

1. はじめに これまで、砂防ダムや流路工といった砂防施設の機能や効果を評価する場合、水理模型実験を行って施設の効果を定量的に評価してきたことが多かったと思われる。これは、数値計算精度や基礎方程式の不確かさとともに、複雑な構造物に対しては数値計算の境界条件が与えにくいといったことも原因していると思われる。しかしながら、比較的単純な構造の施設であれば、数値シミュレーションによる施設の評価はある程度可能であり、経費的にも節約が図れるなど有効な手段と考えられる。そこで、本研究では、1999年12月に南米ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害に対して、砂防ダムや流路工を配置することによる効果を数値シミュレーションによって検討したのでその結果を報告する。

2. カムリグランデ流域での土砂災害の概要 カムリグランデ流域はカリブ海に面するベネズエラ国バルガス州の東端に位置し、図1に示すように標高約2250mのコスタ山脈に源を発する流域面積23.8km²のカムリグランデ川と流域面積19.0km²のミグエレナ川の2つの川が扇頂部付近で合流する幹川流路延長約12.3km、平均河床勾配10度という急勾配河川である。流域の扇状地にはシモンボリバル大学、リゾートホテル、集合住宅、違法移民のスラムが立地する。この流域から西に約30km離れたマイケティア国際空港では12月14~16日の3日間に915mmの豪雨あり、カムリグランデ流域では15~16日の2日間で281.5mm程度の降雨があったと見積もられている。1951

年の豪雨で生産され、その後移動することなく河床に堆積してきたと考えられる土砂が今回の豪雨で一気に流出し、下流の扇状地で大規模な土砂氾濫災害を引き起こした。

3. 砂防ダムの効果の評価

著者らがこれまでに開発してきた粒度分布を考慮した土石流の規模予測モデル¹⁾を用いて、今回発生した土石流の規模予測および砂防ダムおよび流路工の施設効果の評価を行った。計算に用いた粒度分布およびハイトグラフをそれぞれ図2、3に示す。図4に示すように、クローズドタイプの砂防ダムと流路工を組み合わせた砂防施設配置を考え、表1に示す5通りの計算を行った。CASE-1は深さ2mの流路工のみを配置、CASE-2は両河川に高さ10mの砂防ダムを配置、CASE-3はカムリグランデ川の砂防ダム高を20m、CASE-4は流路工の深さを3m、CASE-5はこれを5mにした場合である。ここでは、CASE-1,2,3のシミュレーション結果について示す。

砂防ダムからの流出流量を評価する場合、計算に用いる勾配が問題となるが、ここでは式(1)で示すような砂防ダム天端とダム直上流の水位との差から求められる勾配(図5参照)を用いた。

$$\theta_e = \tan^{-1} \left\{ \frac{z(i) + h(i) - z_1}{(\Delta x / 2)} \right\} \quad (1)$$

なお、ダム天端が上流水位より高い場合はダム越流量をゼロとしている。また、流動深としては式(2)のように、越流深を用いている。もちろん、 $z(i)$ が z_1 を上回れば $h(i)$ が流動深となる。

表1 計算ケース

CASE NO.		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4	CASE-5
SABO WORKS						
SABO DAM (HEIGHT)	CAMURI	NO	10 m	20 m	20 m	20 m
	MIGUELENA	NO	10 m	10 m	10 m	10 m
CHANNEL WORKS	BANK HEIGHT	2m	2m	2m	3m	5m

