

I-16

連続衝撃測定センサーの特性試験とその考察

北海道開発局開発土木研究所 正会員 今野久志

北海道開発局開発土木研究所 正会員 佐藤昌志

北海道大学工学研究科 ○学生会員 川村洋平

北海道大学工学研究科 正会員 氏平増之

1. はじめに

筆者等はフェルミ準位が異なる 2 つの電気材料が接触、分離した時に発生する静電気信号を利用する振動検出用連続衝撃測定センサーを用い、落石検知システムに関する研究を行ってきた¹⁾²⁾。これまでの室内、フィールド実験を通じ、連続衝撃測定センサー出力電圧から、落石の時刻、位置、およそその重量を検出出来ることが判明した³⁾。これまで、連続衝撃測定センサー出力電圧と加速度との関係についての基礎研究は行ってきたが、その周波数特性については未確認であった。また実用化を前提とした場合、連続衝撃測定センサーの出力電圧は A/D 変換し、これを回線、携帯電話回線等で伝送する必要が生じる。この時、A/D 変換速度を上げるとデータは詳細なものになるが、伝送には時間を要する。このため、A/D 変換におけるサンプリング周波数についての検討を必要とした。

上記の 2 点を明らかにすべく、室内実験を行った。実験室のコンクリートの床に連続衝撃測定センサー及び加速度計を設置し、重錘の落下にともなう振動測定を行った。実験では、重錘の落下高さ及びデータロガーのサンプリング周波数を変化させて計測を行い、加速度と連続衝撃測定センサー出力電圧の出力比（伝達関数に近似しているため、以後伝達関数と表現）を周波数領域で求め、連続衝撃測定センサーの周波数領域での特性を明らかにしようとした。

2. 実験と解析方法

連続衝撃測定センサーを覆道等の構造物や岩盤斜面に直接又は落石防護ネットを介して敷設する際の敷設方法としては、コンクリート構造物に埋め込む、コンクリート構造物の表面に全面的に張りつける、岩盤斜面に一定間隔で止め付ける、落石防護ネットに一定間隔で止め付ける、など様々な敷設方法が考えられる。また、長さについても 1、2m～300m の範囲であれば、現場状況に応じた長さで利用できるが、本実験では連続衝撃測定センサー長を 10m と決定した。長さ 10m に特別の意味はない。実験では全長 10m の連続衝撃測定

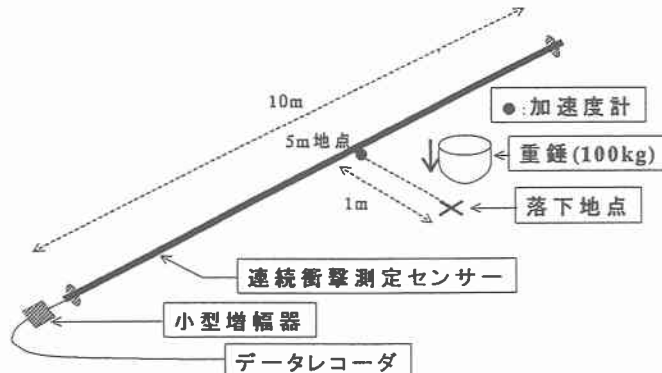


図-1 実験の概念図

On the Study of Characteristics of String Sensor for Vibration Detection.

By Hisashi KONNO, Masashi SATO, Youhei KAWAMURA, Masuyuki UJIHIRA.

センサーをコンクリートの床に引き伸ばし、連続衝撃測定センサーの中心から垂直に 1m の地点に 100kg の重錘を落下させ衝撃入力を与えた。また、連続衝撃測定センサーの中心に加速度計を取り付け、同時に加速度を計測した。連続衝撃測定センサー及び加速度計の設置状況を図-1 に示す。連続衝撃測定センサーはコンクリート構造物の表面又は、比較的凹凸の少ない岩盤斜面に 10m 間隔で敷設する場合を想定し、両端のみをエポキシ系接着剤でコンクリート床へ固定した。したがって、中間の部分は、コンクリート床に軽く接触している状態にある。加速度計はひずみゲージ式を使用し、共和電業社製 AS-100HA (定格 100G) を瞬間接着剤で接着した。重錘の落下高さは、10cm から 50cm まで変化させた。また、連続衝撃測定センサーの出力電圧は連続衝撃測定センサーの一端に小型の増幅器を取り付け 5 倍増幅した。出力された信号はデータレコーダの磁気テープに収録した。その後、磁気テープに収録された連続衝撃測定センサー出力波形と加速度波形をサンプリング周波数 1kHz、2kHz、5kHz、10kHz の 4 種類で A/D 変換し、解析に用いた。それぞれの連続衝撃測定センサー出力波形と対応する加速度波形に対し FFT 処理を行い、周波数領域での表示に変換した。

