渡良瀬川堤防周辺域の流動地下水場の実態調査

FIELD INVESTIGATION OF FLOWING GROUND WATER AROUND RIVERBANK OF WATARASE RIVER

松本健作¹·竹内篤雄²·内堀寿美男³·畑中孝明⁴·原澤剛史⁵

Kensaku MATSUMOTO, Atsuo TAKEUCHI, Sumio UCHIBORI, Takaaki HATANAKA and Tsuyoshi HARASAWA

¹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)
²非会員 理学博士 自然地下水研究所所長(〒520-0014 滋賀県大津柳川2-1-11)
³非会員 国土交通省関東地方整備局利根川上流河川事務所(〒520-0014 埼玉県久喜市栗橋北2-19-1)
⁴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)
⁵非会員 群馬大学大学院(〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

Flowing Groundwater Investigation and Boring investigation were performed in riverbank of WATARASE River. Results of 1m Depth Temperature method indicate remarkable area of flowing groundwater. Boring investigation and Multipoint Temperature Logging were performed at the point where the result of 1m Depth Temperature method indicated. Results of boring investigation and Multipoint Temperature Logging showed good agreement with results of 1m Depth Temperature method. Good correlation between N-value by boring investigation and flowing groundwater area by Multipoint Temperature Logging was showed

Key Words: flowing groundwater, riverbank, N-value, Multipoint Temperature Logging

1. はじめに

河川堤防の安全性診断手法の確立にむけた取り組みが 盛んに為されている.そのための基本的な指針となる河 川堤防設計指針¹⁾には,堤防をその形状によって規定する, いわゆる形状規定方式に加え,堤体および基礎地盤の不 均質性を考慮した質的な検討が必要である旨が明記され ている.実際に計画高水位以下の洪水により漏水被害が 多発している現状を鑑みても,構成土質の不均質性に立 脚した浸透性破壊過程の実態把握と,それに基づく効率 的な維持管理手法の確立は喫緊の課題といえる.長瀬²⁾ は,河川堤防の浸透性破壊に関し,既往の取り組みの動 向と現象としての複雑性を総括したうえで,現在広義に

「浸透性破壊」と呼ばれている現象には、その機構や発 生に関する規定要因が異なるものが含まれており、現象 のスケールや素材・部材・構造物といった対象の階層に 応じて様々なアプローチが必要であるとしている.すな わち、一定領域の土層を均質と仮定して浸透状況を考え る取り組み、予めモデル化できない不均質性による流れ の集中がもたらす局所破壊を把握する取り組み、および、 より厳密に単一土粒子の水流に対する安定性を検討する 取り組みといった種々のアプローチの重要性を指摘して いる.

土粒子レベルのミクロな現象の発端に関する研究とし ては、X線を用いた土の浸透破壊過程の考察を行った中島 ら³⁰の取り組みなどがある.一方,可能な範囲で分解能を 上げたうえで一定領域を均質と仮定した場を対象に浸透 状態を考察する取り組みは現在盛んに為されているアプ ローチであり,国土交通省によって実施された全国一斉 河川堤防詳細点検もこのアプローチに類する取り組みで あるといえる.

いまひとつのアプローチである、モデル化が困難な不 均質性をそのまま検討対象として実態を把握しようとす る試みは、その取扱いの困難さから、他のアプローチに 比して十分な成果が挙がっていない.

