

河床砂礫の透水性の測定とそれに基づく浸透特性の評価

森井俊広^{1*}・小越将仁²・鈴木哲也¹・河合隆行³

(平成25年8月23日受付)

要 約

フローティングタイプの頭首工の安定性は、固定堰下の河床砂礫を通過する浸透流による動水こう配と揚圧力分布に支配される。河床砂礫を通過する浸透流を予測するためには、その透水性を適切に評価しなければならない。しかし、河床砂礫は、最大粒径が数百 mm におよぶことから、通常のφ50あるいはφ100mmのモールドを用いた透水試験ではその透水性を測定することは難しい。本研究では、大粒径粒子を含む河床砂礫の透水性の試験法を提案し、測定した透水係数に基づき、固定堰下で生じる浸透特性（動水こう配と水圧の分布）を調べるとともに、河床砂礫の透水性を規定する因子（粒径）について考察する。

新大農研報, 66(1):49-55, 2013

キーワード：河床砂礫、室内水路実験、水理学的平均径、透水性、非線形パラメータ推定

はじめに

代表的な河川構造物であるフローティングタイプの頭首工の安定性は、固定堰下の河床砂礫を通過する浸透流による動水こう配と揚圧力分布に支配される。河床砂礫を通過する浸透流を予測するためには、その透水性を適切に評価しなければならない。しかし、河床砂礫は、最大粒径が数百 mm におよぶことから、通常のφ50あるいはφ100mmのモールドを用いた透水試験ではその透水性を測定することは難しい。

本論文では、まず、大粒径粒子を含む河床砂礫の透水性の室内試験法を提案し、それにより測定した透水係数に基づき、浸透流解析により頭首工の固定堰下で生じる浸透特性（動水こう配と水圧の分布）を調べる。最後に、室内試験法でえられた河床砂礫材の透水性を分析し、透水性を規定する因子について考察する。これにより、一般に、河床砂礫は透水性が大きく多量の浸透流が生じているであろうとするイメージが実際的でないことを指摘する。

大粒径粒子を含む河床砂礫の透水性の室内試験法の提案

河床砂礫の採取と粒度特性

新潟県を流れる大規模河川の頭首工において、保全管理工事の必要から河川の縮切りが行われた。仮縮切り内のゲート上流部（図1）で、バックホーを用いて深さ50cmあたり、ならびにさらに掘削して深さ50～100cmあたりの河床砂礫を採取した。図2aに採取した直後の河床砂礫を示す。これを室内に搬入し気乾させたのち、ふるい分けを行った。分級した状態の河床砂礫を図2bに示す。

採取した河床砂礫には粒径75mm以上の石分が含まれるため、JGS 0132に準拠して粒度試験を実施した。粒径加積曲線

を図3に示す。土の工学的分類方法（地盤工学会, 2000）によると「砂まじり礫（G-S）」に分類される。ふるい分けした125～300mm、125～75mm、53～75mm、37.5～53mm、21.5～37.5mm、19～21.5mm、9.5～19mmおよび4.75～9.5mmの粒径区分から、無作為に50個程度の礫粒子を取りだし、それぞれの粒子の長軸の長さ、短軸の長さ、そして両者に直交する中軸の長さを測定した。粒子形状を、Zinggの分類法（Sabin and Hansen, 1994）にしたがいまとめると、図4のようになる。粒径が大きなものから小さいものになるにしたがい、板状および葉状から球状になる傾向がある。



