

由良川支川における氾濫災害の 現地調査と再現計算

川池 健司¹・Herman Musumari²・中川 一³

¹ 京都大学准教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）
E-mail:kawaike.kenji.5n@kyoto-u.ac.jp

² 京都大学大学院学生 工学研究科社会基盤工学専攻（〒615-8540 京都市西京区京都大学桂）
E-mail:hermusumari@gmail.com

³ 京都大学教授 防災研究所（〒612-8235 京都市伏見区横大路下三栖東ノ口）
E-mail:nakagawa@uh31.dpri.kyoto-u.ac.jp

平成30年7月豪雨において、由良川の支川では樋門の閉鎖による氾濫が相次いだ。現地調査の結果、住宅地では浸水痕跡が最大で2.7mに達する箇所が見られ、氾濫形態としては支川周辺の標高の低い箇所に浸水位がほぼ水平に湛水していたと予想される。数値解析の結果からは、由良川の水位上昇にしたがって、何らかのタイミングで樋門が閉鎖され、行き場を失った支川の洪水が周囲に氾濫したメカニズムが確認された。由良川の洪水水位が支川下流端の水位を上回ったタイミングで樋門を閉鎖した解析を行ったところ、各地点の浸水深を精度よく再現することができた。この場合、樋門閉鎖直後の支川下流端の水位は由良川水位を大きく上回っており、水深の高い状態が長時間継続する結果になったことから、樋門を閉鎖するタイミングを遅らせていれば、最大浸水深を軽減することができた可能性も示唆された。

Key Words: inundation, field survey, numerical simulation, gate operation

1. はじめに

2018年6月下旬から7月上旬にかけておもに西日本で発生した「平成30年7月豪雨」は各地に甚大な被害をもたらした。200名を超える人的被害に達した。とくに、岡山県倉敷市真備町の浸水被害や、広島県内の土砂災害、愛媛県内の土砂災害や肱川水系のダムの異常洪水時防災操作などが注目を集めた。京都府を流れる由良川流域においても7月5日ごろから降雨量が増大し、由良川の水位が上昇し始め、由良川に流入する支川の周辺で浸水被害が発生した。

由良川本川はこれまでたびたび氾濫を引き起こし、沿川に甚大な被害をもたらしてきたため、由良川の両岸には越水を防止するための堤防が建設されてきた。支川が由良川本川に流入する箇所の多くは樋門が設置され、由良川の水位が上昇した際の逆流を防止するようになっている。しかし、今回浸水被害が発生した蓼原（たでわら）川のように、樋門は設置されているものの排水機場が設置されていないため、支川流域に降った降雨が排水されずに溢れて浸水を起こした河川が少なくない。

本研究では、蓼原川周辺における氾濫災害の状況を調

査した結果を報告するとともに、氾濫状況を数値解析によって再現し、樋門の操作による浸水状況への影響を検討することを試みる。

2. 蓼原川周辺の現地調査

(1) 蓼原川周辺の概要

蓼原川は、流域面積が約3.2km²、流路延長1.3kmの由良川の左支川であり、京都府が管理する一級河川である。由良川との合流点には樋門が設置されているものの、排水機場は設置されていない。

(2) 現地調査

災害発生から2週間余りが経過した7月22日に、浸水被害の発生機構の確認と浸水痕跡等を記録することを目的として、蓼原川周辺の現地調査を行った。

図-1に浸水痕跡を計測した地点を、表-1にその浸水痕跡深を示す。表-1には、該当地点の国土地理院発行の基盤地図情報 標高モデル（5m）の値と、それから推定される浸水位をあわせて示す。



図-1 浸水痕跡の計測地点

表-1 各地点の浸水痕跡深
(地点番号は図-1の丸数字に対応)

地点	浸水痕跡深	5mDEM	推定浸水位
1	1.6 m	12.5 m	14.1 m
2	2.3 m	11.8 m	14.1 m
3	1.7 m	12.3 m	14.0 m
4	2.6 m	11.4 m	14.0 m
5	1.6 m	12.4 m	14.0 m
6	2.2 m	11.8 m	14.0 m
7	1.8 m	12.1 m	13.9 m
8	1.4 m	12.8 m	14.2 m
9	2.1 m	12.0 m	14.1 m
10	2.3 m	12.0 m	14.3 m
11	2.2 m	11.8 m	14.0 m
12	2.3 m	11.7 m	14.0 m
13	2.5 m	11.5 m	14.0 m
14	2.6 m	11.4 m	14.0 m
15	2.7 m	11.1 m	13.8 m
16	1.5 m	12.5 m	14.0 m

