

水面勾配を考慮した水位流量曲線による 東京都中小河川の治水安全度の検討

大塚 理人^{1*}・高崎 忠勝²・河村 明¹・天口 英雄¹

¹首都大学東京 大学院 都市環境科学研究科（〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1）

²東京都 土木技術支援・人材育成センター（〒136-0075 東京都江東区新砂1-9-15）

* E-mail: otsuka-masato@ed.tmu.ac.jp

東京都の都市中小河川である善福寺川の時間50ミリ降雨に対応する河川改修の未完了地点を対象に過去の洪水イベントの最大流量を推定し、治水安全度の評価を行った。最大流量の推定には、一般的に用いられる2次式の水位流量曲線のほか、断面特性や水面勾配を考慮した水位流量曲線を作成し比較検討することで、評価結果に及ぼす影響について検討を行った。評価の結果、2次式の水位流量曲線では特に大きな流量を推定する際に大きな誤差を含むことが示された。一方で、河川の断面特性を考慮することで、概ね妥当な評価結果を得ることができ、水面勾配を考慮することで水位流量曲線のループが再現された。また、河川改修による治水安全度の向上も示唆され、河川改修の有意性が示された。

Key Words :stage-discharge curve, urban small and medium size rivers, safety level of flood control, Tokyo

1. はじめに

東京都の中小河川の高水流量観測調査では主に浮子を用いた観測が行われている¹⁾。流量観測に際しては、降雨による河川の増水を予め把握し、現地で観測の体制を整えておく必要がある。しかし、中小河川では増水の原因となる短時間強雨の発生予測が困難であることや、降雨による水位の上昇が極めて早いことから、計画高水流量に相当するような大きな流量については、その観測が極めて難しくほとんどデータがないのが実態である。

水位から流量を推定する際に用いられる水位流量曲線は、流量観測値を基に作成され、2次式が多く用いられている²⁾。観測値より大きな水位や流量に適用することを外挿といい、2次式の水位流量曲線では、外挿時に大きな誤差を生じる可能性がある。これは、観測された水位より大きな範囲の断面形状が考慮できないことや³⁾、洪水時の水面勾配の急変により非定常効果が大きくなること⁴⁾などが原因として挙げられる。そこで、やむを得ず外挿する際には曲線を単純に延長するのではなく、河

川の断面積や水面勾配を考慮した水位流量曲線の導入を検討することが好ましいとされている⁴⁾。治水安全度の評価に際しては観測流量より大きな水位や流量を取り扱うため、評価結果に対して水位流量曲線が及ぼす影響は大きいものと考えられる。

本研究では東京都の都市中小河川である善福寺川の時間50ミリ降雨に対応する河川改修（50ミリ計画）の未完了地点を対象に、1分間隔の水位データを用いて2次式および断面形状や水面勾配を考慮した水位流量曲線を作成して過去の洪水イベントにおける最大流量を推定し、治水安全度の評価を行った。また、同時に水位流量曲線が治水安全度の評価結果に与える影響について検討を行う。

2. 対象地点および対象イベント

荒川水系の一級河川である善福寺川は、東京都の代表的な都市中小河川の神田川の支川である。評価の対象とする地点は、善福寺川の松見橋水位観測地点とした。善

福寺川流域および松見橋水位観測地点の位置は図-1に示す。対象地点の流域面積は約12km²であり、流域範囲の多くは杉並区に位置する。対象地点では、50ミリ計画の護岸改修が完了しているが、下流側が未整備であることから対象地点を含む上流側では、河床を下流の流下能力を超えない高さとしており⁹⁾、50ミリ計画の最終的な改修完了には至っていない。また、対象地点では2008年に高水流量観測を実施しており、更に、2014年には杉並区の河川ライブカメラ⁹⁾の本格運用が開始した。河川ライブカメラの映像は5分間隔で更新され、ウェブ上で閲覧できる。

