

論文

地中水みちと崩壊発生位置の関連性

Relation between collapse position and water path position in slopes

多田 泰之^{*1}

Yasuyuki Tada

河合 隆行^{*4}

Takayuki Kawai

藤田 正治^{*2}

Masaharu Fujita

奥村 武信^{*5}

Takenobu Okumura

堤 大三^{*2}

Daizo Tsutsumi

本田 尚正^{*6}

Naomasa Honda

小山 敏^{*3}

Kan Koyama

Abstract

In Japan, a lot of hillslope collapses triggered by heavy rainstorm almost every year. In spite of continuous effort to elucidate the mechanism of landslide occurrence, sufficient answer explaining why the particular position of the hillslope collapses have not been obtained. It has been pointed out that there is a close relationship between the landslide and underground water paths according to observations around the collapse site; i.e. outlet of soil pipes on the scarp, clouding, stopping or spouting of spring water just before or after the landslides. However, detail of these relationships has not been clearly understood yet, partly due to lack of an effective method to detect the water path within the slope. Recently, a new method to detect the underground water path positions measuring sound of ground water flow by a sound sensor "hydrostat" was developed.

In this study, water path position is detected by this new method. And estimated water position is compared with the collapse position in natural slopes and road cut slope. As the result, the hydrosonic in collapse position is higher than non collapse position. This result indicates that collapses is triggered at the position where the ground water gathers. In this investigation, there were the slopes that have the high hydrosonic position. Change of these slopes after heavy rainstorm were monitored. As the result, the high hydrosonic position in slopes was collapsed, because of heavy rainstorms by the typhoon. These results clarified bellow. In the slope, there is the position which ground water concentrates on a daily basis, and this position was supplied bags of water by the heavy rainstorms. Therefor, the ground water concentrating position was collapsed. It is clear that supply condition of ground water is different in collapse position and another position.

Key words : collapsed position, water path position, underground sound

1. はじめに

従来、崩壊地で湧水や流水の痕跡が確認されること（例えば、川口ほか、1951、太田ら 1981）や、湧水の噴出・停止が崩壊の前兆現象として知られていることなどから、崩壊現象と水みちには何らかの関連性があると考えられてきた。

このような背景から、水みちの雨水流出過程に及ぼす影響（例えば、北原ら 1988、小山ら 2002、Kosugi 2002）や崩壊発生に及ぼす影響など（例えば、内田ら 1995、多田ら 2002、堤ら 2005）が検討され、多くの興味深い知見が得られている。しかしながら、現状で考えられている水みちと崩壊との因果関係はあるシナリオに基づく見解であり、推測の域を出でていない。この原因是①崩壊が突発的に発生する現象で、その発生位置を特定するのが困難であること。②急峻な山地において簡便に水みち

の位置を特定する手法が無いことが大きく影響している。斜面で水みち位置すら判然としない現状では、崩壊と水みちの因果関係を明らかにすることは困難である。

多田ら（2005 a, b, c）は、崩壊と水みちの因果関係を明らかにするためには、まず、②の問題を解決する必要があると考え、地下を流れる水流の発する音から水みちの位置を特定する手法を開発した。また、この方法は測定が簡便で、計器も軽量であることから急峻な山地でも十分利用できることも明らかとなった。

本研究では、自然斜面や林道法面で発生した崩壊地で地下流水音探査を実施し、従来あまり検討されてこなかった水みち経路と崩壊発生位置の関係について検討・考察する。

2. 地下流水音の測定とその性質

本研究では、地中の水みち位置を地下流水音探査によ

*1 正会員 (独) 森林総合研究所(元京都大学防災研究所) (ytada@ffpri.affrc.go.jp) Member, Forestry and Forest Products Research Institute

*2 正会員 京都大学防災研究所 Member, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University *3 正会員 鳥取県林業試験場 Member, Tottori Prefectural Forest Experimental Station *4 鳥取大学乾燥地研究センター Arid Land Research Center, Tottori University

*5 正会員 鳥取大学農学部 Member, Faculty of Agriculture, Tottori University *6 正会員 茨城大学理学部(元鳥取大学農学部) Member, Faculty of Science, Ibaraki University

って判定した。ここでは、まず地下流水音探査の概要について説明する。

2.1 地下流水音探査

地下流水音探査は、地下を流れる地下水の発する音を測定し、その音圧の強弱から水みちの位置を特定する方法である（多田ら 2005 c）。現地で地下流水音を測定する場合、風音・風の振動音・土・礫の摩擦音等の雑音が地下流水音に混入しやすいので、その測定には雑音を抑える工夫が必要となる。以下、測定装置について説明する。

地下流水音測定装置を写真-1に、測定の模式を図-1に示した。この装置は従来水道管の漏水箇所を検知するために開発されたもので、その分野では漏水検知器と呼ばれている。

地下流水音測定装置は、1) ピックアップセンサ、2) 測定部、3) ヘッドホン、4) 録音部で構成されている。各部の機能は次の通りである。

- 1) ピックアップセンサ：風等の雑音を防ぐために、写真-1に示した $\phi 0.8 \times 10\text{ cm}$ のステンレス棒をピックアップセンサへ取り付け、これを地表面へ挿入し地下流水音を捉える。
 - 2) 測定部：測定部は、ピックアップセンサで捉えた地下流水音を増幅する增幅回路、風等の雑音を遮断するフィルター回路、地下流水音の音圧を指示するレベルメータからなる。フィルター回路はピックアップセンサで捉らえた流水音のうち特定の周波数帯の音のみを取り出せ、現場で発生する雑音に柔軟に対応できる。また、レベルメータによって、音の強弱を視覚的に判断できる。なお、測定器で聴音できる周波数の範囲は $100\text{ Hz} \sim 1200\text{ Hz}$ である。 $100, 200, 400, 600, 800, 1200\text{ Hz}$ の各々の組み合わせの中で聴音する周波数帯を選択する仕組みになっている。
 - 3) ヘッドホン：ピックアップセンサで捉えた地下流水音を測定部で設定した増幅率、周波数帯のものをリアルタイムで出力する。
 - 4) レコーダ：一般に市販されているボイスレコーダーをヘッドホンと並列に繋ぎ、地下流水音を録音する。
- 地下流水音測定装置は、軽量であるだけでなく、最も大きい測定部のサイズは $17.5 \times 7.0 \times 10.5\text{ cm}$ と小型で、山地の作業に十分利用できる。

