HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	急崖の安定性評価におけるいくつかの新しい手法
Author(s)	藤井, 義明; 前田, 将平; 菅原, 隆之 他
Description	資源・素材2015（松山）ー平成27年度資源・素材関係学協会合同秋季大会ー, 2015年9月8日～10日, 愛媛大学, 松山市
Citation	資源・素材2015（松山）企画発表・一般発表講演集, 2015, 3405
Issue Date	2015-09-08
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/62722
Type	conference paper
File Information	MMIJ2015Matsuyama3405.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

企画講演
ＹＡＲＯ13 温度－熱く研究，クールに考察－
2015年9月10日(木) 09:25 ～ 12:00 第４会場 (EL24)

[3405] 急崖の安定性評価におけるいくつかの新しい手法
New Techniqus in Stability Assesment of Steep Cliff

○藤井義明[1], Fukuda 将平[1], 菅原隆之[1], 小玉齊明[2], 宮下尚志[3] （1.北海道大学, 2.函館工業高等専門学校, 3.株式会社ドーコン）

キーワード：急崖, 安定性評価, 亀裂開口変位, 熱変形, 熱応答

岩盤も一般の材料と同じく温度上昇に伴い膨張し、温度低下に伴い収縮する。岩盤表面と周囲の空気・雨水との温度差、日射・放射等により岩盤温度は変化するが、岩盤奥部の温度はほぼ一定のため、マクロな温度勾配・熱応力・熱変形が生じ落石の一因となる。熱変形は岩盤の熱物性値のみならず、岩盤に存在する亀裂に囲まれた岩盤ブロックの形状にも依存する。

ここでは、まず、亀裂により形成された不安定ブロックの熱変形における基本的なメカニズムについて述べる。次に、有限要素法による弾性解析では、数10 m程度の寸法を有する岩盤は、日周期の気温変動ではほとんど熱変形せず、年周期の気温変動で大きく熱変形するという知見に基づき、従来困難だった、計測値に含まれる計測器自体の熱変形と岩盤の弾性的熱変形を簡便に分離する方法について解説する。同じく有限要素法による弾性解析で得られる亀裂開口変位の熱応答を計測値と比較し、不安定岩体の寸法を推定する方法を紹介し、最後に、現地で測定された節理間隔と小規模な落石データとから、現地における大きな落石の寸法とその頻度を推定する方法について述べる。

©一般社団法人 資源・素材学会

1. はじめに

岩盤も一般の材料と同じく温度上昇に伴い膨張し、温度低下に伴い収縮する。岩盤表面と周囲の空気・雨水との温度差、日射・放射等により岩盤温度は変化するが、岩盤奥部の温度はほぼ一定のため、マクロな温度勾配による熱応力・熱変形が生じ落石の一因となる。熱変形は岩盤の熱物性値のみならず、岩盤に存在する亀裂に囲まれた岩盤ブロックの形状にも依存する。

ここでは、まず、亀裂により形成された岩盤ブロックの熱変形における基本的なメカニズムについて述べる。次に、有限要素法による弾性解析では、数 10 m 程度の寸法を有する岩盤は、日周期の気温変動ではほとんど熱変形せず、年周期の気温変動で大きく熱変形するという知見に基づき、従来困難だった、計測値に含まれる計測器自体の熱変形と岩盤の弾性的熱変形を簡便に分離する方法について解説する。同じく有限要素法による弾性解析で得られる亀裂開口変位の熱応答を計測値と比較し、不安定岩体の亀裂深さを推定する方法を紹介する。最後に、温度と直接の関係はないが、非常に不安定な岩盤ブロックの変形を計測する方法について述べる。

