

1. 研究目的

秋田県八幡平、鹿児島県出水市針原川等での土石流災害を契機に、地すべりや深層崩壊に起因した土石流(以下、複合型土石流という)への効果的な対策手法の開発が急務の課題となっている。複合型土石流の特徴の一つは崩土が河道に流入した後も運動を継続し土石流化することである。崩土の流動化が阻止され、その大部分が斜面と河道との合流部近傍に堆積した場合は崖錐地形や天然ダムが形成されて複合型土石流は発生しない。

複合型土石流の発生条件として崩土の流動化現象が必要不可欠であると考えられ、そのためには崩土の内部構造の全部あるいは一部がその移動過程において破壊される必要がある。複合型土石流の崩壊深は、数 10m と大きく、地山には直径数 m~10m にも及ぶメガブロック(秋田県八幡平での事例では、「凝灰岩や泥岩が風化・温泉変質して生成された粘土とシルト成分の塊」、を意味する)が多く混入され、崩土内のかなりの領域を占有している(マトリックスは風化の程度が著しく強度が低下している)ことが、筆者らによる秋田県八幡平での露頭観察や鹿児島県針原川での連続波地中レーダ探査とボーリングコアの観察によって明らかにされている。そのようなメガブロックを混入した崩土が流動化するためには、メガブロックが移動に伴って破壊されるものと考えられる。その破壊要因には崩土の運動を支配する移動区間の地形要因(勾配や平面地形)と粘土含有率や含水比等の土質要因が大きく関与していると考えられる。後者の要因については情報が極めて少ないため、本論では地形要因について論じるものである。さらに、メガブロックが崩土の流動化の過程においてどのような応力によってどのように破壊され土石流化するのか、また境界層はどの程度まで発達するのか、その発達とメガブロックの破壊との関係は、等、不明の点は多い。これらの事項を物理的に明らかにすることが、複合型土石流の発生メカニズムの解明と効率的な対策手法の開発に不可欠であると考えられる。

本研究では、複合型土石流の発生事例、崩土の流動化がなされていない場合として天然ダムの発生事例を基に、どのような地形要因が崩土の流動化に影響しているのかをまず整理した。次いで、秋田県八幡平で平成9年に発生した複合型土石流の堆積物において複数箇所でのトレンチ掘削を行い、メガブロックの破壊実態や境界層の発達程度等を詳細に観察することによって、崩土の流動化要因について考察した。

2. 崩土の流動化に関与する地形要因

地すべりや深層崩壊による崩土が流動化する事例として全国で発生した複合型土石流を7事例、流動化しなかった事例として天然ダムを形成した6事例を過去の災害報告資料等から抽出した。複合型土石流の抽出基準は、「土石流が単一の深層崩壊あるいは地すべりからは発生したことが空中写真等から明瞭であり、崩壊土砂量が 70万 m^3 (1993年の姫川水系浦川流域での事例)以下」、である。また、天然ダム形成事例の抽出基準は複合型土石流と同様、「崩壊土砂量 70万 m^3 以下であり、崩壊脚部と河道との合流点において崩土が堆積した(崩土が河道をある程度流下し狭窄部等で土砂が閉塞したことによる天然ダムの事例は除外した)」、である。崩土の内部構造の破壊は、崩土と斜面との境界摩擦による供給エネルギーが崩土の変形エネルギーを上回った場合になされると考えると、供給エネルギーは $\cos\theta$ (θ は勾配) に比例する(芦田ら(1983))。例えば、崩土が急勾配の斜面区間を流下する場合や河道との合流点近傍において崩土が大きく減速することなく勾配の急な河道区間に流入する場合は摩擦による供給エネルギーが増大し、その結果、崩土が流動化しやすいと考えられる。従って、崩土の流動化に大きな影響を与える地形要因として、斜面/河道合流点での勾配変化比、崩壊幅と斜面/河道合流部幅の拡幅比、斜面/河道合流点付近の河床勾配、崩土の河道への流入角度、に着目した。複合型土石流発生事例と天然ダム形成事例とが明瞭に領域区分できた地形要因は、勾配変化比、河床勾配、流入角度の項目についてであり、各々、1.4~4(平均値:2.1)、 $6^\circ \sim 25^\circ$ (平均値: 15.1°)、 $10^\circ \sim 60^\circ$ (平均値: 31°)程度、天然ダム形成事例では各々、8~270(平均値:78)、 $0.1^\circ \sim 1.4^\circ$ (平均値: 1.2°)、 $45^\circ \sim 120^\circ$ (平均値: 84°)程度となった。

