

数値シミュレーションによる 砂防施設の土石流調節効果の検証

ESTIMATION OF DEBRIS FLOW CONTROL WITH SABO FACILITIES BASED ON NUMERICAL SIMULATION

本田尚正¹・奥村武信²

Naomasa HONDA, Takenobu OKUMURA

¹正会員 博(工) 鳥取大学講師 農学部生物資源環境学科 (〒680-8553 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101)

²正会員 農博 鳥取大学教授 農学部生物資源環境学科 (〒680-8553 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101)

Prediction of debris flow characteristics and estimation of debris flow control with sabo facilities such as check dams and channel works in a mountain torrent are discussed, based on the results of field survey and numerical analysis. In the Ohzedani River, a tributary of the Sendai River, a very active sediment runoff took place in September 1961 due to the second Muroto typhoon. A one-dimensional numerical simulation is conducted in order to investigate the variation of debris flow characteristics along the river reach with sabo facilities. The analytical results show that debris flow discharge increases several orders of magnitude compared to water, and that the sediment transport rate varies with bed slope and river width. Check dams are effective for the reduction of sediment transport when the initial bed slope of deposition area at the upstream of the dam is not steeper than that of equilibrium slope of debris flow. Flow path is fixed with channel works and it makes a great contribution for the protection against debris flow flooding. The computational condition of erosion depth on the bed has much effects on these numerical results.

Keywords : debris flow, sabo facilities, one-dimensional numerical simulation, debris flow control

1. 緒 言

近年, 土石流の数値シミュレーション技術は飛躍的に向上し, 数多くの研究成果が報告されている^{1)~3)}. それは土石流に関する構成則や抵抗則といった理論的研究の進展⁴⁾⁵⁾とともに, コンピュータの演算速度や計算容量の格段の進歩によるところが大きい. その結果, かつて大型計算機で長時間を要した数値計算が, 今やパソコンで計算が可能となり, 計算条件を種々変化させた比較計算も, 時間や労力をかけずに手軽に行えるようになった.

一方, 土石流数値シミュレーションでは, 渓床堆積物の条件や水の供給条件といった計算条件の同定を慎重に行う必要がある. なぜなら, それらの条件設定は解析結果に大きく影響するにも関わらず, その多くは流域内の降雨記録, 土石流の流下痕跡, 氾濫域での堆積物調査結果, 類似の災害事例等をもとに, 計算者自身が経験的に, しかし, 客観的に類推しなければならないからである.

このように, 土石流の数値シミュレーションは, 計算行為自体は計算機パワーの飛躍的な向上によって実務レベルに到達したといえる一方, 計算に必要な種々の条件設定に関しては, 標準化を進めるためにより多くの計算事例が必要であるといえる. さらに, それらを単なる土砂流出現象の再現計算にとどめることなく, 数値計算結果を援用することにより, 砂防施設の土石流調節効果の検証やそれに基づく新たな砂防計画の提案へと発展させていくためにも^{6)~8)}, 今後より多くの計算事例を蓄積していくことには大いに意義があると考えられる.

そこで本研究では, 鳥取県東部において過去に土石流が発生した実渓流を対象に土石流の流動シミュレーションを行い, 発生土石流の規模の推定, 災害前に整備されていた砂防施設の土石流調節効果の検証, 災害後に新たに整備された砂防施設の土石流調節能力の推定を行う. その際, 種々の計算条件の設定は, 当時の災害記録のほか, 若干の現地調査結果や土質試験結果に基づいて行う.

2. 土石流の一次元支配方程式

山地河道における土石流の流動過程を江頭・芦田らによる土石流の一次元支配方程式⁹⁾¹⁰⁾によって追跡する場合, 解析に必要な諸式は次のとおりである.

(水と砂礫の混合物の質量保存則)

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Buh}{\partial x} = \frac{E}{c_s} \quad (1)$$

(砂礫のみの質量保存則)

$$\frac{\partial ech}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial ecBvh}{\partial x} = E \quad (2)$$

(運動量保存則)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = g \sin \theta - \frac{1}{\rho_m h} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{vE}{c_s h} - \frac{\tau_b}{\rho_m h} \quad (3)$$

(河床位方程式)

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = -\frac{E}{c \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

(侵食速度式)

$$\frac{E}{v} = c_* \tan(\theta - \theta_e) \quad (5)$$

ここに、 t は時間、 x は最上流端を原点とする流れに沿った座標、 B は流動幅、 h は流動深、 v は断面平均流速、 E は侵食速度 ($E < 0$ の場合には堆積速度) を示す。なお、計算上、侵食幅 (堆積幅) は流動幅 B と等しい。 c は土砂体積濃度 (断面平均濃度)、 ε は形状係数¹¹⁾で、 $c_t = \varepsilon c$ (c_t : 輸送濃度) である。 c_* は1砂礫の静止堆積濃度、 g は重力加速度、 θ は河床勾配、 ρ_m は水と砂礫の混合物の密度、 τ_b は河床せん断力、 Z_b は河床高、 θ_e は砂礫濃度 c に対する平衡勾配である。

