

25 砂防計画における基本土砂量について

武居 有恒

砂防計画においては、まず処理しようとする土砂量を決定しなければならない。この場合その基本となる量は、計画基準点より上流域の生産土砂量・計画基準点における流出土砂量、及び保全対象区域あるいは下流流路の許容流出土砂量である。かつこれらの諸量に対して、計画の対象となる最大値（ある一定値以下の確率でしか発生しないような巨大な現象は計画の対象外とする）、及び年平均値の両者を決定する必要がある。従来の砂防計画においては、これらの最大値及び平均値に対する考え方が、十分整理されないうちに土砂処理計画のなかに取込まれているために、全体として混乱を招き、あるいは事業効果の説得性に不十分な点があったことは否定できない。そこでこの問題について、基本的な考え方を整理してみた。

1. 土砂生産・流出過程

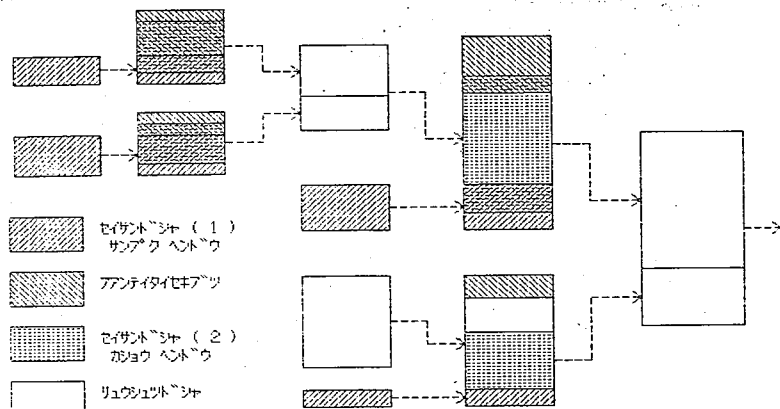
山腹斜面を構成する土層（風化され強度が低下した岩盤を含む）は、平常の状態では安定しているが、豪雨・地震・火山活動などによる異常な外力を受けると、局所的に安定を失い、主として重力によって、溪流に向って崩落する。崩落した土砂は、そのまま一挙に下流まで流下する場合もあるが、一般にはその土砂のうちのかなりの部分は比較的狭い範囲に堆積し、さらにその一部は主として流水の力によって下流に運搬される。

このようにして溪流の谷底や源頭部に堆積した土砂は極めて不安定であって、表流水による再侵蝕を受け、あるいは飽和された堆積土層が再移動して流動化する危険を孕んでいる。また、植生の被覆を失った山腹は降雨によって容易に表面侵蝕を受け、さらに表流水の集中によって侵蝕溝が急速に発達し多量の土砂を溪流に供給する。豪雨によって流出する大量の土砂の起源には、山腹崩壊土砂も含まれるが、このような不安定堆積物の影響が極めて大きいと考えられている。そこで、このような不安定堆積物を発生させ、また溪流を直接流下する土砂を山腹から供給するような現象を「土砂生産」、その現象によって移動し始める量を「生産土砂量」と呼び、また溪流（〇次谷を含む）に一旦堆積した土砂が、浮流・掃流・集合運搬などの形態で流動するものと、生産土砂量のうち直接流出するものを含めたものを「流出土砂量」と呼ぶことにする。

河道のある断面を流下する土砂量は、流量・勾配及び土砂の粒度組成、ならびにそれらによって決定される土砂運搬形態に支配されるものと考えられる。その断面の持つ流砂能力を超える土砂量が上流から供給されるならば堆積（河床上昇）を生じ、土砂供給量が下回れば洗掘（河床低下）が起こる。下流側の一断面が固定されるならば、その上流では河床勾配が次第に上昇あるいは下降することによって、与えられた流砂量に対応する勾配になるまで変化する。

したがって、ある断面における「流出土砂量」は、短期的にはその断面近傍の河床変動による調節作用の影響を受け、河道に供給される「生産土砂量」と、その断面を流下する流れの水理量によって

決定される流砂量のバランスを、流路網の最上端からその断面まで積分した量になる。1 出水の流出過程における生産土砂量と不安定堆積物の変動ならびに流出土砂量の関係を、流域上流端から下流へ追跡する形で模式的に示したものが（図-1）で、1 流域を考えれば



