

I-18

連続衝撃測定センサーを用いた落石感知に関する基礎実験

北海道開発局開発土木研究所 正会員 中井健司

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 ○学生会員 今野慎也

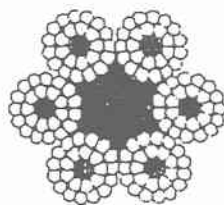
北海道大学工学研究科 正会員 氏平増之

1. はじめに

表題の連続衝撃測定センサーは、岩盤斜面にこれを線状に、あるいは面状に敷設することにより、落石危険箇所における落石頻度や岩盤斜面に対策工を施している最中の落石の状況を監視するのに利用できる可能性がある。ただし、現存の連続衝撃測定センサーは、外径が約 5mm の同軸ケーブルと同様のものであり、高い機械的強度は期待できない。このため、実用に際しては、強度的な補強を施す必要がある。著者等は機械的強度を高める一つの方法として、原形の連続衝撃測定センサーをスチールワイヤの中心部に巻き込む方法を試みている。この場合、連続衝撃測定センサーが本来有している出力感度が低下する恐れがある。このため、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーを用いて、従来の連続衝撃測定センサーとの感度の比較を行う必要が生じた。この研究では、連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーを近接させて平行に設置し、両者の感度の比較を行った。実験においては、落石に見立てた重錘を落下させて衝撃入力を与えた。その際、重錘の重さ、落下点～センサまでの距離を変化させた。また、出力信号を増幅する回路のノイズ除去用フィルタが出力信号に与える影響についても試験を行った。本論文ではこれらの研究結果を述べ、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの実用性に関する検討を行う。

2. 実験および解析方法

本研究で試作したスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの断面形状は、図-1に示すように、素線 24 本で構成されるストランド 6 組をより合わせ、スチールワイヤの心材の代わりに連続衝撃測定センサーを巻き込んだ構造を持っている²⁾。スチールワイヤの外径は 12mm、素線径は 0.67mm である。また、重要なスチールワイヤの引っ張り強度は 7tf である。したがって、中心部の連続衝撃測定センサーは、素線を介して外部からの振動を感知することになる。本実験では、長さ 10m のスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーと元の連続衝撃測定センサーを併用し、重錘の落下衝撃を測定した。実験には、コンクリート床を用い、全長 10m の連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの中心 1 点だけを図-2 のように接着した。中心以外は厚さ 10cm のスポンジブロックを 50cm おきに床とセンサ間に挿入し浮かせた状態になっている。連続衝撃測定センサーの中心から垂直に 1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0m 離れた地点に衝撃を入力した。衝撃力は、7.25kg、50kg、100kg の鋼球を落下させて与えた。それぞれ落下高さは 30cm とした。また、連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの中心点と、中心点から 1.0、2.0、3.0m 離れた両センサー上に加速度計を取り付け加速



外径 12mm
素線径 0.67mm
引っ張り強度 7tf

図-1 スチールワイヤの断面図

Fundamental Study on Rock Fall Detection Using String Sensor for Vibration Detection.

By Kenji NAKAI, Masashi SATO, Shinya KONNO, Masuyuki UJIHIRA.

度も同時に測定した。これは、コンクリート床から1点を通して伝播してきた弾性波が連続衝撃測定センサー沿いにどの範囲まで伝わるかを調べるために取り付けたものである。連続衝撃測定センサーおよびスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーのコンクリート床への取り付けはエポキシ系接着剤で行った。なお、用いた加速度計はひずみゲージ型加速時計であり、2つの連続衝撃測定センサーの中心地点には定格 200g（共和 AS-200HA）、両連続衝撃測定センサーの中心から 1.0、2.0m 地点には定格 100g（AS-100HA）、3.0m 地点には定格 5g（AS-WOA）を接着した。両連続衝撃測定センサーの一端には増幅器を取り付け、出力電圧を 5 倍増幅した。2本の連続衝撃測定センサー及び加速時計の出力信号は、サンプリング周波数 20kHz のデータログを用いて取り込み、パーソナルコンピュータ上で、波形出力、FFT 処理等を行った。

