

I-43

スチールワイヤ型ケーブルセンサの斜面への適用に関する研究

北海道大学大学院工学研究科	正会員	氏平増之
北海道大学大学院工学研究科	学生会員	川村洋平
北海道大学大学院工学研究科	○学生会員	徳永哲信
N T T北海道移動通信網(株)	正会員	駒崎征明
N T T北海道移動通信網(株)	正会員	伊藤史人
北海道開発局開発土木研究所	正会員	池田憲二
北海道開発局開発土木研究所	正会員	今野久志

1. はじめに

1997年8月25日(月)午後2時30分頃、後志管内島牧村の一般国道229号線にある第2白糸トンネル南側坑口付近で大規模な崩落が発生した。崩落規模は体積約42,000m³であった。3日後の8月28日(木)午後1時30分頃、第1崩落部に隣接する島牧側下部付近で2回目の崩落が発生した。崩落規模は体積約14,000m³であった¹⁾。1回目崩落後、小規模な岩石の落下が目撃されており、その頻度が上昇した後、2回目の崩落が発生した。他方、急傾斜地での道路建設においては落石や岩盤崩壊の危険を伴う場合がある。1997年2月28日には北海道南西部の渡島半島西端に位置する帆越第7覆道において覆道上部の岩盤斜面整形工事中に約300m³の崩落が発生した。この崩落では前兆として斜面から覆道上にばらばらと砂粒が落下するのが目撃されている²⁾。

上記の例は数少ない観察例であるが、大規模な崩壊や落石が何の前ぶれもなく発生するとは考えにくく、大規模な崩壊や落石の発生の前には小規模な崩壊や落石が発生すると考えるのがすなおな解釈であろう。

本研究では大規模崩壊や落石の前には前兆があるという仮定の元に、スチールワイヤ型ケーブルセンサを用いた岩盤崩壊・落石予知システムの開発とフィールド試験を行っている³⁾⁴⁾⁵⁾。振動検出用ケーブルセンサ自体は引張強度が40～50kgfであるため、スチールワイヤ型ケーブルセンサでは6ストランドのスチールワイヤの芯材部分にケーブルセンサを配置して引張強度の補強をはかっている⁶⁾。本論文では強度を補強したスチールワイヤ型ケーブルセンサを岩盤斜面に敷設し、実用できるかどうかを調べた結果を述べる。

2. 実験場所

本研究の実験場所には、札幌市南区定山溪にある定山溪ダム右岸に設けられている林道の切通し斜面(斜面長約20m、傾斜角約40～50°)を選定した。実験現場の写真を図-1に示す。

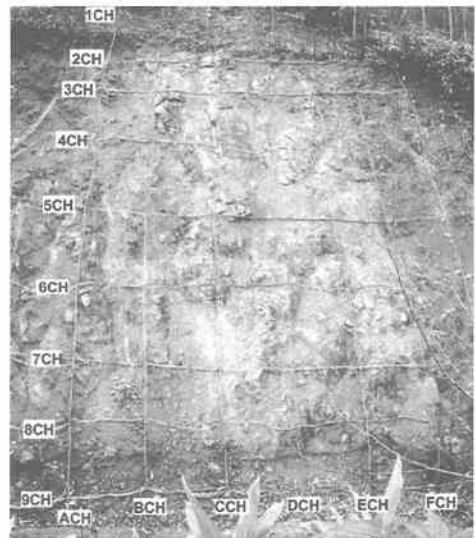


図-1 実験現場の写真

Study on the Application of Steel Wire Cable Sensor for Rock Slope

by Masuyuki UJIHIRA, Youhei KAWAMURA, Tetsuaki TOKUNAGA, Masaaki KOMAZAKI, Humito ITO, Kenji IKEDA, Hisashi KONNO