2. 岩盤ブロックの熱変形のメカニズム

既に根岸・中島（1993）によっても報告されているが、亀裂により形成された梁状の岩盤ブロックに周囲から熱量変化が与えられると温度勾配が生じ、熱変形・熱応力を生じる。たとえば、亀裂を有する岩盤モデル（図 1）に一年周期の気温変化を与え、二次元弾性非定常熱変形有限要素解析を実施すると、気温が低下する場合に、岩盤ブロック外側が収縮するので亀裂が開口する方向に岩盤ブロックは熱変形する（図 2a、前田ら、2015）。気温が上昇する場合には、岩盤ブロック外側が膨張するので亀裂が閉じる方向に岩盤ブロックは熱変形する（図 2b）。

根岸・中島（1993）は、亀裂に岩片が挟まった状態で亀裂が閉じる方向に岩盤ブロックが熱変形すれば、その根元に引張応力が生じ、岩盤ブロックが折損すると考察した。Keppetipola et al. (2013)は、岩片が挟まっていなくとも、亀裂が完全に閉じれば、その反力で岩盤ブロックは折損しうること、特に、寒冷地において、岩盤表面が凍結膨張すれば大きな引張応力が生じ得ることを示した。

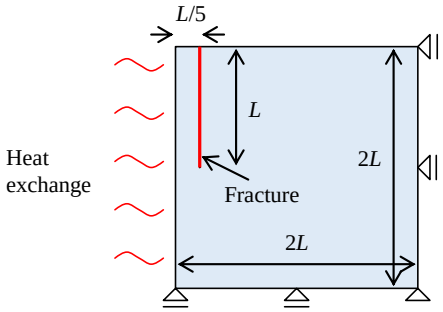
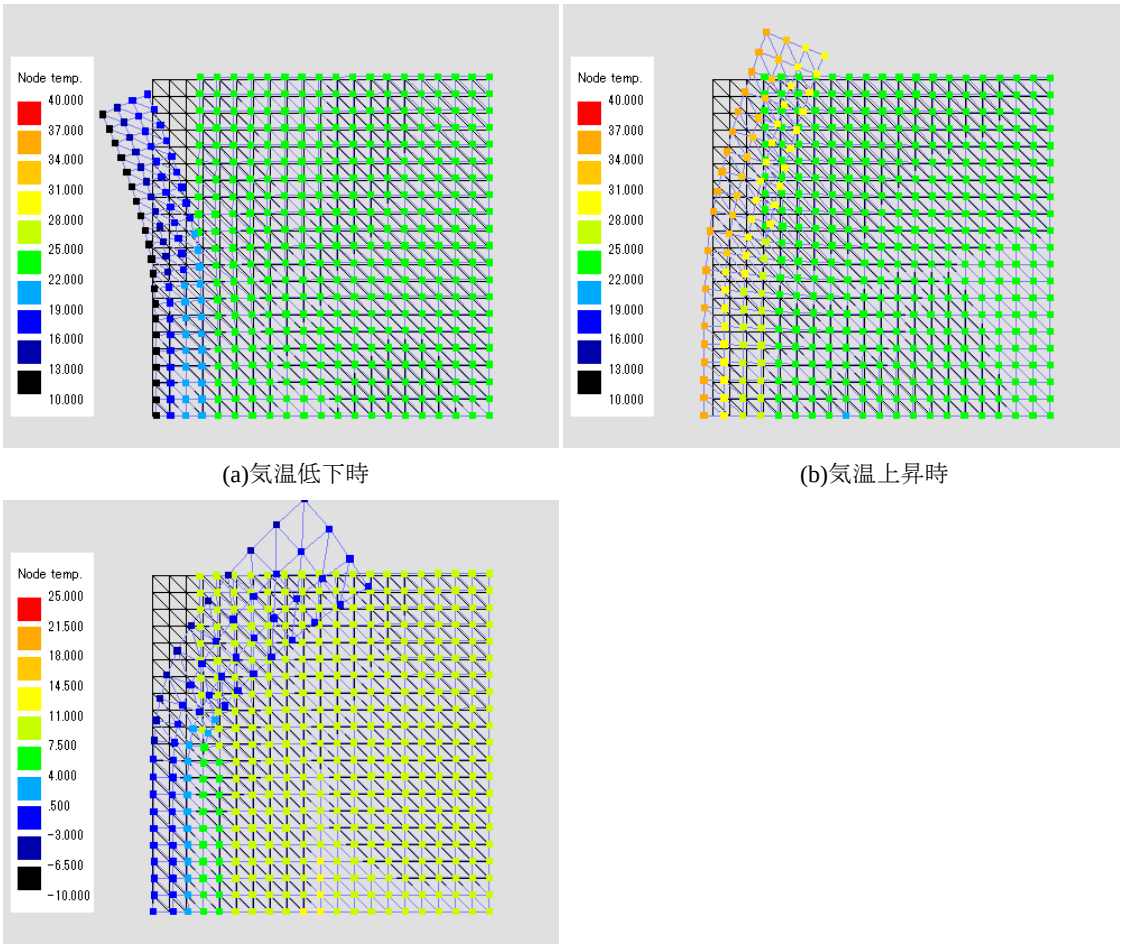