式(1)~(5)が閉じるためには τ_b を与える必要があるが、ここでは江頭・宮本・伊藤の土石流の構成則⁴⁾によった。

3. 実溪流の概要および計算条件

1) 実溪流の概要および第二室戸台風における被災状況

大瀬谷川は、鳥取県下の三大水系の一つ、一級河川千代川水系の八東川支川落折川の右支溪で、鳥取県東部の若桜町内に位置している。同溪流は、流域面積約3.2km²、流路延長約4.1km (砂防指定地内では約2.5km)、平均河床勾配10.8°の土石流危険溪流である (図-1~図-3)。

昭和36年 (1961年) 9月14日~16日にかけて日本列島を縦断した台風18号 (第二室戸台風) は、鳥取県全域に大きな被害を及ぼし、死者3名、被災世帯2,746世帯、被災人員13,005人を数えたほか¹²⁾、堤防流出 (175ヶ所) や山崩れ (84ヶ所) など数多く発生した¹³⁾。

とくに県東部の八東川流域では、若桜観測所で観測所開設以来最大の1時間あたり58.0mmの雨量 (14~16日の総雨量は295mm) を記録し、若桜町内で家屋流出や床上浸水、田畑の流出埋没や冠水等の甚大な被害が発生した。そのため、同町は9月17日、県内では鳥取市について2番目に災害救助法の適用を受けた¹⁴⁾。

この台風で、大瀬谷川でも土石流が発生し、流出土砂は最下流の落折川合流点にまで到達した。しかし当時、同溪流にはすでに小船堰堤 (堰堤高5.5m、幅53.0m) とその下流に流路工 (平均護岸高3.0m、平均幅6.0m、総延長308m) が整備されていた (図-2)。そのため、「鳥取県の砂防」¹⁵⁾の言を借りれば、「上流に砂防堰堤、下流は流路工のため、第二室戸台風の被害を免れ」、谷出口付近の小船集落では土石流による氾濫被害は生じなかった。

その後、同溪流には治山ダム (堰堤高5.2m、幅25.0m) と砂防ダム (堰堤高8.8m、幅42.0m) が1基ずつ整備され、砂防ダム下流にはさらに流路工も整備されて現在に至っている (図-2、ただし、治山ダムは現在では満砂状態である。)。平成12年度に鳥取県が実施した土石流危険溪流に関する調査結果¹⁶⁾によれば、同溪流は「砂防ダムは空容量に余裕があるが、流域面積が広大で計画流出土砂量を補っていない。崩壊箇所等は見当たらないが、今後も監視が必要である。」とされている。

