

斜面の変形地形や湧水の電気伝導度に着目した 深層崩壊発生危険斜面の危険度評価に関する研究

A STUDY ON THE RISK EVALUATION OF POTENTIAL DEEP-SEATED LANDSLIDES FOCUSED ON DEFORMATIONS AND SPRING WATER FROM LANDSLIDE

森加代子¹・林幸一郎²・野池耕平²・高原晃宙³・木下篤彦³

Kayoko MORI, Koichiro HAYASHI, Kohei NOIKE, Teruyoshi TAKAHARA and Atsuhiko KINOSHITA

¹正会員 工修 国立研究開発法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1丁目6)

²非会員 理修 国立研究開発法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1丁目6)

³正会員 農博 国立研究開発法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1丁目6)

The method of risk evaluation of potential deep-seated landslides which focused on deformations of landslide is proposed. On the other hand, the method which focused on hydrological and water quality characteristics of landslide is not proposed. For this reason, hydrological and water quality characteristics show the risk of potential deep-seated landslides is incompletely understood. This study revealed the relations between the risk of potential deep-seated landslides which focused on deformations of landslide and hydrological and water quality characteristics of spring water from landslide. In conclusion, spring water exists at the landslide which has high potential of deep-seated landslide or the rate of deformation more than 5%. And the electric conductivity of spring water when increase, the risk focused on deformations of landslide increase too. On the other hand, the rate of deformation decreases.

Key Words : *potential deep-seated landslides, risk evaluation, hydrological and water quality characteristic, electric conductivity, spring water*

1. はじめに

深層崩壊は天然ダムを形成し、その決壊などにより甚大な被害を引き起こす恐れがある。そのような被害を防止・軽減するためには、深層崩壊の発生する恐れのある斜面を抽出し、危険度を評価したうえで、適切な対策を検討しなければならない。このような斜面の抽出手法については、変形地形に基づく手法¹⁾や、湧水の湧出量や溪流水の電気伝導度といった水文・水質特性に着目した手法²⁾が提案されている。一方、危険度評価手法については、変形地形に基づいた手法³⁾が提案されるなか、水文・水質特性に着目した手法は提案されていない。これは、水文・水質特性が斜面の危険度を示す指標となり得るかが十分にわかっていないためである。そこで、本研究では、水文・水質特性が斜面の危険度評価指標となる可能性を検討するため、湧水に着目し、変形地形に基づく斜面の危険度及び斜面の変形程度を示す歪み率と斜面からの湧水が示す水文・水質特性

の関係を明らかにすることを目的に調査を実施した。

2. 調査の概要

(1) 調査対象地

本研究では、「深層崩壊の発生のおそれのある溪流抽出マニュアル⁴⁾」によって相対的に危険度が高いと判定された溪流の流域である浦川流域を調査対象地とした。浦川流域は、長野県小谷村に位置し、姫川中流域に合流する支川で、流域面積は約22km²である。地質は、上流部に火山岩、下流部に堆積岩が分布している。浦川の源頭部では斜面崩壊や地すべりが絶えず進行し、そこから供給される不安定土砂により、土石流が多発している。図-1に調査対象地の位置を示す。