図 1　亀裂を有する岩盤のモデル（右・下境界は断熱、上部境界も植生や土壌・積雪等により断熱されていると仮定した）。

3. 計測器の熱変形の除去方法

さて、図 1 の岩盤モデルに与える気温変化の周期を変えてみると、図 3 のように、周期が短い場合にも長い場合にも熱変形が小さい。これは、周期が短い場合には、温度変化が岩盤内部に伝導しなく、また、周期が長い場合には、岩盤ブロックの温度がほぼ一様になり、熱勾配が生じないためである。つまり、一日周期の気温変化は、ほとんど岩盤の熱変形を引き起こさず、一日周期の計測値の変動は、計測器自体の熱変形に起因することになる。

例えば、函館市の豊崎トンネル脇旧道（図 4）において計測された亀裂変位データ（図 5a、小玉ら、2013、冨樫ら、2014）をみると、温度が上がると亀裂が閉じ、温度が下がると亀裂が開いているようにみえるが、この段階では、計測器の熱変形が含まれているので結論は出せない。次に、横軸に気温、縦軸に表面亀裂変位を取ってプロットしてみる（図 6a）。生データでは、高温時に亀裂が開いていることが見て取れる他に、温度変化の影響としては、岩盤温度が上がると亀裂が閉じ、岩盤温度が下がると亀裂が開いているようにみえるが、やはり、この時点では、計測器の変形による誤差が含まれており、岩盤の熱変形については何も言えない。そこで、生データに見られる細かい一日周期の変動が水平になるように、気温に比例した成分を取り除く（図 6b の赤線）と、結果的に大差なかったものの、岩盤の熱変形が明らかになり、気温が上がると亀裂が閉じ、気温が下がると亀裂が開いていると、初めて述べることができる。