3. 崩土の流動化のためのメガブロックの破壊

秋田県鹿角市八幡平で平成9年5月1日に発生した土石流の堆積物(土量:約 53万 m^3 (1999年土木研究所調べ))を対象として平成9~10年度に3ヶ所のトレンチ掘削と地すべり発生源での露頭観察を行った。次いで、通常の土石流である事が発生当日に確認された第1波を主体として、流下距離の違いによるメガブロックの破壊状況と破壊形態(せん断破壊、圧縮、引張り)、境界層の発達程度を調べた(図-1)。トレンチ掘削箇所は地すべりブロック末端部から下流約80m(T-3)、下流730m(T-2)、下流約1,030m(T-1)の位置である。また、その堆積物内のメガブロック並びに境界層から不攪乱、攪乱土砂を採取し、それらの土質特性(粒度試験、間隙比、液性・塑性限界、三軸圧縮、一軸圧縮、鋭敏比等)を調べた。その結果、以下の事が分かった。

○下流のトレンチ箇所(T-1,2)ではメガブロックの破壊が比較的顕著である。但し、完全破壊までには至っていない。それに対し、発生源に近いトレンチ箇所(T-3)でのメガブロックはあまり破壊されていない。ちなみに、発生源、T-3,2,1 から採取した不攪乱試料の鋭敏比は各々、6.57,1.88,1.00,1.14、一軸圧縮強度(kgf/cm²)は、各々、

3.60, 1.42, 0.15, 0.83 であり、下流側程、強度が低下している。また、マトリックスの粒度分布を比較すると、流下に伴って細粒分(粘土+シルト)の含有率が大きくなり(36%⇒70%)、中央粒径も小さくなる(0.12mm⇒0.04mm)。メガブロックの破壊に伴って細粒分がマトリックスに供給され、細粒化したものと考えられる。これらのことから、崩土/土石流の流下によりメガブロックの破壊が進むことがうらづけられる。

○メガブロックは個々の粒子の状態にまで破壊されなくても、複合型土石流は流下している。即ち、メガブロックの完全破壊は複合型土石流発生の必要条件ではない。前述の土質試験の結果を基に、メガブロックの破壊によりその構成物質である粘土とシルトが土石流堆積物のマトリックス成分として最大34%供給されたとみなせば、全メガブロックの破壊量は、崩土内に含まれていたマトリックス量の約半分となる。

○下流側のトレンチ箇所(T-1, T-2)では主流域の上部に位置するメガブロックの規模は下部のものよりも大きくせん断破壊は顕著ではない。上部のメガブロックについては、圧縮に起因したと考えられる細かな亀裂がその縁辺部にみられる程度である。一方、下流のトレンチ箇所(T-1, 2)で確認された境界層は、発生源に近いトレンチ箇所(T-3)でのそれよりも厚い。T-1~3で確認された境界層厚(δ)と流下距離(x)との関係は、概ね以下の式で示される。

$$\delta \approx \sqrt{x} \dots (1)$$

即ち、境界層厚は流下距離の平方根に概ね比例して増加しており、境界層発達理論における無限平板上の粘性流れの粘性厚の発達傾向と調和する。

○境界層内にはメガブロック底部がせん断変形により薄く層状にひきのばされと考えられる粘土層が観察される。

○このような事から、メガブロックの主な破壊形態はせん断破壊であり、流下に伴う境界層の発達に応じて破壊が進行していくと考えられる。

○いずれのトレンチ箇所においても、旧河床が著しく洗掘された痕跡はない。崩土の流動化の初期段階で既に平衡土砂濃度に近い状態となっており、その状態が大きく変化することなくで流下・堆積したものと考えられる。ただし、旧河床から鉛直上方向に厚さ0.5~1m程度内の範囲に旧河床礫や木片が取り込まれており旧河床堆積物との交換はなされている。その取り込まれている厚さは下流側の方が厚い。

