

# 斜面崩壊を規制する断裂構造

## GEOLOGICAL FRACTURE REGULATING SLOPE FAILURE

吉村 辰朗<sup>1</sup>・平田 洋士<sup>2</sup>・福田 直三<sup>2</sup>・末次 大輔<sup>3</sup>

Tatsuro YOSHIMURA, Hiroshi HIRATA, Naozo FUKUDA and Daisuke SUETSUGU

<sup>1</sup>第一復建株式会社 (〒812-0006 福岡市博多区上牟田 1 丁目 17 番 9 号)

E-mail: tt\_yoshimura@dfk.co.jp

<sup>2</sup>新日本技術コンサルタント (〒890-0034 鹿児島市田上 8 丁目 24 番 21 号)

E-mail: h.hirata@shin-nihon.net n.fukuda@shin-nihon.net

<sup>3</sup>宮崎大学工学部社会環境システム工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

E-mail: suetsugu@cc.miyazaki-u.ac.jp

**Key Words:** fracture, mountainside looseness, non-rainfall collapse, gamma-ray survey

### 1. はじめに

吉村ら<sup>1)</sup>と上野ら<sup>2)</sup>の報告では、 $\gamma$ 線探査で同じ外力条件(降雨・地震)に対して斜面の崩壊、切土工事に伴うのり面の崩壊箇所を調査し、類似する条件の中でなぜそこが崩壊したのかに着目して、崩壊地に断裂構造が影響をしていることを確認した。また、崩壊箇所を主断裂・共役断裂で取り囲むエリアに地下水が流入することによって山腹のゆるみが進行し、地震時には地盤の揺れが異なることによって崩壊に至る可能性について考察している。主な事例として、山腹のゆるみが進行して崩壊した事例として 2018 年 4 月に発生した耶馬溪金吉ののり面崩壊(以下、耶馬溪崩壊)があげられ<sup>3)</sup>、地震動によって崩壊した事例としては 2016 年 4 月に熊本地震による県道 149 号補強土壁の崩壊があげられる<sup>4)</sup>。

2018 年 7 月の台風 7 号後の前線活動発達による豪雨によって宮崎県小林市北部に位置する県道の斜面崩壊が発生した。この崩壊の原因を把握する目的で  $\gamma$ 線探査を実施した。その結果崩壊地内およびその周辺に主断裂・共役断裂で構成される断裂構造の存在を確認した。本論文では、これまでの崩壊事例の特徴を説明し、小林市の崩壊原因について考察した。

### 2. 断裂を検出する $\gamma$ 線探査

岩石や鉱物中にはわずかであるが天然放射性同位

元素が含まれ、ウラン系列元素(<sup>239</sup>U)、トリウム系列元素(<sup>232</sup>Th)が主要なものである。これらの放射性元素は崩壊過程で、ウラン系列では<sup>226</sup>Ra, <sup>214</sup>Bi, <sup>214</sup>Pb から、トリウム系列ではタリウム(<sup>208</sup>Tl)から  $\gamma$ 線が放出される。カリウム(<sup>40</sup>K)は崩壊系列を作らず、電子捕獲によりアルゴン(<sup>40</sup>Ar)に壊変する過程で  $\gamma$ 線を放出する。地殻変動に伴う破断・変形・変質を受けた地質体(断裂帯、変質帯)では、その作用によって物質(地盤、岩盤)の磁性が変化し、 $\gamma$ 線強度異常が生じると考えられる<sup>5)</sup>。 $\gamma$ 線探査は、地質体から放出される  $\gamma$ 線をシンチレーションカウンタで検出し、その強度(放射線の数)を計測する方法である。計測方法としては全計数法を用いた。測定機器は、アロカ社製  $\gamma$ 線用シンチレーションサーベイメータ TCS-172B である(図-1)。測定はセンサー一部を地盤に密着させ 10 秒おきに 5 回読取り、その平均値を測定値とした。放射線の測定単位は、Sv/h である。各地質体は固有値を呈し、その標準偏差は  $0.2 \sim 0.5 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h}$  が主で平均値  $\pm (0.5 \sim 1 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/h})$  の範囲で測定値のバラツキが認められる。断裂においては、固有値の範囲外の値を呈することから、これを  $\gamma$ 線強度異常値とした<sup>6)</sup>。 $\gamma$ 線強度異常値が出現した地点では 10cm 間隔で測定し  $\gamma$ 線強度異常値区間を詳細に求めた。この測定法で異常値区間境界点( $\alpha$ 点)を求め、測線より 50cm~1m シフトさせて同様に境界点( $\beta$ 点)を 10cm オーダーで求め、 $\alpha$ 点と  $\beta$ 点を結んだ方向を断裂帯の走向とした。走向に直交する  $\gamma$ 線強度異常値区間を断裂幅と定義