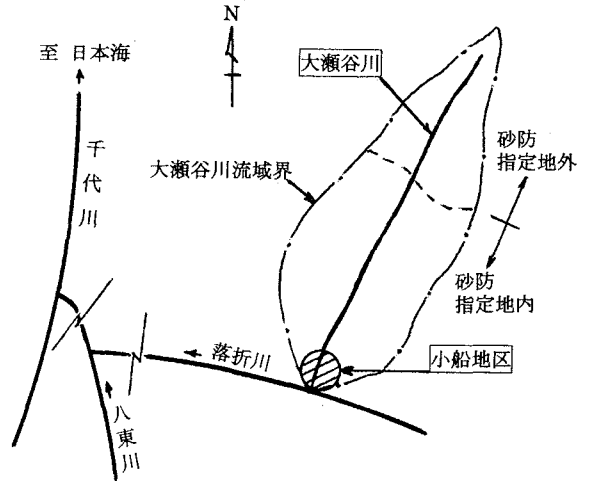


図-1 大瀬谷川 流域図

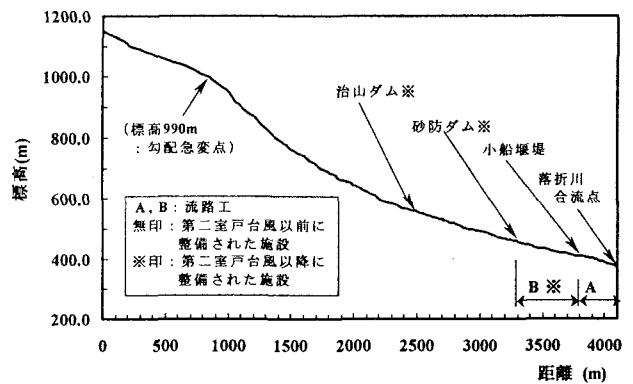


図-2 大瀬谷川 河床縦断形状

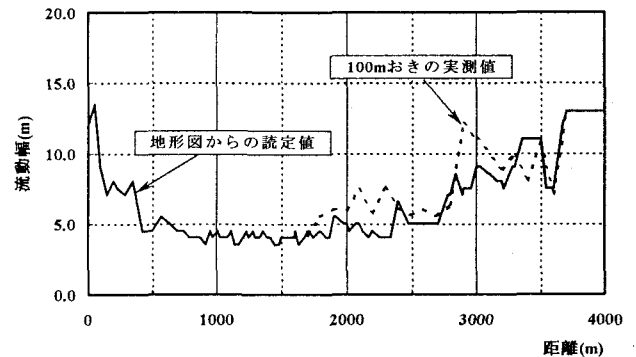


図-3 大瀬谷川 河幅の縦断分布

2) 検討ケース

ここでは、次の3ケースについて、土石流の流動シミュレーションを実施する。

- Case1: 第二室戸台風来襲時における土石流の再現計算
- Case2: 台風当時の砂防施設による土石流調節効果の検証
- Case3: 現在の砂防施設による土石流調節能力の推定

3) 計算条件

(1) 地形条件 (初期河床縦断形状および流動幅)

まず、初期河床縦断形状は、若狭町発行の1/25,000地形図から谷筋の標高を読み取って、図-2のように求めた。

次に、流動幅は、流動深を1.0mと仮定した場合に地形図から読み取れる谷幅と、平成12年度に鳥取県が実施した土石流危険渓流に関する調査において渓流の縦断方向に100m間隔で測定された河幅とを図-3のように比較した。そして、両者到大差がないことから、数値計算に必要な流動幅としては地形図から読み取った値を用いた。

(2) 計算開始地点および元河床の侵食条件

土石流がどの地点で発生したか、あるいは、上流域における崩壊の状況等に関する記録は見当たらない。また、斜面崩壊や土石流の材料となる風化層の厚さや河床材料の厚さを設定するためには詳細な調査が必要であるが、現状では十分なデータはない。しかし、一般に土石流が流下した谷の源頭部には必ず崩壊がみられることや、既往最大の時間雨量を記録したことなどから考えて、河床堆積物は飽和状態に近い状態にあったと推察される。

そこで、ここでは上流域で河床勾配が急変する標高990mを計算開始地点 $x=0\text{m}$ (計算対象区間長: 3,200m) とし、元河床の侵食条件としては、非粘性材料の飽和時の安定限界勾配に着目して、河床勾配が 22° よりも緩い所には堆積物が存在するものとした。そして、この堆積厚 (=限界侵食深) を0.5m~3.0mの範囲で0.5mずつ変化させて数値計算を行い、流下土石流の規模を調べた。

(3) 水の供給条件

計算開始地点において渓流に流入する水の条件に関する直接的なデータは得られていない。そこで、供給流量 Q_{in} を次式の合理式によって大まかに見積もってみた。

$$Q_{in} = \frac{1}{3.6} f r A \quad (6)$$

ここに、 f は降雨流出係数、 r は降雨強度(mm/hr)、 A は流域面積(km²)である。今、計算開始地点において $f=0.6$ 、 $r=58.0\text{mm/hr}$ 、 $A=0.05\text{km}^2$ とすると、 $Q_{in}=0.5\text{m}^3/\text{sec}$ である。

さらに、土砂流出が短時間に終わることを念頭に置けば、水の供給は定常的であっても大差ないと考えられる。そこで、ここでは $Q_{in}=0.5\text{m}^3/\text{sec}$ を計算開始地点において定常的に供給し、その時の土砂濃度は流れの抵抗評価の煩雑さを避けるため、便宜上 $c_{in}=5\%$ とした。また、水深は Q_{in} に対応する等流水深を式(3) (左辺第1項および第2項、右辺第2項および第3項を0とする) によって与えた。

次に、流量の供給時間をいかに設定するかは、土石流の減速特性を議論するためには非常に重要であるが、ここではとくに発生土石流のピーク規模に着目することから、流量の供給時間は600sec (10分間) とした。