2.2 地下流水音の特徴

地下流水音の特徴については、多田ら（2005 c）で詳細に述べた。ここでは均一な土層に水みちが1つ存在する場合を例に取り上げ、地下流水音の特徴を説明する。

模型土層の模式を図-2に示した。長さ5m、幅2m、深さ0.7mの土層 ($\gamma_s = 1.43\text{ g/cm}^3$) の中央2.5mの位置に、直径5cmの多孔管を設置し、図-2中の Q_{in} から給水を行った。多孔管の深さは35, 62cmの2ケース、流量は50, 100, 150, 200, 250, 300 ml/sec の6種類の定常給水とした。

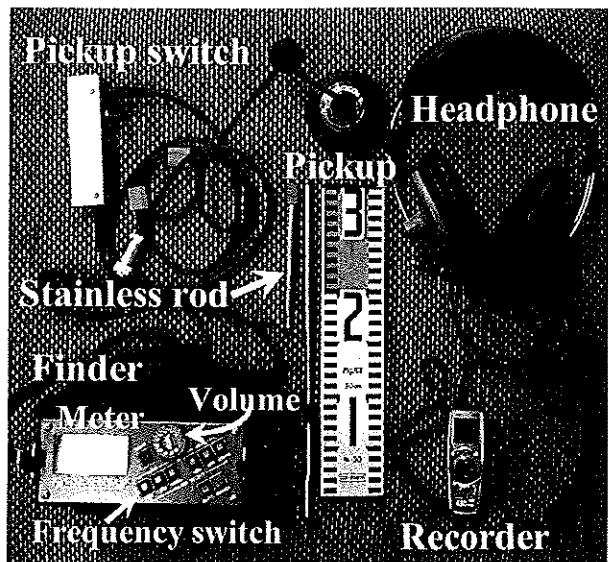


写真-1 地下流水音測定装置
Photo 1 Measuring devices of ground water Sound

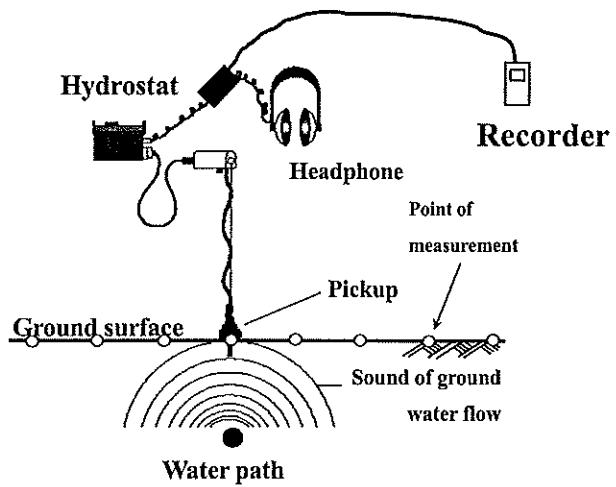


図-1 地下流水音の測定
Fig. 1 Measuring method of ground water sound

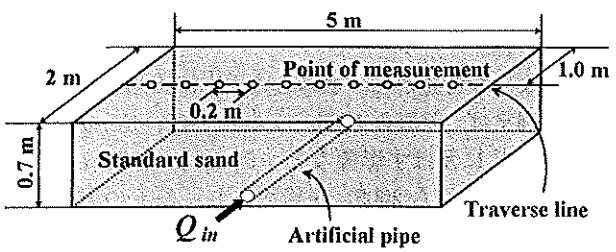


図-2 模型土層
Fig. 2 Model soil layer with one water path and measurement point of water flow sound

地下流水音は、図-2中に示した各測点でピックアップのステンレス棒を地表面へ挿入し、ヘッドホンから聞こえる地下流水音の変動とレベルメータの指示値の変動の関係を良く観察し、ピーク値を10回測定した。そして、それらの値の平均値を地下流水音圧とした。なお、

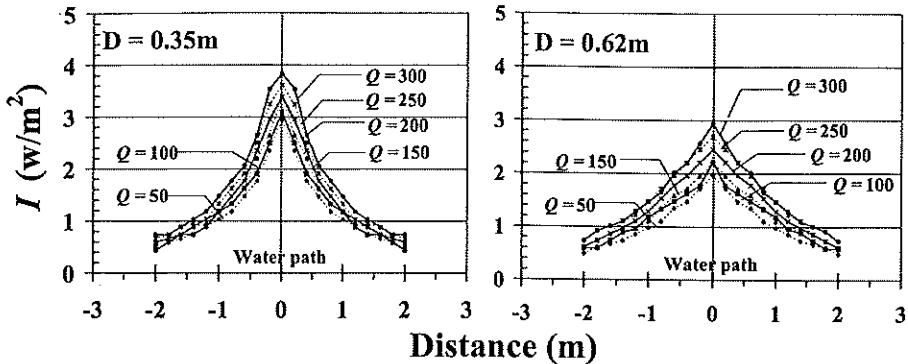


図-3 深度毎の地下流水音の測定結果
Fig. 3 Measurement results of water flow sound in each depth

低騒音かつ無風状態で予備実験を行った結果、地下流水音は100~600 Hzの間でよく捉えることが可能であった。本実験では地下流水音のうち、この周波数帯のものを測定値としている。

