

1. はじめに

格子型砂防ダムによる土石流の調節過程においては、土石流に含まれる大粒径粒子によるダム透過部の閉塞現象が最も重要な役割を果たしている。ダムの透過部が下から上へと閉塞してゆく状況は、あたかも不透過性ダムの天端が時間とともに上昇していくかのようなものである。本研究では高橋ら¹⁾の数値モデルから得られる格子間の閉塞確率を基にダム地点河床位の上昇速度を求め、これを1次元河床変動モデルに組み込むことを試みる。さらに、横方向の桁の影響を考慮することにより、一般的な形状の格子型ダムによる土石流の調節過程を再現しうる数値モデルを提案する。

2. 閉塞モデル

高橋ら¹⁾は格子型ダムの柱の間が閉塞する主たる原因は、図-1に示すように複数の粒子によってアーチが形成されることであると考え、数値シミュレーションモデルを構築し、水路実験結果との比較を通じてモデルの妥当性を検証している。高橋らの実験によれば、上流からダム地点に到着し柱に衝突した粒子は、柱を中心とした回転運動をし、ある限界の角度となった時点で柱から離脱して下流へ向かう。回転中の粒子に対して新たに到着した粒子が衝突することにより粒子群となり、この粒子群がアーチを形成することにより透過部の閉塞が生じる。粒子が柱を中心として回転している間は、後続の粒子にとって通過可能な間隔が小さくなっているため、これを柱の直径が大きくなったものと考え、この見かけ上の直径の時間的な変化は図-2のように表される。両柱の半径の和が柱の間隔を上回ったとき、格子間隙の閉塞が生じると考えられる。

流入する土砂の濃度 C と速度 v が一定であったとしても、ダム地点にやってくる粒子の到着位置や到着時刻はランダムであるため、格子間が閉塞するかどうかは確率事象となる。乱数を用いて粒子の発生位置と発生タイミングを変化させながら格子の閉塞に関する試行計算を行うと、時間 T_L の間に閉塞が生じる確率 F が求められる。 T_L が長くなれば F は大きくなり、この F の値を基に粒子の平均到着時間間隔 $t_m (= \pi d^2 / 6lCv, d$: 粒子径, l : 柱の中心間距離) に対応する瞬間閉塞確率 p が推算される。 p は粒子の濃度や粒径、柱の間隔や柱の直径に応じて変化すると考えられる。図-3に確率 p に関する計算結果の一例を示す。

3. 閉塞確率とダム地点の河床上昇速度

閉塞確率 p を基にダム地点の平均河床上昇速度を算定する方法について考察する。上流から到達するすべての粒子は同一平面上を流下して、その一部がダム地点でアーチを形成するものとし、土石流の流動深は d に等しいものとする。いま、アーチを形成した k 個の粒子が縦断方向距離 d の範囲に堆積するものとする、この領域の河床上昇量 Δz は河床堆積物の容積濃度 C を用いて、

$$\Delta z = V_T / (l d C) \quad (1)$$

となり、閉塞するのに必要な時間所要時間の平均値 Δt_c は、

$$\Delta t_c = \{(1/p) - (1/2)\} t_m \quad (2)$$

と表されることから、閉塞に伴う単位時間あたりの局所的河床上昇量、すなわち河床上昇速度 i_d は、

$$i_d = \Delta z / \Delta t_c = k f(p) \frac{C}{C} v \quad (3) \quad f(p) = \frac{2p}{2-p} \quad (4)$$

となる。 $k f(p) = a_1$ とすると、 a_1 の値は粒子濃度や開口部幅といったパラメータを用いて近似的に表すことが可能である。

式(3)によって表される河床上昇速度 i_d は、粒子が鉛直方向に1層で流入してくることを想定して得られたものであることから、流動深が h の場合には同様の現象が鉛直方向に h/d 層にわたって生じるものとする、新たな河床上昇速度 i_d' は次のように表される。