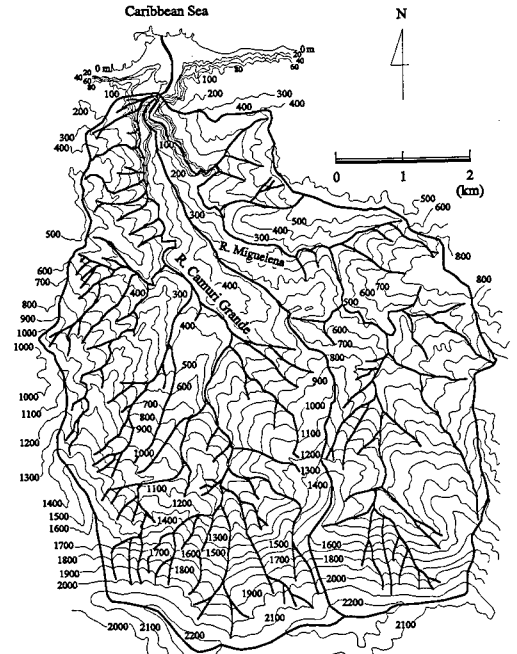


図1 カムリグランデ流域

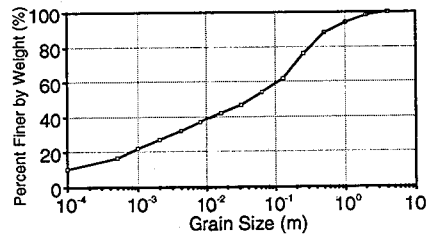


図2 計算に用いた粒度分布

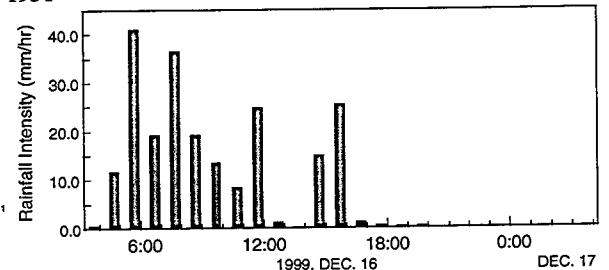


図3 計算に用いたハイトグラフ

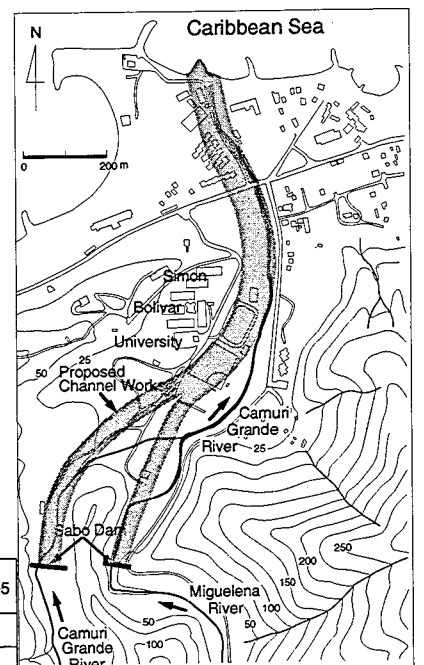


図4 施設配置図

$$h' = \begin{cases} h(i) + z(i) - z_l & (h(i) + z(i) - z_l > 0) \\ 0 & (h(i) + z(i) - z_l \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

一方、ダム地点での平衡濃度を計算するときに必要な勾配としては、式(3)のような地形勾配(図6参照)で評価する。

$$\theta_e = \tan^{-1}\{[z(i) - z_l]/(\Delta x/2)\} \quad (3)$$

なお、逆勾配の時は平衡濃度をゼロとする。

図7および図8はそれぞれCASE-1~CASE-3のハイドログラフおよびセディメントグラフを示したものである。CASE-1では土石流のピーク流量が約800m³/s程度であったが、CASE-2では550m³/s程度に減少している。それでも流砂量は350m³/s程度と高く、砂防ダムからかなりの土砂が土石流のまま流出していることが分かる。CASE-3では明確な土石流のピークが現れておらず、流砂量のピークも40m³/s以下に減少している。表2に各CASEの総流出土砂量とダムによる土砂補足率を示す。同表より、CASE-2では砂防ダムによる土砂補足効果は30%程度であり、CASE-3では約60%に及んでいることがわかる。

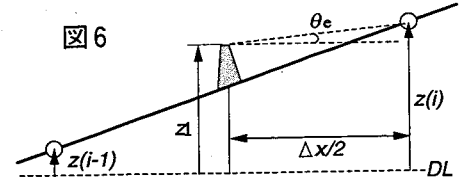
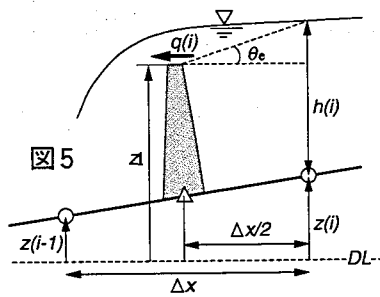