対象イベントは、1999年から2014年の16年間の年最大水位を記録した洪水イベントとした。河川水位および雨量データについては、1分間隔で観測している東京都水防災総合情報システムのデータを用いた。雨量は1辺の長さが約1kmである3次メッシュの標高傾斜度⁷⁾を基に、図-1のように流域範囲を設定し、対象地点における流域平均雨量を計算した。なお、計算においては対象地点の上流域およびその周辺に位置する武蔵野、原寺分橋、久我山橋、杉並、池袋橋の計5雨量観測地点のデータを用い、各メッシュの雨量をメッシュの中心から最も近くに位置する雨量観測地点の値とした。

3. 水位流量曲線の作成

一般的に用いられる2次式の水位流量曲線式を式(1)に示す。また、断面特性や水面勾配を考慮した水位流量曲線には式(2)のマニングの平均流速公式を用いることとした。これに流水断面積を乗じた式(3)により、水位流量曲線を作成した。

$$Q = \alpha (H + \beta)^2 \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{n} I^{1/2} R^{2/3} \quad (2)$$

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

ここに、 Q ：流量(m³/s)、 H ：水位(m)、 v ：平均流速(m/s)、 n ：マニングの粗度係数(m^{1/3}・s)、 I ：水面勾配、 R ：径深(m)、 A ：流水断面積(m²)、 α 、 β ：定数。

マニング式中の流水断面積 A および径深 R は河川断面形状より、水位 H に対応する値を算出し、適用することとした。対象地点の河川断面形状を図-2に示す。図中には2008年の流量観測における観測最大値を併せて示している。観測最大水位は河床から天端までの半分にも満た