図1 河床砂礫を採取した頭首工のゲート上流部の仮縮切り内ヤード

¹ 新潟大学農学部

² 新潟県十日町地域振興局

³ 新潟大学災害・復興科学研究所

* 代表著者：morii@agr.niigata-u.ac.jp



a 採取直後の河床砂礫



b ふるい分けにより分級した様子

図2 採取した河床砂礫

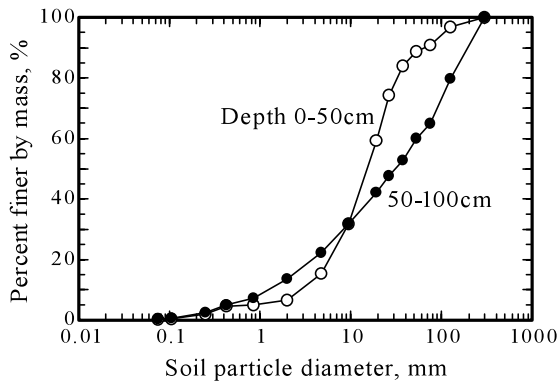
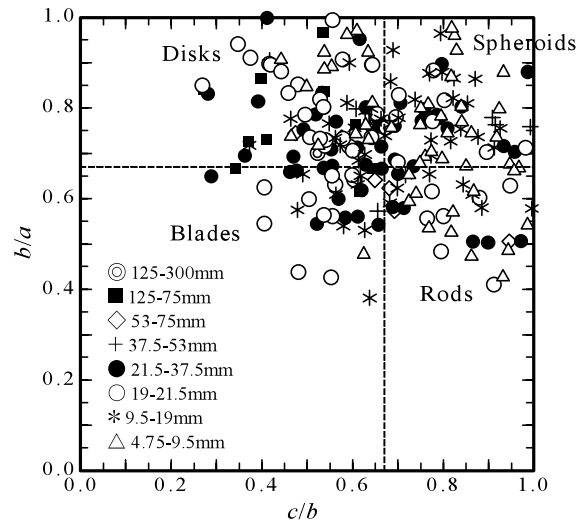


図3 河床砂礫の粒度分布

大型水路を用いた透水試験と透水のパラメータ推定

幅50cmの大型水路に、河床砂礫を締め固めて直方体状の堤体を築造したのち、上流側水位を何段階かに変えて通過する流量を測定した。これによってえられる水位流量曲線を逆解析することにより、河床砂礫材の透水パラメータを推定した。図5aに、水路内に築造した河床砂礫の堤体を示す。堤体と水路



a: longest diameter of particle,
 b: intermediate diameter of particle, and
 c: shortest diameter of particle.
 a, b and c were measured inter-perpendicular.

図4 河床砂礫の粗粒分および石分の粒子形状

のガラス側壁との間には、メッシュ状のビニールネットを挿入した。図5bは、堤体の上部からみた砂礫の分布状況である。大粒径の礫粒子の間に砂分がくまなく充填されている様子を見ることができる。

透水パラメータの推定にあたり、河床砂礫の透水性能は、次の Forchheimer 式でモデル化した (Morii *et al.*, 2004; 森井, 2004)。つまり、

$$i = A \cdot V + B \cdot V^2 \tag{1}$$

ここで、 i は動水こう配、 V は流量流速である。係数 A および B は、理論的に、次のように表わすことができる。

$$A = \frac{A_0 \cdot \nu}{g} \tag{2}$$

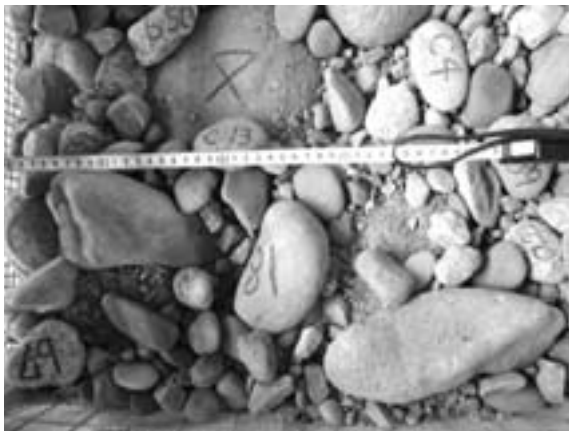
$$B = \frac{B_0}{g}$$

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、そして g は重力加速度である。 A 、 B および A_0 、 B_0 は、それぞれ、 $[TL^{-1}]$ 、 $[T^2L^{-2}]$ および $[L^2]$ 、 $[L^{-1}]$ の次元をもつ。式 (1) に ν が含まれているため、逆解析に際しては、試験中の水温の効果も考慮することができる。非線形計算には逐次近似法を導入した FEM を、逆解析によるパラメータの推定には遺伝的アルゴリズムを用いた (Morii, 2002; 森井, 2002)。

