar{X}_f が変化しないのは、濾波した高周波成分の波が、基本波形上に上下にほぼ等しい振幅で重なっていることによるものである。言い換えれば、データ平均値が一定であるということは、

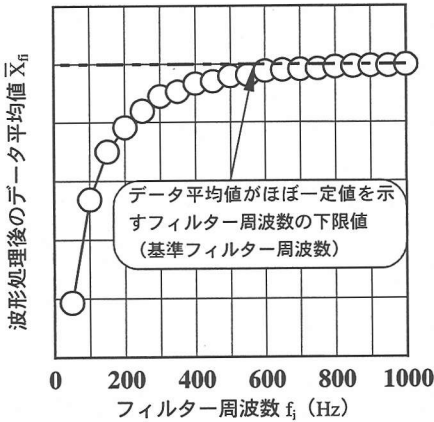


図-14 フィルター周波数の決定方法 (提案法)

使用したフィルター周波数でカットオフされた帯域の周波数は計測波形の物理的性質にほとんど影響しないことを示している。また、平均値が極端に減少する範囲のフィルター周波数を使用すると、図-13 に示した極端な波形処理の例に見られるように、波形処理によって計測波形が本来有する物理的意義を全く失った波形になる。

衝撃実験で得られた計測波形に対する処理手順を、図-15 に示す。図中のローパスフィルター値 (フィルター周波数) の決定および処理方法が、本研究で提案する処理手順の主要な特徴である。すなわち、フィルター周波数の決定および処理は以下の手順で行う。

(1) 計測波形に対する N 個の時系列データを用いてフィルター周波数 f_i による処理を行い、処理された波形の振幅平均値 \bar{X}_f を求める。 f_i を高次から低次までである間隔で連続的に変化させて、同様の処理をくり返し行う。

(2) 図-14 に示すような振幅平均値 $\bar{X}_f \sim$ フィルター周波数 f_i 関係を求め、データ平均値が一定となる範囲の最も低いフィルター周波数 (以下、これを基準フィルター周波数と呼ぶ) を定める。

(3) 波形処理においては、所望のローパスフィルターの性能を有するフィルター関数を周波数領域で設定する (図-5 参照)。これをフーリエ逆変換した値を重み関数と置き、時間領域のコンボリューション演算によって高周波成分をカットオフして平滑化する。すなわち、周波数領域において設定したフィルター関数 $H(f_i)$ をフーリエ逆変換してフーリエ係数 (インパルス応答) $h(n)^*$ を求める (周波数サンプリング法^{15), 16)}。さらに、周波数特性に及ぼすリップルの影響を抑制するため、インパルス応答に窓関数 $w(n)$ を掛け合わせたものを重み関数 $h(n)$ ($= h(n)^* \cdot w(n)$) とする。窓関数は、ハンニング窓やハミング窓などよく知られているだけで数十種類のものがあるが、本研究では主な周波数成分を検出す

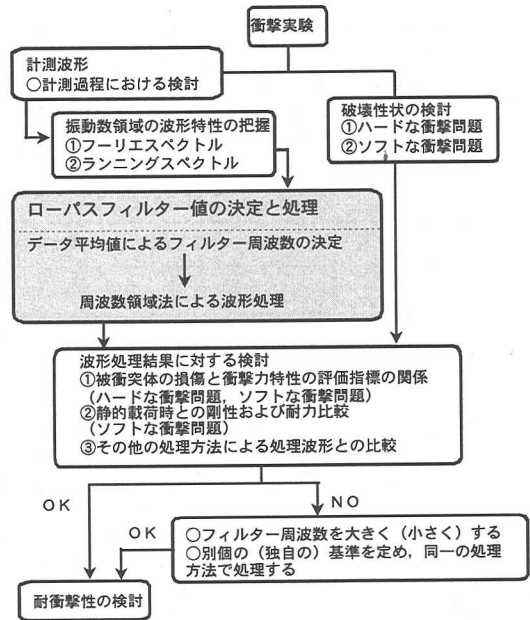


図-15 計測波形の処理手順

るのに適している (サイドローブが小さい) ブラックマン窓を用いた。これにより、時刻 $t = i\Delta t$ に相当するデータ番号 i における測定値 $x(i)$ の処理後の値 $y(i)$ は次式で求められる。

$$y(i) = \sum_{n=0}^M h(n)x(i-n) \quad (5)$$

ここで、 M はフィルターの次数であり、フィルター周波数を f (Hz)、データのサンプリング間隔を Δt (sec) とすると、移動平均法との関係は $M = 1/(f \cdot \Delta t)$ で与えられる¹⁷⁾。処理後の波形は、位相がデータ数にして $M/2$ 個分遅れる位相特性¹⁸⁾を有することがわかっているため、最大衝撃力発生時間や衝撃作用開始点が処理の前後でずれないようにこれを補正する。なお、周波数領域法と移動平均法の一つである多項式適合法との間には、 $f = 1/(N \cdot \Delta t)$ (f : フィルター周波数、 N : 平滑化点数、 Δt : サンプリング間隔) の関係にある¹⁷⁾。