図-1 測定機器

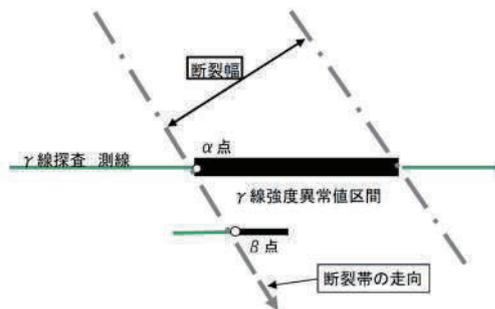


図-2  $\gamma$ 線探査で検出した断裂幅

した(図-2)。 $\gamma$ 線測定結果図は縦軸に $\gamma$ 線強度、横軸に測定点の位置を示し、断裂部の測定値の記号は塗りつぶして示した。

### 3. 熊本地震による補強土壁崩壊地の特徴

2016年4月に熊本地震が発生し、補強土壁が部分的に崩壊した。補強土壁は連続的な構造物であるが、崩壊箇所と残存箇所が隣り合っており、これに作用した地震動による外力が局所的に大きく異なったものと推察された(図-3)。崩壊土砂の撤去および地山の切土施工時に、補強土壁付近には共役断裂が検出

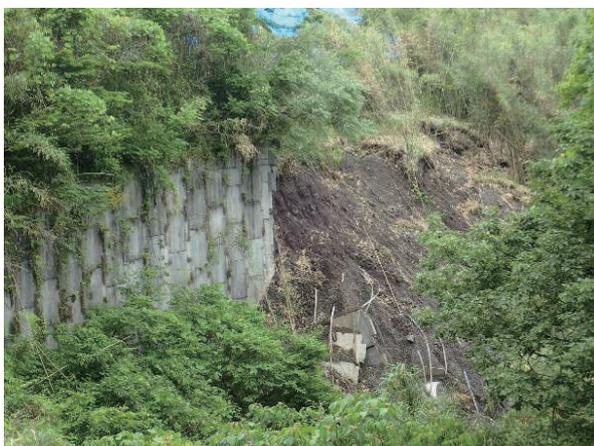


図-3 崩壊部と非崩壊残存部が隣接した補強土壁

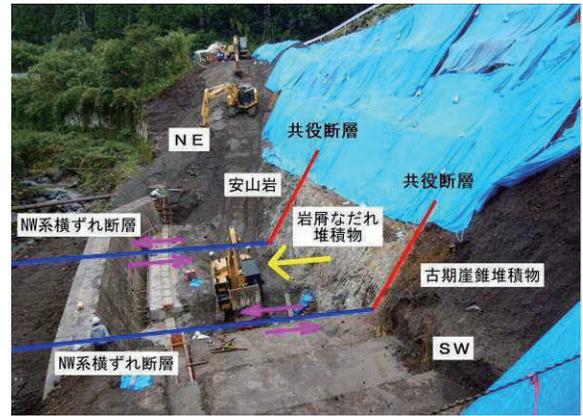


図-4 基礎掘削時に認められた共役断裂

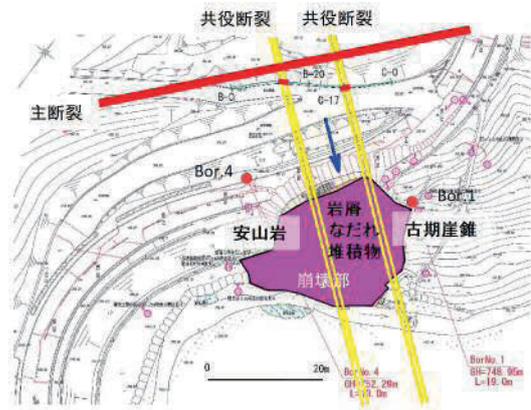


図-5 断裂分布と崩壊区間の対応

された(図-4)。崩壊区間の中心部にある断裂で分断された区間が、地震動によって射動的な崩壊をしたと考えられる(図-5)。断層付近の地震動の振幅特性として、断層と直交する方向に地震動が卓越する可能性が高いと考えられている<sup>7)</sup>。

### 4. 耶馬溪金吉の斜面崩壊の特徴

2018年4月11日に発生した耶馬溪崩壊は、主断裂・共役断裂の他に中央部に規模が大きい断裂が認



図-6 耶馬溪崩壊の断裂分布