図6に、河床砂礫を用いた水路試験で測定した水位流量曲線と、逆解析により推定した流量を比較する。計測値と推定値はおおむね良好に対応している。この逆解析により得られた河床砂礫の透水パラメータは $A_0 = 60008.0 / \text{cm}^2$ および $B_0 = 172.29 / \text{cm}$ であった。



a 水路内に築造した砂礫堤体（右が上流側）



b 堤体上部からみた砂礫の締固め状況

図5 大型水路を用いた透水試験

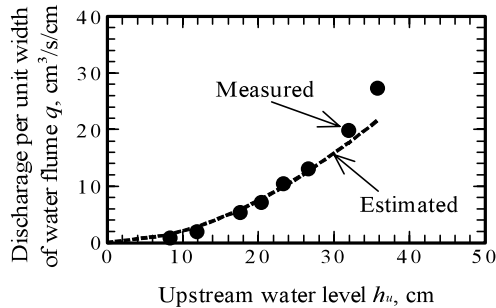


図6 水路内の砂礫堤体で測定した水位流量データおよび逆解析による推定曲線との比較

固定堰下で生じる浸透特性

非線形浸透流計算

非線形 FEM 計算により、大規模河川の頭首工の構造規模を想定した固定堰下の浸透特性を調べる。河床砂礫は式 (1) および (2) にしたがう非線形透水材料として、前章で推定した

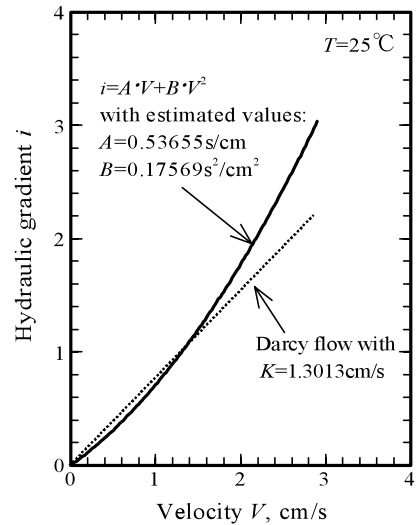


図7 河床砂礫、線形透水性の材料ならびに非線形透水性の程度が大きいロックフィル材の透水性能



図8 非線形透水性の程度が大きいロックフィル材（粒径50～75mmの粗礫）

透水パラメータ A_0 および B_0 を適用する。水温は 25°C を設定する。図7は、式 (1) および (2) により、この河床砂礫の非線形透水性を $i \sim V$ 関係に表したものである。比較のため、この河床砂礫の動水こう配1以下の透水性とおおむね対応する線形の透水性をもつ材料を想定し、ダルシー流れの浸透流計算を行う。図7より、動水こう配1以下の範囲で、透水係数は $K = 1.3013 \text{ cm/s}$ と見積もることができる。この場合、 $A = 1/K = 0.7685 \text{ s/cm}$ であるから $A_0 = 85945.5 / \text{cm}^2$ 、 $B_0 = 0$ となる。河床砂礫、ならびにこの線形透水材料のいずれにしても、その透水性は粗粒土の中でも小さい方にグルーピングされる。このため、非線形な透水性の影響をより拡大して調べる目的で、非線形性の程度がかなり大きな材料を、一連の非線形浸透流計算で取り上げることとする。透水パラメータは $A_0 = 167.36 / \text{cm}^2$ および $B_0 = 2.5267 / \text{cm}$ とする。動水こう配がわずかに増えると急激に流速が大きくなり、図7では、 $i \sim V$ 曲線は x 軸に重

なっているように見える。このような非線形性が強い材料は、たとえば図8に示すように、粒径が区分されて砂分を含まないようなロックフィル材が該当する。ここで図8に示す礫の粒径は50～75mmであり、締め固めた場合の間隙比はおおよそ0.6程度である (Morii *et al.*, 2003)。

固定堰下の浸透流動

上流エプロン長 10.5m、ケーソンの厚さ 4m、深さ 11m、および下流エプロン長 28m の規模をもつ固定堰を想定する。河床砂礫の厚さは 25m とし、底面は不透水境界とする。上流側水位は 5.5m とし、下流側には水深がない状態を考える。

