崩壊面から湧出する地下水の赤外画像による遠隔観測

Remote sensing of discharge of groundwater in collapsed slope by means of infrared thermal imaging

新井場公德^{a)*}

Kiminori ARAIBA

Abstract

This study shows the possibility to quantitatively observe the discharge of groundwater from collapsed slope by remote sensing. In order to remotely observe the discharge situations of groundwater, the temperature of collapsed slope was observed by means of infrared thermal imaging. A slope had been artificially failed by artificial rainfall then a series of thermal images was taken from a distance. Since the collapse occurred at time when the underground temperature was higher than that of ground surface and air, the temperature of collapsed surface immediately after the failure was relatively higher than that of the original ground surface. The collapsed surface then began to be cooled by convection of the air but the temperatures were found to fall down at different rate. Slow rate was observed in some areas and it is considered to be due to the heat transfer from the deep ground to the surface in such areas. According to the observation in this experiment, temperature around one of such areas formed an one-meter-width peak after failure and, the width became to be about 0.5 m at 36 minutes after the failure.

Key words : slope failure, spring water, remote sensing, groundwater, temperature, thermal image

和文要旨

本研究は崩壊面からの地下水の湧出状況を遠隔で定量的に監視することの可能性を示したものである。地下水湧出状況を遠隔で観測するために、人工降雨による自然斜面崩壊実験において、崩壊後の地盤温度を赤外画像装置で計測した。崩壊は地表・大気より地下の温度が高い時期に発生したため、崩壊時に高温の地盤が露出した。その後冷却されたが、温度低下の遅い部分がみられた。地下水による深部からの熱の移流によるものと考えられた。その点の周辺温度を見ると、崩壊直後に幅約1mでピークが発達し、36分後には幅約50cmとなった。

キーワード：斜面崩壊、湧水、リモートセンシング、地下水、温度、熱画像

1. はじめに

斜面内の地下水のうち流動するものは、地盤中や地層境界に均質に存在するのではなく、ある特定の領域(「水みち」や「パイプ」などと呼ばれる)内を流動するものが多い。このような地下水の位置・流速・流量などをすることは容易ではないが、ボーリング孔を用いた検層等の調査・観測、1m深地温探査などが行われている。1m深地温探査法(竹内, 1973)は地盤の温度と流動する地下水の温度差に着目した方法であり、地すべり地において地下水の流動状況を知るために有効な方法として確立され、水みちが斜面内に存在することを示す先駆的役割を果たした。このような流動する地下水は、土骨格に対して水流の向きに浸透力を作用させるとともに、水の分布量の変化による間隙水圧変化や土塊の重量バランスの変化を生じさせ、地すべり・斜面崩壊の発生に力学的な影響を与えている。その場所・流量等を計測できれば、地すべり・崩壊の挙動予測に役立つと考えられる。

一方、斜面崩壊後の搜索・救助活動においては、作業の迅速性と安全性の確保という2つの条件を満たす必要がある。そのため二次的な崩壊の危険性を監視しつつ作業を行うことが求められる。現在は目視による定性的な監視が一般的である。筆者は各種の条件を総合的に判断

できる人間による監視を否定するものではないが、それを支援する情報を創出することにより、より安全な作業が可能になると考える。特に、地下水の状況について客観的情報を得る既存手段としては、ボーリングを用いた調査・観測等、崩壊地へ立ち入る手間と時間のかかる方法が主体であり、崩壊直後などの監視活動に用いることは難しい。もし遠隔に地下水の湧出状況が分かれば有益であると考えられる。このような目的で本研究では、崩壊面と湧出地下水の温度差に注目し、赤外画像装置によって崩壊地内の水みちから流出する地下水の状況を遠隔で観測することを試みた。

同様に地盤等から浸出する水の存在を遠隔に知るための研究として、山下他(1993)はため池の堤体からの漏水箇所を赤外画像から同定する研究を行った。これによれば、堤体からの漏水は遠隔で検出できる程度の温度差を有していることが明らかにされている。同様にコンクリート壁面に対して、水の浸出箇所を赤外画像から同定する方法も開発されている(中村他, 1993)。これら既往の研究では人口構造物からの漏水について扱っている。また、定常的な浸出の位置を同定することを主たる目的としており、温度の経時変化等に着目してはいない。本研究においては、崩壊後の救助活動の安全性評価に資する目的で、崩壊後の自然斜面から流出する非定常の地下水湧き出し状況を遠隔観測する手法について検討する。