斜面の岩質は安山岩である。斜面は北向きで、かなり風化した状況下にある。斜面には防護ネット工が施されており、降雨・融雪時に落下したと見られる小さな岩塊がネット脚部に堆積している。また、ネット上段部～中段部には直径 10～30 cm の岩塊数十個が落下し切らず停止した状態になっている。防護ネットには数カ所に損傷が見られる。写真中に格子状に見えるものがスチールワイヤ型ケーブルセンサである。

3. 実験の概要

実験装置の概念図を図-2 に示す。斜面の防護ネット上にスチールワイヤ型ケーブルセンサ (SWCS) と振動検出用ケーブルセンサ (CS) をそれぞれ約 2m 間隔で横方向に 9 本、縦方向に 6 本敷設した。横方向のセンサには上から 1ch～9ch、縦方向のセンサには左から A ch～F ch の ch 番号をつけている。また、これら合計 $(9+6) \times 2 = 30$ 本のセンサにはそれぞれ増幅率 2 倍の小型増幅器が取り付けられている。

各センサにより感知され小型増幅器で増幅された電圧信号は 3 芯シールドケーブルを通じてデータロガに伝送、記録され、コンピュータによって解析される。データロガのサンプリング周波数は 20kHz、1 ch 当たりのメモリ容量は 6MB である。

また、実験では斜面の上端や、ある特定の場所にコンクリートブロックや鋼球を落下させ、スチールワイヤ型ケーブルセンサがその信号を感知するか、また、落下した軌跡を推定できるかについて調べようとした。

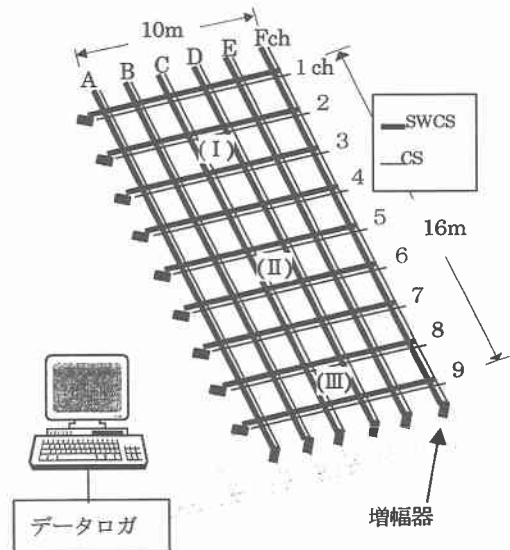


図-2 実験装置の概念図

4. 落下箇所の条件と出力感度

スチールワイヤ型ケーブルセンサを図-1、図-2 のように岩盤斜面の防護ネット上に格子状に敷設する場合、斜面には凹凸や箇所ごとの岩質の違いがある。同一質量の落下物が同じ速度で防護ネットに衝突したとする場合でも、防護ネットに取り付けられているスチールワイヤ型ケーブルセンサの出力電圧は場所により異なってくると考えられる。また、格子中央部に落下させる場合とスチールワイヤ型ケーブルセンサに近い位置に落下した場合とでは出力電圧は異なってくると考えられる。

落下箇所ごとの条件の違いで出力電圧がどの程度異なるかをみるために図-2 に示す(I)～(III)の箇所に鋼球 (5.45kg) を高さ約 1.5m から落下させ、感度試験を行った。図-3 の (A), (B) は図-2 の (I), (III) の箇所に鋼球を落下させたときの出力電圧波形例とそのフーリエスペクトルである。図-2 の (I) の箇所は実験斜面の中では最も勾配が急な部分で小石や泥の堆積物は存在せず、凹凸のある岩盤に防護ネットが数点で接触し一部浮いた状態になっている。したがって防護ネットは落下物により振動しやすい状態にある。図-3 の (A) に示すように図-2 の (I) の箇所においては 2 ch 目のスチールワイヤ型ケーブルセンサでみると最大出力電圧は 354mV と記録され、フーリエスペクトルによると数 10Hz と 800Hz 付近に周波数の卓越部が存在している。これに対し、図-2 の (III) の箇所では斜面上部から降雨・融雪により落下した小岩塊が防護ネットと斜面の間に堆積しており、堆積物に防護ネットがほぼ全面的に接触した状態になっている。このため図-3 の (B) に示すように、図-2 の (III) の箇所へ鋼球を落下させたときの 8 ch 目のスチールワイ