各測点で測定した地下流水音圧 I (W/m²) をパイプの深さ別に図-3に示した。なお、図中の数字は流量(m l/sec)を表す。また、図中では多孔管の位置を0 mとして表記している。

地表面で測定した地下流水音圧は、多孔管直上0 mの位置で最も強く、音源であるパイプから離れるほど音圧が減衰する。パイプの深さが等しい場合、各深度の地下流水音の分布波形の勾配は類似しているが、流量が多いほど各測点での地下流水音が強い。パイプ流量が等しい場合、深度の浅い方がパイプ近傍の音圧が高い。また、分布波形の勾配は深度が深い場合に比較し、深度が浅い方が急である。

このように、地表面へ伝わる地下流水音の大きさは、水みちの流量と深さの相互関係によって定まり、水みちの真上で最も強くなる。

以下の検討では、地下流水音のピーク直下に水みちが存在すると考え、考察を進めることとする。

3. 調査地の概要と調査方法

水みち経路と崩壊発生位置の関係を検討するために、岡山県下の自然斜面4箇所で発生した表層崩壊10個、および、鳥取県・岡山県下の林道40箇所で発生した法面崩壊63個で地下流水音を調査した。調査地の位置を図-4に示す。

自然斜面で調査した表層崩壊(図-4中○)は、皆伐後にスギ・ヒノキを植栽した幼齢林地で発生したものである。崩壊の地質は全て花崗岩からなり、崩壊幅は2~16 m、崩壊深は1~2 m程度と花崗岩地帯で発生する一般的な表層崩壊と思われるものを選定・調査している。

林道法面で調査した崩壊(図-4中●)は、全て切取り法面で発生したもので、降雨時に林道路面で発生した表面流が影響したと考えられるものは選定していない。

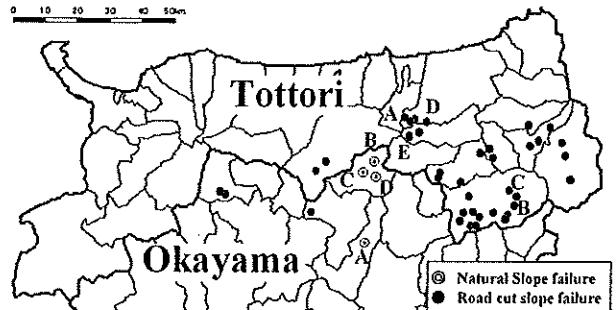


図-4 調査地の位置
Fig. 4 The location of study area

地質は花崗岩・花崗閃緑岩、三群変性岩、黒色変岩、凝灰岩などからなり、崩壊幅は2~30 m、崩壊深は0.5~5 m程度である。

地下流水音の調査は、降雨直後はあらゆる場所で地下流水音が大きく、水みち経路の判定が難しいので、降雨後2~3日以上経過した状態で調査した。調査は次の手順で行った。

- 崩壊した部位と崩壊していない部位の音圧分布の違いが分かるように、自然斜面では崩壊発生位置上方5 mの位置に、崩壊部位と崩壊していない部位が入るように測線を設ける。
- 林道法面は林道から高さ1 mの位置に、崩壊部位と崩壊していない部位が入るように測線を設ける。
- この測線上を1 mあるいは2 m間隔に測点を設ける。
- 測点で地下流水音測定装置(写真-1)を用いて地下流水音を測定する。なお、山地における音圧測定では、模型実験時のような低騒音という理想的な聴音環境は望めない。すなわち、風が吹くとピックアップやケーブルが振動し、地下流水音に雑音が混入する。この雑音の成分は100~400 Hz程度の周波数帯に多い。そこで、現地での測定は風による雑音の影響を極力少なくするために、できる限り風のない瞬間に測定を行った。また、聴音周波数も風の影響の出やすい100~400 Hzは避け、かつ、微弱な地下

流水音をより多く捉えるため、模型実験よりも高周波側の 400~1200 Hz の周波数帯で測定した。

5. 測定点と測定値を記録する。
6. 次の測点へ移動する。
7. 以下、1.~6.の作業を繰り返し、最後の測点まで測定する。

4. 崩壊発生位置と地下水流水音分布の対応

崩壊斜面と崩壊の発生していない斜面の地下流水音圧の違いについて検討する。ここでは、調査したいくつかの崩壊地を例にして説明をする。

a. 表層崩壊

図-4 中◎で示した、自然斜面 A~D で発生した表層崩壊の様子を写真-2~5 に、地下流水音圧の測定結果を図-5~8 に示した。なお、地下水流水音は写真中の破線で示す位置で測定した。また、図-5~8 中のハッチは、崩壊の発生位置を表す。

①自然斜面 A (写真-2, 図-5)

スギの伐採跡地で 1 箇所、表層崩壊が発生している。地表面の形状は集水地形である。崩壊は幅 10 m、崩壊深は 1~1.5 m 程度で基盤を境界として滑落している。滑落崖には水流の痕跡は確認されなかったが、崩壊の流下方向約 15 m 下方では湧水点が存在した。この湧水点近傍から飽和帶が斜面上方へと拡大し、崩壊したものと思われる。

崩壊地内の地下流水音は、崩壊の発生していない部位に比べ大きい。また、崩壊地内の地下流水音には、3 箇所に地下流水音のピークが存在する。写真を見ると崩壊は 3 つのブロックに分けられ、それぞれが地下水流水音のピークに対応する。

②自然斜面 B (写真-3, 図-6)

植栽後間もないヒノキ林で 2 箇所、表層崩壊が発生している。地表面の形状は平行である。崩壊 a は幅 10 m、崩壊深は 1 m 程度で、崩壊 b は幅 11 m、崩壊深は 1 m 程度である。両者ともに基盤を境界として滑落している。また、降雨後 1 週間晴天が続いた調査当日は崩壊裸地面に湧水は確認できなかったが、総雨量 55 mm の降雨のあった翌日には、崩壊裸地面から地下水の滲出しが確認された。調査当日には、地下水は花崗岩基盤以深にあったものと想像される。

