

人材育成のための特別講義

(一財) 砂防・地すべり技術センター

STC社内の人材育成の一環として、砂防・地すべりに関係する各分野を代表する先生方に特別講義をいただきました(対象:全技術系職員、開催時期7月・9月~11月、全8回)。特別講義の概要をご紹介します。



水山高久京都大学名誉教授の講義

「土砂の生産・流送と砂防」

水山高久
京都大学名誉教授

1. 山地河川の特徴

砂防が対象とする山地河川の特徴として、河床勾配が急であり射流である、河床材料の粒径が大きく粒度分布の範囲が広い、粒径に対して水深が浅いといった点が挙げられる。また、河床変動量が大きく、一出水のうちに数m単位で河床変動が生じる場合がある。

2. 土砂生産について

土砂生産は崩壊に注目しがちになるが、土砂の生産形態は様々であり、土砂流出のプロセスに注意する必要がある。土砂生産があった流域の危険度を議論する際には、今後流出するおそれのある土砂の量と場所、それに対する対策を考慮するべきである。また、土砂生産があった流域の対策と同時に、その周辺流域で次の出水に向けた対策を実施することが望ましい。

3. 流砂計測について

流砂の計測は難しく、流量観測ですら不足している現状がある。河床変動を考える上ではハイドログラフが必要であるため、流量データを蓄積し、流出解析を行うことが重要である。流砂観測については、ウォッ

シュロードは採水により容易に観測でき、掃流砂もハイドロフォン等の観測手法が開発されてきている。しかし、浮遊砂は水深方向に濃度分布があるため、観測できていないという課題がある。また、下流河川の流砂量は、勾配、粒径、流量により決定するのに対し、山地河川は流量と流砂量がそれぞれ独立しているという特徴がある。

4. 河床変動について

河床変動計算はある区間に流入する土砂と流出する土砂の差で発生する。河床変動の要素にはハイドログラフ、セディグラフ、粒径が挙げられ、同じ土砂量でも流出のタイミングによって河床変動の結果が変化する。河床変動の一例として、堰堤で土砂を捕捉すると下流の河床が低下する場合がある。また、出水直後に河床が低下していないということは出水の後半まで土砂の流出が続いたという証拠である。このように現場では河床変動の結果しか見ることができないため、水路実験等により起こりうる現象を知ることによって現場の見方が変わってくる。

「土砂水理学」 「河床変動モデルと土砂動態モデル」

藤田正治
京都大学防災研究所教授

1. はじめに

掃流砂や浮遊砂などは流砂の運動形態による分類であり、各研究者の現象の捉え方の違いにより異なる流砂モデルが提案されている。よって、目的に沿った流砂モデルを適切に選択するためには、各流砂モデルの適用条件や導入過程についてある程度理解しておくことが重要である。

2. 流砂の分類と特徴

土砂移動現象は運搬形態の違いから、砂礫が流体力によって個々に移動する個別運搬と土砂礫が重力の作用によって一体となって移動する集合運搬に分けられる。さらに個別運搬は河床材料由来のBed material load (掃流砂・浮遊砂) とそれ以外を起源とするウォッシュロードに分けることができる。ウォッシュロードの流送量は河床材料に含まれない成分であるため流砂量式では計算できず、河床変動計算では別途与える必要がある。掃流砂量は砂礫に作用する流水の流体力と砂礫の河床などへの衝突によって移動する現象をモデル化して流砂量式を導く。浮遊砂は流水の乱れによって移動する現象であり、一般に拡散理論によって解析されるが、従来のモデルでは底面における境界条件を便宜的に決めているのが現状であるが、統一的でない掃流砂と浮遊砂のモデルにおいては、底面で両者の濃度を容易に接続させるということは避けなければならない。