不均質な土質場において実際の地下水がどのような存 在形態となっているかは現在においても未解明な点を多 く残しているが、その複雑性は種々のデータから窺い知 れる.図-1はボーリング調査の際に得られる、ボーリン グ掘削深度と孔内水位の関係を示したもので、一般に試 錐日報と呼ばれるものの一例である.横軸が掘削開始か らの経過日数、縦軸が地表面からの深度(以下、GL-と記 す)で図左上を原点としてある. 掘削深度, 当日のボーリ ング掘削作業前水位および同じく当日のボーリング掘削 作業後水位を示している.作業2日目以降は孔内に水位 が確認できる、2日目から4日目までの間は、ボーリング 孔を掘り下げても孔内水位はGL-2m程で安定しているが, 初日に GL-4m まで掘削した際には孔内水位は確認されて おらず、この周囲の自然状態における地下水位が GL-2m でないことは自明である. 更に 5 日目に, 掘削深度が GL-19m 付近まで達したところで、孔内水位が一気に GL-19m, つまり孔内水無しという状況を呈している. こ れは、GL-19m 付近の難透水層をボーリング孔が貫通した ことにより、その下部に存在した透水層に孔内水が逸水 したものと考えられる.8日目までは掘削深度に依らず作 業前水位は地下8~10m程度となっており、これが平衡水 位と考えられるが、9日以降は、更に下層の難透水層を貫 通したためと考えられる孔内平衡水位の急落が確認でき る. このようなボーリング孔水位関係は一般的に認めら れる現象で、特殊な事例では無い. これらの結果は、自 然状態における地下水が、下層から空間的に均一に存在 しているという概念では説明し難く、地下に存在する複 数の流動層が異なった水位・水頭を有している状態を示 唆していると考えられる. すなわち, 孔内水位はいわゆ る地下水位ではなく、一般的にはいくつかの流動層を貫 通した場合の水理学的平衡水位であると考えられる.図 -2にその概念図を示す、複数の流動層の水頭条件によっ て孔内水位が様々な様相を呈することが想定される. こ のような現場における土質の不均質性とそれに起因する 複雑な地下水浸透場を把握することは通常は困難である. 土中水分を把握するための物理探査としては、高密度電 気探査 4などが実施されることが多いが,高密度電気探査 は土質特性の変化によっても探査指標である比抵抗値が 変化するため、計測された比抵抗分布が水分由来である のか土質の違いによるものであるのか、通常はその分離 が難しい、長期間に亘る連続観測によって土質特性に起 因する定常成分を分離することで水分のみの情報を得よ うとする取り組みもあるが、長期間連続計測が必要であ ることなど制約があることから実施例が少なく、今後の データの蓄積が期待されている状況にある.

竹内[®]は土質的不均質性に起因する流路選択的な地下 水の存在状態を把握するため温度指標による流動地下水 探査法[®]を考案し,主に地すべり災害地の地下水問題を解 決してきた.著者ら[®]はこの流動地下水探査法を渡良瀬川 の河川堤防の基盤漏水探査法として適用し,有効性の検 証を行ってきた.

そこで本研究では、1m 深地温探査の結果、流動地下水 の強い反応が得られた地点でボーリング調査および多点 温度検層[®]による流動層の鉛直構造特性に関する調査を 実施し、各種探査結果の整合性の検証と、そこから推定 される流動地下水特性について報告を行うものである.



図 - 1 ボーリング掘削深度と孔内水位の関係例



図-2 孔内水位の水理地質学的解釈概念図



写真 - 1 福富サイトの測線および測点の配置図 (点線:1m深地温探査側線,丸印:ボーリング位置)

2. 現地観測

(1) 観測サイトの概要と 1m 深地温探査結果

現地観測は、渡良瀬川30.5km地点右岸の福富町地先堤防にて実施した.当該区間は先行して実施された河川堤防詳細点検の結果、浸透性破壊に対する安全性に懸念があると診断された区間である.計測区間の概況航空写真と測線および測点配置を写真-1に示す.堤内地側堤防法尻に沿って1m深地温探査の測線を設定した.1m深地温探査は、土と水の熱容量の差を地表面から1mの深度におけ



図-3 1m 深地温探查結果例

る地温において検出することによって、測点周辺域の流 動地下水の存在を検知する物理探査である. 地中の有意 温度差伝播範囲が探査範囲であり、最大で深度 15m まで 探査実績がある.詳細原理は既報^{5),6),7)}に譲るが,探査例 を図-3に示す.図-3は漏水が目視で確認できる河川区 間における実施例であり、横軸が測線長、左縦軸が夏季、 右縦軸が冬季における探査結果である. 流動地下水存在 域周囲では、夏季には異常低温帯、冬季には異常高温帯 となるため、両者は逆位相となることが図-3で確認でき る. 図-4に, 福富サイトにおける 1m 深地温探査結果を 示す. 軸設定は図-3 同様である. 冬季における計測結果 で横軸 30.477k 付近に異常高温帯が検出されている. そ こで夏季における計測を実施すると、低温ピークが検出 され,流動地下水の反応を強く示していることが判る. そこで、この測点においてボーリング調査を実施するこ ととした. そして、同一ボーリング孔を利用して多点温 度検層を実施して流動層の深度方向の位置特定を試みた. これらの結果から、1m 深地温探査、ボーリング調査およ び多点温度検層の3調査結果の整合性を検証し、不均質 な土質構造場における地下水の流動状態の実態に関する 考察を行うこととした. なお、顕著な流動地下水反応が 検出されなかった上流方向に20.2mほど離れた位置(図-4中では「ボーリング②」と記載)においても同様の調査 を実施し、両者の比較を行った.