(3) 波形処理例

図-10(a), (c) に示した計測データを用いて、処理波形の例を示す。前述の波形処理手順(1), (2)にしたがって処理すると、ロードセル荷重および加速度からの換算荷重のデータ平均値とフィルター周波数の関係が、図-16 のように得られる。各データに対する基準フィルター周波数は、各図中および表-5 に示している。求めた基準フィルター周波数を用いた波形処理の例を以下に示す。

図-17 は、ケース 3 (図-10(c) の計測波形) に対して、基準フィルター周波数と基準フィルター周波数の 1/2 お

表-5 基準フィルター周波数

計測波形	基準フィルター周波数 (Hz)	
	ロードセルによる計測荷重	加速度からの換算荷重
ケース1 (図-10(a))	600	500
ケース3 (図-10(c))	500	200

表-6 フィルター周波数の影響 (ケース3の場合)

フィルター周波数	ロードセル (基準フィルター周波数 $f_c=500\text{Hz}$)			加速度 (基準フィルター周波数 $f_c=200\text{Hz}$)		
	データ平均値(kN)	力積(kN·sec)	最大値(kN)	データ平均値(G)	力積(kN·sec)	最大値(kN)
基準フィルター周波数 f_c	27.23(0.992)	1.362(0.992)	153.4	9.07(0.985)	1.333(0.985)	155.4
$1/2f_c$	26.65(0.971)	1.333(0.971)	118.1	8.56(0.929)	1.254(0.929)	95.55
$1/5f_c$ (ロードセル) $1/4f_c$ (加速度)	25.17(0.917)	1.254(0.917)	75.84	7.79(0.85)	1.147(0.85)	82.61

()内は未処理の計測データに対する比, 加速度の力積および最大値は重錘質量 (300kg) を掛けた数値

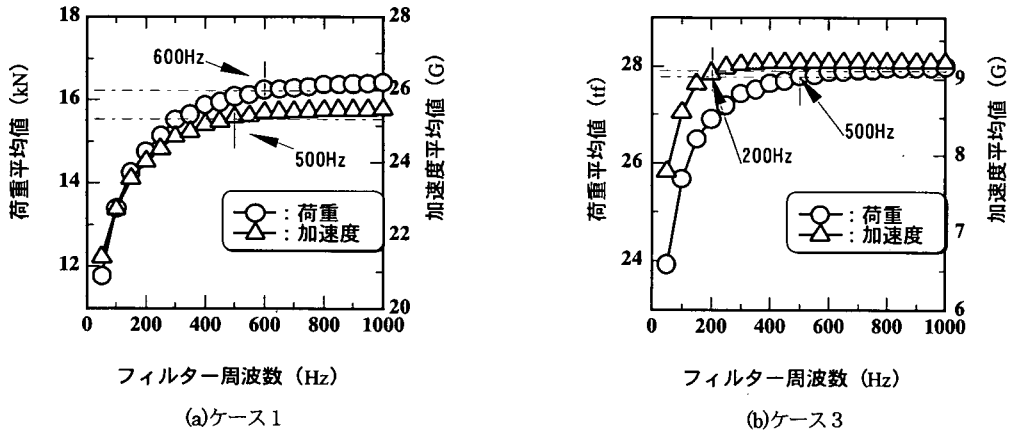


図-16 フィルター周波数とデータ平均値の関係

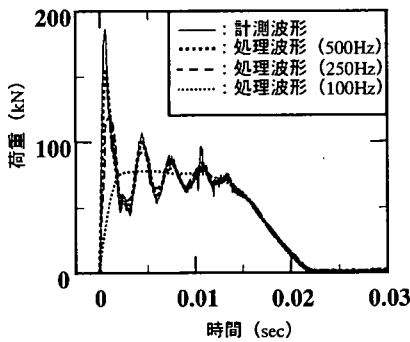
よび $1/5$ (ロードセルの計測波形), $1/4$ (加速度の計測波形) の 3 種類のフィルター周波数でそれぞれ波形処理した衝撃力波形である。各フィルター周波数によって処理された波形のデータ平均値, 力積および最大衝撃力を表-6 にまとめて示す。