4. 今後の課題

複合型土石流の運動モデルを作成するためには、メガブロックの存在とその破壊を考慮する必要がある。模型実験を行ってメガブロックの混入程度やメガブロックのせん断変形による体積減少(粒径の細粒化)がその運動に及ぼす影響を明らかにするとともに、非連続体モデルとして例えば個別要素法を用いた数値解析手法の開発に発展させていきたい。

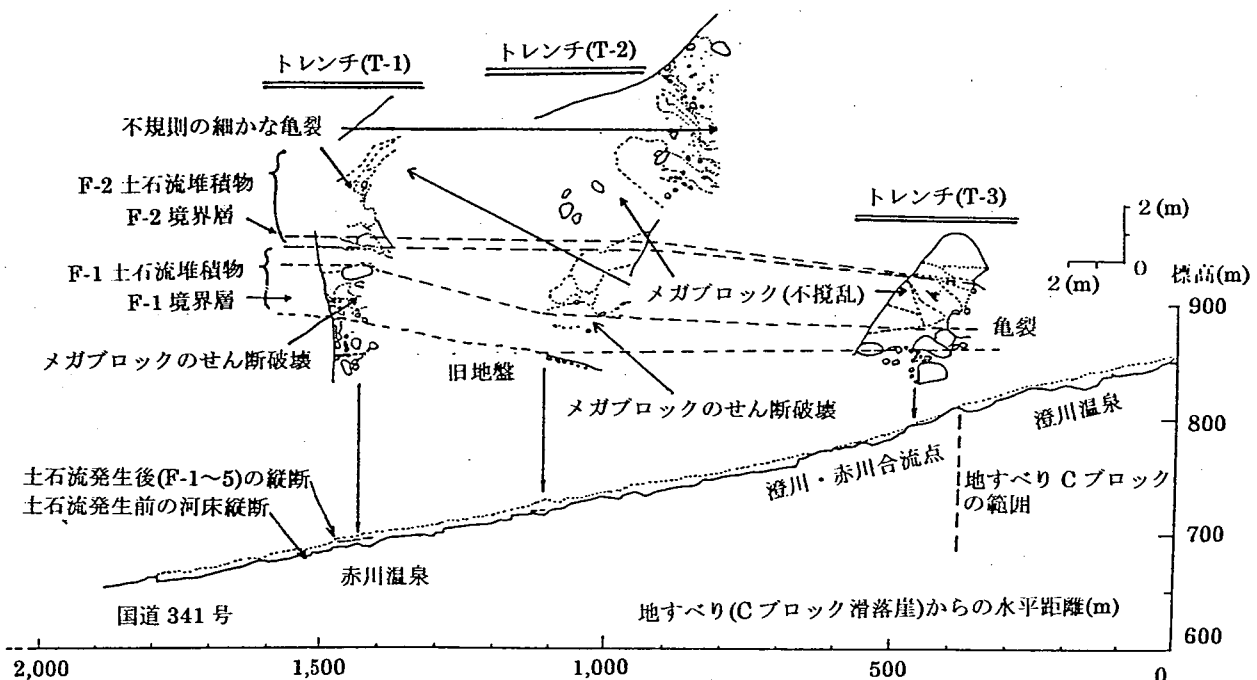


図-1 複合型土石流堆積物におけるメガブロックの破壊、せん断境界層の発達状況

参考文献、芦田、江頭、大槻(1983)：山腹崩壊土の流動機構に関する研究、京大防災研究所年報、第26号B-2。
謝辞：本研究を進めるにあたり、三菱マテリアル資源開発株式会社秋田営業所の石井学氏、八千代エンジニアリング株式会社東京事業部水工部の三浦郁人氏のご協力を頂いた。ここに記して深謝の意を表します。