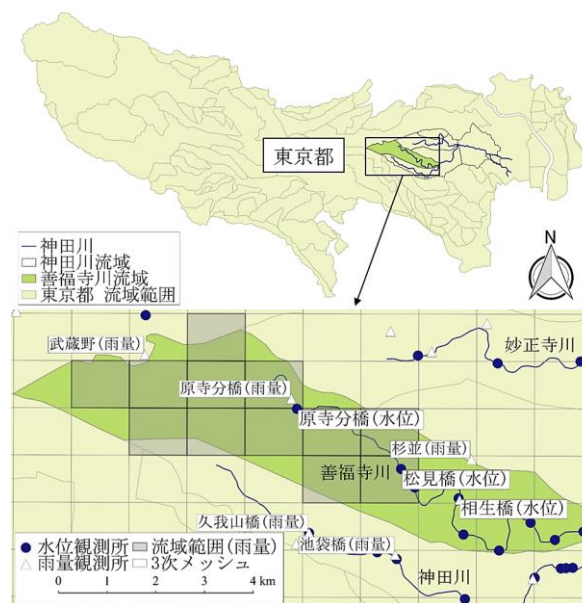


図-1 対象地点

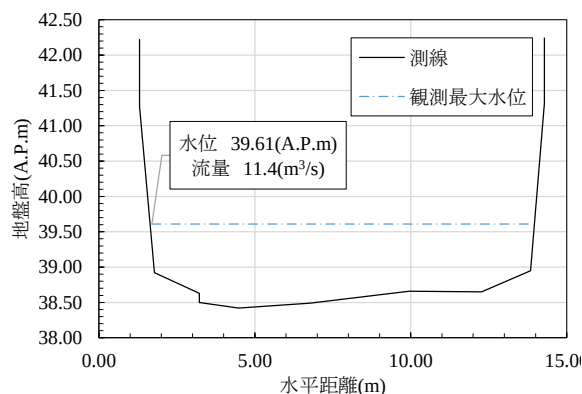


図-2 河川断面形状

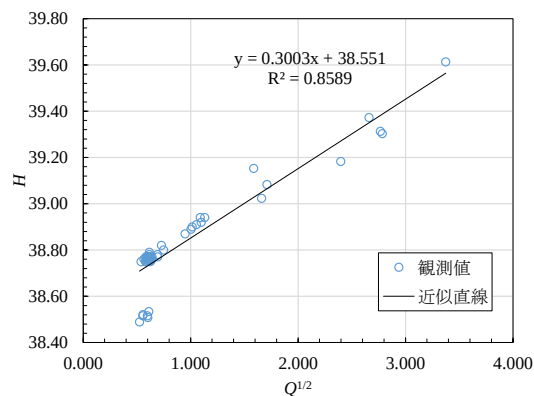


図-3 定数 α 、 β の算定

ないことがわかる。なお、式(3)は水面勾配 I を一定とした場合、可変とした場合の2種類の水位流量曲線を作成することとした。

(1) 2次式の水位流量曲線

高水流量観測の水位 H を縦軸、流量の平方根 $Q^{1/2}$ を横軸としてプロットすると図-3が得られる。図より、観測

値が概ね一直線上に並んでいることがわかる。この図において、最小自乗法により得られた一次近似式を変形することにより、定数 $\alpha=11.092$ 、 $\beta=-38.551$ と決定した。

(2) マニング式（水面勾配一定）

式(3)の水面勾配 I を一定と仮定すると、 $I^{1/2}/n=K$ として、式(4)が得られる。

$$Q = KAR^{2/3} \quad (4)$$

高水流量観測の流量 Q を縦軸、水位より算出した $AR^{2/3}$ を横軸としてプロットすると図-4が得られる。この図において、最小自乗法により得られた原点を通る一次近似式の勾配より、定数 $K=0.937$ と決定した。

(3) マニング式（水面勾配可変）

水面勾配 I は式(5)のように、近隣に位置する水位観測地点との水位差 ΔH を観測地点間の河道延長 L で除した値とした。近隣の水位観測地点としては、対象地点の上流に位置する原寺分橋観測地点と、下流に位置する相生橋観測地点の水位データを用いた。なお、原寺分橋、相生橋水位観測地点の位置は図-1中に示している。

$$I = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_1 - H_2}{L} \quad (5)$$

ここで、 ΔH ：水位差(m)、 L ：河道延長(m)、 H_1 ：上流の水位(A.P.m)、 H_2 ：下流の水位(A.P.m)。

河道延長 $L=5,500\text{m}$ とし、高水流量観測の水位および同時刻の水位データより算出した $I^{1/2}AR^{2/3}$ を縦軸、流量 Q を横軸としてプロットすると図-5が得られる。この図において、最小自乗法により得られた原点を通る一次近似式の勾配より、粗度係数 $n=0.035$ と決定した。なお、水面勾配を可変とした場合は、対象地点のみの任意の水位から流量を計算することができないため、イベントごとに曲線を作成することとした。

4. 最大流量の推定

2014年の最大水位イベント時である7月24日の河川ライブカメラ映像を目視にて確認し、19時20分時点で溢水が発生していると判断した。この時刻の水位データA.P.+41.41mを基準に、全イベントの溢水の有無を判定し、溢水イベントと非溢水イベントに分類した。

