1.はじめに

礫や砕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理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、 礫構造物を通る流れの水理特性を調べ、粒径100mm 程 度までの礫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。

2. ロックフィルを通る流れの水頭損失式

直径 10cm,長さ 100cm のアクリル製円筒にロック材を 充填し,室内1次元透水試験¹⁾を行った。試験には,5~ 25mm 径の河川礫を用いた。図 1 に試験結果の一例を 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 10⁻²cm/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 の流れが生じるのが分かる。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の非線形な水頭損失特性は,次のForchheimer式 でうまく記述することができる¹⁾。

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

ここで $A_0 \ge B_0$ は間隙の幾何構造のみに依存する係数,vは水の動粘性係数,ならびにgは重力加速度である。ロ ックフィルを通る流れに及ぼす水温の影響は,v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(Hydraulic mean radius of voids)mを導入した。

$$n = \frac{e \cdot d}{6r} \tag{2}$$

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¹⁾,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 A₀, B₀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 20 cm および 50 cm の室内水路を利用して,高さ 30~40 cm 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 5~25 cm に加え, 25~75 cm 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 を測定した。そして,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,この h_u ~q 関係をもっとも適切に表す係数 A_0 , B_0 を求めた。これ によって得られた係数 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次元透水試験による A_0 , B_0 は,図1に一例として示した $i \sim V$ 関係を,式(1)で直接 に回帰して求めている。図 2 から,係数 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。このことより, 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,室内水路試験で測定した流量を,非線形流 れの FEM 解析⁵⁾による計算値と比較する。また,図4 に は,矩形断面状の堤体で測定した自由水面と全水頭分



図2 係数 A_0 , B_0 とmの関係

布を, FEM 計算値と比較する。いずれも, FEM 計算値は 測定値に良好に対応しており,図2に示す A₀, B₀~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, 図 5 に示すモデル堤体を用いた FEM 数値実験により調 べる。堤体は高さ $H=1.25m \ge 10m$ 規模の2ケースを想定 する。d が前者で 95mm,後者で 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=0.5cm,4.0cm 程度となる。図 6 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 式を用いて 適切に記述することができた。式に含まれる係数 A₀,B₀ は,間隙の水理学的平均径とユニークな関数関係をもつ ことを明らかにした。この水頭損失式は,おおよそ 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。 今後,パラメータ推定法を利用して,さらに大きな m と係 数 A₀,B₀との関係を調べていく必要がある。

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),課題番号 11660238 および 14560196)を受けた。ここに記して謝意を表する。



図3 係数 A₀, B₀~m 関係の実務性の検証(1)



図4 係数 A₀, B₀~m 関係の実務性の検証(2)



図 5 係数 A, B の影響を調べるための数値実験堤体



図6 係数 A, B が流量の推定に占める影響

参考文献:1)森井他,農土論集,206,2000.2)森井,農 土論集,217,2002.3)Morii,5th ICHE,CD208,2002. 4)森井,農土論集,218,2002.5)森井他,農土論集, 206,2000.