図9に水圧分布と流速ベクトルを示す。上段の図から河床砂

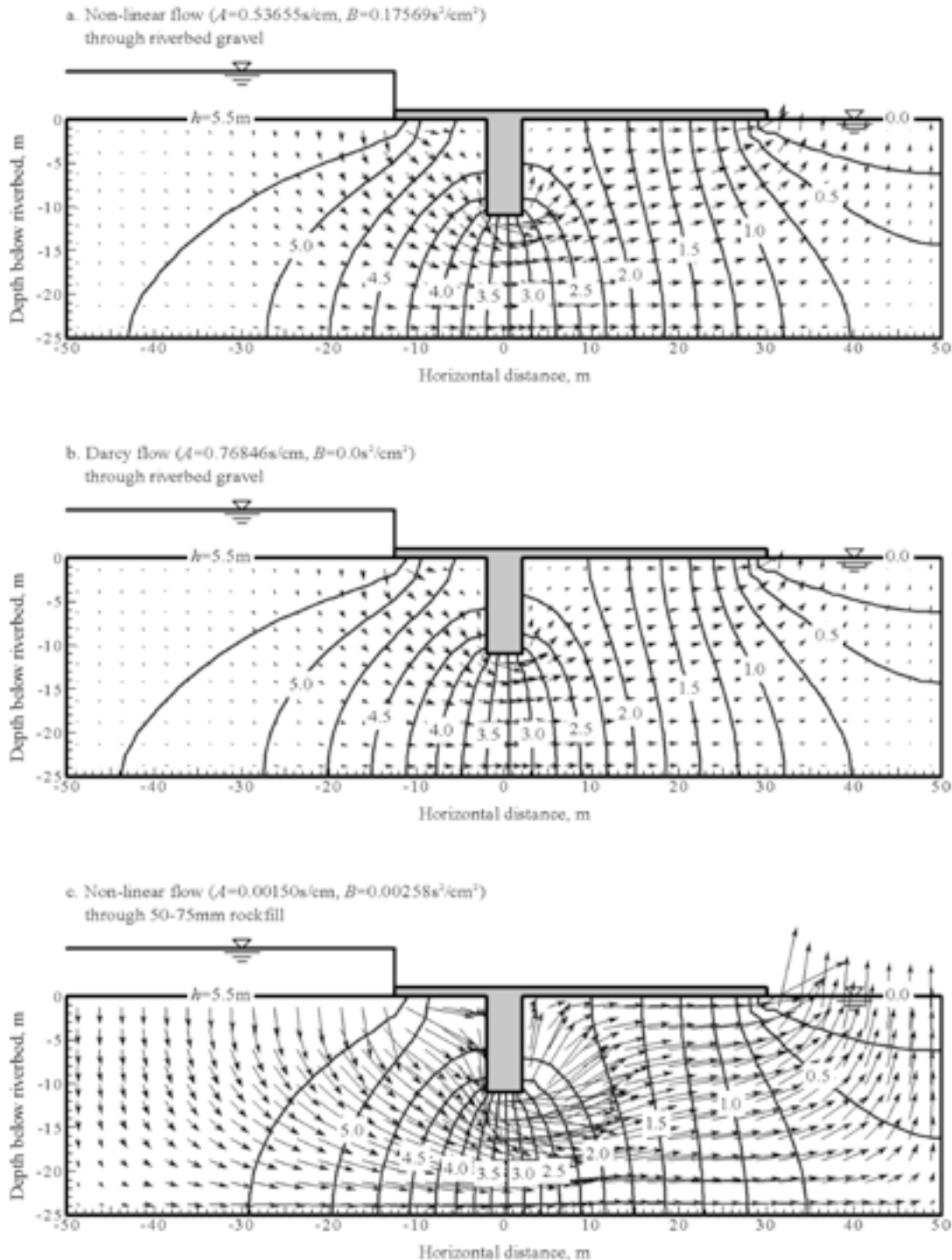


図9 頭首工固定堰下の浸透流動にともなう水頭分布と流速 (非線形 FEM 計算による)

