

10. 観測所近傍の河川水位に連動した地下水位変動

Changes of Groundwater Levels corresponding to High Water Level of River near Groundwater Observatory

技術支援課 大澤健二、○川合将文、小川 好

1. はじめに

土木技術支援・人材育成センターでは、地下水位の変動から地盤沈下を監視するため、42 地点 92 井の地盤沈下観測井より毎正時の 1 時間データをテレメータで収集している。

収集データは様々原因で欠測が発生する。最も多いのは落雷による観測局舎の停電や設置してあるファクトリー・コンピュータ (FC) の故障によるものである。欠測を減らすために雷対策、ハードディスクの二重化、収集ソフトの改良等を実施しているが、欠測を減らすことは容易なことではない。

本報告で使用する 1 分データは、突発的に起こる原因不明の正時データの欠測をどう減らすか、に関連して収集されたものである。手法はいたって単純で毎正時の 1 時間データのほかに 1 分データを同時収集し、現地の FC に保存・蓄積しておく。ある正時データが欠測になった場合、その正時の前後の 1 分データを回収して変動傾向を検討し、正時データを補完するというものである。この方法が導入できた背景には大容量ハードディスクが安価に使用できるようになったことが大きい。平成 15 年頃から FC の更新に合わせて収集している。

2. 特異な地下水位の変動

モニター画面で地下水位の変動を監視していると、時々、図-1 から図-3 (○印) のように、短時間に針状に上昇する特異な水位変動が、特定の観測井で、観察されることがある。

この特異な変動は、地下水の揚水による変動や台風の通過や降雨などの自然要因による変動とは明らかに

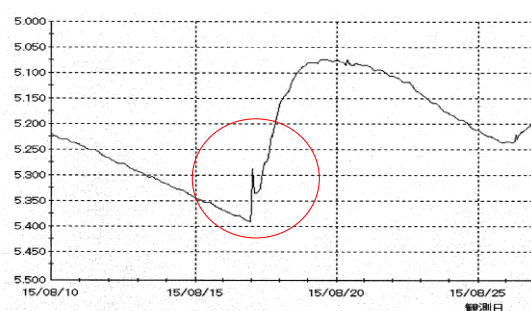


図-1 杉並 (浅井戸) での観測例 (2015 年 8 月)

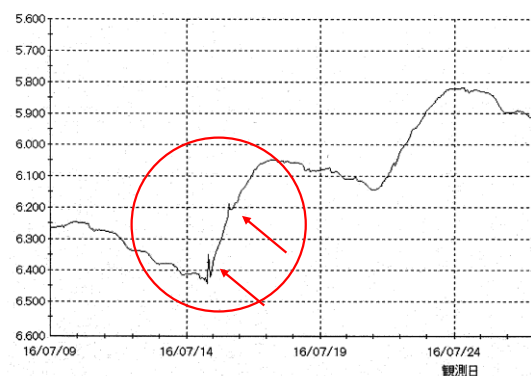


図-2 東村山第 1 での観測例 (2016 年 7 月)

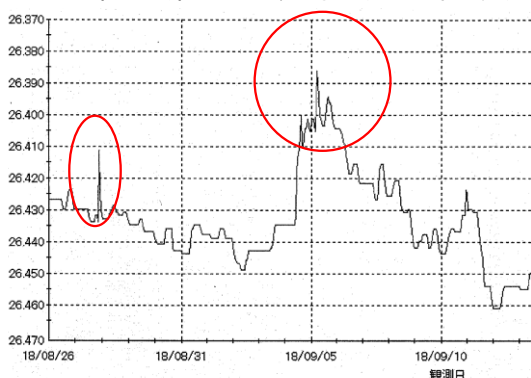


図-3 板橋での観測例 (2018 年 9 月)

異なる変動で、その理由がよくわからなかった。

詳細は後述するが、この特定の観測井とは、近くに河川が流れている観測井である。図-1 杉並（浅井戸）観測井は近く善福寺川が流れている。図-2 東村山第1観測井はすぐ脇に空堀川が流れている。図-3 板橋観測井はやや離れているが石神井川が流れている。