自然地盤の斜面からの流動地下水の場合、地下深部と

* 連絡著者／corresponding author

a) 独立行政法人消防研究所

National Research Institute of Fire and Disaster

〒181-8633 東京都三鷹市中原3-14-1

3-14-1, Nakahara, Mitaka, Tokyo, 181-8633, Japan

地表とは一般に温度差があり、地下深部から地表へ流動する地下水は、その流速が熱伝導に比べて十分早ければ、地表に到達しても深部の温度の情報を有している可能性がある。具体的には、夏季には湧出地下水温は地表よりも相対的に低く、冬季には水温は相対的に高いものと予想される。また、地表温度は大気温度変化や日射などの影響によって変化する一方、ある程度深い地盤中を流動する地下水温は変化しにくいという特徴もある。そのため、地下水が湧き出す点では、気温及び日射由来の地表温度の変化と異なる温度変化を示すものと想像される。本研究ではこのような点に着目し、自然斜面での崩壊実験時に、その後の地下水流出状況が赤外画像装置によって遠隔的に計測できるかどうかを検討した。

2. 実験の概要と観測の方法

2.1 崩壊実験の概要

測定の対象とした実験は「地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明プロジェクト」グループによって実施された（落合他，2004，Ochiai *et al.*, 2004）。ここでは本研究に関連する部分のみを記載する。崩壊実験は2003年11月14日に茨城県真壁郡の加波山の標高約400mに位置する西向き斜面の一部を区画して行なわれた。区画された斜面形状は、幅5m、斜面長約30mで平均傾斜は約33°であった。実験斜面は風化花崗岩を基盤とし、上層に火山灰層が堆積している。植生は除去され、露出した地表面には表面流を抑制し浸透を促進するために、わらむしろが敷かれた。この実験斜面へ地表約2mに設置されたノズルにより水が散布された。平均散水強度は78 mm/hであった。区画横方向への地下水の散逸を防ぐために、鉄板が地下約1mまで両側面に打たれた。

散水を開始してから約6時間後の午後4時ごろに崩壊が発生した。図-1に崩壊前後の断面図を示す。実験斜面のうちおよそ下部半分で崩壊が発生した。崩土は流動化して流走し崩壊面は土がむき出しになった（一部にわらむしろが残った）。崩壊後しばらくは散水ノズルから

図-1 実験斜面の崩壊前後の縦断面形状（中央断面）

Fig. 1 Longitudinal sections of the center of the experiment slope before and after collapse

わずかではあるが水が垂れていた。実験斜面は午後に強い太陽光を受けていた。崩壊時には実験斜面上部には太陽光があたっていたが、崩壊した部分は日陰になっていた。崩壊面は最大深度1.2mでまさ土中に形成された。

2.2 計測の方法

赤外画像装置を設置したのは、実験斜面頂部から水平距離約60m（脚部から約40m）離れた点である。データは不定期に記録した。装置の主な仕様は表の通りである。距離（代表値として50mを採用）と視野角、画素数から計算されるおおよその空間分解能は、水平方向約0.074m、鉛直方向約0.085mとなる。

この装置の測定波長領域では地上における太陽の放射照度が高く、直射日光が当たる部分ではその反射の影響が強く出る可能性がある。但し、今回解析の対象とする時間帯において、対象領域は日陰に入っており直射日光を受けておらず、また、40分という短い時間であるので、太陽光由来の赤外線量の変化を考慮する必要はないものと考えた。そのほか、今回の測定対象は飽和度の高いま

表-1 赤外画像装置の仕様
Table 1 Specifications of the thermal camera

温度測定範囲	-10～200℃
最小検知温度差	0.1℃以下（30℃）
測定精度	±1.0%
測定波長	3～3.5 μm
検出器	HgCdTe 8素子電子冷却型
視野角	水平 21.5° × 垂直 21.5°
フレーム時間	1/1.6 秒
赤外画像画素数	水平 255×垂直 223
データ深度	12bits

図-2 水みちからの地下水湧出を考慮した地盤の伝熱モデル
Fig. 2 Schematic model of heat transfer in the ground where an underground vein discharges groundwater