(4) 砂防施設 (砂防ダムおよび流路工) の条件

まず、砂防ダム地点では、河床高がダム高を越えるまでは、土石流を構成する砂礫はダム下流への流出流量の土砂濃度 $c_{in}=5\%$ を除いてすべて堆積されるものとし、水は堆積土砂の間隙に取り込まれる分を除いてそのままダム下流に流出する。この時、ダム地点の全流量および土砂濃度を Q および c とすると、ダム下流への流出流量 Q' および流砂量を Q'_s は、それぞれ次式で与えられる。

$$Q' = \left(1 - \frac{c-c'}{c_*} \right) Q \quad (7)$$

$$Q'_s = c_m Q' \quad (8)$$

ここに、

$$c' = \frac{c_* - c}{c_* - c_{in}} c_{in} \quad (9)$$

一方、砂防ダムへの土砂堆積が進み、ダム地点での河床高がダム高と一致した後は、河床高をダム高に等しく置き、全流量 Q はダム下流にすべて流出する。なお、砂防ダム直下流地点における水深はダム通過流量 (Q' または Q) に対応する等流水深を式(3)によって与えた。

次に、流路工区間はコンクリートと粗石で底張りされているため、限界侵食深を0mとし、土砂堆積の発生は許すが河床侵食は起こらないものとした。また、流路工の平均護岸高が3.0mであることから、ここでは、流路工区間において計算水深が3.0mを超えたかどうかをもって、土石流が谷出口より下流で氾濫したかどうかを判定した。

(5) 数値計算に必要なその他の条件

数値計算に必要な物理定数を表-1に示す。同表において、砂礫の密度 σ 、内部摩擦角 ϕ および河床堆積物の代表粒径 d は、現状の河床材料に対して室内土質実験を行って求めた。河床堆積物の粒度分布の一例を図-4に示す。泥水の密度 ρ は、泥水中の微細砂濃度を10%と仮定し、 $\sigma=2.70\text{g/cm}^3$ 、清水の密度 1.00g/cm^3 として算出した。

支配方程式の差分化は、leap-frog法によって行った。計算時の差分の条件は、 $\Delta t=0.025\text{sec}$ 、 $\Delta x=5.0\text{m}$ である。

表-1 数値計算に必要な物理定数

泥水の密度	$\rho=1.17\text{g/cm}^3$
砂礫の密度	$\sigma=2.70\text{g/cm}^3$
砂礫の内部摩擦角	$\phi=39.0^\circ$
堆積物の代表粒径	$d=5.0\text{cm}$
堆積物の静止堆積濃度	$c_*=0.50$

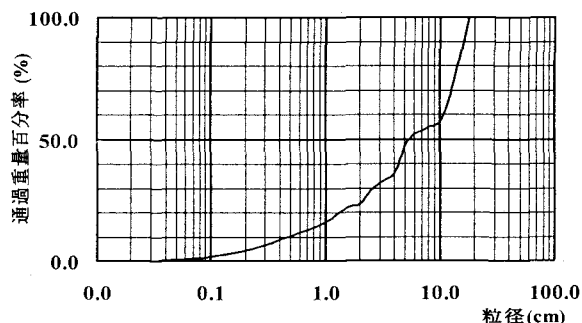
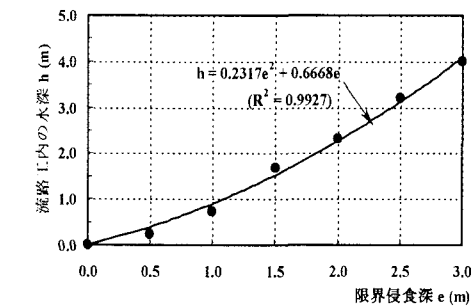


図-4 河床堆積物の粒度分布の一例 (標高560m付近)

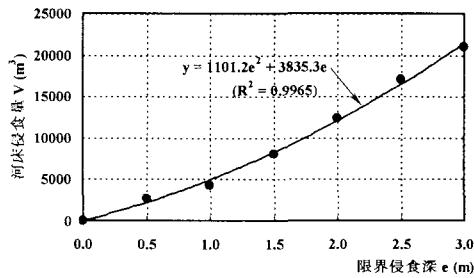
4. 計算結果および考察

1) Case1: 第二室戸台風来襲時における土石流の再現計算

図-5(a) および (b) は、河床堆積物の限界侵食深を0.5m~3.0mの範囲で0.5mずつ変化させ、小船堰堤とその下流の流路工が整備されている場合の土石流の数値計算を行い、限界侵食深と流路工区間内の $x=3,100\text{m}$ 地点 (後出の図-7(a) 参照) における最大計算水深および計算対象区間全体での河床侵食量との関係を示したものである。



(a) 限界侵食深と流路工内の水深との関係



(b) 限界侵食深と河床侵食量との関係

図-5 限界侵食深と流路工の水深および河床侵食量との関係 (Case1)

同図によれば、限界侵食深が2.5mの時、流路工の最大水深は3.0mを超えており、その時の計算区間全体での河床侵食量は約17,000m³である。前述のとおり、土石流発生源の状況は不明であるが、本計算結果から、溪流全体では土石流による河床侵食（崩壊を含む）によってこの程度の規模の土砂流出があったものと推定される。

