

2019年台風第19号における鬼怒川上山川 地区堤防とその周辺における地下水動態に 関する調査検討

INVESTIGATION OF GROUNDWATER MOVEMENT IN THE KAMIYAMAKAWA
LEVEE AND ITS SURROUNDING AREA IN THE KINU RIVER
DURING TYPHOON NO.19 IN 2019

道津友弘¹・青山貞雄²・柳澤亘³・椎名紀幸⁴・青木裕⁵・田端幸輔⁶・福岡捷二⁷
Tomohiro DOUTSU, Sadao AOYAMA, Wataru YANAGISAWA, Noriyuki SHIINA,
Yutaka AOKI, Kosuke TABATA and Shoji FUKUOKA

¹国土交通省関東地方整備局 下館河川事務所 計画課 (〒308-0841 茨城県筑西市二本成1753)

²国土交通省関東地方整備局 (元) 下館河川事務所 事務所長 (同上)

³国土交通省関東地方整備局 (元) 下館河川事務所 副所長 (同上)

⁴国土交通省関東地方整備局 下館河川事務所 計画課長 (同上)

⁵国土交通省関東地方整備局 (元) 下館河川事務所 計画課 (同上)

⁶正会員 工博 中央大学研究開発機構 准教授 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

⁷フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 教授 (同上)

The considerable underseepage occurred at the landside of the Kamiyamakawa levee in the Kinu River during the heavy rainfall in the Kanto Tohoku region in 2015. Therefore, the mechanism of the groundwater movement has been investigated based on the pressure of groundwater, rainfall, river water level and stratum of the levee. The previous paper showed that high-pressure aquifer which is comprised of coarse material exists under the levee. In this paper, we estimate the source of groundwater that can be a factor in forming the aquifer based on the pressure and velocity of groundwater flow which were additionally observed during the flood due to Typhoon No.19 in 2019 and irrigation period. Also, the future investigations necessary to elucidate the more detailed mechanism of the groundwater movement and to determine specific measures against the groundwater supply is presented.

Key Words: levee, foundation, groundwater movement, observation of groundwater level and velocity

1. 背景と目的

平成27年9月関東・東北豪雨時に、茨城県結城市上山川地区の鬼怒川堤防において基盤漏水が発生したことから、河川水に対する漏水対策工事（堤防断面拡幅、川表遮水矢板、川裏ドレーン工）を実施した。ところが、工事期間中に堤防川裏側地盤から顕著な湧水が確認されたことから、河川水だけでなく、堤防裏側台地等からの地下水供給による基盤漏水被害の危険性が懸念された。当該地区のように堤防裏側台地等からの地下水供給の可能性がある地形では、広域での地下水の挙動を現地調査により把握することが重要であることから、一連の現象に対する堤防の安全性確認のため、これまでに地下水位観測及び分析を行ってきた。これにより、堤防裏側台地からの地

下水供給や、堤体内で地下水の出口を失っている礫を主成分とした高圧力帯水層の存在を明らかにし、地下水供給に対する堤防の安全性確保のための対策検討に資する追加の現地調査計画を作成した²⁾。

本報告では、継続的に実施している地下水位観測とともに、地下水の流向流速計測を新たに実施し、高圧力帯水層を形成する要因となり得る地下水供給源を推定している。更に、より詳細な地下水供給メカニズムの解明と、地下水供給に対する具体的な対策を判断するために必要な今後の調査検討課題を提示している。