(a)気温低下時　　(b)気温上昇時

(c)凍結時

図 2　岩盤ブロックの熱変形のメカニズム（L = 10 (m)、前田ら、2015）

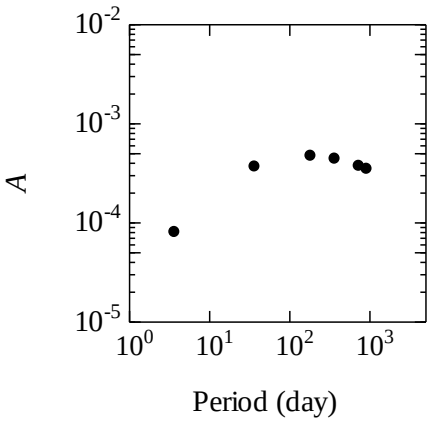


図 3　気温変化周期と岩盤ブロック頂部における最大傾斜変化 $A = \tan\Delta\theta$ に関する FEM 解析結果

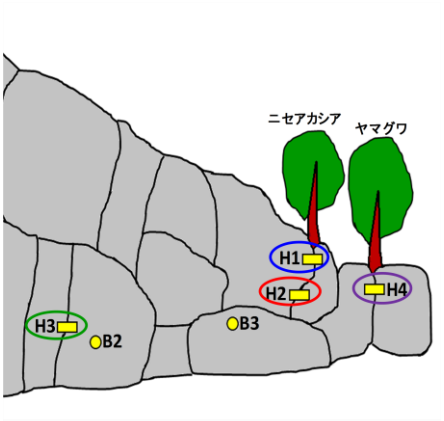
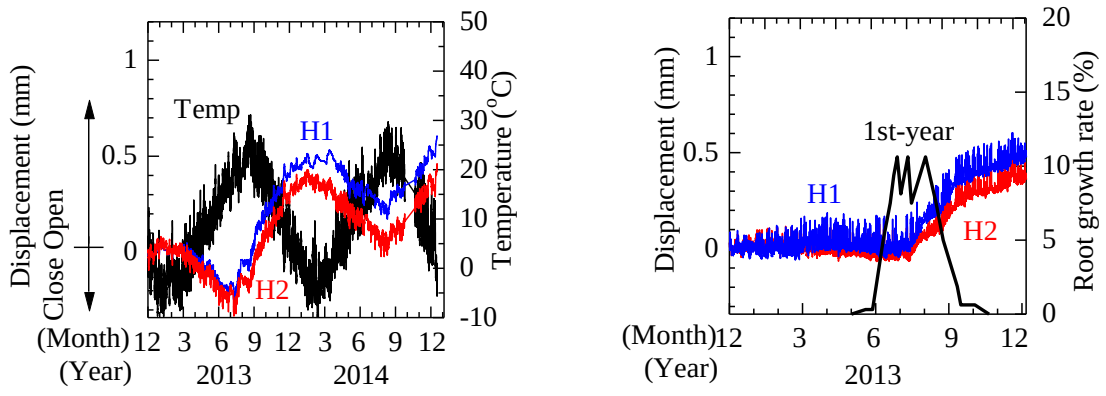


図 4　函館市豊崎トンネル脇旧道の岩盤斜面における計測の模式図



(a)　　(b)

図 5 表面亀裂変位の経時変化。(a)生データ、(b)熱変形を取り除き一年目のみを拡大したデータと参考のために示したヤマグワ樹木根の伸長データ（佐藤、1985）

4. 岩盤の熱変形の除去方法

岩盤の変形と気温の関係は、熱伝導に要する時間のために線形とはならないが、略線形であれば、その変形は弾性的な熱変形であり、岩盤ブロックの不安定性を示すものではないとみなすことができる。一方、岩盤の変形が気温と全く非線形な関係にあれば、弾性的な熱変形以外の何らかの要因で岩盤が非弾性的に変形しているとみなすことができる。

先ほどのグラフで、岩盤の熱変形が表れていると思われる部分が水平になるように再び気温に比例した変形成分を除去し（図 6c の緑）、時系列のグラフとしてプロットし直してみると（図 5b）、この場合は、夏季の大きな亀裂開口が強調される。この開口は、計測対象亀裂の上部に挟まっているニセアカシアの幹の成長と解釈された（前田ら、2015）。

5. 熱応答から岩盤ブロックの寸法を推定する方法

先の有限要素法による解析で、モデルの大きさを変えてみると、岩盤ブロックが小さい場合や大きい場合には亀裂変位が小さいという結果になる（図 7a、前田ら、2015）。これは、岩盤ブロックが小さい場合には、岩盤ブロックの温度がほぼ一様になって熱勾配が生じず、また、岩盤ブロックが大きい場合には、温度変化が岩盤内部に伝導しないためである。そこで、気温－亀裂変位のグラフを作成し、亀裂変位の気温依存性 b (K^{-1})を求め、現地岩盤ブロックを正確にモデル化した解析結果と比較すれば、亀裂深さを推定することができる。

