

令和元年8月28日現在

機関番号：21401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12856

研究課題名（和文）間伐材と自律型極限計測センサを用いた土石流等の危険予測システムの研究

研究課題名（英文）Debris flow prediction system using wooden thinning and piezoelectric limit sensors

研究代表者

下井 信浩（SHIMOI, NOBUHIRO）

秋田県立大学・システム科学技術学部・教授

研究者番号：10300542

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：地すべりや落石の発生を予測することは重要であるが、実際には困難である。この問題を解決するために、降雨時および落石時の土石流の危険度を荷重の変化と計測柵の変形に比例した出力する電圧の特性測定から危険度の評価について検討した。この測定システムには、専用の土石流計測柵に取り付けたブラケットで固定されている圧電センサを使用している。計測柵の構造設計で地すべりや落石が発生したときの荷重と振動を計測する。また、間伐材を使用した木材構造のこの柵は、小規模の地すべりや落石に対応する防護柵としても利用が可能な様製作されている。土砂崩れ時の土砂崩れ荷重3～5[t/m<sup>2</sup>]に耐えるように設計されている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

間伐材による構造物に荷重や振動計測が可能な簡易的なセンサを用いた計測柵を製作し、土石流、落石、雪崩等による小規模な発生状況を予兆現象として評価している。災害発生の可能性及び発生後の状態を認識する計測システムの有効性や性能評価を実装試験により検討した。本システムは、危険個所の管理者や地域の責任者が、迅速に問題個所を認識し速やかな住民の避難や救助および災害現場の復旧対応が実施可能な支援情報を提供できる仕組みの構築を目指すものである。評価試験では、荷力試験機による完全破壊までの計測柵およびセンサの基本特性について計測し、重錘落下衝撃試験による加速度センサと振動型センサの計測結果の確認を行った。

研究成果の概要（英文）：The prediction of landslide and falling rock occurrence is important, but such predictions are difficult. To resolve this difficulty, this study assessed measurement of the degree of danger by measuring the risk to the landslide fence at the time of rainfall and falling rock according to changes in the load and the impact of voltage proportional to the avalanche barrier deformation. This measurement system has fixed sensors attached with mounting brackets to a dedicated landslide prevention measurement fence. It measures the pressure and vibration measurement of the snowfall at the time of landslide or rock fall occurrence at the main fence structure. Furthermore, this fence made of lumber from thinned timber is useful as a defensive barrier countermeasure against landslides and falling rock. It is designed to withstand a mudslide load of 3-5 [t / m<sup>2</sup>] during a landslide.

研究分野：計測工学

キーワード：センサ スマートセンシング ピエゾフィルム

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

火山列島である日本は、欧米諸国と比較して巨大地震が発生する確率が非常に高い状態であるにもかかわらず、防災に関する具体的な対策が遅々と進まない現状が課題である。特に落石に対する防御工の強度や敷設範囲を決定するための計測技術、危険予知の判断基準を策定する分野に関しては技術的にも遅れている。落石の特性データを得る最も良い方法は、斜面で実際に石を落下させて状況を観察することである。しかし、安全面や周囲の制約からシミュレーションによる評価が主体となっている。そこで筆者らは、この落石の落下試験を簡易的な方法で再現し、落石やがけ崩れ等の発生予知と被害拡大を防ぐための資料を得ることができれば社会に貢献できると考えた。本研究では、ピエゾ極限センサとピエゾ振動センサを用いた荷重と落下エネルギーに関する出力特性に注目した。野外において、載荷試験および傾斜面を用いた球体の転がり落下エネルギー試験を実施し、本計測システムによるセンサ性能とモニタリング技術の有効性について検討した。

2. 研究の目的

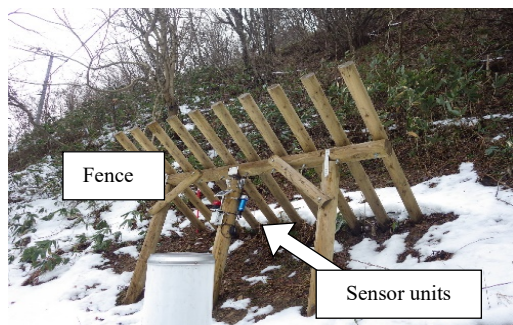
(1) 土石流、落石、雪崩における小規模な発生状況を予兆現象として捉え、災害発生を予測して危険個所の管理者または地域の責任者が、迅速に危険個所を認識し、速やかに住民の避難や救助及び災害現場の復旧対応がとれるための支援情報を提供できるシステムを構築する。