ひずみゲージ型加速度計の周波数特性曲線は図-2 のようであり⁴⁾、平坦部の周波数帯域を計測可能帯域としている。連続衝撃測定センサーについては同図に対応するような周波数特性線図は存在しないし、著者等も作成していない。同図に対応する周波数特性試験は、加振器を用いて行うべきものであるが、これを加速度波形のフーリエスペクトルと連続衝撃測定センサー波形のフーリエスペクトルの比から推定しようとした。具体的には、加速度波形 $f(t)$ を入力、連続衝撃測定センサー出力波形 $h(t)$ を出力とみなした時の伝達関数 $H(\omega)/F(\omega) = G(\omega)$ を導く⁵⁾。

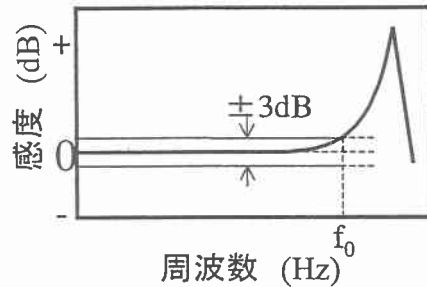


図-2 ひずみゲージ型加速度計の周波数特性曲線

3. 測定結果

図-3 に測定結果の典型的な波形例を示す。図-3 の波形は重錘の落下高 50cm のときの出力波形であり、(A) は連続衝撃測定センサーの出力電圧波形、(B) は加速度 (単位 G) の波形である。サンプリング周波数は 10kHz を使用している。それぞれの最大値は加速度約 60G に対し連続衝撃測定センサー出力電圧は約 6V、最小値は加速度約 -40G に対し連続衝撃測定センサー出力電圧は約 -4V を示していた。図-3 から加速度波形と比較した時の連続衝撃測定センサー出力波形の特徴としては、一見して周波数が低いことと、波形の持続時間が長いこと等が読みとれる。また、加速度と連続衝撃測定センサー出力電圧の関係をプロットしたのが、図-4 であり、両者の間には明らかにベキ関数的な関係が存在している。サンプリング周波数は図-3 と同様に 10kHz を使用している。

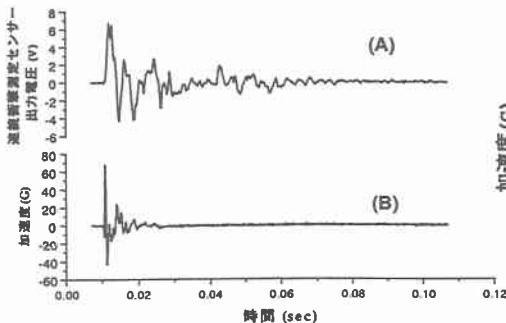


図-3 出力波形

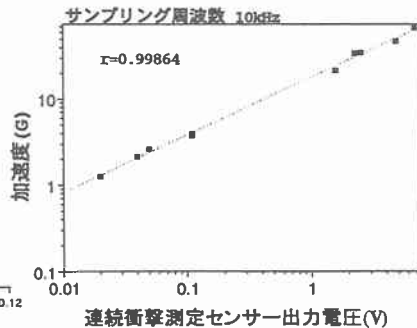


図-4 加速度と連続衝撃測定センサー出力電圧の関係

4. 周波数領域における測定結果の分析

4.1 FFT 処理と周波数領域における伝達関数

図-5 は図-3 の典型的な波形に FFT 処理を行ったものである。図-5 の (A) は連続衝撃測定センサー出力波形のフーリエスペクトル、(B) は連続衝撃測定センサーの中心に隣接している加速度計のフーリエスペクトルを表わしている。図-5 の (C) はそれぞれのフーリエスペクトルを (B) を分母、(A) を分子として求めた伝達関数である。(D) は (C) を平滑化したものである。(C) (D) の曲線が周波数領域における伝達関数を示している。これ以降の議論はこの平滑化された (D) の周波数領域における伝達関数を用いて行う。もし連続衝撃測定センサーと加速度計が同じ周波数特性を有するならば図-5 の (C) は水平な直線となる。