(2) 調査対象斜面

微地形判読結果を基に深層崩壊の発生する恐れのある斜面として抽出された19斜面を調査対象斜面と



図-1 調査対象地位置図

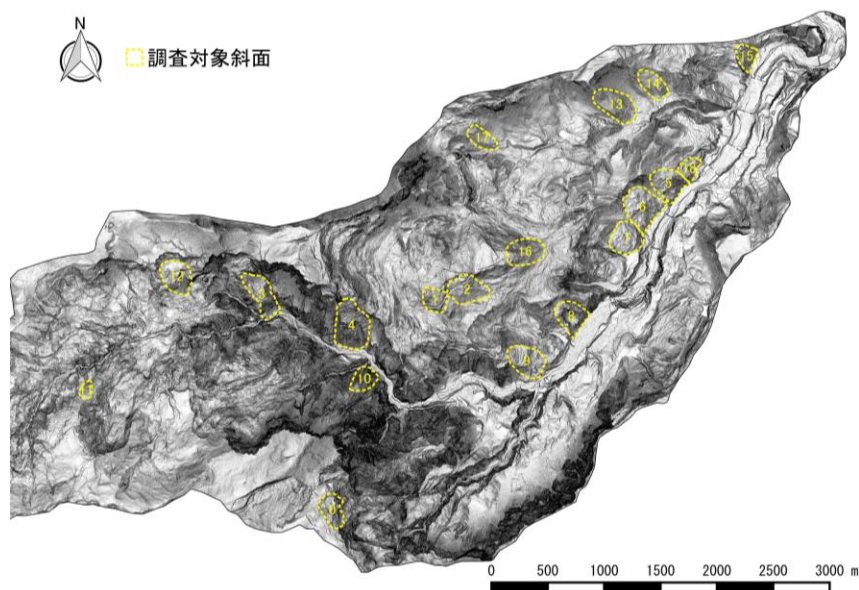


図-2 調査対象斜面

表-1 調査対象斜面の危険度及び歪み率

斜面 番号	主たる 変形地形	斜面上部の眉形小崖			斜面下部の状況			危険度	歪み率
		無	不連続	連続的	拘束	浸食	崩壊		
0	凹凸斜面			○	○			Ⅱ	4.9%
1	凹凸斜面			○	○			Ⅱ	2.9%
2	凹凸斜面			○	○			Ⅱ	9.6%
3	凹凸斜面			○		○		Ⅲ	13.0%
4	凹凸斜面			○		○		Ⅲ	7.3%
5	凹凸斜面			○			○	Ⅳ	4.6%
6	地すべり						○	Ⅳ	19.6%
7	地すべり					○		Ⅲ	26.3%
8	地すべり						○	Ⅳ	21.8%
9	凹凸斜面			○			○	Ⅳ	-
10	凹凸斜面			○		○		Ⅲ	5.4%
11	凹凸斜面			○	○			Ⅱ	5.5%
12	地すべり				○			Ⅱ	21.6%
13	凹凸斜面		○		○			Ⅱ	-
14	凹凸斜面		○		○			Ⅱ	-
15	凹凸斜面			○		○		Ⅲ	5.2%
16	凹凸斜面			○	○			Ⅱ	3.2%
17	凹凸斜面		○		○			Ⅱ	-
18	地すべり			○			○	Ⅳ	11.1%

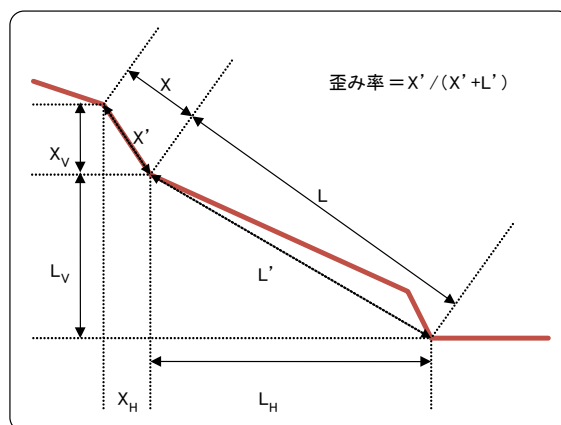


図-3 歪み率の算出方法

した。変形地形で分類すると、凹凸斜面が14斜面、地すべり斜面が5斜面である。図-2に調査対象斜面の位置を示す。

(3) 調査内容

図-2に示す斜面を対象に、斜面の変形地形に基づく危険度評価と変形程度を示す歪み率の算出を行う。また、対象斜面において現地調査を実施し、各斜面の湧水点の有無の確認と、河川水、渓流水や湧水を対象とした簡易水質調査（電気伝導度、水温、pH）を行う。また、各斜面端部の湧水点では採水を実施し、主要溶存イオン（ナトリウムイオン、カリウムイオン、カルシウムイオン、マグネシウムイオン、炭酸水素イオン、硫酸イオン、塩化物イオン、硝酸イオン）及びシリカ濃度の水質分析を行う。

3. 調査結果

(1) 調査対象斜面の危険度評価及び歪み率の算出

調査対象斜面における斜面の変形地形に基づく危険度評価結果と変形程度を示す歪み率の算出結果を表-1に示す。変形地形に基づく危険度評価については、千木良ら³⁾の研究から地形要素のみを抽出し、深層崩壊発生の危険度を低い方からⅠ～Ⅳに分類した。また、歪み率については既往研究^{5)・7)}を参考に、図-3に示すように小崖長と斜面長から算出した。