浸水域は、蓼原川、公手（くで）川、大谷川周辺からあふれた氾濫水により、由良川に沿った標高の低い住宅地ならびに京都丹後鉄道の軌道の南東側の水田地域に広がっている。住宅地で最も浸水深が大きかったところは2.7mに達しており、住宅の1階部分が水没していた（図-2）。国土地理院の基盤地図情報標高モデル（5m）の値と浸水痕跡深を加えた推定浸水位はおおよそ14.0m前後



図-2 2.7mの浸水痕跡が見られた住宅



図-3 蓼原川樋門

となり、氾濫水は水位がほぼ水平な状態で湛水していたことがわかる。蓼原川、公手川、大谷川がそれぞれ由良川、宮川に合流する地点においては、樋門（図-3）はあ

るものの排水施設がないため、行き場を失った支川洪水があふれて氾濫したものと予想される。ただし、宮川より東側については、上野川が由良川堤防を通り抜けるカルバートに樋門がなく、由良川の水位上昇に伴い由良川の洪水がそのまま堤内地にあふれて浸水したものと考えられる。

3. 蓼原川周辺の氾濫現象の数値解析モデル

本節では、数値解析により、蓼原川とその周辺で発生した氾濫現象の再現計算を試みる。用いたモデルは、著者らと同様に、対象領域を上流部と下流部に分割し、上流部での流出解析ならびに洪水解析により洪水流量を解析し、それを境界条件として下流部の平面 2 次元氾濫解析を行うモデルである。ただし、本解析では土砂の流出・堆積は考慮しない。解析対象範囲は、上流部は蓼原川、公手川、大谷川の各流域、ならびに下流部は由良川堤防と宮川堤防に囲まれた範囲とする（図-4）。

(1) モデルの概要

a) 上流部のモデル

上流部では、河道を抽出し、その河道区間をもとに斜面を流域分割する。斜面では、kinematic wave モデルにより流出流量を計算し、それを横流入として河道内の洪水流量を計算し、最終的に下流端における洪水流量の時間変化を出力する。

上流部の流出解析において用いた基礎式は下記のとおりである。

$$\frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$q_s = \alpha_s h_s^m \quad (2)$$

ここに、 h_s ：斜面の水深、 q_s ：斜面上の単位幅流量、 r ：降雨強度、 α_s 、 m ：それぞれ係数で $\alpha_s = \sqrt{\sin \theta_s} / N_s$ 、 $m = 5/3$ であり、 θ_s ：斜面の勾配、 N_s ：斜面の等価粗度である。

河道の洪水流解析で用いた基礎式は、下記のとおりである。

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} + \frac{\partial q_r}{\partial x} = q_s \quad (3)$$

$$q_r = \alpha_r h_r^m \quad (4)$$

ここに、 h_r ：河道の水深、 q_r ：河道の単位幅流量、 $\alpha_r = \sqrt{\sin \theta_r} / N_r$ であり、 θ_r ：河道の勾配、 N_r ：河道の等価粗度である。

図-4 に、上流部において用いた河道と分割した斜面を示す。ここでは、国土地理院の基盤地図情報標高モデル



図-4 上流部の流域分割と氾濫解析対象エリア

ル（5m）を用いて流域分割した。蓼原川、公手川、大谷川の各下流端で得られた洪水流量を、下流部の平面 2 次元氾濫解析の流入境界条件として与える。

b) 下流部のモデル

下流部では、蓼原川などの河道部分を含めた対象領域を三角形非構造格子に分割する。下流部の氾濫解析に用いた基礎式は下記のとおりである。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = r \quad (5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial (uM)}{\partial x} + \frac{\partial (vM)}{\partial y} = -gh \frac{\partial (z_b + h)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (6)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (uN)}{\partial x} + \frac{\partial (vN)}{\partial y} = -gh \frac{\partial (z_b + h)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (7)$$

ここに、 u, v ： x, y 方向の氾濫流の流速、 $M(=uh), N(=vh)$ ： x, y 方向の氾濫流の流量フラックス、 z_b ：地表面の標高、 τ_{bx}, τ_{by} ： x, y 方向の底面せん断応力、 ρ ：氾濫水の密度、 g ：重力加速度である。 τ_{bx}, τ_{by} は、マニング則を用いて、それぞれ下記のように表される。

$$\tau_{bx} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (8)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \quad (9)$$

