

# 豪雨時における下水道管きよの流下能力 に関する実験的研究

吉田 陸<sup>1</sup>・張 浩<sup>2</sup>・川池 健司<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 非会員 熊本大学工学部土木建築学科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)

E-mail: 199t1260@st.kumamoto-u.ac.jp

<sup>2</sup> 正会員 熊本大学大学院先端科学研究部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1)

E-mail: hzhang@kumamoto-u.ac.jp

<sup>3</sup> 正会員 京都大学防災研究所 (〒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

都市排水システムを構成する下水道は、頻発する都市水害の防止と軽減において重要な地下インフラ施設である。下水道は地上の雨水を流入渠等により集め、地下にある管きよネットワークや排水施設等を経て都市外へ排出する。流入渠から下水道管きよへの流入流量の評価は、流入渠及び下水道管きよネットワークの流れ評価に影響を及ぼし、都市全体の排水能力評価において重要な課題である。本研究では流入渠からの雨水流入が下水道管きよ流れに及ぼす影響を基礎水理実験により検討し、豪雨時における下水道管きよの流下能力に関する評価を行った。特に、流入渠水位が変化しない定常流と、変化する非定常流時の管きよ流下能力に関する考察を行った。また、下水道マンホールの有無とマンホール蓋の有無が下水道管きよの流下能力に与える影響を明らかにした。

**Key Words:** urban flood, sewer system, manhole, drainage capacity, unsteady flow

## 1. はじめに

近年、世界では異常気象による災害が増加しており、特に短期的な集中豪雨は各地で甚大な被害をもたらしている。中でも、人口と資産が集中している都市部では、1時間あたり 50mmや 100mmを超える集中豪雨が各地で観測されており、今後も増加していくと考えられる。豪雨災害による都市機能の麻痺や人命・財産の損失は、安全安心な社会づくりにおいて大きな脅威となり、豪雨災害対策は現在大きな課題の一つでありつつある<sup>1), 2)</sup>。

都市水害の発生を左右する要因として、下水道施設の流下能力が挙げられ、流下能力を上回るような流量が下水道管きよに押し寄せた場合、深刻な浸水被害に至る可能性がある。下水道施設は、一般的に合理式等を用いて5~10年確率降雨に対応する排水能力を確保すべく、整備が進められた<sup>3)</sup>。一方、集中豪雨時における下水道施設内の流況や実際の排水能力を把握できていないのが実状である。増え続ける都市水害に対して、既存下水道施設流下能力の適切な実態把握と既存下水道施設の有効な

活用方法の検討が必要である。

近年、都市浸水対策における下水道の重要性が広く認識され、下水道管きよ流れを考慮した内水氾濫解析<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>、河川と下水道の連携運用手法<sup>6)</sup>や下水道マンホール損失<sup>7)</sup>、<sup>8)</sup>に関する研究が実施されてきた。著者らの研究グループでは、下水道マンホール内に小型圧力式水位計を設置し、高知市内のパイロット地区における下水道管きよ内の水位観測を継続的に実施した。その結果、管きよ内の開水路流れ・満管流れ、雨の降り方や排水機場の運転状況などによって、下水道内の流況や周囲への氾濫リスクが大きく異なることが示唆された<sup>9)</sup>。また、マンホール周辺における局所エネルギー損失は管きよの配置角度や流入流量比などによって異なり、下水道管きよの流下能力に大きな影響を及ぼすことが基礎水理実験により明らかになっており<sup>10)</sup>、<sup>11)</sup>、下水道管きよ流れは、数多くの要素が絡む複雑な現象である。本研究では、集中豪雨時における下水道への流入流量の非定常性による下水道管きよ内の流れへの影響および、下水道マンホールの有無とマンホール蓋の有無などマンホール設置条件

の影響に着目し、基礎水理実験を行った。

## 2. 基礎水理実験

### (1) 実験装置概要

実験は、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー第2実験棟に設置された下水道管きょ模型を用いて行った。実験装置の全体図およびスケッチは図-1と図-2に示す。

下水道管きょ模型は透明アクリル製で、流入管と流出管がマンホール部で接合する構造になっている。管きょ長さ  $L$  と直径  $D$  は、それぞれ 4.0m, 5.0cm である。マンホールの直径  $d$  は 15cm, 高さ  $h_m$  は 50cm である。管きょ上流には流入渠を再現する流入タンク、下流には放流先を再現するためのタンクと貯水槽が設けられ、それらにつながるポンプを用いて水を循環させる仕組みとなっている。ポンプの流量は、インバーター装置とバルブの開度によって調整する。また、下流側タンクには可動堰が設置されており、放流先の水位調整が可能である。管きょの流量変化を記録するため、上流タンクから下流へ 4cm の管きょに電磁流量計を設置している。管内圧力変化を測るため、各管にはマンホータが 8 本、マンホール下部にはマンメータが 1 本設置されている。



