

3. 現象のモデル化と再現方法

3.1 水の流れのモデル化

土砂移動現象には各溪流ごとの降水パターンが大きく影響を持つ。そこで、砂防基本計画の検討で最も重要な土砂移動の再現に当たっては、近年設置された雨量観測所の降水データを用いて流域の地形特性を的確に反映しうる貯留関数法を用いて水の流れのモデル化を行なう。貯留関数法の定数の一次設定を行うに当たっては、融雪期(5~7月)と非融雪期で流出率の違いを検討した上で、kinematic-wave法により流域及び河道定数を設定し、鶴来地点における実績流量から最終的にパラメーターの較正(キャリブレーション)とモデルの検証を行った。較正に当たっては、牛首川流域、尾添川流域を含め、手取川ダム、大日川ダムの調節を考慮すると共に、洪水ピークの立ち上がり前と後、及びピーク後で流出率を変化させた。

3.2 河床変動のモデル化

急勾配の上流区間での土砂礫の流出・流送形態は、河床勾配 3° 程度以下で掃流・浮遊状態での各個運搬、 $4^\circ \sim 10^\circ$ 程度で掃流状集合流動、 10° 程度以上で土石流による集合運搬となる。このうち、掃流砂量式としては芦田・道上式や芦田・高橋・水山式(ATM式)、Meyer-Peter-Müller式(以下、MPM式)等が、掃流状集合流動の流砂量式としては水山式や高橋式等が提案されている。本計画では、手取

川流域の特性に合致した河床変動のモデル化を行うため、次のような方針で流砂量式の選定を行う。

- 既往出水時の河床変動の再現計算結果とその時の土砂移動・流動実績(河床変動測量資料、手取川ダム堆砂量資料、生産土砂・流出土砂量調査)とを比較して次元河床変動計算モデルの再現性の高いものを選定する。
- 選定した流砂量式と実績との較正(キャリブレーション)は水密度 ρ を 1.0g/cm^3 として行う。
- 流砂量式は河道内の全区間で原則として同じ式を用い、区間別の流砂量の違いは適用する掃流力を有効掃流力とするか全掃流力とするかによって表現する。緩勾配区間であるLower regime(河床勾配 $1/200$ 程度以下が目安)では有効掃流力を、急勾配区間であるUpper regimeでは全掃流力を用いる。(図-3.2.1)
- 掃流形態と掃流状集合流動の判別は、高橋の掃流状集合流動の領域式を基に、過去の土砂動態調査結果を参考に設定する。
- 牛首川及び尾添川で実施されてきている流砂量観測資料については、アーマコートの破壊の影響や資料不足の問題があるため、観測資料から流砂量式のパラメータを決定することはせず、河床変動計算モデルの妥当性を検証するために用いる。

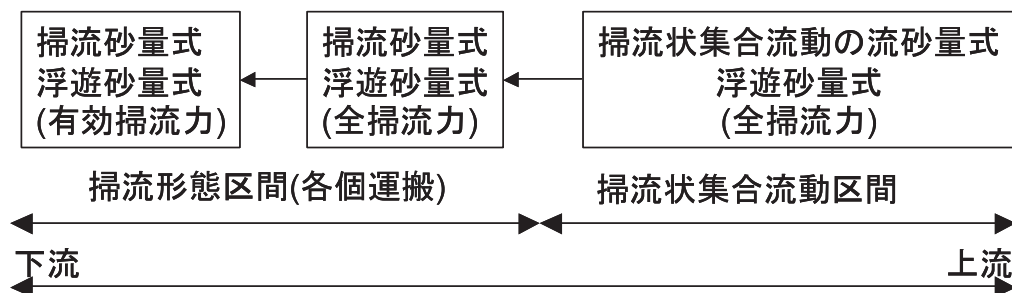


図 3.2.1 区間別の流砂量式適用の考え方

表-3.2.1 再現計算ケース

CASE	浮遊砂式	掃流砂式	掃流状集合流動式	
				領域式
1	芦田・道上式	芦田・道上式	高橋式	高橋式
2	芦田・道上式	MPM式	高橋式	高橋式
3	芦田・道上式	芦田・高橋・水山式	高橋式	高橋式