ここに、 n ：マニングの粗度係数である。

図-4 に示す範囲を対象として、三角形非構造格子に分割した。格子分割の際には、蓼原川、公手川、大谷川の河道のほか、国道 175 号線と京都丹後鉄道の軌道が周囲よりも高い連続盛土構造物となっているため、境界を抽出して考慮した。この各解析格子に、国土地理院の基盤地図情報標高モデル（5m）を用いて標高を与える。なお、河床高は現地調査で簡易に計測した掘り込み深さとして、蓼原川は周辺地盤より 1m（蓼原橋より上流）または 3m（蓼原橋より下流）、公手川ならびに大谷川は周辺地盤より 1m 低い標高を各河川格子に与えた。国道 175 号線と京都丹後鉄道の軌道の標高は、国土地理院の

基盤地図情報標高モデル（5m）の値をそのまま与えるが、河川が盛土を横断する際は河川の標高を反映し、ボックスカルバートなどはここでは考慮しないこととする。

(2) 解析条件

今回の浸水の主要な原因は、各支川下流端にある樋門の閉鎖である。しかし、それぞれの樋門がどのタイミングで閉鎖されたのかに関するデータは公表されていないため、樋門の開閉状態を仮定する必要がある。そこで本研究では、以下の3ケースの解析を行った。

●ケース 1：樋門がつねに開いている。ただし、由良川および宮川の水位は十分に低く、蓼原川、公手川、大谷川の洪水はマンニングの等流公式に従い下流端から領域外に流出すると仮定。

●ケース 2：樋門がつねに閉鎖している。

●ケース 3：樋門が開いた状態から始まり、由良川の水位が蓼原川水位を越えた時刻に3ヶ所の樋門を同時に閉鎖し、計算終了時刻まで閉鎖したままとする。

なお由良川の水位の時間変化は、国土交通省の水文水質データベースから得た天津上と波美の水位を距離に応じて線形補間して求める。

4. 氾濫現象の数値解析結果と考察

(1) 流出解析結果

図-5に、解析に用いた降雨のハイトグラフと、上流部の流出解析による蓼原川、公手川、大谷川の洪水流量のハイドログラフを示す。降雨強度には、アメダスの坂浦地点の10分ごとの値を用いる。また、計算開始時刻は7月6日の午前8時である。7月6日以降、降雨はいくつかのピークがみられるが、いずれの河川においても7月7日0時ごろの降雨によって突出した流量のピークが現れている。3河川の流域面積に応じて、蓼原川のピーク流量は約36m³/s、公手川と大谷川はほぼ同じで6m³/s

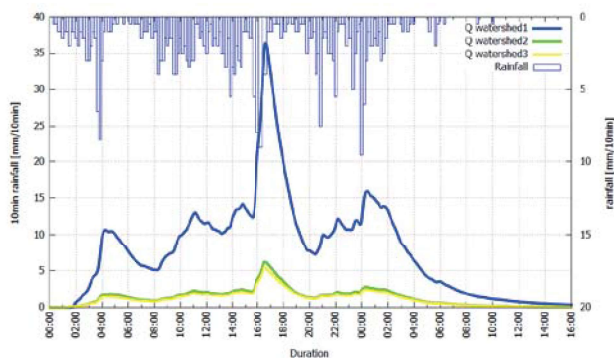


図-5 解析に用いた降雨のハイトグラフと
蓼原川、公手川、大谷川の洪水流量ハイドログラフ

程度であった。この洪水流量ハイドログラフを境界条件として、下流部の氾濫解析を行った。

(2) ケース 1（樋門が開いている場合）

ケース 1の結果、最大浸水深を図-6に示す。各河川の流下能力が不足しており周辺に洪水があふれているものの、浸水深は0.75m未満となっている。とくに京都丹後鉄道の軌道より北西側の浸水は、ボックスカルバートを考慮すれば南東側の水田地帯に流下して浸水が軽減されると考えられる。蓼原川の兩岸と大谷川周辺の京都丹後鉄道の軌道より北西側の浸水域を除けば、浸水域はいずれも水田地帯であり、壊滅的な浸水深には至っていない。このことから、この領域に降った降雨はややまとまった量ではあったが、それ自体で甚大な浸水被害を引き起こすものではなく、由良川の水位が十分に低く樋門を閉鎖していなければ大きな被害には至っていなかったことを示している。