さ土で放射率が高いことが考えられるため、放射率を1.0(完全黒体)とした。

2.3 地温のモデル

地下水の湧出を考慮した地盤の熱環境のモデルを図-2に示す。地下深部には年間を通じてほとんど温度の変化しない恒温層が存在する。地表では、日射による加熱のほか、大気との温度差に比例した対流伝熱が生じる。以上は地下水流動による熱の移流がない場合である。水みちが地下深部から地表へ通じていた場合、地下水の移動に伴い熱が移流される。移流される熱量は地下水の流速と水みち方向の温度勾配との積となる。そのため、地下水の流速によっては、地表部が恒温層より低温の場合には水みち周囲の温度が周辺地盤より高くなり、逆に地表が高温の場合には水みち周囲が低温となる。また、地表に湧き出した後の水によって熱量は斜面下方へ輸送される。その他、放射による冷却や気化熱による冷却も存在する。湧き出し量が少ない場合、例えば、湧き出し点付近の地表面が湿っている程度で斜面上に流れがないような場合には、気化による冷却を無視し得ない。本研究では、斜面の安定性に大きな影響を与えると考えられる程度の湧き出しを検討対象としているため、湿潤斜面上を流下する程度の湧き出しを考慮し、気化による冷却を無視したモデルを構築した。なお、一般的な地下水温度領域では放射による冷却は無視し得ると考えられる。

2.4 単純条件下における遠隔計測実験

本論文で対象とする実験のような複雑な条件ではなく、単純な条件下における赤外画像撮影を行った。撮影は4月下旬の石川県で行った。当日は日中気温が20℃を越える好天で、撮影は夕方4時頃行った。撮影画像を図-3に示す。被写体は可視光写真Aに示す通り、道路の切り土のり面に厚層基材吹付が施工されたものである。人物の指さす点には穴が開いており、地下水がにじみ出していた。近接から赤外画像を撮影した(図-3B)。にじみ出している点は他の地盤より低い温度で写っている。また、わずかではあるが水みちから下方へ低温部が延びており、湧出後の水の流下による熱移動も観察できる。なお、この点の周辺でも同様の高さの位置に水が湧出している点が断続的に複数存在していた。これらの水が吹き付けた基材と地盤の間を流動してきたものであれば同じ高さから流出する可能性は低い。背後地盤のある高さの不透水層上部から湧出しているものと推測される。

2.4 崩壊実験時の温度条件

加波山における崩壊実験の場合、崩壊時に露出する地盤は元々の地表温度とは異なっていたと考えられる。崩壊直後の面の温度として標準的な1m深地温(竹内, 1996)を実験斜面について求めると、実験斜面(北緯36度19分、標高約400m)の11月においては約14.5℃となる。斜面方位はおおよそ西向きでやや北へ傾斜していることから、実際にはこの値よりも低い可能性はあるものの、崩壊時の気温(約9℃)よりも十分に高かったと判

断できる。このことから、崩壊後の温度変化としては以下のように推移すると考えられる。崩壊直後、元々の地表よりも高い温度の崩壊面が露出する。崩壊面は低温の空気によって地表から冷却される。地下水が湧き出す水みち内部では地下深部から地下水の移流によって熱が輸送され、比較的高い温度となる。水みち周辺の地表の温度は半径方向の熱伝導によって高くなる。一方、地表からの冷却は徐々に地下深部へ浸透するために、地表に到達する地下水の温度は時間的に低下する。

3. 計測結果と議論

3.1 赤外画像の経時変化

図-4に崩壊前(A)後(B)の写真を示す。Aの写真中で実験斜面中腹にある青い線は、崩壊の頂部のおおよその位置を、写真Bを参考に描いたものである。崩壊は実験斜面の下部約半分の部分から発生した。図-5に崩壊11分前から崩壊36分後までの赤外画像の経時変化を示す。温度の色尺度は一連の画像の中で統一してある。画像中には、金属製の散水管路の影響を受けた縦及び横方向の線(日射を受けている部分では高温、日陰部分では低温)が写っているが、これらは地盤の温度ではないために除外して考える。図-5A(崩壊の11分前の赤外画像)では、実験斜面上部で高温となっている。これは直射日光を受けている部分である。実際に温度が高かったことと、日射由来の赤外線の反射という二つの影響であると考えられる。日射のない斜面下部は低温に写っている。崩壊直後(図-5B, 崩壊4秒後)には崩壊が発生した領域で崩壊前より高い温度が観測されている。比較的高温の地下深部が露出した様子をとらえたものと考えられる。その後時間の経過と共に冷却されていく(図-5C, 崩壊16分後)が、図-5D(崩壊36分後)に見られるように、崩壊面中に比較的温度の高い領域がいくつか残された。前章のモデルにおける地下水の湧出点であると考えられる。