3. 掃流砂と浮遊砂の支配パラメータ

掃流砂と浮遊砂の運動はいくつかのパラメータによって支配されているが、中でも摩擦速度は馴染みが薄いのではないと思われる。摩擦速度は砂が流れから受ける摩擦を速度の次元で表したもので、河床の底面に作用する掃流力(底面せん断応力)と流体の密度を用いて定義される。底面せん断応力は流速の自乗に比例することからDarcy Weisbach式やManning式などの抵抗則を用いて、摩擦速度を求めることができる。このとき、等流か不等流によってエネルギー勾配 I の取り扱いが変わることに注意が必要である。さらに砂粒に働く力を力学的な釣り合いから、掃流砂の支配パラメータとして無次元掃流力と砂粒レイノルズ数の2つを導くことができる。これにより、等流状態であれば現場や解析等で水深や河床勾配、粒径から容易に河床材料の動き易さを知ることが可能となる。

浮遊砂の支配パラメータは流水の乱れ速度の標準偏差である乱れ強度と沈降速度の比である。粗面において河床底面付近の乱れ強度は摩擦速度とほぼ同じになることが実験から知られており、摩擦速度と沈降速度の比が1になる(つまり摩擦速度と沈降速度が等しい)時が砂の浮遊限界となる。さらに乱れ速度が正規分布に従うとすると、浮遊限界は鉛直方向の乱れ速度が沈降速度を超える確率が16%程度となる状態と言換えることができる。また、水理学的滑面では河床底面の砂の高さでの乱れ強度が摩擦速度より小さいので、摩擦速度が沈降速度を大きく上回らないと浮遊しないということにも注意しなければならない。

「地震地すべり」

～新潟中越地震による地すべり災害の特徴とその後の対応～

丸井英明
新潟大学名誉教授

新潟中越地震の発生以前、地震による災害は平野部における建築物や土木構造物への被害が目立ってきた。中越地震における山腹での斜面災害の多発を契機として、地震による斜面災害が認識され、地すべり及び地すべり対策工に関する解析や検討が始まった。山地における地震災害の事例は数少なかったことから、地震災害に関する調査研究事例は極めて少ない。さらに、自然斜面は地形・土質・地質・水文・植生等の状況が多様であり、災害形態が各災害で異なるため、災害形態の予測は困難であることが想定される。

中山間地域は日本の国土面積の約7割を占めることから、今後も中越地震と同様の災害が発生することが想定される。中越地震による災害対応を通して地震地

すべりに関する知見が集積され、技術の定式化が行われた。それらの知見を活用し、将来起こり得る地震を想定した斜面危険度評価法の検討が進められている。斜面災害発生箇所の崩壊形態や地質の類型化や地震動に対する土塊の強度低下に関する調査、FEM解析が進められ、解析に基づいて推定された地すべり発生場は、実現象の崩壊箇所と概ね整合的であった。

地震地すべりを想定したリスクマップを作成するためには、地震地すべりの場の条件(震度分布・地質帯・地形等)と運動タイプに基づいた危険度評価が必要である。地震ごとに発生状況は異なるため統一的に評価することは難しいが、震源や断層位置と地すべり発生個所の関係や、材料特性と物理的メカニズム等は

説明が可能となってきた。AHP（階層分析法）による危険度評価手法が検討された事例では、崩壊危険箇所と実際の崩壊箇所とで一定の整合が確認された。し

かし、防災対応に役立てるためには現在の精度では十分とは言えず、今後の課題として残されている。

「地すべりにおけるFEM解析」

若井明彦
群馬大学教授

1. 有限要素法（FEM）とは

有限要素法（Finite Element Method）は、現場の多様な情報を複雑に組み合わせて現象を予測する手法である。数学的には偏微分方程式の近似解法に位置付けられ、解析対象を有限要素メッシュと呼ばれる網の目状の要素メッシュに分割し、力学的法則など個別要素の影響範囲を全体の連立方程式として解く（離散化して解く）手法である。設計のように与えられた情報の中で最大限確からしい解を求めるため計算とは異なり、複雑な条件をある程度合理的に考慮して全体の解を導くことができること、地盤の変形や地下水浸透といった物理法則に支配されている場の支配方程式であれば有限要素法で解けることが最大のメリットである。