図-1：実験装置全体写真

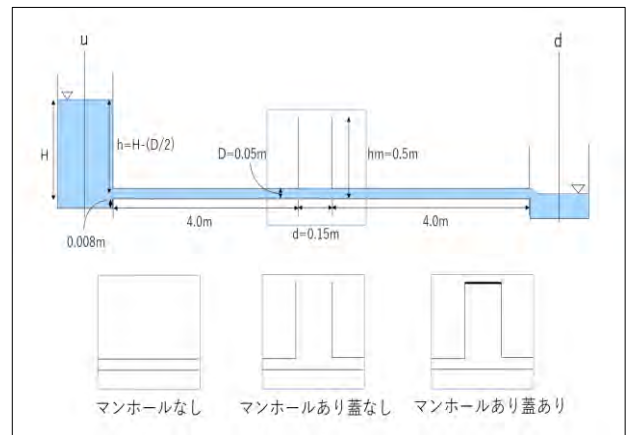


図-2：実験装置概略図

### (2) 実験条件

実験においては管きょを水平にし、上流タンク水位が一定とする定常流実験と、上流タンクの水位が変化する非定常流実験を行った。また、下流タンク水位は管きょ底面から  $h_d = 2.5\text{cm}$  に設定した。定常流実験では、マンホールの設置条件およびそれぞれの流量をあらかじめ設定し、計 18 ケースの実験を行った (表-1)。なお、マンホールの設置条件は、マンホールの有無とマンホールがある状態でのマンホール蓋の有無の 3 種類を想定した。非定常流実験では、マンホールの設置条件に加え、上流タンクからの流入ハイドログラフを変化させ、計 12 ケースの実験を行った (表-2)。また、非定常流実験においては、管きょ内の初期流量は 1.0L/s とし、満管圧力流れと設定した。

表-1：定常流実験条件

case	流れ	マンホール	蓋	流量	相対水深
S1	定常流	なし	-	1.0L/s	1.70
				1.5L/s	3.44
				2.0L/s	5.42
				2.5L/s	8.20
				3.0L/s	11.34
S2	定常流	なし	なし	3.5L/s	14.78
				1.0L/s	2.20
				1.5L/s	3.88
				2.0L/s	6.24
				2.5L/s	8.78
S3	定常流	あり	あり	3.0L/s	13.04
				3.5L/s	16.22
				1.0L/s	1.90
				1.5L/s	3.76
				2.0L/s	6.46
S3	定常流	あり	あり	2.5L/s	9.04
				3.0L/s	13.02
				3.5L/s	16.48

### (3) 計測と解析方法

実験においては、上流流入タンク水位、管きょ上流端流量、マンホール水位、代表地点における管きょ内の圧力水頭を計測した。なお、非定常流実験の場合は、それらの時間的変化をビデオカメラで撮影し、動画解析を行った。

定常流において、上下流タンクの間 Bernoulli 定理を適用する。上流タンク地点を添字  $u$ 、下流タンク地点を添

字 $d$ とすると、管きよにおけるエネルギー損失は摩擦損失水頭 $h_L$ と形状損失水頭 $h_l$ の和となる。

$$\left(H_u + \frac{v_u^2}{2g}\right) - \left(H_d + \frac{v_d^2}{2g}\right) = h_l + h_L \quad (1)$$

ここに、 $H_u$ は上流側位置水頭、 $H_d$ は下流側位置水頭、 $v_u$ は上流タンク内流速、 $v_d$ は下流タンク内流速、 $g$ は重力加速度である。摩擦損失 $h_L$ と形状損失 $h_l$ は次のように表される。

$$h_L = f \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

$$h_l = (K_e + K_o + K_m) \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

ここに、 $f$ は摩擦損失係数、 $l$ は管きよ長さ、 $v$ は管内流速、 $K_e$ は管きよ入口損失係数、 $K_o$ は管きよ出口損失係数、 $K_m$ はマンホール局所損失係数である。

上下流タンク内の流速を無視し、すなわち、 $v_u = v_d = 0$ 、また、下の式を考慮し、

$$H_u - H_d = H - \frac{D}{2} \quad (4)$$

式(1)より

$$H - \frac{D}{2} = (K_e + K_m + K_o + f \frac{l}{D}) \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

左辺を下の式に書き直し、

$$h = H - \frac{D}{2} \quad (6)$$

式(5)と式(6)より管内流速 $v$ は次の式

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{K_e + K_m + K_o + f \frac{l}{D}}} \quad (7)$$

から求められる。一方、流量 $Q$ は断面積 $A$ と流速 $v$ より求められるため

$$Q = Av = \frac{\pi}{4} CD^2 \sqrt{2gh} \quad (8)$$

なお、流量係数 $C$ は次のように表される。

$$C = \sqrt{\frac{1}{K_e + K_m + K_o + f \frac{l}{D}}} \quad (9)$$

本研究では、式(8)に導入された流量係数 $C$ を用いて、管きよ内が定常流時の状態だけでなく、豪雨時における流入流量の増加を想定した非定常流時の場合を含めて管きよ流下能力を定量的に評価する。

実験結果の解析においては、計測された流量と流入タンク水深情報を式(8)に代入することによって流量係数 $C$ が算出される。算出された流量係数 $C$ の値と流入渠内の相対水深 $h/D$ の関係より、管きよの流下能力を評価する。