2. 上山川地区の地下水動態の調査概要

図-1、図-2に漏水対策工と圧力式水位計の位置図と地

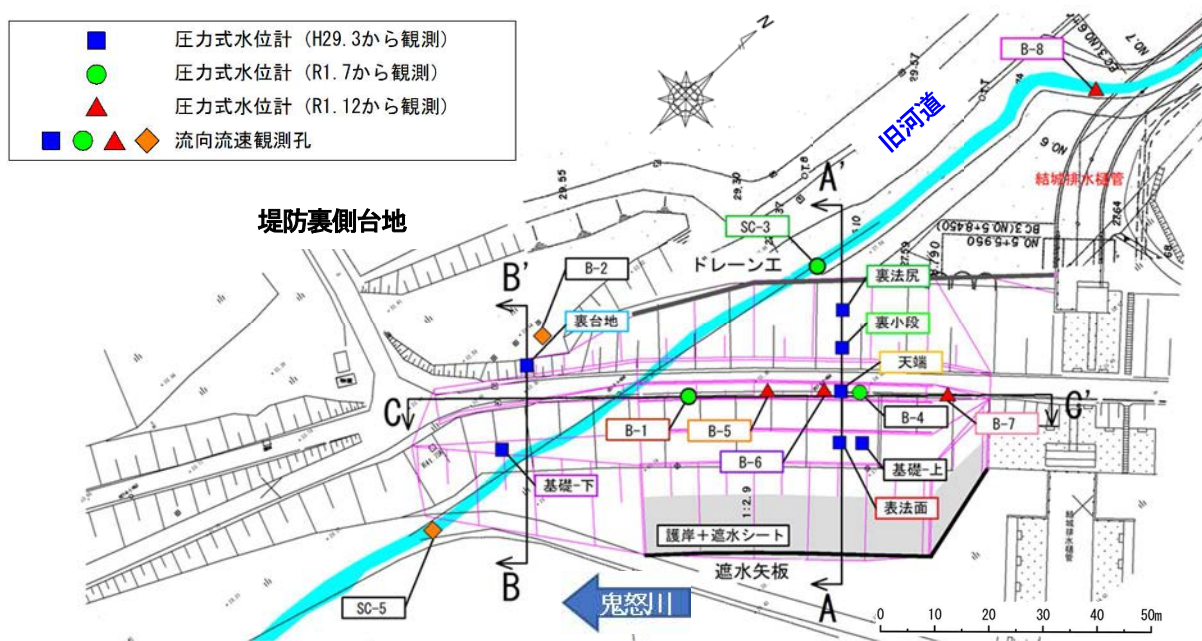
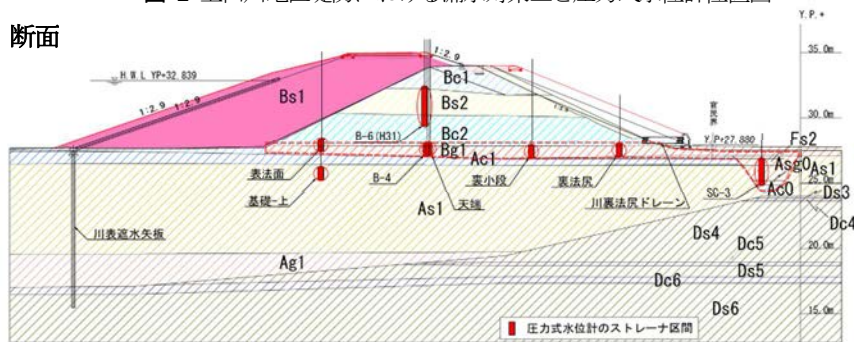


