地すべり地内における地下水区分の一手法

On Some Proposal Methods for Division of Ground Water in Landslide Areas

長 溝 忍*
Shinobu NAGAMIZO

Abstract

Investigation of water quality of ground water in landslide areas is sometimes used for design of drainage works for landslide control. Considering a selection of elements of water quality and division of ground water, Ca^{++} , Mg^{++} and alkalinity are indispensable and division of ground water can be done by using a correlation between $\text{Ca}^{++}+\text{Mg}^{++}$ and alkalinity. It is found that water quality in landslide areas is not peculiar and have a resemblance to the water distributing generally over the earth.

まえがき

地すべり活動に最も大きな影響を与えるものが地下水であることは、地すべりの実態統計¹⁾からも、また地すべりの発生誘因が図-1に示すように、自然的な誘因によるものがほとんどであり、この誘因中、水によるものが図-2から豪雨時、長期間の降水、融雪時と計81%にも及んでいることから裏付けられる。

地すべり対策工法もこれを受けて図-3に示すように、地表水路工、水抜ボーリング工、集水井工と、地表水、地下水の処理に関するものが多い。したがって、これ等の地表、地下水の排除の工法の選択、及びその効果を高めるためには、事前に地下水調査を行ない、地下水の区分及び地下水系の区分が必要となる。この地下水調査による地下水の診断に水質分析の結果が用いられている。地下水の水質は地下水がそれまでに接触して来た地質的な環境、履歴を反映したものであり、水質の変動は地下水の流動状況に関して有力な情報を提供するものと考えられるからである。

地すべり対策工法の地下水排除工法の目的は、高い水圧をもった滞水層の水圧を下げることによって、すべり面に働く間隙水圧の減少を計ることである。本文はこの地すべり活動の誘因となる滞水層及び滞水層へ流入している地下水系の区分を水の硬度によって試みたもので、地すべり地の地下水診断の一手法として発展させることができないものかと期待するものである。

1. 一般的な陸水の水質

地すべり地の陸水の水質について述べる前に一般的な

図-1 地すべり発生誘因¹⁾ 図-2 地すべり発生誘因
(自然的発生誘因)¹⁾ 図-3 地すべり対策工¹⁾

陸水の水質組成について述べる。

地殻を構成する鉱物で、最も量が多いのは珪酸塩鉱物であり、このうち、地下水と反応しやすいものは長石類である。

珪酸塩鉱物よりは量的に少ないが、岩石中に普遍的に含まれ、かつ、水の反応に弱いのが炭酸塩鉱物であり、代表的な鉱物は、炭酸カルシウム (方解石)、炭酸マグネシウム (苦灰石) である。

*前建設省土木研究所砂防部地すべり研究室
中国地方建設局広島国道工事事務所管理第二課

水が岩石と反応（風化）しながら流下するにつれて、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 等の溶存成分は増加する。
表-1に淡水性地下水の水質の変質方向を示した。

また、溶けやすさの一般的傾向を示すと

である。

以上のことから一般陸水の性質は炭酸水素塩を主とする地下水であること、換言すれば一時硬水（Ca、Mgが炭酸水素塩となって溶けている状態）を呈していることがうなずける。

〈タイプ分類〉

- (1) Carbonate hardness
重炭酸カルシウム、マグネシウムを主成分とする水
- (2) Carbonate Alkali
重炭酸ナトリウム、カリを主成分とする水
- (3) Non Carbonate hardness
塩化土類、硫酸土類を主成分とする水
- (4) Non Carbonate Alkali
塩化アルカリ、硫酸アルカリを主成分とする水
- (5) 1と2の区分に属する中間的なもの

〈作図法〉

$$(1) \begin{cases} \text{HCO}_3^- (\%) = \frac{\text{HCO}_3^-}{\text{HCO}_3^- + \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}} \times 100 \\ \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} (\%) = 100 - \text{HCO}_3^- \end{cases}$$

$$(2) \begin{cases} \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} (\%) = \frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na} + \text{K}} \times 100 \\ \text{Na} + \text{K} (\%) = 100 - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \end{cases}$$

〈タイプ分類に対する一般判定〉

- (1) 炭酸カルシウム（ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ）タイプ： $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 、 $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ の組成で我が国の一般の地下水のタイプ
- (2) 炭酸ナトリウム NaHCO_3 タイプ：停滞的な環境にある地下水のタイプ
- (3) 非炭酸カルシウム CaCl_2 、 CaSO_4 タイプ：温泉水、鉱泉、化石水などがこのタイプで一般の地下水とは異なる傾向がある。
- (4) 非炭酸ナトリウム NaCl タイプ： NaCl の水質組成で、海水や海水に汚染された地下水、温泉水がこのタイプ。
- (4) 中間タイプ：0～4の中間に位するもので、河川水、伏流水及び自由水のタイプ

