

# パッカー法を用いた砂礫河床における透水係数の測定 Measuring hydraulic permeability in a streambed using packer test

山田 浩之<sup>1</sup>・中村 太士<sup>1</sup>・渡邊 康玄<sup>2</sup>・村上 まり恵<sup>1</sup>・野上 毅<sup>2</sup>  
Hiroyuki Yamada<sup>1</sup>, Futoshi Nakamura<sup>1</sup>, Yasuharu Watanabe<sup>2</sup>,  
Marie Murakami<sup>1</sup> and Takeshi Nogami<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北海道大学大学院農学研究科森林管理保全学講座

<sup>2</sup>独立行政法人北海道開発土木研究所環境水工部環境研究室

<sup>1</sup>Department of Forest Science, Graduate School of Agriculture, Hokkaido University

<sup>2</sup>Civil Engineering Research Institute

## 1. はじめに

河床間隙水域 (hyporheic zone: Orghidan 1959) は、河川生物相の生息場、あるいは河川生態系における物質の滞留や分解の場として重要な環境要素である (e.g. Williams 1993; Wondzell and Swanson 1999). この河床間隙水域の特性を把握するためには、精度が良く、多くの河床で透水係数を得ることが重要である。しかし、これまで河床で用いられてきた単孔式透水試験は、透水性が比較的良い地盤では水位の時間変化が極端に早いことから、透水係数の測定が困難であった。その為、現地において確実かつ簡便に計測できる透水試験が求められている。パッカー法は、透水性が比較的良い地盤でも適用可能な定常法の単孔式透水試験であり、非定常法で実施される水位の時間変化の測定を必要とせず、しかも精度の良い方法であると報告されている (西垣 1986a)。また、河床においても有効な方法である (村上ほか 印刷中; 山田・中村 2001)。しかし、間隙の大きい河床では、乱流が生じていると考えられ、そのような河床でダルシー則を適用した透水試験を実施した場合、透水係数は過大評価される (Pollard 1955; Terhune 1958)。また、河床表面近傍の流速は表流水の流速に影響される (Shimizu et al. 1990)。そのため、表流水の影響が、パッカー法で得られる透水係数に及ぼす影響を検討する必要がある。

そこで、本研究ではパッカー法を用いて、乱流における透水係数の算定式を構築し、水理実験による検証を行った。さらに、表流水の流速が透水係数に及ぼす影響についても検討した。

## 2. 土中の水の流れ

間隙の水の流れが層流であるとき、水頭勾配と見かけ流速の関係は、ダルシー則により説明される。間隙の水の流れが乱流になると、エネルギー損失が生じ、水頭勾配と見かけの流速に比例関係が成立しなくなる。Louis (1967) は、乱流である場合、(1)式に示すように見かけ流速( $v_a$ )は水頭勾配( $I_h$ )の1/2乗に比例すると指摘している。

$$v_a = -ak_t (I_h)^{1/2} \quad (1)$$

このように、見かけ流速と水頭勾配の関係は、乱流あるいは層流という水の流れの状態によって変化する。乱流および層流の状態は、(2)式に示すレイノルズ数(Re)により説明される。一般的に、土中の水の流れは、Reが10以上になると乱流、Reが1以下で層流になると考えられている (Leonalds 1962)。

$$Re = \frac{v_a d_m}{\nu} \quad (2)$$

ここで、 $d_m$ は土粒子の中央粒径(cm)、 $v_a$ は見かけの流速(cm/sec)、 $\nu$ は動粘性係数(cm<sup>2</sup>/sec)である。

## 3. パッカー法を用いた乱流における透水係数の誘導

パッカー法の試験方法は、井戸孔内の試験区間に一定圧(h)を作用させ、定常になった状態での流出流量( $Q_p$ )を測定して透水係数を求める方法である (図-1)。間隙中の水の流れがダルシー則の適用範囲である場合、パッカー法による透水係数は次式によって算出される (Hvorslev 1951; 西垣 1986b)。

$$k_{pd} = \frac{Q_p}{2\pi hl} \sinh^{-1} \left( \frac{l}{2r_w} \right) \quad (l/r_w < 8) \quad (3)$$