表-3.2.2 各CASEの河床変動量総量

CASE (掃流砂量式)	堆積土砂量(×10 ³ m ³)				
	牛首川区間	実績値との差	手取川ダム貯水池区間	実績値との差	合計
case1(芦田・道上)	123	-52	212	52	335
case2(MPM)	101	-74	234	74	335
case3(芦田・高橋・水山)	102	-73	233	73	335
実績	175	※	160	-	335

浮遊砂量式は全CASEとも芦田・道上式。掃流状集合流動式は全CASEとも高橋式
 ※砂利採取料(61,000m³)含む

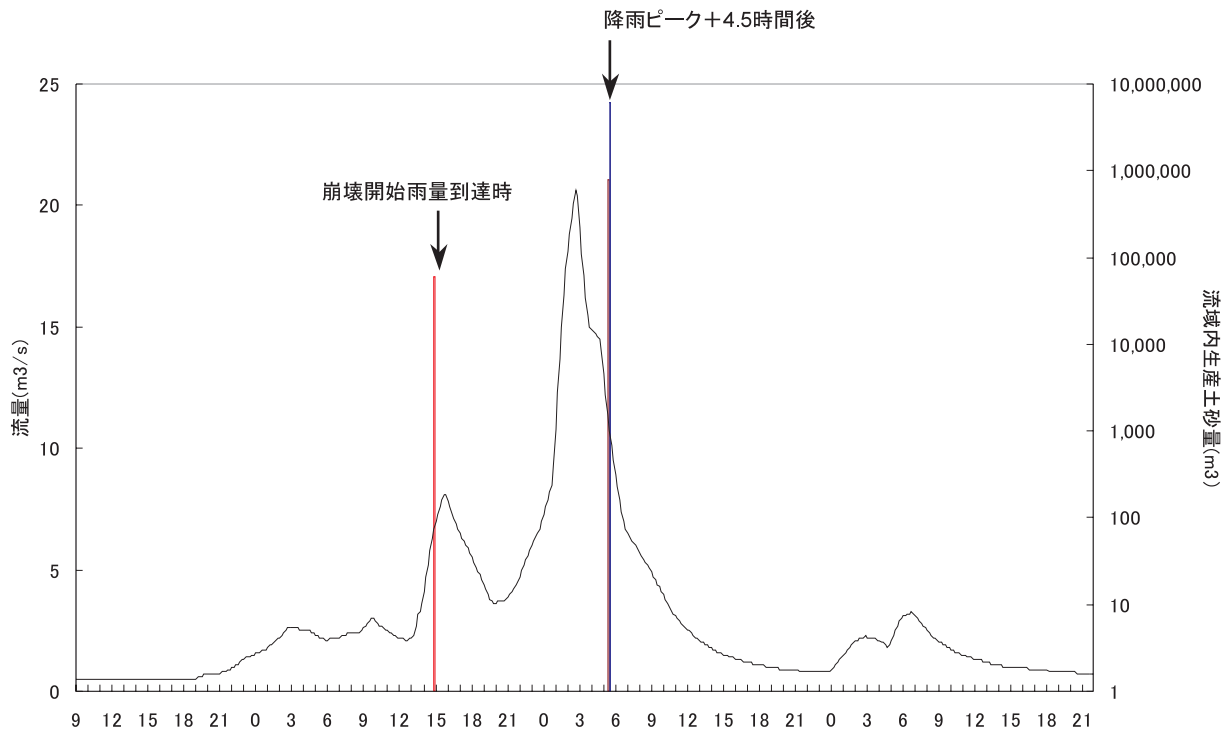
次に、実績洪水の再現計算によって流砂量式の選定を行う。再現計算ケースは表-3.2.1の通りである。手取川ダム竣工後の牛首川流域で土砂移動調査データ、生産土砂量・流入土砂量調査、流出土砂量調査の全項目が整っているのは2.1でも見た②昭和60(1985)年7月11日出水である。そこで、同事例を用いて再現計算を行ったところ、河床変動量の総計は表-3.2.2の通りとなった。以上から、本砂防基本計画では掃流砂量式として水密度 ρ を1.0g/cm³とした芦田・道上式を、掃流状集合流動式及びその領域式として高橋式を用いる。

3.3 給砂のタイミング

豪雨時の土砂崩壊・生産のタイミングを崩壊種別に基づいて考えると、地形地質、降水特性に大きく依存するが、一山降水の中で見た場合には、既往崩壊地は降水が一定量を超えた段階で崩壊し、新規・拡大崩壊地は降水ピーク時に崩壊し、地すべり性のは降水ピーク後一定の時間が経過した後に崩壊すると考えうる。この分類に沿って2.2で設定した計画土砂量を分類し、河床変動計算において給砂を行うタイ