(2) ボーリング調査による土質特性の把握

図-5に、ボーリング調査の結果得られた地質縦断図を示す. 図中右ボーリングが,流動地下水反応が強い「ボーリング①」,他方が比較のために実施した流動地下水反応のない「ボーリング②」である. 横軸が測線長で,両ボーリング間は20.2mである. 縦軸は深度(m)であり,土 質推定の凡例が表 -1 に対応している. 上層から順に礫混 じりシルト,砂質シルト,礫混じり砂礫および砂混じり シルトとなっている. 両ボーリングには標準貫入試験に よって得られた N 値の鉛直分布を付してあり,その拡大 図を図-6 に再掲した. 縦軸に深度(m),横軸に,各測定



図 - 4 福富サイトにおける 1m 深地温探査結果



図 - 5 地質縦断図

表 - 1 地質縦断図凡例

時代区分			地層名	贈記	主な構成土 質	z 値	主な特徴
開始			盛土層	bk-2	シルト 礫潤ごりシル ト	-	川康、増わ地の民地境界付近こ分布 する。 - 堤林観付け盛上の一部 305K 地点では、Q 2~60mm 程度の 有解意じりである。簡厚 0.20~1.20m 程度である。 色調は、茶褐~暗褐色を呈す。
的电回	完新世	沖積層	粘性土層	Ac	シルト 砂質シルト	1 ~ 9	川康305(地点、細妙を薄く抜け、 少量の顔緒物が混じる。 層写050-210m指度で川腹に向か い 厚く分布する。 色調よ、暗茶得~暗灰色を呈す。
			礫質土層	Ag	確認にり細砂 砂礫	10 ~ 50	全域に分布する。含水多い、 φ 2~30m 程度の部門、亜角隙間と り接触すたるる。 構築中にはな100~150m 程度の 玉石が点在する。 機動ま、チャート、頁岩等の硬度な ものを主体とする。 層算 10.0~11.0m 程度である。 色調ま、暗解灰~茶餐灰~暗褐~ 暗灰色を呈す。
	更新世	洪積層	粘性土 層	Dc	砂潤じりシル ト	8 ~ 11	Ac層下位こ分布する、含水中位、粘 性中位~小さい、 細砂混じ、あるいは消層状に挟む などやや不均質である。 確認層算1.55~216n 程度である。 色調は、暗茶褐~暗灰色を呈す。



図 - 6 ボーリングによる N 値の鉛直分布 (左:ボーリング①, 右ボーリング②)

想定土質区分	透水係数(cm/sec)
Bk-2:(礫混じりシルト)	2.0E-05
Ac: (砂質シルト)	1.0E-05
Ag: (礫混じり砂礫)	1.2E+00
Dc:(砂混じりシルト)	1.0E-05

表-2 土質毎の透水係数

深度における N 値を示している. 左図が, 顕著な流動地 下水反応が検知されたボーリング①測点における N 値の 鉛直分布であるが, GL-8.15m~-9.15m および GL-12.15m 付近で高いN値が見られる. 土質は GL-7.8~-14.30 が砂 礫層であったが, 土質区分としては砂礫層であっても物 性が様々であることが判る. 流動地下水反応が無かった 測点として比較のために同一調査を実施したボーリング ②の結果である右図を見ると, GL-6.15m および GL-12.15 ~-13.15m において比較的高い N 値が確認できるがボー リング①ほどの高値ではない. 両測点は 20.2m しか離れ ていないこともあり,総観的には似通った N 値分布を呈 しているが, ボーリング①の方が局所的に高い N 値分布 がみられることが確認できる.

ここから一般的には,設計N値の算出,各種土質試験, 粒度試験からCreager 図表によるD₂₀透水係数などを算出 して,土質毎に物性値を設定し,設計あるいは診断業務 に利用されることとなる.浸透性の把握という観点から は透水係数の算出が重要となる.表-2に,算出された土 質区分毎の透水係数を示す.これは前述の,可能な範囲 で分解能をあげて土質区分を想定したうえで,その土質 区分毎に均質な物性を与え解析に用いる取り組みである が,想定土質の平均的な特性把握に便利であり,比較的 広域を対象として一定基準で診断していく業務において 非常に有効な手法であるといえる.しかし,例えば特定 区間の漏水問題に対して対策を施す場合などのように, より局所的な流動地下水の実態把握が必要であるときに は,同一想定土質内にも不均質性を読み取っていく更に 詳細な検討が必要となる.ボーリング①を例にとると, GL-2~14m が Ag 層であると推定されているが,N 値は区 間毎に大きく異なっており,実際には Ag 層全域で均等な 浸透状態であるとするには疑問の余地があることが判る.