図5 ダム地点での流量評価時の勾配の採り方

図6 ダム地点での平衡濃度評価時の勾配の採り方

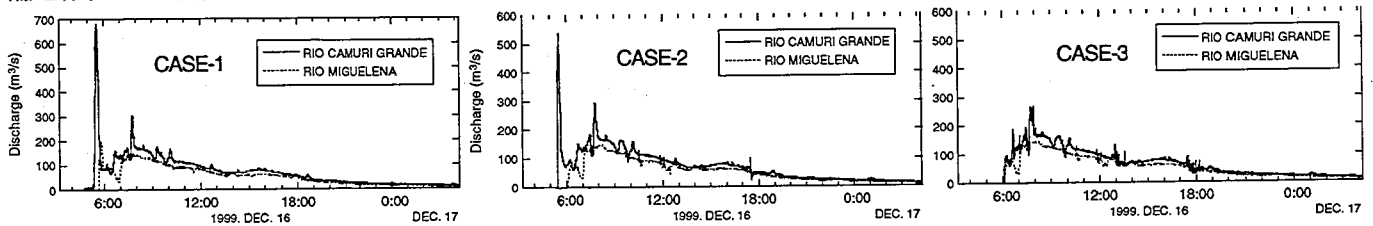


図7 各計算ケース毎の土石流ハイドログラフ

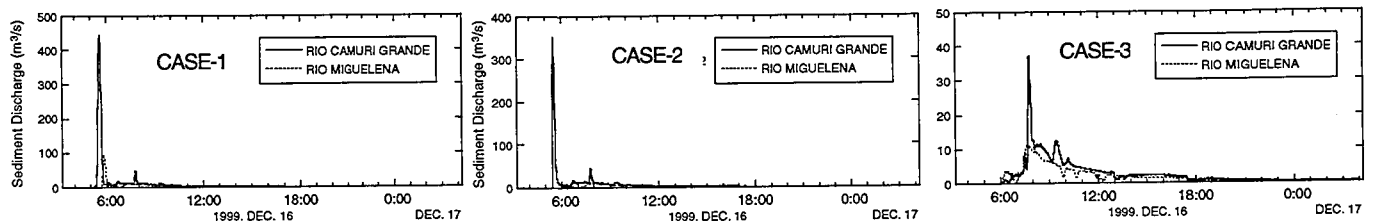


図8 各計算ケース毎のセディメントグラフ

4. 流路工の効果の評価 複雑な地形・地物形状や流路工の線形を数値計算で反映させる方法として、任意の形状にメッシュを構成する非構造格子を用いた有限体積法がある²⁾。ここではこの方法を用いることとし、3. で得た結果を流入境界条件として扇頂部で与え、各CASE毎に施設配置効果の評価を行う。用いた基礎式は平面2次元流れの運動量式、バルクの連続式、粗粒子及び細粒子の連続式、河床変位式、粒子個数の連続式である。図9、図10にCASE-1およびCASE-5の最終的な土砂氾濫・堆積状況を示す(12月17日4時15分)。これらの図より、

今回と同規模の土石流に対して扇状地での土砂氾濫を防ぐにはミグエレナ川には高さ10m、カムリグランデ川には高さ20mの不透過型砂防ダムを配置し、流路工の深さを少なくとも5m程度とらなければならないことが分かる。

5. おわりに 従来、土石流の堆積勾配にあるような場所での湾曲した流路工の設計では、下流端条件、線形、土砂の堆積の影響等を精度よく評価することは困難であったが、本方法によって比較的精度よく施設の効果を評価できるものと思われる。

<参考文献>1) 高橋・井上・中川・里深：山岳地域における土砂流出の予測，水工学論文集，第44巻，pp.717-722，2000。

2) 川池・井上・戸田・中川・中井：急傾斜都市における土砂・氾濫災害の解析，京大防災研年報，第43号B-2，pp.333-343，2000。

表2 砂防ダムの土砂補足に関する計算結果

CASE RIVER	CASE-1	CASE-2		CASE-3	
	Vout* (m ³)	Vout (m ³)	Vout-cut** (%)	Vout (m ³)	Vout-cut (%)
Camuri Grande	912,000	686,000	24.8	317,000	65.2
Miguelena	397,000	223,000	43.8	223,000	43.8
Total	1,309,000	909,000	30.6	540,000	58.7

* Vout: sediment volume outflowed from the Sabo dam

** Vout-cut = (Vout (case-1) - Vout) / Vout (case-1) x 100

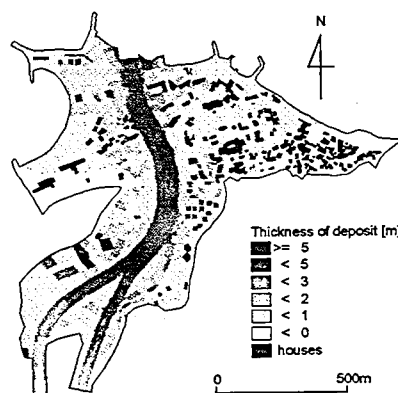


図9 計算結果 (CASE-1)

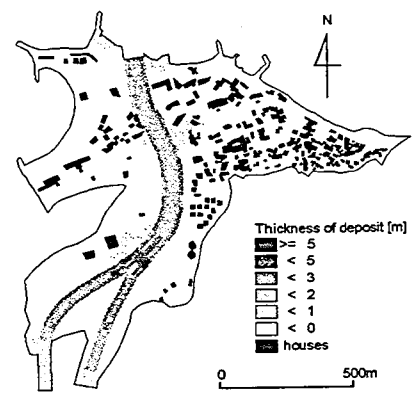


図10 計算結果 (CASE-5)