

ロックフィルを通る流れの水理特性

Hydraulics of flow through rockfill.

森井俊広*・大懸重樹**・松本智***

MORII Toshihiro*, OGAKI Shigeki** and MATSUMOTO Satoshi***

1. はじめに

礫や碎石で代表されるロック材は、フィルダムの透水性ゾーンをはじめ、仮締切り堤、透水型ダム、排水工、あるいは礫間浄化工など多くの水利構造物に用いられている。これらの構造物の水理設計を行うにあたり、構造物のもつ通水性能を適正に評価する必要がある。そのためにはロックフィルを通る流れの水理特性を明らかにしなければならない。ロックフィルのような粗粒材の集合体では、間隙を通る流れが乱流状態になるため、構造物に作用する動水こう配 i と流れの速さ V の関係、つまり流れの水頭損失式は非線形性を示すようになる。本報告では、1次元透水試験と室内水路を用いた堤体通水試験によりロックフィルを通る流れの水理特性を調べ、粒径 100mm 程度までのロックフィル構造物の通水特性を精度よく予測できる水頭損失式を提示する^[1]。

2. ロックフィルを通る流れの水頭損失式

5～25mm 径の河川礫を用いた室内 1 次元透水試験の結果の一例を図 1 に示す。ロックフィルを通る流れの水頭損失式は、マイルドな非線

形性を示すことがわかる。図 1 には、透水係数が 10^{-2}cm/s の砂について、ダルシー式で表される水頭損失を示した（ただし図の縦軸にほとんど重なっている）。ロックフィルでは、砂のような土質材料に比べ、圧倒的に多くの流れが生じる。ロックフィル構造物の水理設計で、まず通水性能に着目しなければならないのは、このような流量の多さのためである。

図 1 の水頭損失特性は、次の Forchheimer 式でうまく記述できる。

$$i = A \cdot V + B \cdot V^2 = \left(\frac{A_0 \nu}{g} \right) \cdot V + \left(\frac{B_0}{g} \right) \cdot V^2 \quad (1)$$

ここで A_0 と B_0 は間隙の幾何構造のみに依存する係数、 ν は水の動粘性係数、ならびに g は重力加速度である。流れに及ぼす水温の影響は ν を通して知ることができる。したがって、残る問題は、係数 A_0 、 B_0 と強い関連をもつ間隙の幾何構造を表す指標を明らかにすることである。本研究では、この指標として、次式で定義される間隙の水理学的平均径 m を導入した。

$$m = \frac{e \cdot d}{6r} \quad (2)$$

ここで d と r は、それぞれ、ロック材粒子の代表粒径と形状係数、 e はロックフィルの間隙比である。 m は、ロック材粒子の形状、粒径、および間隙の大きさと分布といった間隙の幾何構造を包括して表現することができる。

3. 係数 A_0 、 B_0 と m の関係

式(1)の係数 A_0 、 B_0 と m との関係を調べるため、幅 20cm および 50cm の室内水路を利用して、高さ 30～40cm 程度の小規模堤体に対する通水試験を実施した^{[2]、[3]}。1次元透水試験と同じ 5～25mm に加え、25～75mm 径の河川礫を用いた。上流側水位 h_u を 5～6 段階にかえて、水路単位幅あたりの通水流量 q を測定し、遺伝的アルゴリズムを用いたパラメータ推定法^[4]により、

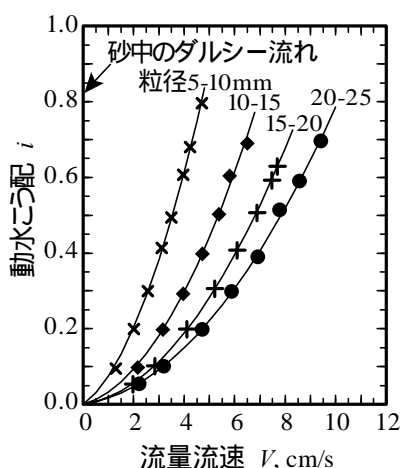


図 1 ロックフィルの 1 次元透水試験結果の一例
Typical result of one-dimensional permeability test.

*新潟大学農学部 Faculty of Agriculture, Niigata University, **新潟大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology, Niigata University, ***新潟県土木部六日町土木事務所(前新潟大学農学部) Muika-machi Administration Office, Dept. Civil Engineering, Niigata Prefecture. キーワード: ロックフィル, 非線形流れ, 水頭損失式

この $h_u \sim q$ 関係を最も適切に表す係数 A_0, B_0 を求めた。これによって得られた A_0, B_0 と m の関係をまとめると図2のようになる。ただし、室内1次元透水試験の A_0, B_0 は、図1に例示した $i \sim V$ 関係を、式(1)で直接に回帰して求めている。図2から、 A_0, B_0 と m の間にユニークな関数関係があることがわかる。これより、 m を介して、ロックフィル構造物の通水性能を適正に評価することが可能となる。図3に、矩形断面状の堤体で測定した自由水面と全水頭分布を、FEM 計算値と比較する。両者は良好に対応しており、図2に示す $A_0, B_0 \sim m$ 関係が実務的な記述精度をもつことを確認できる。