められた(図-6). 中央部の断裂の表層部は凹地形を呈し, 古期崖錐が堆積している. その下方の移動土塊は, 崩積土中に溶結凝灰岩の大転石を多量に含んでおり, また凝灰角礫岩(不動層)との境界付近では湧水が見られた<sup>8)</sup>. 移動土塊中央部に規模が大きい断裂が分布することから, この断裂付近の浸食によって中央部分に深い谷が形成され崩積土や岩層が堆積し, 次に側方崖付近の共役断裂付近の浸食によって「地形の逆転」<sup>9)</sup>が生じ, 谷底が尾根になり埋没谷が形成された可能性が高い(図-7).



図-7 埋没谷の形成(文献<sup>10)</sup>に加筆)

## 5. 小林市北部の斜面崩壊特性

### (1) 崩壊箇所周辺の地形と地質

崩壊箇所は, 宮崎県小林市北部に位置する斜面である. 西方の西俣山(917m)を最高点とし, 概ね標高600m~850mの急峻な山岳地形からなる. 周辺地域の山地を形成する主要な尾根は北西-南東方向に延びる. 崩壊が発生した箇所の上部尾根には特徴的な鞍部が見られ, 北西-南東方向に延びる断層に規制された崩壊の可能性がある. 明瞭な地すべり地形は認められず, 「地すべり地形分布図」(防災科学技術研究所発行)にも地すべり地形は抽出されていない.

崩壊箇所周辺の地質は, 新生代古第三紀始新世~



図-8 調査地周辺の地質(産総研地質調査総合センター地質図に加筆)

漸新世の日向層群からなる. 同層群は「四万十帯の付加コンプレックス」と定義され, 主に砂岩, 泥岩, 砂岩泥岩互層および乱雑層から構成される(図-8).

### (2) 崩壊の概要と地盤変動

2018年7月9日の台風7号豪雨により斜面が崩壊した(図-9). 2019年9月末から孔内傾斜計や水位計の計器観測, また, 同年11月より地表伸縮計の計測が実施されている. 計測位置は図-18に後掲する.



図-9 崩壊箇所全景

地表伸縮計の観測中には降雨はほとんど見られなかったが, 地すべり頭部に設置した地盤伸縮計 S-1 では図-10に示すように2020年2月初めより変位が顕著になっている.

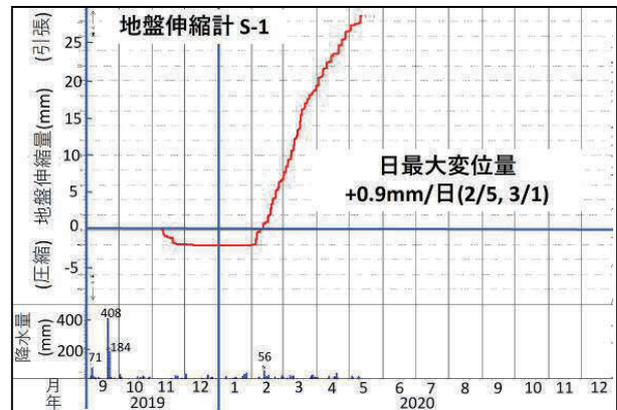


図-10 地表面伸縮計変動図(S-1)