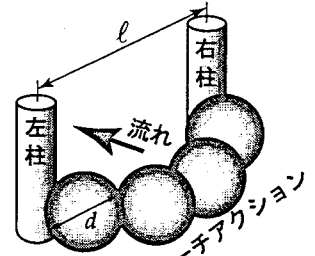


図-1 アーチの形成による柱間の閉塞

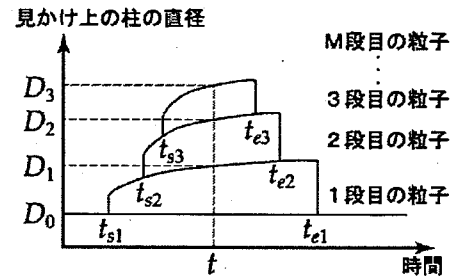


図-2 柱径の時間的变化

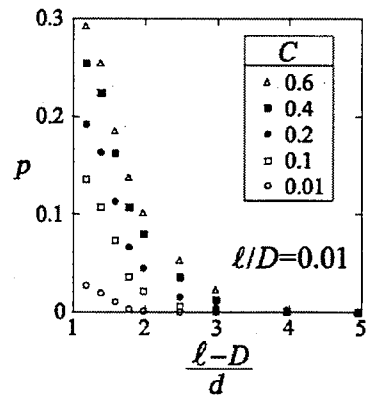


図-3 閉塞確率の計算結果

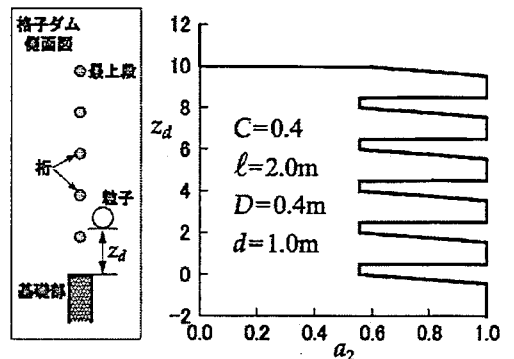


図-4 係数 a_2 の鉛直分布

$$i_d' = \frac{h}{d} i_d = a_1 \frac{C}{C_s} \frac{h}{d} v \quad (5)$$

また、横方向の桁の下面と河床との間隔が粒子径より小さくなる時、河床から桁の上面までの部分が堆積するものとする、以下のように柱と桁の両方を考慮した河床上昇速度が求められる。

$$i_{dr} = \frac{h}{d} i_d + \frac{z_{H_{j+1}} - z_d}{d} \frac{C}{C_s} v = a_2 \frac{C}{C_s} \frac{h}{d} v \quad (6)$$

図-4に係数 a_2 とダム直上部河床位との関係を示す。

4. ダム地点河床上昇速度の1次元河床変動モデルへの組み込み

格子間の閉塞に寄与するような大きいサイズの粒子と、それよりも小さい粒子という2種類の材料で構成される石礫型土石流を対象として1次元河床変動モデルを作成し、これに式(6)を組み込んだ。式(6)はダム直上流部の局所的な河床の上昇速度を表す式であるので、通常の河床堆積速度 i_b に $i_{dr} d / \Delta x$ を付加している。なお、砂防ダムより上流のエリアにおいては、当該地点の河床位が砂防ダムの天端高より低いとき、上流から流入するすべての土砂が瞬時にその地点に堆積するものと考えている。

5. 計算結果と考察

上述のモデルを用いて、格子型ダムが設置された場における土石流の流動・堆積に関する数値解析を行った。流路長300m、川幅10m、河床勾配1/4の河道の下流から100mの地点に高さ10mの格子型ダムを設置し、上流端から水と土砂を供給する。格子型ダムの柱と桁の直径はともに0.5mとし、桁の間隔は2m、大粒径粒子の直径は1m、小粒径粒子の直径は0.1mである。図-5に示すように計算開始後600秒まで供給流量は一定とし、この間の大粒子の供給濃度は0%、小粒子の濃度は15%としている。その後、大・小粒子の供給濃度をともに15%として、三角形上の洪水波形を与えている。