(3) ケース 2（樋門が閉鎖している場合）

ケース 2の最大浸水深を図-7に示す。計算開始から樋門が閉鎖されているため、各河川の洪水がすべて領域内に貯留される結果となり、浸水深がかなり大きくなっている。京都丹後鉄道軌道の南東側の水田地帯で浸水深が4m程度に達しているほか、山際近くの標高の高い市街地にまで浸水域が及んでいる。第2節で述べた現地調査の対象範囲であった蓼原川兩岸の住宅地の浸水深は2m程度、蓼原川と公手川の間にある住宅地の浸水深は3m程度となっている。これらの浸水深は、表-1に示した実測の浸水深よりも明らかに大きい値となっている。このことから、実際の樋門操作は、降雨の降り始めである7月6日8時の時点から閉鎖されていたのではなく、支川からの初期の洪水は由良川に排水され、由良川水位の上昇にしたがって何らかのタイミングで樋門が閉鎖された

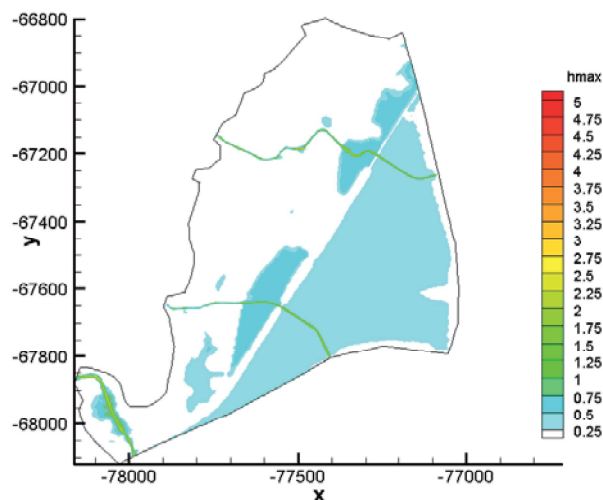


図-6 樋門が開いている場合の最大浸水深

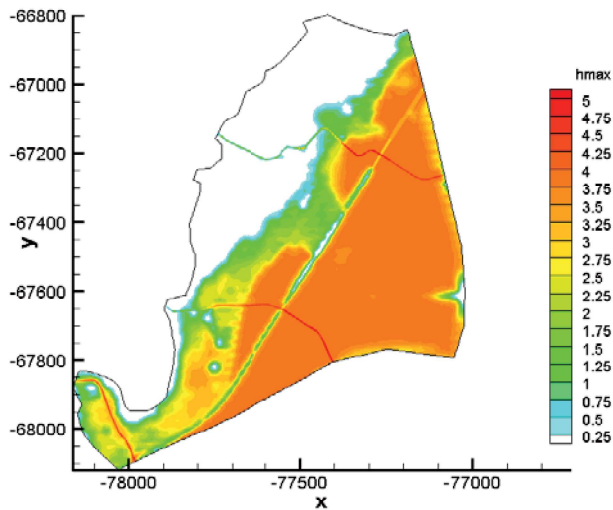


図-7 樋門が閉鎖している場合の最大浸水深

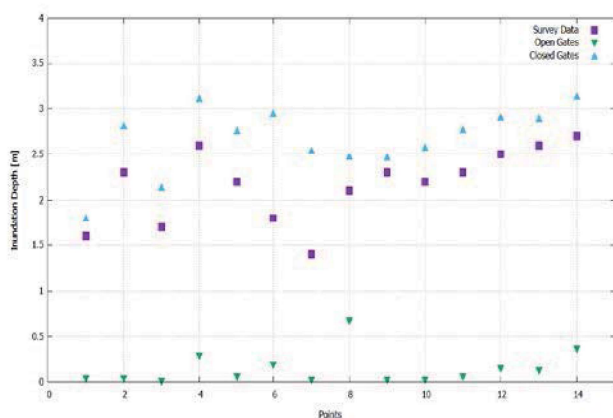


図-8 実測浸水深とケース 1,2 の最大浸水深との比較

と予想される。

図-8 に、現地調査による実測浸水深とケース 1 とケース 2 の最大浸水深との比較を示す。これより、実測浸水深と比較して、ケース 1 ではほとんど浸水が現れず、ケース 2 では過大評価となっていることがわかる。

