# 河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の 流動特性に関する考察

# A STUDY ON PERMEABILITY OF GRAVEL LAYER IN IMMEDIATE VICINITY OF THE RIVER AND CHARACTERISTICS OF UNDERFLOW WATER

松本健作<sup>1</sup> · 宫崎基浩<sup>2</sup> · 野中航太<sup>3</sup> · 大友悠大<sup>4</sup>

Kensaku MATSUMOTO, Motohiro MIYAZAKI, Kota NONAKA and Yudai Otomo

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) 群馬大学大学院助教 工学研究科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
<sup>2</sup>非会員 芙蓉地質株式会社 (〒520-0014 栃木県宇都宮市御幸ヶ原町57-25)
<sup>4</sup>非会員 群馬大学大学院 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)
<sup>5</sup>非会員 群馬大学工学部 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

The permeability of gravel layer in immediate vicinity of the river calculated by various methods was examined. Field permeability test, calculation by Hazen and Creager equation, calculation from result of direct observation of underflow velocity in bore hole and calculation from dropped water level in bore hole as response to pumping well were examined to determine the permeability of gravel layer. There was difference of four to five orders of magnitude in comparison with permeability calculated by various method. Observation result of velocity of underflow water in bore hole showed 1.E+00 cm/s order which is very high velocity as velocity of underflow water.

Key Words: underflow water, permeability, field observation, pumping well

## 1. はじめに

河川堤防は治水上の最重要社会基盤であるが、内的に 不均質であり且つ線状長大半自然構造物であるが故に、 限られた投資力の中で効率的に維持管理する方法が依然 として確立されていない. 破堤要因のなかでも, 土中水の 挙動に起因する浸透性破堤は、外観からの観察では現象 の過程を視認できないため、 越流・洗掘といった他の破堤 要因と比してもその取り扱いおよび解明が難しい課題と なっている. 浸透性破堤は、出水時の河道内における高水 位の継続が漏水として堤内方向への地下水流動を引き起 こし、これがパイピング、ボイリングといった諸現象を伴 って堤防の構造不安定化をもたらし破堤に至ると考えら れている破堤形式である1). この浸透性破堤は更に, 破堤 主因たる漏水の発生位置に応じて、堤体漏水および基盤 漏水に大別される. 基盤は元来不均質であり, 加えて堤体 に関しても、人工構造物でありながら、その複雑な施工履 歴等により一般的には不均質な土質構造を有している. この実情としての局所的な不均質性の高さと、一方で要 求される長大区間全域を対象とした均質な治水機能の保 持という,一見して二律背反様の課題が,浸透性破堤に対 する河川堤防の健全な維持管理の困難さを端的に示して いる.

河川堤防の浸透性破堤に関しては、前田ら<sup>20</sup>や神谷ら<sup>30</sup> によって解析的、実験的に様々な検討が為され、種々の有 益な知見が得られている.しかし、相似則の制約、実現象 における不均質性の考慮といった諸問題が今後の課題と して残されている.一方、現場における実河川堤防を対象 として浸透性破堤の観測およびその観測結果に基づくメ カニズム考察が為された例は少ない.これは、浸透性破堤 という現象がいつ・どこで発生するか予測不可能であり、 且つ土中水の浸透流動を現地でモニタリングできる観測 技術が存在しないことに起因する.このため、現地におけ る実現象として浸透性破堤の内部過程が観測された例は 未だに存在せず、これが今後のメカニズム解明における 必須にして極めて困難な課題と目されている.

著者は、沖積河川近傍における伏流水を対象とした連 続観測を実施することで、特に河道内水位に対する伏流 水の非定常応答について検討を進めてきた<sup>4)</sup>.これまでの 観測結果から、河川近傍における伏流水は河道内水位の



図 - 1 観測孔位置図

変動に対して、流向および流速の非定常応答として有意 な変動性を示すことが確認できている.この伏流水の連 続観測を堤防至近部において実施することで、堤防近傍 における浸透流の挙動につながる知見が得られ、これが 出水時における堤防基盤漏水に関する知見につながる可 能性も有していると考えられる.

そこで本研究では、河川堤防至近部に伏流水の観測孔 を設置し、ボーリング調査によって地盤の透水性につい て調べ、これを浸透流の流向および流速の直接観測結果 と比較し、砂礫層の透水性と伏流水の挙動について考察 した.また水位についても連続観測を実施し、降水および 揚水に対する孔内水位の応答性について考察することと した.