図-17(a)に示すロードセルによる荷重波形は, 未処理の計測波形に対して基準フィルター周波数で処理した波形の最大衝撃力は減少するが, 最大衝撃力以降の波形はほぼ一致している。また, 計測波形に対する力積の減少は 1% に満たない。フィルター周波数を下げると最大衝撃力はさらに減少するが, 基準フィルター周波数の $1/2$ である 250Hz のフィルター周波数で処理した波形においても力積の減少量は計測波形の 3% 程度であり, 全体的な波形の形状はほとんど変わらない。しかしながら, データ平均値が極端に低下する基準フィルター周波数の

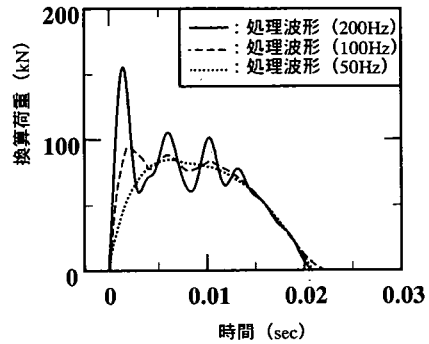
$1/5$ である 100Hz のフィルター周波数で処理した波形は, 衝突直後の最大衝撃力を示すピークがなくなり, 波形特性が著しく損なわれている。

図-17(b)の加速度データから求められる換算荷重波形は, 基準フィルター周波数の $1/2$ (100Hz) のフィルター周波数で処理した場合, 最大衝撃力を示すピークが急激に減少し, 衝撃力波形が著しく変化する。このときの計測波形に対する力積の減少はおよそ 7% となる。

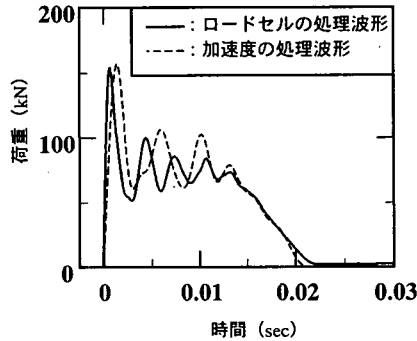
図-16(b)に示すように, ロードセルによる荷重データは, 基準フィルター周波数 (500Hz) 以下のフィルター周波数に対してデータ平均値が比較的緩やかに減少するのに対して, 加速度データは基準フィルター周波数 (200Hz) を境にしてデータ平均値が急激に減少する。このような特性を有する加速度データに対しては, 基準フィルター周波数より僅かに小さなフィルター周波数を



(a)ロードセルによる荷重データの処理波形



(b)加速度データからの換算荷重の処理波形



(c)基準フィルター周波数による処理波形の比較

図-17 ケース3の波形処理例

用いることにより波形特性が大きく変化することがある。

図-17(c)は、ロードセルの荷重データと加速度の換算荷重データに対して、それぞれの基準フィルター周波数で処理した場合を比較したものである。図-10(c)に示したように大きく異なった二つの衝撃力波形は、基準フィルター周波数で処理することによりほぼ一致することが認められる。

(4) 単純移動平均法による波形処理との比較

図-18は、ケース3の計測波形に対して、基準フィルター周波数を用いた処理波形と、一般に波形処理方法として利用される単純移動平均法によって処理された波形を比較したものである。

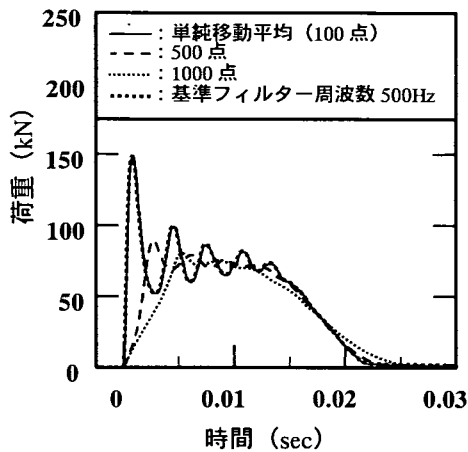
単純移動平均法で処理する際の平滑化点数（平均するデータの個数）を逐次変化させ、前述の基準フィルター周波数で処理した波形と比較する。図-18(a)のロードセルの荷重データに対しては、平滑化点数が100点、同図(b)の加速度による換算荷重データに対しては平滑化点数が200点の単純移動平均法で処理した波形と比較的良好一致している。また、平滑化点数を大きくすると、最大衝撃力が減少するだけでなく、衝撃関数の形状が著しく変化することがわかる。