また、その発生時期は、ゲリラ豪雨等で急激な増水で河川水位が上昇した時に、短期的に発生する現象であることがわかってきた。

この他に、時々、新宿局（神田川）、町田南局（恩田川）、調布局（野川）などでも観察されることがある。

3. 東村山地盤沈下観測局の事例

本報告は、図-1 から図-3 で例示した3例のうち、東村山地盤沈下観測局（以下、東村山観測局と記す）を事例に、1分データを活用して、河川水位の変動に連動した地下水位の変動メカニズムについて解明を試みたものである。

観測地点の位置関係は図-4、空堀川河床高と観測井のストレーナー深度等の関係は図-5のとおりである。

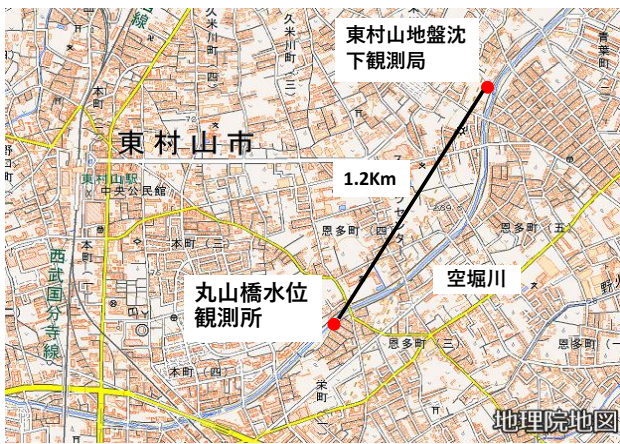


図-4 観測地点の位置

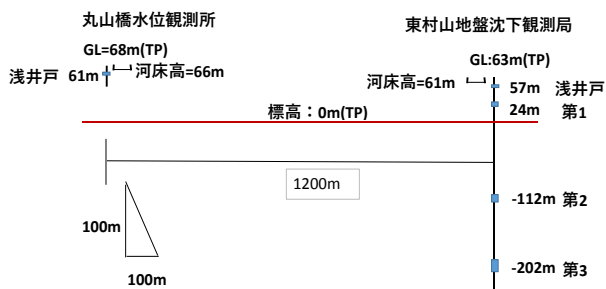


図-5 河床高と観測井ストレーナー深度等（単位：T.P.）

今回使用した空堀川の河川水位データは、東村山観測局の上流約1200mにある建設局水防災総合システムの丸山橋水位観測所（以下、丸山橋観測所と記す）で観測された1分データである。

地下水位データは東村山観測局の第1及び第2観測井が1分データ、東村山（浅井戸）が1時間データ、丸山橋（浅井戸）は10分データである。

各観測点の空堀川との距離、対象地下水の区別、ストレーナー深度等は次にとおりである。

丸山橋（浅井戸）の地盤高はT.P. 68mで、丸山橋観測所のすぐ近くの護岸脇にあり、管頭は護岸とほぼ同じ高さである。武蔵野礫層の不圧地下水を観測し、ストレーナー中心深度は深さ7m（T.P. 61m）である。

東村山観測局の地盤高はT.P. 63mで、空堀川とは河川敷と遊歩道を挟み、護岸から10m程度しか離れていない。第1観測井は江戸川層の被圧地下水を対象に、ストレーナー中心深度は39m（T.P. 24m）、第2観測井は舎人層の同じく被圧地下水を対象に、ストレーナー中心深度は175m（T.P. -112m）、第3観測井は東久留米層の同じく被圧地下水を対象に、ストレーナー中心深度は265m（T.P. -202m）である。また、東村山（浅井戸）は武蔵野礫層の不圧地下水を対象に、ストレーナー中心深度は6m（T.P. 57m）である。なお、第3観測井は有意な水位変動が観測されなかったことから今回はデータを割愛した。

各観測データの同時性について、丸山橋水位観測所、丸山橋（浅井戸）、東村山観測局、東村山（浅井戸）はそれぞれ独自の時刻に従って記録されており同期はとられていない。

また、丸山橋観測所では水位（H）-流量（Q）曲線が求められており、流量と流速を推定することができる。それを利用して東村山観測局での高水到達時間の遅れを推定すると、水位が1mでは流速は1.57m/秒、水位が2mでは2.08m/秒となり、高水ピークの伝播速度は流速の1.5倍程度とされることから、東村山観測局での時間遅れは、水位が1mのときは約8.5分、2mのときは6.4分程度と推定される。

