

学 位 論 文 題 名

振動検出型ケーブルセンサと移動通信網を利用した 落石検知システムに関する研究

学位論文内容の要旨

わ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5万7千箇所といわれ、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、岩盤崩壊に対する予知と防止対策が必要である。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。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察事例をみると、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。著者は、前兆的に発生する数10g～数10kgの小礫や岩塊の落下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、導電線の切断、圧力検出用空気袋等を用いて行なわれたが、その後豊浜トンネル岩盤崩落事故(1996年)頃までの研究事例は少ない。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、耐熱性、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型ケーブルセンサがある。著者はケーブルセンサを利用した落石検知システムに関する研究を行っており、これまでコンクリート構造物、地面への埋設、防護ネットのある斜面などに敷設し、システムの性能について評価を繰り返してきた。

本論文の研究は大別すると、「ケーブルセンサの出力電圧改善の有無に関する基礎研究」および「信号伝送手段が衛星電話以外に無く、かつ防護ネットが無い岩盤斜面への適用性に関する研究」の2つの部分からなっている。第1章は序論であり、主たる研究内容を第2章～第6章に述べている。第8章は結論である。

第1章では、本研究の目的と本論文の構成について述べている。

第2章では、斜面計測に関連する既往の研究を整理した上で、落石・岩盤崩壊の検知法として有効とされているAE法、GPSによる岩盤変位測定法、さらには現在も応用研究が進められている光ファイバーケーブルによる検知法等について考察し、本研究の位置付けを明らかにした。

第3章では、最初に、ケーブルセンサの構造と構造上の特徴、仕事関数の概念を用いた接触電荷の発生と移動、計測回路の入出力関係式、調和振動を加えたときの出力電圧波形等に関するに既往の研究結果を概説した。次いで、分子動力学的解析法によりセンサを構

成している FEP の電子親和力およびイオン化ポテンシャルを算出、ケーブルセンサの出力電圧は FEP の+符合の電子親和力に依存していることを明らかにした。また、FEP 分子にフッ素原子を含む側鎖を結合させることで電子親和力が大きくなり、ケーブルセンサ出力電圧が増加する可能性があることを示した。

第4章では、防護ネットが無い岩盤斜面にスチールワイヤ型ケーブルセンサ(SWCS)を2m間隔で格子状に敷設し、斜面の変状と融雪季から秋季にかけての落石をモニタリングした結果を述べている。研究の結果、1個の落石に伴ない、多数の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、SWCSは複数の小礫の衝突振動を捉えていることを明らかにした。本実験では、測定信号の伝送に衛星電話を使用し、通信時間を測定した結果、30kbyte ($15 \times 10^3 \text{dot}$) の波形データを99%の確率で伝送できる時間は8min35sであることを確認した。

第5章では、先ず、前章の検知システムに対する融雪季後の異常診断結果を述べている。診断では、斜面上に敷設している小型増幅器とその接続箇所への融雪水の浸入、それに伴う電源電圧の降下、ノイズの発生、積雪滑動に伴う断線がみられた。このため、本章では、小型増幅器を計測室へ移設できるかどうかを理論と実験により確認した。斜面上のSWCS 末端と計測室内の増幅器間に同軸ケーブルを挿入して落石試験を実施したところ、静電容量増加に伴う出力低下はみられるが、静電容量が小さい同軸ケーブルであれば、少なくとも100mは挿入できることを明らかにした。実用上重要な知見といえる。さらに、本章の研究から、敷設しているSWCSを4~13本並列、直列に接続したいずれの場合も岩塊、小礫衝突による 数10mV~1000mV の出力電圧が得られる事を明らかにした。

第6章では、ケーブルセンサにより実測された落石による振動波形を用い、落石重量を評価する研究を行なった。重量判定には、ALM (Aggregative Learning Method) を用いた。ALM では、基準重量の落石で得られた振動波形の自己回帰係数を、任意重量の落石で測定された振動波形に適用し、実波形に近づけていく際の修正係数 GP を算出する。本章では、GP の自乗平均が重量の常用対数値と直線関係にあることを示し、SWCS 出力波形から落石重量の評価が可能であることを明らかにした。