図-19は、図-16(b)に示したものと同様の考え方で、単純移動平均法による波形処理後のデータ平均値と平滑化点数の関係性を求めたものである。平滑化点数0点に対しては、未処理のままの計測波形のデータ平均値である。図より、加速度データに基づく換算荷重平均値は平滑化点数が200点付近から減少するが、ロードセルの荷重平均値は0点以降平滑化点数の増加とともに単調に減少する。すなわち、平滑化点数とデータ平均値の関係には図-16(b)に示した関係のように一定値の範囲から明瞭に減少開始を始める傾向が見られず、図式的に平滑化点数を求めることはできない。言い換えれば、ここで提案する基準フィルター周波数の設定方法と同様の手法を、単純移動平均法において平滑化点数を設定する際に適用するには無理があるということである。

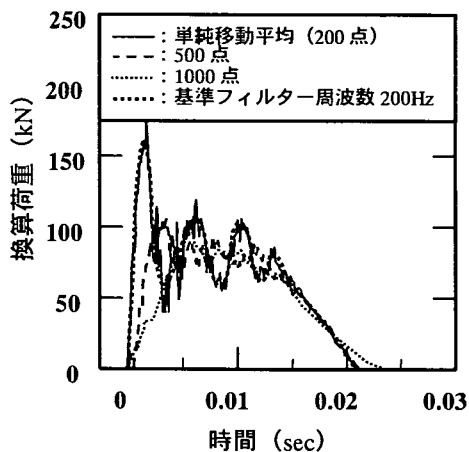
(5) 波形処理の妥当性の検討

衝撃力特性を評価するための波形処理は必要不可欠であるが、どのような波形処理方法を用いても計測された波形は処理によってある程度歪められる。そのため、波形処理後の波形の歪みが許容範囲内にあるかどうかについて一定の判断基準を定めて検討する必要がある。

歪みの度合いを検定するためには、標準となる「真値」



(a)ロードセル



(b)加速度計

図-18 単純移動平均法による処理波形 (ケース3)

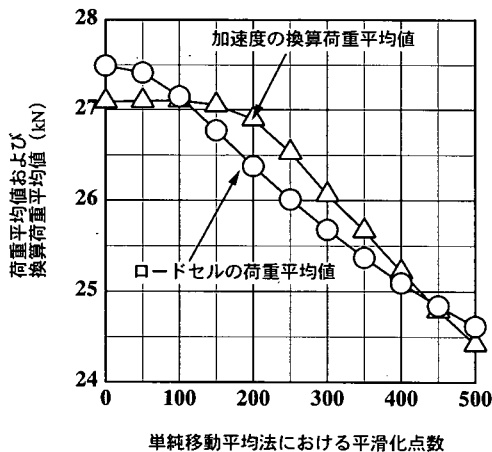


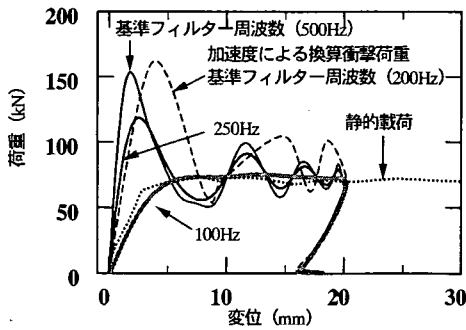
図-19 データ平均値と平滑化点数の関係

すなわち「正しい波形」が必要である。しかしながら、これがブラックボックスそのものなのである。そこで、波形処理の妥当性を何らかの形で確認するには、理論的・解析的手法により得られた結果との比較による方法が考えられる。しかし、衝撃問題に適応可能な有効な解析ツールが十分に確立されていないことや、理論解析的に衝撃力を同定する試み^{18), 19)}も対象となる衝撃現象が極めて単純なものに限られている現状を考慮すると、現在のところ、理論的もしくは解析的な手法を用いて波形処理の妥当性を検討することは難しい。

