

36 水理模型実験と数値シミュレーションによる遊砂地の機能評価について

(財) 砂防・地すべり技術センター ○高橋 正昭、松村 和樹
北海道留萌土木現業所遠別出張所 石黒 元昭
(財) 建設技術研究所 斉藤 武

1. はじめに

遊砂地は有害な土砂を面的に堆積させ下流域の安全を図る施設として有用である。従来、遊砂地の機能・効果を定量的に評価する場合、水理模型実験による手法がよく適用されている。一方、近年、コンピュータの高速化に伴い、土石流や泥流の氾濫・堆積範囲を数値シミュレーションによって推定することが試みられており¹⁾²⁾、その手法を用いて遊砂地の機能・効果を評価した例³⁾も見られる。本文は、水理模型実験と数値シミュレーション手法を用いて、遊砂地の堆砂機能の評価を行う機会を得たので、それぞれの手法によって得られた評価結果について述べ、それら手法の機能評価への適用上の留意事項に言及するものである。

2. 水理模型実験

実験は、遊砂地計画上の捕捉必要量 16,000 m³を確保することおよび平常時・中小規模の洪水時において安定した流路を確保することを目的として、以下に述べる模型および実験条件の下で行った。

2.1 模型および実験条件

模型は、図-1 に示す長さ約300m、幅30～80mの範囲を取り入れた胃袋型とし、縮尺 1/100 で制作した。流量は洪水波形を図-2 に示すように階段状に分割して与え、給砂量は流域の土砂収支から得られている28,300 m³を与えた。なお、実験では1回の洪水で全給砂量を給砂できないため、洪水波形を7回重ねた。実験砂(河床材料、給砂材料)は図-3 に示すように現地調査から得られた粒度分布とほぼ一致するように作成した。平均粒径は 8.7cm である。

2.2 実験結果

実験は、遊砂地形状を同一とし遊砂地内の床固工と帯工の形状を変更して2ケース行った。各ケースに適用した床固工と帯工の形状の諸元を表-1 に示した。図-4 に各ケース毎の洪水終了後の河床変動平面図を示した。以下

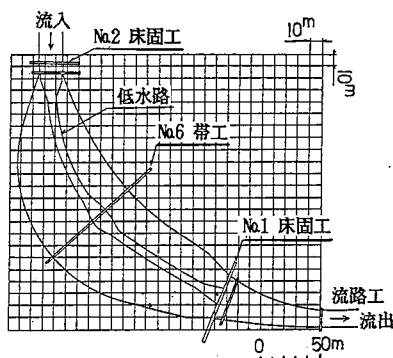


図-1 遊砂地形状と計算メッシュ

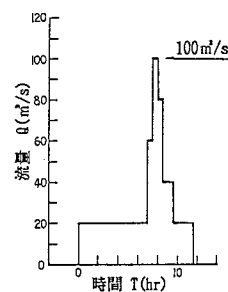


図-2 洪水波形

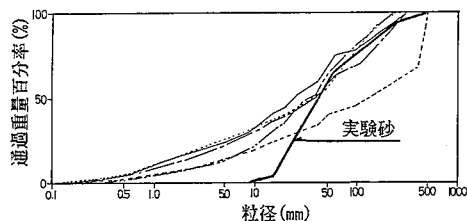


図-3 粒度分布

表-1 機工の諸元

case	低水路部形状および低水路部取付け位置	
	No.1床固工	No.6帯工
1	中央部に1箇所、スリット形式 (突起部高さ1.2m幅0.8m間隔1.5m)	中央部に1箇所、左右側岸寄りに 各1箇所、スリット形式 (突起部高さ1.5m幅0.8m間隔1.5m)
2	中央部に1箇所、スリット無 (複断面形式)	中央部に1箇所、スリット無 (複断面形式)

に、実験結果の概要を述べる。

① ケース1：洪水の初期段階ではNo.6帯工の上流側、特に外弯側で堆砂が生じ、下流側で洗掘を生じている。洪水終了後の河床は、流水の帯工および床固工における堰上げによる掃流力の減少や上流No.2床固工直下における首振りによる流水（土砂）の分散により、遊砂地全体に1m～2m程度の高さで均等に堆砂している。堆砂量は21,500m³程度である。流路は各スリット部を通じて上下流に連続して形成されている。

② ケース2：堆砂・洗掘状況はケース1とほぼ同様な傾向を示しているが、洪水終了後の河床は低水路部に流水が集中したことにより、局所的にNo.6帯工の下流外弯側で1.0m程度の洗掘が生じているが、全体には0.5～2.0m程度の堆砂高を示し、堆砂量は約16,600m³である。流路は帯工中央の低水路部に形成されている。

