

善福寺川地下調節池取水施設の影響による水面勾配を考慮した水位流量曲線の検討

首都大学東京大学院	都市基盤環境学域	学生員	○大塚 理人
東京都	土木技術支援・人材育成センター	正会員	高崎 忠勝
首都大学東京大学院	都市基盤環境学域	正会員	河村 明
首都大学東京大学院	都市基盤環境学域	正会員	天口 英雄

1. はじめに

河川の水位観測データから流量を推定する際には、水位流量曲線（以下、「H-Q 曲線」という）によって求めることができる。H-Q 曲線式としては、2 次式が多く用いられている。2 次式の H-Q 曲線は水位と流量を 1 対 1 の関係で表現しており、計算が容易である。一方で、洪水時には河川の H-Q 関係は単純な一価関数とならず、時系列的に反時計回りのループを描く場合がある。これは、洪水時に河床勾配に対する水面勾配の変化の影響が無視できなくなるためである。2 次式ではこのような H-Q 関係の二価性を表現できないため、洪水時に 2 次式を用いると流量の推定値に大きな誤差を含む場合がある。この場合、マンニング式等を活用し水面勾配を考慮した H-Q 曲線を作成することが推奨されている²⁾。特に短時間のうちに増水する河川や、取水施設付近などの水位が変動しやすい地点では、増水時の流量を水位から推測する際に水面勾配を考慮した計算が有効であると考えられる。以上の背景の下、本検討では東京都の善福寺川における地下調節池取水施設の上流地点を対象とし、マンニング式を用いて水面勾配を考慮した H-Q 曲線を作成し、増水時の流量を推定した。また、推定された流量を実測値および 2 次式による推定値と比較検討し、その再現性について評価を行った。

2. 対象地点

本検討では東京都区部に位置する都市中小河川の善福寺川を対象とした。善福寺川は杉並区の善福寺池に源を持ち、中野区との区境付近で神田川に合流する延長 10.5km、流域面積 18.2km²の荒川水系の一級河川である。対象地点は図-1 に示す本村橋地点とした。善福寺川には神田川・環状七号線地下調節池（以下、「地下調節池」という）の取水施設があり、本村橋は取水施設の上流に位置している。本村橋では 2016 年に浮子による高水流量観測調査が実施されており、並行して簡易水位計により水位を 1 分間隔で観測している。図-1 中には簡易水位計の設置位置を併記している。簡易水位計はおよそ 500m の範囲内に 5 地点設置されている。また、図-2 に本村橋の河川断面形状ならびに 2 次式の H-Q 曲線および流量観測の実測値を示す。流量観測により得られた本村橋における 2 次式の曲線式を式(1)に示す。

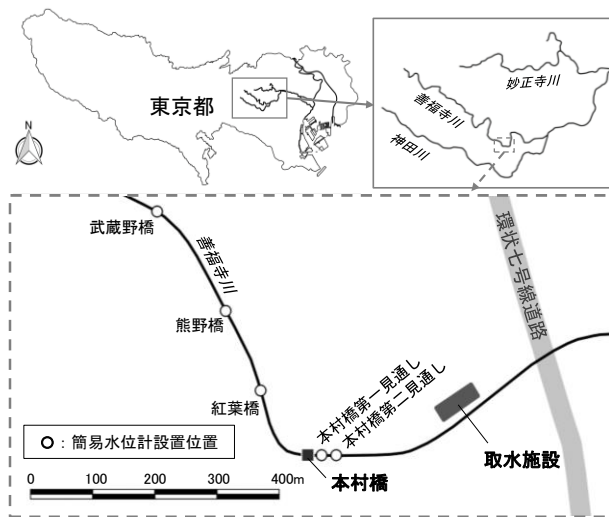


図-1 対象地点

$$Q = 5.330 \times (H + 0.187)^2 \tag{1}$$

ここに、 Q : 流量(m³/s), H : 水位(m).