危険度評価結果は、危険度Ⅰが0斜面、Ⅱが9斜面、Ⅲが5斜面、Ⅳが5斜面であった。変形地形で分類すると、凹凸斜面では危険度Ⅱが8斜面、Ⅲが4斜面、Ⅳが2斜面、地すべり斜面では危険度Ⅱが1斜面、Ⅲが1斜面、Ⅳが2斜面であった。

歪み率は、19斜面中4斜面で算出が困難であった。これは、小崖地形が不明瞭で断面図から小崖上部と下部の設定ができなかったためである。歪み率の算

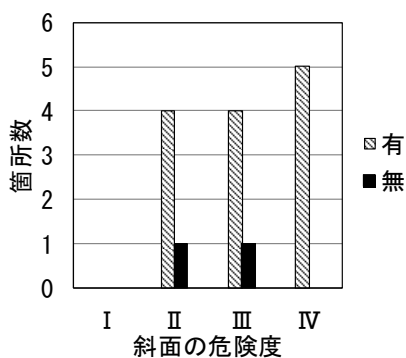


図-4 湧水の有無と危険度

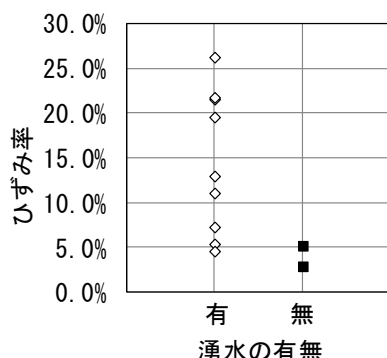


図-5 湧水の有無と歪み率

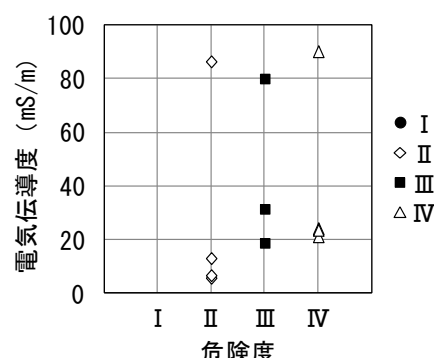


図-6 電気伝導度と危険度

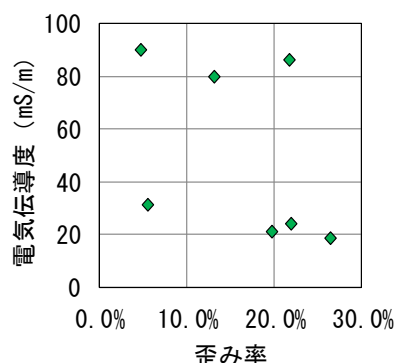


図-7 電気伝導度と歪み率

表-2 湧水の有無及び水質結果

斜面番号	湧水有無	電気伝導度 (mS/m)	Na ⁺ (meq/L)	K ⁺ (meq/L)	Ca ²⁺ (meq/L)	Mg ²⁺ (meq/L)	HCO ₃ ⁻ (meq/L)	SO ₄ ²⁻ (meq/L)	Cl ⁻ (meq/L)	NO ₃ ⁻ (meq/L)
0	未確認	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	未確認	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	有	80.00	0.274	0.046	5.988	1.316	2.950	6.037	0.011	0.001
4	有	8月26日の調査では微量な湧水であったため採水不可								
5	有	90.20	4.785	0.087	1.397	3.702	9.178	0.312	0.959	0.002
6	有	21.20	0.209	0.051	0.998	0.790	1.803	0.229	0.034	0.010
7	有	18.72	0.235	0.028	1.148	0.280	1.344	0.229	0.045	0.031
8	有	24.20	0.405	0.041	1.547	0.313	2.131	0.271	0.071	0.005
9	有	23.60	0.565	0.036	1.397	0.288	1.803	0.354	0.034	0.079
10	有	31.40	0.165	0.031	1.996	0.354	0.639	2.019	0.011	0.002
11	未確認	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	有	86.40	0.252	0.118	4.092	2.386	0.002	0.208	0.710	0.001
13	有	5.71	0.130	0.046	0.220	0.064	0.344	0.040	0.034	0.009
14	有	6.66	0.117	0.005	0.359	0.123	0.590	0.027	0.031	0.002
15	無	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	未確認	-	-	-	-	-	-	-	-	-
17	有	13.04	0.152	0.018	0.649	0.288	0.836	0.171	0.023	0.010
18	有	8月26日の調査では微量な湧水であったため採水不可								