地下水流水音は、写真-3 中の破線で示した Line 1, 2 で測定した。なお、Line 2 の崩壊 b の区間は測定に危険を伴うので、地下水流水音は測定していない。

Line 1, 2 の崩壊 a の位置で地下水流水音が大きく、崩壊頭部に水みちが存在することが分かる。同様に、Line 1 の崩壊 b の地下流水音は、崩壊していない部位よりも相対的に大きい。

③自然斜面 C (写真-4, 図-7)

林齢 14 年のスギ林の 3 箇所で表層崩壊が発生している。地表面形状はいずれも集水地形である。

崩壊 a は幅 12 m、崩壊深 2 m 程度、崩壊 b は幅 16 m、崩壊深は 2 m 程度、崩壊 c は幅 10 m、崩壊深 1 m 程度であった。これらの崩壊は全て基盤を境界として滑落している。何れの崩壊も降雨後 1 週間晴天が続いた調査当日には流水痕跡あるいは湧水は確認できなかった。しかし、自然斜面 B と同様に、総雨量 55 mm の降雨のあった翌日には、崩壊裸地面から地下水の滲出しが確認された。調査当日には、地下水は花崗岩基盤以深にあったものと想像される。

地下水流水音の分布は、何れも崩壊発生位置で大きい値を示した。また、崩壊 b, c の滑落崖は、何れも左右 2 つのブロックに分かれていることが現地で確認された。崩壊 b, c の地下流水音の分布も左右に 2 つのピークをもつことは、興味深い。

④自然斜面 D (写真-5, 図-8)

林齢 10 年のヒノキ幼齢林で 4 箇所、崩壊が発生している。地表面の形状は尾根型である。

- ・崩壊 a は幅 2 m、崩壊深は約 1 m である。崩壊の下部に湧水が 1 箇所存在する。
- ・崩壊 b は幅 6 m、崩壊深は約 1 m で、崩壊の下部 2 箇所に恒常的な湧水が存在する。
- ・崩壊 c は幅 12 m、崩壊深は約 2 m で基盤を境界として滑落している。崩壊裸地面に湧水は確認されなかったが、崩壊の約 20 m 下方に恒常的な湧水が存在する。
- ・崩壊 d は幅 2 m、崩壊深は約 1 m で基盤を境界として滑落している。崩壊裸地面は周囲に比べ非常に湿っているが、湧水は確認されていない。しかし、その後の地下水調査で、崩壊 d の頭部は降雨に対して地下水が発生しやすい場所であることが明らかとなっている。

地下水流水音の分布は、何れも崩壊地内で大きい。また、湧水点が 2 箇所で確認された崩壊 b では、地下水流水音に 2 つのピークが存在する。

b. 法面崩壊

図-4 中●で示した林道 A~D で発生した法面崩壊の様子を写真-6~9 に、地下流水音の測定結果を図-9~12 に示した。なお、図中のハッチは法面崩壊の発生位置を表す。

①林道 A (写真-6, 図-9)

林道の尾根部の 2 箇所で崩壊が発生している。崩壊 a は、2004 年の台風 23 号によって、崩壊 b は同年台風 21 号によって発生したものである。

- ・崩壊 a：幅 30 m、崩壊深は約 5 m で基盤上の土層が滑落したもの。崩壊直後の調査で湧水点と相対的に湿った部位が各 1 箇所ずつ確認された。
- ・崩壊 b：幅 14 m、崩壊深は約 1 m で、基盤上の土層が滑落している。崩壊後の調査で湧水点が 1 箇所確認された。

崩壊しなかった法面に比較し、崩壊の発生した部位



写真-2 自然斜面 A で発生した表層崩壊
Photo 2 Collapse in natural slope A



写真-4 自然斜面 C で発生した表層崩壊
Photo 4 Collapses in natural slope C

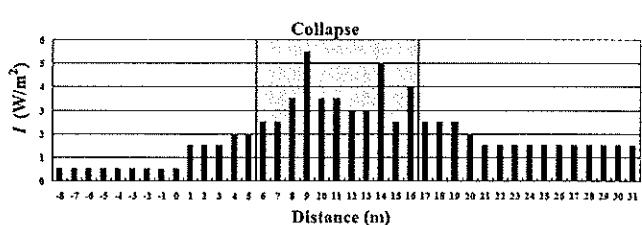


図-5 自然斜面 A の地下流水音の分布
Fig.5 Distribution of the underground sound in natural slope A