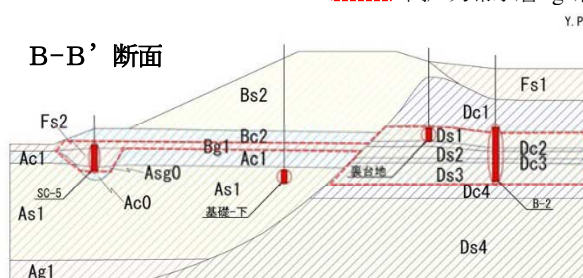
図-1 上山川地区堤防における漏水対策工と圧力式水位計位置図

A-A' 断面



高圧力帯水層Bg1層とこれに接続する透水層の推定範囲

B-B' 断面



C-C' 断面

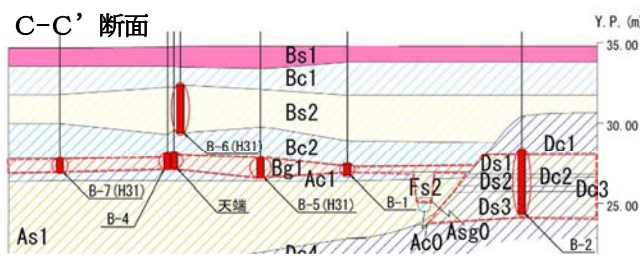


図-2 地質想定図と圧力式水位計の設置箇所（断面図）

質想定図を示す。堤防川裏側地盤からの湧水範囲と地下水位を把握するため、堤防基盤部のBg1層及びAs1層を対象としたA-A'断面5箇所と、堤防裏側台地からの地下水供給を想定したB-B'断面2箇所の計7箇所（図-1の青色四角）に圧力式水位計を設置し、平成29年3月から地下水位観測を実施してきた。その後、地質構造と面的な地下水挙動を補足及び解明するため、図-1の緑色丸、赤色三角の点で新たなボーリング調査と圧力式水位計の設置及び結城排水樋管堤外水路に水位計の設置を行った。更に、図-1に示す流向流速観測孔において、流向流速測定を行った。

30mm/日を超える降雨時にBg1層の圧力水頭が反応していることに着目し観測をしているさなか、台風第19号が関東地方に上陸した。鬼怒川流域（図-3）では、石井地点上流域における流域平均最大24時間雨量で349mmを観測し、流域平均で30mm/hrを超える激しい降雨が5時間にわたり続き、当該地区に最も近い川島雨量観測所で総降雨量180mmを記録した（図-4）。また、当該地区の鬼怒川水位は、最高水位YP+30.971m（計画高水位YP+32.839m）で高水敷が約13時間湛水し、平成27年9月関東・東北豪雨時と比較すると約1.4m低い水位であった（写真-1）。更に、堤内地では樋管操作に伴う内水氾濫が発生し、最高水位は痕跡からYP+30.0m程度で内水深約2.2mと推定され、平成27年9月関東・東北豪雨時と同程度であった（写真-2）。

3. 2019年台風第19号出水の概要

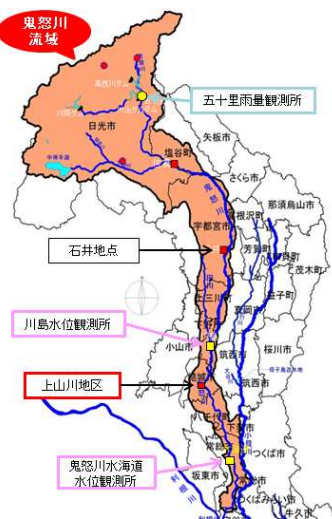


図-3 鬼怒川流域図

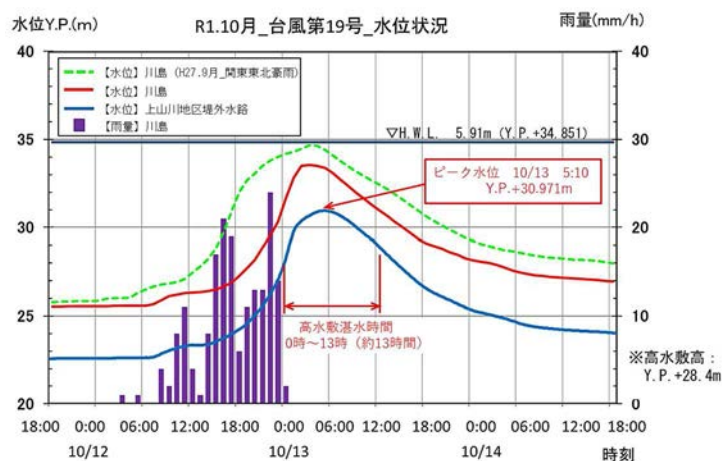


図-4 R1.10月 台風第19号水位状況



写真-1 上山川地区の状況 (川表) [R1.10.13 8時頃]

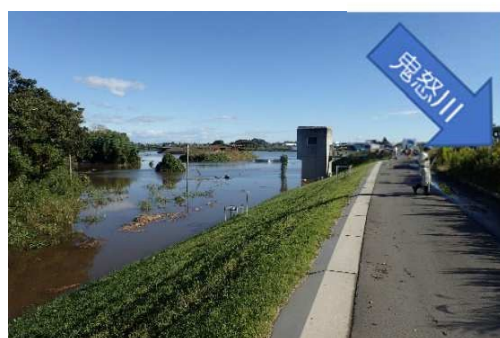


写真-2 上山川地区の状況 (川裏) [R1.10.13 8時頃]