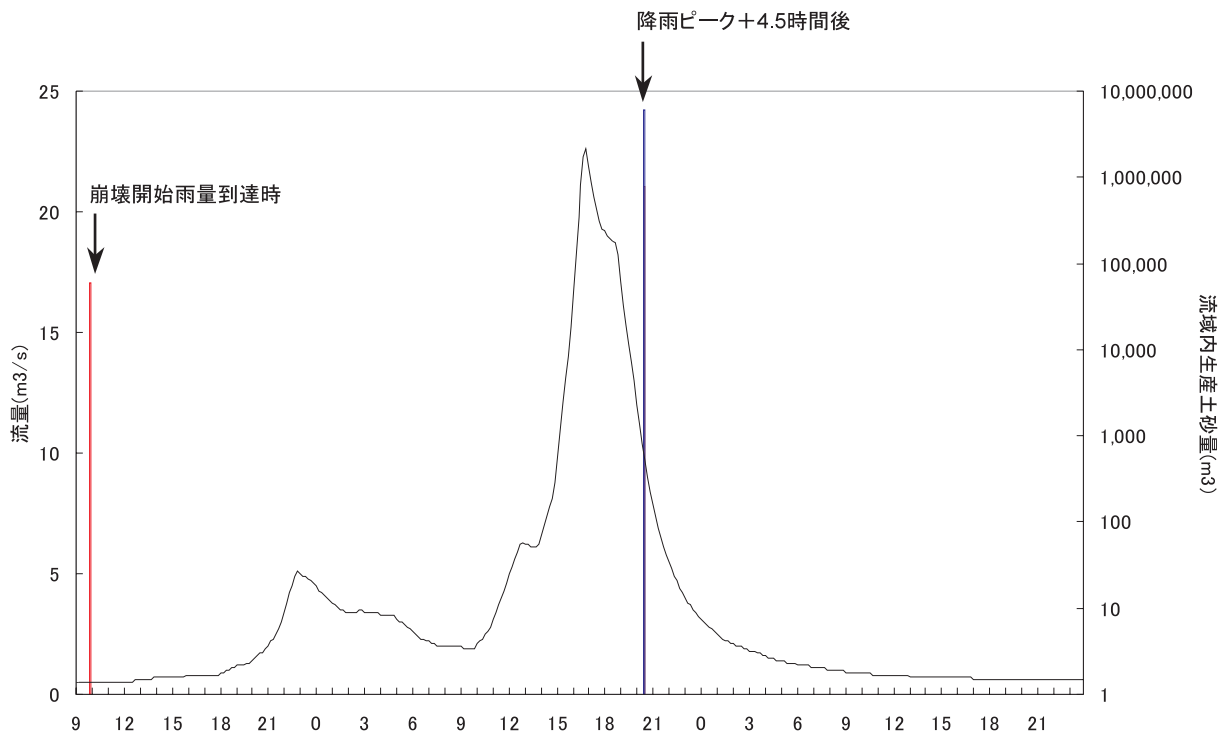
ミングを、降水との対応から、大きく①降水が一定量(以下、「崩壊開始雨量」という)を超えた時に崩壊する土砂量(表層崩壊、基盤・岩盤崩壊、ガリー、雪崩影響、河床部の内、現在の崩壊地の分)、②降水がピークに達したときに崩壊する土砂量(表層崩壊、基盤・岩盤崩壊の内、侵食前線により新規・拡大生産が見込まれる分)、③降水ピーク後一定の時間が経過した後に崩壊する土砂量(地すべり及びクリープ斜面末端、大規模崩壊)の3グループに分ける。手取川流域における崩壊開始降水量は過去の実績から流域の代表地質別(流紋岩、砂岩礫岩、片麻岩)にそれぞれ180、190、200mmと設定される。また、昭和9(1934)年7月11日の事例から、降水ピークから地すべり性崩壊発生までの遅れ時間は4.5時間と設定される。

参考までに別当谷における計画降水・融雪時の流量図(ハイドログラフ)中の給砂タイミングを示すと、2.1の①昭和56(1981)年7月3日出水と③平成10(1998)年9月22日出水のケースのそれぞれについて、図-3.3.1と図-3.3.2のようになる。