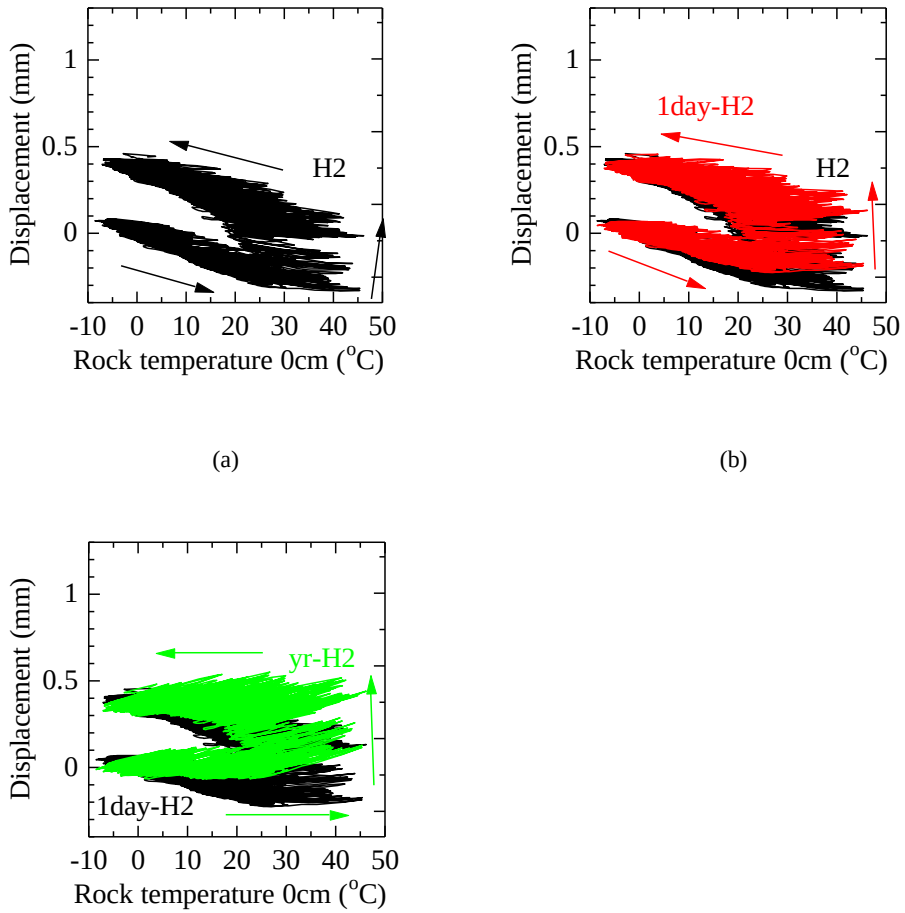


図 6 ある急崖において計測された(a)表面亀裂変位と岩盤表面温度の生データ(黒)、(b)計測器の変形を補正したデータ(赤)、(c)1 年目の熱変形を取り除いたデータ(緑)。