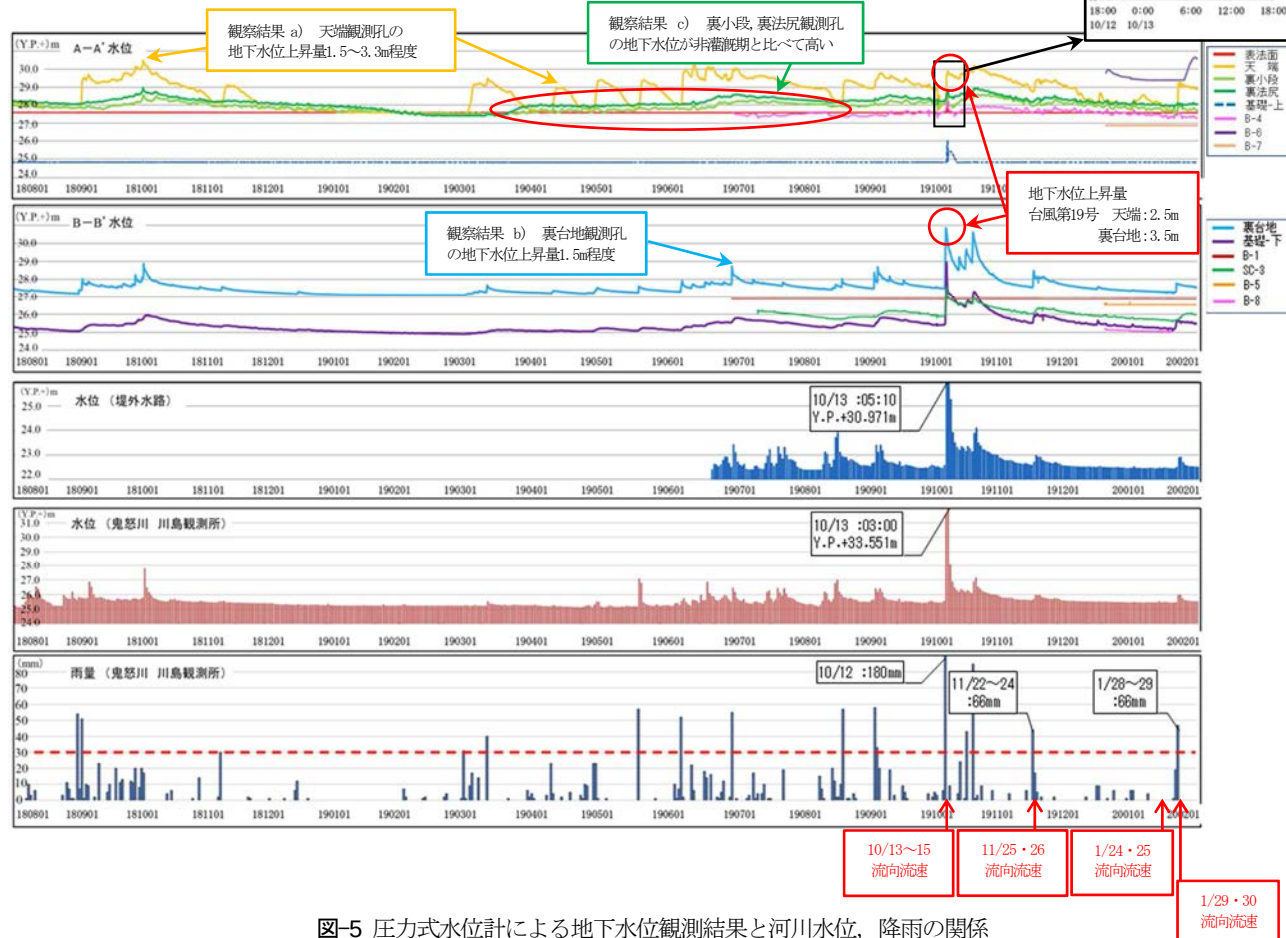


図-5 圧力式水位計による地下水位観測結果と河川水位、降雨の関係

4. 上山川地区の地下水動態観測

前報告²⁾において、地下水観測孔（図-1の青色四角）の圧力水頭位置水頭を加えた地下水位を調べた結果、堤体内の地下水位が河川水位よりも高いこと、基礎-下と裏台地の間で大きな水面勾配が生じていることを確認した。しかし、当時の観測体制では、これ以上の面的な地下水挙動に関する情報を得ることが困難であったことから、前報告では降雨時に着目した各観測点での圧力水頭変化から、堤防直下の高圧力帯水層の存在を示すにとどまっていた。これに対して本報告では、より広域に設置した地下水観測孔（図-1参照）で得られた地下水位と流向流速測定及び結城排水樋管堤外水路の水位観測結果から、上山川地区の面的な地下水動態の把握が可能になった。

(1) 地下水動態観測結果

2019年台風第19号降雨時を含む圧力式水位計による地下水位観測結果を図-5に示す。以下に、特長的な観測結果（図-5のa）～c）と対応）を示す。

a) 高圧力帯水層のBg1層を有する天端観測孔では30mm/日を超える降雨時の地下水位上昇量は1.5m～3.3m程度で、台風第19号時も最大で2.5mを観測し、これまでと同程度の地下水上昇を観測した。

b) 地下水供給源となり得る裏台地観測孔では、30mm/日を超える降雨時の地下水位上昇量の最大値が1.5m程度であったが、台風第19号時は最大値3.5mを観測し、天端観測孔を超える地下水位の上昇を観測した。

c) 4～9月では、裏小段、裏法尻観測孔で地下水位の高い状態が維持されている。この時期は農業用水灌漑期に相当しており、上山川地区の堤防及びその周辺部の地下水挙動に、季節性的な変動がある可能性を示唆している。

(2) 流向流速測定結果