高水流量観測では、比較的大きな流量を観測した 2016 年 8 月 22 日（観測最大流量 75m³/s）および 2016 年 9 月 20 日（観測最大流量 41m³/s）のイベントを用いることとした。

地下調節池の善福寺川取水施設は、治水安全度の早期向上を目指し 2005 年 9 月に運用を開始した。豪雨時には効率的な取水をするため取水ゲート操作を行い洪水の貯留を行っている³⁾。取水ゲート操作により地下調節池への流入が開始すると水位が大きく変動するため、流量の推定に際しては水面勾配を考慮した計算

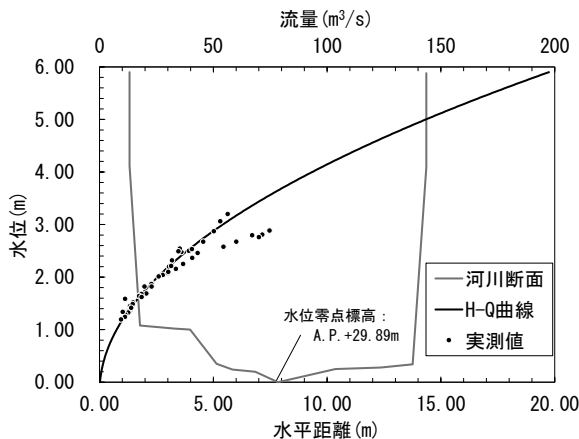


図-2 河川断面形状および H-Q 曲線

が必要であると考えられる。本検討では、流量観測における実測流量および簡易水位観測データを用い、水面勾配を考慮したH-Q曲線を作成した。なお、洪水時にH-Q曲線がループを描くのは一般的に河床勾配が小さく、かつ粗度が大きい大河川で顕著であるとされる⁴⁾が、中小河川である東京都の神田川においても発生することが報告されている⁵⁾。

3. H-Q 曲線の検討

流量観測で最大の流量が観測された2016年8月22日のイベントを対象とし、以下の式(2)に示す Manning式を用いてH-Q曲線を作成する。

$$Q = VA = \frac{1}{n} I^{1/2} AR^{2/3} \quad (2)$$

ここに、V:平均流速(m/s), n:粗度係数(m^{1/3}・s), I:水面勾配, A:流積(m²), R:径深(m)。

流積Aおよび径深Rは、対象地点の河川断面横断測量データを用い、水位に対応する値を計算する。水面勾配Iは、2地点の簡易水位データを用い、水位差を地点間の河道延長で除した値とした。よって、粗度係数nを適切に設定することで式(2)を用いて水位から流量を計算できる。水面勾配の計算として、図-1中に示した各地点の簡易水位観測のデータを用いて、表-1に示すようにA~Dの4パターンに分けて検討を行った。

図-3に8月22日のイベントの相生橋のハイトグラフ、取水ゲート開度および簡易水位計のハイドログラフを示す。対象としたイベントは台風起因する豪雨であり、善福寺川流域内の本村橋より上流に位置する相生橋雨量観測所(東京都水防災総合情報システム⁶⁾)では、24時間雨量108mm、60分最大雨量29mmを記録している。図より、降雨ピーク付近でゲート開度が100%となり、地下調節池への流入に伴い水位が急激に下がっている様子が確認される。また、ハイドログラフには本村橋第一見通しにおける流量観測時の実測水位を併記している。流量実測値は増水期から減水期まで期間全体に渡って観測されている。このイベントに対し粗度係数を検討し、得られた粗度係数を基に水面勾配を考慮したH-Q曲線の検討を行う。

(1) 粗度係数の検討

流量観測データを用い、表-1の各パターンで式(2)から粗度係数を逆算した。式(2)より得られた粗度係数を「逆算粗度係数」とする。また、ゲート高さによる粗度の変化を把握するため、ゲート開度が20%以下のデータを「ゲートが上がっている」状態、80%以上の状態を「ゲートが下がっている」状態として分類して検討を行った。なお、開度20~80%のデータは「ゲート操作中」と見なして使用しないこととした。また、検討においては表-1中の本村橋第一および第二見通しの水位は流量観測における実測水位を、残りの地点は簡易水位計のデータを用いることとした。得られた逆算粗度係数と水位の関係を図-4に示す。図より、各パターン内では逆算粗度係数の値は概ね一定となっていることが確認できる。表-2に各パターンにおける逆算粗度係数の平均値、標準偏差、最大値および最小値を示す。表中の各パターンにおける「差」の項目には、ゲートが高い時と低い時における逆算粗度係数の平均値の差を示している。表より、各パターン内でゲート高さによる逆算粗度係数の値に大き

表-1 水面勾配のパターン分け

パターン	上流	下流	距離(m)
A	武蔵野橋		530.43
B	熊野橋	本村橋第二見通し	326.83
C	紅葉橋		196.70
D	本村橋第一見通し		33.00