4. 河川水位と地下水位の急上昇との関係

1) 時系列データの比較

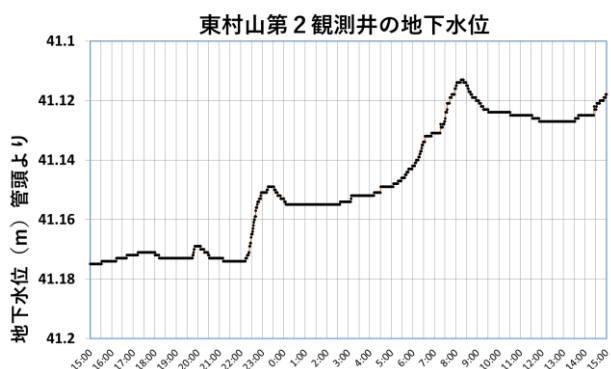
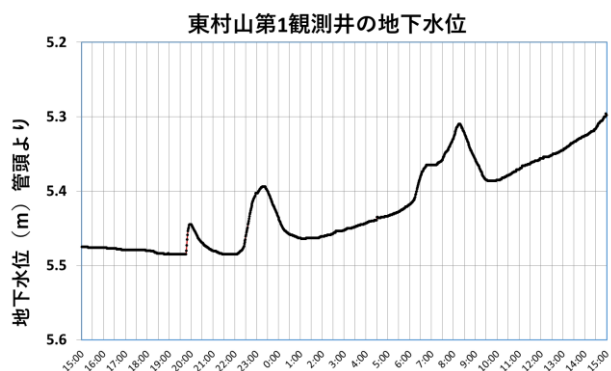
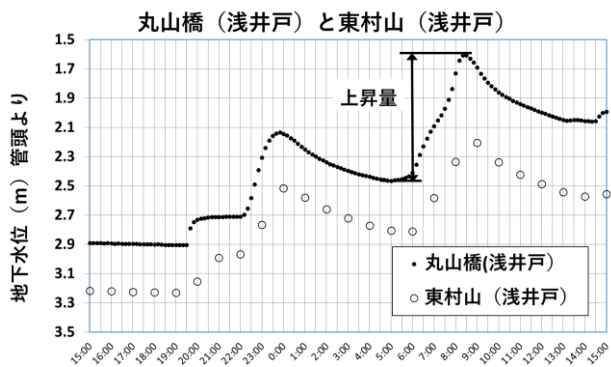
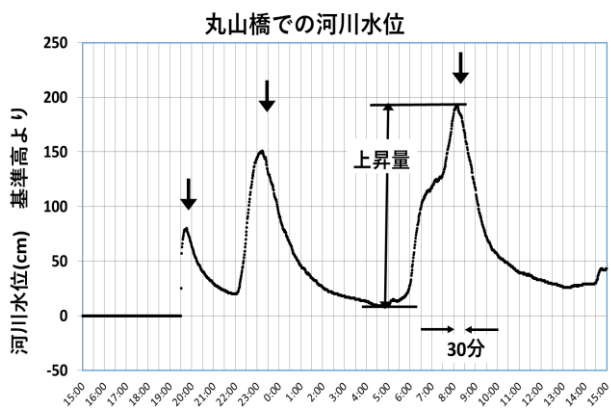


図 - 6 2015年8月16日から17日の記録(24時間)

解析対象とした3期間(2015年8月16日から17日、2016年7月14日から15日、2018年9月1日から2日)の河川水位と地下水位の変動状況は図-6、図-7、図-8のとおりである。