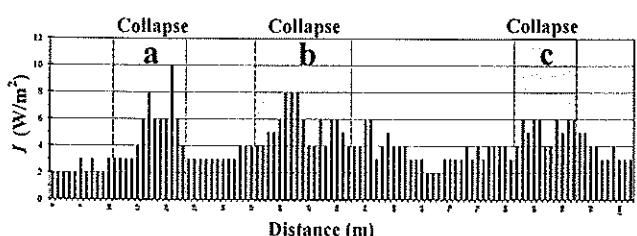


図-7 自然斜面 C の地下流水音の分布
Fig.7 Distribution of the underground sound in natural C



写真-3 自然斜面 B で発生した表層崩壊
Photo 3 Collapses in natural slope B

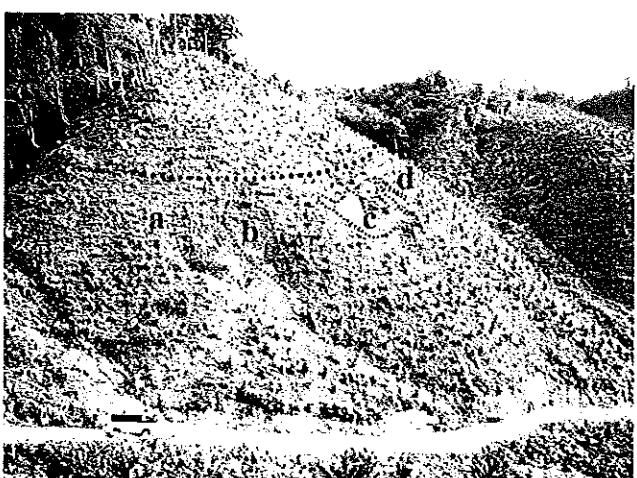


写真-5 自然斜面 D で発生した表層崩壊
Photo 5 Collapses in natural slope D

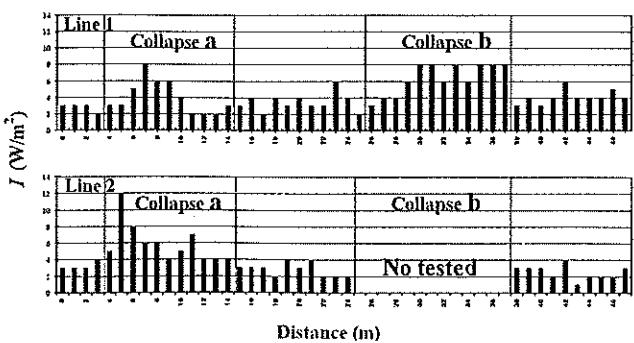


図-6 自然斜面 B の地下流水音の分布
Fig.6 Distribution of the underground sound in natural slope B

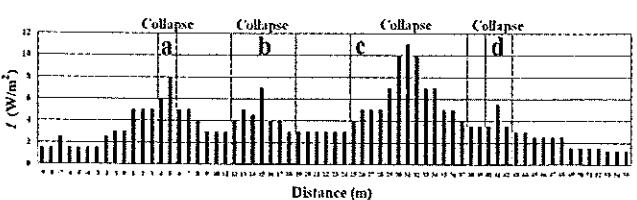


図-8 自然斜面 D の地下流水音の分布
Fig.8 Distribution of the underground sound in natural slope D