図-6は、限界侵食深を2.5mとした場合の通水開始600sec後の河床縦断変化を示している。同図および計算結果によれば、土石流は最上流端（ $x=0$ m）から小船堰堤上流（ $x=2,800$ m付近）まで、 $x=800$ m付近の土砂堆積を除いて河床を侵食し、その後、小船堰堤の堆砂域に堆積した。通水開始600sec後の小船堰堤（堰堤高5.5m）地

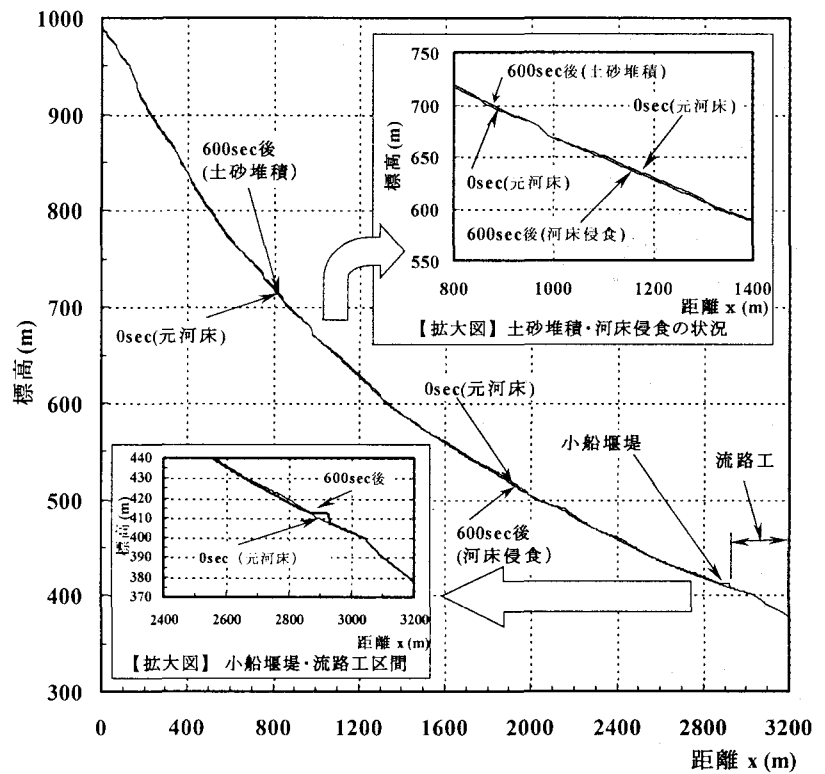
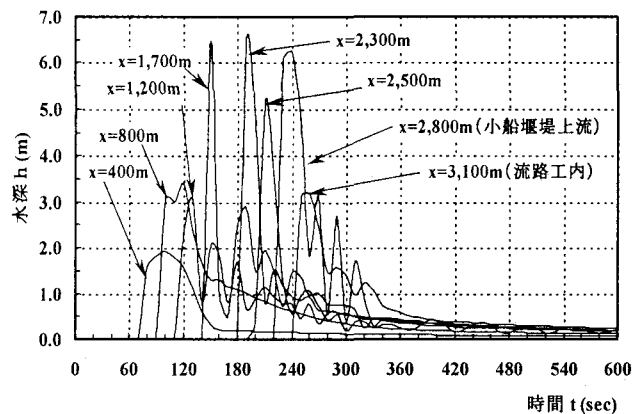
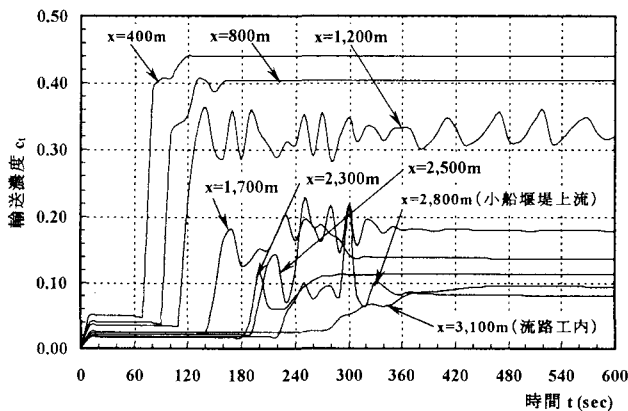