礫、線形透水性の河床砂礫、ならびに非線形性の強いロックフィル材の計算結果である。いずれも、上流の流入流量と下流の流出流量の平均値に対する誤差は0.01%以下となっている。図9cの流速ベクトルは、9aおよび9bを基準にすると、実際はさらに10倍の大きさとなる。図9より、ケーソン先端とその背面でかなり大きな流速になることが分かる。河床砂礫と線形透水性の河床砂礫を比較すると、もともと河床砂礫の非線形性はあまり強くなく、透水性自体も低いことから、非線形な透水性が浸透挙動に及ぼす影響はほとんどみられない。しかし、非線形透水性の強いロックフィル材と比べると、ケーソン先端の動水こう配が大きくなるとともに、ケーソン背後で水圧分布に変化が生じる。

上下流のエプロン底面とケーソン周面を合わせたクリープ長に沿って、水圧と動水こう配の変化をまとめると、図10のようになる。図10aから、ケーソン前面から背面にかけて水圧が大きく変化すること、またその変化は、非線形透水性の度合いが大きくなると対応して大きくなること分かる。同図に一点鎖線で示した直線は、BlighがExit gradientを算出する際に仮定した直線状の水圧分布 (Novak *et al.*, 2007) であるが、河床材料が線形透水性、非線形透水性のいずれであっても、そのように単純なものでないことが分かる。図10bは、クリープ長に沿った動水こう配の変化をまとめたものである。流入部と流出部で動水こう配は大きくなり、エプロンとケーソンが接合する隅角部ではほとんど動水こう配が生じていない。最大の動

水こう配は、ケーソンの先端部で生じることになる。特にエプロン末端の流出部とケーソン先端部では、Blighが仮定したExit gradientをかなり上回る動水こう配が発生すると考えられる。

河床砂礫の透水性を規定する因子

水理学的平均径の導入

式(2)の係数 A_0 と B_0 は間隙の幾何構造のみに依存し、水理学的平均径 (Hydraulic mean radius) m と一価的な関係をもつことが分かっている (森井, 2002)。 m は次式で定義される。つまり、

$$m = \frac{e \cdot d}{6 \cdot r_e} \quad (3)$$

ここで e は河床砂礫堆積層やロックフィルの間隙比である。 d は砂礫粒子の集合体の代表的粒径であり、集合体としての透水性を規定する因子と考えることができる。 r_e は土粒子の形状係数であり、前出の図4の粒径の分布状況から1.9程度になると推察される。