要素メッシュに与えられる個別要素に与えられる物理法則は、力の釣り合い式、ひずみの適合条件式、応力-ひずみ関係で表現される構成則の3つの法則に単純化される。力の釣り合い式とひずみの適合条件式は、固体力学では物質の材料によらず自動的に成立する法則であるが、応力-ひずみ関係は試験等を基にした経験式で、材料に応じて様々な経験式を適用する。地すべりで用いられている弾塑性FEMでは、物質が弾性から塑性へと切り替わる一連の現象を数式として表現する弾塑性構成モデルが経験式として用いられる。弾塑性構成モデルで使用する際のパラメータは、各種の土質試験や地盤調査の結果に基づいて粘着力や内部摩擦角などの定数を設定することになる。

弾塑性FEMの考え方として、実際の斜面では、載荷とともに塑性化が進行して崩壊が生じるため、斜面が一様の応力状態とはならず、部分的に破壊が進行しているような状態となる。そのため、弾塑性FEMによる計算手順として、①：各要素の応力を順番に算出し、②：弾性・塑性化の判定を行った後、③：塑性化した場合は応力の余剰分（残余力）を他の要素へ再配分し、④：①～③の再計算を繰り返しながら収束させる計算が行われている。

2. 広域地震応答解析の実施事例

広域地震応答解析の実施事例として、2004年に発生した中越地震を対象に、公開されている旧山古志村の地形・地質図や過去の地質調査結果を基に構築したモデルに対して、中越地震の地震波を適用した有限要素法により解析を行った結果、実際の斜面崩壊発生箇所

と解析結果が整合するか検証したものである。この事例では、切り立った尾根部等で最大水平加速度が大きくなる傾向や、谷筋から斜面下部にかけて最大せん断応力が大きくなる傾向が確認され、これらの特徴が実際の斜面崩壊箇所でもみられる結果が得られた。

3. UWモデルについて

有限要素法による計算を実施する際に使用する力学法則の内、応力-ひずみ関係で表現される構成則は、材料に応じて様々な経験式を適用する。UWモデルは、地震応答解析において応力-ひずみ関係をうまく表現するため、土を繰り返し載荷した時の動的応答特性に着目した構成則を提案したモデルである。

土の繰り返し載荷挙動の際に生じる応力-ひずみ関係は、粘弾性モデルとして弾性変形と粘性減衰の組み合わせで表現したモデルが古くからいくつも提案されている。その内、通称R-Oモデルとして提唱されているモデルに対して、実現象として土のひずみレベルが上がった時にみられるせん断応力の考え方を新たに加えて作成したものである。

UWモデルの特長として、適切な動的変形特性を表現することができ、かつ、せん断強度が指定できるため、地震時の地盤の増幅・減衰特性を再現しつつ、地盤の塑性変形や破壊を再現することが可能となる部分にメリットがある。

4. みかけの安全率の変化と地すべり変動速度を再現した事例

従来の地すべりの安全率は、1.0を上回ると静止し、1.0を切ると活動・崩壊すると定義されているが、実際は、安全率の上昇とともに変動速度が低下するものの、安全率1.0を上回っても変動が0にならない事例がいくつも存在することが経験的に知られている。

そのため、局所安全率によって各要素のひずみ速度の上限値が変わるような構成則をこれまでのFEMモデルに対して新たに組み込むことで、地下水変動により生じるみかけの安全率の変化で生じる地すべり土塊の変動速度を再現しようとした。実際に、群馬県で発生した地すべりを対象としてFEM解析を行ったところ、地下水上昇に伴う安全率の変化と地すべり変動状況が再現される結果となった。

