

35 火山地域における遊砂地の水理模型実験

(財) 砂防・地すべり技術センター ○ 鶴殿 俊昭

鹿児島県砂防課 矢沢 昭夫

(財) 砂防・地すべり技術センター 鈴木 宏

(財) 建設技術研究所 栗山 義英

1. はじめに.

遊砂地(砂溜工)や流路工等の砂防施設の機能の評価や形状、構造の検討のため、よく水理模型実験が行われる。水理模型実験は、一般的にはフルードの相似則に基づいて計画がたてられる。これは、流れの特性が流れの慣性力と重力により支配されており、両者の比、すなわち、フルード数が等しければ流れの特性も等しいことを仮定している。このこと自体はよほどおかしい条件でないかぎりほとんど問題とはならない。流砂現象に対しても一般的にはフルードの相似則がなりたつことは知られている通りである。しかしながら、火山地域のように、土砂の特性が、たとえばみかけの密度が小さかったり変化に富んでいたり、あるいは粒径が非常に小さかったりすると、流砂現象に対してフルードの相似則をそのまま適用することには無理があることがある。ここでは、特に粒径が小さい場合の水理模型実験の手法について検討する。

2. 粒径が小さい場合にフルードの相似則を用いる場合の問題点

現象がフルードの相似則に従うことは、流れの乱れが充分発達していてレイノルズ数が充分大きくレイノルズの相似則を無視してもよいことを意味しており、流れの抵抗も乱流のそれである対数則で表現することが出来ることを示している。

粒径が小さい場合の相似則にフルードの相似則を適用する場合の問題点を整理する前に、まず、フルード相似則について簡単にまとめる。

フルード数 Fr は、

$$Fr = U_m / \sqrt{g h}, \quad U_m: \text{平均流速}, g: \text{重力加速度}, h: \text{水深} \quad (1)$$

で定義されるから、水平縮尺と垂直縮尺を等しくおけば、対数則

$$U_m / U_* = 6.0 + 5.75 \log(h/d), \quad U_*: \text{摩擦速度}, d: \text{粒径} \quad (2)$$

から、

$$Fr = \{6.0 + 5.75 \log(h/d)\} \cdot i, \quad i: \text{勾配} \quad (3)$$

となり、粒径も縮尺に合わせると抵抗則、フルードの相似則とも満たすことになる。流砂量についてみると、掃流砂については、

$$q_b / \sqrt{s g d^3} = f(\tau_* - \tau_{*c}) = f(h/d, \tau_{*c}), \quad f: (\quad) \text{の関数} \quad (4)$$

q_b : 掃流砂量, s : 水中比重, τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力

であるから、一般には τ_{*c} が、0.04~0.05と一定値をとるので、流砂量の縮尺が、右辺が1であることから流量と同じ縮尺となり、フルード相似則を満たすようにすれば掃流砂についても相似則が満たされていることになる。浮遊砂についても、たとえば、レーン・カリンスキーの浮遊砂量式、

$$q_s / \sqrt{s g d^3} = C_a (h/d) \tau_*^{1/2} \cdot U_m / U_* \cdot P_{*0} \quad (5)$$

q_s : 浮遊砂量, C_a : 基準点濃度で w_0/U_* の関数, P_{*0} : w_0/U_* の関数,

をみると掃流砂と同じく、フルードの相似則をみたせば、ほぼ浮遊砂についても相似則が成り立つことがわかる。(w_0 は粒径の平方根に比例し U_* は水深の平方根に比例するから結局 h/d の関数となりこれらの縮尺は1である。)

このように、縮尺を定め、その縮尺に従って模型を作成し、河床材料の粒径を小さくし、フルード相似則にしたがって水を流せば、ほぼ、実際の現象と似た現象をそこに見ることが出来るようになるわけであるが、粒径が小さくなると同じ方法で実験を行っても現地のリアルスケールの現象と異なった現象が現れるようになる。この原因は式(1)～式(5)をながめているだけではわからない。

仮に、流れのレイノルズ数は充分大きく、レイノルズ相似則は無視しうるものとする。すると、流水についてはフルードの相似則がそのまま成り立つ。したがって、問題は、流砂現象の相似則にあることになる。リアルスケールの現象と異なる現象が現れるというには、実は土砂の移動、堆積の様子が異なるということになる。

流砂現象を支配している式(4)、式(5)についてもう少しこまかく検討してみよう。両式のうち、フルードの相似則で表現されているものは、抵抗則 U_m/U_* 、と相対水深 h/d である。したがって、流砂現象を変化させる残されたパラメーターとしては、掃流砂については無次元限界掃流力 τ_{*c} 、浮遊砂については基準点濃度 C_a と P_{*0} ということになる。これらの粒径への依存性をみしてみる。