図-4 Keydiagram 説明図

表-1 淡水性地下水の変質方向

成 分	地下水の流動についての増減
Na^+	+
Mg^{2+}	-
Ca^{2+}	-
Cl^-	+
SO_4^{2-}	-
NO_3^-	-
NO_2^-	不 定
Fe^{2+}	+
$\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$	+
SiO_2	+
H_2S	+
DO	-
CH_4	+
E_h	-
pH	不 定

（参考）永久硬水：Ca、Mgが硫酸塩や塩化物となって溶けている。 CaSO_4

一時硬水であることは図-4（キーダイアグラム）での分類判定(1)のタイプが我が国の一般的な地下水のタイプであることと一致する。

2. 分析結果の解析方法

次に一般に使用されている、キーダイアグラム（Key-

図-5 Hexadiagram の模式図と水質型の分類

〈タイプ分類〉

- 1) $\text{Ca} + \text{Mg} < \text{HCO}_3$ （当量線上側）：重炭酸アルカリ系
- 2) 当量線上：重炭酸硬度系
- 3) $\text{Ca} + \text{Mg} > \text{HCO}_3$ （当量線下側）：硫酸硬度系

〈タイプ分類に対する判定〉

- 1) 河川よりの供給を受けない深い地下水で、河川に無関係か、河川からの供給を受けたとしても相当離れた地点
- 3) 浅い地下水、河川水

図-6

表-2 ppm より eqm の換算係数

陰 イオン	陽 イオン
重炭酸イオン (HCO_3^-).....0.0164	カルシウムイオン (Ca^{2+}).....0.0499
炭酸イオン (CO_3^{2-}).....0.0333	マグネシウムイオン (Mg^{2+}).....0.0822
硫酸イオン (SO_4^{2-}).....0.0208	ナトリウムイオン (Na^+).....0.0435
塩素イオン (Cl^-).....0.0282	カリウムイオン (K^+).....0.0256
硝酸イオン (NO_3^-).....0.0161	第1鉄イオン (Fe^{2+}).....0.0358
亜硝酸イオン (NO_2^-).....0.0217	マンガンイオン (Mn^{2+}).....0.0364
	アンモニウムイオン (NH_4^+).....0.0554
	アルミニウムイオン (Al^{3+}).....0.1112

diagram) とヘキサダイアグラム (Hexad iagram) による解析方法及び硬度 ($\text{Ca}+\text{Mg}$)- HCO_3 相関図について図-4~6に示す。

図の説明のように、キーダイアグラム (図-4) は水質成分の存在比を示すので量的関係が不明であるのに対して、ヘキサダイアグラム (図-5) は各成分の存在量 (eqm: ミリグラム当量, 表-2 に ppm より eqm の換算係数を示す) の多少を示すので理解しやすく、特長として

- イ) 作図が容易
- ロ) 図形による水質組成の判定が簡便
- ハ) 同一図形の追跡により、溶存成分量の消長から水塊の区分が可能

が上げられ、キーダイアグラムよりヘキサダイアグラムの方がより水系区分には適しているものと思われる。

次に硬度- HCO_3 相関図 (図-6) について説明する。この相関図は北野の理論²⁾ によるもので、岩石同化の予知と共に同一水系では勾配45度の直線の上に載ることと地域的に集中すること、また、永井³⁾ によって、一般に水中における主成分は陰イオンでは HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , 陽イオンでは Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ であり、陰イオンの構成を見ると HCO_3^- が空気中の CO_2 および炭酸塩、有機物の分解で生ずる CO_2 の溶解により量的に最多量を占め、陽イオンでは火山岩、変成岩などからの溶出は Ca -長石の方が Na -長石より溶解度が大きいこと、また炭酸塩の場合には Ca , Mg が主成分であるため、 $\text{Ca}+\text{Mg}$ が $\text{Na}+\text{K}$ よりはるかに多い (溶けやすさ: $\text{Ca}+\text{Mg} > \text{Na}+\text{K}$)。浅い地下水、河川水では HCO_3^- に対して SO_4 , Cl の比率が比較的高いために HCO_3^- と $\text{Ca}+\text{Mg}$ の関係を見ると、ほとんどが $\text{HCO}_3^- < \text{Ca}+\text{Mg}$ の関係にあり、一方深い地下水では酸素の供給が欠乏するため、還元状態となり SO_4^{2-} が減少 (SO_4^{2-} はしだいに還元されて H_2S