3.2 崩壊面の温度変化

図-6(背景は崩壊36分後の白黒赤外画像)に示した8つの点の温度の経時変化を図-7に示した。点a, bは空が映っている部分で、気温に対応する放射を表していると考えられる。それ以外の点は露出した崩壊面内の地点で、c, d, g, hは図-5Dで高温が見られた領域、e, fは低温の領域から選んだ。崩壊が発生したのは日没時の気温の低下時にあたり、その様子があらわれている。崩壊面のうちe, fという2点の温度は崩壊直後にはa, bよりも高いもののすぐに減少し、その後a, bと類似した温度低下を示している。崩壊面のうち地下水の影響圏にない部分では、急速に対流伝熱による冷却が進行し、気温の影響を強く受けていることが分かる。

一方、その他の点については、これらの点よりも高い温度で推移している。崩壊後3分以内ではほとんど冷却されていない。崩壊直後には地盤深部まで冷却が伝導し

図一 3 厚層基材吹き付けが施工された道路法面からの水の湧出状況
(A：可視光写真，B：湧出点の赤外画像（近接））

Fig. 3 Pictures of position of groundwater discharge from a slope covered by an artificial soil layer
(A: visible rays, B: thermal image taken closely)

図一 4 崩壊前(A) 後(B) の実験斜面の写真

Fig. 4 Pictures of the slope of experiment before (A) and after (B) failure

図一 5 自然斜面崩壊実験時の連続赤外画像
A：崩壊11分前，B：崩壊 4 秒後，C：崩壊16分後，
D：崩壊36分後

Fig. 5 Thermal images of the collapsed slope
A: 11 minutes before collapse, B: 4 seconds after collapse, C: 16 min. after collapse, D: 36 min. after collapse

図一六 温度計測点の分布

Fig. 6 Distribution of points where temperature is shown in Fig. 7

図一七 温度計測点の温度の経時変化

Fig. 7 Changes in the temperature of the collapsed surface observed by thermal imaging

ておらず、地下水温が高いまま地表に到達していることを反映しているものと考えられる。その後、冷却の浸透に伴い地表に近い部分から水みち内の地下水の温度も低下するために地表の温度は低下するものの、その度合いは同じ時期のe, fよりも遅い。対流伝熱による冷却を受けるものの移流による熱輸送も継続していることを示している。

3.3 高温域周辺の温度場

図一八に高温域g周辺の温度場の横断形状の経時変化を示す。なお、横軸は、計器の視野角と画素数及び計器と対象との距離から求めたものである。崩壊から約2分後までは崩壊直後（4秒後）よりも中央付近のピークが

図一八 点gの周辺の斜面横断方向の温度分布とその変化斜面向かって左方向が正值

Fig. 8 Cross section of temperature field around point g in Fig. 6 and its change. The positive value of the distance indicates the right hand direction of slope

成長している。地下水による熱の移流は地下水流速と流速方向の温度勾配の積である。崩壊直後にピークが発達する機構としては、崩壊によって流速が増加した、空気に露出することによって地下の温度勾配が急になった、という2つの機構が考えられる。g周辺の地表温度が上昇していることを考慮すると、後者ではなく前者の機構であるといえる。その後、全体として温度が低下しているが、中央付近の温度は23分後では、中央付近で崩壊直後と同じ程度の温度であるのに対し、周囲で崩壊直後よりも温度が下がっており、高温部が顕著となっている。このとき±0.5mの範囲ではおおよそ左右対称と言える。この程度の範囲で解析をすれば地下水の湧出量などの解析が可能であると推測される。36分後の計測ではピーク部でも温度が低下しているが、約0.5mの幅で高原状の形状が見られる。粗い評価であるがg点の水みちの半径としてはこの程度の直径を考慮すればよいと考えられる。

なお、より広い範囲を見た場合、ピークの形状は、単純なモデルから想像される左右対称ではなく非対称である。とくに右側で著しく温度が低くなっている。これは散水管路の影響及び実験斜面側部に地下深部まで打設した鉄板の影響などの誤差要因が考えられる。