式(1)に示した係数 A の逆数はダルシー式の透水係数に対応する。また、係数 B は流れの乱流成分の寄与を表現する。通水量の推定値に占めるこれらの係数の影響を、上下流斜面こう配 1H: 1V の堤体を想定した FEM 数値実験により調べる。堤体は高さ $H=1.25\text{m}$ と 10m 規模の2ケースを想定する。 d が前者で 95mm 、後方で 750mm 程度のロック材を用いるとすると、先の水路試験における堤体の実績値より、それぞれ $m=0.5\text{cm}$ 、 4.0cm 程度となる。図4は、FEM 計算より得られた $h_u \sim q$ 関係を、 H で除してまとめたものである。これより、堤体の規模、したがって m の違いに関係なく、流量に占める係数 A の影響は極めて小さいことが分かる。つまり、ロックフィルを通る流れは、圧倒的に乱流成分で占められ、ダルシー式で表される層流成分、そして水温の影響はほぼ無視できることになる。

4. まとめ

ロックフィル構造物の通水性能を推定するために必要となる流れの水頭損失特性を、Forchheimer 式で表し、式に含まれる係数 A_0, B_0 が、間隙の水理学的平均径とユニークな関数関係をもつことを示した。この水頭損失式は、およそ 100mm 程度までの径の粒子で構成されるロックフィルに対し、寸法効果を考慮せずにそのまま使うことができる。本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金による補助（基盤研究(C) 11660238 および 14560196）を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献：[1] 森井：広範な粒径に適用できるロックフィルを通る流れの水頭損失式，農土学会応用水理研究部会講

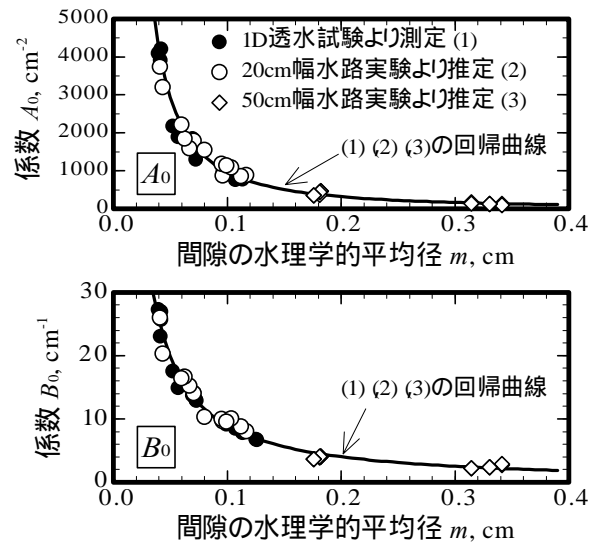


図2 係数 A_0, B_0 と m の関係
Unique relationship of A_0 and B_0 with m .

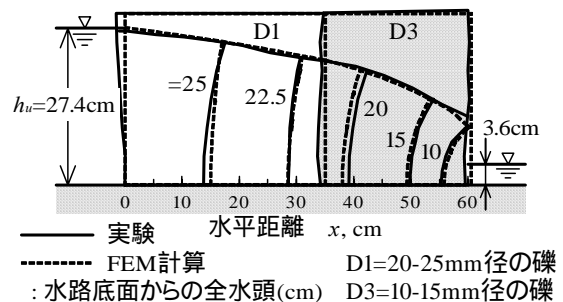


図3 係数 $A_0, B_0 \sim m$ 関係の実務性の検証
Examination of the relationship of A_0 and B_0 with m .

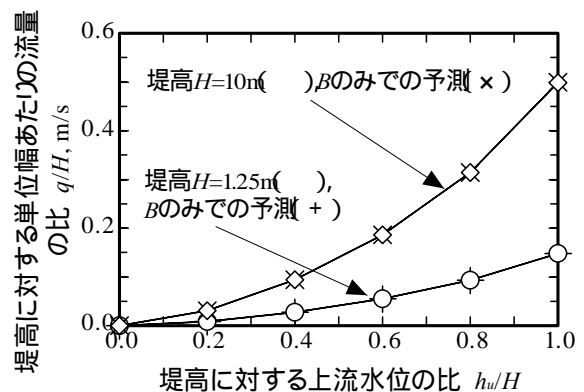


図4 係数 A, B が流量の推定量に占める割合
Estimation of discharge by Eq. (1) with and without A .

演集, 89-94, 2002. [2] 森井：ロックフィルを通る流れの非線形水頭損失式に関する室内実験検証，農土論集，217，119-124，2002. [3] Morii: Head loss equation to predict flow transmissibility of rockfill structures, 5th ICHE, Poland, CD-208, 2002. [4] 森井：ロックフィルを通る非線形流れのパラメータ推定，農土論集，218，89-95，2002.