ここで、 $k_{pd}$ はダルシー則を仮定した透水係数 (cm/sec),  $r_w$ は井戸内半径 (cm),  $l$ は、試験区間長 (cm)である。

乱流における透水係数は、(3)式の誘導過程でダルシー則の代わりに、(1)式を適用することで得られ、その解は、次式により示される。

$$k_{pt} = \frac{Q_p}{4\pi lh^{1/2}} \int_0^l \frac{1}{\left( r_w^2 + \left( \frac{l}{2} - \xi \right)^2 \right)^{3/4}} d\xi \quad (4)$$

ここで、 $k_{pt}$ は乱流を仮定した透水係数 (cm/sec)である。なお、右辺の積分により示される関数は、井戸内半径 ( $r_w$ )と試験区間長 ( $l$ )が一定の場合、定数となる。これを、シンプソンの積分公式を用いて計算した。

#### 4. 実験方法

1) 実験水路の設定: 水理実験は、延長 25m, 高さ 1m, 幅 1m の実験水路を用いて行った(図-2)。実験区間を水路中の流れが安定する水路の中央の位置に設定した(図-2)。この実験区間に河床材料をできるだけ均質になるように高さ 50cm まで充填した。河床材料は、山地河川でみられる河床材料の粒度分布を参考にして、4つの異なる粒度の材料を用いた(図-3)。河床材料 1(M-1)は、最も粗い粒度、河床材料 4(M-4)は、最も細かい粒度である。

2) 河床勾配および流量の設定: 河床勾配は、山地河川の河床勾配を想定し、かつ乱流が生じるように 1/50, 1/100, 1/200 に設定した。その際、表流水が透水係数に及ぼす影響を検討するため、流量は各河床勾配で表流水がある場合とない場合の2つの条件を設定した。表流水がない場合の流量は、実験区間内が等流になり、かつ水位が河床高 (50cm) になる流量を

