

振動検出用ケーブルセンサによる落石検知に関する研究

Study on the rock fall prediction using cable sensor for vibration detection

小原健児*・氏平増之**・名和豊春**・川村洋平***

Kenji OHARA, Masuyuki UJIHARA, Toyoharu NAWA and Youhei KAWAMURA

It is observed that small scale rock falls occur along a slope before the occurrence of large scale rock failure. Authors have considered that rock fall detection could be carried out by the monitoring of small rock falls as the warning sign using steel wire cable sensor (SWCS). Amplifiers are attached to the end of each cable sensor. It is experienced that repair work of amplifier which is installed around the top of long slope is dangerous. To avoid this dangerous work, amplifier was moved to measurement house. In this paper, it was made clear from theoretical calculation and field test that amplifier could be shifted from the slope to indoor. Moreover, rock fall behaviors could be measured clearly by using this improved system.

Key words: slope failure, rock fall detection, steel wire cable sensor, amplifier, coaxial cable

1. はじめに

我が国の一般道路沿線における落石に対する要対策箇所は5万7千ヶ所¹⁾といわれ、より規模の大きい岩盤崩壊危険箇所も少なくない。また、石灰石や砕石を生産している露天掘り鉱山においても斜面が人の居住地、県道、生産設備等に近い場合、落石、岩盤崩落に対する予知と防止対策が必要である。門間ら²⁾は和歌山県天鳥橋西地区における岩盤モニタリングの結果、1993年3月、岩盤崩壊前に開口亀裂の相対変位、地表傾斜、AEイベント数、落石頻度等の急増現象が現れたと述べている。また、1989年7月16日福井県越前海岸覆道崩壊事故(15名死亡)では、崩壊1時間前から数度の落石音を釣り人が聞いている³⁾。1997年8月25日の北海道島牧村第2白糸トンネル巻き出し部の岩盤崩壊事故⁴⁾では、その3日後に、大小

の落石頻度が急増した後、2回目の崩壊が発生している。これらの研究結果と観測事例をみると、大規模落石や岩盤崩壊が何の前ぶれもなく発生するとは考えられない。著者らは、前兆的に発生する数～数十 kgの小礫や岩塊の落石頻度をモニタリングすることが大規模落石～岩盤崩壊の予知に有効であると考えている。

前兆的な落石の頻度を捉える試みは、1970年代、加速度計⁵⁾、導電線の切断⁶⁾、圧力検出用空気袋⁷⁾等を用いて行われたが研究は継続されていない。自然条件下で用いるセンサや計測システムには、十分な感度と精度のほか、耐水性、耐食性、堅牢性、簡易性、経済性等が要求される。これらの条件を満足し、広範囲の斜面に適用できる可能性を持つセンサに振動検出用ケーブルセンサがある。著者らは、1995年頃よりケーブルセンサの利用に関する研究を始め、「コンク

* 北大大学院工学研究科環境資源工学専攻 大学院生

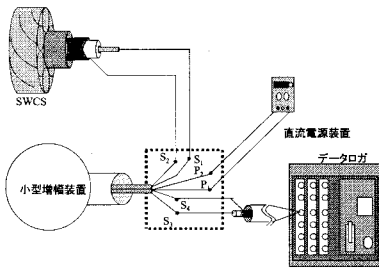
** 正会員 工博 北大大学院工学研究科

*** 正会員 博士(工学) 筑波大機能工学系

リート構造物に敷設した場合、落石物震源のソースロケーションができる」^{8)~11)}「防護ネットがある斜面に敷設した場合、防護ネット上を落下する人為的な落下物の震源、落下軌跡を検知できる」¹²⁾また、「防護網がなく岩盤が露出している斜面においても自然落石を検知できる」¹³⁾等のことを明らかにしてきた。