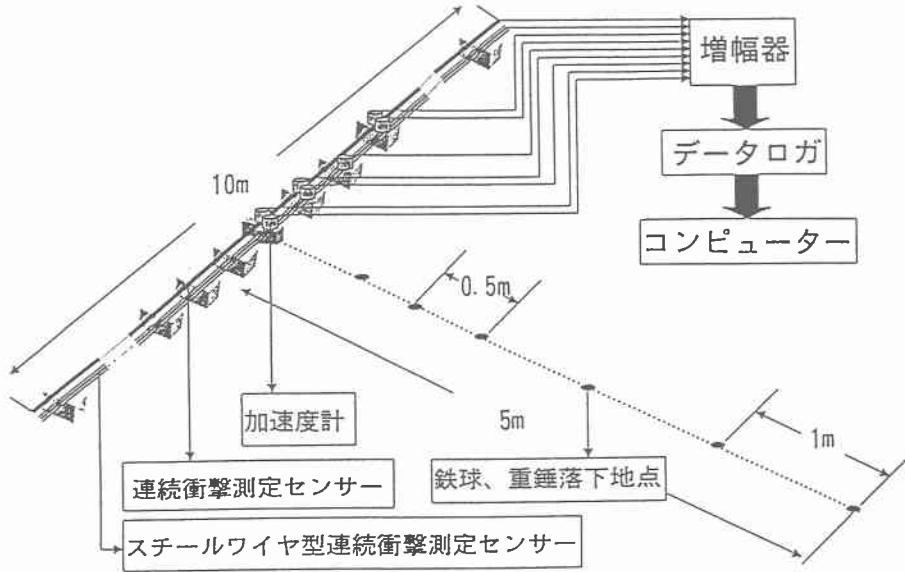


図-2 実験概要図

3. 実験結果

3.1 連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力波形と周波数特性

ここでは、連続衝撃測定センサーをスチールワイヤ内に巻き込むことで、どのように出力波形が変化するかを調べた。図-3 が連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力波形例である。横軸を時間 (msec) とし、縦軸を出力電圧 (mV) で表示している。この波形は、100 kg の重錘を図-1 の落下点 1 m の位置に、高さ 30 cm から落下させた時の波形例で、本実験の中では衝撃入力が最も大きいケ

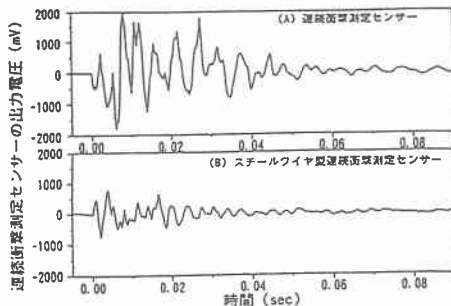


図-3 出力波形例

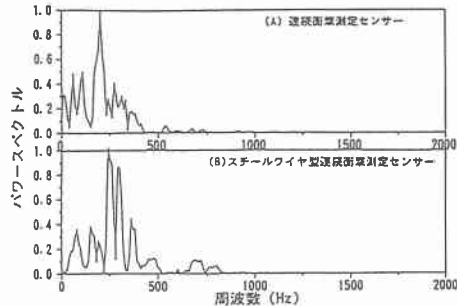


図-4 パワースペクトル例

ースの例である。図によると、連続衝撃測定センサーは最大 2000mV の出力を示しておりかなり大きい出力電圧といえる。これに対し、スチールワイヤ型衝撃測定センサーでは 800mV の出力電圧になっている。確かに、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力感度は原形の連続衝撃測定センサーの出力電圧にくらべ約 0.4 倍に低下しているが、出力値 800mV は十分な出力電圧といえる。次に波形の持続時間についてみると、連続衝撃測定センサーの波形持続時間は約 60msec、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの波形持続時間は約 50msec であった。波形持続時間はスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの場合、元の連続衝撃測定センサーの持続時間の約 0.8 倍になっている。これは、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーがより剛な材料で拘束されているからとみられ、常識的な解釈と一致している。

次に、図-4 は、図-3 に示された 2 つの出力波形に高速フーリエ変換を施して得られたパワースペクトルである。図-4 (A) は連続衝撃測定センサーの パワースペクトルであり、卓越周波数は 200Hz 付近にある。図-4 (B) はスチールワイヤ型衝撃測定センサーのパワースペクトルであり、卓越周波数は 250Hz 付近にある。両連続衝撃測定センサーのパワースペクトルを比較してみると、連続衝撃測定センサー出力波形は比較的周波数成分のばらつきが小さく、0~500Hz の間にまとまっている。一方、スチールワイヤ型衝撃測定センサーのパワースペクトルには 500Hz 以上の周波数成分も多めに含んでいる。

以上のように、実験回数は少ないが、スチールワイヤ型衝撃測定センサーは、連続衝撃測定センサーをスチールワイヤ内に巻き込み強度補強を行ったことで低下している。ただし、許容範囲内におさまっている。また、スチールワイヤ内に巻き込むことで卓越周波数が高い方へスライドすることが認められた。この点も大きい支障になるとは考えられない。

