

## 2)

# 崩土の河川突入に伴う混相流の運動特性

## Motion characteristics of multiphase flow generated by the rush of rock avalanches into the mainstream

中屋志郎 (同志社大・理工)  
Shirou NAKAYA, Doshisha University

### 1. はじめに

2011年台風第12号に伴う降雨により紀伊半島四万十帯では多数の斜面崩壊が発生した。これらは、崩壊の発生機構、崩壊の規模、崩土の運動機構および堆積機構において多様性が認められた。崩土の運動機構と堆積機構に着目すると、崩土が移動土塊の形態で斜面脚部の河谷に達して地すべりダムを形成したタイプ、崩土が移動土塊に比して破碎が進行した状態で斜面脚部の河谷に達して地すべりダムを形成したタイプ、さらに、崩土が岩屑なだれ、土石流、あるいは岩屑なだれや土石流とは異なる運動形態に発達したタイプが存在する。後三者に関しては崩土が斜面脚部の本川に達した事例、および地すべりダムを形成しなかった事例がある。一つの崩壊地内の崩土滑落斜面において崩土の堆積形態と分布様式に着目すると、崩土の運動方向の先端から後方にかけて、岩屑なだれまたは土石流堆積物、ロープ状崩土堆積物、移動土塊の順に堆積物の状態が遷移して行く過程が認識された事例がある。崩壊の発生機構、崩土の含水量、および岩石の物性によっては、これら三者のうち他の堆積物の形態を欠く場合も認められた。このように、崩壊の発生から崩土の運動および堆積に至る過程においては、系統的な発達様式が認められた。本講演では上記の崩土運動および堆積過程のうち、岩盤崩壊による崩土の河川突入現象と、これに伴い河谷において生じた崩土と河川水の相互作用に関して、運動痕跡の調査・計測による基礎的研究を行った結果を述べる。研究対象としたのは奈良県十津川水系の小原谷と濁谷において発生した事例である。小原谷と濁谷は類似した地形・地質的特徴を持つ。いずれも上流域の谷地形の規模が大きく、大局的には縁辺が急崖に取り囲まれて西側に開放・傾斜した半球状・凹状の幅広い斜面地形を有する。対照的に本川との合流点付近の谷地形は湾曲・狭窄した峡谷部と急崖を成している。

### 2. 崩壊地の概要

#### 2.1. 小原谷の崩壊

小原谷流域には、四万十帯日高川層群龍神層の緑色岩を伴う砂岩泥岩互層が分布する。北傾斜のスラストと小断層が発達する典型的な付加体であり、剪断変形が著しい。崩壊源頭部の基岩は黒灰色を呈する新鮮な泥岩から成る。崩壊は流れ盤構造において発生している。崩壊源頭部から斜面脚部の本川河床までの比高は560m、崩土の水平方向の運動距離は最大で1000m、崩土滑落斜面の平均勾配は30°、崩土運動域の幅は最大で60mに達する。崩土は崩壊源頭部付近から脚部本川の河床付近に至るまで広域にわたり堆積し、本川との合流点には扇状地を形成した。崩土の一部は河川に突入するとともに川幅150mの本川を経て河川水と共に対岸斜面に達した。崩土運動域では、偏流痕跡、境界層剥離を示す岩屑しづき<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup>、表土の洗掘または削剥の痕跡、条痕、擦痕、物体の衝突痕跡、斜面に付着または堆積した岩屑、傾動・転倒または切断された木本および草本、樹幹切断部の傾動したささくれ、樹皮の剥落など多様な運動痕跡が認められた。

#### 2.2. 濁谷の崩壊

濁谷の流域には、四万十帯日高川層群美山層の暗緑色泥岩および砂岩泥岩互層が分布する。これらは付加体形成時のスラストの上盤に相当し、剪断変形を受けている。これらの地質体は難透水層を形成している。崩壊源頭部から斜面脚部の本川河床までの比高は550m、崩土滑落斜面の平均勾配は23°である。崩土の水平方向の運動距離は最大で1300mに達する。斜面を滑落した崩土は河川に突入するとともに、河川水を伴い河床幅190mの本川を経て対岸斜面に迫り上げた。この過程で一部は尾根を乗り越えて剥離した。崩土は崩壊源頭部の滑落崖直下の斜面から本川の河床に至るまで広域にわたって堆積し、本川との合流点付近において扇状地を形成した。

崩土運動域と本川河床および河岸には、表土の洗掘または削剥の痕跡、斜面に付着した崩土、流木、倒木および傾動木、樹幹切断、樹幹切断部の傾動したささくれ、樹皮の剥落、人工物の転倒、変形、付着、物体の衝突痕跡など多岐にわたる運動痕跡が認められた。