出が可能であった15斜面では、歪み率2.9～26.3%であった。危険度と同様に、変形地形で分類すると、凹凸斜面では2.9～13.0%、地すべり斜面では11.1～26.3%であった。

(2) 湧水の有無及び採水試料の水質

現地調査においては、斜面状況、湧水の有無の確認を実施した。また、斜面端部の湧水を採水し、水質分析を行ったが、水質は観測条件によって変化すると考えられるため、同日中に調査が完了できる範囲にある斜面を選定した。このため、現地調査は、斜面0及び11を対象外とした17斜面で実施した。表-2に2016年6月及び7月に実施した湧水の有無の確認結果と2016年8月に採水を行った湧水の水質分析結果を示す。調査対象であった斜面2及び16については、斜面下部へのアクセスが困難であったため、湧水の有無は未確認である。また、斜面4及び18については8月の現地調査日に微量な湧水しか確認できなかったため、採水が不可能であった。

現地調査結果から、湧水は15斜面中13斜面で存在した。変形地形で分類すると、凹凸斜面では10斜面中8斜面、地すべり斜面では5斜面中すべてで湧水が存在した。また、湧水の電気伝導度は、5.71～90.2mS/mを示し、凹凸斜面では5.71～90.2mS/m、地すべり斜面では18.72～86.4mS/mであった。

4. 危険度及び歪み率と水文・水質特性の比較

3章で示した調査結果を用いて危険度及び歪み率と水文・水質特性を比較した結果を以下に示す。

(1) 危険度及び歪み率と湧水の有無の関係

図-4に危険度と湧水の有無の関係を示す。危険度Ⅳの斜面ではすべてで湧水が存在し、危険度Ⅱ及びⅢの斜面では湧水の有無が混在するという結果であった。また、図-5に歪み率と湧水の有無の関係を示す。湧水の存在する斜面では歪み率4.6～26.3%、存在しない斜面では歪み率2.9～5.4%であった。このことから、今回対象とした斜面では危険度が高い斜面や歪み率が5%以上の斜面では湧水の存在する可能性が高くなる。

(2) 危険度及び歪み率と電気伝導度の関係

図-6、図-7に危険度及び歪み率と電気伝導度の関係を示す。危険度、歪み率ともに電気伝導度と明瞭な関係を示さなかった。これは、斜面12といった危険度が低い場合にも電気伝導度の高い湧水が存在する斜面の影響によると考えられる。また、電気伝導度は湧水中に溶存するイオンに左右されるため、比較に用いる値が特異ではないか、地下水の流出であるかを評価しなければならない。そこで、表-2に示