(2) 過疎地域におけるライフラインの維持管理、関係住民の生命及び財産の保護、集落の孤立防止等、災害の事前対策の迅速化、減災を図れる安心・安全の生活構築をする。

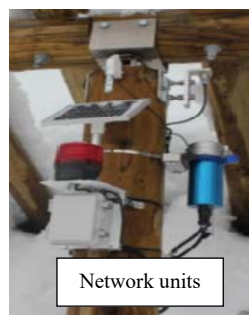
3. 研究の方法

(1) 落石の初期検知のための、衝撃による振動計測や計測柵の構造変位を計測。

間伐材の有効利用も考慮した安価な大型柵の設置により、「計測」および「初期落下において落石の拡大を抑制する効果」を可能にすることも望ましいと考えた。本研究で考案した落石やがけ崩れを計測する柵を図 1(a)に示す。間伐材を利用して製作した計測柵は、およそ縦 3360×横 3800×高さ 3350mm の形状である。敷設場所が広域幅でなければこの計測柵を数基設置すれば良いと考えている。図 1(b)のようにピエゾ極限センサを計測柵の中央部に専用金具で固定し、その下部にデータ送信用の無線通信機器を配置している。モニタリング用の通信機器には、野外観測で実績のある応用地質株式会社製の i-SENSOR を用いた。本センサは落石による衝撃や破損等、計測柵が受けたダメージの大きさに比例してセンサ自らが電圧を出力する。よって計測用の電源は使用しないという利便性がある。

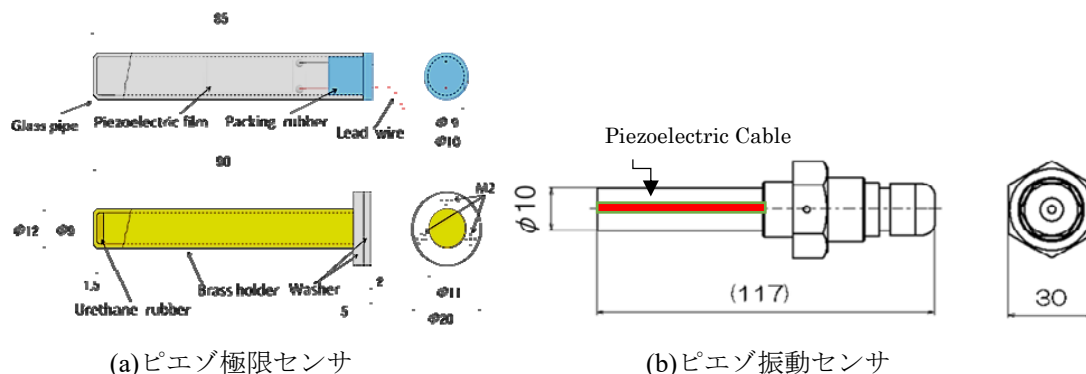


(a) 計測柵



(b) 通信システム

図 1 実装中の計測柵



(a) ピエゾ極限センサ

(b) ピエゾ振動センサ

図 2 各センサの構造

(2) ピエゾ極限センサの構造

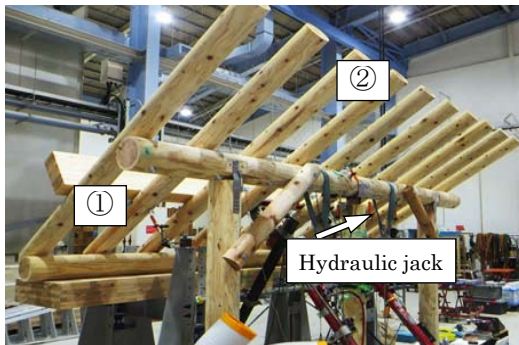
図 2(a)に示すピエゾ極限センサは、ピエゾフィルム（東京センサ製 DT2-028K/L）を硬質ガラス管の中に紫外線硬化樹脂（UV）を用いて密着固定し、ウレタン製パッキンゴム栓に外部ケーブルと接続するためのリード線を挿入したものである。このガラス管を常用はめ合い程度の公