3.2 連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの感度の比較

上で述べたスチールワイヤ型衝撃測定センサーの出力感度の変化をもう少し全体的に見るため、7.25kg、50kg、100kg の 3 種類の重錘を落下させて実験を行った。回数は 15 回であり、加速度と連続衝撃測定センサーの出力電圧の関係を図-5 にまとめている。図中の▲印が連続衝撃測定センサーによる測定結果であり、●がスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーによる測定結果である。図によると、上で述べたようにどの落下試験の場合にもスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力電圧が低くなっている。しかし、いずれの場合にも 200mV 以上の出力は得られており実用上の問題はないと考えられる。

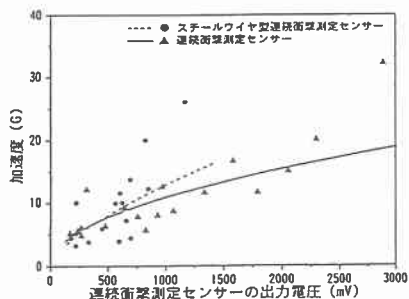


図-5 連続衝撃測定センサーの
出力電圧と加速度の関係

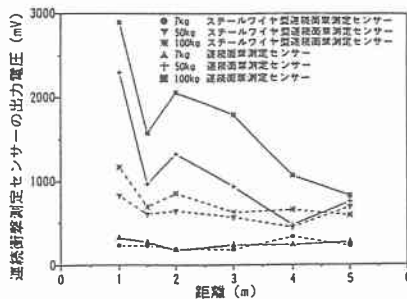


図-6 連続衝撃測定センサーの
出力電圧と距離の関係

図-6 は図-1 の重錘落下点を連続衝撃測定センサーの中心から直角方向に 1~5m まで離しながら行った実験の、連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力電圧との関係をプロットしたものである。7kg の鋼球を落下させた場合では、両連続衝撃測定センサーとも距離を変えても、際立った出力電圧の変化は見られなかった。50kg の鉄球を落下させた場合では距離を変えた時に、破線で示した

スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーにおいてはあまり出力電圧の変化は見られなかったが、実線で示した連続衝撃測定センサーでは距離が小さいほど出力電圧は大きくなっている。100kg の重錘を落下させた場合では、両連続衝撃測定センサーとも距離が小さいほど出力電圧は大きくなっている。

このように、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの、中心部に巻き込まれている受感部に対する拘束効果は、衝撃入力が大きいくほど顕著に表れている。低周波領域の周波数成分ほど拘束の影響を大きく受けている可能性があるが、定量的な理由については今後これを明らかにすべきと考えている。

3.3 連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ形衝撃センサの振動減衰特性

2節の実験方法で述べたように、この実験では、連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの中心（振動入力点）と、中心からセンサ沿いに1m間隔で加速度計を取り付け、ケーブル状のセンサーの外被とスチールワイヤ型衝撃測定センサーのワイヤ表面の振動を測定している。入力点からどの範囲までセンサーが機械的振動をしているかを見るためである。

図-7 は鋼球 7.25kg、50kg、重錘 100kg をセンサーからの垂直距離 3.0m 地点に落下させた時の、両連続衝撃測定センサー上に取付けた各加速度計の最大出力値と、センサー中心からの距離との関係をプロットしたものである。どの場合でも、両連続衝撃測定センサーの中心地点での加速度は両センサー間であまり差がない。両連続衝撃測定センサーの加速度の減衰状況を比較してみると、破線で示したスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーでは、センサー中心からの距離が 1.0m 地点での加速度はどの場合においても、0m 地点の約 3 分の 1 となっている。2.0m 地点では、加速度はさらにその約 2 分の 1、3.0m 地点で加速度はほぼ 0 となっている。その一方で、連続衝撃測定センサーは、センサー中心からの距離が 1.0m 地点で加速度がすでに 0 となっている。このように、機械的な振動自体はスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの方が入力点から広い範囲に及んでいる。ただし、3m 以内である。このことから、連続衝撃測定センサーの場合にはセンサーが出力電圧を発生させ得る範囲は入力点の両翼 ± 1 m 以内と推定され、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーでは入力点の両翼 ± 3 m 以内と考えられる。