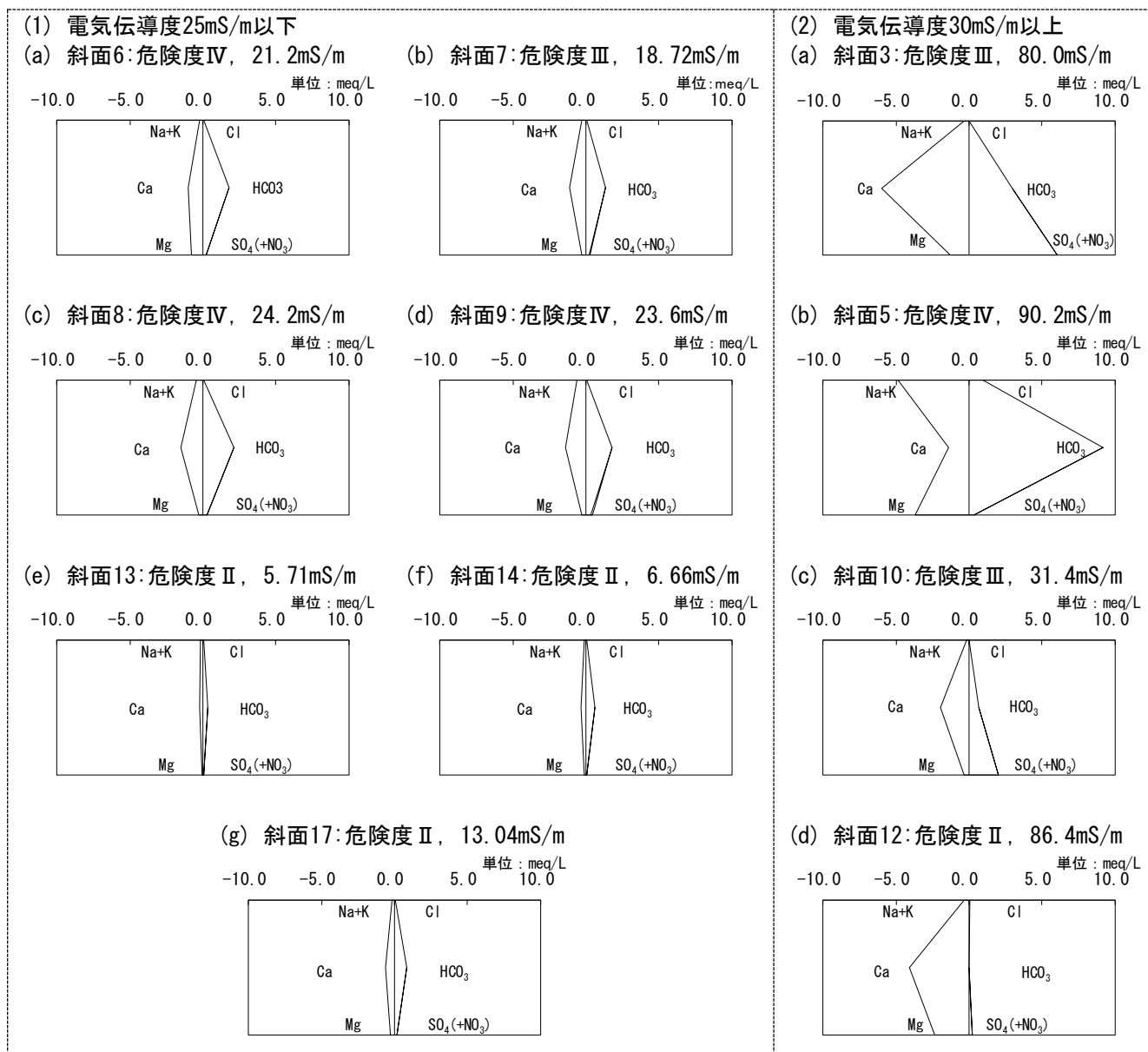


図-8 湧水の分類（ヘキサダイアグラム）

スイオン分析結果を用いて、分析結果の評価を行う。

5. 溶存イオン分析結果の評価

(1) 湧水のヘキサダイアグラム

各斜面の湧水のヘキサダイアグラムを図-8に示す。調査対象斜面の湧水のうち、電気伝導度が25mS/m以下と相対的に低い値を示す湧水のヘキサダイアグラムは同様の形状を示し、水質組成に類似性があることがわかる。このことから、これらの湧水は同様の水質形成過程をたどっており、岩盤の風化や破碎程度から直に大小が生じたと考えられる。しかし、電気伝導度が30mS/m以上と相対的に高い値を示す湧水のヘキサダイアグラムは前者のものと比べて特異な形状を示した。前者では左右対称な樽型の形状を示すが、後者は左右非対称である。ヘキサダイアグラムの形状の違い、つまり、水質組成の違いは地質条件による場合が多い。調査対象斜面の地質は火

山岩と堆積岩に分類されるが、地質の違いによる水質組成の明らかな違いは見られなかった。また、電気伝導度が相対的に低い値を示す湧水についても地質の違いに関係なく同様の形状を示していた。このことから、本研究の調査対象地における水質組成の違いは地質条件のみとは判断しがたく、他の原因を考える必要がある。そこで、今回の分析結果が正しく、分析イオンが不足していないかをイオンバランスの評価によって確認する。また、湧水がイオンを著しく取り込む水質形成過程ではなかったかを湧水地点の特徴から整理する。

(2) イオン分析結果の評価

a) イオンバランスによる分析結果の評価

イオンバランスによる評価手法⁹⁾は、試料水が電氣的に中性であることに着目したもので、陰イオンの当量濃度の合計と陽イオンの当量濃度の合計を等しいと考え、差異が生じる場合には分析値に誤差や

表-3 イオンバランス R_1 の基準

$\Sigma C_{\text{Cation}} + \Sigma C_{\text{Anion}}$	R_1
$< 50 \mu \text{eq/L}$	$\pm 30\%$
$50 \sim 100 \mu \text{eq/L}$	$\pm 15\%$
$> 100 \mu \text{eq/L}$	$\pm 8\%$