差によるギャップで金属ホルダに挿入して使用する。センサ外装に使用する金属ホルダの材質はアルミ、真鍮、鉄材などに変更可能であるが、本試験では真鍮を選択した。ピエゾ極限センサは、金属ホルダ内部にあるガラス管が破損した時のみ荷重を計測する。ガラス管の破壊に応じてセンサ本体がせん断または圧壊などにより破損し、この加力に応じてガラス管内部のピエゾフィルムが塑性変形する。このピエゾフィルムの変形によって、計測柵が受けたダメージに応じた電圧による出力を可能としている。ピエゾ極限センサによる出力電圧の発生時に、落石等の荷重により計測柵の破壊が始まる応力や完全破壊に至る変位を求めることができる。ピエゾ振動センサを図2(b)に示す。ピエゾ振動センサはケーブル状の圧電センサ（東京センサ AWG 80mm）を中空のウレタン樹脂（φ10mm×80mm）の中心に挿入して接着固定したものであり、外形は胴体を円筒型、頭部をボルト形状にしてある。高性能メモリロガー（HIOKI LR8431）に有線接続を可能にするため、φ4mmの被覆リード線2mを接続し絶縁処理を施している。本センサは加速度計に近似した全周方向の振動を計測することが可能であり、振動の大きさに比例した電圧出力を得ることが可能である。

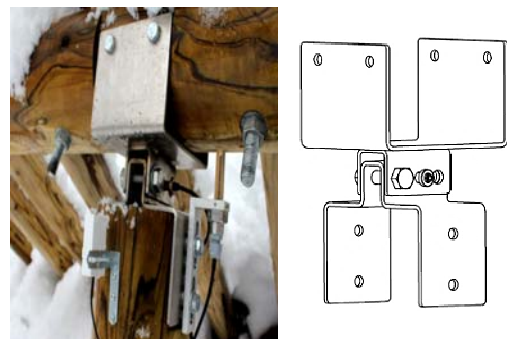
#### 4. 研究成果

##### (1) 屋内における計測柵の強度計測

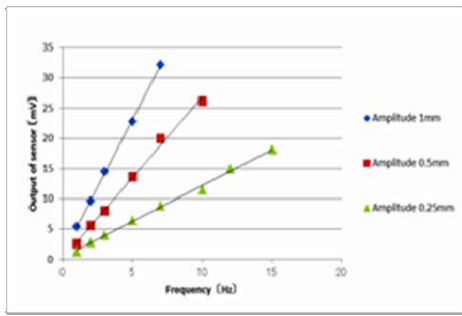
最初に研究所内で計測柵の強度や振動特性の試験を実施した。計測柵が山中の斜面に設置した状態と同様になるよう、図3(a)のように架台に試験用計測柵を固定した。計測柵への荷重は、油圧ジャッキによる逆向きの方向への引込み力を使用して再現した。縦柵（垂直支柱）に油圧ジャッキによる引張を発生させ、支柱部などの加力方向の変形状況、センサ応答、荷重を計測し比較した。図3(a)、(b)に示すように、ピエゾ極限センサは中央部垂直支柱の接合部の専用金具（センサ取付用ブラケット）に挿入して固定し、加力と変位によるセンサの出力関係を時系列に計測した。各接合部分および梁（図3(a)：①水平方向の木材）の変形量を計測するために変位計も設置した。なお、計測柵は中央部に負荷される最大許容加力50～70kNで完全破壊する仕様で設計されている。図3(c)は、ピエゾ振動センサによる振動周波数とセンサ出力の関係を表している。振動の大きさに比例して出力する電圧も比例的に増大することが理解できる。試験の結果、加力の増加と共に梁の左右両方向への変位の発生も確認した。図4は、加力とピエゾ極限センサ出力の関係を示している。図中の左楕円部付近で加力約20kN時にピエゾ極限センサから最初の大きな電圧出力が認められた。この時、中央部の垂木（図3(a)：②上部斜めの木材）における変位は約10～15mmを計測したことから、設計時の安全許容内における最初の破壊が生じた瞬間であると考えられる。2回目の大きな電圧出力は、図4内の中央楕円部付近で加力約45kNのときに認められた。この時の垂木の変位は18～20mm程度であった。さらに、図4内の右楕円部付近で加力が約65kNの時に3回目の大きな出力を示し、中央部の垂木変位も30～35mmの大きな値を示した。その後、計測柵は完全に破壊したことから、この3回目の出力は計測柵の完全破壊を示すことがわかる。図2(a)のように、ピエゾ極限センサはガラス管とピエゾ素子を組み合わせて金属製の保護管内に挿入した構造である。通常（健全時）はガラス管内に封入されたピエゾ素子は固定されているため、センサの出力は計測されないが、設計上の安全値を超える変位や荷重が生じた場合、負荷荷重によりガラス管が部分破損し、その衝撃および金具の変動によりピエゾ素子から電圧出力がある。本試験の結果から、ピエゾ極限センサは3段階による計測柵の危険状況をリアルに知らせることが可能であると考えられる。つまり1回目の出力で注意を促し、2回目の出力では直ちに危険を予知する必要がある、3回目の出力は計測柵の完全破壊を示している。さらにセンサ出力は当初の計測柵設計時における最大許容荷重の数値内にて実証することが可能であったことから信頼性が伺える。