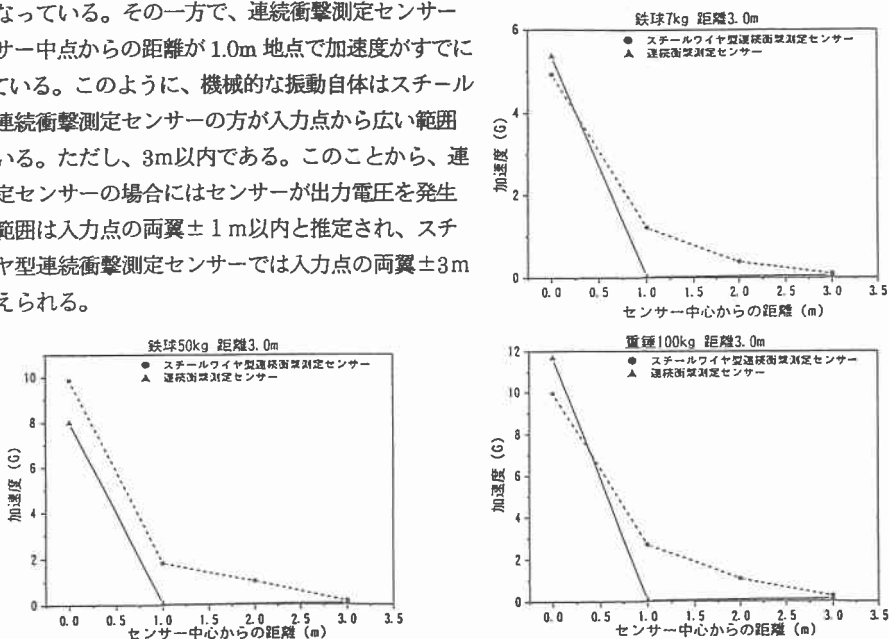


図-7 加速度と距離の関係

4. ハイパスフィルタの適用と出力波形の変化

今回の実験で使用した両連続衝撃測定センサーの一端に取り付けた増幅器は、フィルターを装着していないものであった。ノイズの問題から増幅器にハイパスフィルターを装着するか否かを検討した。フィルターに関連する試験においては、図-2 の連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの長

さを2mに取り替えて同様の実験を行った。ここでは、重錘重量は小さくし500gとした。この条件の下で、フィルタを装着しない場合と、フィルタを装着した場合の2通りの実験を行った。

まず、センサー長2mでハイパスフィルタを装着しない場合の連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの典型的な波形例を図-8に示す。この場合、重錘落下位置はセンサ中点から1mとしている。図-8(A)によると、連続衝撃測定センサーの出力電圧はプラス側で210mVであった。重錘重量が500gと小さいため図-3の100kgの重錘の場合より小さくなっている。同図(B)との比較では、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの振幅はほとんど同じであり原形の連続衝撃測定センサーはワイヤで拘束されているが出力は低減されていない。センサの長さが短いため拘束の効果が少ないからと考えられる。次に、図-9は図-8の2つの波形をFFT処理して描いたパワースペクトルである。同図(A)の連続衝撃測定センサーのパワースペクトルは、波形が500Hz以下の低周波数成分を多く含んでいることを示している。逆に、同図(B)のスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーのパワースペクトルは、波形が500Hz以上の周波数成分もかなり含んでいることを示している。いずれにしても、長さ2mのスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの場合のように、スチールワイヤの長さが短い場合にはスチールワイヤに原形の連続衝撃測定センサーを巻き込んでも出力感度にほとんど変化がなく、実用上支障はない。

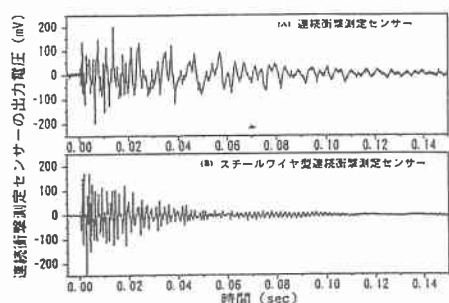


図-8 フィルタなしの場合の波形例

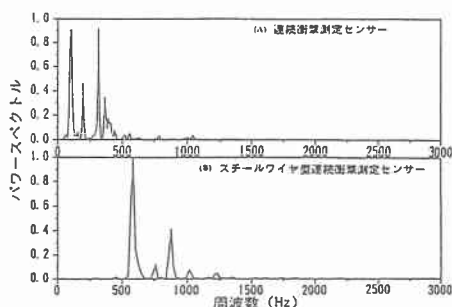


図-9 フィルタなしの場合のパワースペクトル例

次に、ハイパスフィルタ回路を増幅器後段に装着して行った実験結果を示す。図-10に今回用いたフィルタの周波数遮断特性を示す。このフィルタの減衰傾度は緩慢で十分と言えないが50Hz以下のノイズは完全にカットオフしている。ハイパスフィルタを装着して行った連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの典型的な波形例を図-11に示す。図-11によると、連続衝撃測定センサーの出力電圧は約110mV、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力電圧は約450mVであった。