(4) ケース 3 (樋門が由良川水位に応じて閉鎖する場合)

蓼原川が合流する地点における由良川の線形補間洪水位と、ケース 1 における蓼原川の下流端格子における水位との比較を図-9 に示す。計算開始後は蓼原川の下流端格子の水位が高い状態が続くものの、計算開始 12 時間後に由良川の線形補間洪水位が上回る。降雨の空間分布は一樣ではないものの、集水域の小さい蓼原川は降雨のピークに対する応答が早く、降雨ピークの直後に水位のピークが現れるが、流域面積が比較的大きい由良川はそれよりさらに 10 時間ほど遅れて水位のピークが現れていることがわかる。ケース 3 では、樋門が開いている間はケース 1 と同様に等流公式に従って蓼原川洪水を流出させるが、由良川の洪水位が蓼原川水位を上回った計算開始 12 時間後に 3 ヶ所の樋門が同時に閉鎖されたと仮

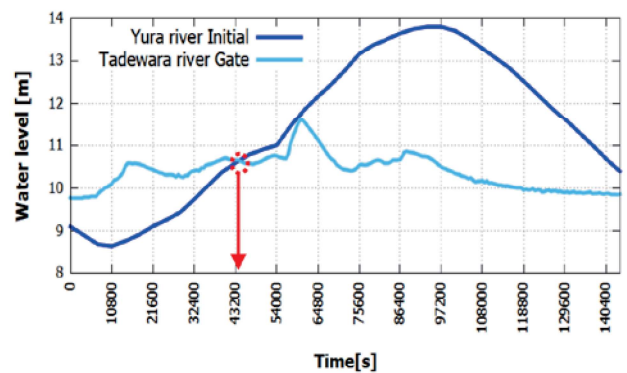


図-9 蓼原川下流端水位と由良川洪水位の比較
(赤丸の時刻が樋門閉鎖のタイミングを示す)

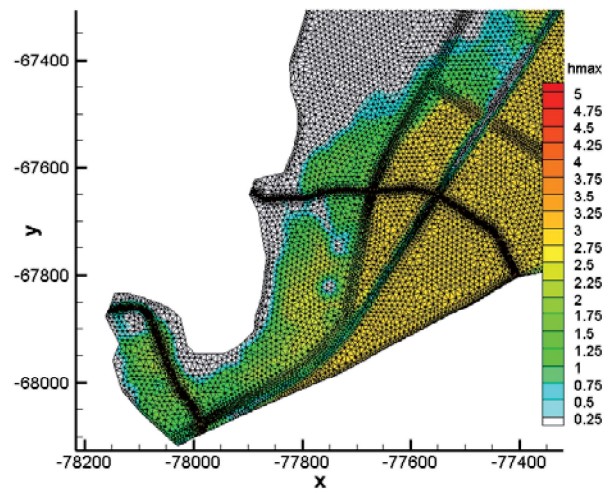


図-10 由良川水位に応じて樋門を閉鎖した場合の最大浸水深

定して、蓼原川の洪水が排水されなくなる条件で計算を行った。なお、一度閉鎖した樋門は計算終了時刻まで閉鎖されたままとする。

図-10 に、領域南西部の蓼原川および公手川周辺におけるケース 3 の最大浸水深を示す。ケース 2 と比較して浸水域がやや狭くなり、浸水深は全体的に減少していることがわかる。蓼原川と公手川の間の住宅地の浸水深は最大で 2.5m 程度となっている。実測の浸水深とケース 3 の最大浸水深との比較を図-11 に示す。これによると、ケース 3 では浸水深の傾向がよく再現できており、精度よく再現できている地点があるものの、多くの地点において実測浸水深よりも一律に 10~30cm 程度小さい結果となっている。したがって、実際の樋門は図-9 に示す計算開始 12 時間後よりもやや早いタイミングで閉鎖されていたと考えられる。

図-12 は、蓼原川の下流端格子の水深の時間変化を示している。樋門が閉鎖される時刻までは、ケース 1 とケース 3 の水深は同じ値で推移するが、樋門が閉鎖されるとケース 3 の水深は瞬時に上昇し、それ以降は高い水深が長時間継続することになる。とくに樋門閉鎖直後の時