となる), HCO_3^- が増大するが陽イオンでは変化が少ないため、この関係は逆転し、河川よりの供給を受けない深い地下水は、ほとんどが $\text{HCO}_3^- > \text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ である。したがってこの関係を用いると河川からの地下水の供給を裏付けることが可能であると論じて図-6の説明のように地下水の区分を行なっている。

一般陸水が一時硬水を呈していることから、地下水系、地下水区分に当っては硬度- HCO_3^- 相関図が適していると思われる。

3. 地すべり地内の地下水の水質及び水系区分

一般に地すべり地には通常の斜面に比較して多量の地下水が分布していることはよく知られている、図-7に地すべり地の地下水分布の模式図を示す。

渡⁴⁾ は地すべり地陸水を表-3 のように区分している。水質特徴としては、浅層地下水は降水の水質と同じ、深層地下水は鉱泉質で基盤面地下水は深層地下水に似ていると述べ、牧、富田⁵⁾ は地すべり地帯陸水の最も大きな特徴は重炭酸塩を主としていると報告しており、また有泉⁶⁾ は第三紀の地すべりでは CaSO_4 , MgSO_4 の濃度が高く、第三紀以外ではアルカリ度が高いと述べている。松崎、飯田⁷⁾ は統計的手法を用い、 $\text{Ca}+\text{Mg}$ と SO_4 及び HCO_3^- との相関性の高い事実、吉岡、古谷⁸⁾ は第三紀層、破碎帯地すべりとも一般に溶存成分量は表流水、湧水、ボーリング孔の水の順に多くなっていること、陽イオンとして Ca^{2+} 、陰イオンとして HCO_3^- が卓越していることを指摘している。また、杉崎、柴田⁹⁾ によって

図-7 地すべり地の地下水分布⁴⁾

表-3 地下水区分

地下水区分	滞水場所	水質	地すべりへ及ぼす影響
浅層地下水	崩積土や表層土の中の上層滞水・常時は滞水せず、降雨時にのみ滞水	降水の水質とまったく同質	強雨のときには異常に高い中立圧を発生し、表層付近の浅い滑落の原因になること多。
基盤面地下水	基盤表面付近の基盤の地形(岩盤地形)に影射され、その沢形部に集まって流れる。	深層水と似た水質	基盤風化層の中のすべり面に影響最も多く地すべり発生と関係する。
深層地下水	断層やそれに沿った破碎部	鉱泉質	地すべりの誘因となることは少ないが、誘因となった場合比較的大規模な地すべりを起こす。

地下水の化学成分の流動に伴う変化について、溶出作用は地層との接触時間が長いほど、溶出によって溶存化学成分が増加する。①全陽イオン量の増加（各イオン間の相互の比率は考えない）② HCO_3^- の増加。したがって（ HCO_3^- /全陰イオン）の増加、 Cl^- は地中に起源がない場合が一般であるから（ Cl^- /全陰イオン）の減少が見られると報告している。

以上の諸報告等から、地すべり地内の地下水の一般的性質から、地下水分区分及び水系区分に当っては、

- (1) 溶存割合、
- (2) 溶存成分量

について把えることができ、陰イオンでは HCO_3^- が、陽イオンでは Ca^{2+} 、 Mg^{2+} が指標になる。

以上の要件を満たす解析方法は2節の解析方法（図-6）で述べた硬度- HCO_3^- 相関図が適していることになる。

これは、陸水の一般的な性質を見る場合と同じことになる。すなわち、溶存成分的には地すべり地内の地下水と一般陸水の性質との間には差がないことになる（各々の地すべり陸水には各々水質の特徴が見られるが⁶⁾）。

硬度- HCO_3^- 相関図を適用するに当り、地表流水と地下水との区分の目安を表-4より河川水中で最も溶存量の多い関東地方の値から、一応0.7ミリグラム当量（eqm）の値を使うこととして、0.7meq以上で地下水の浅・深層の区分を行なうこととした。また、地下水の区分については前述の渡による区分を相関図上に図-8のように当てはめて考察することにした。

3.1 硬度- HCO_3^- 相関図の適用例

筆者は徳島県江島地すべり（破碎帯地すべり）¹⁰⁾にお

(イ) 浅層地下水 (ロ) 基盤面地下水
(ハ) 深層地下水 (ニ) 地表流水

図-8 地下水分区分

表-4 河川水における HCO_3^- と $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ の関係³⁾