ヤ型ケーブルセンサでみた出力波形は振幅が小さく最大 64mV であった。スチールワイヤ型ケーブルセンサを落石防護ネットに敷設する場合、落下箇所の岩盤状態により出力電圧が数倍程度異なることがあるとみなすべきである。このばらつきは加速度計等の振動感知センサを用いた場合にも同様に生じ得るものと考えられる。

図-4 は図-2 の(I), (II), (III)の箇所へ鋼球 (5.45kg) を落下させたときの斜面に水平方向に敷設した各スチールワイヤ型ケーブルセンサの最大出力値を折れ線で描いた図である。縦軸が出力電圧、横軸は斜面に水平方向に敷設した各スチールワイヤ型ケーブルセンサの ch 番号である。前述のように最下端の(III)に落下させたときの最大出力電圧が 64mV(8ch)と小さいが、(I), (II)では 354mV(2ch), 245mV(5ch)の最大振幅値を示しており、落下位置から遠ざかるにつれて出力電圧が小さくなっていくことが分かる。この場合アンプ増幅率を 2 倍としているが、落下物の衝突発生を検知するのに十分な出力電圧が得られているといえる。また、折れ線の衝突源からの距離による出力減衰状況によると、スチールワイヤ型ケーブルセンサを用いて衝突源の位置がどの格子中であるかを判別する事ができるといえる。