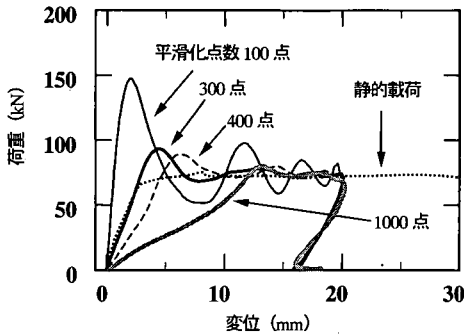
以上のような現状を踏まえ、ここでは、RCはりの曲げ衝撃実験の計測データに対する波形処理の妥当性を、既往の研究成果^{9), 20)}との比較によって検討する一例を示す。

岸ら⁹⁾は、両端を単純支持したRCはりに対する低速度の落錘衝突実験において支点反力をロードセルで計測し、RCはりの衝撃破壊時の最大支点反力は静的曲げ耐力と同程度か若干上回る程度であることを報告している。また高橋ら²⁰⁾は、衝撃あるいは動的な荷重に対するRCはりの見かけ上の剛性は、材料のひずみ速度効果などによって静的な場合より大きくなることを指摘している。いずれの研究結果も、慣性力の影響が比較的小さい衝撃実験から得られたものであり、衝撃曲げ強さに相当する耐力を評価した場合である。より高速度の衝突実験では、衝突直後に被衝突体(試験体)の慣性力の影響が大きいため、衝突点荷重が支点反力以上の耐力を示すことが明らかである。したがって、波形処理後の衝撃荷重～変位関係においても、衝撃力に対する部材の耐力や剛性は静的荷荷の場合と同程度かそれを上回るように波形処理上の下限値を確認する必要がある。

図-20は、RCはり実験のケース3で得られたロードセルの荷重データに対する波形処理後の荷重～載荷変位関係を、静的荷荷に対する荷重～変位関係と比較したものである。比較のため、基準フィルター周波数で処理した加速度からの換算衝撃荷重による荷重～変位関係も示している。なお、変位の計測にはレーザ式非接触変位センサー(応答周波数915Hz)を用いているので、変位データには高次成分の波は含まれていない(図-10(c)参照)。同図(a)のフィルター周波数による波形処理の場合では、フィルター周波数を100Hzに設定して処理した荷重～変位関係は、静的荷荷時の荷重～変位関係とほぼ一致している。すなわち、先に述べた部材の衝撃応答特性を満足しておらず、衝撃実験による結果の評価とは言えない。荷重～変位関係における見かけの初期剛性(載荷初期の立ち上がり勾配)は、フィルター周波数を小さ



(a) フィルター周波数を設定して処理した場合



(b) 単純移動平均法で処理した場合

図-20 波形処理法による荷重～変位関係の違い

くすることで次第に緩やかになるが、基準フィルター周波数 (500Hz) で処理した場合には静的載荷時よりも初期剛性が高い。これに対して、同図(b)の単純移動平均法で処理した場合は、平滑化点数の大小が初期剛性に大きな影響を与えることがわかる。

波形処理結果に対する以上の検討から、提案した処理方法で求めた基準フィルター周波数による波形処理は工学的にも妥当な方法であると考えられる。

6. 結言

本研究は、「信頼性のある衝撃実験データを得る」という観点から、具体的な衝撃荷重の計測とその処理方法について検討したものである。本研究は以下のように要約できる。

- (1) RC はりに対する重錘落下方式の衝撃実験を行い、計測された 2 種類の衝撃荷重 (ロードセル、加速度からの換算衝撃力) 波形を考察し、波形処理に考慮すべき要件を評価した。
- (2) 衝撃荷重波形のデータ平均値を用いたフィルター周波数の決定方法を検討した。すなわち、ローパスフィルターの周波数を逐次に変化させてデータ平均値を求め、

データ平均値がほぼ一定値を示す範囲から急に減少する境界の周波数を基準フィルター周波数と定義し、これを用いてフィルター処理する方法を提案した。

(3) 提案した波形処理法により、計測データを処理し、その妥当性を検討した。その結果、処理前に大きく異なっていたロードセルの衝撃荷重と加速度からの換算衝撃力波形は、基準フィルター周波数で処理することによりほぼ一致した。

(4) 提案した手法と単純移動平均法を比較、検討した。単純移動平均法でも平滑化点数を適当に調整することで、提案手法と同様な衝撃力波形を得ることができるが、平滑化点数の決定法に問題が残ることがわかった。