(3) 多点温度検層結果の考察

同一想定土質内においても不均質性を考慮して局所的 な流動地下水に関する考察を実施する場合、更に土質想 定を細分化して検討することも有効である.しかし、土 質的物性値をどれだけ細分化しても、厳密には流動地下 水に関する直接的な情報とはなり得ない. 透水係数が高 いということは、その周囲に浸透流場がある場合に、優 先的にその領域を浸透流が流動することを意味するので あって、例えば難透水層によって周囲を閉鎖されている ような状況下に透水性の高い土層が存在しても、そこに 顕著な流動地下水が存在する訳ではない.図-1に示した 試錐日報の5日目にGL-19mに達したボーリング孔におい て孔内水が逸水したのは、難透水層を貫通した下部に、 比較的透水性が高く、浸透水によって被圧されていない 状況が存在したためである可能性が高く、ボーリング孔 の貫通といった事象が無ければ、透水性が高くとも浸透 流が存在しない状況は不均質場においては特殊事例では ない.

流動地下水に関する直接的な情報を得るための手法は いくつか存在するが,本研究では「地盤工学会基準 JGS1317」として認定されている「トレーサーによる地 下水流動層検層方法|の温度トレーサー法を用い、流動 地下水の実態調査を実施した. 解析手法としては竹内の 開発した多点温度検層を用いた. 多点温度検層は、ボー リング孔内に温水を注入し、孔内を一定温度に昇温させ た後, 平常温度に復元する際の復元率を追跡する. 流動 地下水が存在する深度においては、浸透流の冷却効果に よって温度復元率が上昇することを利用して, 孔内の温 度復元率の鉛直分布を求めることで、流動地下水の深度 を推定する手法である. 温度復元率の分布形状と, 流動 層厚および浸透流速との間には明瞭な相関があること, および現地観測で得られる典型的な温度復元率の鉛直分 布形状が、深度方向に複数の流動層が存在する場におい て確認できることを室内実験によって再現できることは 既報8に示した.

温度復元率Rは式(1)

R = $(\theta_0 - \theta_n)/(\theta_0 - \theta_i)$ (1) ただし、 θ_0 : 一定昇温直後の温度、 θ_n : 任意の経過時刻 における温度、 θ_i : 自然状態における温度 を用いて算出する.



図-7および図-8に、ボーリング①および②のそれぞれの孔を用いて実施した多点温度検層の結果として得られた温度復元率の鉛直分布を示す.縦軸は地表面からの深度(m)である.横軸は各図の上部に付してあり、右端が昇温完了直後の段階で、この時点が温度復元率0%である. 以後、孔内水温の経時変化を計測し、最大で30分後までの温度復元率の鉛直分布を示してある.

図 - 7 においては GL-2.4m, 図 - 8 においては GL-3.1m が 温水注入前における孔内水位である.孔内水位以浅に



図 - 9 N値および流動層反応の相関図(ボーリング①)



図 - 10 N値および流動層反応の相関図(ボーリング②)

おいても流動層の診断が可能である点が多点温度検層の 特徴の1つであるが、定量的な診断に際して未解明な点 が残されているため、本研究ではこの区間については触 れず、孔内水位以深のみを対象として考察する。両図を 比較すると、図-7に示した温度復元率の方が、図-8の それよりも総観的に高い復元率を示していることが見て 取れる。図-7の孔内水位以深区間で、最終的な温度復元 率の鉛直分布において突出(左に凸)区間を抽出すると、 GL-7.1m~8.1m、GL-9.1m~10.2m、GL-11.6m および GL-14.1mの4層となっている。図-8を見ると、図-7 と比較すると温度復元が平坦で、深度方向に特徴が見え 難い.同じく温水注入前の孔内水位以深区間を対象として、温度復元率の突出区間を抽出すると、GL-6.1mに定量的には小さいが明瞭な形状が見てとれるほか、GL-9.1mおよびGL-11.7m~-14.1mの区間に不明瞭ながら抽出することができる。ただし、最下部のGL-11.7~-14.1m区間については、不明瞭であるため、ここでは流動層と判断しない。考察の目安としてボーリング②における30分後の温度復元率60%線を両図に記したが、両図を比較するとボーリング①では30分後には温度復元率が70~90%で分布しており、ボーリング②と比べるとボーリング①の方が流動性が高い傾向が読み取れ、これは図-4に示した1m深地温探査の結果とも符合する。