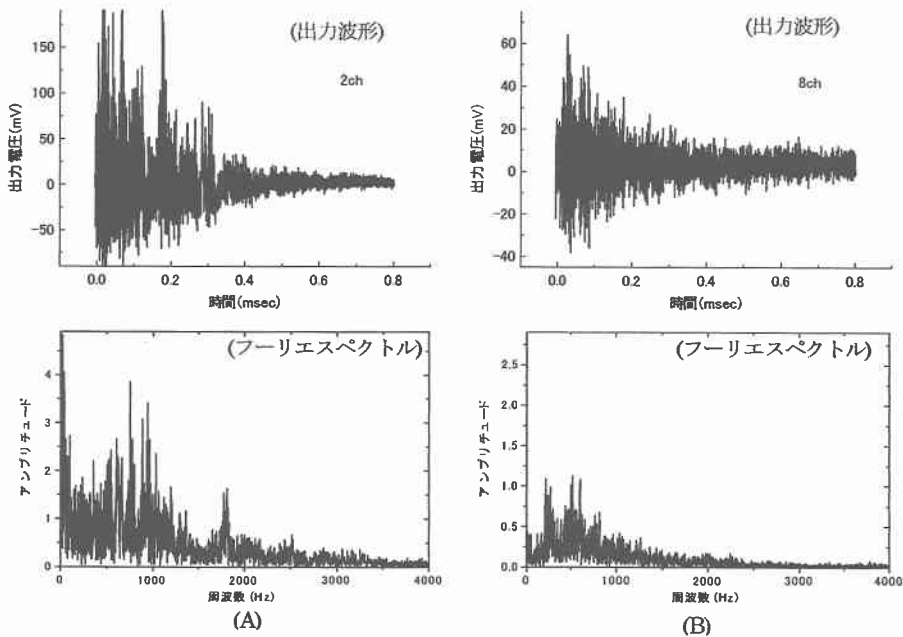


図-3 鋼球落下にともなう出力波形とフーリエスペクトル

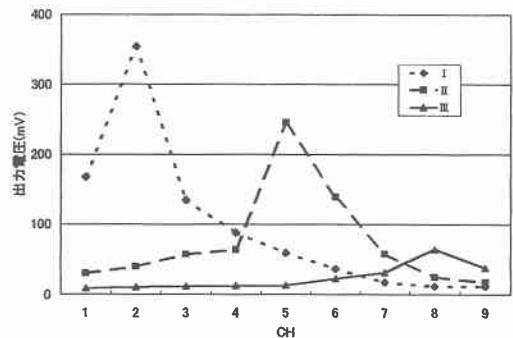


図-4 水平に敷設された各スチールワイヤ型ケーブルセンサの出力感度の比較

5. 落石にともなう出力波形

図-1、図-2の斜面上端からコンクリートブロックを落下させ、各スチールワイヤ型ケーブルセンサがどのような出力波形を示すか、また出力波形の経時変化がどのようなものであるかを調べた。16.5kgのコンクリートブロックを1chの上部のC～Dch間から落下した時におけるブロックの落石軌跡を図-5に示す。またそのときのスチールワイヤ型ケーブルセンサ各chの出力波形を図-6に示す。ビデオ画像によると、ほぼ立方体のコンクリートブロックはDchのスチールワイヤ型ケーブルセンサ沿いに落下した。人の手により約30cmの高さから1chの上部に落下されたブロックは防護ネット上を回転しながら落下し、3chの上部でこすれるように衝突して跳躍し、4chと5chの間に落下、再度跳躍して斜面脚部の林道へと落下した。図-6の①はブロックを落下させたことによる波形、②はブロックが2chの上を回転しながら落下していった時の波形、③は3chの上部でネットにこすれるように衝突した時の波形、④は4chと5chの間でネットに衝突した時の波形、⑤はブロックが跳躍中でまだネットの振動が持続している状態の波形である。

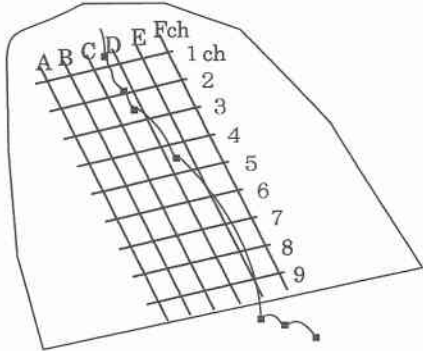


図-5 ブロック落下軌跡(ビデオカメラによる)