写真-6 林道 A で発生した法面崩壊
Photo 6 Collapses in road cut slope A

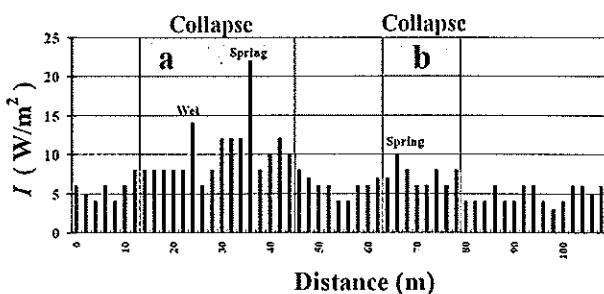


図-9 林道 A の地下流水音の分布

Fig. 9 Distribution of the underground sound in road cut slope A



写真-7 林道 B で発生した法面崩壊
Photo 7 Collapses in road cut slope B

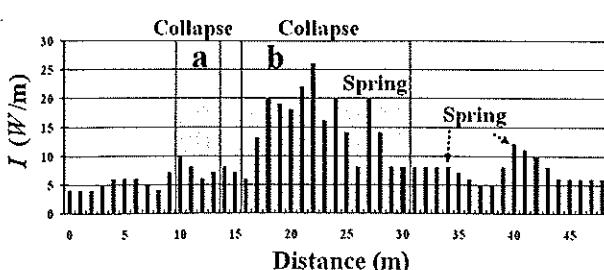


図-10 林道 B の地下流水音分布

Fig. 10 Distribution of the underground sound in road cut slope B

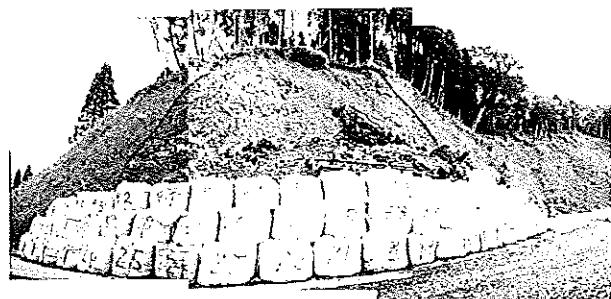


写真-8 林道 C で発生した法面崩壊
Photo 8 Collapse in road cut slope C

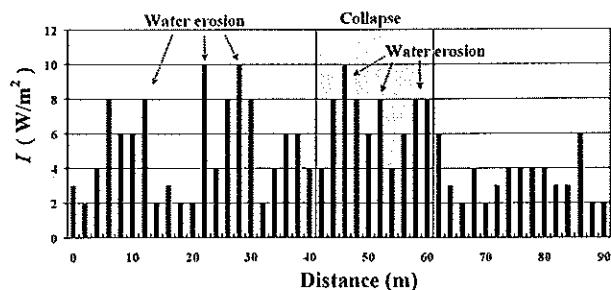


図-11 林道 C の地下流水音の分布

Fig. 11 Distribution of the underground sound in road cut slope A

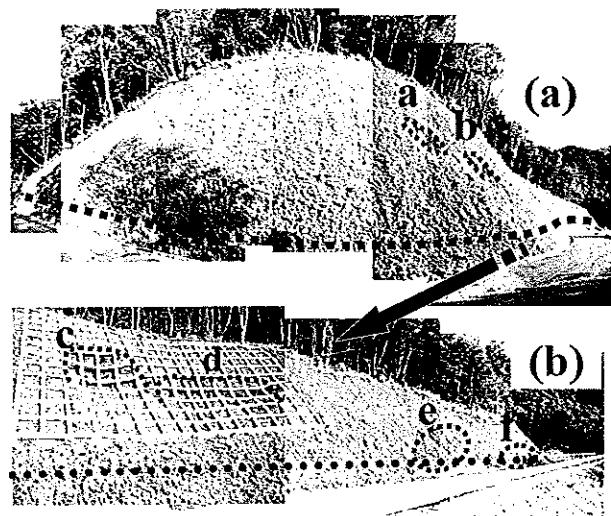


写真-9 林道 D で発生した法面崩壊
Photo 9 Collapses in road cut slope D

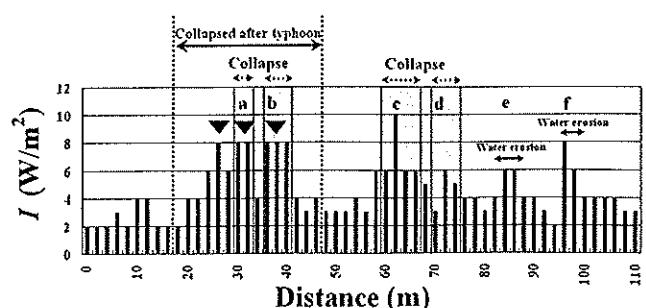


図-12 林道 D の地下流水音分布

Fig. 12 Distribution of the underground sound in road cut slope D

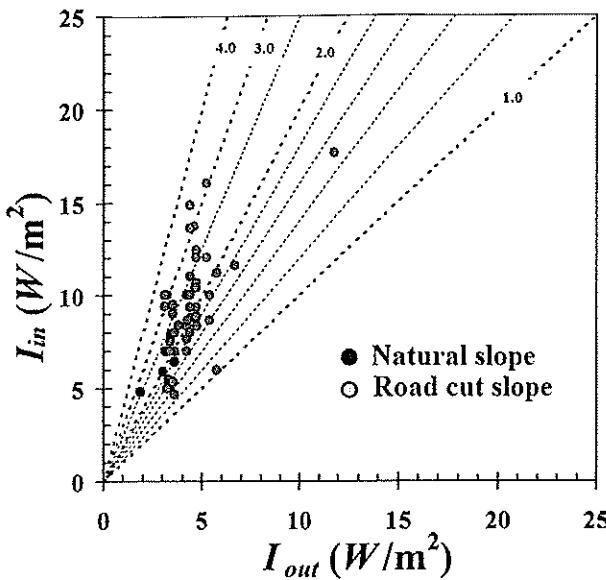


図-13 I_{in} と I_{out} の関係
Fig. 13 Relation between I_{in} and I_{out}

a, b で地下流水音が大きい。また、崩壊地内の湧水点や土層の湿った部位と地下流水音のピークが合致する。一方、崩壊 a, b 間の残存した土層では、地下流水音が減衰している。

②林道 B (写真-7, 図-10)

2004 年台風 21 号によって林道の谷部 a と尾根部 b で崩壊が発生した。地質は花崗閃緑岩からなる。

- ・崩壊 a : 幅 3 m, 崩壊深は 0.5 m 程度で法面の表土が薄く滑落したもの。谷部のため土層が湿润であった。
- ・崩壊 b : 幅 14 m, 崩壊深は 1 m 程度で基盤上の土層が滑落し流動化したもの。流水痕跡が 3 点で確認された。

地下流水音は、何れも崩壊地内で大きい。また、崩壊 b は流水痕跡が 3 点で確認されたが、地下流水音のピークもそれらによく対応する。

③林道 C (写真-8, 図-11)

林道の尾根部で発生した崩壊で、幅 18 m, 崩壊深 1.3 m である。地質は花崗閃緑岩からなり、調査当日に湧水は確認されなかったが、流水痕跡が 3 箇所で確認できた。

地下流水音の分布は、何れも崩壊地内で大きい。また、流水痕跡が確認できた位置と地下流水音のピークがそれぞれ対応した。

④・林道 D (写真 9, 図-12)

吹付け緑化された法面の 4 箇所 (a~d) で崩壊が、2 箇所 (e, f) で表面侵食の痕跡がある。崩壊 c, d では法枠工が敷設してある。

- ・崩壊 a : 幅 2 m, 崩壊深約 1 m で、調査当日に湧水は見られなかった。
- ・崩壊 b : 幅 4 m, 崩壊深約 1 m で、調査当日に湧水

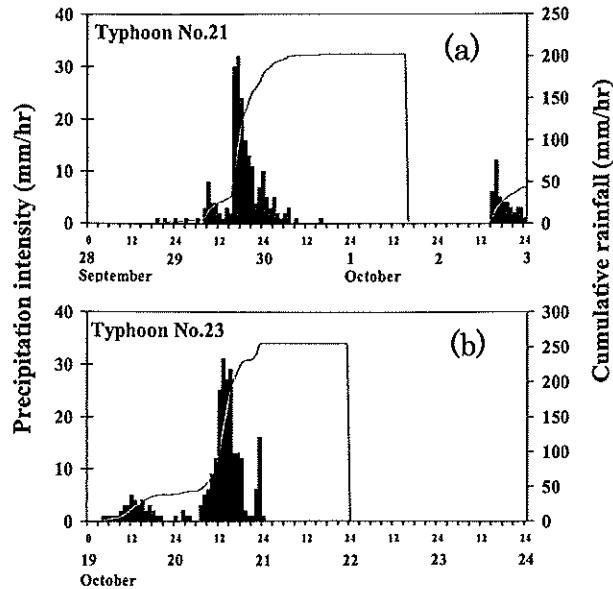


図-14 林道 D, E における降雨イベント
Fig. 14 Appearance of rainfall in road cut slope D and E

は見られなかった。

- ・崩壊 c : 幅 6 m, 崩壊約 1 m で、豪雨時にのみ湧水が発生する。調査当日は湿润な状態であったが、湧水は確認されなかった。
- ・崩壊 d : 幅 4 m, 崩壊深は約 1 m で、豪雨時には湧水が見られるが、調査当日は湿润な状態であったが、湧水は確認されなかった。