流向流速の測定は、一般的に用いられている熱量式の地下水流向流速計により実施した。これは、図-6に示すような計測部中央に発熱体（ヒーター）があり、その周りに16個の温度センサーを配置した測定器を使用して、部分的にストレーナ加工された有孔管を通して流れる地下水が発熱体により加熱され、各センサーの温度分布から流向流速を計測する方法である。

これまでの地下水動態観測では、30mm/日を超える降雨の際に地下水位に顕著な反応を示していることから、台風第19号時を含む降雨後3回と、無降雨時1回の計4回の流向流速測定を実施し、測定結果を表-1に示す。ただし、台風第19号以外のイベントで計測された流速は、台風第19号降雨時のものに比べて1オーダー小さく、測定値のばらつきが大きかった。

5. 考察

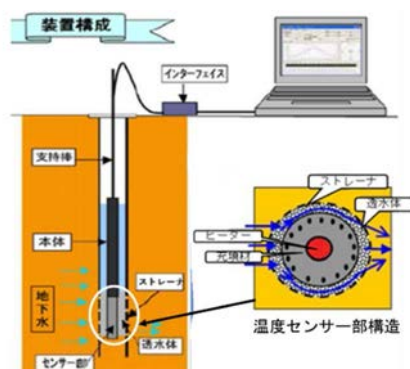


図-6 地下水流向流速計概念図

表-1 流速測定結果一覧

(単位: cm/sec)

	堤体基盤Bg1層	堤防裏側台地Ds層	旧河道Fs層(川裏側)
台風第19号時	$3 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-4} \sim 2.5 \times 10^{-3}$	3×10^{-4}
台風以外降雨時	$2 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-4} \sim 2.1 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-4} \sim 3.7 \times 10^{-4}$
無降雨時	$2.8 \times 10^{-4} \sim 3.8 \times 10^{-4}$	$2.7 \times 10^{-4} \sim 6.2 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-4} \sim 3.2 \times 10^{-4}$