(5) 提案手法により波形処理した衝撃力と変位データより求めた荷重～変位関係と静的な荷重～変位関係を比較することにより、本法の工学的妥当性について検証した。

なお、図-15 に示した波形処理手順においては、最終的な波形処理の結果に対する妥当性の検討がまだ不完全な部分を残している。それは、現在のところ解析的な検討が遅れていること、および衝撃力波形の処理に関する研究が少なく処理方法の適用性を定量的・定性的に評価するのに必要な信頼性の高い衝撃荷重データが十分に得られていないことによるもので、今後検討すべき課題と考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ 6，平成 6 年。
- 2) 藤井学，宮本文徳：衝撃荷重下におけるコンクリート構造物の挙動，コンクリート工学，Vol.21，No.9，pp.25-36，1983.9。
- 3) 井元勝慶，大野友則，佐々木晃，小暮幹太：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性，構造工学論文集，Vol.41A，pp.1201-1212，1995.3。
- 4) 近藤博，飯沼孝一，浦丸剛，沢田純：土の高速試験装置におけるロードセルの動的特性について，土木学会論文集，No.581/VI-37，pp.123-130，1997.12。
- 5) 小暮幹太，酒巻勝，喜多龍一郎，藤掛一典，大野友則：衝撃実験における種々の荷重計測方法に関する検討，第 3 回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.145-149，1996.6。
- 6) 三上浩，岸徳光，松岡健一，田村富雄：低速度衝撃を受ける RC 梁の耐衝撃設計法の一提案，構造工学論文集，Vol.42A，pp.1255-1260，1996.3。
- 7) 佐治泰次，松藤泰典，大久保孝昭：脆性材料を対象とした衝撃曲げ強さの評価法に関する基礎的研究，建築学会構造系論文報告集，第 358 号，昭和 60 年 12 月。
- 8) 佐藤昌志，岸徳光，三上浩，松岡健一：大型 RC 版の耐衝撃特性，構造工学論文集，Vol.43A，pp.1499-1506，1997.3。

- 9) 1) p.59
- 10) 梅田章：動的力計測の現状と問題点，計測と制御，Vol.27，No.6，pp.69-74，昭和63年6月。
- 11) 中野修，岸徳光，後藤雪夫，今野久志：衝撃実験の計測方法とデータ処理に関する一考察，土木学会北海道支部論文報告集，pp.89-94，平成3年度。
- 12) 松葉美晴，音田奨，佐藤彰，後藤吉晴，岡畑博子，井上理恵：衝撃実験における測定方法についての一考察，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.1-6，1992.6。
- 13) 南茂夫：科学計測のための波形データ処理，CQ出版社，1994.4。
- 14) Holzer,A.J., Brown,R.H. : Mechanical Behavior of Metals in Dynamic Compression, *Trans. of the ASME, Jour. of Eng., Material Tech.*, Vol.101, pp.238-245,1979.
- 15) 三谷政昭：デジタルフィルタデザイン，昭晃堂，平成6年。
- 16) 中村尚吾：ビギナーズデジタルフィルタ，東京電気大学出版局，1991年。
- 17) 酒巻勝，佐々木晃，小暮幹太，藤掛一典：衝撃実験データの適正処理方法についての一考察，第22回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.72-73，平成6年度。
- 18) 柴田俊文，須藤敦史，三上隆：時刻歴の重みを考慮した梁に作用する衝撃力の同定，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.211-214，1998.6。
- 19) 三上隆，柴田俊文，佐藤昌志，須藤敦史：梁と剛球の接触条件を考慮した衝撃荷重の一計算法，第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp.215-218，1998.6。
- 20) 高橋芳彦，大野友則，太田俊昭，日野伸一：高速荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの終局限界変形量の推定法，土木学会論文集，No.432/I-16，pp.99-108，1991.7。

(2002. 3. 25 受付)

MEASURING FORCE-TIME VARIATIONS AND DATA PROCESSING PROCEDURE IN LOW-VELOCITY IMPACT TESTS FOR RC BEAMS

Masuhiko BEPPU , Kanta KOGURE, Masaru SAKAMAKI and Tomonori OHNO

In designing structures that are subjected to impact/impulsive loads, the equivalent static force, which is based upon consideration of the dynamic load factor (D.L.F), have been currently employed. For this design procedure, which focuses attention on the maximum of forces, deflections and stresses even though they are time varying values, it may be hardly assured the safety of structures against impact/impulsive loads. From the perspective that how to enhance the reliability of the data from impact tests, this study is to disclose the problems on both measuring the impact force-time variations in tests and processing their recorded data waves. Consequently, the low-velocity impact tests for RC beams are performed, and then the data processing procedure proposed in this study is validated.