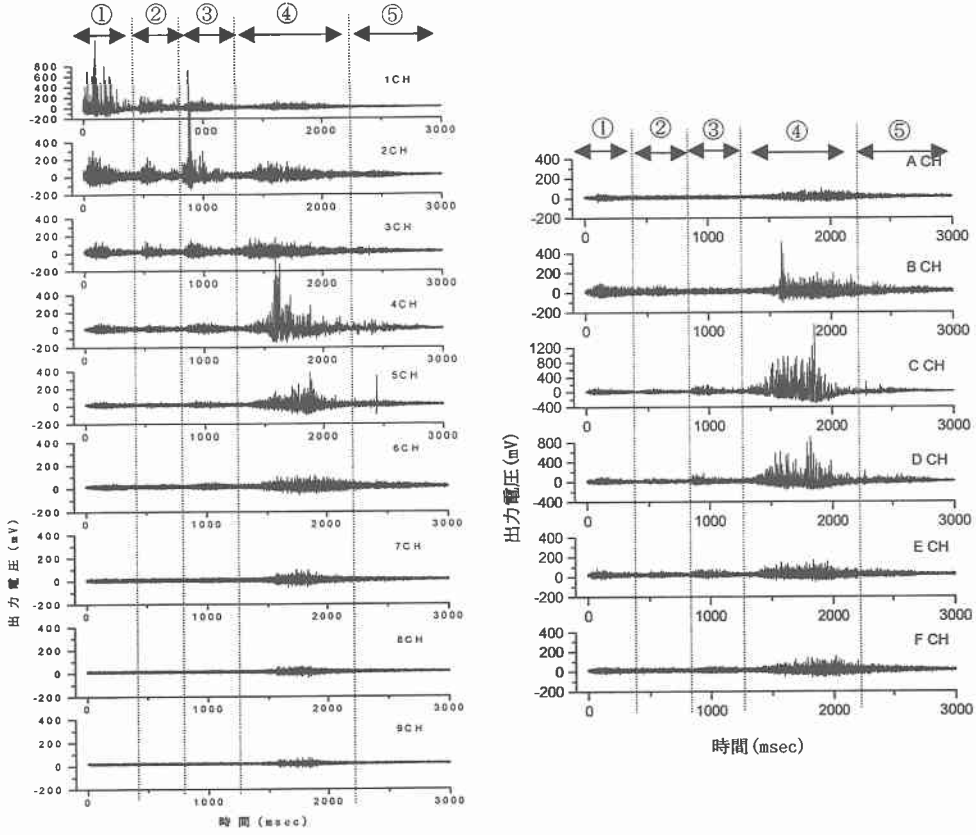


図-6 落石にともなう出力波形

6. トポグラフィによる落下軌跡の表示

5 節で述べたスチールワイヤ型ケーブルセンサの落下軌跡を視覚的に見るために、縦横に敷設されているスチールワイヤ型ケーブルセンサの交点に、その点で交差しているセンサが感知した出力電圧の最大値を掛け合わせた値を与え、時間帯ごとのトポグラフィを作成した。図-6 の波形に対応したトポグラフィを示したのが図-7 である。

図-7 の①、②、③、④、⑤は図-6 の①、②、③、④、⑤に対応しており、①は 0～400ms、②は 400～800ms、③は 800～1250ms、④は 1250～2200ms、⑤は 2200～3000ms の時間帯における最大値によるトポグラフィである。図-7 の①では明らかに最初に落下させた時の大きい振動による高い山が表示されている。②ではブロックは防護ネット上を回転運動しており、縦横に斜面に敷設したスチールワイヤ型ケーブルセンサの感知した出力電圧は小さめで、トポグラフィにはわずかな盛り上がりが見られる。③ではブロックが明らかに斜面へ衝突しているのが該当する位置に明確な山が表されているが、ブロックの落下速度がそれほど大きくないため次の④に比べると山が低い。④ではブロックが③での衝突の後 2ch 間隔分ほどの距離を跳躍した後、斜面へ衝突したため、シャープで最も高い山が表されている。⑤ではブロックが④の衝突の後どこへも衝突せず落下したため、④の波形の減衰部もしくは④での衝突により起きた岩盤斜面の小さな岩石の落下によるトポグラフィと考えられ、山は低い。

この場合は横約 10m、縦約 16m の狭い範囲にスチールワイヤ型ケーブルセンサを敷設したものであるが、岩盤斜面の岩盤や起伏、防護ネットの施工状態にかなりの差異がある場合でも落石の発生と落下の軌跡を視覚的に推測することができるといえる。