「火山噴火災害に学ぶ」

池谷浩

(一財) 砂防・地すべり技術センター
研究顧問

火山災害はほかの災害と異なり、起こっている災害の最中に立ち向かい、対応しなければならない。今回は雲仙岳噴火の対応経験より、計画と対策の視点から、どのような心構えで火山災害に対応すべきか話していきたい。

まず、計画についてだが、平成の雲仙岳噴火の際、過去の履歴から溶岩流の発生を予測していた。しかしながら実際は大規模な火砕流が発生し、普段土石流が発生していない溪流で雨のたびに土石流が発生した。このように計画においては、想定と違う現象が発生した時にどのように対応するが問題となる。その答えとしては、発生した現象のメカニズムを理解すること、特性を把握することが必要であり、当初の予測とは異なる新たな視点で考えることが重要である。

次に対策についてだが、火山噴火の対策にはハード対策とソフト対策の二つがある。ハード対策においては、当時一番の問題は用地の調整であった。どのような現象が発生した際にどこに何を配置するか、何を事

前に準備しておくべきかを予め考えておく必要がある。また実施した対策効果は地域住民にわかる形で示さないといけない。ソフト対策においては、発生現象を正確に予測したハザードマップがあっても活かされず、甚大な被害が発生したネバド・デル・ルイス火山の事例もあることから、マップの作成だけで終わらせず、地域住民に適切に活用されるかどうかまで考える事が重要である。さらに雲仙岳噴火においては、地域住民が戻ってきて地域の安全や生活基盤の安定といった復旧が進んだ一方で、雲仙岳周辺の主産業の観光に関しては、噴火後に宿泊客が激減し、災害発生から20年以上経っても回復していない。よって、生計基盤の安定である復興はまだまだであり、周辺地域と連携して、独自性の模索や行政からの発信を進める等、引き続き課題解決を支援することが望まれる。

このように火山砂防は地域の安全と安心を確保するだけにとどまることなく、地域の活性化まで繋がるものであることを念頭に仕事をしていただきたい。

「安定と部材破壊について」 「設計の本質」

香月智

(一財) 砂防・地すべり技術センター
研究顧問 (防衛大学校名誉教授)

砂防堰堤のミドルサード条件について考える。砂防堰堤は接地面に対して分布荷重を与えているが、これらを代表して1つの集中荷重を与えていると仮定する。砂防堰堤に対して側方から荷重が加わっていないとき、集中荷重の作用点は砂防堰堤の重心線の延長線上に位置する。砂防堰堤の側方、例えば上流から土石流の荷重が加わったとき、これは砂防堰堤を傾けようとする荷重なので集中荷重の作用点は下流側にずれる。さらに荷重が加わると砂防堰堤の上流側の底面が浮き始める、つまり砂防堰堤が転倒する直前の限界状態を迎えるが、この限界状態の時、集中荷重の作用点は重心線と地面との交点と砂防堰堤下流端の距離の1/3の点に位置する。このことから、砂防堰堤が転倒するか確認するための条件をミドルサード条件という。

鋼製部材などは引っ張りではなく曲げて破壊することが多い。不静定構造物であれば一部の部材が破壊されても構造物としての機能を保つことがあるが、不静

定構造物を製造するには鋼材等の部材を精密に加工できる、高い技術が必要である。なお、このように一部の部材が破壊されても構造の機能には影響を及ぼさないような余裕のことをリダンタンシー(冗長性)という。

鋼製透過型砂防堰堤に対する設計荷重は堆砂圧や流体圧などがある。堆砂圧を求める際の土圧係数は主働土圧係数、静止土圧係数、受働土圧係数の3種類があるが、設計では慣習上、主働土圧係数を使用する。流体圧は大同の式で計算することができる。

許容応力度設計とは、構造物に荷重が作用しても、建設時と同じ状態に対応できるように設計することという。設計荷重のモデル化においては仮定や切り捨て判断等を行っているため、これらを担保するために安全係数がある。許容応力度設計を行う際、弾性限界応力度を安全係数1.7で除してモデル化過程で簡略化した条件に対して担保している。