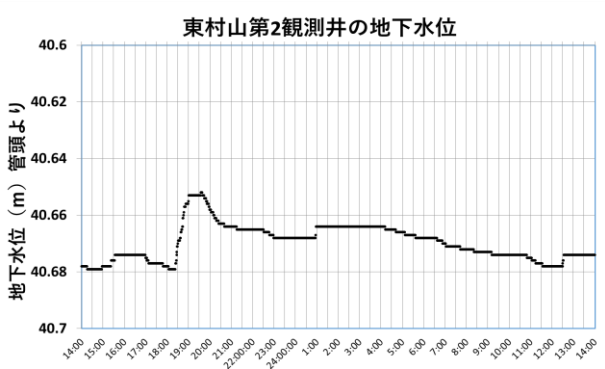
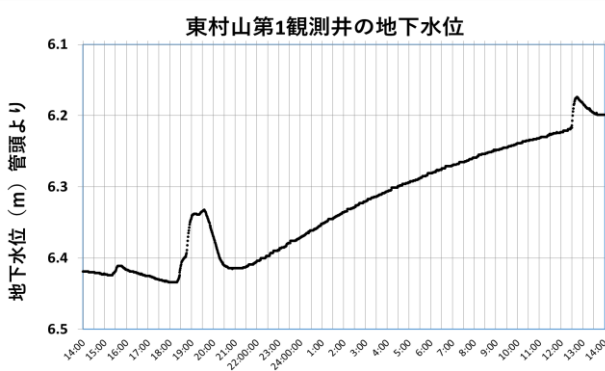
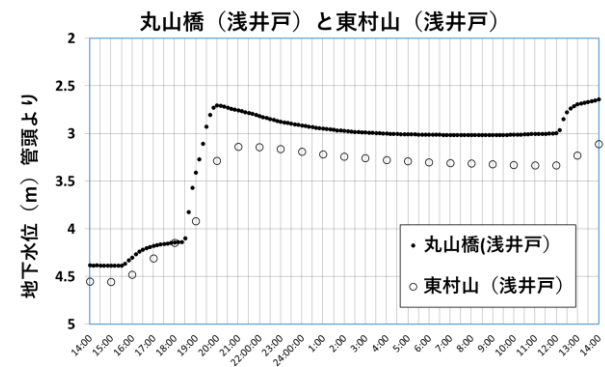
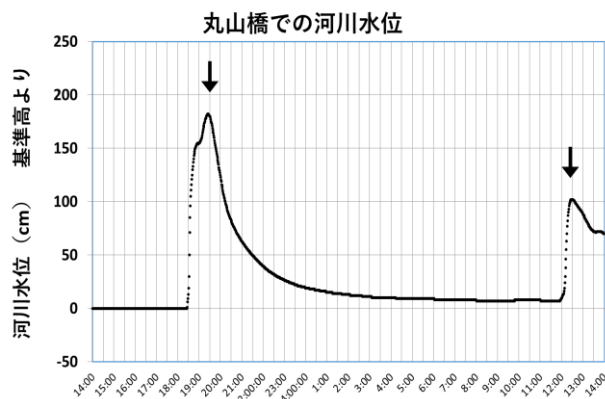


図 - 7 2016年7月14日から15日の記録(24時間)