### 3. 研究方法

小原谷の崩壊に関してはトータルステーションを用いた地形、崩土、および運動痕跡群に関する測量と、崩土および岩盤の地質調査を行った。崩土滑落斜面の偏流痕跡に関しては、兩岸における植生の残存域と同流失域の境界線を計測して、崩土運動の表面位置の変化過程を調べた。偏流を生じた峡谷部の流路中心線、兩岸谷壁と流路下底との境界線、および流路横断面の形態を計測した。崩土迫り上げ斜面の盛土法面に形成された運動痕跡群に関しては次の内容の計測を行った。盛土の洗掘痕跡については、洗掘領域の輪郭を計測した。条痕については線的であるため、この伸長形態そのものを計測した。転倒・傾動した木本および草本については、地面に付着したままの根元を始点、幹または茎の先端あるいは切断点を終点とする一種の有向線分と見なしてこの2点を計測した。以上のようにして計測した運動痕跡群の空間分布を重ね合わせて、分布特性と相互関係を解析した。

濁谷の崩壊に関しては地形測量を行うとともに、レーザー距離計等を用いて崩土と運動痕跡群の空間分布、方向、および形態について計測した。これに加えて崩土および岩盤の地質調査を行った。

### 4. 結果

#### 4.1. 小原谷の崩壊

崩土迫り上げ斜面には、最大直径20mに達する計6個の岩塊が一群のまとまりを成しつつも離散的に堆積した。外形は三角錐状、扇型状、曲率を持つ棒状を呈する。一群の中央に位置する岩塊は丘状の本体部分と、間隙をもってこれを円弧状に取り巻く紐状の部分から成る二重構造を示す。岩塊群は層理面が認められる泥岩や泥岩勝ち砂岩泥岩互層から成り、緻密かつ硬質で風化が進んでいない。岩塊内部に生じた破壊ブロックは回転を示す配列を成す。岩塊は以上に示す流れ山の特性を持つ。波状堆

積物は岩塊と同じ岩質の破碎された岩屑から成る。これらはいずれも盛土法面の上方から下方へ伸長・堆積しており、形態はいずれも曲線的であった。洗掘痕跡の形態には階層性と連続性、および並列性の要素と、発散、回転、収束、反射の構造が存在すること、分布に関しては相異なる2方向性が存在するとともに、両者は同所的に共存することがわかった。波状堆積物および洗掘痕跡は、斜面の一領域を境にして本川横断方向に線対称性を持ち、これより本川上流側では右回転、下流側では左回転を示すとともに、いずれの曲率もそれぞれの方向へ漸次変化して行くことが明らかになった。転倒または傾動した木本および草本の方向には多様性が認められた。これらの示す方向は、その近傍に位置する洗掘痕跡の伸長・回転方向、条痕の伸長方向、岩塊または波状堆積物の伸長・堆積方向のいずれかに調和的であった。

#### 4.2. 濁谷の崩壊

崩土迫り上げ斜面においては、黒灰色の泥岩から成る岩屑が元の河床から18mの高さまで堆積していた痕跡が認められた。表土および植生の被損傷領域は元の河床から最大で60mの高さに及ぶ。岩屑の堆積した位置より斜面上方にかけては、樹木被害に関して、根元付近からの樹幹切断とこれに伴うささくれの傾動、これより高い位置での鋭利な樹幹切断、倒木の順に系統的な遷移過程が認められた。表土の洗掘痕跡は、岩屑の堆積位置より斜面上方へかけて複数にわたり波状に繰り返す形態を成して分布していた。これらの運動痕跡群は崩土滑落斜面の一領域を中心として、本川横断方向に線対称性を示して分布すると共に、発散、回転、反射の要素とパターンを持つことが明らかになった。岩屑は先述した位置よりも斜面上方には存在しない。これに対し、樹木の根元付近または樹幹の切断面に砂礫の堆積が認められた。国道168号線小休場橋の橋脚と欄干に刻まれた衝突痕跡の示す方向はそれぞれ、崩土迫り上げ斜面に近い本川河床と崩土迫り上げ斜面上へ収束することがわかった。