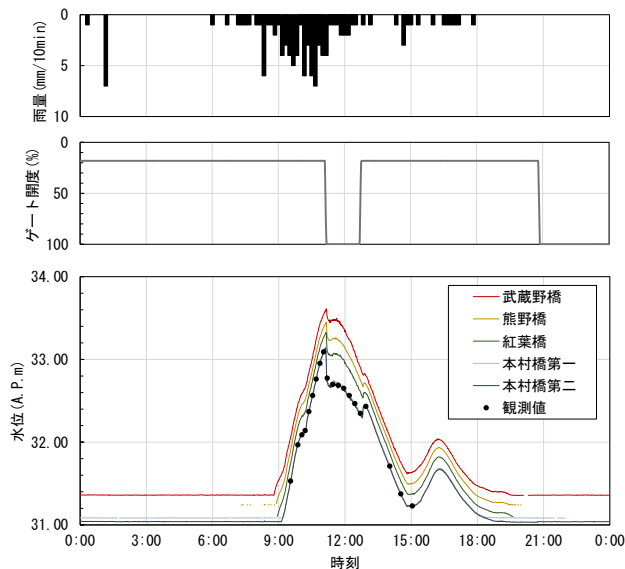


図-3 8月22日のハイドログラフ

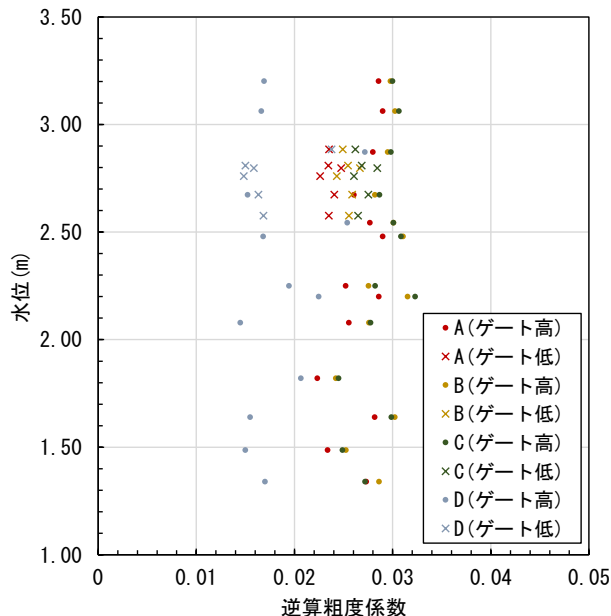


図-4 水位と逆算粗度係数の関係

な差はなく、取水ゲート操作による粗度の変の影響は小さいと考えられる。また、計画上の粗度係数は河川断面の状態により $n=0.0225\sim 0.035^7)$ であるため、パターン A~C では概ね妥当な値が得られたと考えられる。パターン D における逆算粗度係数の平均値 0.018 は計画上の値と比較してやや小さな値である。これは、パターン D では水面勾配計算時の 2 地点間の距離が 33m と他パターンと比較して大幅に短いことから、2 地点で大きな水位差が発生しなかったため水面勾配の変化が過小に計算されたためと考えられる。

(2) 流量の再現性

表-2 に示した逆算粗度係数の平均値を用い、パターン毎に水面勾配を考慮した H-Q 曲線を作成し、実測値の再現性を 2 次式とともに比較検討する。再現性の評価指標としては式(3)で表される NS (Nash-Sutcliffe) 指標および式(4)で表されるピーク誤差 E_p を用いた。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs(i)} - Q_{cal(i)})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs(i)} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (3)$$

$$E_p = \frac{Q_{obsP} - Q_{calP}}{Q_{obsP}} \quad (4)$$

ここに、 $Q_{obs(i)}$: 時刻 i における観測流量, $Q_{cal(i)}$: 時刻 i における計算流量, $\overline{Q_{obs}}$: 観測流量の平均値, Q_{obsP} : 観測ピーク流量, Q_{calP} : 計算ピーク流量, N : データ数。

NS 指標は、流量のばらつきの大きさを考慮して流出モデル等の精度を評価する指標であり、1 に近いほど精度は良く、0.7 以上で再現性は高いとされる⁸⁾。 E_p は、ピーク流量の相対誤差であり、その絶対値が小さいほどピーク流量の再現性が高いといえる⁹⁾。

図-5 に式(2)を用いた各パターンの H-Q 曲線と 2 次式の曲線および実測値を、表-3 に各パターンおよび 2 次式の NS および E_p をそれぞれ示す。図より、実測の H-Q 関係はループを描いており、各パターンの計算値も水面勾配を考慮したことでループが再現されている。なお、通常では H-Q 曲線のループは時系列的に反時計回りとなるが、図に示した曲線は高水時に時計回りのループを描いている。これは取水ゲート操作に伴い、