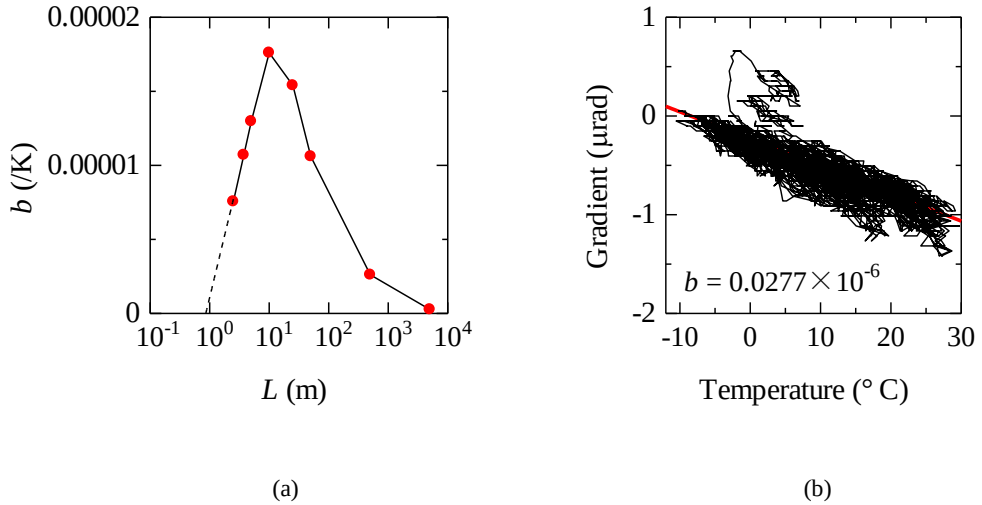


図 7 (a)有限要素モデルによる傾斜の温度依存性 b における岩盤ブロック寸法の影響と(b)豊崎における岩体 A の東方向の傾斜と気温に関する測定値の例

後述する函館市豊崎の現場における傾斜の計測データの例では、計測データが図 7b のようになったので、岩体 A については大きさ 0.86 m または 6270 m となり、後者はあり得ないので前者を採用するとして、不安定岩体の寸法約 1 m に近い値が推定された。ここで用いたモデルは正確なものではないが、正確なモデルを用いれば、亀裂深さの正確な推定が可能と考えられる。また、気温依存性の経時変化から、亀裂の成長を検出することも可能と考えられる。

さらに、熱変形が最大となる岩盤ブロックの大きさと現地の代表的な岩盤ブロックの大きさが一致している場合に落石が頻発するのではないかと予想されるので、多数の斜面においてこの考えの妥当性を検証したいと考えている。

6. 非常に不安定な岩盤ブロックの計測方法

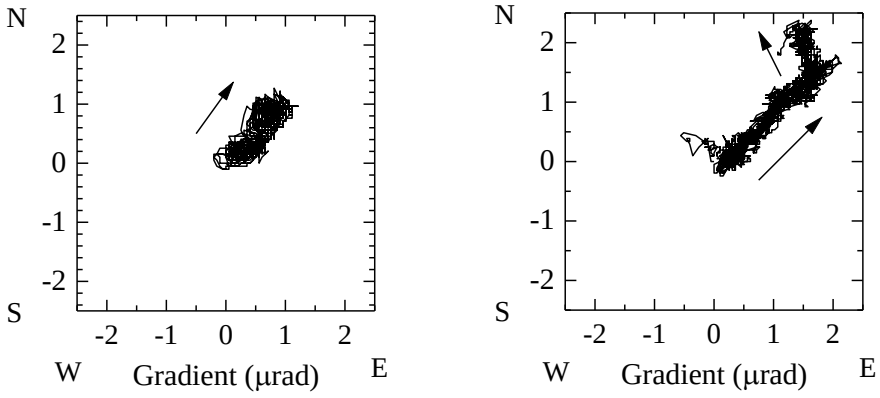
従来の急崖の計測においては、岩石を穿孔しアンカーを用いて計測器を固定するために、本当に落ちそうな岩盤ブロックには計測器を取り付けることができなかった。これが、現在に至るまで、落石の引金が明らかになっていない原因の一つと考えられる。そこで、モルタルブロックと角度調整用台座を用いて傾斜計を不安定ブロック頂部に固定する方法を考案し、函館市豊崎の現場において施工してみた（図 8、前田ら、2015）。

この現場では、はしごを用いてアプローチし、ケーブルを用いてデータを回収するが、クレーン車等でアプローチして、太陽光パネル等で電源を供給し携帯にデータを飛ばすようなシステムを用いれば、高所にある不安定な岩盤ブロックにも適用可能である。傾斜計データには計測器の膨張収縮の影響はなく、生データでは、図 9 に示すような傾斜変化の様子を捉えることができた。5.で述べた方法により岩盤の熱変形を除去すると、熱変形以外の変形が強調され（図 10）、この場合は、夏季の降雨をきっかけとして生じた岩盤の非弾性的変形ではないかと解釈された。