図一九に高温域g周辺の温度場の縦断形状の経時変化を示す。横断形状と同様、ピークの周辺では崩壊直後から2分後の間に温度が上昇しているが、gを離れると小さくなり、特に上流側で小さい傾向がある。湧出部より下流側には地表流による熱輸送があることを反映していると考えられる。上流側に温度が著しく低い箇所がある

図－9 点gの周辺の斜面縦断方向の温度分布とその変化斜面下方方向が正値

Fig. 9 Longitudinal section of temperature field around point g in Fig. 6 and its change. The positive value of the distance indicates the downward direction

が、散水管路の影響を受けた箇所である。下流側では湧き出した後の地表流によって斜面下部まで高い温度を維持している。この湧出点の場合、冷却よりも地表流による熱の輸送の方が優勢である。

4. 結 論

自然斜面崩壊実験において崩壊後の地表の温度を赤外面像装置によって計測し、以下の結果を得た。

- ・崩壊は地表・大気温度より地下の温度が高い時間帯に発生し、崩壊直後には地表よりも高温の崩壊面が露出した。
- ・露出した崩壊面は空気により冷却されるが、面内で冷却が速い領域と遅い領域がみられた。遅い領域には地下水流動によって地表より高温の地下深部からの熱の移流があるものと考えた。
- ・冷却が遅い部分の温度は、地下深部への冷却の浸透に伴って下がるが、早い部分に比較して遅い。地下水流動による熱の移流の効果と考えられる。
- ・高温部の一つについてその周辺の温度場形状を見ると、崩壊直後から2分間程度の間はピークが発達した。

ピークの幅は約1mから徐々に小さくなり、36分後におよそ50cmであった。

- ・以上のことから崩壊面から湧き出す地下水について、赤外面像装置を用いて遠隔的に観測できる可能性が示されたと考えている。

本研究においては観測可能性の検証及び今後詳細に解析を行うための予備的検討を行った。これまで述べた方法では赤外面像装置からの出力をそのまま見たものであり、計測値の取得は瞬時的に可能である。さらに詳細な解析のためには、日照時の太陽由来の赤外線による測定値の攪乱の除去、大気と地表との伝熱の評価などが必要である。今回得られた規模の水みちを対象として、今後数値解析等により観測現地にて流出量を算定する手法について検討を行う予定である。

謝 辞

難しい実験を成功裏に実施された「地震豪雨時の高速長距離土砂流動現象の解明プロジェクト」グループの皆様には深く敬意を表します。特に実験の現地責任者である森林総合研究所落合博貴氏には様々な便宜を図って頂きました。深謝申し上げます。防災科学技術研究所岡田康彦氏、京都大学防災研究所古谷元氏、(株)数理設計研究所名倉裕氏・玉置晴朗氏の各氏には現地作業においてお世話になりました。記して感謝します。

引用文献

- Hirotaoka Ochiai, Yasuhiko Okada, Gen Furuya, Yoichi Okura, Takuro Matsui, Toshiaki Sammori, Tomomi Terajima and Kyoji Sassa (2004), A fluidized landslide on a natural slope by artificial rainfall, Landslides, Vol. 1, No. 3, pp. 211-219.
- 中村弘史・稲垣照美・岡本芳三・佐藤好昭・山根修 (1993): 構造物壁面より漏洩する流体の噴出箇所の検出に関する研究, 可視可情報, 13, Supple No. 1, 58, p. 219.
- 落合博貴・三森利昭・大倉陽一・松井琢郎・寺嶋智己・牧原浩太郎・藍原誠志・谷田部慶憲・Mark E. Reid・森脇 寛・岡田康彦・佐々恭二 (2004): 人工降雨による実斜面崩壊実験と斜面変動, 平成16年度砂防学会研究発表会予稿集.
- 竹内篤雄 (1973): 地すべり地における地温測定調査について(4), 地すべり, Vol. 9, No. 3, 18-22.
- 竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法, 古今書院, ISBN 4-7722-1850-5, pp. 34-40.
- 山下恒雄・吉迫宏・堀俊和 (1993): 赤外線温度解析装置によるため池堤体漏水箇所の検出方法, 平成5年度農業土木課題別研究会, 造構分科会資料.

(原稿受付2004年7月8日, 原稿受理2005年2月14日)