図-1 は τ_{*c} の粒径への依存性を示したものである。横軸は粒子レイノルズ数 Re_* で通常であるとこれが充分大きいとほぼ一定の値をとり相似則に矛盾は生じない。粒径が小さく、粒子レイノルズ数が小さくなると無次元限界掃流力が変化し流砂現象に関する相似則がくずれる。

図-2 は C_a と P_{*0} のパラメーターである沈降速度 w_0 の粒径への依存性をみたものである。粒径が大きい時は沈降速度は粒径の平方根に比例するが小さくなると次第に粒径に比例するようになる。したがって、ここでも流砂運動に関する相似則はくずれてしまう。

図-3 は浮遊限界と移動限界(掃流限界)との関係を粒径に対して見たものであるが、粒径が大きいと掃流限界が浮遊限界を常に上回っており、流砂を構成する粒子は必ず河床に存在することになるが、粒径が小さくなるに従い両者の差は小さくなり、約 0.1mm より小さくなると両者の関係は逆転してしまう。浮遊限界が掃流限界より上回ると、粒子は移動を開始するときには、浮遊砂となり、河床にもどることはない。いわゆる、ウォッシュロードとなる。

以上の点から、フルード相似則に従って水理模型実験を行おうとする時、現地の河床材料の粒径の小ささが問題となる場合を整理すると、

- ① 模型の粒径が流砂運動の相似則から外れてしまう。
- ② 現地の河床材料がそもそも小さく、ウォッシュロードや粒径がフルードの相似則と相いれない条件にある。

の2点に集約される。何れにしても、流砂現象の相似則の面からみると同じことであることは先の考察から理解される通りである。

3. 遊砂地の水理模型実験

遊砂地の水理模型実験を行う場合には、それ以前に、実験により何について検討するのかを予め明らかにしておかなければならないのはいうまでもないことである。特に、ここで対象としているような、

流砂現象の相似則とフルードの相似則とが一致しない場合には重要な問題となる。たとえば、給砂の粒度分布と河床材料の粒度分布をどのように設定するかといった問題だけでも、どのような現象を対象とするのかによって異なってくる。

ここでは、遊砂地の堆砂形状について議論をしぼり、それをうまく表現するような実験手法について検討する。

堆砂形状を問題にするということは、遊砂地における河床材料の流砂現象を問題にすることになる。河床材料は、ウォッシュロード成分を除くことにより定義されるので粒度分布からウォッシュロードの部分の水でおきかえる。現地スケールでは河床材料であるが、実験スケールではウォッシュロードとなる粒径については河床材料となるように調整する。遊砂地における堆砂は一般的には静的勾配で堆砂させることになるので、河床材料の掃流限界に対する相似則が重要となってくる。すると、自ずから実験条件が、実験に用いる調整した河床材料、給砂材料の代表粒径と、現地の河床材料の代表粒径の掃流限界に対する相似則が、フルードの相似則のもとで成り立つようにすればよいように定まる。

4. 遊砂地の水理模型実験のケーススタディ

火山地域の遊砂地の水理模型実験のケーススタディとして桜島の深谷川を対象として行った。遊砂地は、図-4に示すように深谷川の扇状地の、ほぼ勾配が一樣で平衡勾配が達成されている区間に設けることにする。遊砂地の縦断形状は図-7に示す。実験の模型縮尺は1/30とする。3.の考察に従って河床材料を調整すると図-5のようになる。実験に用いたハイドログラフを図-6に示す。給砂は平衡給砂とする。この条件のもとで代表粒径に対する遊砂地内での粒子レイノルズ数を求めると、流砂量が卓越しているピーク近傍で、ほぼ、70~100程度となり、掃流限界が一定値を持つ下限に近い。

図-7は実験結果を堆砂形状の縦断図としてまとめたものを示している。堆砂勾配が、ほぼ、扇状地の勾配に等しく、扇状地の勾配が度重なる土砂の氾濫の結果形成されたものであることを想像させる。

5. おわりに。

本報告では、火山地域の水理模型実験は、その対象と目的により相似則を充分吟味して行う必要があることを示し、遊砂地の堆砂機能に関する実験の手法について検討し、ケーススタディを行ってその考え方の妥当性を検討した。火山地域の土砂移動現象そのものが、まだ十分に解明されているわけではないので相似則以前の問題も山積みされており難しい面が多いが、基本的には本論での議論が水理模型実験を行ってゆくにあたっては必ずなされなければならないものと考えている。