(1) 地下水位と流向流速観測結果に基づいた地下水流動

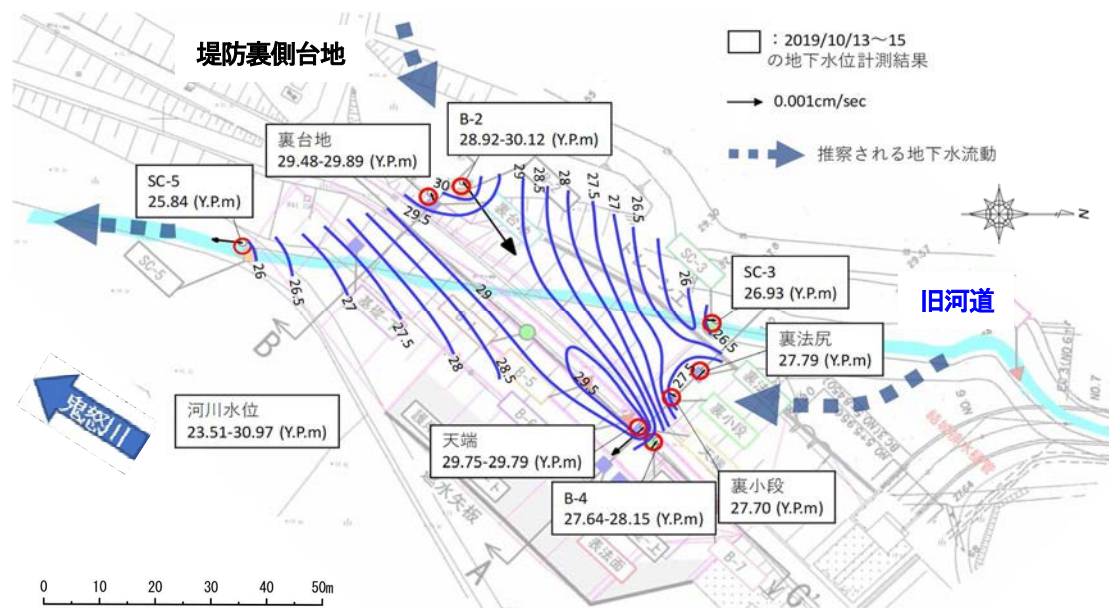
ここでは河川水位と地下水位がともに高まり、地下水の流動が比較的顕著であった台風19号降雨時に観測した地下水位と流向流速を用いて、地下水の挙動を考察した。また、地下水挙動の季節変動性を調べるため、農業用水灌漑期で無降雨時（2019年8月20日）についても考察した。

a) 洪水時

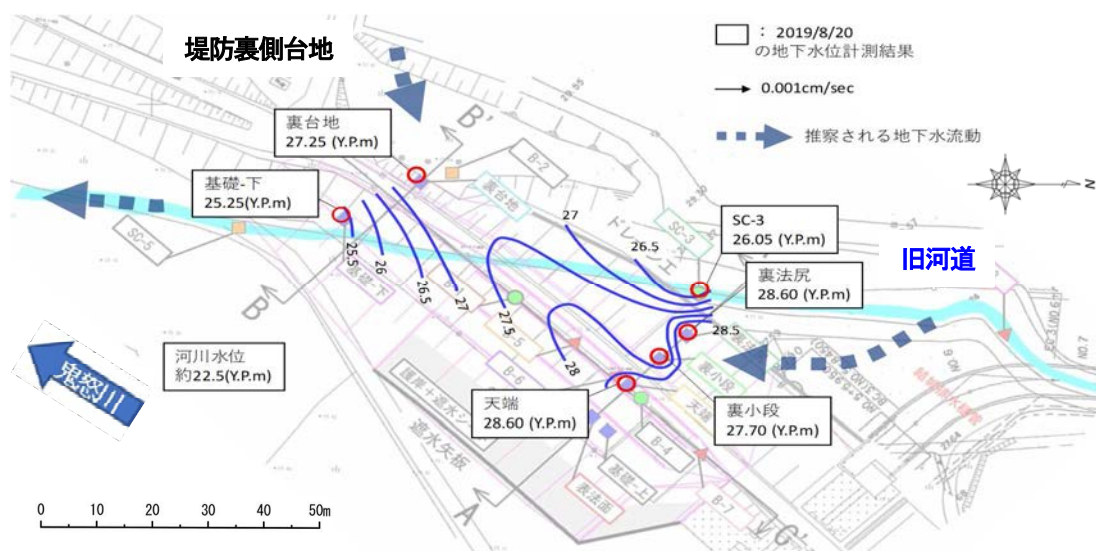
図-7(a)に洪水時における地下水位の等高線と、流速ベクトル図を示す。ここに示す地下水位及び流速の観測孔は、Bg1層、Ds1層、Ds2層、Ds3層、Fs2層のいずれかに位置している。これらの層は、図-2の地質想定図に赤色破線で示した高圧力帯水層とこれに接続する透水層の推定範囲に含まれており、堤防直下部に概ね同じ高さで分布していると考えられる。地下水位等高線を見ると、裏台地と天端の間でY.P.+30m程度の高い値を示し、裏台地に位置するB-2観測孔（堤防裏側台地Ds層）では、天端方向へと向かう 2.5×10^{-3} cm/sec程度の流速が確認された。また、天端観測孔、旧河道（川表側）のSC-5観測孔では、流速は小さいものの、それぞれ遮水矢板、鬼怒川の低水路へと向かう流れが確認された。以上より、裏台地、旧河道（川裏側）から供給された地下水が、裏台地と天端の間の地下水位を高めると共に、旧河道（川表側）を経て鬼怒川低水路へと徐々に抜け出しているものと推定される。