それぞれ最上段が河川水位、2段目が二つの浅井戸の不圧地下水位、下2段が東村山第1及び第2観測井の被圧地下水位である。なお、東村山第3は前述のとおり割愛している。

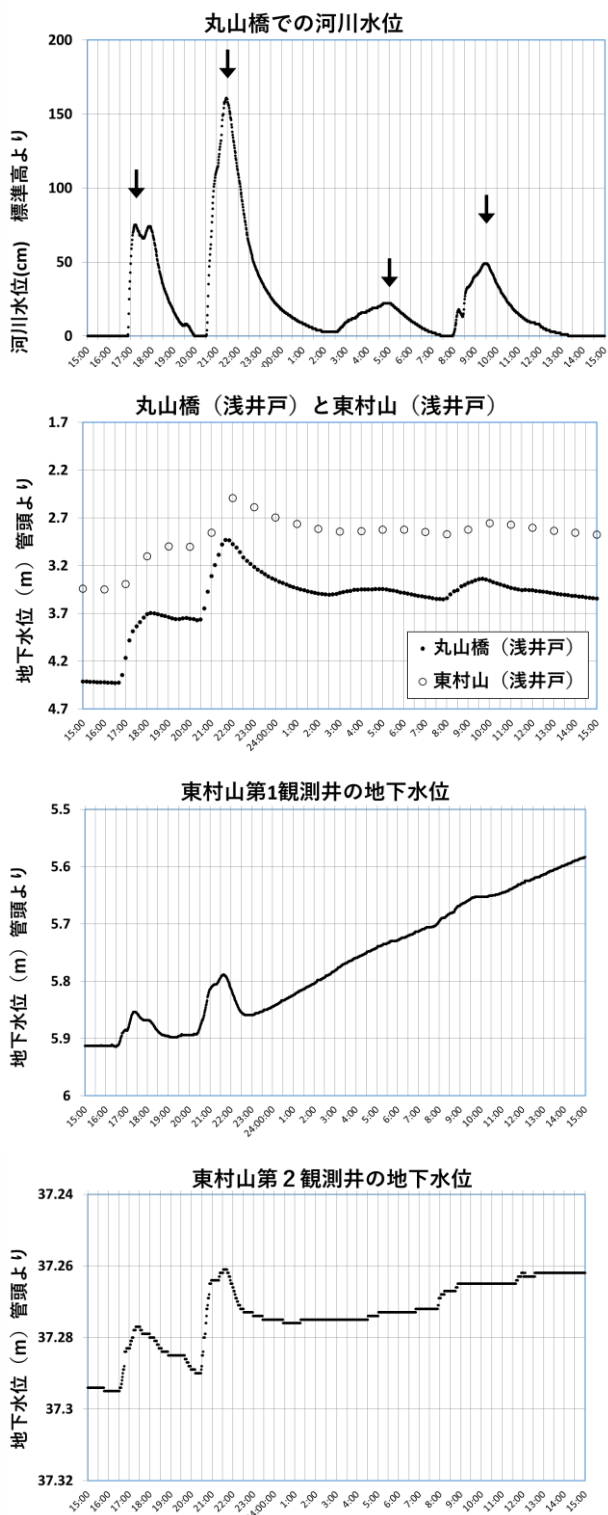


図 - 8 2018年9月1日から2日の記録(24時間)

3期間中の9例(河川水位に↓を付記、図-8の3番目矢印の東村山第1及び第2は水位上昇が不明瞭のため上昇量の読み取り対象から除いた)は、河川水位の上昇とほぼ同時に、いずれも地下水位が上昇している。

河川水位は、図の時間軸(横軸)の目盛が30分間隔であることから、図-6では2時間程度で、図-7では

1時間程度で、それぞれ最大2m近く上昇している。また、河川水位の上昇に対応する地下水位の上昇は、いずれもほぼ同時に立ち上がりを開始し、ほぼ同時刻に最大値となっている。

河川水位及び地下水位の上昇量の読み取り方は、図-6に矢印の範囲で例示した。

(2) 地下水位上昇のメカニズム

地下水位の変動要因は、媒質である水そのものの移動である透水現象と、媒質に圧力が加わることで水圧が変化し、その結果、水頭が変化する圧力伝播現象の2つがある。地盤の透水性はあまり高くないことから透水現象には時間がかかるのに対して、圧力伝播は弾性波速度で伝わることから、地下水位の変動はほぼ瞬時に現れる。

このことから、今回の9例はいずれも河川水位と地下水位の上昇がほぼ同時であることから、透水現象ではなく圧力伝播現象であろうと想定した。

① まず、透水現象の可能性が考えられる不圧地下水位を観測している浅井戸について検討した。二つの浅井戸は、空堀川に距離が近いだけでなく、河床に露出している武蔵野礫層を帯水層として共有しているので、より空堀川に近い丸山橋(浅井戸)について検討した。

丸山橋(浅井戸)は設置時に現場透水試験が行われている。土質は粘土混じり砂礫で、透水係数は深度5.0mから5.5mでは 2.44×10^{-5} m/秒(注入法)と 1.87×10^{-5} m/秒(回復法)、深度13.3mから14.0mでは 1.06×10^{-6} m/秒(注入法)と 7.41×10^{-6} m/秒(回復法)である。

今回の事例に即して、透水係数を 2×10^{-5} m/秒、水頭差を2m、透水距離を1mとして計算すると、定常流でも浸透距離1mを流れる時間は6.9時間にもなり、ほぼ同時という観測結果とは一致しない。

このことから、丸山橋(浅井戸)の水位上昇は透水現象によるものではない、とすることができる。また、東村山(浅井戸)も、丸山橋(浅井戸)以上に離れているので、透水現象によるものではない、と言える。

② 次に、圧力伝播によるメカニズムとして、粘性土の圧密に伴う圧力伝播のメカニズム(図-9)を想定して検討した。

河川の増水によって地盤内に応力増加が発生し、帯水層内の応力も増加する。増加した応力の載荷直後の

時点では、応力はすべて間隙水の水圧増加（過剰間隙水圧）によって受け持たれる。観測井の水位上昇はこの水圧増加によるもので、透水現象によるものではない。この意味から、計測される水位上昇は正しくは圧力水頭の上昇である。