### (3) 渇水期に認められた地すべり変動

図-11は孔内傾斜計(B-2)は災害復旧工事時(2019年10月6日)に地すべりと思われる孔内傾斜計の変位を確認した. その後2月初めから変位速度が0.028mm/日から0.19mm/日と約7倍に増している. この変動状況は, 地表伸縮計 S-1と同様である. これらの地すべり変動は観測中には降雨はほとんど見られなかった期間であり, ボーリング孔内の地下水位に顕著な変動は認められない(図-12). 2020年2月初めから顕著になった地盤変動は, その直前に崩壊箇所付近で地震(2020年1月30日19時55分頃,

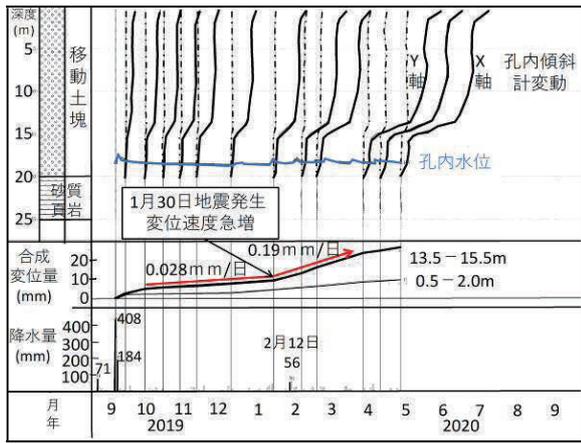


図-11 孔内傾斜計変動図 (B-2)

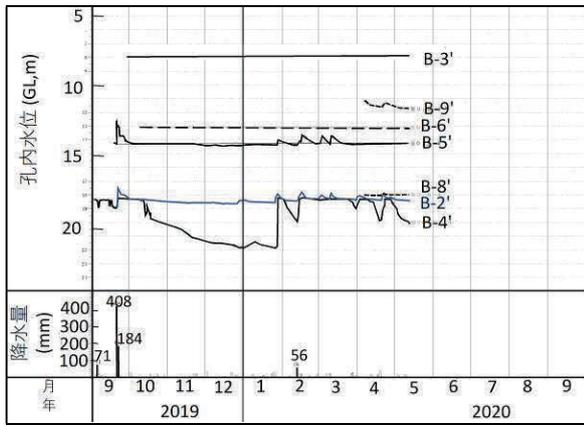


図-12 孔内水位変動図 (2019年9月～2020年5月)

熊本県天草・芦北地方，M4.0，深さ約10km，図-13)が発生している。被災地付近でも震度1が観測され，これ以前には近辺では震度3以上が観測された有感地震が見られないことから，この地震動が崩壊箇所の不安定な地盤に変位速度を加速させたトリガーになった可能性が推察される。



図-13 2020年1月30日の震央と崩壊箇所 (気象協会HPに加筆)

#### (4) $\gamma$ 線探査結果と山腹ゆるみ形成の考察

崩壊箇所付近にNEおよびNW方向の断裂が推定されたため，崩壊に関わる断裂分布を定量的に把握する目的で，断裂の分布(走向)・規模(断裂幅)を把握する調査手法である $\gamma$ 線探査を実施した。A測線は尾根に設定し(後述図-16参照)，測線長は180m，測点間隔は3mである。 $\gamma$ 線測定結果図は，図-14に示すとおりであり，縦軸には $\gamma$ 線強度( $\times 10^{-2} \mu\text{ Sv/h}$ )，横軸には測点(m)を示した。 $\gamma$ 線強度分布から分布地質を反映している測定値を破線で囲んでいる。同図からA測線上に5箇所の断裂が検出された。また，当該地の地質は砂質頁岩および泥岩である，各地質体の $\gamma$ 線強度を表-1にまとめた。これより地質の分布を断裂とともに示すと図-15のように推察される。