地下流水音の分布は、何れも崩壊地内で大きい。また、表面侵食の痕跡が見られた e, f においても地下流水音が大きい。

自然斜面と林道法面で崩壊位置と地下流水音分布の対応について検討した。結果として、両者には明確な対応が存在し、周囲に比較し崩壊の発生位置では地下流水音が大きいことが分かった。これは、地中水の集中する部位で崩壊が発生していることを意味するものと考えられる。また、地下流水音の大きい部位では崩壊が発生していないとも、湧水や表面侵食が発生することも分かった。

次に崩壊の発生した範囲 (前出地下流水音分布図のハッチ内) と崩壊の発生していない範囲の地下流水音の関係を図-13 に示した。ここに、 I_{in} は崩壊範囲内の平均地下流水音圧を、 I_{out} は崩壊範囲外の平均地下流水音圧を表す。また、図中の破線は I_{in}/I_{out} を表し、崩壊地外に対し崩壊地内の地下流水音が何倍大きいかを表す。仮に $I_{in} = I_{out}$ であれば、1.0 の破線上にプロットされる。

自然斜面と切取り法面の I_{in} と I_{out} の関係は、調査した全ての場で図中 $I_{in} = I_{out}$ 破線の上側にプロットされた。自然斜面の I_{in} は I_{out} のに比較し 1.2~3 倍程度、法面では 1.2~3.5 倍程度 I_{in} が大きい。

これらのことから、崩壊は地下流水音の強い水みち経路上で発生するものと考えられる。また、これらの性質を利用すれば、崩壊が発生する危険性のある斜面をある

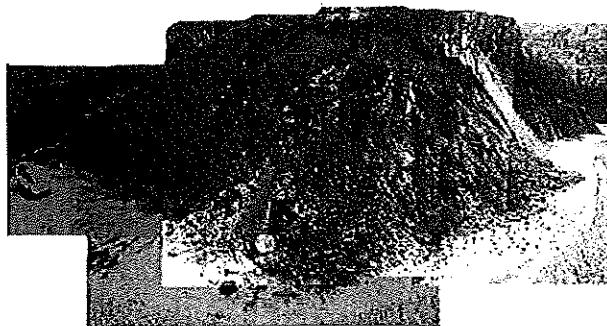


写真-10 台風後の林道Dの様子

Photo 10 Appearance of the road cut slope D after typhoon No.21.

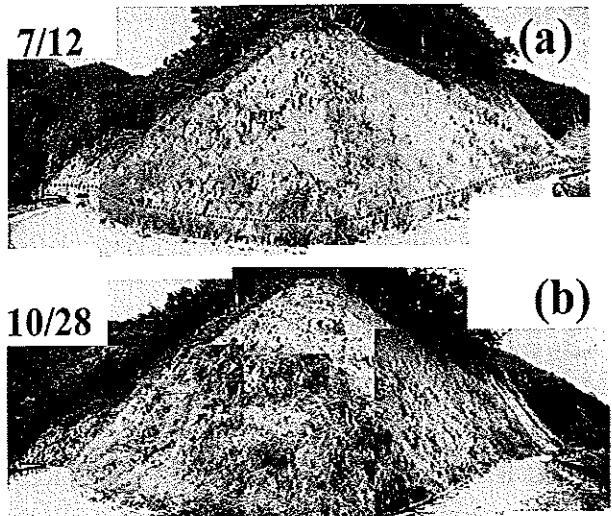


写真-11 台風前後の林道Eの様子

Photo 11 road cut slope D after typhoon No.23.

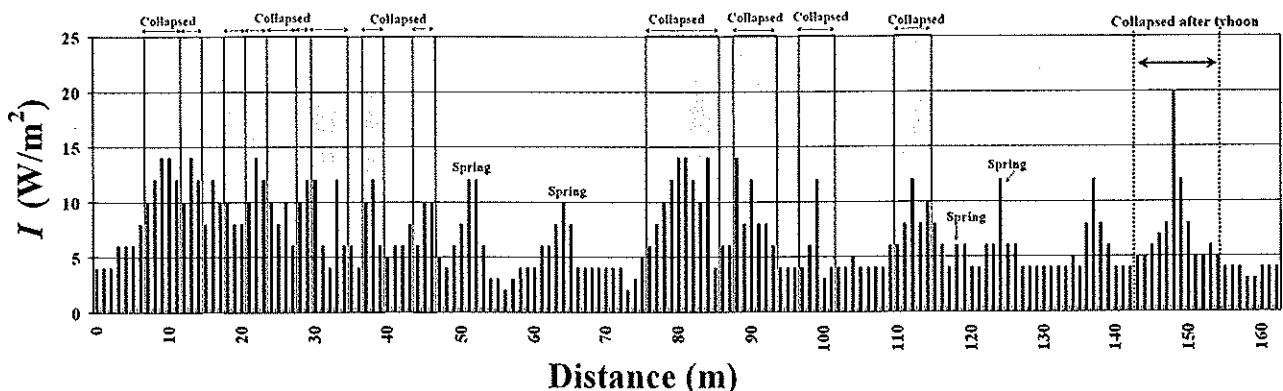


図-15 地下流水音の分布と新たに発生した崩壊の位置

Fig. 15 Relation between the distribution of underground sound and collapse position that was occurred by typhoon No.23

程度の精度で絞り込む可能性が示された。

5. 地下流水音のピークが確認された部位のモニタリング

崩壊地で地下流水音を測定した結果、崩壊は地下流水音の強い部位で発生していた。一方、崩壊地と同様の強い地下流水音のピークが存在するが、崩壊の発生していない斜面も確認された。ここでは、総延長約10kmの林道路線を1,2m間隔で測定した地下流水音のうち、ピークが検知された斜面がその後の降雨でどのように変化するのかを検討する。