#### 2. 現地観測の概要

#### (1) 観測サイトの概要

本研究では、河川堤防の至近部における伏流水観測を 重要な要素と位置づけ、渡良瀬川支川桐生川の 10km 地 点右岸側堤防裏法尻至近に観測孔を2つ設置し、 伏流水 の連続観測を実施することとした.図-1に観測孔の位置 図を示す、上流側および下流側の観測孔を以下ではそれ ぞれ No.1 孔および No.2 孔と呼ぶこととする. 両孔とも, 桐生川堤防裏法尻から 50cm 堤内側に設置した. 両孔の水 平距離は30.7m,図-1中の揚水井1および2は群馬大学 施設内で使用する水を汲み上げている揚水井であり、こ の揚水に対する水位応答性についての考察を後述する. 水平距離はNo1 孔と揚水井1 間が45.6m, No.2 孔と揚水 井2間が24.6mである. 孔深度はNo.1 孔が15m, No.2 孔 が13mで, No.1 孔のみコアサンプルを取得し, 各種土質 パラメータを取得した. 図-2に No.1 孔のコアサンプル の写真(上より 1m 間隔)およびそれに基づく土質想定図 を示す. No.2 孔についてはコアが存在せず, 掘削状況お よび試錐日報に基づく参考図として同図中に示した.



図 - 2 No. 1 孔のコアサンプルおよび土質想定



図 - 3 粒経加積曲線(No.1 孔)

両孔共に、地表面を基準として下向きにとった深度(以下,GL-と示す)1.5mまでは盛土シルトが存在し、その下部上層に玉石混砂礫、下層に粘土混砂礫が存在している土質想定が得られた.

#### (2) 透水係数に関する考察

観測孔周辺地盤の透水係数について検討した. No.2 孔 の GL-11m の深度において注入法によって現場透水試験 を実施した. また, 粒度試験の結果から Hazen<sup>5</sup>および Creager<sup>6</sup>の推定式を用いて透水係数算出し,比較を行った. 粒度試験の結果を図 - 3 に,現場透水試験の結果と Hazen および Creager 推定式によって算出された透水係数の鉛 直分布を図 - 4 に示す.縦軸に深度(GL-m)を,横軸に透水 係数を示してある.現場透水試験の結果は砂層としては 標準的な値を示していることが判る. 一方の Hazen およ び Creager 推定式から得られる透水係数をみると,両推定 式間の差異はさほど無いものの,現場透水試験の結果と は同深度で比較すると 1 オーダー程度の差異が生じてい る. 一般に,透水係数の決定においては現場透水試験が望 ましいとされているが,現場透水試験の手法毎でも



図 - 4 現場透水係数および推定式による透水係数

結果に差異が生じ,推定式においても D10 および D20 の 値に依拠するため,細粒分含有率によって結果が大きく 影響を受けることなどが知られており<sup>77</sup>,何を真値とする かについては依然として確立されていない状況にある.

#### 3. 伏流水の観測と周辺地盤の透水性

#### (1) 伏流水観測の概要

土質特性からみた観測孔周辺砂礫層の透水性が把握で きたことから,次に孔内における伏流水の流動状態を実 測することとした.観測項目は,深度毎の孔内流向・流速 および水位の連続観測である.孔内流向・流速の観測には 単孔型加熱式流向・流速計<sup>®</sup>を,水位の連続観測には自記 水位計(応用地質製 S&DLmini)をそれぞれ用いた.また河 川水位についても手動式水位計で1日1回の観測を実施 した.

#### (2) 伏流水の流向・流速の直接観測結果および考察

単孔式加熱型流向・流速計(以下, FDV と称する)によ る孔内流速の観測結果を図 - 5 に示す. 縦軸が深度(GL-m), 横軸が流速(cm/s)である.一般的に,孔内流速は周辺地盤 の浸透流速と一致せず, 佐野<sup>9</sup>による理論解と, その後の 籾井<sup>10</sup>による実験的検証により、孔内流速の1/3が周辺 地盤内の浸透流速と推定できることが知られているが、 本研究において孔内流速の観測に用いたFDVは周辺地盤 の浸透流速値を用いて速度校正された値を算出している ため、この処理は要しない. No.1 および No.2 孔共に 50cm 間隔で孔底まで測定し,後日(6/9)に確認のため3深度(GL-6m, 9m および 11m)に測定を実施した. No.1 孔, No.2 孔 共に、上層部で高速であり、深部ほど比較的低速となって いるといった全体的な傾向は似通っている. 土質想定か らも上層部が玉石混じり砂礫、下層部が粘度混じり砂礫 と想定されており、定性的な傾向については整合性が確 認できる. 両孔間の流速について定量的に比較すると, 深 度によって差異はあるものの、半オーダーから最