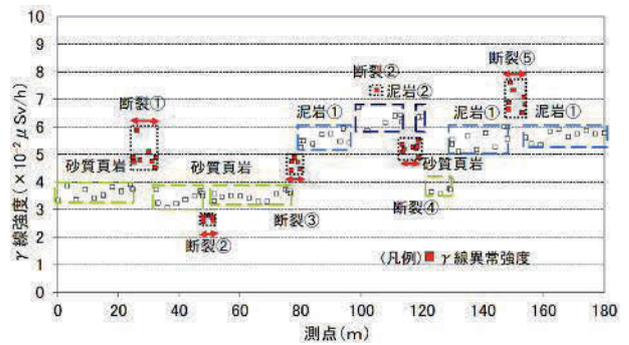


図-14  $\gamma$ 線測定結果 (A測線)

表-1 A測線に分布する地質の $\gamma$ 線強度

分布地質	測定区間 (m)	平均値	標準偏差
砂質頁岩	0.0~24.7	3.65	0.20
砂質頁岩	32.4~47.8	3.43	0.22
砂質頁岩	51.4~76.7	3.50	0.15
泥岩①	79.9~96.0	5.55	0.21
泥岩②	99.0~120.0	6.31	0.25
泥岩②	105.0	7.34	0.29
砂質頁岩	123.0~129.6	3.74	0.18
泥岩①	129.7~148.2	5.53	0.31
泥岩①	153.9~180.0	5.68	0.19

単位： $\times 10^{-2} \mu\text{ Sv/h}$

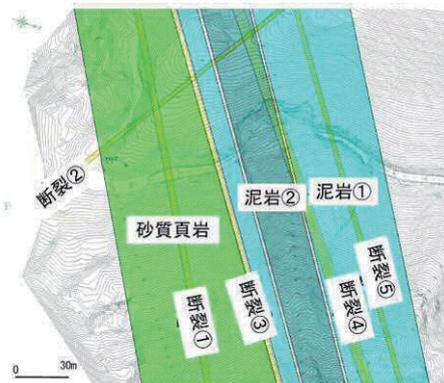


図-15  $\gamma$ 線強度による砂質頁岩・泥岩の分布 (A測線)

A 測線上で検出された断裂を表-2 に、断裂分布を図-16 に示した。すなわち、 $\gamma$ 線の異常値の分布から、断裂幅は2.3mから5.6mであった。断裂①、③、④、⑤の方向はN52° E～N60° E、また、断裂②はN50° Wであり、共役の関係である。図-17 に現場において断裂②（主断裂）と断裂④（中央部断裂）の断裂幅と断裂方向を決定する状況を示した。

表-2 A 測線の  $\gamma$ 線異常値区間と断裂の規模・方向

断裂名	$\gamma$ 線異常値区間(m)	断裂幅(m)	方向(走向)
断裂①	24.8～32.3	4.3	N60° E
断裂②	47.9～51.3	2.3	N58° W
断裂③	76.8～79.8	2.4	N55° E
断裂④	113.3～118.9	5.6	N52° E
断裂⑤	148.3～153.8	3.2	N55° E