表-1に全イベントの最大水位とその時刻、流域平均雨

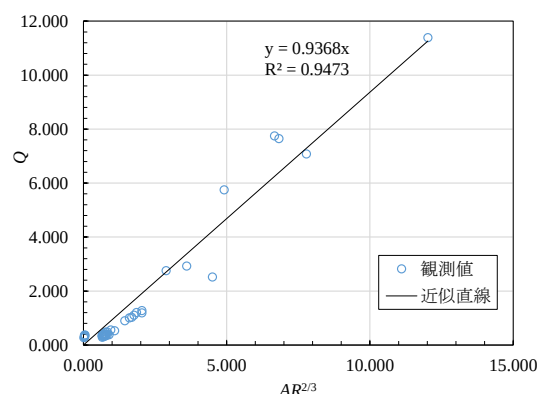


図-4 定数 K の算定

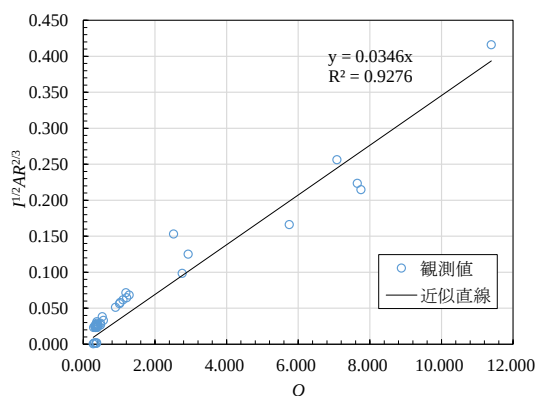


図-5 粗度係数 n の算定

表-1 対象イベント

年	最大水位 (A.P.m)	最大水位時刻				流域平均 60分最大雨量 (mm/60min)
		月	日	時	分	
1999	41.34	8	14	10	0	34.6
2000	40.98	8	7	19	41	34.8
2001	40.86	10	10	16	39	24.5
2002	40.92	8	2	16	13	33.1
2003	41.70	6	25	11	19	43.5
2004	41.57	10	9	17	53	35.8
2005	41.87	9	4	22	26	84.6
2006	40.88	6	16	6	54	24.3
2007	41.57	7	29	14	54	33.9
2008	40.79	5	20	7	33	24.4
2009	41.53	10	8	3	52	41.8
2010	41.22	12	3	7	53	34.3
2011	40.68	9	21	13	3	25.9
2012	40.49	5	3	7	17	20.7
2013	41.62	9	15	7	24	37.4
2014	41.70	7	24	19	40	63.3

量を示す。表中では、溢水イベントを網かけで表している。表より、16年間の内7年で溢水イベントが発生しており、水位から判定すると溢水頻度はおよそ2.3年に一度である。

非溢水イベントは水位流量曲線により最大流量を推定し、溢水イベントの流量は水位より推定することが困難であるため、流域平均雨量から合理式法により推定することとした。

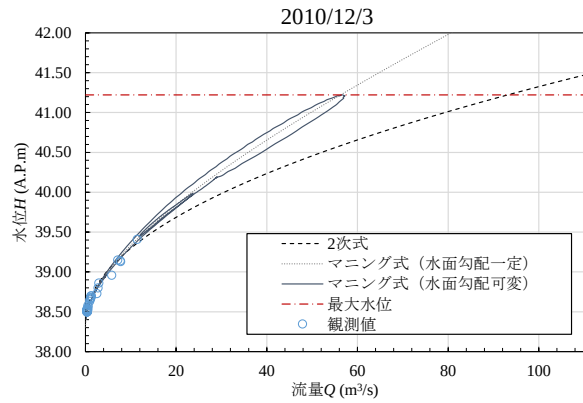
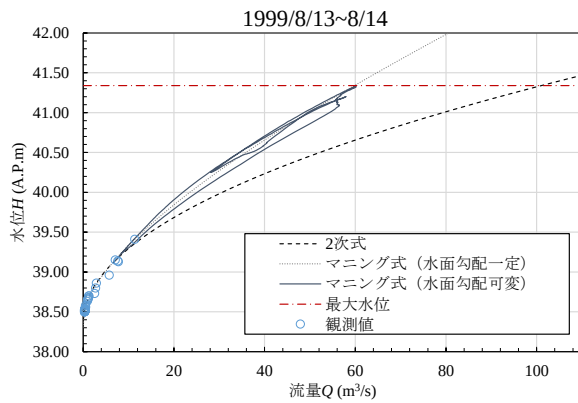


図-6 水位流量曲線

(1) 水位流量曲線による推定

図-6に各水位流量曲線を示す。水面勾配可変の曲線は、非溢水イベント中で最大水位の大きかった1999年および2010年のものを示している。また、溢水時の流量を推定するため、ライブカメラによって溢水の判定を行った2014年のイベントの水位流量曲線を図-7に示す。図中では河川が溢水している領域を網かけで示している。