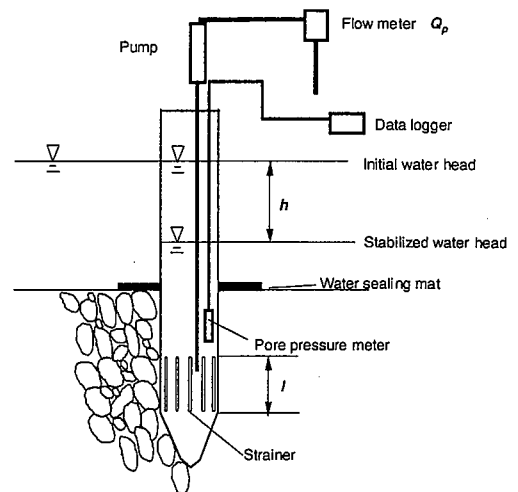


図-1. 単孔式透水試験パッカー法

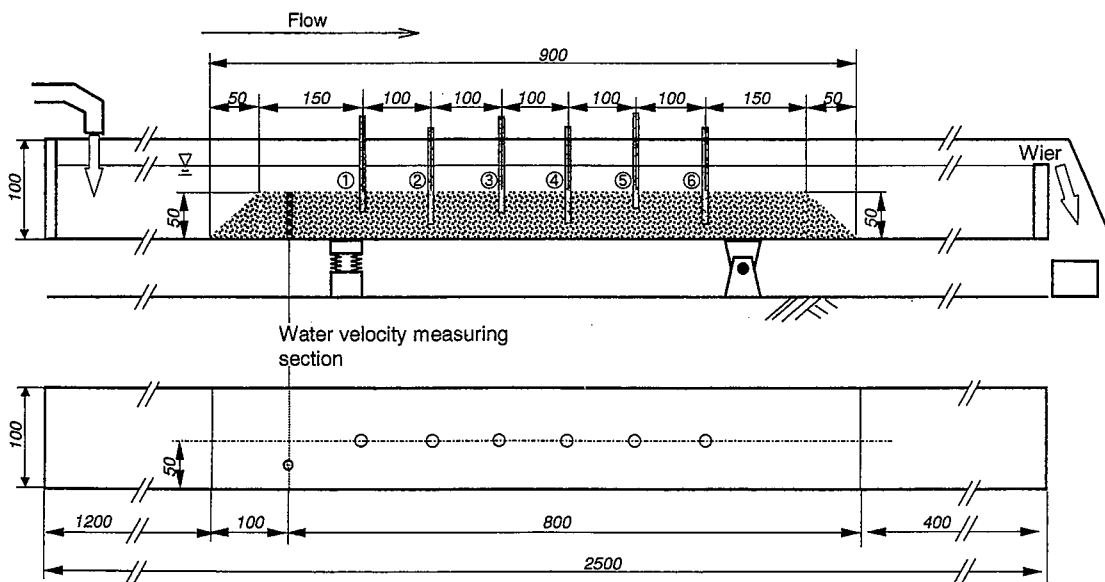


図-2. 実験水路と単井戸の設定(単位: cm).

設定した。表流水がある場合の流量は、各河床勾配において実験区間内で等流になる流量を設定した。また、表流水がない場合において、水位をポイントゲージにより測定し、水頭勾配を算出した。

3) 単井戸の設置: 本研究で用いた井戸は、内径 4.6cm の鉄パイプ製杭の先端に 5cm の試験区間(ストレーナ)を設けたものである。この井戸を実験区間に 1m 間隔で 6 本設置した(図-2)。なお、試験区間を河床表面から深さ 12.5-17.5cm と 32.5-37.5cm に、交互に高さを変えて設置した。各井戸にポンプおよび間隙水圧計を挿入し、パッカー法による透水試験を行った。なお、揚水流量は、フローメーターを用いて  $0.1\text{cm}^3/\text{sec}$  まで、水位は 0.1cm まで測定した。

## 5. 結果および考察

1) 河床内の水の流れの判別: 見かけの流速と水頭勾配の関係およびレイノルズ数から、乱流および層流について検討した。その結果、全ての河床材料で見かけの流速は、水頭勾配の  $1/2$  乗に比例しており、全ての河床材料における水の流れは乱流であると考えられた。一方、 $Re$  は河床材料 1 で 10 から 290 の範囲、河床材料 2 では 9 から 15 の範囲、河床材料 3 および 4 では 1 から 4 の範囲であった。従って、河床材料 1 では  $Re$  が 10 を超えることから、完全な乱流、河床材料 2・3・4 では  $Re$  が 1 から 10 程度であることから、乱流と層流の遷移領域であると考えられた。

2) パッカー法と水理実験により得られた透水係数の比較: 水理実験における透水係数は、乱流を仮定した透水係数( $k_{ht}$ )を算出した。パッカー法による透水係数は、(3)式により得られるダルシー則を仮定した透水係数( $k_{pd}$ )、(4)式より得られる乱流を仮定した透水係数( $k_{pt}$ )の 2 つの透水係数を算出して、これらの 3 つの透水係数を比較した。その際、温度による影響を排除するため、 $10^\circ\text{C}$ における透水係数に統一した。その結果、河床材料 2, 3, 4 で、 $k_{pd}$  は  $k_{ht}$  とほぼ一致した(図-3(a))。これは、流れが乱流と層流の遷移領域にあり、ダルシー則で近似される範囲にあったためと考えられる。しかし、完全な乱流であった河床材料 1 では  $k_{pd}$  は  $k_{ht}$  に比べ約 5 倍も高くなった(図-3(a))。従って、完全な乱流が生じている場合、ダルシー則を仮定した透水係数( $k_{pd}$ )は、実際の透水係数よりも大きくなると考えられた。一方、 $k_{pt}$  は全ての河床材料で  $k_{ht}$  とほぼ一致し(図-3(b))、特に、河床材料 1 では、 $k_{ht}$  と  $k_{pt}$  は有意に一致した(T-test,  $p < 0.05$ )。従って、完全な乱流および遷移領域において、(4)式より得られる透水係数( $k_{pt}$ )は、実際の透水係数を精度よく評価していることが明らかになった。これらのことから、地下水の流れが完全に乱流になれば、乱流を仮定した透水係数( $k_{pt}$ )を用いる必要があると言える。