ただし、別当谷においては天然ダムによる河道閉塞を考慮するため、降雨ピーク時に給砂せず、降雨ピーク+4.5時間後に新規・拡大生産土砂量及びクリープ末端、大規模崩壊生産土砂量を給砂している

図 3.3.1 別当谷地点での計画降水・融雪時の給砂のタイミングと生産土砂量 (S56)



ただし、別当谷においては天然ダムによる河道閉塞を考慮するため、降雨ピーク時に給砂せず、降雨ピーク+4.5時間後に新規・拡大生産土砂量及びクリープ末端、大規模崩壊生産土砂量を給砂している

図 3.3.2 別当谷地点での計画降水・融雪時の給砂のタイミングと生産土砂量 (H10)

3.4 非平衡給砂の方法

掃流砂量式は、元来連続で比較的緩勾配の区間での調査結果に基づいて検討されているため、上流や支川といった急勾配区間との接続部分で給砂量が掃流砂量式で運搬可能な土砂量を超過してしまい、そのまま適用しても実現象の再現が的確でない面がある。一方、手取川上流域では大規模な土砂流出時に発生した天然ダムによる河道閉塞の影響で流量及び流砂量が不連続に大きく変化した実績が知られている(例えば大正 15(1926)年尾添川支川蛇谷、昭和 9(1934)年牛首川支川湯ノ谷合流地点等)。この不連続性を扱うために本計画では過去の天然ダムの統計的な特性に基づき、大規模な土砂流出がある場合に天然ダムが形成・決壊して流量が変動するメカニズムを組み込む。形成・決壊を想定する地点は、計画対象とした降水・融雪発生時に 100 万 m³ 以上の大規模な土砂流出が想定される溪流と牛首川、尾添川との合流地点とした。この方式によって、まず一洪水中に形成される天然ダムの規模とその決壊可能性の有無を把握した上で、天然ダム貯水池への流入量と決壊時のピーク流量との関係を検討する。大規模な土砂流出から堰止め土量、堰止め高さを算出するに当たっては、過去の天然ダムの統計資料の内、信頼度が高く「A」とされている事例に基づいて作成された関係式を用い(中部地方建設局、1987)、ピーク流量(m³/sec)の算定に当たっては、合理的なパラメーターが選定されている方式で、安全側となる上限線を用いている(田畑他、2001)。計算に用いた式は次の通りである。

移動土塊量(v)と堰止め土量(V)の関係
 $V = 0.8002v^{0.8452} \quad (R^2=0.7676)$

堰止め土量(V)と堰止め高さ(h)の関係
 $h = 10.676V^{0.2735} \quad (R^2=0.5069)$

ここで、v、V はいずれも万 m³ 単位である。単位幅当りの流量と流入量の関係

$$\frac{q}{q_{in}} = 1.0832 * \left[\frac{\sqrt{gh^3}}{\tan \theta * q_{in}} \right]^{0.565}$$

ここで、q:天然ダム決壊時の単位幅当りの流量(m²/sec)、q_{in}:流入量(m²/sec)、g:重力加速度(m/s²)、h:天然ダム高さ(m)、θ:河床勾配である。

3.5 砂防施設が土砂移動・流動に与える効果の表現手法

砂防施設、特に砂防堰堤の効果としては、一見してすぐに理解できる①貯砂の他に、②溪流の勾配を緩和することによる掃流力の低減、③貯砂・堆砂による溪床の保護固定・縦侵食の防止、④水通し部によって横方向の乱流の減勢することによる溪岸侵食の防止、等が代表的なものとして挙げられている。これらの効果が全て発揮されるかどうかは溪流や周囲の地形という場の要因も大きく効くことから、一概には明らかではない。

本検討では、現況の施設の効果及び想定される新規の施設の効果を表現するために、次の3つの方法を用いる。

- 河床変動計算において、砂防施設の水通し部の高さによって土砂流動及び水流の高さ・勾配を規制。
- 山腹工や水路工によって溪床が安定している区間では山腹・溪岸からの土砂生産が計画規模の現象では発生しないと設定。
- 河床変動計算対象区間より上流に設置された砂防堰堤・治山堰堤について計画扞止土砂量と調節土砂量(貯砂量 1/10)の合計値を溪床生産土砂量から控除。ただし、控除する土砂量については溪床生産土砂量を上限と設定。