河床砂礫の透水性を規定する土粒子径

これまでの室内1次元透水試験と水路実験から、 A_0 および B_0 と m との一価的な関係として、図11が得られている (Morii,

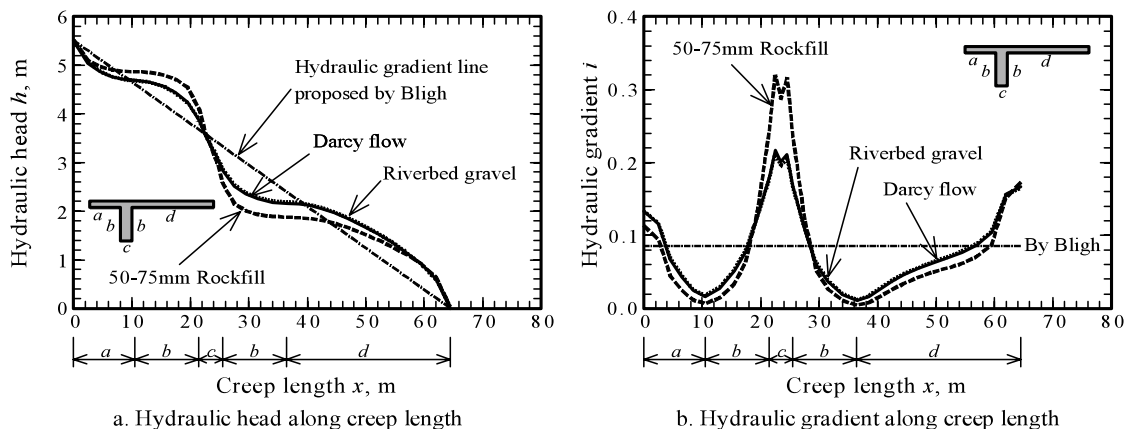


図10 固定堰下のクリープ長に沿った水頭および動水こう配の変化

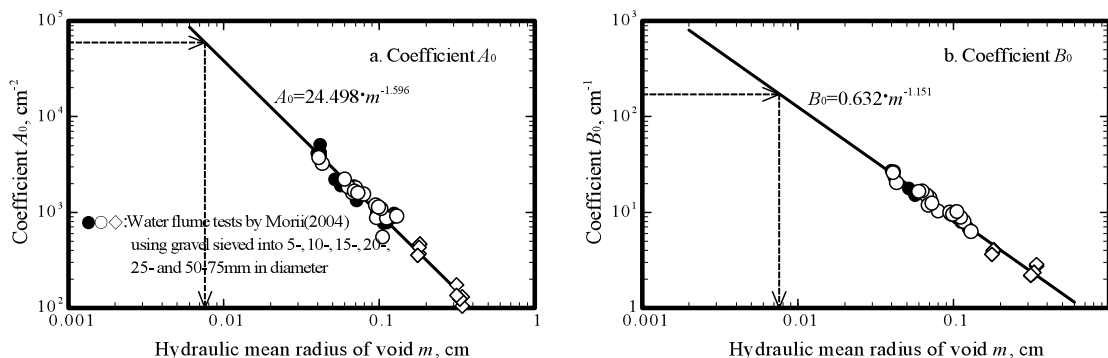


図11 非線形透水性を表すパラメータ A_0 および B_0 と水理学的平均径 m との関係、ならびに河床砂礫の透水性を規定すると考えられる代表的粒径の推定

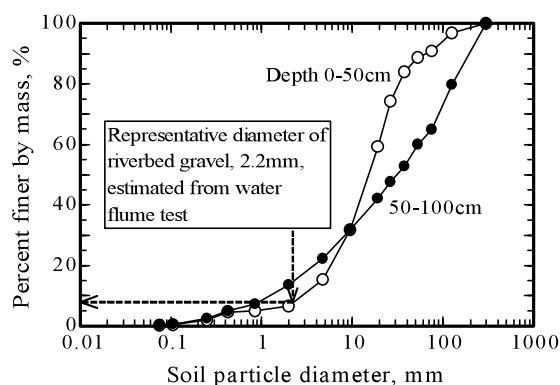


図12 河床砂礫の透水性を規定する砂分の代表的粒径と有効径との対応

2002)。前々章の水路試験でえられた $A_0 = 60008.0/\text{cm}^2$ および $B_0 = 172.29/\text{cm}$ に対応する m を求めると、図 11a、11b のいずれからでも $m = 0.0076\text{cm}$ となる。水路試験で築造した堤体の間隙比は 0.389 であるから、式 (3) より、 $d = 0.22\text{cm}$ がえられる。この粒径を、前々章で測定した粒径加積曲線におとすと、図 12 のように、通過質量百分率はおよそ 10% 程度となる。つまり、数百 mm におよぶ大粒径の石分を含む河床砂礫であるが、その透水性は、大きな粒径の礫や石分の空隙内に充てんされた砂粒子に支配されていると考えることができる。そして、そのうちもっとも支配的な影響をもつ代表的粒径は、図 12 から、有効径 d_{10} あたりにあるといえるかもしれない。もちろん、図 11 および図 12 はまだ 1 回だけの試験による結果であり、今後、試験データの蓄積が必要であることは十分に理解しているが、たとえば、透水係数の推定式として著名な Hazen の式 (澤, 2009) にもみられるように、 d_{10} が、大粒径の石分が混じる河床砂礫の透水性に支配的な影響をもつと考えても、あながち非現実的ではない可能性がある。

まとめ

新潟県を流れる大規模河川の頭首工において河床砂礫を採取し、その非線形透水性を測定するとともに、固定堰下の浸透特性を FEM 計算により調べた。次のことが判明した。

- 1) 大型水路に築造した堤体で測定した水位流量曲線より、FEM 逆解析法を用いて、精度よく非線形透水パラメータを推定することができた。
- 2) 非線形浸透流解析により、固定堰下の浸透特性を調べた。水圧は、クリーブ長に沿って非直線的に変化し、エプロン末端の流出部では、Bligh の仮定する Exit gradient より大きい動水こう配が生じることが確認できた。河床砂礫は、もともと透水性が低く非線形透水性の程度も小さいため、浸透流特性のおよぼす非線形透水性の影響は