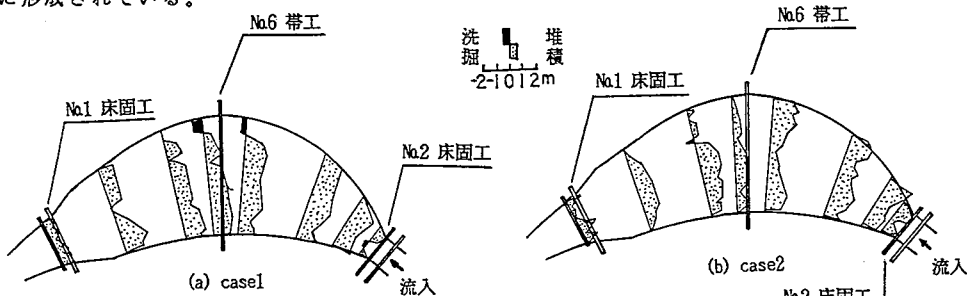


図-4 河床変動平面図

3. 数値シミュレーション

数値シミュレーションは捕捉必要量16,000m³の確保および洪水終了後の流路の形成状況を把握することを目的として行った。

3.1 2次元シミュレーションの概要

① 基礎式

基礎式は次式で示される二次元平面上の連続流体の漸変流の運動方程式と流体の連続式からなる⁴⁾。

・運動方程式

$$X \text{ 方向} : \frac{\partial M}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \beta' \cdot \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho \tau} \quad (1)$$

$$Y \text{ 方向} : \frac{\partial N}{\partial t} + \beta \cdot \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \beta' \cdot \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho \tau} \quad (2)$$

・連続式

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここに、 M, N : x および y 方向の流量、 u, v : x および y 方向の平均流速、 h : 流動深、 z : 流動底面の地盤標高、 $H = h + z$ 、 τ_{bx} 、 τ_{by} : x および y 方向の抵抗力、 β' : 運動量補正係数、 g : 重力加速度、 ρ : 流体の密度、である。また、流動の抵抗則にマンニング則を用いると、 τ_{bx} 、 τ_{by} はそれぞれ、

$$\tau_{bx} = \frac{\rho \tau g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (4)、 \quad \tau_{by} = \frac{\rho \tau g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (5)$$

となる。ここに、 n : マニングの粗度係数である。

遊砂地計画区間付近の河床勾配が1/50程度であるので、土砂移動を掃流として取り扱うことができ

る。掃流砂量式としてMeyer-Peter-Muller式を用いた。

② 計算方法、範囲

計算は、図-1に示すように遊砂地を10m×10mの正方形メッシュに分割し、地形図から各メッシュの地盤標高を読み取った上に、境界条件として洪水波形を与えて行った。洪水波形および対象土砂量は水理模型実験と同一とし、8.7cmの平均粒径を与えた。

3.2 2次元シミュレーション結果

シミュレーションは実験と同様に遊砂地形状を同一とし、帯工の形状の変更により2ケース行った。ケース1においては帯工の3箇所あるスリット部を矩形の断面にモデル化し、ケース2では帯工の中央にある低水路部を矩形断面にモデル化した。図-5に洪水後の河床変動高の分布を示した。以下に、各ケースの結果の概要について述べる。

① ケース1：土砂はNo.6帯工の上流、特に外弯側に1.5m～3.0mの高さで堆砂し、堆砂量は15,600m³程度である。これは、遊砂地内の内弯側と外弯側との勾配を比較すると、当然外弯側の勾配が緩く掃流力は外弯側の方が小さくなるため堆砂はまず外弯側で生じ、その後河床勾配が変化しても外弯側の水深は小さくなるので、掃流力がさらに減じられ堆砂を促進させかつ流水は中央部から内弯側に集中し掃流力が増加することにより内弯側では堆砂が生じないことによる、と考えられる。流路は帯工低水路部上流の変動高の分布から、外弯側、中央部および内弯側に形成されているのがわかる。堆砂量が実験結果に比べ少ないのは、スリット部を矩形断面にモデル化したことによる、と考えられる。

② ケース2：ケース1と同様、土砂は帯工上流部外弯側に2.0～3.0mの高さで集中して堆砂し、堆砂量は16,800m³程度である。変動高の分布では流路の形成状況は不明瞭であるが、流量フラックスの分布では中央の低水路部に流水が集中しており、低水路部を通じて流路が形成されていることがわかった。