（図-1） 土砂生産・流出過程の模式図

「流出土砂量」は「生産土砂量」と「不安定堆積物の変動量」の差として表されるが、この変動量はその時点に存在する不安定堆積物の量と分布によって大きく変化する。

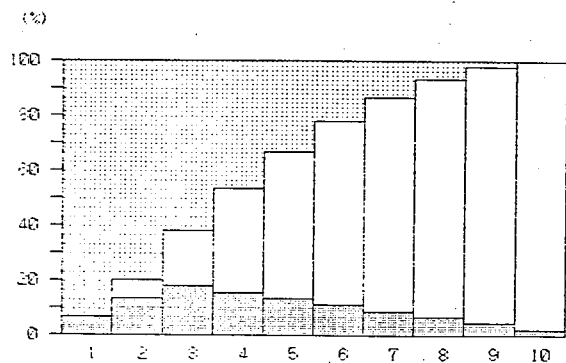
長期的には、供給される生産土砂量に対応するような平均的な安定断面が形成されることになるので、「年平均生産土砂量」と「年平均流出土砂量」は同等であると考えられる。これに対し「最大流出土砂量」は、予測される「最大生産土砂量」が発生する時点に存在する「不安定堆積物」の量と分布を考慮しなければ推定できない。

2. 計画の基礎となる土砂量

土砂災害防止計画のための最も基本的な量の一つに、計画基準点における「許容流出土砂量」がある。この量は保全対象区域の及び下流流路の自然的・社会的条件によって決定されるもので、砂防計画自体に対しては apriori に与えられるものであるが、これに対しても「年平均値」と「最大値」は別個に考えなければならない。砂防工事によって処理（安定化）しなければならない量、すなわち「計画土砂量」は現状における「流出土砂量」と「許容流出土砂量」の差であって、砂防計画ではこれをある一定に期間内に0にするような工事の実行計画を作成する。（図-2）はこのような計画を模式的に示したもので、計画期間を10年と

仮定し、各年度毎の計画量のパーセント及びその累加値をヒストグラムで表示している。

この計画が「最大値」を対象とするものとするれば、計画期間10年を経過すれば災害防止の目的は完全に達成されるが、それまでの期間に「計画最大流出土砂量」に近いような土砂流出現象が発生した場合でも、既に完成した砂防ダム等の「調節量」によって災害の減少をはかることができる、ということで一応目的は達成されるとすることができる。しか



（図-2） 土砂処理の年次計画

し「平均値」を対象としている場合は、図中左側上部の空白（細かいドット）部の面積に相当する土砂量は、計画基準点より下流へ流出することになる。またこの場合は砂防ダムによる「調節量」は、一時的な貯留量に過ぎないのでこれを算入することはできない。

一般に「許容流出土砂量」は「年平均値」として与えられるから、計画の対象とされている土砂量も「年平均流出土砂量」になっている筈であるが、この値を推定することは意外に難しい。ある地点における流出土砂量の観測値が得られたとしても、その値は観測点直上流部の河床変動結果だけを反映している場合が多く、またダム堆砂の長期変動観測結果を適用しようとするれば、一般に砂防計画で考えられているような値と較べれば1～2オーダー小さい値になってしまう。

砂防計画の基準として普通使われている土砂量は、大災害が発生したときの実績に準拠しているのので、「最大流出土砂量」を問題にしている限りは、それなりに実際の現象によって裏付けられた値を求めることができるが、この量にはさきにも説明したように「生産土砂量」とその時点における「不安定堆積物量」の両者が関係しているので、「最大値」と「年平均値」を整合性を保って結びつけることはかなり困難と考えなければならない。

「許容流出土砂量」が「年平均値」として表されているならば、この値はそのまま「許容年平均生産土砂量」とすることができるので、計画の対象とする土砂量についても「年平均生産土砂量」を使うことができる。この場合は、「生産土砂量」は毎年変動する値であっても、平均的にはそれぞれの流域に固有の値と考えられるので、適当な仮定を設けることにより「最大値」と「年平均値」の関係を求めることができる筈である。したがって「年平均値」を処理しようとする砂防計画においては、「生産土砂量」を対象としなければならない。そこで次に「最大生産土砂量」と「年平均生産土砂量」の関係について考えてみることにする。なおこのような計画においては、計画開始時点において流域内に存在する不安定堆積物の安定化に対しては、別の土砂処理計画を平行して実行する必要がある。

3. 「最大生産土砂量」と「年平均生産土砂量」

既往の災害記録から推定される「最大生産土砂量」は同一であっても、災害発生周期が比較的長くその間にはあまり大きい土砂流出は起こらないいわゆる「休眠性河川」と、激しい土砂流出が頻繁に発生するいわゆる「活動性河川」とにおいては、年間生産土砂量の分布は異なっている。この間の相違は、その最大生産土砂量が発生する周期 (return period) の長短だけではなく、最も起こりやすいような現象における土砂生産量にも差があるものと考えられる。このような年間生産土砂量の分布を表すために、それぞれの母分布は異なった中央値 (median) ; M 、及び標準偏差 (standard deviation) ; σ_y を持った対数正規分布に従うものと仮定し、年間生産土砂量 x の密度分布関数を次式で与える。

$$p(x) = \{\sigma_y \cdot e^y \cdot (2\pi)^{1/2}\}^{-1/2} \cdot \exp\{- (y - \mu_y)^2 / (2 \cdot \sigma_y^2)\}$$