地	域	河川数	HCO_3^- (eqm)	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ (eqm)
北海道地方		22 河川平均	0.55	0.60
東北	"	35 "	0.33	0.54
関東	"	11 "	0.69	0.87
中部	"	42 "	0.49	0.58
近畿	"	28 "	0.45	0.49
中国	"	25 "	0.45	0.42
四国	"	19 "	0.61	0.65
九州	"	43 "	0.67	0.72
全国		225 "	0.51	0.60

いて硬度- HCO_3^- 相関図を適用し、溶存成分量から地下水を図-9に示すように区分し、地すべり地を涵蓋している地下水は主として混合地下水であることを報告した。また、粕、横田¹¹⁾は第三系地すべり地で図-10に示す区分（三角グラフとキーダイアグラムを併用）より $\text{Ca} +$

図-9¹⁰⁾

図-10¹¹⁾

重碳酸と硬度による区分		地すべりとの関係
系	no.	
当量線上側 重碳酸アルカリ系	11, 24, 25, 32, 34 19, 28, 33	深層地下水 一次地すべりに関係が大きい
	17	
当量線上 重碳酸硬度系	10 14, 18, 21, 26, 27 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 12, 35 13, 15, 16	
当量線下側 硫酸硬度系	23 8, 9, 30 29, 31 44 20, 22, 40, 41 42, 43	浅層地下水 二次地すべりを促進する傾向が大きい

$Mg > HCO_3$ の地下水は二次的な（崩壊層）地すべりを促し、 $Ca + Mg < HCO_3$ の地下水は一次的な（構造的）地すべりを促す役割をもっていると考察している。

江島地すべりでは同一地下水系での溶存成分量よりの地下水区分の例であり、狛、横田の例は溶存成分量と領域によるところの地下水区分である。

3.2 地すべり地内の地下水の特徴について

一般に地すべり地内の地下水が異常であると言われていたので、有泉⁶⁾によって報告された全国の地すべりに6カ所の地すべりを加えて、図-11に示した。これと比較するために鈴木¹²⁾によって報告されている全国の工業用水に使用されている地下水を図-12に示した。両者の図からは特徴的なものは把握することができないし、一般的な陸水の水質で述べた一般の陸水となら変るところはないように見られる。ただ地すべり地内の地下水の方が溶存成分量の多いものが多いように見られる。

次に地下水の区分に目を移すと、地すべり地内の地下水の大半が、溶存成分量 0.7meq 以下、 $Ca + Mg > HCO_3$ の区分に入るようであり、これから考察するに、地すべり地の涵養水あるいは供給水は表流水かまたは浅層の地下水が多いということになる。

むすび

地すべり地陸水の水質の特徴については報告がなされ

図-11 全国地すべり地陸水

図-12 全国工業用水（地下水）

ているが、一般の陸水の水質についてあまり示されていないので、一般の陸水の水質を取り上げて、その解析方法を述べて、地すべり地内の地下水について述べた。

そして

① 地すべり地陸水の地下水区分に硬度 $-HCO_3$ 相関図が適している。

② 一般陸水との間に特に異なっ点は見られない

③ 地すべり地涵養水は浅層あるいは地表流水であることを述べた。が、適用例が少ないため、今後、または、今までの地すべり地陸水の水質分析結果を見直して、その適用性を把える必要がある。また、統計的手法により、より一般性を持たせる必要がある。硬度 $-HCO_3$ については松崎、飯田⁷⁾により、ヘキサダイアグラムについては千葉¹³⁾による例がある。終りに当って宮崎他¹⁴⁾によって、電導度 $-HCO_3$ の関係から一般河川水と地すべり周辺部の地下水との間に相異のあることが報告されているので付け加えておく。