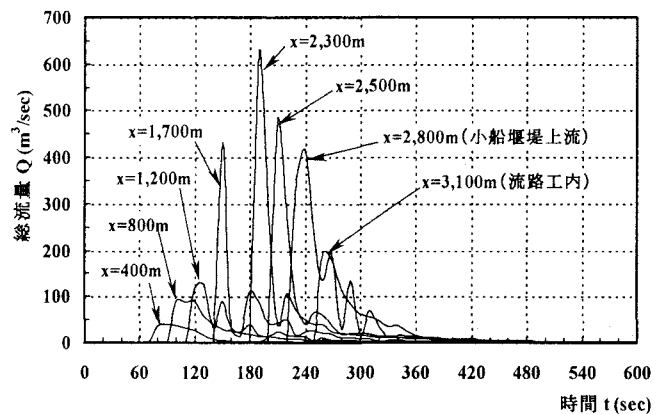
図-6 河床縦断形状の変化 (Case1:限界侵食深2.5m)



(a) 水深の時間変化



(b) 輸送濃度の時間変化



(c) 総流量（水＋土砂）の時間変化

図-7 土石流特性値の時間変化 (Case1: 限界侵食深2.5m)

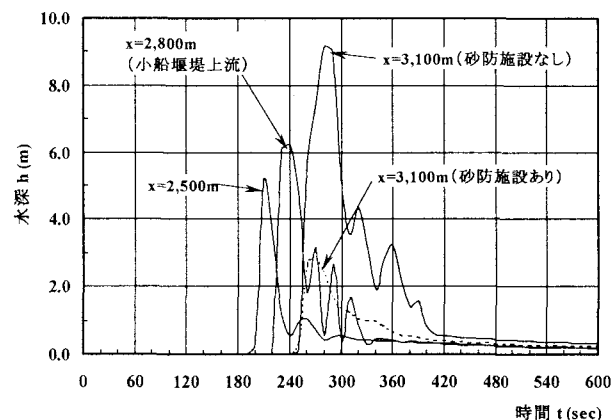
点の堆砂厚は5.0m（堆砂量約4,700m³）であり、堆砂域には満砂に近い状態まで流出土砂が堆積している。

図-7(a)～(c)は、限界侵食深を2.5mとした場合の各地点における水深 h および総流量 Q （水＋土砂）の時間変化を示している。(a)および(c)から、土石流は河床を侵食しながら流下して規模を増し、 $x=2,300\text{m}\sim 2,500\text{m}$ 付近で水深および総流量が最大となっていることがわかる。

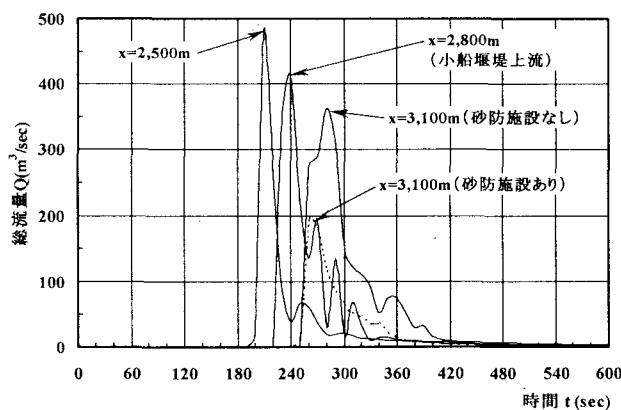
また、(b)から、土石流は $x=400\text{m}\sim 800\text{m}$ といった上流域では40～45%の高濃度の流れであるが、下流に流下し、河床勾配が緩やかになるにつれて輸送濃度は小さくなり、 $x=2,300\text{m}$ よりも下流では20%以下のいわゆる土砂流へと流れの形態が変化していることがわかる。

その後、土石流は広い堆砂幅をもつ小船堰堤の堆砂域に堆積して減勢された。(c)で小船堰堤の上下流地点である $x=2,800\text{m}$ および $x=3,100\text{m}$ に着目すると、総流量が大きく減衰されていることがわかる。

小船堰堤および流路工による土石流調節効果は(a)および(b)からもみてとれる。とくに流路工区間では、小船堰堤での土砂捕捉後に流出した濃度の薄い流れが流路工の幅に対応した流速で落折川合流点（ $x=3,200\text{m}$ ）へと流下している。流路工は流路を固定してこの流れを安定的に流下させたと推察される。ちなみに、 $x=3,100\text{m}$ 地点における通水開始600sec経過後の全通過流量および全流砂量は、それぞれ、10,000m³および950m³であった。