SWCS の使用にあたっては、従来からセンサ末端に小型増幅器を取り付けている。通年の計測結果によると、一部接続箇所への融雪水の侵入が見られ、印加電圧の低下、ノイズの発生がみられた。修理のためには斜面の高所へ人が登る必要がある。高所、低温、強風下等での修理には危険が伴い、事故のおそれがある。これを避ける方法の 1 つに小型増幅器を測定室へ移設する方法がある。SWCS と小型増幅器との間に長い信号線を介在させると、SWCS との接続箇所を 6 箇所(図-1(a))から 2 箇所(図-1(b))に減らすことが出来る。しかし、信号線を介在させると測定回路の静電容量が増加する。本研究ではその長さをどれほどにできるかを、理論的実験的に確認しようとした。信号線を介在させる場合に検討する項目は、出力電圧の低下の有無、周波数成分の変化、ノイズレベルの変化である。

(a) 信号介在前の接続状況



(b) 信号介在後の接続状況

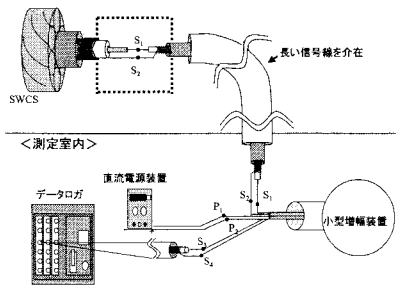
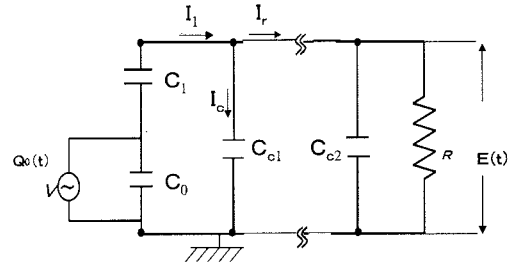


図-1 信号線介在による接続箇所の変更図

2. センサ～増幅器間へ信号線を介在させた場合の出力特性の変化に関する理論的検討



$E(t)$: 出力電圧 Q_0 : 発生電荷 R : 負荷抵抗
 C_c : 心線とシールド線間の全静電容量
 $C_0(t)$: 心線とFEP間に生じる局所的な静電容量
 C_1 : 心線とシールド線間の局所的な静電容量
 C_{c1} : SWCSの静電容量
 C_{c2} : 信号線の静電容量

図-2 信号線を介在させた場合の測定回路

図-2 に信号線を介在させた状態の SWCS の測定回路図を示す。図-2 の C_{c1} は SWCS の静電容量を、 C_{c2} は介在する信号線の静電容量を表している。以下の計算式中の C_c は $C_{c1} + C_{c2}$ を表している。

入出力をそれぞれ

$$v_{in} = ae^{j\omega t} = a(\cos \omega t + j \sin \omega t) \quad (1)$$

$$v_{out} = be^{j(\omega t + \varphi)} \quad (2)$$

とおく。(1),(2)の両辺を微分すると、

$$\frac{dv}{dt} = aj\omega e^{j\omega t} \quad (3)$$

$$\frac{dE}{dt} = bj\omega e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (4)$$

となる。図 2 の入出力に関する方程式は、

$$R(c_c + c_1) \frac{dE}{dt} + E = \frac{c_1 R}{c_0} \cdot \frac{dq_0}{dt} \quad (5)$$

で表せ、回路中の右辺の $q_0(t)$ は

$$q_0 = c_0 v_{(t)} \quad (6)$$

であり、(2) (3) (4) (6) を代入して、

$$R(c_c + c_1) \cdot bj\omega e^{j(\omega t + \varphi)} + be^{j(\omega t + \varphi)} = c_1 R \cdot aj\omega e^{j\omega t} \\ \{R(c_c + c_1)j\omega + 1\}be^{j\varphi} = ac_1 Rj\omega$$