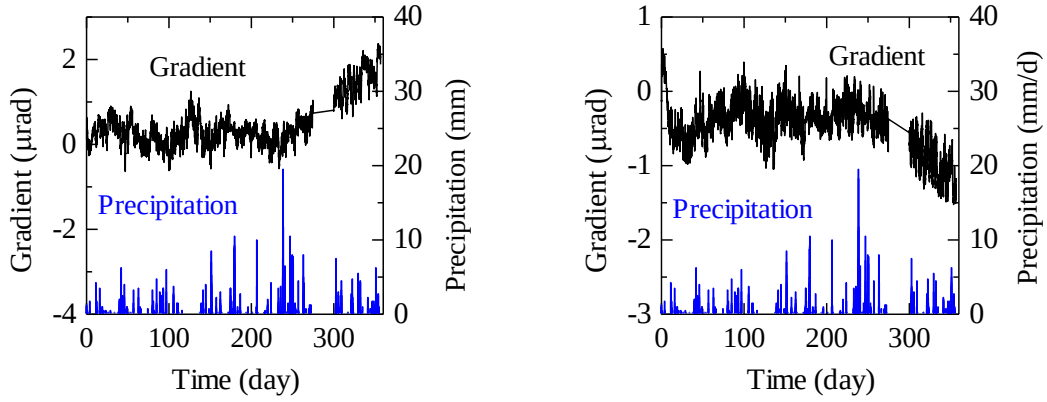
(a) (b)

図 8 (a)不安定岩体に対する傾斜計の設置(b)拡大図



(a)岩体 A (b)岩体 C

図 9 計測された傾斜ベクトルの例



(a)岩体 C、北方向　　(c)岩体 C、西方向

図 10　熱変形を取り除いた傾斜データの例。日降雨量とともに示す。

7. おわりに

亀裂により形成された岩盤ブロックの熱変形における基本的なメカニズム、計測値に含まれる計測器自体の熱変形と岩盤の弾性的熱変形を簡便に分離する方法、亀裂深さを推定する方法、非常に不安定な岩盤ブロックの変形を計測する方法などについて述べた。

地震予知と類似の状況ではあるが、これまで幾多の計測が行われても、落石のメカニズム解明・予知・予防に至っていないことから、ただ単に多大な予算を費やして従来型の計測の密度や正確さを追及しても、落石の予測には結びつかず、発想を転換して新しいアプローチを模索することが必要と思われる。ここで示したような各種方法はその模索の一部であり、これらのいくつかでも、将来、落石のメカニズム解明・予知・予防に資することがあれば筆者らの最大の喜びとするところである。

謝辞

本研究は一般財団法人北海道道路管理技術センター道路管理技術研究所との共同研究として行われた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

小玉齊明・藤井義明・菅原隆之・冨樫晃平・山真典（2013）、函館市豊崎における岩盤斜面変位の長期計測、資源・素材 2013（札幌）講演資料、A13-3、pp. 251-252、北海道大学（札幌）

佐藤孝夫(1995)、樹木の根系の成長に関する基礎的研究、北海道林業試験研究報告第 32 号、pp.1-50

冨樫晃平・小玉齊明・山真典・菅原隆之・畠山葵・福田大祐・加藤昌治・川崎了・藤井義明（2014）、函館市豊崎における落石メカニズム解明を目的とした長期モニタリング対象の旧道岩盤斜面を構成する岩石の特徴、資源・素材学会春季大会、33-1、東大生産研

根岸正充・中島巌（1993）、層雲峡熔結凝灰岩の柱状節理におけるき裂進展とすべり破壊、応用地質、Vol. 34, No. 2, pp. 1-11

前田将平・冨樫晃平・菅原隆之・藤井義明・小玉齊明・宮下尚志（2015）、寒冷地急崖を対象とした長期モニタリングと熱変形に関する数値計算、資源・素材学会北海道支部春季大会、pp. 17-18, 函館

Keppetipola, S.S.S.S.M., Fujii Y. and Kodama, N. (2013), Mechanisms of Falling Rock Formation at Steep Slope due to Temperature Perturbation, Proc. 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium in San Francisco, 23-26 June, 2013, Paper No. 13-237, June 24, 2013.