図 - 5 FDV による孔内流速の鉛直分布



大で1オーダー程度,No.2 孔の方がほぼ全深度において 高速であることが見て取れる.堤内地砂礫層において図 -5に示す通り1.E±00~1.E±01の浸透流速が測定され, 極めて高速な伏流水が存在していると考えられる.高速 流を示した深度における流向を確認すると,河川流下方 向と平行する流向であったことから,両孔の水位差 20.1cmを両孔間の水平距離30.7mで除し,これを動水勾 配として,図-5の結果を透水係数に換算した結果が図-6である.図-6中では6/9の測定結果は省略した.Hazen および Creager 透水係数とは3オーダー,現場透水係数と は4オーダーほども離れた大きな値となっていることが 判る.

#### (3) 揚水の影響下における孔内水位の考察

土質試験から求められる透水係数と孔内流速の実測か ら求められる透水係数の比較結果が大きく異なっていた ことから、いまひとつ、揚水に対する孔内水位の応答性に 着目した透水性評価について以下で考察する. 2014 年 8 月 20 から同年 11 月 6 日まで、30 分に 1 度の頻度で水位 の自動観測を実施した. 8 月 21 日における自記水位計



図-7 No.1 孔の水位の経時変化(2014/08/21)



図-8 No.2 孔の水位の経時変化(2014/08/21)

による No.1 および No.2 孔の水位の 24 時間の経時変化を それぞれ図-7および図-8に示す. 横軸が時間, 縦軸が 水位(GL-(m))である. No.1 孔の水位には, 定期的な水位低 下が顕著に現れている.これは両観測孔近傍に存在する2 つの揚水井による揚水の影響である.両揚水井は同機能 であり、揚水量 500ℓ/min, 孔深度 60m, ストレーナー深 度40mである.毎8時に定期的な揚水が為され、その後 は使用状況に応じて随時自動的に揚水が為されている. No.2 孔についても、No.1 孔と同じ時刻に僅かながら水位 低下が確認されている.しかし、図-1に示したように、 両観測孔により近い位置に存在しているのが揚水井2で あり, 且つ No.1 孔より No.2 孔の方が揚水井 2 に近い. にもかかわらず、揚水による孔内水位の低下はより遠方 に存在する No.1 孔において顕著であり、これは No.2 孔 周辺地盤の透水性が極めて高くなっていることをうかが わせる結果であるといえる. 図 - 9 および図-10 に、2014 年9月6日から同年9月13日までの間の両孔の水位の経 時変化をそれぞれ示す.9月6日深夜から翌7日にかけ て、最大10mm/h程度の降雨が発生した.図-9および図 -10をみると、降雨に対する孔内水位の応答が水位上昇 として現れていることが確認できる.水位はその後,7日 程度をかけて次第に降雨前の水位へと漸減しており、こ れらの全体的な挙動は両孔共に共通している.しかし、8 月21日の平水時における観測結果同様, No.1 孔の孔内水 位には顕著な周期的な水位低下が見られ、平水時のみな



図-9 No.1 孔の水位の経時変化(2014/09/06~09/13)



図-10 No. 2 孔の水位の経時変化 (2014/09/06~09/13)

らず降雨による水位上昇期も含め、揚水による影響を両 孔が定常的に受けており、且つ、近傍に存在する揚水井2 に近い No.2 孔に比べ、より遠方の No.1 孔において水位 低下が顕著であることが確認できる.

そこで、周辺観測井における非定常水位低下量を不圧 帯水層に適用した Theis の非平衡式<sup>11)</sup>を用いて、周辺地盤 の透水係数について考察することとした. Theis の非平衡 式を式(1)~(3)に示し、その変数定義を図 - 11 に示す.

$$X = \frac{Q}{4\pi kb} W(u) \tag{1}$$

$$u = \frac{r^2 S}{4kht} \tag{2}$$

W(u) = 
$$-0.5772 - log_e u - \frac{u^2}{2 \times 2!} + \frac{u^3}{3 \times 3!} - \frac{u^4}{4 \times 4!} \cdots$$
(3)