3) 表流水が透水係数に及ぼす影響: 表流水の流速の増加に伴い、河床表面近傍の流速が大きくなることが知られている(Shimizu et al. 1990)。本結果でも、同様な傾向が得られた。このような表流水の流速の大きさが、パッカー法で得られる透水係数に及ぼす影響を検討するため、表流水がある場合の透水係数( $k_{ptf}$ )と表流水がない場合の透水係数( $k_{pt}$ )の比( $k_{ptf}/k_{pt}$ )と表流水の平均流速の関係について検討した。その結果、全ての河床材料で  $k_{ptf}/k_{pt}$  は、1 より大きくなる場合が多く、0.8 から 2 の範囲でばらついていた(図-4)。しかし、流速の増加に対する  $k_{ptf}/k_{pt}$  の変化は認められず(図-4)、表流水の流速がパッカー法で得られる透水係数に与える影響はわずかであることが得られた。これを考慮すれば、 $k_{ptf}/k_{pt}$  が 1 よりも大きくなるのは、表流水の流速の影響ではなく、表流水が河床に浸入する影響であると考えられた。従って、パッカー法により正確な透水係数を測定するには、井戸周辺において表流水の河床への浸入をできるだけ阻止する必要があると言える。

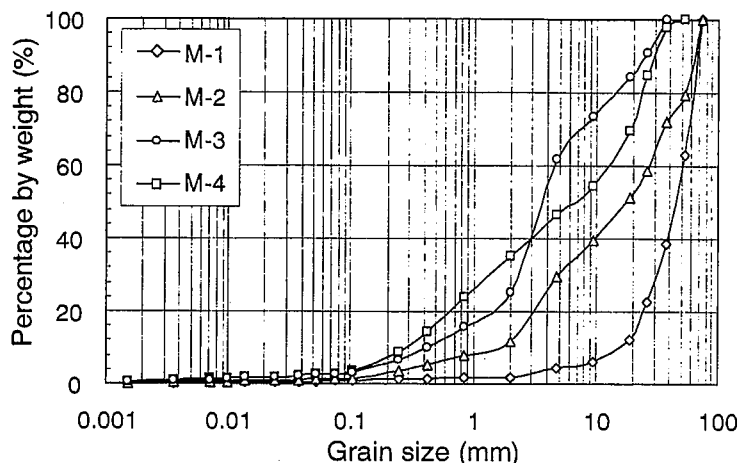


図-3. 各河床材料の粒度曲線。

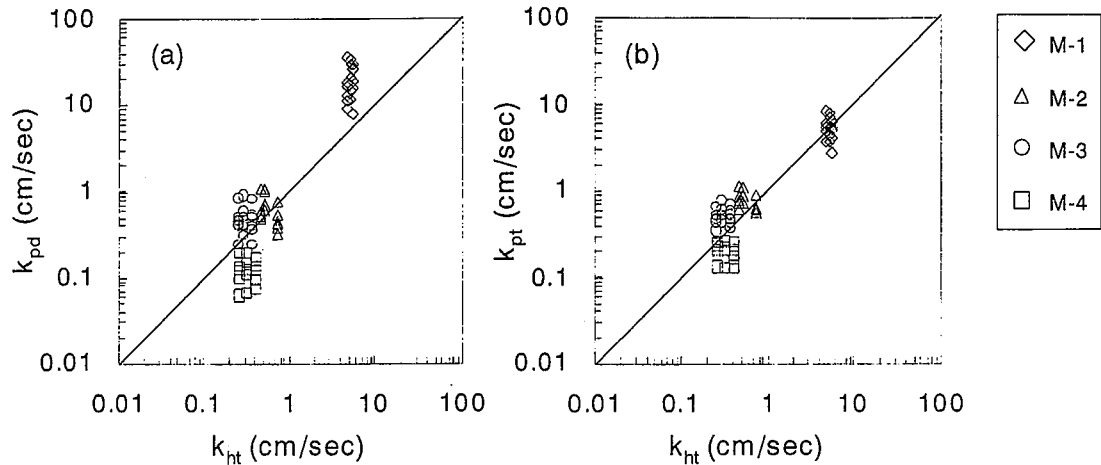


図-3. 実験水路およびパッカー法で得られた透水係数の比較。

## 6. おわりに

本研究で構築した透水試験ならびに透水係数の算出式は、表流水の流速の大きさに影響を受けず、乱流における透水係数を精度よく評価することが明らかになった。この透水試験は、井戸の設置を含め一箇所につき 20 分程度で計測が終了することから、野外調査において簡便な方法であると言える。また、砂礫河床の透水試験として有効な方法であることから、今後の河床間隙域の評価研究の発展に期待できる。なお、本研究の一部は(財)河川環境管理財団による河川整備基金助成、(財)リバーフロント整備センターおよび(社)砂防学会ワークショップによる助成を受けた。また、本研究を進めるにあたり、岡山大学環境理工学部の西垣誠教授、小松満助手、北海道大学農学部の新谷融教授、山田孝助教授、菊池俊一助手には、有益な助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

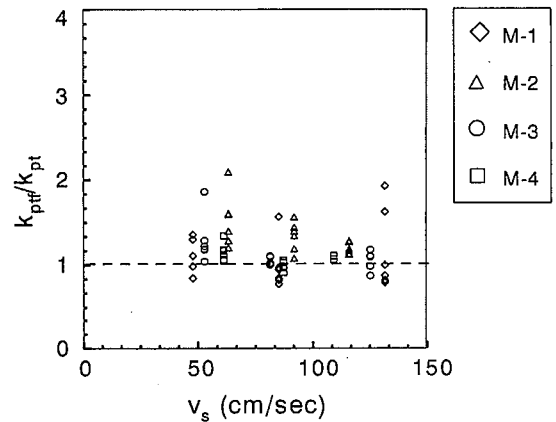


図-4. 表流水の流速と  $k_{pt}/k_{pd}$  の関係。

## <引用文献>

- Hvorslev M. J. 1951. Time lag and soil permeability in ground-water observations. Bull.36,50pp., U.S. Corps of Eng., Waterways Exp. Sta., Vicksburg, Miss.\*
- Leonalds, G. 1962, Foundation Engineering, McGraw-Hill, pp.124-127.