時間の経過とともに、透水によって過剰間隙水圧は低下し、砂礫層の骨格構造が収縮して応力を分担することになる。しかし、被圧地下水では排水距離が長いと考えられ、透水による消散が短時間では難しいことから、過剰間隙水圧が高い状態を保ったまま、河川水位の低下による帯水層内の応力低下に応じて地下水位が低下する。今回の観測事実と整合している。

一方、不圧地下水の場合、飽和帯の上部に接している毛管帯に透水すると考えると、砂礫層は粘土層に比べて透水係数が高く骨格の体積圧縮率が小さいことから短時間で排水が完了するという結果となり、観測事実と整合しない。不圧地下水の応力伝播のメカニズムについては、さらに詳細な検討が必要である。

なお、圧力伝播の事例は、東部低地の被圧地下水位に見られる潮位に類似した水位変動が知られている。この周期変動は潮汐の大潮や小潮に対応して振幅も変化するが、東京湾の駿潮所（晴海）の潮汐とは有意な時間差があり、この時間差は観測井の固有値になっている。解析の結果、この水位変動は、東京湾の潮汐が直接影響したのではなく、感潮河川に遡上した水の重量が地盤中の応力を増加させていることが明らかとなっている¹⁾。

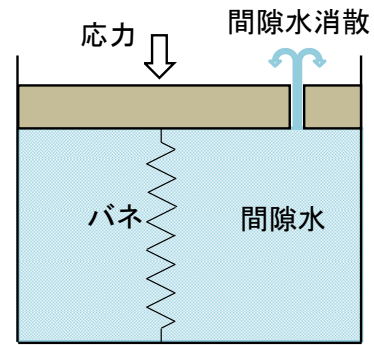


図-9 圧密と同じ圧力伝播のメカニズム・モデル

(3) 解析結果

空堀川の単位長さあたりの水量と地下水位との関係を図-10 に示す。左の図が不圧地下水位、右の図が被圧地下水位である。

河川水位については上昇量から河川水による荷重の増加を推定した。上昇前の水位と最高水位それぞれについて、H-Q 曲線から流量と流速を求め、流量を流速で除することで河川の単位長さ（1m）あたりの水量を計算し、両者の差を単位長さあたりの増加水量とした。単位長さあたりの増加水量は単位長さあたりの荷重増加量を重力加速度で除したものである。また、地下水位の上昇量は帯水層にかかる応力を重力加速度で除した値であるから、後者を前者で除した値は（応力 / 荷重）の比となっている。

地下水位の上昇が河川水の増加に伴う帯水層中の応力増加とすると、河川の増加水量と地下水の水位上昇量は線形となる。図-10 の不圧地下水と被圧地下水は

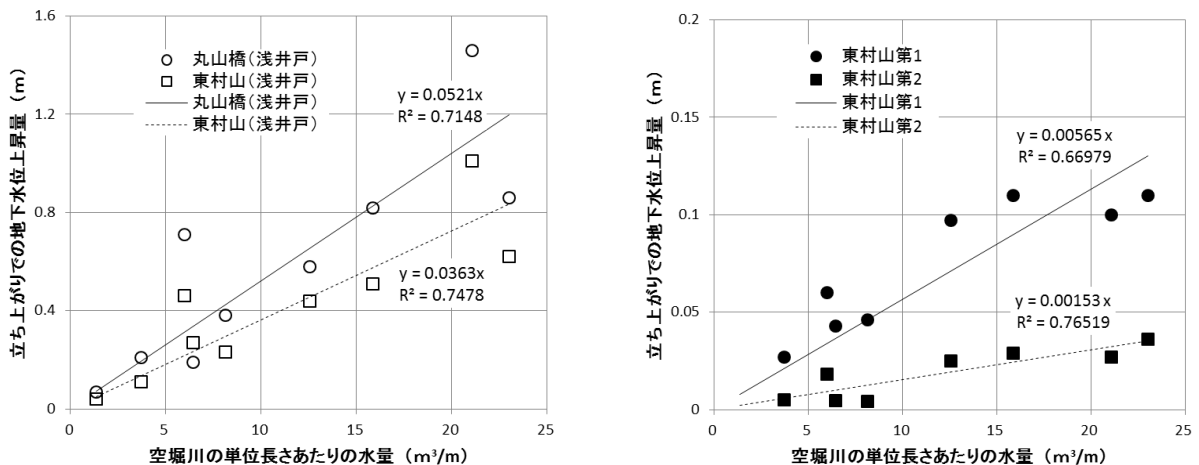


図-10 空堀川の単位長さあたりの増加水量と地下水位の上昇量との関係

ともに、増加水量がふえると水位上昇量は上昇するという線形関係が認められる。

図-10 に示した線形関係の傾きは、前述した（応力/荷重）の比の平均値となっている。図-11 はこの平均値をストレナーの深度についてプロットしたもので、両対数で表している。両対数軸上での回帰直線の傾きは、ストレナー深度の -1.03 乗となっている。