最後に第7章では全体を通しての結論を述べている。

学位論文審査の要旨

主査	助教授	氏平増之
副査	教授	三浦清一
副査	教授	金子勝比古
副査	教授	名和豊春
副査	助教授	田畑昌祥

学位論文題名

振動検出型ケーブルセンサと移動通信網を利用した 落石検知システムに関する研究

近年、特に豊浜トンネル岩盤崩落事故以降、国内の大学・研究機関では岩盤崩壊予知に関する研究が活発化し、予兆を微小な変位、傾斜変動、微小破壊音等で検出しようとする研究が進められてきた。しかし、各種多く存在するフィールド計測用センサの自然環境への適用性に関する研究とデータ伝送・処理に関する研究は不十分な状態にあり、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文は、このような現況の中で、広い範囲の岩盤斜面への実用化が期待できる「振動検出型ケーブルセンサ」と「移動通信網」を組み合わせた岩盤崩壊予知を目的とする落石検知システムの改善、有効性の検証、データ処理法について研究した結果を述べたものである。

本論文第1章では研究の必要性を論じ、第2章では斜面防災に関する計測法の既往の研究結果をレビューし、振動検出用ケーブルセンサと移動通信網を組み合わせた落石検知システムの新規性と位置づけを述べている。

第3章では、最初に、ケーブルセンサの構造と構造上の特徴、仕事関数の概念を用いた接触電荷の発生と移動、計測回路の入出力関係式、調和振動を加えたときの出力電圧波形等に関する既往の研究結果を概説している。次いで、分子軌道理論によりセンサを構成しているFEPの電子親和力およびイオン化ポテンシャルを算出、ケーブルセンサの出力電圧はFEPの正符合の電子親和力に依存していることを明らかにしている。また、FEP分子にフッ素原子を含む側鎖(-CF₂CF₃)を結合させることで電子親和力が大きくなり、ケーブルセンサ出力電圧が増加する可能性があるとして述べている。

第4章では、防護ネットが無い岩盤斜面にスチールワイヤ型ケーブルセンサ(SWCS)を2 m間

隔で格子状に敷設し、斜面の変状と融雪季から秋季にかけての落石をモニタリングした結果を述べている。研究の結果、1個の落石に伴い多数の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、SWCSは複数の小礫の衝突振動を捉えていることを明らかにしている。融雪季の斜面観察では、斜面頂における積雪と表土層の流動で内部の岩塊が表層に浮き出し転石や浮石が形成されるプロセスを明らかにし、これらの転石や浮石がその後の降雨による落石源になることを示している。また、本フィールド実験では、測定信号の伝送に衛星電話を使用し、通信時間を測定した結果、30kbyte (15×10^3 dot) の波形データを99%の確率で伝送できる時間が8min35sであることを確認し、衛星電話による通信時間をより短縮させるための手段を提案している。

第5章では、まず、前章の検知システムに対する融雪季後の異常診断結果を述べている。診断では、斜面上に敷設している小型増幅器とその接続箇所への融雪水の浸入、それに伴う電源電圧の降下、ノイズの発生、積雪滑動に伴う断線を確認している。これへの対策として小型増幅器を計測室へ移設できるかどうかを理論的および実験的に検討している。斜面上のSWCS末端と計測室内の増幅器間に同軸ケーブルを挿入して落石試験を実施し、静電容量増加に伴う出力低下はみられるが、静電容量が小さい同軸ケーブル(50nF/km)であれば、少なくとも100mは挿入できることを明らかにしている。実用上重要な知見である。さらに、本章の研究から、敷設しているSWCSを4~13本並列、直列に接続したいずれの場合も岩塊、小礫衝突による数10mV~1,000mVの信号が出力されることを明らかにしている。長大斜面に対し、SWCSを短い間隔で敷設した場合、必要に応じセンサを並列または直列に接続することで、計測チャンネル数を低減できると述べている。

第6章では、ケーブルセンサで実測した落石による振動波形を用いて落石重量を評価する研究を行なっている。重量評価には、ALM (Aggregative Learning Method) を用いている。ALMでは、基準重量の落石で得られた振動波形をプラントとし、これに対応するモデルを同定している。同定したモデルパラメータを任意重量の落石で測定された振動波形に適用し、実波形に近づけていく際のジェネラルパラメータ GP (修正係数) を算出している。次いで、GPの分散が重量の常用対数値と直線関係にあることを示し、SWCS出力波形から落石重量の評価が可能であることを明らかにしている。

第7章では全体を通しての結論と今後の展望を述べている。

これを要するに、著者は、振動検出型ケーブルセンサと移動通信網を利用した落石検知システムにおける「センサ自体の出力機構の解明と感度の改善」、「防護網が無い斜面における落石検知能力と直列・並列接続法の有効性」および「落石重量評価法」について新知見を得たものであり、落石・岩盤斜面の崩壊に対する予知技術の向上に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。