となる。入出力比は、

$$\frac{b}{a} e^{j\varphi} = \frac{c_1 R j \omega}{R(c_e + c_1) j \omega + 1}$$

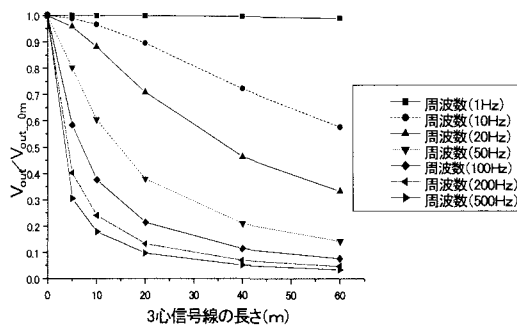
$$= \frac{c_1 R j \omega + R^2 c_1 (c_e + c_1) \omega^2}{1 + R^2 (c_e + c_1)^2 \omega^2} \quad (7)$$

このとき、入出力比の絶対値は、

$$\left| \frac{b}{a} \right| = \frac{c_1 R}{\sqrt{1/\omega^2 + R^2 (c_e + c_1)^2}} \quad (8)$$

となる。

図-3 は、(8)式に実際の回路定数を代入して 3 心信号線の長さを変化させた時に信号線長ゼロの場合の出力に対する出力比を示している。3 心信号線の静電



容量は 36.5 n F/100m である。

図-3 測定回路出力比と 3 心信号線長の関係
(3 心信号線を介在させた時の場合)

この図から読み取れるのは、低周波領域の入力では信号線の長さが長くなることによる出力比の減少が小さい点である。一方、(8)式によると、高めの周波数を持つ入力では入出力比の絶対値は大きくなるが、信号線を介在させた時の出力比の減少割合は大きくなると推定される。

上記の計算結果が、実際の測定回路においても見られるかを確認するため、次の実験を行うこととした。

3. 信号線介在による出力振幅変化に関する室内実験

実際に増幅器の前へ信号線を介在させたとき出力比がどのように変化するかを、鋼球落下振動を用いて実測した。長さ 11m の SWCS の末端に 3 心信号線と、静電容量の小さい同軸信号線 3 種類の長さを変化させて介在しない場合の出力振幅と比較した。すなわち

V_{out}/V_{out-0m} を求めた。

図-4 は増幅器前の信号線介在に伴う出力比と信号線の長さとの関係を示している。図-3 の理論計算曲線と同等の結果が得られている。S/N 比を考慮し、増幅倍率を 5 倍まで与えるとすれば、介在可能長は 3 心信号線で 20m と評価され、静電容量の小さい同軸信号線は 120~140m まで介在可能と考えられる。出力の減少割合の小さい① (L-7CFB) の同軸信号線について、フーリエスペクトル積算値と周波数の関係を信号線長ごとに比較したのが図-5 である。一般に時間領域の信号波形が高周波成分を多く含むほど、フーリエスペクトル積算値の立ち上がりが緩慢になる。同図下位曲線の場合ほど原波形に近い波形となり、実用上好ましい。

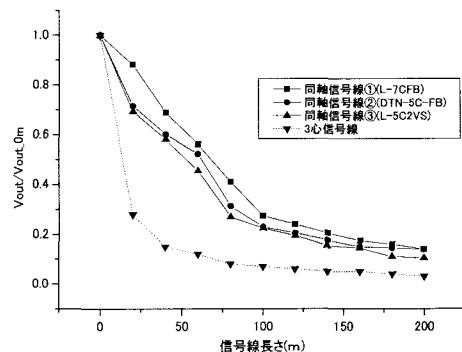


図-4 信号線長 V_{out}/V_{out-0} の関係

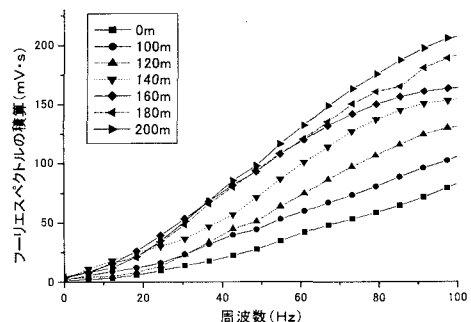


図-5 同軸信号線①の長さとフーリエスペクトル積算値の関係

上記の内容から、同軸信号線であれば増幅の前へ120～140mまでの介在が可能と考えられる。そこで、図-6 で示される札幌市南区定山溪で、SWCS と小型増幅器との間に②(DTN-5C-FB)の同軸信号線を各チャンネルにつき100m介在させ、増幅倍率を5倍に設定し打撃試験を行った。