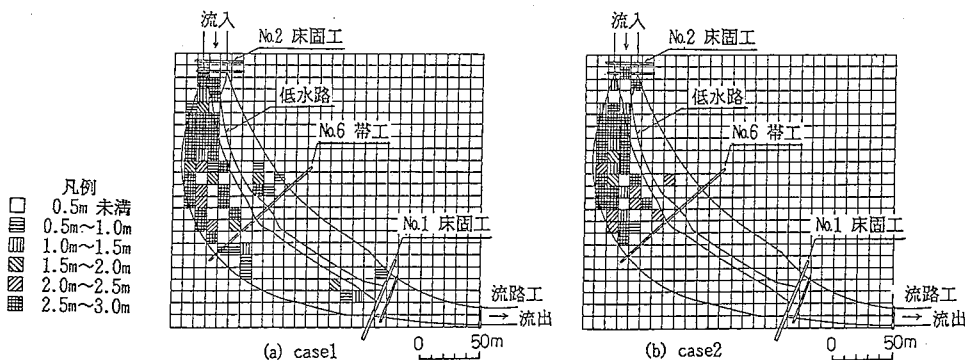


図-5 河床変動高の分布

本シミュレーションの結果と実験結果とを比較した場合、堆砂形状において顕著な差が表れた。これは、本シミュレーションでは側岸の掃流力（せん断応力）を考慮していないため、外弯側に堆積した土砂が側岸侵食により崩壊せずその状態を維持し続けたことによる、と考えられる。

以上の検討は2次元のシミュレーション結果であるが、比較のため、従来、縦断形の河床変動状況を推定する際に用いられている1次元の河床変動シミュレーションによる堆砂機能の評価をおこなった。計算は2次元シミュレーションのケース2の形状を矩形断面にモデル化し、土砂、洪水波形等の条件は同一として、不等流計算によって行った。図-6に洪水終了後の河床の縦断形を示す。洪水後

の河床の縦断形は帯工上流で約2m程度、下流で1m～1.5m程度の堆砂高を示しており、堆砂量は19,700m³程度である。実験結果および2次元シミュレーション結果と比較すると、1次元の河床変動計算では低水路の形成状況等は把握できないが堆砂量については両者の結果とほぼ一致している。また、堆砂の縦断形状に関しては2次元シミュレーション結果とは異なるが、実験結果とはほぼ一致している。

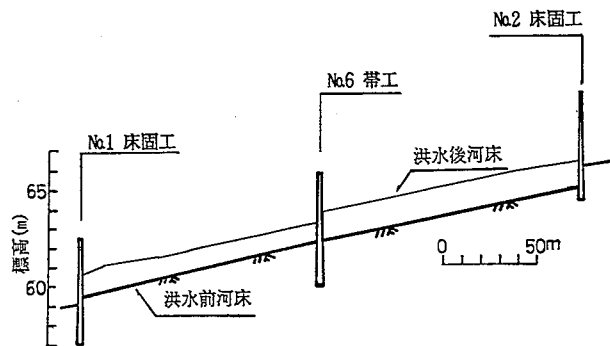


図-6 河床の縦断形 (1次元河床変動計算結果)

4. 適用上の留意事項

- ・今後、2次元シミュレーションにより遊砂地の堆砂形状を評価する場合、側岸浸食の影響が大きいと考えられるので、この点を考慮したプログラムの開発が必要である。

- ・水理模型実験では粒度分布をある程度反映して機能評価を行っているが、数値シミュレーションでは代表粒径によって検討しているため、機能評価をより精度よく行うために混合粒径によるプログラムの開発が必要である。

- ・2次元シミュレーションにおいて、メッシュ分割は流体の運動がそのメッシュを代表するように、かつメッシュ間相互の作用の影響を無視できるように1メッシュの大きさを水深の5倍程度以上にすることが必要であり、また、モデルの評価を表現できる程度に河幅に対しメッシュの大きさを小さくする必要がある。このため、横工のスリット部のような構造物の機能の検証や低水路の形成状況の評価する等の目的に対しては、評価する対象の大きさにより制約を受ける可能性がある。

- ・一方、水理模型実験において、本モデル程度の範囲 (約0.06km²) よりも大きなモデル (数km²以上)、対象とする現象 (泥流、火砕流等) によっては適用が実際上または理論上難しい場合もあり、このような場合、2次元シミュレーションは有効な手法となる。

5. おわりに

本文は、水理模型実験と数値シミュレーションとによる遊砂地の機能評価の結果について示し、それらの適用上の留意事項について述べた。今後、遊砂地の機能を定量的に評価して行く上で、両手法を種々のモデルに適用し比較・検討して行くことが必要である。

参考文献)

- 1) 下東久己、水山高久、阿部宗平；土石流氾濫シミュレーションモデルと模型実験による土石流災害の再現、砂防学会研究発表会概要集、昭和61年
- 2) 久保田哲也、井戸清雄；大武川土砂氾濫シミュレーション、砂防学会研究発表会概要集、昭和63年
- 3) 北海道帯広現業所、(財)砂防地すべり技術センター；芽室川砂防工事 (導) 基本設計委託報告書、昭和62年
- 4) 宮本邦明、矢沢昭夫、水山高久；火山泥流の流動機構とそのモデル化、砂防学会研究発表会概要集、昭和62年