ここで,Q:一定揚水量(m<sup>3</sup>/s),b:帯水層厚(m),X:水位 低下量(m),S:有効間隙率,t:揚水継続時間(s),k:透水 係数(m/s),h:観測井における基準面からの水頭(m),r: 揚水井からの距離(m)

Theis の非平衡式中の水位低下量 X を孔内水位の連続 観測結果から求め、同式中の透水係数kを未知数として、 これを算出する.解析対象データは、降雨撹乱等を受けて おらず比較的平均的な挙動であった図 - 7および図 - 8に 示した平水時データを用いた.図 - 12 に 8 月 21 日にお



図-11 Theisの非平衡式に用いる変数定義



図 - 12 Theisの非平衡式の解析対象とした 揚水による水位低下

表 - 1	Theis の非平衡式から算出した
No.1 お	よびNo.2孔周辺地盤の透水係数

		$\bigcirc$	2	3	4	5	平均
Case-1							
	No.1	3.1	3.5	0.1	0.8	3.4	2.2
	No.2	38.2	28.4	25.0	11.2	35.1	27.6
Case-2							
	No.1	0.9	1.1	0.8	0.1	1.1	0.8
	No.2	12.1	8.7	7.6	2.9	11.0	8.5
Case-3							
	No.1	1.4	1.6	1.2	0.3	1.5	1.2
	No.2	21.2	15.8	14.0	6.4	19.5	15.4

ける水位の経時変化をまとめ、計 5 回の水位低下それぞれに①~⑤の番号を付して解析対象とした.水位低下量の算出は、水位低下開始前から下限値までの変動量とし、 揚水継続時間は水位低下開始から下限値発生時刻までとした.帯水層厚は揚水井深度の 60m とし、水頭算出の基準面は孔深度をとった.各変数定義を図 - 11 に示す.表 -1に、全 case の解析結果を示す.表中における case-1



図 - 13 Theisの非平衡式により算出した透水係数を 付加した各種透水係数の鉛直分布

は揚水井1および2の両揚水井の影響を考慮した結果, case-2 は揚水井1のみ, case-3 は揚水井2のみを考慮した 結果である.表中の①~⑤は対象とした水位低下を示し たもので、図-12に対応している.表の最右列に水位低 下①~⑤の平均を示した. 揚水井と観測孔の距離だけで 考えると揚水井2の方が両観測孔に近い位置に存在して いるが、揚水井1は両観測孔の上流側に位置しているこ となどを併せ鑑みると、現段階では、どちらの揚水井によ る影響が主要因となって孔内水位が低下しているか明ら かではない. このため本考察では、上記全 case の最大・ 最小幅を可能性値域として考察に用いることとした. 算 出結果として得られた観測孔周辺域の透水係数は、No.1 では0.8~2.2, No.2では8.5~27.6となった.この結果を、 土質試験結果および孔内における流速の直接観測結果の それぞれから算出した透水係数算出結果である図-8に 追加したものを図 - 13 に示す. 図をみると, Theis の非平 衡式より求めた No.1 孔周辺地盤の透水係数は, Creager 透 水係数の最大値域(GL-4m)と一部重複し、全体的にはそれ より1オーダー程過大となった.一方,同じく Theis の非 平衡式より求めた No.2 孔周辺地盤の透水係数は, FDV に よる孔内流速の直接観測結果から算出した透水係数の最 小値域(GL-12.5m)と一部重複し、全体的にはそれより1オ ーダー程過小となった.

透水係数は地盤の透水性を検討するうえで極めて重要 な基礎的物理量であるが、現場の不均質性や算出方法毎 の特性によってバラつきが生じることは良く知られてい る.一般に、現場透水試験が最も現地の状況を表している として扱われることが多いが、それについても、では何を もって真値とするか、という議論が尽くされている訳で はなく、検討の余地は大きいといえる.

本研究では、観測孔内における伏流水の流速が10のゼロ乗(cm/s)オーダーとなり、この流れは可視化実験によっても確かに生じていることが確認されている. 佐野の1/3

則<sup>9</sup>を適用したとしても,周辺地盤において現場透水係数 より4オーダー過大な値を示したことになる.