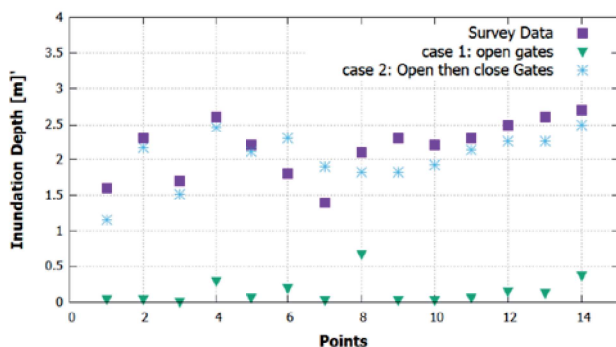


図-11 実測浸水深とケース3の最大浸水深との比較

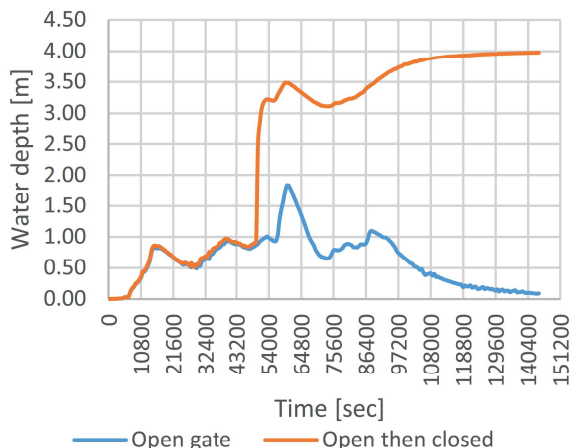


図-12 ケース1とケース3における蓼原川下流端格子の水深

間帯は、蓼原川下流端格子の水位が由良川の洪水位を上回っており、その後に蓼原川洪水のピークの時間帯を迎えることから蓼原川周辺の浸水を急激に増大させる原因になったとも考えられる。つまり、蓼原川洪水のピークが経過した後など、樋門閉鎖のタイミングをもう少し遅らせていれば、由良川洪水の堤内地への逆流は発生するものの堤内地の水位上昇は緩やかに起こると予想され、

結果的には最大浸水深がちいさくなっていた可能性も考えられる。

将来的に降雨の予測精度が向上し、あらゆる支川からの洪水流出予測をリアルタイムで追跡することが可能になれば、最適な樋門閉鎖のタイミングを判断することも技術的に可能になると期待される。

5. おわりに

本研究では、7月豪雨で甚大な浸水被害が発生した由良川支川に着目し、現地調査と数値解析によって被害の発生機構を明らかにした。

現地調査では、各支川が由良川に合流する地点の樋門の設置状況を調査し、周囲の浸水痕跡深を計測して浸水状況を調べた。その結果、住宅地の中には最大で3m近い浸水被害に見舞われた地点もあることがわかった。

樋門の閉鎖のタイミングを仮定した数値解析では、由良川の水位上昇に伴って何らかのタイミングで樋門が閉鎖されたため、支川の洪水が行き場を失い浸水被害が生じたことが明らかになった。解析結果と浸水痕跡深の比較から、実際には由良川水位が支川の水位を上回ったのとほぼ同時刻に樋門が閉鎖されたことがわかったが、樋門の運用の仕方によっては最大浸水深を軽減できた可能性も示唆された。

参考文献

- 1) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一, 中井 勉: 流出土砂が急傾斜都市氾濫解析に及ぼす影響, 水工学論文集, 第45巻, pp.883-888, 2001.

FIELD SURVEY AND NUMERICAL SIMULATION OF FLOOD INUNDATION FROM TRIBUTARIES OF YURA RIVER

Kenji KAWAIKE, Herman MUSUMARI and Hajime NAKAGAWA

Severe inundation occurred around tributaries of Yura river due to the gate closures at the event of Heavy Rainfall in July 2018. We conducted a field survey and found the maximum inundation depth of 2.7 m in the residential area. From the measurement of the inundation depth, it is supposed that the inundation water was stored in low-elevation areas with a horizontal water level. From the numerical simulation, inundation occurred in such a way that the gate was closed along with the water level rise of Yura river, and the flood water of the tributaries had lost the outlet and inundated in low-elevation areas. If the gate was closed at the moment when the water level of Yura river exceeded the water level of the tributary, the simulated depth agreed well with the measured depth at each point. However, in this case, the water level of the tributary suddenly increases and keeps high for a long time, which implies the possibility of decrease of the maximum inundation depth with a late closure of the gate.