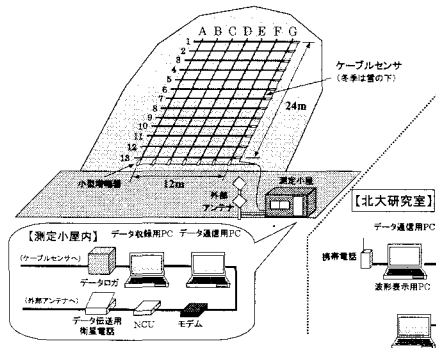


図-6 フィールド試験概要図

図-7 に示される出力波形図は上が既存のシステム（2 倍増幅）で得られたものに対し、その下のものは同軸信号線 100m を介在させ、測定室内で 5 倍増幅させたものである。視覚で捉える限りでは波形の振幅自体が単純増幅された形になっていることがわかる。一番下の波形は測定する SWCS にとりつけていた加速度計波形である。打撃イベントが起こったときに加速度波形と SWCS 出力波形が同時に発生しており正常であることがわかる。

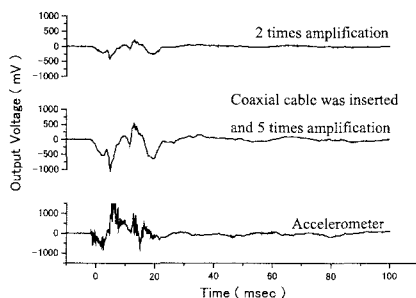


図-7 同軸信号線を介在させた時の出力波形例

次に、図-7 のようにして得られる SWCS 出力電圧と、同時に得られる加速度を縦横 log10 スケールで表したものが図-8 である。ベキ式で表される関係になるので、オーダー単位で考えれば加速度計の代替センサとして用いることができると考えている。

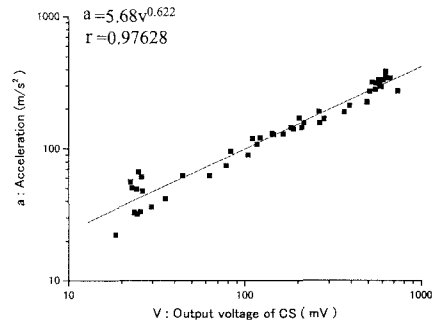


図-8 SWCS 出力電圧と加速度の対比

打撃試験で得られた SWCS の出力電圧の平均を取ったものが表-1である。全て5倍設定で得られた出力電圧だが、敷設状況により大きく感度が変わってくるので、感度をおおむね統一させる必要がある。今回は5、10、15倍の三つの倍率で再設定を行った。

表-1 SWCS の倍率決定

	Average (mV)	Amplification for practical use
CH 1	319.5	10
CH 2	180.9	15
CH 3	182.4	15
CH 4	524.8	5
CH 5	200.5	15
CH 6	207.5	15
CH 7	295.1	10
CH 8	507.5	5
CH 9	141.4	15
CH 10	181.2	15
CH 11	467.9	5
CH 12	144.7	15
CH 13	148.7	15
CH A	1664	5
CH B	378.4	10
CH C	201.9	15
CH D	749.4	5
CH E	467.5	5
CH F	191.1	15

倍率を変更した後のホワイトノイズ波形の標準偏差を求めたものが表-2である。6、Fチャンネルで既存のシステムよりも高い値を示しているが、全体を通して $\sigma = 1 \sim 4 \text{ mV}$ で実用上問題ないレベルといえる。