透水係数が算出方法毎に大きく異なる結果となる可能 性があることは一般に知られている. ボーリングによっ て得られるコアサンプルから推定された結果は、サンプ ル取得時に現場における土の状態が撹乱されている可能 性を有するため、両者が得られている場合には一般的に は現場透水係数が真値に近いと判断されているが、それ についても根拠があるわけではなく, 更には, 複数ある現 場透水試験方法毎に結果がことなることは珍しくない. 本研究では、一般にはほとんど算出例の無い、観測孔内の 地下水流速の直接算出結果を元に、動水勾配から透水係 数を算出し、現場透水係数、推定式による透水係数と比較 した. 孔内流速は1. E±00(cm/s) オーダーを超える流速を 示し,動水勾配を考慮した考察から,きわめて高い透水係 数となることが示唆された. 孔内流速の直接測定結果か ら算出された透水係数の値は、現場透水係数より、推定式 による透水係数にむしろ近い数値を示し.いまひとつの 揚水量から算出した透水係数も、やはり現場透水係数よ りも推定式による透水係数に近い値となった.現在のと ころ,現場の地盤の透水係数について,何が真値であるの かという議論に結論は得られていないが、必ずしも現場 透水係数が真値であるとは限らないこと、可能な限り多 種算出法を試みることが望ましいこと, 更には, 同一孔を 対象としても、深度によってその値に大きな差異が生じ ることが一般的であることなどを理解したうえで、適宜 取捨選択し各種検討に用いることが必要であることを明 らかにすることができた.

## 4. まとめ

本研究によって得られた主要な成果を以下に示す.

- 沖積河川堤防裏法尻至近に設置した地下水観測孔 において伏流水の孔内流速を観測した結果,現場 透水試験および粒度試験の結果から推定する Hazen および Creager 透水係数と比較して過大な 値を示した.
- 2) 揚水に対する水位低下応答を対象として Theis の 非平衡式を用いて,観測孔周辺地盤の透水係数を 算出した結果,推定式と直接観測結果の中間的な 値となった.
- 3) 透水係数の値は、現場透水係数、Hazen、Creager 推定式による透水係数、Theisの非平衡式を用い た揚水応答から算出した透水係数、観測孔内の流 速の直接観測結果より算出した透水係数の順に大 きな値となった。高速な伏流水を対象とした場 合、算出方法によってその透水係数の値が4~5 オーダーほどの差異が生じる可能性があり、取り 扱いに注意を要することが明らかとなった。

4) 同一観測孔周辺地盤を対象として、上記の各種透水係数が比較検討された例は無く、貴重な知見を得ることができた。

謝辞:本研究を推進するにあたり,公益財団法人河川財 団の河川整備基金による補助を受けた.ここに記し,謝 意を表します.

#### 参考文献

- 1) 中島秀雄: 図説河川堤防, 中島秀雄, 技報堂出版, 2003.
- 前田健一,今瀬達也,伊藤嘉,齊藤啓:内部侵食による土の 不安定化を考慮した河川堤防の浸透破壊解析法の提案,河 川技術論文集,第19巻,pp.39-44,2013.
- 3) 神谷浩二,大場敬士,山田周作:河川堤防の浸水に伴う間隙 空気圧発生とそれによる破壊現象に関する実験的考察,河 川技術論文集,第20巻, pp.473-478,2014.
- 4) 松本健作,竹内篤雄,宮崎基浩,原澤剛史,野中航太:大芦 川流域を対象とした地下水および河川伏流水の混在場の実 態調査,河川技術論文集,第19巻,pp.531-536,2013.
- A. Hazen : Some physical properties of sand and gravel with special reference to the use in filtration, 24<sup>th</sup> Ann. Rep., State Board of Health, Boston, 1893.
- Creager, W. P., Justin, J. D. and Hinds, J : Chap. 16 soil tests and their utilization, in Engineering for dams, Vol. 3, Earth, Rock-fill, Steel and Timber Dams, John Wiley and Sons, pp.645-654, 1944.
- 7) 山本荘毅:地下水文学,共立出版株式会社,1992.
- 8) 竹内篤雄・中山健二・渡辺知恵子:温度を測って地下水を診断する、古今書院,2001.
- 9) 佐野理:多孔性媒質中に穿った円柱状の空洞を過ぎる粘性 流(ナビエ・ストークスの方程式の解),数理解析研究所講究 録、510, pp.89-99, 1984.
- 10) 籾井和朗,神野健二,上田年比古,本村浩志,平野文昭,本 田保:ボーリング孔内の地下水流れに関する実験的研究, 地下水学会誌,第31巻,第1号, pp.13-18,1989.
- Theis, C. V.: Relation between lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, Transactions, American Geophysical Union, Vol. 27, No.4, pp.526-534, 1946.

(2015.4.3受付)