(a) 計測柵の荷力試験



(b) センサユニット



(c) ピエゾ振動センサの出力特性

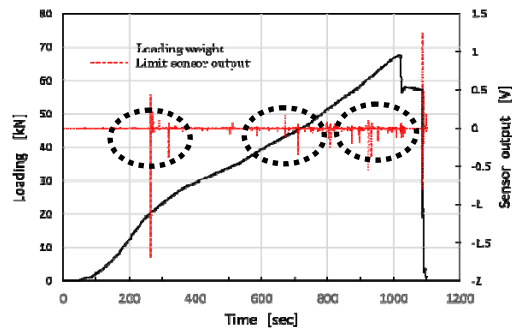


図4 加力とピエゾ極限センサの出力関係

図3 センサの取付状況と出力特性

(2) 野外における計測柵の性能試験

研究所敷地内の野外斜面に設置した計測柵において、クレーンを用いて 500kg の土嚢を 5 t まで載荷する荷力試験を実施した。図 5 に示す試験実施状況は、屋内試験で得られた荷重および変位データから検討した検知範囲の設定が妥当であるか検証した。なお、計測柵の変形を計測するため、試験実施中は複数の変位センサで主要箇所をモニタリングした。図 6 は載荷荷重とピエゾ極限センサ出力の関係を表す。荷重 10kN 付近でダメージを示す信号、30kN 付近で危険信号、50kN 弱で破壊を示す限界信号が認識された。第 4 図に示した同様の屋内試験結果では、ダメージ信号は 20kN 付近、危険信号は 45kN 付近、限界信号は 65kN 付近で計測されている。野外試験と屋内試験の各所要信号に差が生じている点は試験体が各々異なるためと考えられる。屋内試験で使用した破壊加力 65kN の計測柵と野外試験で使用した破壊加力 50kN の計測柵における各所要信号出力時の加力の比を求めると、同様の特性であることが判断できる。