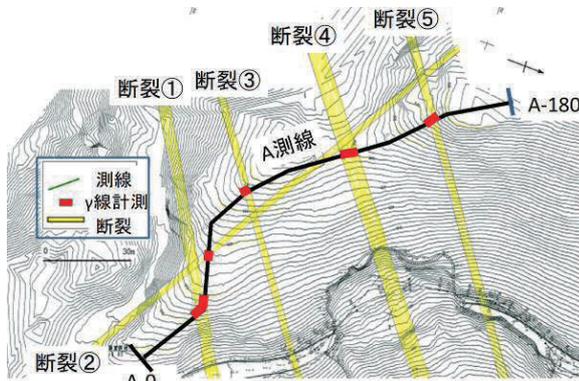


図-16 A 測線設定と断裂分布

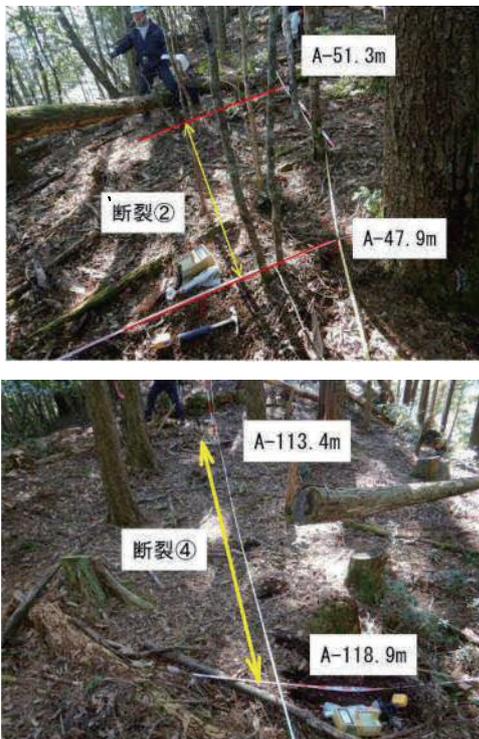


図-17  $\gamma$ 線探査による断裂の設定状況  
断裂②（上図）と断裂④（下図）

小林市北部の斜面崩壊は、泥岩分布域で発生しており（図-15）、図-18 に示すように中央部に規模の大きい断裂④（断裂幅5.6m）が位置し、崩壊地形を取り巻くように共役断裂（断裂③、断裂⑤）が分布することが認められた。このような崩壊形態は4.の耶馬溪崩壊と同様である。



図-18 崩壊箇所と各断裂の位置関係

#### (5) 主断裂・共役断裂と地下水の影響

耶馬溪崩壊と小林北部地区の崩壊の形態から、主断裂は滑落崖を、共役断裂は側方崖を形成していると考えられる。また、主断裂と共役断裂の交差部では図-19<sup>11)</sup>に示すように湧水が認められる場合がある。断裂交差部では透水性が高く、地下水および物質の重要な移行経路となることが報告されている<sup>12)</sup>。これは、「地すべり地では滑落崖・側方崖に地下水流路が形成され“地下水包蔵体”<sup>13)</sup>と称されている」とことと調和的である。



図-19 主断裂と共役断裂の交差部にみられる湧水<sup>11)</sup>

以上の事象を「斜面崩壊構造」として図-20 にまとめた。小林市北部の崩壊では、崩壊箇所を主断裂・共役断裂で取り囲むエリアに地下水が流入することによって移動土塊が生じ、渇水期においても地震動

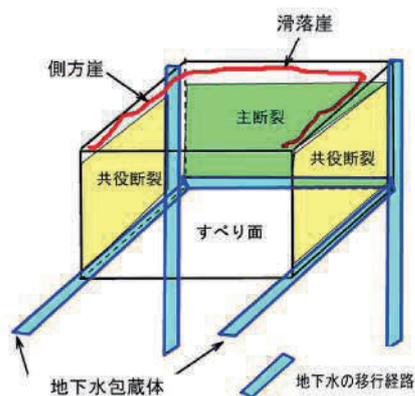


図-20 斜面崩壊構造における地下水の影響

がトリガーとなって「山腹のゆるみ」が発生し、地すべり変動が活発化する現象が推定される。

## 6. まとめ

斜面・のり面、道路構造物の崩壊の地質的素因として主断裂・共役断裂からなる断裂構造や地下水包蔵体の存在、誘因として豪雨や地震があげられる。熊本地震による補強土壁崩壊や耶馬溪斜面の崩壊を事例として紹介した。これらの事例では、斜面崩壊箇所尾根部において $\gamma$ 線探査を実施し、断裂分布を調べた結果、主断裂は滑落崖を共役断裂は側方崖を形成し、移動土塊を形成している。

小林市北部の崩壊では、崩壊箇所を主断裂・共役断裂で取り囲むエリアに地下水が流入することによって移動土塊が生じ、渇水期においても地震動がトリガーとなって「山腹のゆるみ」が発生し、地すべり変動が活発化する現象が推定された。