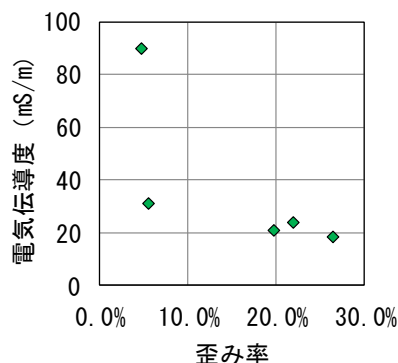
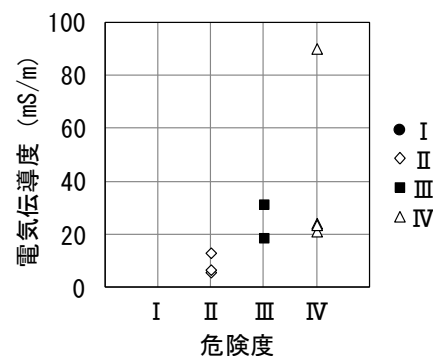
図-9 電気伝導度と歪み率
(見直し)図-10 電気伝導度と危険度
(見直し)

表-4 イオンバランスによる評価結果

斜面 番号	ΣC_{Cation} (meq/L)	ΣC_{Anion} (meq/L)	計	R_1
3	7.624	8.999	16.623	-8.27%
5	9.971	10.451	20.422	-2.35%
6	2.048	2.076	4.124	-0.68%
7	1.691	1.649	3.340	1.26%
8	2.306	2.478	4.784	-3.60%
9	2.286	2.270	4.556	0.35%
10	2.546	2.671	5.217	-2.40%
12	6.848	0.921	7.769	76.29%
13	0.460	0.427	0.887	3.72%
14	0.604	0.650	1.254	-3.67%
17	1.107	1.040	2.147	3.12%

溶存イオン成分の分析値に不足が生じていると評価する。分析値の評価は式(1)に示す R_1 の算出結果から行い、 R_1 の基準⁸⁾は表-3に示すとおりである。

$$R_1 = 100 \times \frac{\Sigma C_{\text{Cation}} - \Sigma C_{\text{Anion}}}{\Sigma C_{\text{Cation}} + \Sigma C_{\text{Anion}}} \quad (1)$$

ここに、 R_1 ：イオンバランス(%)

C_{Cation} ：陽イオンの当量濃度($\mu\text{eq/L}$)

C_{Anion} ：陰イオンの当量濃度($\mu\text{eq/L}$)

式(1)を用いてイオンバランスを算出した結果を表-4に示す。今回の湧水は、陽イオンと陰イオンの当量濃度の合計がすべてで 0.1meq/L 以上であるため、 R_1 の基準は $\pm 8\%$ となる。表-4より、電気伝導度が相対的に低い湧水は、すべてで基準を満たしているため、分析結果は正しいと言える。しかし、相対的に高い湧水では、斜面3、12は基準を満たさず、斜面5、10は基準を満たした。ここで、基準を満たさなかった理由を湧水地点の特徴から整理する。

b) 湧水地点の特徴

斜面3、5、10、12の湧水地点の状況を写真-1、写真-2に示す。現地調査の結果、斜面5、10の湧水は、岩盤の亀裂から湧出していた。これらの斜面の湧水はイオンバランスの基準を満たすことから、特異な

水質形成過程や他成分の混入を受ける状態でもなかったと想定され、斜面内部の地下水が流出したものと判断できる。一方、斜面3、12の湧水は、土砂流出等による堆積物から湧出していた。これらの斜面の湧水はイオンバランスの基準を満たさないことから、この堆積物を通過することにより、イオンを著しく取り込む水質形成過程や他成分の混入を受ける状態にあった可能性が高い。現地状況として、斜面3、12の湧出箇所は赤褐色であり、火山岩に多く含まれる黄鉄鉱の酸化の過程で生成された酸化鉄が大きく影響していると想定される。また、黄鉄鉱には酸素と水に触れることによって、酸化が進み、硫酸イオンの生成が活発となる反応がある。ただし、この反応では黄鉄鉱が地表付近に存在するなど、酸素によく触れる状態が必要となる。つまりは、崩壊や風化により地盤内の黄鉄鉱が酸素に触れやすい状態になると硫酸イオンの生成が活発となる。斜面3の湧水の硫酸イオンは、他の斜面の湧水と比較して非常に多く、現地状況から、堆積物内の黄鉄鉱の反応で生成されたものと判断できる。また、斜面12の湧水について、8月採水の分析結果では硫酸イオンがほとんど溶存していなかったが、11月にも同様の手法で確認したところ、硫酸イオンが非常に多かった。このことから、斜面12の湧水も堆積物内の黄鉄鉱の反応による影響を強く受けたと判断できる。以上より、斜面3、12の湧水は地表の堆積物を通過する際にイオンを著しく取り込むこととなり、斜面内部の地下水とは水質が変化している可能性が高いと言える。このため、斜面3、12の湧水はイオンバランスの基準を満たさなかったと判断できる。このように、湧水の水質は通過する土砂などの堆積物に影響を受ける場合があるため、湧出箇所の状況を含めた評価が必要である。