図-5に開口部の幅を1.5mとした場合の流出ハイドログラフを示している。不透過型ダムでは洪水到達以前にダムポケットの堆砂が進み、ほとんど流出のピークがカットされていないのに対し、格子型ダムでは30%程度ピーク流量・流砂量がカットされていることがわかる。洪水流量を変化させた場合の総流砂量ピーク値の変化が図-6に示されている。これを見ると、格子型ダムの方がより規模の大きい土砂流出にも効果を発揮できることがわかる。

図-7には同一の流入条件の下で格子間隔を変化させた場合のピーク流量・流砂量の変化が示されている。これを見ると、開口部の幅が粒径の2.5倍程度までは流砂量のピークを低下させられることがわかる。

6. おわりに

土石流に含まれる大粒径の粒子によって格子型ダムの開口部が閉塞する現象を考慮した1次元河床変動モデルを構築し、格子間隔や洪水規模の違いが砂防ダムの土砂調節効果に及ぼす影響について調べてみた。今後、水路実験等との比較を通じ、モデルの妥当性を検証してゆく予定である。

参考文献

1)高橋保・中川一・里深好文・王浩民：格子型砂防ダムの閉塞モデル，水工学論文集，第45巻，2001，pp.697-702.

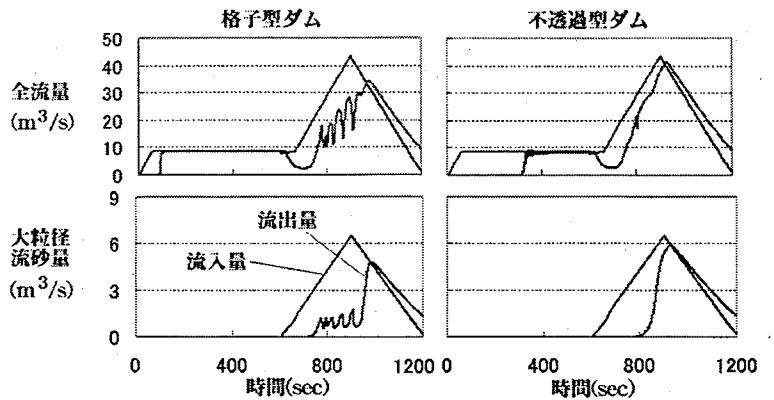


図-5 流量と流砂量の時間的変動に関する計算結果

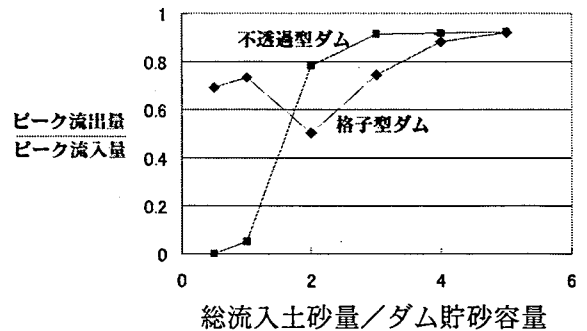


図-6 洪水規模と総流砂量ピーク値との関係

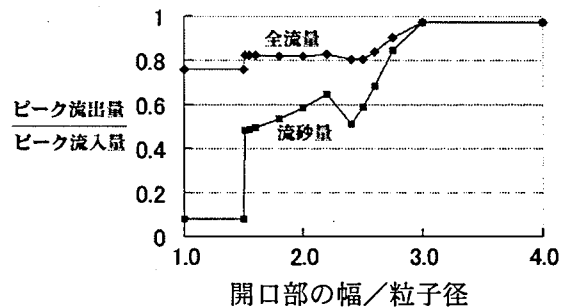


図-7 開口部の幅と流量・流砂量ピーク値との関係