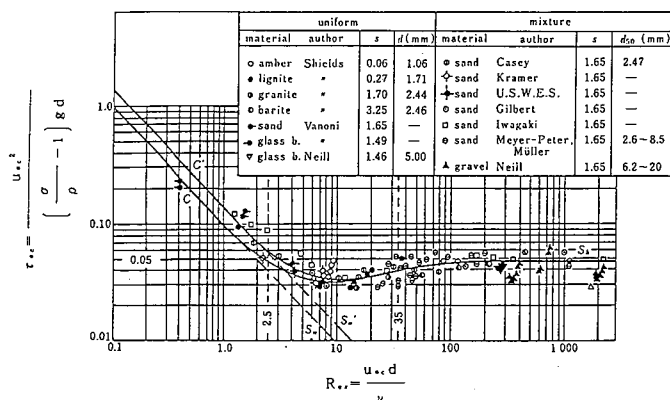


図-1 τ_{*c} の粒径への依存性

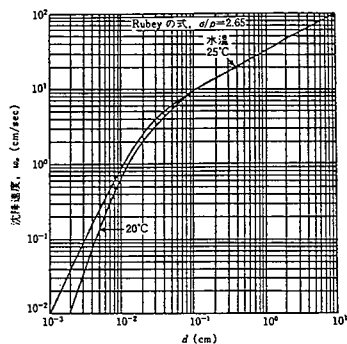


図-2 w_0 と粒径の関係

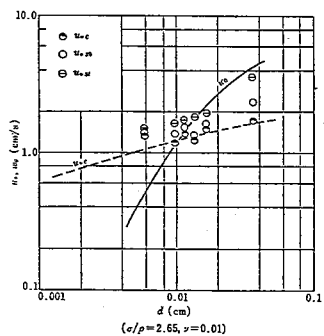


図-3 浮遊限界と移動限界の粒径に対する変化

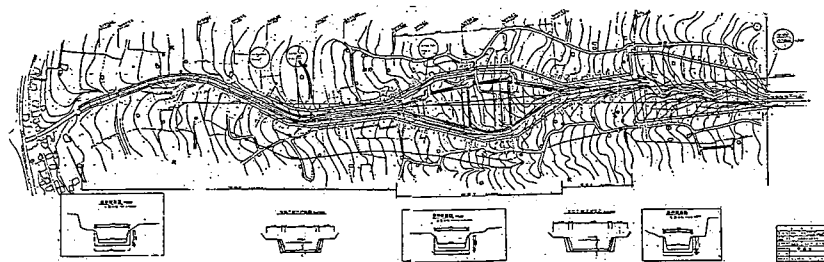


図-4 遊砂地平面図

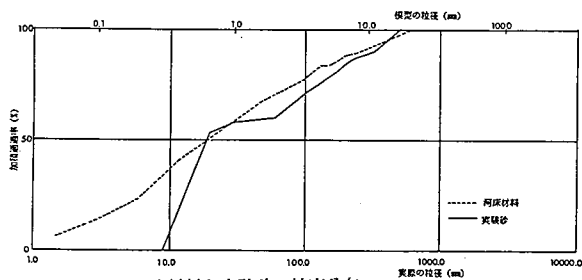


図-5 河床材料と実験砂の粒度分布

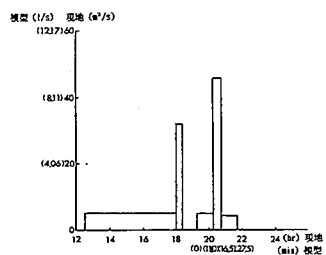


図-6 実験ハイドログラフ

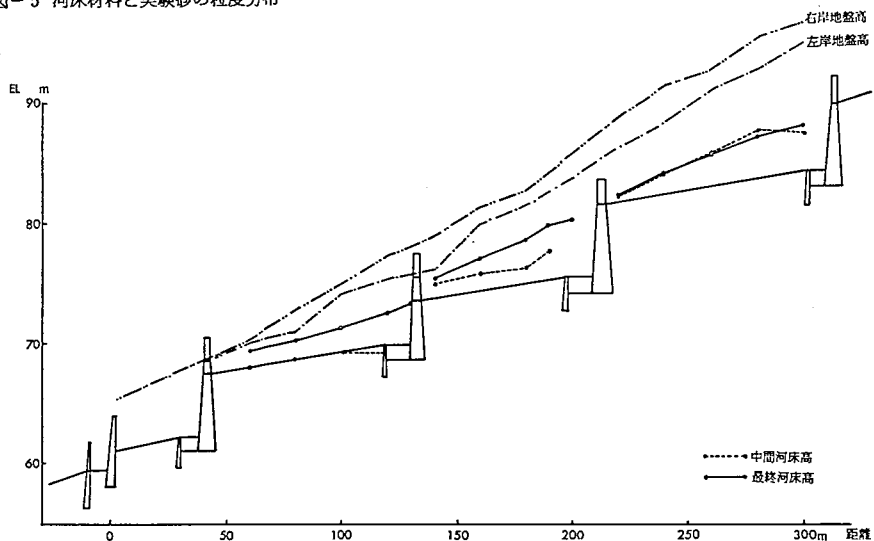


図-7 模型実験結果縦断面