図より、3本の水位流量曲線は流量観測の観測値の範囲内の内挿領域では概ね一致しているものの、観測値を超えた外挿領域においては、2次式の曲線は他の2つの曲線と比較し、流量を極端に大きく評価する傾向にあることがわかる。これは先述のように、流量観測値より大きな領域の断面特性が考慮されなかったためと考えられる。

マニング式で水面勾配を可変とした場合の曲線では、水位上昇期・下降期の反時計回りのループが再現された。水面勾配を一定とした場合の曲線は、水面勾配を可変とした曲線のループの概ね中心を通っており、最大流量の値は概ね一致している。

(2) 合理式法による推定

合理式法は主に河川計画に多く用いられる手法であり、最大洪水流量 Q_p は式(6)のように表される。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f r B \quad (6)$$

ここに、 Q_p ：最大洪水流量(m^3/s)、 f ：流出係数、 r ：洪水到達時間内の降雨強度(mm/hr)、 B ：流域面積(km^2)。

洪水到達時間は善福寺川の過去洪水時の実績⁹⁾を参考に60分と設定し、流出係数 f は非溢水イベントの最大流量および流域平均雨量より逆算して用いた。

(3) 最大流量の評価結果

表-2の「現況」欄に水位流量曲線および合理式法によ

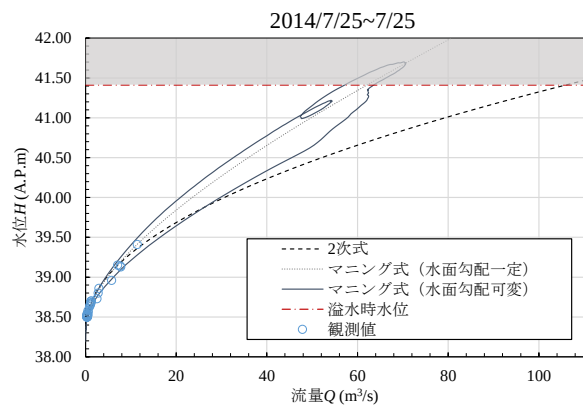


図-7 現況の流下能力

表-2 年最大流量推定値

	年	現況			改修 完了後
		2次式	マニング式		
			水面勾配 一定	水面勾配 可変	
最大 流量 (m³/s)	1999	101	60	60	92
	2000	78	49	56	93
	2001	71	46	47	65
	2002	75	47	50	88
	2003	115	73	75	116
	2004	94	60	62	95
	2005	223	142	147	226
	2006	72	46	47	65
	2007	89	57	59	90
	2008	67	44	45	65
	2009	110	70	72	111
	2010	93	56	57	92
	2011	61	41	43	69
	2012	52	36	36	55
	2013	98	63	65	100
2014	167	106	110	169	
流下能力 (m³/s)	106	62	63	130	
流出係数	0.79	0.50	0.52	0.8	

って得られた16イベントの年最大流量、現況の流下能力および流出係数を示す。合理式により求めた最大流量を網かけで示している。先述のように、2次式を用いた場

合では、マニング式と比較し流量や流出係数が大きく評価された。マニング式を用いた場合は、水面勾配一定・可変に関わらず概ね同様の結果が得られたが、全イベントで水面勾配を可変とした場合の流量が数%上回っている。また、マニング式により得られた流出係数は、50ミリ計画における計画上の流出係数が0.8⁹⁾と比較し大幅に小さな値となった。これは河川改修未完了地点において、雨水放流量規制¹⁰⁾によって下水道から河川への雨水の流出量が規制されていることが主な原因であると考えられる。

また、表-2の「改修完了後」欄には、河川改修完了とそれに伴う雨水放流量規制の緩和を想定し、流出係数を計画上の0.8として、表-1の流域平均雨量を式(6)の合理式に適用して求めた最大流量を示している。流下能力および流出係数はそれぞれ50ミリ計画の計画上の値を入れている。