参考文献

- 1) 地すべり実態統計（その2）：土木研究所資料1121号、建設省土木研究所砂防部地すべり研究室（昭51.2）
- 2) 北野 康、加藤喜久雄、金森 悟、金森暢子、吉岡龍馬：水質調査による岩石崩壊の予知の可能性、京都防災研、年報第10号 A. p. 555～p. 587（昭42.3）
- 3) 永井 茂：水質による地下水水系の解明、工業用水第114号（昭43.3）p. 66～p. 75
- 4) 渡 正亮：地すべり調査と対策講座Ⅰ 地すべり地の地下水とその調査、全国地すべり対策協議会
- 5) 牧 隆正、富田利保：松久山地すべり地帯陸水の水質的特性について、「地すべり」Vol. 1, No. 3（昭40.3）p. 1～p. 7
- 6) 有泉 昌：地すべり地帯陸水の水質について、土木研究所報告（昭39.3）p. 1～p. 14
- 7) 松崎 健、飯田 修：地すべり地帯の水質とその統計的分析について「地すべり」Vol. 12 No. 2（昭50.8）p. 19～p. 27
- 8) 吉岡龍馬、古谷尊彦：地質環境のこなる地すべり地の水質特性 京都防災研 年報第16号 B（昭48.4）p. 127～p. 139
- 9) 杉崎隆一、柴田 賢：地下水の地球化学的研究（第2部）「地質学雑誌」Vol. 67 No. 791（昭46.8）p. 427～p. 439
- 10) 江島地すべり調査報告書：土木研究所資料第1203号、建設省土木研究所（昭52.3）
- 11) 狛 武、横田節哉：第三紀地すべり地帯における水質の特徴 地質調査所月報（第22巻6号）p. 13～p. 25
- 12) 鈴木静夫：本邦地下水の化学成分の分布特性、水処理技術 Vol. 7, No. 10,（昭41）p. 1～p. 9
- 13) 千葉 仁：水質分析による地すべり調査事例 第12回治山研究発表会論文集、治山研究会（昭48.9）p. 296～p. 302
- 14) 宮崎敏孝、畔柳 健、堀内照夫：水質調査による風化帯の推定法について（Ⅱ）—電導度と溶出イオン量について—昭52年度砂防学会研究発表会概要集 p. 10～p. 11

（原稿受理日 昭和53年9月30日）

地すべり斜面の安定解析と原位置大型供試体の長期クリープ試験

「地すべり」 Vol. 15, No. 4 (通巻 第56号) 1979年 (昭和54年) 3月

福本 安正, 寺川 俊浩, 小宮 利彦

地すべり斜面の安定解析に適合する土塊のせん断強さを求めるため、地すべりが多発する冬期から春にかけて地すべり斜面において原位置大型供試体の長期クリープ試験をおこなった。

その結果、上限降伏値以上の応力を与えるならばせん断破壊すること、上限降伏値は室内試験のせん断強さの1/3よりも小さく、ほぼ残留強さと同値であることが明らかになった。クリープ性の地すべり斜面の安定解析には上限降伏値がよく適合する。

地すべり斜面の地形解析による地すべりの判読と危険度判定

「地すべり」 Vol. 15, No. 4 (通巻 第56号) 1979年 (昭和54年) 3月

吉松 弘行, 坂元 靖秀

地すべりは、その構成土塊の性質に応じた地形的特徴を有しており、その発生箇所も異なることが知られている。したがって地すべり斜面の判読、危険度の推定においては、これら構成土塊の性状を基に地すべりを型分類し、地すべり斜面のそれぞれの型における特徴を明らかにした上で実施することが必要である。今回は、構成土塊の性質を延展性 (ductility) の概念で三つの型に分類し、統計的手法等によりそれぞれの型における地形的特徴の違いを明らかにし、その結果を利用し、地すべり斜面の判読の難易、その危険の推定について考察及び解析手法を確立しようとするものである。

徳島県正夫地すべり地における地震探査

「地すべり」 Vol. 15, No. 4 (通巻 第56号) 1979年 (昭和54年) 3月

小林 芳正, 末峯 章, 小西 利史

徳島県井川町正夫地すべり地 (三汲川帯) で行なわれた地震探査について述べている。調査方法として、普通の測線探査 (profile shooting) のほか、一部の測線で扇射法 (fan shooting) を行なった。また、一部の解析で遅れ時間法 (delay-time method) を適用した。探査の結果、0.5~0.7km/s の第一層、2.0~2.5km/s の第二層、3.0~3.5km/s の第三層の速度分帯が行なわれた。第一層は厚さ 5~10m で表土および崩積層、第二層は 20~30m で原位置風化岩、第三層は新鮮岩に対応すると推定された。縦断方向の長測線探査および斜面中段を横断する測線での扇射法によって、地すべり地中央の基岩中に斜面最急勾配の方向をもった小断層らしい低速帯が見出された。

地すべり地内における地下水区分の一手法

「地すべり」 Vol. 15, No. 4 (通巻 第56号) 1979年 (昭和54年) 3月

長溝 忍

地すべりの地下水質分析は、地すべり対策法の1つである地下水排除工を効果的に行なうことを目的としたものである。この目的に照らした、分析項目の取捨選択及び地下水系の区分方法について考察した結果、分析項目は最小限 Ca^{++} 、 Mg^{++} 、アルカリ度の3項目、水系区分には $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ - アルカリ度の相関図から可能であり、従来地すべり地の地下水の水質が特異であることが強調される傾向にあったが、上記の相関図からは一般の陸水の性質との間に異なった点は見いだせなかったことから地すべり地の地下水も一般の陸水として対処しているのではないかと思う。