地下調節池への流入時に流速が大幅に増したためと考えられる。パターン A~C は良好に実測値を再現しており、NS の値はいずれも 0.95 程度の非常に高い再現性を示している。一方で、パターン D は NS の値は 0.7 程度であり概ね良好な再現性を示しているものの、ピーク流量を過大に算出している。加えて、図より全体的な実測値の再現性も他パターンと比較して劣っている様子が見受けられる。また、2 次式の H-Q 曲線は水位が概ね 2.5m 以下の低水時には良好に実測値を再現しているが、特にピーク流量付近の高水時には流量を過小に評価しており、 E_p の値も比較的大きくなっている。2 次式の NS の値は 0.7 を下回っており、 Manning 式を用いた全パターンと比較しても最低の値であることから、水面勾配が急変するイベントに対しては水面勾配を考慮した計算が有効であるといえる。また、水面勾配の計算に際しては NS および E_p の値はパターン C (2 地点間

表-2 各パターンの逆算粗度係数の平均値

パターン	ゲート高さ	平均	標準偏差	最大値	最小値
A	全	0.026	0.0000053	0.029	0.022
	高	0.027	0.0000044	0.029	0.022
	低	0.024	0.0000004	0.025	0.023
	差	0.003	-	-	-
B	全	0.028	0.0000055	0.032	0.024
	高	0.029	0.0000044	0.032	0.024
	低	0.025	0.0000005	0.027	0.024
	差	0.003	-	-	-
C	全	0.028	0.0000043	0.032	0.024
	高	0.029	0.0000048	0.032	0.024
	低	0.027	0.0000007	0.028	0.026
	差	0.002	-	-	-
D	全	0.018	0.0000142	0.027	0.014
	高	0.019	0.0000156	0.027	0.014
	低	0.017	0.0000094	0.024	0.015
	差	0.002	-	-	-

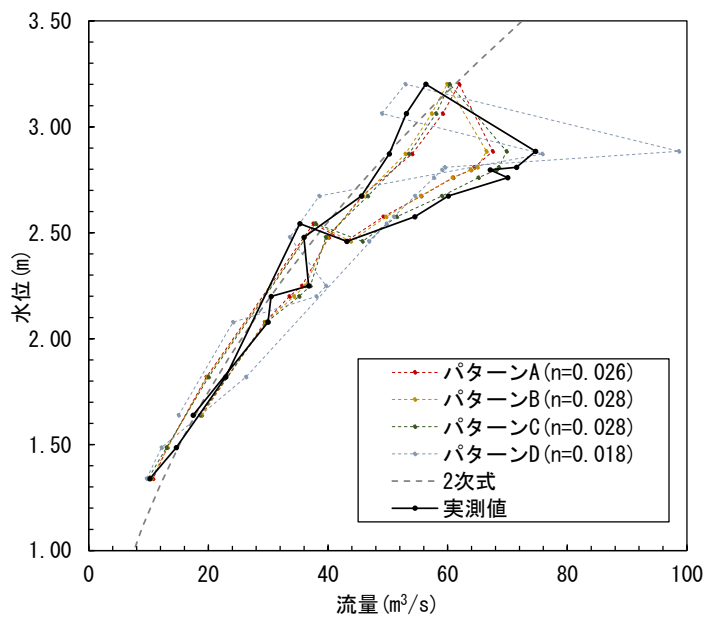


図-5 8月22日における実測および推定の H-Q 曲線

表-3 各パターンの NS および E_p

パターン	NS	E_p
2次式	0.629	0.181
A	0.949	0.096
B	0.953	0.110
C	0.975	0.065
D	0.717	-0.321

距離 196.70m) が共に最も高い値を示しており、これよりも距離の長いパターン B (326.83m) および A (530.43m) では僅かに NS の値が減少していることから、対象地点では 200m 程度の距離を確保して計算をすることで適切に水面勾配の影響を反映することが出来ると考えられる。

4. 他イベントへの適用

前章で得られたパターン毎の逆算粗度係数を用い、流量観測で 2 番目に大きな流量が観測された 2016 年 9 月 20 日のイベントに適用する。このイベントで観測された最大流量は $41\text{m}^3/\text{s}$ であり、地下調節池への取水は行われていない。また、相生橋の雨量は、24 時間雨量 84mm 、60 分最大雨量 18mm であり、比較的小規模な増水イベントである。