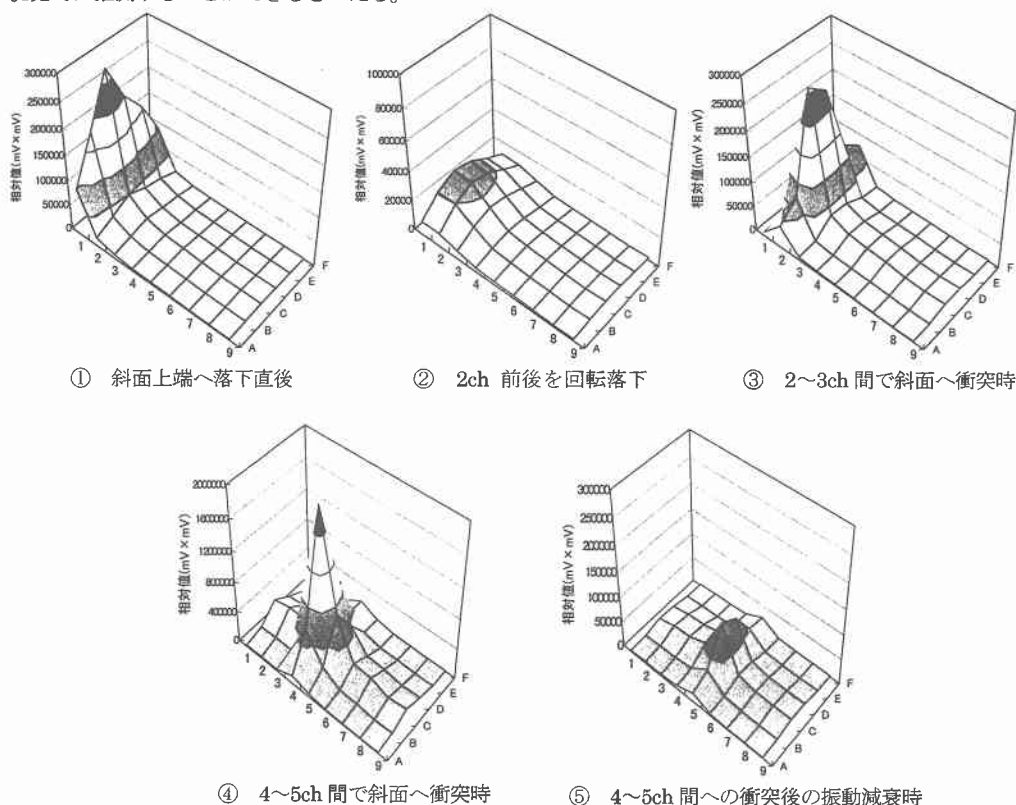


図-7 トポグラフィによる落下軌跡例

7. まとめ

本研究では、振動検出用ケーブルセンサを 6 ストランドのスチールワイヤの芯材部分に巻き込んだスチールワイヤ型ケーブルセンサを実斜面に敷設し、スチールワイヤ型ケーブルセンサが実用に耐え得る十分な出力感度を示すか、落石の発生を感知できるか、落石の軌跡を検出できるか等についてフィールド試験を行った。その結果以下の事項が明らかになった。

- (1) 実斜面では箇所によって岩質やスチールワイヤ型ケーブルセンサを敷設する防護ネットの状態が異なるが、鋼球を落下させた実験による出力電圧の最大値と最小値の比は数倍前後の範囲に収まることが分かった。この比率は大きく見積もっても 10 倍以内であると推測される。
- (2) スチールワイヤ型ケーブルセンサに取り付けられた小型増幅器の増幅倍率は 2 倍でも実用上十分な出力電圧が得られた。
- (3) コンクリートブロックをスチールワイヤ型ケーブルセンサを敷設した斜面へ落下させた時のセンサの出力波形から落石の運動状況をほぼ推定できた。
- (4) スチールワイヤ型ケーブルセンサの出力振幅から作成したトポグラフィにより視覚的に落石の落下軌跡を推定することができた。

参考文献

- 1) 第 2 白糸トンネル崩落事故調査委員会：第 2 白糸トンネル崩落事故調査報告書（平成 10 年 2 月）
- 2) 佐藤博文・三上芳正・野地正保・木村彰宏：AE 直接法による落石岩盤崩落の監視、北海道応用地学合同研究会論文集 No.9、p113～118（1998）
- 3) 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）
- 4) 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、No5、p. 423～432（1998）
- 5) 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、No2、p. 631～637（1997）
- 6) 中井健司・佐藤昌志・今野慎也・氏平増之：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、土木学会北海道支部論文報告集、第 55 号(A)、p. 62～67（1999）