- Louis, C. 1967. Strömungsvorgänge in klüftigen Median und ihre Wirkung auf die Standsicherheit von Bauwerken und Böschungen im Fels, Ph.D. thesis, Inst. für Bodenmechan. und Felsmechan.,no. 30, Univ. Karlsruhe, Karlsruhe.\*
- 村上まり恵, 山田浩之, 中村太士 印刷中. 北海道南部の山地小河川における細粒土砂の堆積と浮き石および河床内の透水性に関する研究, 応用生態工学研究会誌
- 西垣誠 1986a. 単孔式原位置透水試験法の諸問題, 地下水と井戸とポンプ, 28, 5, 1-13.
- 西垣誠 1986b. 単孔式原位置透水試験法の整理(その2), 地下水と井戸とポンプ, 28, 3, 15-24
- Orghidan, T. 1959. Ein neuer Lebensrum des unterirdischen Wassers, der hyporheische Biotop. Archiv für Hydrobiologie 55, 392-414.
- Pollard, R. A. 1955. Measuring seepage through salmon spawning gravel beds, J. Fish. Res. Bd. Canada, 12, 5, 706-741.
- Shimizu, Y. T. Tsujimoto, H. Nakagawa 1990. Experiment and macroscopic modeling of flow in highly permeable porous medium under free-surface flow, Journal of hydrosciences and Hydraulic Engineering 8, 69-78.
- Terhune, L.D.B. 1958. The Mark VI Ground Water Standpipe for Measuring Seepage through Salmon Spawning Gravel, J. Fish. Res. Bd. Canada, 15, 5, 1027-1063.
- Williams, D.D. 1993. Nutrient and flow vector dynamics at the hyporheic/groundwater interface and their effects on the interstitial fauna, Hydrobiologia, 251, 185-198.
- Wondzell, S.M. and F.J. Swanson 1999. Floods, channel change, and the hyporheic zone, Water Resources Research, 35, 2, 555-567.
- 山田浩之・中村太士 2001. 微細砂堆積による河床透水性の低下がサクラマス卵の生残率に及ぼす影響, 日本林学会北海道支部論文集, 49, 112-114

\*は直接参照していない。