(4) 危険度及び歪み率と電気伝導度の関係の見直し

(3)より、斜面3、12の湧水は、堆積物を通過する際に水質が変化しているため、斜面内部の地下水そのものの水質を有していないと判断し、水質特性の比較から除くこととした。斜面3、12の湧水を除いて見直しを行った危険度及び歪み率と電気伝導度の関係を図-9、図-10に示す。見直し結果より、電気

a) 斜面3



b) 斜面12



写真-1 斜面3及び12の湧出箇所状況

伝導度は「危険度が高くなるにつれて大きくなる」が、「歪み率が大きくなるにつれて小さくなる」という傾向を示した。今回の結果から、湧水の電気伝導度が高くなれば変形地形に基づく危険度も高くなる可能性が高いが、歪み率は一定の値を超えた場合に電気伝導度が低下する可能性が高いことがわかった。

6. おわりに

本研究では、深層崩壊発生危険斜面を対象に、変形地形に基づく斜面の危険度及び斜面の変形程度を示す歪み率と斜面からの湧水が示す水文・水質特性の関係を明らかにした。得られた結果を以下に示す。

- ・危険度が高い斜面や歪み率が5%以上の斜面では湧水が存在する可能性が高い
- ・電気伝導度が高い場合、変形地形に基づく危険度も高くなる可能性が高いが、歪み率は一定の値を超えた場合に電気伝導度が低下する可能性が高い
- ・湧水の水質は通過する土砂など地表面の堆積物に影響を受ける場合があるため、湧出箇所の状況を含めた評価が必要

今回得られた結果より、電気伝導度は斜面の危険度と相関があり、斜面の危険度評価指標となり得る可能性が高いことがわかった。しかし、地質などの要因によって電気伝導度の特性は多様であると想定

a) 斜面5



b) 斜面10



写真-2 斜面5及び10の湧出箇所状況

されるため、今後は検証地を増やし、地質の違いなどによる知見の蓄積を図りたい。

参考文献

- 1) 木下篤彦, 石塚忠範, 高原晃宙, 瀬戸秀治, 野池耕平, 森加代子, 水野秀明: 深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究, 土木研究所資料, 第4333号, p11, 2016
- 2) 地頭蘭隆, 下川悦郎, 寺本行芳: 深層崩壊発生場予測法の提案ー鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にしてー, 砂防学会誌, Vol.59, No.2, p5-12, 2006
- 3) 千木良雅弘, 坂島俊彦, 渋谷研一: 深層崩壊発生危険斜面の地質・地形的抽出法について, 平成26年度砂防学会研究発表会概要集A, p16-17
- 4) 田村圭司, 内田太郎, 鈴木隆司, 寺田秀樹, 栗原淳一: 深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル(案), 土木研究所, 第4155号, 2008
- 5) 森脇寛: 地表面移動量を指標とする地すべり斜面の崩壊危険度評価, 地すべり, Vol.38, No.2, p115-122, 2001
- 6) 稲垣秀輝, 小坂英輝, 大久保拓郎: 四国, 中央構造線沿いの地すべりの発生と安定化, 日本地すべり学会誌, Vol.44, No.4, p37-43, 2007
- 7) 小野田敏, 高山陶子, ハスパートル: ひずみ率による斜面安定度の推定, 平成26年度特別講演およびシンポジウム予稿集「土砂災害の軽減に向けてー大規模斜面変動の前兆と評価ー」, p49-55, 応用地質学会, 2014
- 8) 環境省地球環境局環境保全対策課: 陸水モニタリング手引き書(初版), p65-66, 2005

(2017.4.3受付)