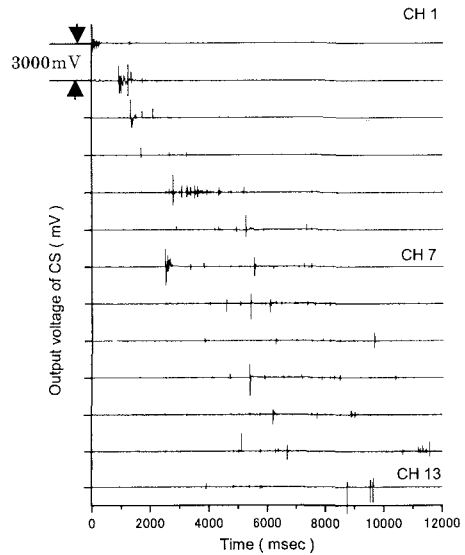
表-2 ホワイトノイズの標準偏差の比較

	Stan.dev. σ (mV) before improvement	Stan.dev. σ (mV) after improvement
CH 1	6.744	2.154
CH 2	3.263	1.837
CH 3	3.026	1.538
CH 4	3.238	1.714
CH 5	2.942	1.893
CH 6	2.728	3.272
CH 7	2.827	1.572
CH 8	3.433	1.682
CH 9	2.651	1.451
CH 10	3.621	1.521
CH 11	3.203	1.829
CH 12	3.104	1.641
CH 13	2.988	1.792
CH A	2.892	1.634
CH B	2.929	1.653
CH C	2.951	2.239
CH D	2.844	1.721
CH E	2.988	2.092
CH F	3.014	4.079

次に、斜面上部から1個の落石を人為的に落下させ、2m間隔に敷設しているSWCSで落下挙動を捉えられるかどうかを検討した。人為的な落石は斜面上部にある浮き石をピックル先端で軽く押すことで発生させた。長軸径が20cm前後、質量数kgの浮き石を選んで落下させた。図-9は、斜面上部、センサ記号で示すと1chの上部でかつC-Dch間から落下させた場合のSWCSによる計測波形例を出力電圧のまま描いた図である。図の横軸はトリガ信号が作動した時刻を0sとした時間軸である。図によると、1~13chまでの横方向SWCSは概ね数1000mVオーダーの出力電圧を示している。縦方向SWCSも一部を除き同じレベルの出力を示している。図-9(a)は1~13chの横方向SWCSの出力電圧を示し、1chの立ち上がり時間が最も早く、下位のchほど立ち上がり時刻は遅くなっている。また、1chの継続時間は短く、下位のchほど振動の継続時間が長くなるのは、1個の落石が落下する過程で、小礫を巻き込み落下しているためである。一方、図-9(b)でのA~Fchの縦方向SWCSについては、A~Cchで大きい出力を示している。特にBchで高い出力を示している。落石がC→Bchの方向に移動したことがわかる。

以上より、ケーブルセンサへ増幅器間に同軸信号線100mを挿入した場合でも、人為的に発生させた落石試験ではSWCSを2m間隔で敷設した場合1個の落石に伴って発生する複数の岩塊や小礫の落下状態を一つのイベントとして捉え得ることが明らかになった。また、波形の立ち上がり時間差から、落下挙動を読み取れる可能性があることが確認された。

(a) 横方向に敷設したセンサの出力波形



(b) 縦方向に敷設したセンサの出力波形

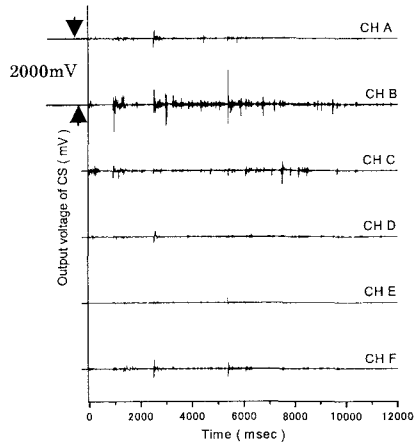


図-9 人為的な落石に対するSWCSの出力波形例

5. 本研究のまとめ

本論文ではケーブルセンサを用いた落石検知システムの改善に関する研究結果を述べた。得られた知見をまとめると以下のようなものである。

1) SWCSの測定回路の入力部へ正弦波電圧を入力した場合の周波数伝達関数を求め、この伝達関数を用いて計測回路の静電容量 C_0 の変化に伴う出力振幅の変化

を算出したところ、低周波領域では C_c の増加に伴う出力低減割合は小さいが、高周波領域では C_c の増加に伴う出力低減割合が大きくなった。

2) 実用上、SWCSと増幅器の間に長い信号線を介在させた場合、計測回路の静電容量 C_c が大きくなる。信号線を介在させた実験を行ったところ、ほぼ理論通りの出力の低減が見られた。