(a) 水深の時間変化



(b) 総流量（水＋土砂）の時間変化

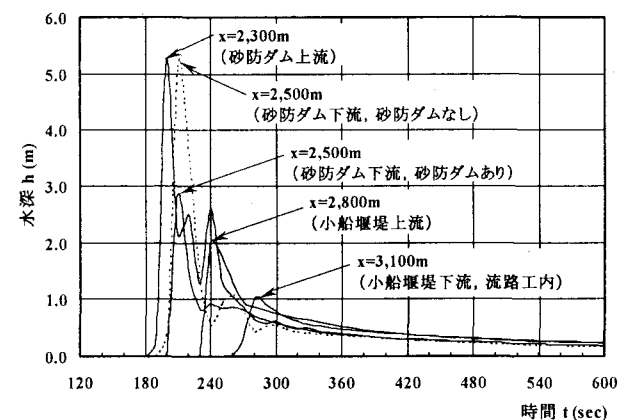
図-8 土石流特性値の時間変化（Case2）

2) Case2：台風当時の砂防施設による土石流調節効果の検証

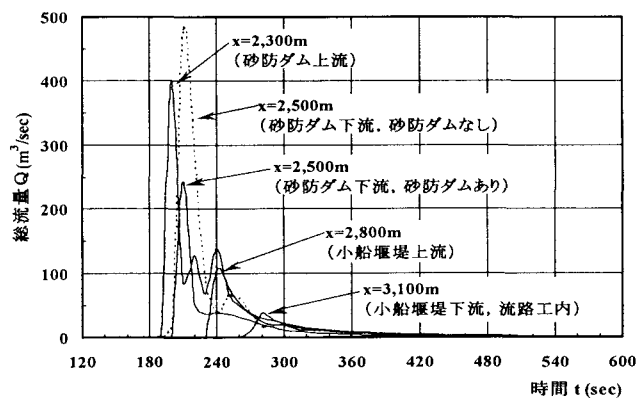
図-8(a)および(b)は、Case1（限界侵食深2.5m）と同じ計算条件下で、砂防施設（小船堰堤および流路工）が整備されていない場合を想定して土石流の数値計算を行い、各地点における h および Q の時間変化を示したものである。なお、図中の点線は前出の図-7の計算結果であり、 $x=3,100\text{m}$ 地点（小船堰堤の下流かつ流路工内）の実線と点線による土石流特性値を比較することにより、砂防施設の土石流調節効果が検証できる。

砂防施設がない場合、(a)によれば $x=3,100\text{m}$ 地点において土石流の水深は9.2mに達するが、これは計算では $x=3,100\text{m}$ 地点付近の流動幅を流路工と同じ6.0mとしていることによる。そのため、流路工がない場合、土石流は水深が護岸高（3.0m程度）を超えると実際には下流部で氾濫することになる。また、(b)によれば、土石流は砂防施設がある場合と比べて大きな流量を保ったまま下流に流下することがわかる。ちなみに、 $x=3,100\text{m}$ 地点における通水開始600sec経過後の全通過流量（水＋土砂）および全流砂量は、それぞれ、22,000m³および2,000m³である。

以上の結果より、砂防施設は今回の土石流の発生に対してその土砂調節機能を有効に発揮し、下流における土石流の氾濫を防いだといえる。



(a) 水深の時間変化



(b) 総流量（水＋土砂）の時間変化

図-9 土石流特性値の時間変化（Case3）

3) Case3：現在の砂防施設による土石流調節能力の推定

図-9(a)および(b)は、Case1（限界侵食深2.5m）の計算条件に加えて、治山ダム、砂防ダム、およびその下流に流路工が整備された現在の大瀬谷川に対して土石流の数値計算を行い、各地点における h および Q の時間変化を示したものである。ただし、当計算では、治山ダム（現状では満砂状態）および小船堰堤（現状では有効堰堤高3.3m）の計算条件は現状とした。また、図中の点線は、前出の図-7の計算結果である。

砂防ダムは $x=2,400\text{m}$ 付近に位置しており、同図において、 $x=2,300\text{m}$ 地点および $x=2,500\text{m}$ 地点の土石流特性値を比較することにより、砂防ダムの土石流調節効果が確認できる。同図より、水深や総流量といった土石流特性値は、いずれも流出土砂の砂防ダムへの堆砂によって大きく減衰されていることがわかる。

また、ここでは図示を省略したが、計算結果によれば、満砂状態の治山ダムにも、堆砂域内で平衡勾配に相当する堆砂勾配まで土砂堆積が生じている。そして、それらの施設群の土石流調節効果は下流にも波及しており、(a)によれば、流下土石流は $x=3,100\text{m}$ 地点の流路工内で水深1.0m程度にまで減勢されている。ちなみに、 $x=3,100\text{m}$ 地点における通水開始600sec経過後の全通過流量および全流砂量は、それぞれ、 $2,500\text{m}^3$ および 220m^3 である。

以上の結果より、現在の砂防施設群によって、大瀬谷川の土石流に対する安全度は第二室戸台風来襲時に比べて著しく向上していることがわかる。

5. 結 語

本研究では、過去に土石流が発生した実渓流を対象として、数値計算条件の同定を慎重に行いながら土石流の流動シミュレーションを実施し、発生土石流の規模の推定ならびに砂防施設の土石流調節効果の検証を試みた。