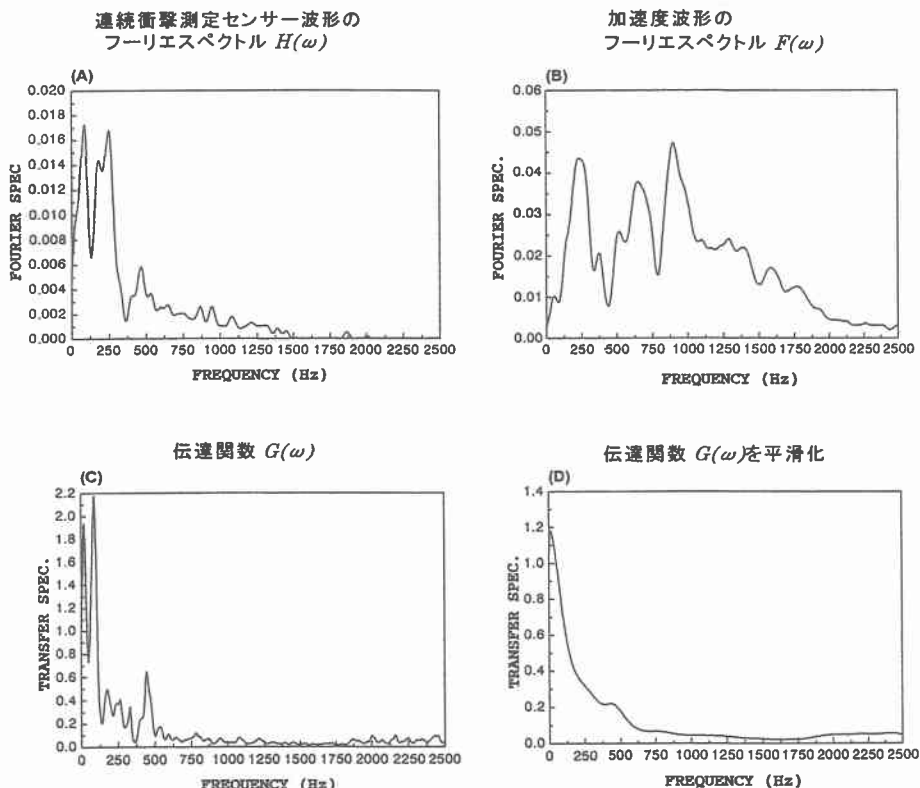


図-5 周波数領域における分析の処理手順と結果の一例

4.2 サンプリング周波数の違いによる伝達関数の変化

図-6 の (A) (B) (C) (D) は、一旦データレコーダの磁気テープに収録された連続衝撃測定センサーの出力波形と、同一の実験の加速度波形を A/D 変換、FFT 処理を行い、伝達関数 $H(\omega)/F(\omega) = G(\omega)$ を求め、図示したものである。同図 (A) は A/D 変換時のサンプリング周波数を 1kHz とした時の伝達関数 $G(\omega)$ である。また、同図 (B), (C), (D) はサンプリング周波数をもう少し高くし、それぞれ 2kHz、5kHz、10kHz としたときの伝達関数 $G(\omega)$ である。また、図中の太い曲線が平均値を示している。周知のとおり、FFT 処理を行った場合には、横軸の周波数は、サンプリング周波数を N とするとフーリエ係数を $N/2-1$ Hz まで算出することが可能である⁵⁾⁶⁾。したがって、図-6 (A) のサンプリング周波数 1kHz の場合には、周波数 500Hz までとなる。4

つの図では、サンプリング周波数を 1kHz の場合に横軸を合わせてある。図-6 (A) によると、サンプリング周波数が 1kHz では落下高の違いによるデータのバラツキが大きい、その $G(\omega)$ は 0.2 でほぼ一定となっている。一方、図-4 (B) (C) (D) からサンプリング周波数が 2kHz 以上になると徐々に 250Hz 以下の低周波の $G(\omega)$ が大きくなっていることがわかる。しかし、サンプリング周波数が 2kHz では落下高さによるバラツキが大きい。次にサンプリング周波数 5kHz の図-6 (C) と 10kHz の図-6 (D) を見てみると、伝達関数 $G(\omega)$ の平均値、形状、バラツキがほぼ等しくなっている。また 250Hz 以下の低周波において若干の入れ替わりはあるが重錘の落下高が高い、つまり衝撃入力が高い時のほうがその $G(\omega)$ が大きくなる傾向がみられる。もう一つの大きな特徴としては 400Hz から 500Hz の辺りで重錘の落下高さによる影響がみられなくなるレンジが存在し始めていて、その値が約 0.2 であることである。