### 5. 考察

#### 5.1. 小原谷の崩壊

偏流痕跡に対し、Knapp<sup>(3)</sup>およびLenau<sup>(4)</sup>の力学モデルと、これらに基づく応用結果<sup>(5)-(9)</sup>を適用すると、崩土の運動速度は9-28 m/sと求められた。Lenauの理論式を直接適用した場合、外岸側における最初の波動の頂点が出現する位置までの距離に関して、理論による計算値は実測値に対し32%の過大な誤差を生じた。これは内岸側から発生した衝撃波の角度が大きかったことと、混相流の持つ物性の多重性に起因するものと考えられる。黒灰色の泥岩から成る岩塊と岩屑を堆積・付着させた運動は岩屑なだれであったと考察される。岩屑なだれの突入に伴い、岩塊・岩屑と河川水を主とする高速の混相流が発生して対岸に迫り上げたものと考えられる。盛土法面に形成された運動痕跡群はいずれも流跡線に相当する要素を示すと考えられるが、一部において流線の接線方向に調和した要素が含まれる。これらが表す発散、回転、収束、反射のパターンは、高速混相流とこれの斜面迫り上げに伴う階層的・組織的渦運動、および斜面衝突に伴う反射波の存在を示すものと考えられる。一部の洗掘痕跡には、壁面に斜め入射するソリトンのマッハ反射に見られる特徴に酷似した形態が認められた。これに対しMilesの理論<sup>(10)-(12)</sup>を適用した結果、入射波・反射波・STEM波の交点の移動速度は27 m/sと求められた。

#### 5.2. 濁谷の崩壊

崩土迫り上げ斜面に認められた運動痕跡は、境界層剥

離を示す岩屑しぶきに類似した現象であり、崩土本体部分の河川衝突に伴う衝撃により発生した土砂・河川水・空気から成るしぶき、すなわち階層性と組織的構造を持つ高速の固気液三相流が斜面に衝突した結果、形成されたものと考えられる。しぶきの運動は崩土本体に比して鉛直距離にして43 m上方まで達していた。崩土迫り上げ斜面の運動痕跡群が示す発散、回転、反射のパターンは、崩土の河川突入から対岸斜面迫り上げの運動に伴った渦輪と、斜面衝突に伴う反射波を反映したものであり、小休場橋に刻まれた衝突痕跡は、崩土本体の河川突入に伴う河床からの衝撃波と、崩土およびしぶきの対岸斜面衝突に伴う反射波を反映したものと考察される。

### 6. まとめ

斜面崩壊に伴う崩土の運動と堆積に関する現象のうち、岩盤崩壊による崩土が斜面脚部の本川に突入することにより河川水と河谷に影響を及ぼした事例を検討した。その結果、崩土の主部が岩屑なだれに発達し、高速の噴流となって河川に突入したこと、この運動により岩塊・岩屑と河川水を主とする高速の固気液混相流が形成されるとともに、これらの運動が、渦輪と衝撃波の性質を持つ非線形波動であったことを明らかにした。本研究の事例における高速の岩屑なだれの発生・発達と河川への突入現象は、物理学的には混相噴流の発生、運動、および衝突とこれに伴う渦運動・波動の発生の一機構として捉えることができる。岩屑なだれは重力流の一種であるが、その発生と、流路の湾曲・狭窄部の通過から河川への突入に至る運動過程においては、混相噴流の性質を伴う場合がある。同時にこれらの現象は地球科学的な観点から、地殻応力に起因した地形構造発達史における一機構として捉えることが重要である。紀伊半島四万十帯は、西南日本外帯に作用する地殻変動の影響を強く受けた地形構造および地層の屈曲構造<sup>(13)</sup>が発達する場であり、これらの一部は活構造<sup>(13)</sup>である。すなわち、岩盤崩壊の発生から崩土の運動および停止に至る一連の侵食・堆積過程は、テクトニクスを反映した裂罅構造・地質構造を持つ地盤と降水、およびこのような特徴を持つ地盤の内部を運動する裂罅水の、三者の相互作用の結果として生起する現象である。

### 引用文献

- (1) 松田, 有山, 地震研究所彙報, 60 (1985), pp. 281-316.
- (2) Nakaya, S., Abstract of IGU Kyoto Regional Conference 2013 (2013), [GS130-2] Disaster Research (2), 2).
- (3) Knapp, R. T., Transactions, ASCE, 116, 2434 (1951), pp. 326-347.
- (4) Lenau, C. W., Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 105, EM1 (1979), pp. 43-54.
- (5) 芦田, 高橋, 新井, 京大防災研年報, 24, B-2 (1981), pp. 251-263.
- (6) 諏訪, 月刊地球, 19, 10 (1997), pp. 612-618.
- (7) 諏訪, 石井, 藤田, 京大防災研一般共同研究 15G-06 報告書 (2005), pp. 29-37.
- (8) 諏訪, 志方, 奥田, 京大防災研年報, 26, B-1 (1983), pp. 413-433.
- (9) 上原, 水山, 砂防学会研究発表会概要集 (1981), pp. 48-49.
- (10) Miles, J. W., J. Fluid Mech., 79, 1 (1977a), pp. 157-169.
- (11) Miles, J. W., J. Fluid Mech., 79, 1 (1977b), pp. 171-179.
- (12) 灘井, 都司, 月刊海洋, 号外, 15, (1998), pp. 129-134.
- (13) 紀州四万十団研, 地団研専報, 59 (2012), 附図.