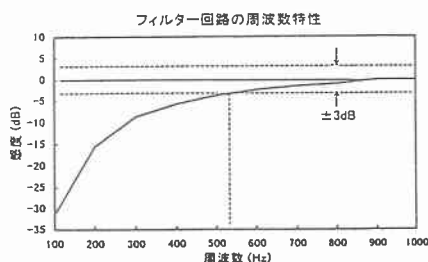


図-10 フィルタ回路の周波数特性

すなわち、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力電圧のほうが約4倍も大きく、前節までに述べた結果と逆の現象が現われた。その理由は、低周波領域の振動入力に対する感度が高い連続衝撃測定センサーの低周波領域の出力がフィルタにより低減させられているからである。ハイパスフィルタの使用に関しては注意を要することを意味している。図-12は図-11の出力波形をFFT処理して得られたパワースペクトルである。パワースペクトルについてはハイパスフィルタを装着しているため、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーとスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの双方とも250Hz以下の周波数成分をほとんど含んでいない。同図(A)、(B)の比較では、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの周波数成分の方がより高い周波数帯域まで分布している。

以上、センサ長が短い2 m の場合には、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力電圧はスチールワイヤで拘束されていても出力電圧はほとんど低減せず、実用上の問題は生じない。また、測定に当たって増幅器の後段にハイパスフィルタを装着した場合には、低周波成分に対してより感度が高い連続衝撃測定センサーの低周波部分の振幅が低減される恐れがあるため注意を必要とする。50Hz のノイズレベルが許容値を超えない限りハイパスフィルタの使用は控えることが好ましい。

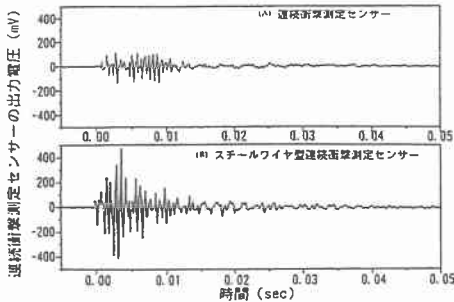


図-11 フィルタありの場合の波形例

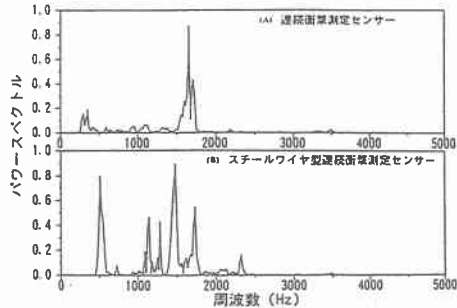


図-12 フィルタありの場合のパワースペクトル例

5. まとめ

本研究では、現存の連続衝撃測定センサーの機械的な強度を補強する目的で原形の連続衝撃測定センサーをスチールワイヤの中心部に巻き込んだスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーを試作し、両センサの出力感度を比較した。また、波形の周波数領域での特徴について調べるとともに、ノイズ除去用ハイパスフィルタの適用の是非について検討した。本研究で現在得られている中間的な結果をまとめると次のようである。

- 1) 連続衝撃測定センサーをスチールワイヤの中心部に巻き込んだスチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力感度は原形の連続衝撃測定センサーより低下する傾向があるが、実用上十分な出力電圧を示した。
- 2) スペクトル解析によると、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーは連続衝撃測定センサーより高い周波数の振動を感知しやすい。
- 3) スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーの出力波形の減衰時間は原形の連続衝撃測定センサーより短い。
- 4) 1点から衝撃入力を与えられた時、弾性波がセンサの軸沿いに伝播し信号源となり得る範囲は、連続衝撃測定センサーの場合両翼±1 m以内、スチールワイヤ型連続衝撃測定センサーでは±3 m以内と推定される。
- 5) ノイズ対策でハイパスフィルタを用いる場合には、特に、低周波領域での感度が高い原形の連続衝撃測定センサーの低周波領域の出力振幅が低減させられるため注意が必要である。極力フィルタは使用しないことが好ましい。

参考文献

- 1) M. Ujihira, K. Ogawa, S. Suzuki, S. Hosoya, H. Saeki and M. Komazaki: Two dimensional source location system for rock fall detection by using cable sensor and mobile multimedia network, Proceedings of 36th U.S. Rock Mechanics Symposium#, 【1/1(CD-ROM)315】 (1997)
- 2) 日本機械学会：機械工学便覧, 日本機械学会, 16, p.41-43, (1970)