b) 農業用水灌漑期

図-7(b)に灌漑期で5日間無降雨時の地下水位の等高線を示す。等高線の間隔は洪水時に比べて広がっており、地下水の勾配が緩やかであることが分かる。前報告²⁾でも確認されたように、裏台地、基礎-下、鬼怒川河川水位の順に水位が低くなるが、裏台地の地下水位は洪水時のように局所的に高くなっておらず、一方で天端や裏法尻の地下水位は高まっている。以上より、農業用水灌漑期では、主として旧河道上流側から地下水が供給され、旧河道（川表側）を経て鬼怒川低水路側へと徐々に抜け出しているものと推定される。



(a) 台風第19号洪水時、降雨後（2019年10月13～15日）



(b) 農業用水灌漑期、無降雨時（2019年8月20日）

図-7 地下水位等高線と流速ベクトル図

(2) 高圧力帯水層の形成要因と裏台地・旧河道（結城排水路）周辺の土地利用

図-8に昭和56年の結城排水樋管新設工事と築堤工事の工事完成図を、図-9に旧河道付近に位置する箇所Bg1層（SC-2、SC-3）と堤防基盤部Bg1層（B-1、鬼20-天端）の粒度分布をそれぞれ示す。旧河道付近に位置するSC-2とSC-3地点のBg1層は、主にシルトと細砂で構成されている。一方、B-1と鬼20-天端地点のBg1層は、粗砂や中礫を多く含有しており、一般的な碎石の粒度分布（図-9のM-40、C-40）と概ね一致している。これらより、高圧力帯水層であるBg1層は、工事施工時の重機等足場として、碎石を用いて工事ヤードを整備した際に形成された砂利層である可能性が推察される。

また、図-10に示す治水地形分類図によると、堤防裏側台地では工場、宅地、農地(畑)が存在している。一方、

旧河道は現在の結城排水路と繋がっており、その周囲には水田が広く分布している。よって、農業用水灌漑期は、水田の湛水により地下水位が高まり、旧河道を経由することで地下水が供給されている可能性がある。これは、これまで3年間の地下水位の変化に着目した際に、A-A'断面の裏法尻、裏小段観測孔の地下水位に季節的な変化が見受けられ、農業用水の供給時期と連動して、灌漑期に川裏旧河道の透水層が保水され、帯水層の地下水位が高くなっていることから推察される。

(3) 堤防漏水対策工の効果

平成27年9月関東・東北豪雨では、上山川地区の堤内地側で湛水深2.3mの内水氾濫が生じたが、その水面に気泡を伴う大きな水紋を複数出現させる程の顕著な基盤漏水被害が発生した²⁾。これを受けて、漏水対策工を整備し

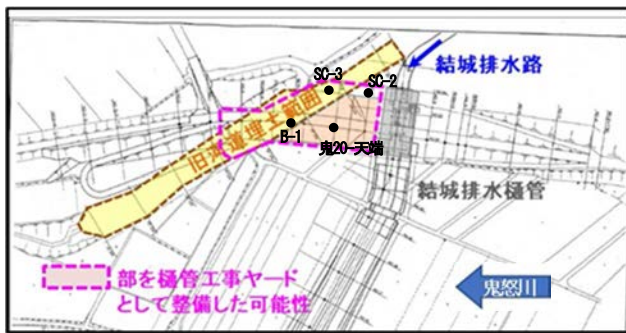


図-8 旧河道の埋土平面範囲(S56工事完成図より)