羽田野<sup>14)</sup>は、崩壊性地形は他の外力による地形に比べると、単位個体としての独立性が強く、これは、その地形をつくりだした崩壊性変動が場所的にも時間的にも不連続性の著しい現象だ、と指摘している。大八木<sup>15)</sup>は、一つの地すべりは周囲の斜面からすべり面等の不連続面によって分離した地形、独立した構造体として「地すべり構造」という概念を提唱している。

これらの視点を得るには、本論文の事例で示したように不連続面としての幅 2m 前後の小規模断裂の存在を検出できる $\gamma$ 線探査法が有効である。崩壊危険斜面を抽出する手法としては、地表の変位をとらえることによる「山腹のゆるみ」を面的かつ広域的に把握する技術（例えば「SAR 干渉解析」<sup>16)</sup>など）と断裂構造の存在の影響を組み合わせる方法を今後の課題と位置付けている。

## 参考文献

- 1) Yoshimura, T., Fukuda, N., Hodo, M., and Baimakhan, A.

R.: Importance to evaluate of fault fracture zones for construction of infrastructures in mountain area by  $\gamma$ -ray survey, *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Join Symp. Problematic Soils and Environment in Asia, JS Okinawa 2013*, pp.167-172.

- 2) 上野竜哉・西内浩二・中島溪・平田洋士・吉村辰朗： $\gamma$ 線調査によりモデル化した地質構造の道路設計への適用，令和元年度土木学会全国大会第74回年次講演会，III-94，2019。
- 3) 平成29年7月九州北部豪雨地盤災害調査団：平成30年4月中津市耶馬溪町金吉梶ヶ原地区における斜面崩壊と今後の問題点，<https://www.jiban.or.jp>
- 4) Sahara, K., Suetsugu, D., Fukuda, N., Yoshimura, T., Sato, H, and Hirae, F.: The effect of fracture zones on a failed reinforced soil wall induced by severe ground motions during the 2016 Kumamoto Earthquake, *Proc. 16<sup>th</sup> Asian Regional Conf. Soil Mechanics and Geotech. Engineering*, WED-P2-006\_JGS-082, 2019.
- 5) 吉村辰朗，大野正夫：断層破砕帯における帯磁率異常に伴う $\gamma$ 線量の変化，物理探査，63，pp. 151-160，2012。
- 6) 吉村辰朗・小田高幸： $\gamma$ 線測定の解析手法について，全地連「技術フォーラム '93」横浜，89-92，1993。
- 7) 地盤工学会 地震動編集委員会：ジオテクノート9地震動，62-63，2010。
- 8) 耶馬溪町金吉地区山地崩壊原因究明等研究委員会：平成30年（2018年）4月に中津市耶馬溪町で発生した山地崩壊について 最終報告概要，平成30年11月26日。
- 9) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地，古今書店，pp.927，2000。
- 10) 千木良雅弘：地質と災害—応用地質の見方・考え方，近未来社，pp.46，2016。
- 11) 吉村辰朗・吉松史徳：断裂による分断に起因する斜面崩壊発生機構，応用地質，59-6，485-494，2019。
- 12) 鐵 桂一・澤田 淳・内田雅大：亀裂交差部に沿った方向の透水特性の評価，サイクル機構技報，N0.23，63-70，2004。
- 13) 渡 正亮・小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策，山海堂，52-54，1987。
- 14) 羽田野誠一：最近の地形学，8. 崩壊性地形（その1），土と基礎，22，9，77-84，1974。
- 15) 大八木規夫：I. 3章 地すべり構造。地すべりに関する地形地質用語委員会編「地すべり-地形地質的認識と用語」，社団法人日本地すべり学会，29-45，2004d。
- 16) 山中雅之・中埜貴元・和田弘人・仲井博之：全国 SAR 干渉解析による斜面変動の検出事例，第8回土砂災害に関するシンポジウム論文集，55-60，2016。

(2020.7.1 受付)