その結果、得られた知見をまとめると次のようである。

- 1) 土石流の再現シミュレーションを行うためには、各種の計算条件を決定する必要があるが、それらの同定の根拠となる直接的な情報は、現地の降雨記録や土石流の流下痕跡、氾濫域での堆積物調査結果等、必ずしも豊富でない場合が多い。ここでは、今から40年以上前に第二室戸台風に起因して発生した大瀬谷川土石流を事例として、現存する僅少な災害記録と若干の現地調査結果をもとに数値シミュレーションに必要な計算条件を同定するための一手順を示した。
- 2) 土石流の再現計算では、土石流発生源の状況が不明であるため、土砂供給源を河床侵食のみとして数値解析を行い、最下流部の流路工内の水深を一つの判定材料として土石流の規模を推定した。その結果、渓流全体で約 $17,000\text{m}^3$ での土砂流出があったものと推定された。また、その計算過程において、河床堆積物の分布状況（本研究では、具体的には限界侵食深をいかに設定するか）が、再現土石流の規模に大きく影響することが示された。
- 3) 当シミュレーションの活用方法として、砂防施設の設置条件を種々変えることにより、それらの施設群によ

る土石流調節効果を数値的に表現できることを示した。さらに当手法により、新たな砂防施設の設置や、砂防ダム堆砂域での除石といった既存施設の機能回復等を計画する上で参考となる計算情報を手に入れることができる。

今後は、当シミュレーション結果の妥当性をさらに詳しく検証していく必要がある。その一つの方法として、下流域で土石流の氾濫が生じた実流域を対象に、当手法で得られる谷出口の土砂流出ハイドログラフを用いて二次元氾濫解析を行い、その結果と現地における氾濫痕跡との比較をもって、当手法の妥当性を確認することが考えられる。また、スリットダム等の透過型砂防施設をモデル化して当手法に組み込むことも今後の課題である。

謝辞：立命館大学理工学部 江頭進治教授には、土石流の数値シミュレーションに関して日頃より貴重なご助言を賜っている。また、本研究の遂行にあたり、鳥取県八頭地方県土整備局には、同局管内の災害関連資料や土石流危険渓流に関する貴重な調査資料を快くご提供いただいた。ここに記して、心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘：土石流シミュレーションモデルの比較研究，水工学論文集，第44巻，pp.687-692, 2000.
- 2) 原田英治・後藤仁志・酒井哲郎・大野正博：三次元数値移動床による土石流堆積過程の数値シミュレーション，水工学論文集，第47巻，pp.553-558, 2003.
- 3) 宮本邦明・井戸俊介：土石流の1次元キネマティックウェーブモデル，平成16年度砂防学会研究発表会概要集，pp.38-39, 2004.
- 4) たとえば、江頭進治・宮本邦明・伊藤隆郭：掃流砂量の力学的解釈，水工学論文集，第41巻，pp.789-795, 1997.
- 5) 伊藤隆郭・江頭進治：土石流に関する構成則の比較研究，水工学論文集，第42巻，pp.913-918, 1998.
- 6) 水山高久：わかりやすい砂防技術(5)「砂防計画」，砂防と治水，Vol. 36. No.4, pp.75-76, 2003.
- 7) 水山高久：わかりやすい砂防技術(6)「砂防堰堤」，砂防と治水，Vol. 36. No.5, pp.93-94, 2003.
- 8) 本田尚正・奥村武信：除石による砂防ダムの機能回復に関する一考察，平成16年度砂防学会研究発表会概要集，pp.176-177, 2004.
- 9) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(1)，新砂防，Vol. 46. No.1, pp.45-49, 1993.
- 10) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(2)，新砂防，Vol. 46. No.2, pp.51-56, 1993.
- 11) 江頭進治・本田尚正・高濱淳一郎・伊藤隆郭・有村真一：土石流の再現および構造物等による土石流調節について，平成11年度科学研究補助金（特別研究促進費(1)，研究代表者 福岡捷二，研究課題番号11800010）研究成果報告書，pp.83-102, 2000.
- 12) 鳥取県土木部：鳥取県のダムと砂防，pp.50, 1997.
- 13) 日本気象協会：鳥取県防災気象要覧，pp.66, 1967.
- 14) 鳥取県若桜町：若桜町誌，pp.34-36, 1982.
- 15) 鳥取県土木部砂防課：鳥取県の砂防，災害写真，1963.
- 16) 鳥取県八頭地方県土整備局：土石流危険渓流に関する調査資料を種々ご提供いただいた。

(2004. 9. 30 受付)