次に、図-7および図-8で抽出した流動地下水反応が 検出された区間を、図-6に示した標準貫入試験結果に重 ね合わせて再掲したのが図-9および図-10である. 軸 設定等は図-6と同様であり、図-7および図-8から抽 出した流動地下水反応が検出された区間を矢印で示し, 深度を付した. 図-9を見ると、前述した Ag 層内におい て突出して N 値が高くなっていた区間(GL-8.15m~ -9.15m)を挟むように、流動地下水反応区間(GL-7.1m~ -8.1m および GL-9.1m~-10.2m) が存在していることが判 る. その下方 GL-12.15m においても N値 50/29の区間が 存在するが、そのピーク周辺の高 N 値区間を挟むように 上下に2層の薄い流動層反応が存在している.図-9を見 る限り、N値と多点温度検層結果から得られる流動層反応 との間には明瞭な相関性があるように見える. 図 - 10 を 見ると、やはりN値のピークが存在するGL-6.15mの直上 に、薄い流動層反応区間が存在している.図-8からはも うひとつ GL-9.1m にも弱い流動層反応を抽出したが、こ ちらについては N 値との相関性が不明瞭である. 流動層 反応自体が比較的不明瞭であったことも要因と考えられ るが、元々流動地下水の存在域は N 値以外にも様々な要 因が関与して決定されているものであるため、N値との整 合性が無い流動層反応も起こり得る. 元来 N 値は浸透性 に関連する土質特性値ではないため、現時点では一定の 相関性が確認できたことを報告するまでにとどめる. こ れらの相関性については、今後更にデータを蓄積し検証 を行い、且つ、その他の要因との相関性を検討し、より 流動地下水の実態把握に関する知見を収集することが必 要であると考えられる.

3. まとめ

本研究では、河川堤防詳細点検の結果、浸透性破壊に 対する安全性に懸念があると診断された渡良瀬川堤防周 辺域の流動地下水に関する現地観測を実施し、実態の把 握にむけた考察を行った.得られた主要な結論を以下に 示す.

- 1) Im 深地温探査の結果,流動地下水反応が顕著であっ た測点と,反応が見られなかった測点についてボー リング調査による土質特性調査および温度トレーサ 一地下水流動層検層法による流動層検知調査を行っ た結果,1m 深地温探査の結果,流動層反応が顕著で あった測点においては,高い流動層反応が検出され た.
- 2) 高N値区間を避けるように高流動層反応区間が存在している状況が明瞭に確認でき、両者には高い相関性があることが確認できた。同一想定土層であっても実態としては局所的に地下水流動している可能性が高いことが確認できた。

参考文献

- 1)国土交通省水管理・国土保全局ホームページ
- 2) 長瀬迪夫:浸透破壊に関する考え方と破壊発生の条件 諸文 献における記述と用例 - , 応用地質年報, Vol. 9, pp. 43-124, 1987.
- 3) 中島秀雄・長瀬迪夫・飯島豊: X線を用いた土の浸透破壊実験 とその考察,応用地質年報, Vol. 9, pp. 21-41, 1987.
- 4) 島裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹編:比抵抗映像法-建設・防災・ 環境のための新しい電気探査法, 古今書院, 1995.
- 5)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.
- 6)竹内篤雄:流動地下水探査法,古今書院,1996.
- 7)岡田崇,松本健作,竹内篤雄,玉置晴朗,矢澤正人,内堀寿 美男,瀬間武,清水義彦:1m深地温探査を用いた渡良瀬川基 盤漏水の常時監視による流動地下水特性の考察,河川技術論 文集,第16集, pp. 341-346, 2010.
- 8) 竹内篤雄・松本健作・原澤剛史:温度復元率を用いた流動地 下水特性の検証と堤防基盤漏水調査への適用,水工学論文集, 第 56 巻, pp. 571-576, 2012.

(2012.4.5受付)