3) 計測回路のSWCSと増幅器間に介在させ得る信号線の長さは、出力電圧の低減割合、ノイズレベル、フーリエスペクトルの特性変化を総合して判断した場合、同軸信号線①(L-7CFB)の場合であれば140m程度と考えられる。すなわち、面長100m程度の斜面の場合には、増幅器を斜面下の計測室内に移動でき、システムの維持が安全になると考えられる。

4) フィールド試験からも、同軸信号線(DTN-5C-FB)を100m介在させ、小型増幅器を測定室内へ移設させることがノイズレベルを考慮しても可能であると言える。

5) 人為的に落石を発生させることにより多数の岩塊、小礫が巻き込まれ落石群を形成して落下する現象がみられた。SWCSは複数の小礫の衝突振動もとらえていると考えられる。

参考文献

- 1) 佐々木靖人(2000): GISを活用した道路斜面のリスク評価に関する研究, 土木技術資料, Vol.42, No.10, p.14.
- 2) 門間敬一・小野田敏・落合達也・荒井健一・網木亮介・浅井健一(2002): 岩盤崩壊モニタリング箇所での転倒崩壊に至るまでの変位挙動の計測例, 地すべり, Vol.39, No.1, pp.62-69.
- 3) 平野昌繁・諏訪 浩・藤田 崇・奥西一夫・石井孝行(1990): 1989年越前海岸落石災害における岩盤崩壊過程の考察, 京都大学防災研究所年報, No.33, B-1, pp.219-236.
- 4) 神尾重雄・吉松弘行・網木亮介・脇坂安彦(1997): 国道229号第2白糸トンネルにおける岩盤崩落, 土木技術資料, Vol.39, No.11, pp.2-5.
- 5) 馬場和秋・吉川利雄(1973): 落石の予知, 施工技術, Vol.6, No.8, pp.22-47.
- 6) 馬場亮介・高木 寿(1993): 国鉄における落石の実態と対策—四国の場合—, 施工技術, Vol.6, No.8, pp.32-39.
- 7) 高橋一男・岡部澄弥(1973): 道路法面崩壊及び落石予知器の開発, 第11回日本道路会議論文集, pp.108-111.
- 8) 小川健太・氏平増之・鈴木新吾・細谷昭悟・石井文明・皿田 滋(1998): 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, pp.380-390.
- 9) M.Ujihira, K.Ogawa, S.Suzuki, S.Hosoya, H.Saeki, M.Komazaki (1997): Two dimensional source location system for rock fall detection by using cable sensor and mobile multimedia network, *Int. Jour. Rock Mech. Sci.*, Vol.34, No.(3-4), Paper No.315(CD-ROM).
- 10) 駒崎征明・平間和夫・伊藤史人・氏平増之・鈴木新吾・川村洋平・樋口澄志(2000): 実規模覆道における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に関する研究, 応用地質, Vol.41, No.4, pp.200-210.
- 11) 氏平増之・鈴木新吾・細谷昭吾・佐伯 浩・川北稔(1998): 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, pp.423-432.
- 11) 駒崎征明・浦田健司・伊藤史人・氏平増之・徳永哲信・今野慎也・川村洋平・樋口澄志・川北 稔(2001): スチールワイヤ型ケーブルセンサの実斜面への適用に関する研究, 応用地質, Vol.42, No.5, pp.264-273.
- 13) 伊藤史人・氏平増之・安池雅之・川村洋平・樋口澄志・山田 孝・アクメトフ ダウレン・駒崎征明(2003): スチールワイヤ型ケーブルセンサと衛星電話を用いた落石予知システムに関する研究—防護網がない斜面への適用性に関する試験結果—, 応用地質, Vol.44, No.4, pp.223-233.