5. 治水安全度の検討

2次式、マニング式（水面勾配一定および可変）の水位流量曲線により求めた現況の年最大流量に、改修完了後の流量を併せた計4パターンで治水安全度の評価をし、比較検討を行う。

治水安全度の評価には、年最大流量をグンベル分布に適用することとした。グンベル分布は水文統計分野で多く用いられる極値分布である¹¹⁾。グンベル分布の計算式はそれぞれ式(7)～(10)のように与えられる。なお、確率紙上には、式(11)に示すカナンプロットにより年最大流量をプロットした。

$$f(x) = \frac{1}{a} \exp \left[-\frac{x-c}{a} - \exp \left(-\frac{x-c}{a} \right) \right] \quad (7)$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-c}{a} \right) \right] \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{1 - F(x)} \quad (9)$$

$$x = c - a \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (10)$$

$$T_{(i)} = \frac{N+0.2}{i-0.4} \quad (11)$$

ここに、 $f(x)$ ：確率密度関数、 $F(x)$ ：非超過確率、 T ：再現期間、 x ：確率流量(m^3/s)、 a 、 c ：パラメータ、 $T_{(i)}$ ： i 番目に大きな標本に対する再現期間、 N ：統計年数。

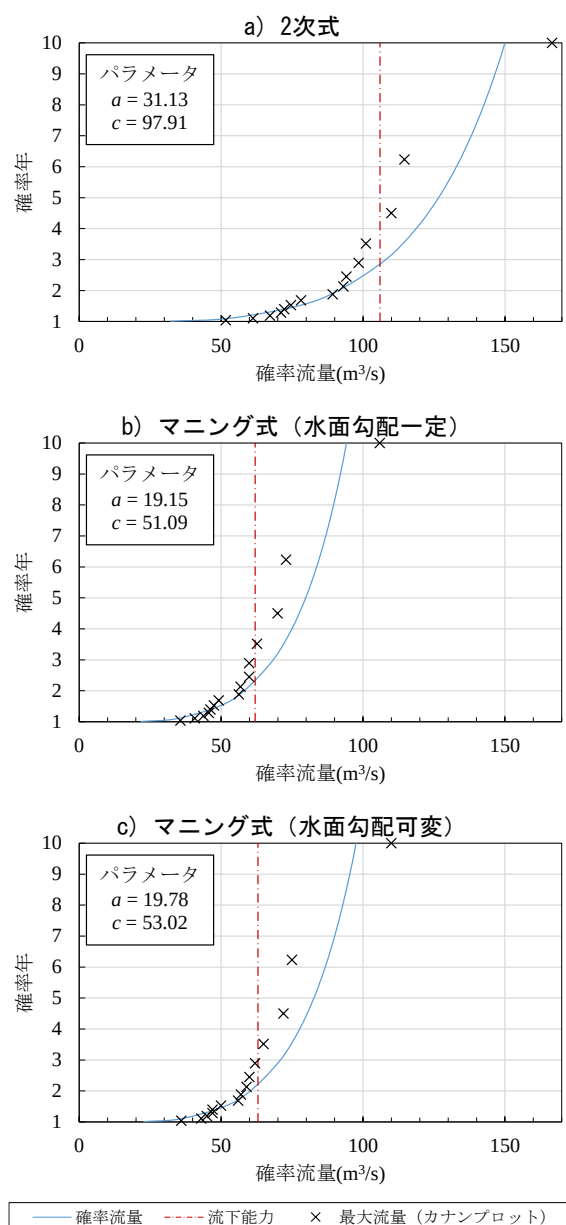


図-8 現況の治水安全度評価結果

(1) 現況の治水安全度

図-8 a)～c)に各水位流量曲線で得られた年最大流量をグンベル分布へ適用して得られた現況の確率流量およびグンベル分布のパラメータを示す。なお、16年間で最大の流量となった2005年の最大流量はカナンプロット式による確率年が27年であるため、確率紙中では省略している。図中の流下能力は表-2の値を用いている。現況において、確率流量が流下能力に達し洪水が発生する確率年は、2次式を用いた場合で3年程度、マニング式を用いた場合は水面勾配一定、可変のいずれの場合も2年程度となった。水位による判定では、23年に1度の洪水頻度であったため、マニング式を用いた評価に近いことがわかる。