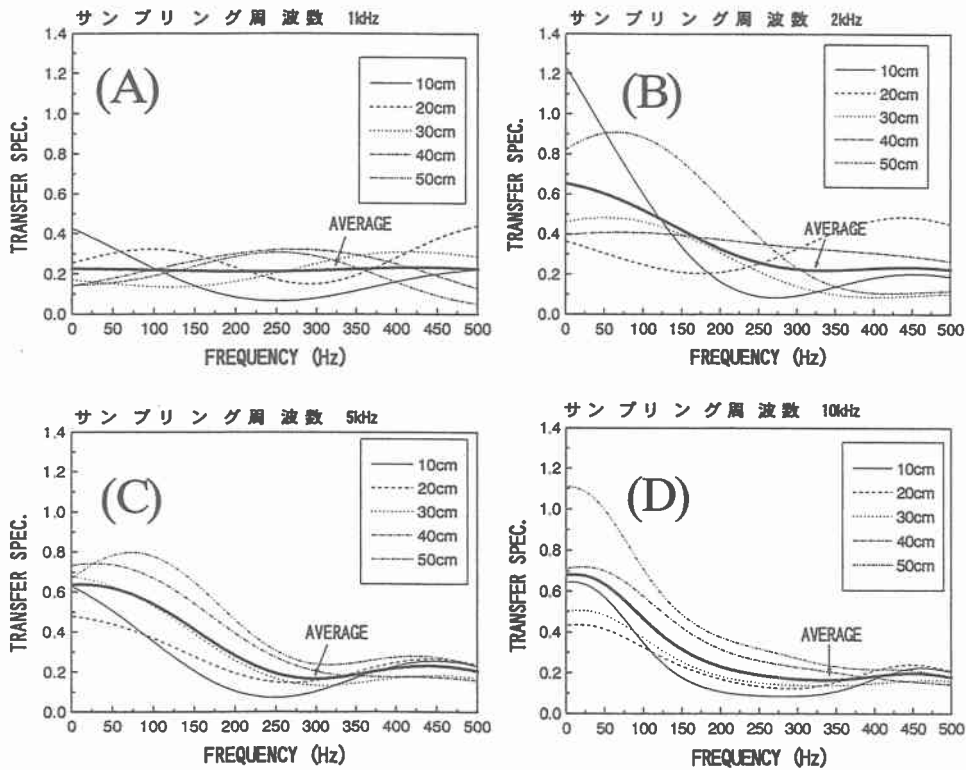


図-6 周波数領域における連続衝撃測定センサー出力波形と加速度波形の出力比

A/D変換におけるサンプリング周波数が10kHzの場合と5kHzの場合の伝達関数には類似性がみられるため、周波数領域を2500Hzまで拡張して $G(\omega)$ を示したのが図-7である。同図(A)が5kHz、(B)が10kHzに対応している。この図-7からはサンプリング周波数が5kHzと10kHzでは2500Hzまでの高周波域でも出力比の傾向はほぼ同じになり、約700Hz以上ではその出力比が約0.07で一定になることがわかった。

以上、サンプリング周波数の違いによる加速度波形を入力とし連続衝撃測定センサー出力波形を出力とした伝達関数の変化について検討した。サンプリング周波数は出力波形の持っている情報を損なわないためにも、高ければ高いほうがよい。しかし、当然それに伴いデータ量が増加する。今回の実験においては、サン