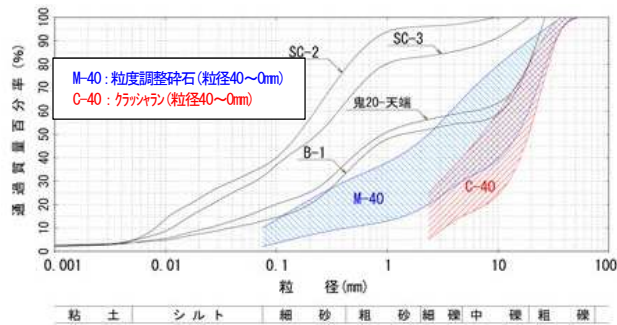


図-9 粒径加積曲線の重ね図

た結果、台風第19号降雨では、川表遮水矢板背後の表水面、基礎-上観測孔の地下水位の過度な上昇が抑えられ（図-5を参照）、内水氾濫の水面における気泡の発生は微少であった。また、台風通過直後の10月13日には、堤防に浸透した雨水がドレーンを通じて排水されている状況も確認されている。

よって、関東・東北豪雨後に整備した漏水対策工が、河川水から受ける影響に対して、一定の効果を発現したと考えられる。また、流向流速測定の結果から、堤体基盤Bg1層における最大流速は $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 程度で極めて低く、地下水による築堤土の流動変化は無いものと推定されることと、堤体基盤部Bg1層の最大地下水位上昇量3.3mと同程度の地下水位上昇量が裏台地観測孔Ds層で観測されているが周辺堤防への変状は見受けられないことから、地下水による堤体への影響は小さいと考えられる。

6. まとめ

本報告では、上山川地区堤防とその周辺における面的な地下水動態を把握するため、これまでの観測体制²⁾に、ボーリング調査と圧力式水位計を追加し、更に流向流速測定を実施した。この結果、高圧力帯水層を形成する要因となる地下水供給源として、堤防裏側台地に加えて、埋め戻された旧河道から帯水層への地下水供給が新たに把握でき、外水による堤防への影響は無かった。堤体基盤層の地下水は、土砂が流動するような流速ではなく、堤防に影響を及ぼすものではなかった。しかしながら、高圧力帯水層が堤防に与える影響を払拭できていないこ



図-10 治水地形分類図と現況結城排水路の重ね図

とから、面的な基盤土質構造と地下水動態に関する更なる調査検討課題を以下に整理した。

- ・ 川裏側の旧河道に地下水観測孔を新たに設置するとともに、その近傍にあるコンクリート三面張りの結城排水路にも水位計を設置して、旧河道と結城排水路との地下水の関連性を把握する。
- ・ 洪水時と灌漑期無降雨時における地下水挙動の違いや、堤防裏側台地だけでなく川裏旧河道からの地下水供給にも着目し、高圧力帯水層を形成する要因となり得る地下水供給メカニズムの解明と、地下水供給に対する具体的な対策を判断するための地下水動態観測と流向流速測定を継続して行っていく。あわせて、地下水観測孔での注水試験により、地下水位と流向流速の応答を確認するための基礎調査も行う。

なお、本調査検討は、堤防裏側台地や旧河道を有する地形・地質における堤体の安全性検討の貴重な資料となるものである。

参考文献

- 1) 佐藤豊，河原武志，大淵貴，福岡捷二：千曲川堤防における裏のり尻付近の基盤漏水・噴砂発生箇所の土質・地下水位と旧河道特性の関係，河川技術論文集，第24巻，pp.571-576，2018。
- 2) 青木裕，青山貞雄，内堀寿美男，石田和也，椎木貴敏，田端幸輔，福岡捷二：平成27年9月関東・東北豪雨における鬼怒川上山川地区堤防と地下水動態について，河川技術論文集，第25巻，pp.559-564，2019。

(2020.4.2受付)