図-6 に式(2)を用いた各パターンの H-Q 曲線と 2 次式の曲線および実測値を、表-4 に各パターンおよび 2 次式の NS および E_P をそれぞれ示す。図-6 より、パターン A~C の計算流量は実測値を良好に表現しており、NS の値はいずれも 0.9 程度であることから概ね適切な流量の推定値が得られたといえる。パターン D では、図より期間全体に渡って流量を過小に算出しており、NS および E_P ともに低い再現性を示している。一方で、2 次式は NS の値が 0.9 を超えていることから、2 次式を用いた場合でも概ね適切な流量推定値が得られた。これは、このイベントは 8 月 22 日のイベントと比較して、雨量やピーク流量が小さいほか、地下調節池への流入がないことから水面勾配の変化が流量に与える影響が小さかったためと考えられる。

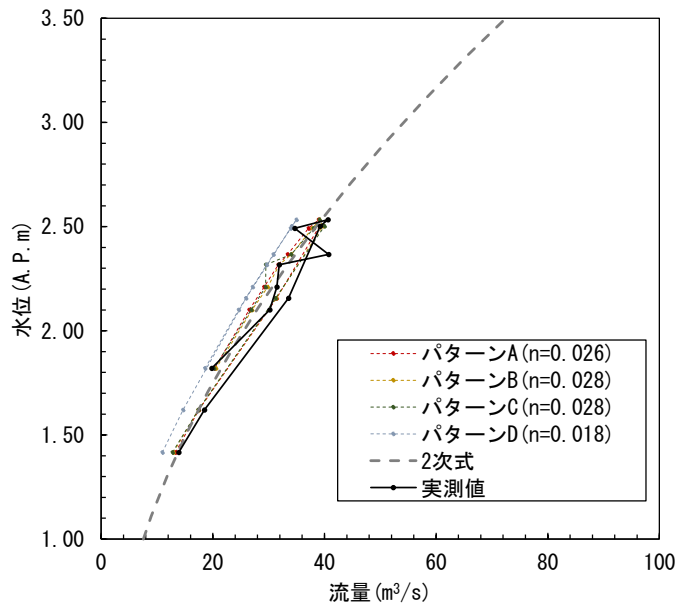


図-6 9月20日における実測および推定の H-Q 曲線

表-4 各パターンの NS および E_P

パターン	NS	E_P
2次式	0.905	0.125
A	0.897	-0.315
B	0.909	-0.090
C	0.896	-0.097
D	0.655	-1.390

5. むすび

本検討では、都市中小河川善福寺川の地下調節池取水施設の上流地点を対象として増水時の流量を、水面勾配を考慮した H-Q 曲線によって推定し、その再現性について評価を行った。検討の結果、水面勾配を考慮することで増水時の H-Q のループが再現された。水面勾配の影響を受けにくい比較的小規模の増水時には、マンニング式による水面勾配を考慮した H-Q 曲線による推定流量は、2 次式による推定流量と同程度の再現性を示した。一方で、地下調節池への流入があり、水面勾配が大きく変動したイベントに対しては、特にピーク流量付近を推定する際には水面勾配を考慮した計算をすることで 2 次式よりも優れた再現性を示した。また、水面勾配の計算に際しては、水位データを用いる 2 地点間の距離を 200m 程度確保する必要があることから、水面勾配の影響を強く受ける地点では 200m 程度の間隔で水位観測所が位置していることが望ましい。

参考文献

- 1) 栗城稔, 山本泰督: 高水流量観測の非定常性を克服する試み, 平成 25 年度河川情報シンポジウム講演集, 2013.
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局: 国土交通省河川砂防技術基準調査編, 2014.
- 3) 東京都: 荒川水系神田川流域河川整備計画, 2016.
- 4) 一般財団法人国土技術研究センター: 河道計画検討の手引き, pp.65-69, 山海堂, 2002.
- 5) 増田信也, 高崎忠勝, 服部憲一: 神田川流域の高水流量観測結果, 平成 16 年東京都土木技術研究所年報, pp.187-198, 2004.
- 6) 東京都: 平成 29 年度東京都水防計画, 2017.
- 7) 東京都建設局: 東京の中小河川, 1985.
- 8) 日本学術会議: 回答 河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価 一公開説明(質疑)一, pp.10, 2011.
- 9) 一般財団法人国土技術研究センター: 流出解析システム Ver2.3 解析手法について, 2001.