ここに、 $y = \ln x$ 、 $\mu_y = \ln M$ である。また母分布の平均値 (mean) ; μ 、及び最頻値 (mode) ; $x_{p, \max}$ は次式によって与えられる。

$$\mu/M = \exp(\sigma_y^2/2)、\quad x_{p, \max}/M = \exp(-1/\sigma_y^2)$$

いま「最大生産土砂量」の値 x_r 、及びこの値に対応する超過確率 $y_r = 1/r$ (ここに、 r (年) はその発生周期である) を与えて M および σ_y を決定するためには、さらにもう一つの仮説が必要に

なる。さきに述べたようにある流域の土砂生産特性は、大災害が発生する周期及びその時の生産土砂量によって表されるものと考えられるので、最も起こりやすいような現象すなわち最頻値 $x_{0,max}$ に対応する年生産土砂量は、最大生産土砂量 x_r を回帰年 r で割った値に等しいと仮定し、 $\mu_r = 0$ 、 $(M=1)$ 、 $\sigma_y = 1$ の正規分布において超過確率が $1/r$ になるような y の値を Y_r とすれば、

$$\ln(x_r/M) = \sigma_y \cdot Y_r, \quad r = (x_r/x_{0,max}) = (x_r/M) \cdot \exp(\sigma^2)$$

という関係が成立し、 x_r 及び r を与えれば、 M および σ_y は試算によって容易に求められ、また同時に生産土砂量の平均値 μ も知ることができる。この分布においては、 σ_y がきまれば M は同時に決定されることになるので、(表-1) に回帰年 r に対応する μ/x_r および M/x_r の代表的な値を示す。 r に関しては、典型的な休眠性河川で 100~200 年、典型的な活動性河川で 25~50 年としてその値を用いた。また x_r が絶対的な最大値であって x_r 以上の土砂生産は起こらないと仮定した場合の修正係数を α で示した。また(図-3)には $M=1$ 、 $\sigma_y=1$ に対応する密度関数 $p(x)$ 、 $q(x) = x \cdot p(x)$ 、分布関数 $P(x) = \int p(x) \cdot dx$ 、 $Q(x) = \int q(x) \cdot dx$ を図示してある。

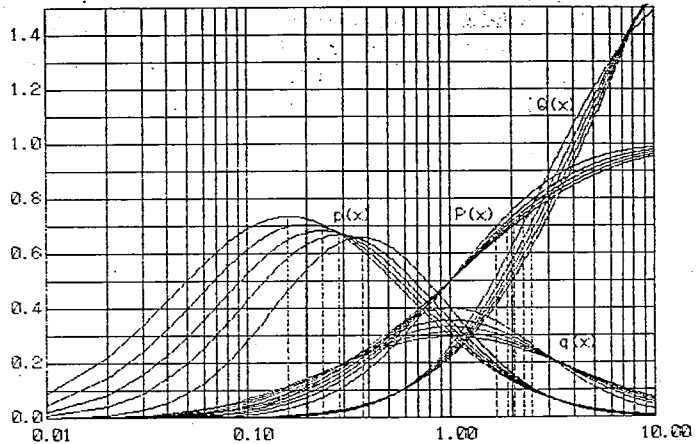
4. 砂防計画への適用

流域一貫砂防計画においては、許容流出土砂量としては年平均値を採用するべきであるから、この場合は上述の年平均生産土砂量処理する計画と、さらに計画開始時点に存在する不安定堆積物を処理する年次計画を同時に考慮する必要が

r (年)	200	100	50	25
μ/x_r (%)	7.7	11.6	17.5	26.7
M/x_r (%)	3.1	5.1	8.5	14.1
σ (標準偏差)	1.35	1.28	1.20	1.12
α (修正係数)	0.95	0.92	0.87	0.81

(表-1) 年平均生産土砂量に関する諸数値

ある。このような形で土砂処理計画を樹てると、計画期間 N 年を通じ毎年同量づつ実行するとすれば、計画完成までに計画土砂量の $(N/2)$ 倍の土砂を処理しなければならないことになる。(表-1) の値を参照すれば、活動性河川では 10~15 年、休眠性河川では 20~30 年を計画完成までの期間とし、やや前倒しの実行計画を樹てれば、ほぼ最大生産土砂量に対応できることになる。従来の砂防計画において、最大流出土砂量を計画期間中に年平均流出土砂量まで低下させるように計画されている場合が多いが、流出土砂量の中には災害発生時に存在した不安定堆積物からの流出量が含まれていることを考慮すれば、結果的には實際上それほど支障の無い計画になっていると云うこともできる。



(図-3) 年生産土砂量の分布