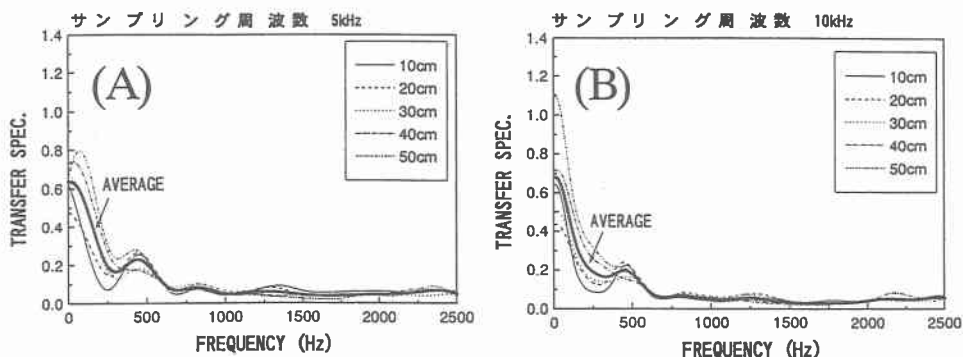


図-7 サンプルング周波数 5kHz、10kHz の比較

プリング周波数 10kHz の波形が波形としての情報を最も多く持っているわけだが、データ量としてはサンプルング周波数 1kHz のときの 10 倍となる。このことから、問題はサンプルング周波数をどれだけ下げられるか、ということになるが、今回の実験のように連続衝撃測定センサーを用いる場合にはサンプルング周波数 10kHz の時とはほぼ同様の周波数特性を示す 5kHz 付近までは下げ得る可能性のあることがわかった。また、サンプルング周波数を 1kHz まで下げるとその周波数特性は大きく変わってしまうが、0Hz から 500Hz までの $G(\omega)$ が平坦になるという現象が現われている。またデータ量もサンプルング周波数 10kHz のときの 10 分の 1 となる。これらのことから、サンプルング周波数が低くても利用目的によっては有用なこともあると考えられる。

4.3 振動区間の違いによる伝達関数の変化

図-8 は連続衝撃測定センサーの固定区間の長さを 10m から 2.8m、2m、1m、0m と狭めていき、振動区間を変化させた時の伝達関数の変化を示している。サンプルング周波数は 10kHz を使用している。図-8 から多少のバラツキはあるが、振動区間を変化させても周波数領域における出力比の傾向としてはあまり変化がみられなかった。低周波領域における出力比の平均が図-6、7 の事例にくらべ増加したのは、この図に使用しているデータがすべて重錘の落下高 50cm のものだったことによると考えられる。

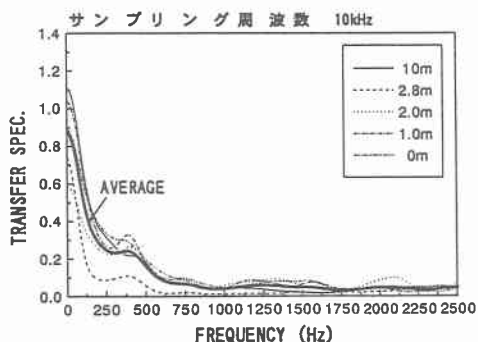


図-8 振動区間の違いによる伝達関数の変化

5. まとめ

以上、本論文では連続衝撃測定センサーの基本特性のうちの一つである周波数領域での特性について、また出力波形のサンプルング周波数をどこまで下げ得るかの問題について実験を行い、実験結果を検討した。実験回数とパラメータスタディーは十分とは言えないが、今までに得られている結果は次のようである。

- (1) 連続衝撃測定センサーの出力電圧と加速度測定値の間には、従来の研究で認められているのと同様のベ

キ関数的な関係が存在している。

- (2) 加速度波形を入力とし、連続衝撃測定センサー出力波形を出力とした伝達関数を求めたところ、伝達関数 $G(\omega)$ は周波数が 0～700Hz の間では指数関数的な減少を示し、700～2500Hz の帯域では、一定値になる傾向がみられた。連続衝撃測定センサーは 0～700Hz 内の帯域では入力周波数が低いほど感度が高い。
- (3) 伝達関数の変化の様相を検討したところでは、連続衝撃測定センサーの出力波形の A/D 変換におけるサンプリング周波数は 5kHz より大きく設定することが好ましい。ただし、今後更なる検討が必要である。
- (4) 本研究で試みた周波数領域での出力波形の解析を進めることで、連続衝撃測定センサーの出力特性をより明瞭に出来ると考えられる。

尚、本研究については精力的に上記のような基礎研究と、応用研究を平行して進め、できるだけ早期に実用化を図りたいと考えている。

参考文献

- 1) 小川健太・氏平増之・鈴木新吾・細谷昭悟・石井文明・皿田 滋：振動検出用ケーブルセンサの出力特性と応用に関する研究、応用地質、Vol. 39、No. 4、p. 380～390、(1998)
- 2) 氏平増之・鈴木新吾・細谷昭悟・佐伯 浩・川北 稔・皿田 滋：ケーブルセンサによる模擬トンネルへの落下物衝突位置の標定に関する研究、応用地質、Vol. 39、No. 5、p. 423～432、(1998)
- 3) 氏平増之・鈴木新吾・佐伯 浩・駒崎征明・平間和夫・川北 稔：ケーブルセンサと移動通信網を用いた落石検知システムの現場実験、寒地技術論文・報告集、Vol. 13、No. 2、p. 631～637、(1997)
- 4) 片岡照栄・柴田幸男・高橋 清・山崎弘郎：センサハンドブック、培風館、p. 456～461、(1986)
- 5) 大崎順彦：地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版、p. 82～98、(1977)
- 6) 日野幹雄：スペクトル解析、朝倉書店、p. 205～209、(1989)