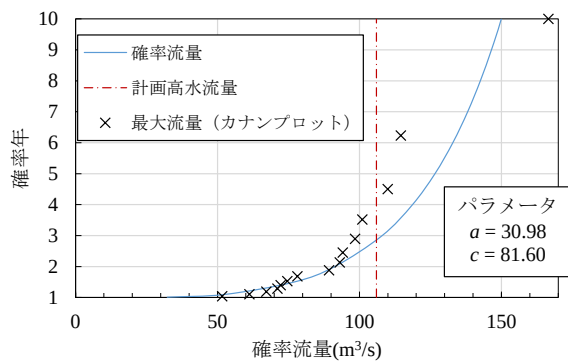


図-9 改修完了後の治水安全度評価結果

(2) 改修完了後の治水安全度

図-9にグンベル分布により得られた改修完了後の確率流量およびグンベル分布のパラメータを示す。同様に2005年の最大流量は省略している。改修完了後の確率流量が対象地点の計画高水流量である130m³/sに達する確率年はおおよそ5年となり、現況と比較し安全度が向上することが示唆された。時間50ミリ降雨の確率年は3年¹²⁾であるため、評価結果は約2年の差異が生じたものの概ね妥当な値が得られたと考えられる。

6. むすび

本研究では、2次式やマニング式を用いた水位流量曲線を用い、善福寺川の松見橋水位観測地点における過去16年間の年最大水位イベントの流量を推定し、治水安全度の検討を行った。検討の結果、河川改修の完了後に雨水放流量規制が緩和されても対象地点における治水安全度は現況よりも向上すると推察された。

2次式の水位流量曲線を用いた場合はマニング式を用いた場合と比較し、流量が過大評価される傾向にあったことから、2次式の水位流量曲線を取り扱う際には特に注意が必要であることが示された。治水安全度の評価においても、マニング式を用いた場合と比較し、安全側に評価された。

マニング式を用い、河川の断面特性を考慮することで

外挿領域においてもより適切な流量の推定が可能であると考えられる。また、水面勾配を考慮することによって水位流量曲線の反時計回りのループが再現されたが、最大流量や治水安全度の評価結果は水面勾配を一定とした場合とほとんど変わらなかった。

今後は、他の地点や河川において同様の評価を行い、水位流量曲線が洪水時の流量推定や治水安全度評価に及ぼす影響についてより詳細に検討する予定である。

参考文献

- 1) 増田信也，高崎忠勝：神田川流域における粗度係数の実態，東京都土木技術研究所年報，1988
- 2) 木下武雄：流量観測の過去と未来，河川流量の新時代，2010
- 3) 高崎忠勝，大澤健二，湊友洋，杉原大介：中小河川における水位流量特性，都土木技術支援・人材育成センター年報，2012
- 4) 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
- 5) 東京都：荒川水系 神田川流域河川整備計画，2010
- 6) 杉並区 気象情報，河川カメラ映像：
<http://www.micosfit.jp/suginami-ku/>
- 7) 国土数値情報，標高・傾斜度 3次メッシュデータ：
<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-G04-a.html>
- 8) 和泉清，井上正之：浸水被害予測モデルの開発（その1），東京都土木技術研究所年報，1988
- 9) 東京都建設局：東京の中小河川，1985
- 10) 鈴木淳也：区部河川における下水道からの雨水放流量の緩和について，東京都下水道局 東京都技術調査年報 Vol.38，2014
- 11) 小林健二：確率降雨と再現期間の推定，測候時報 73.4-5，2006
- 12) 中小河川における今後の整備のあり方検討委員会：東京都内の中小河川における今後の整備のあり方について，2012