ほとんどないと考えてよいことが分かった。

- 3) 大粒径の粗礫や石分を含む河床砂礫であっても、その透水性は、粗礫や石分の空隙内に充てんされた砂粒子に支配されていると考えることができる。そして、そのうちもっとも支配的な影響をもつ代表的粒径は、有効径あたりにある可能性が高い。

最後に、本研究を取りまとめるにあたり、公益社団法人農業農村工学会ダム研究委員会の顧問沢田敏男先生ならびに委員長谷川高士先生には多大なご助言をいただいた。ここに厚くお礼申しあげます。採取した河床砂礫の水路試験を行うにあたり、北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所の佐藤一史氏と鷲尾潤一氏よりご支援をいただいた。合わせて、厚くお礼申しあげます。

引用文献

- 地盤工学会(編). 2000. 土質試験の方法と解説 第1回改定版. 地盤工学会, pp.213-245.
- 森井俊広. 2002. 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. 農業土木学会論文集, **217**: 119-124.
- 森井俊広. 2002. 遺伝的アルゴリズムを用いた非ダルシー流れのパラメータ推定. 新潟大学農学部研究報告, **54(2)**: 159-167.
- Morii, T. 2002. Head loss equation to predict flow transmissibility of rockfill structures. *Proceedings of the Fifth International Conference on Hydrosience and Engineering, Warsaw, Poland*. Abstracts: 140-141; PDF-208.
- Morii, T., Takeshita, Y., and Hasegawa, T. 2002. Hydraulic design of flowthrough rockfill embankments. *Proceedings of the Third International Conference on Dam Engineering, Singapore*. 205-212.
- Morii, T. 2003. Determination of hydraulic conductivity of sand sediment soil taking an inclusion of gravel and cobbles in to account. *Bulletin of Faculty of Agriculture, Niigata University*, **55(2)**: 161-167.
- 森井俊広. 2004. ロックフィルを通る流れの水頭損失式. 農業土木学会論文集, 230: 91-98.
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C. and Narayanan, R. 2007. *Hydraulic Structures*, Taylor & Francis, London and New York, pp.369-372.
- Sabin, C. W. and Hansen, D. 1994. The effects of particle shape and surface roughness on the hydraulic mean radius of a porous medium consisting of quarried rock. *Geotechnical Testing Journal*, **17(1)**: 43-49.
- 澤孝平(編著). 2009. 地盤工学, 第2版, 森北出版株式会社, 東京. pp.41-48.

Laboratory Measurement of Permeability of Riverbed Sediment and Prediction of Seepage Flow under River Weir

Toshihiro MORII¹*, Masahito OKOSHI², Tetsuya SUZUKI¹ and Takayuki KAWAI³

(Received August 23, 2013)

Summary

Hydraulic stability of river weirs (head works) is dominated by hydraulic gradient and uplift pressure caused by seepage flow through riverbed sediment under the weir. To predict the seepage flow through the riverbed sediment, permeability or transmissibility of the riverbed sediment consisting of sand and gravel should be measured properly. As the riverbed sediment includes usually large gravel particles a few hundred millimeters in diameter, it is difficult to use the usual permeability test equipment employed in the usual soil tests to measure coefficient of permeability. In this paper, a new permeability test which employs laboratory water flume test together with numerical parameter estimation is proposed. The coefficient of permeability of the riverbed sediment is determined by the proposed permeability test, and the seepage flow through the riverbed sediment is calculated by numerical non-linear seepage analysis to investigate the hydraulic gradient and the uplift pressure under the base of the base floor. Finally, a hydraulic mean radius of the riverbed sediment is estimated from the coefficient of permeability measured, and is related to grain size distribution of riverbed sediment in order to show the particle size of sand or gravel which dominantly determines the permeability of the riverbed sediment.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 66(1):49-55, 2013

Key words : Riverbed sediment, Laboratory water flume test, Hydraulic mean radius, Permeability, Numerical parameter estimation

¹ Faculty of Agriculture, Niigata University

² Tokamachi Regional Office, Niigata Prefectural Government

³ Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University