①林道D

林道D(写真-9)では、2004年7月12日に地下流水音を測定した。その後、2004年9月29日～30日に接近した台風21号によって多量の降雨がもたらされた。林道Dに最も近い雨量観測点で観測された降雨状況を図-14(a)に示す。降雨強度のピークは30mm/hr程度で、連続雨量は200mmが記録されている。

台風通過直後10月1日の林道Dの様子を写真-10に

示した。崩壊は斜面の尾根部で幅30m、崩壊深1.5mの規模で発生した。写真-9に示した崩壊前の様子と比較すると、法棒の左側、写真-9(a)の部位が大きく崩落したことが分かる。

この崩壊位置を2004年7月12日に測定した崩壊発生前の地下流水音分布を示した前出図-12に照合した。崩壊は破線で挟んだ位置で発生しており、3つの地下流水音のピークが検知された部位(図中▼)で発生している。

②林道E

林道Eでは、2004年7月12日に地下流水音を測定した。その後、2004年10月20日～21日に接近した台風23号によって多量の降雨がもたらされた。林道Eに最も近い雨量観測点で観測された降雨状況を図-14(b)に示す。降雨強度のピークは30mm/hr程度で、連続雨量は250mmが記録されている。

台風接近前の7月12日に撮影した林道Eの様子と台風通過後10月28日の様子を写真-11に示す。崩壊は斜面の小さな谷部分である写真右奥の法面で発生してお

り、幅10m、崩壊深0.5mの規模で崩落している。

崩壊発生前2004年7月12日に測定した地下流水音の分布と崩壊発生場所を図-15に示した。なお、図中のハッチは2004年7月12日に既に崩壊の発生していた場所を、破線で挟んだ範囲は台風23号で新規に崩壊が発生した位置を表す。図より、強い地下流水音が検知された位置で崩壊が新たに発生している。

強い地下流水音が検知された未崩壊の法面が、その後の豪雨で崩壊した。このことは、斜面には日常的に地中水の集中しやすい部位（水みち）が存在し、豪雨によってその部位に多量の地中水が供給され崩壊が発生すると考えられる。

一方で、図-15から分かるように、地下流水音のピークが存在するからといって必ずしも崩壊が発生しているわけではない。斜面は素因と誘因が揃って崩壊するが、地下流水音は誘因の影響の大きい場所を評価しているに過ぎない。今後は地下流水音にピークが存在する場所の崩壊の発生、非発生を定める理由を検討する必要がある。

6.まとめ

本研究では自然斜面・林道法面で地下流水音を測定し、地下流水音の分布と崩壊発生位置の関係について検討した。結果として、崩壊の発生している位置では地下流水音が強く、地中水の集中する部位で崩壊が発生していることが明らかとなった。また、強い地下流水音が認められた未崩壊斜面をモニターした結果、豪雨の後にその部位が崩壊した。

これらのことから、斜面には、日常的に地中水の集中する部位（水みち）が存在し、豪雨によってその部位に多量の地中水が供給され、崩壊が発生すると考えられた。

従来、同じような地形地質であっても崩壊する斜面としない斜面があり、その理由を明確に回答できることが多くあった。本研究の結果から、崩れる斜面と崩れない斜面には根本的に水の供給のされ方が異なるという知見を得た。今後災害調査をする場合にはこのような水の供給のされ方の違いについても目を向ける必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、鳥取県林業試験場 生田公良

場長、森林造成研究室前田雄一室長に林道での調査の便宜を頂いた。また、中国企業株式会社の城市隆利氏・藤井信夫氏には造林地での調査にご協力を頂いた。本研究は京都大学防災研究所COEプログラムと文部省科学研究費補助金の予算を使用した。以上の方々に感謝の意を表します。

引用文献

- 川口武雄・渡辺隆司・瀧口喜代志（1951）：赤城山山崩れに関する研究、林試研報、No.49, p.11-78
 北原 耀・清水 晃・真鍋征夫（1988）：林地緩斜面土層中のパイプフローの特性、日林誌、Vol.70, No.7, p.318-323
 KOSUGI, K. (2004) : Numerical calculation of soil pipe flow and its effect on water dynamics in a slope, Hydrol. Process. No.18, p.777-789
 小山 敏・奥村武信（2002）：1降雨に対して2回の流量増加があるパイプ流の流出機構、地形、Vol. 3, No. 4, p. 561-584
 太田猛彦・塙本良則・野口晴彦（1981）：パイプフローと山崩れについての一考察、昭和56年度砂防学会研究発表会概要集、p.92-93
 多田泰之・奥村武信・久保田哲也（2002）：パイプの存在が斜面安定に与える影響の実験的検討、砂防学会誌 Vol.55, No. 3, p. 12-20
 TADA, Y., FUJITA, F., TSUTSUMI, D., OKUMURA, T., KOYAMA, K., KAWAI, T. & HONDA, N. (2005 a); Detection of Collapse Position in Mountainous Slope by Underground Sound Method, Annals of Disas. Prev. Inst., Kyoto Univ., No.48 C, p.219-229
 多田泰之・藤田正治・堤 大三・小山 敏・奥村武信・本田尚正・河合隆行（2005 b）：地下流水音の検知とその後の崩壊発生、平成17年度砂防学会研究発表会概要集、p.26-272
 多田泰之・藤田正治・堤 大三・小山 敏・河合隆行（2005 c）：地下流水音による地中水みち経路の推定、水工学論文集、No. 50, p. 283-288
 堤 大三・宮寄俊彦・藤田正治・SIDLE Roy C. (2005) : パイプ流に関する数値計算モデルと人工斜面実験による検証、砂防学会誌、Vol. 58, No. 1, p. 20-30
 内田太郎・小杉賢一郎・大手信人・水山高久（1995）：斜面土層内のパイプが地下水形に及ぼす影響に関する実験的研究、日林論、No.106, p. 505~508

(Received 17 October 2005; Accepted 26 July 2007)