(a) 載荷試験における計測柵上面の土嚢



(b) 計測器の設置状況

図5 野外における載荷試験

(3) 野外斜面に設置した計測柵において模擬的の落石試験

屋内試験で得られた衝撃振動データから算定した値を用いて、検知範囲の設定について検証した。落石の転がり落下エネルギーの計測状況試験の状況を図 7 に示す。野外斜面に約 30° の角度で設置した計測柵の上から落石を模擬した球体を落下させ、その衝撃を観測した。球体の衝突位置が変化しないように中空の球体ガイド管を計測柵の中央に固定し、管内の球体が自由落下で転がるように実施した。使用した球体は 31kg の鉄球で直径 28cm 程度の落石を想定している。図 8 は、計測柵に鉄球を落下させた時の衝撃における加速度計とピエゾ振動センサの出力比較を示す。実線で示した波形は、3 軸加速度計の合成出力であり、破線の波形はピエゾ振動センサによる電圧出力である。両波形を比較すると類似した初期の衝撃状態から減衰して約 2 秒で収束していることが理解できる。図 9 は、球体の重量を約 6kg、11kg、31kg の 3 種類用意して同様の試験で落下させた結果を示している。各球体の重量ごとの落下エネルギーを計算して各センサ出力と比較してグラフ化した。実線は 3 軸加速度計の合成値と落下エネルギーの関係であり、破線は同様にピエゾ振動センサの出力と落下エネルギーの関係を示している。落下試験では両センサとも球体の重量に比例した応答を出力した。

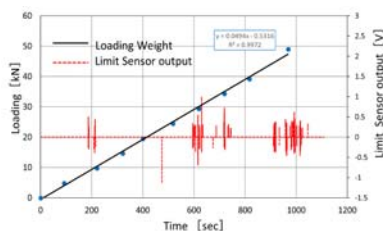


図6 載荷荷重とピエゾ極限センサ出力の関係



図7 落石の落下エネルギー計測状況

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

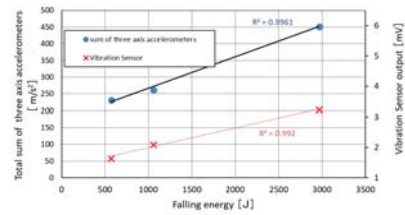
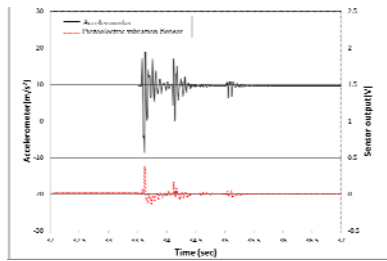


図8 加速度計とピエゾ極限センサの出力比較 図9 各センサ出力と落下エネルギーの関係

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Nobuhiro Shimoi, Kazuhisa Nakasho, Carlos Cuadra, Masahiro Saijo and Hirokazu Madokoro, American Journal of Remote Sensing issued by Science Publishing Group, Vol.5, p10-15, 2017. 査読有り
- ② Nobuhiro Shimoi, Kazuhisa Nakasho, Carlos Cuadra, and Hirokazu Madokoro, Landslide and Falling rock Measurement Using Piezoelectric Smart Sensors, IJSEI, Vol.7, p134-138, 2018. 査読有り
- ③ 下井信浩、中正和久、Carlos CUADRA、間所洋和、ピエゾ極限センサを用いた雪崩発生計測柵の性能試験、日本機械学会、第18巻、p1-7, 2018. 査読有り

[学会発表] (計 4 件)

- ① Nobuhiro Shimoi, Carlos H. Cuadra, Nondestructive Survey of a Historical Wooden Construction Using Thermography and Ambient Vibration Measurements, 18th International Conference on Control, Automation and Systems. ICCAS, 2018
- ② Carlos H. Cuadra, Nobuhiro Shimoi, Structural Damage Detection in a Steel Column-Beam Joint Using Piezoelectric Sensors, 18th International Conference on Control, Automation and Systems. ICCAS, 2018
- ③ 釜田 恵理菜、板垣 直行、小杉 大和、芳賀沼 整、滑田 崇志、難波 和彦、浦部 智義、二次利用を考慮した縦ログ耐力壁の性能改良 その1. ログ材の接合方法の検討、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II. 2016
- ④ 下井信浩、中正和久、間所洋和、間伐材を用いた雪崩計測柵の性能試験、センシングフォーラム (山口大学). 2018

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：板垣 直行

ローマ字氏名：NAOYUKI ITAGAKI

所属研究機関名：秋田県立大学

部局名：システム科学技術学部

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：00271891

(2) 研究協力者

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

研究協力者氏名：中正 和久

ローマ字氏名：KAZUHISA NAKASYO

所属研究機関名：秋田県立大学

部局名：システム科学技術学部職名：助教

研究者番号 (8桁)：40780242

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。