ところで、等方均質な半無限弾性体の表面に作用する集中荷重によって弾性体内部に発生する応力と変位は、Boussinesq の解で求められる。特に、応力の解はポアソン比だけに依存することから、地盤の剛性や荷重の大きさに影響されないため、実際の値と比較的よく一致するとされている²⁾。

今回の事例についてみると、単位長さあたりの増加水量は、この単位長さあたりの線荷重を重力加速度で除した値である。対象としている地盤を等方均質な半無限弾性体、空堀川を幅のない直線荷重と近似すると、弾性体内部に発生する増加応力は Boussinesq の解では深度の -1 乗に比例することになる。図-11 の深度の乗数 -1.03 はこの理論値 -1 とほぼ等しいことから、地下水位の上昇は河川水位の上昇による帯水層内の応力増加であるという考えを補強する結果となった。

5. おわりに

空堀川に近接した観測井に見られる河川水位の上昇に連動した特異な地下水位の上昇について考察した。地下水位の上昇は、河川水位の上昇に伴う帯水層内の応力増加に起因するのではないかと想定し検討した結果、次の結論が得られた。

- ① 河川水位と地下水位の上昇はほぼ同時に発生しており、透水現象による時間遅れが見られない。
- ② 河川水位の上昇量から計算される荷重増加と地下水位の上昇量との間には線形関係が認められる。
- ③ 地下水位の上昇量と河川の加重増加から求めら

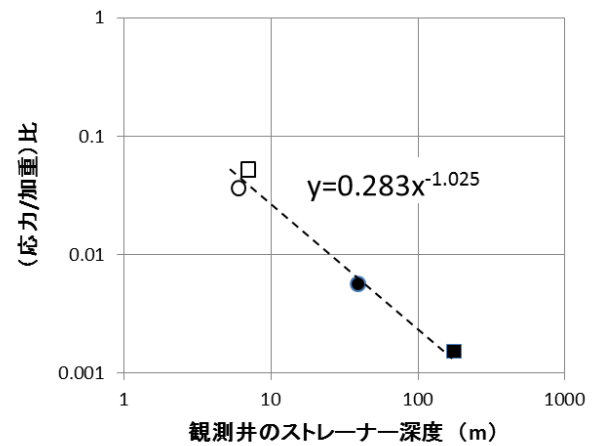


図-11 (応力/加重) の比とストレナー深度との関係

れる（応力/荷重）比とストレナーの深度を両対数軸上にプロットしたときの傾きは深度の -1.03 乗であり、半無限弾性地盤の表面に線荷重を載荷した時の地盤内応力の逓減率である深度の -1 乗に近い値となった。

本報告のとおり、河川近傍で観測される地下水位の上昇は、河川水位の上昇に伴う帯水層内の応力増加に起因することが解明された。そのメカニズムは圧密現象における載荷荷重の過剰間隙水圧への転嫁と同様であると考えられる。ただし、不圧地下水の水位低下については、観測事実を説明できる適切な圧力伝播モデルは見つかっていない。

地下工事に伴い、周辺の地下水位を連続観測する例は多いと考えられるが、近接した場所に河川があると増水時に地下水位の上昇が見られる可能性がある。この水位上昇を河川からの浸透であると無条件で判断すると、場合によっては無駄な止水工事を施工することになる。この解析事例が参考になれば幸いである。

また、本報告は、欠側を減らし良質なデータ取得を目的とした業務改善策の1分データを活用した成果である。日頃業務の中で感じた疑問を生かし、新たな成果に繋がられたことは幸いである。

参 考 文 献

- 1) 東京都土木技術研究所 (1979) : 地震時の地下水位変動に関する研究 (その2)、昭和54年度 東京都防災会議地震部会調査研究、東京都防災会議
- 2) 河野伊一郎、八木則男、吉国 洋 (1997) : 土の力学、p. 77、技法堂出版