表-2：非定常流実験条件

case	流れ	マンホール	蓋
1	非定常流	なし	-
2			
3			
4			
5	非定常流	あり	なし
6			
7			
8			
9			
10			あり
11			
12			

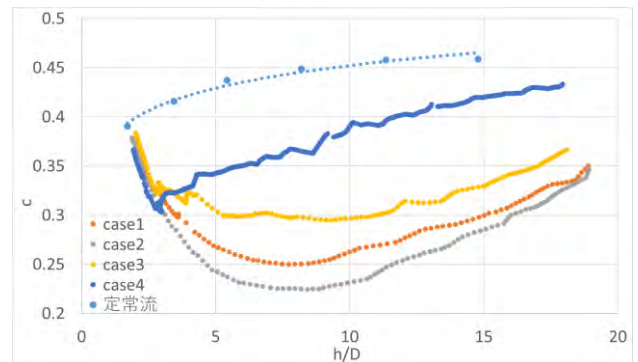


図-3：流量係数と相対水深の関係（マンホールなし）

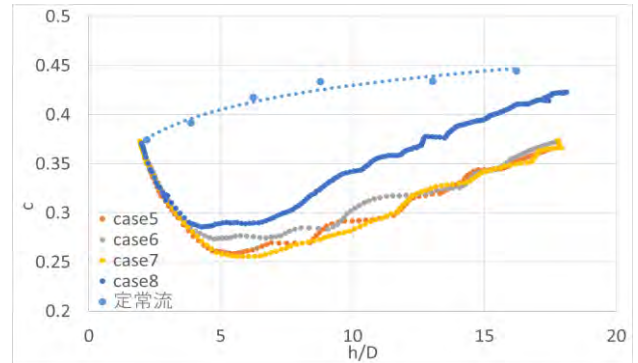


図-4：流量係数と相対水深の関係（マンホールあり蓋なし）

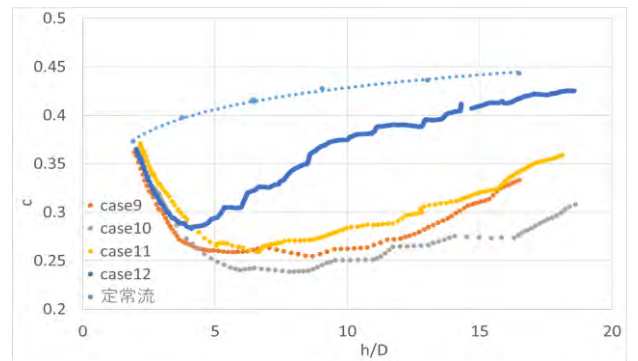


図-5：流量係数と相対水深の関係（マンホールあり蓋あり）

### 3. 実験結果

#### (1) 定常流と非定常流の違いによる影響

マンホール設置条件ごとに、定常流実験と非定常流実験から得た流量係数をまとめた図は、**図-3～図-5**に示す。

マンホールの設置条件に関係なく、定常流時の流量係数 $C$ は、相対水深 $h/D$ の増加に伴って増加していく傾向が確認される一方、非定常流時の流量係数は相対水深の増加に伴って一旦低下した後に、緩やかに増加していく特徴が見られる。また、同じ相対水深に対して、非定常流時の流量係数は定常流のそれよりも小さいことが分かる。これは、非定常流時の管内圧力変化による影響と考えられる。この結果から、豪雨時における流入渠流量の増加に下水道排水が追いつかず、排水能力の一時低下に伴う流入渠水位の増加が予想される。

また、非定常流時の流量係数の低下量は、非定常流のハイドログラフにより異なる。マンホールがない **case1** の場合は、流量係数が最大で定常流の 56.1%まで減少した。マンホールが設置され、蓋のない **case5** と蓋のある **case9** の場合は、それぞれ最大で 63.3%と 60.1%まで流量係数の低下がみられた。

#### (2) マンホールの設置状況による影響

定常流時と非定常流時の流下能力の特性を踏まえ、マンホールの有無とマンホール蓋の有無が流下能力に及ぼす影響を考える。

定常流における流量係数と相対水深の関係を**図-6**にまとめる。同じ相対水深に対して、マンホールがある場合より、マンホールがない場合のほうが流量係数が大きく、管きょ流下能力が大きいことがわかる。これはマンホール損失に伴うものと考えられる。式(9)に着目すると流量係数 $C$ は入口損失、マンホール損失、出口損失と管きょにおける摩擦損失によって変化することが分かる。損失が大きければ大きいほど流量係数は小さくなる。マンホールなしの場合では $K_m=0$ であり、流量係数は最も大きいことが分かる。また、マンホール設置された場合の各ケースの結果から、流量係数には明確な差がなく、本実験ではマンホール蓋に伴う影響は明確ではなかった。

非定常流実験では、マンホール設置状況の異なる3ケース **case2** (マンホールなし)、**case5** (マンホールあり蓋なし) と **case9** (マンホールあり蓋あり) の結果について考察する。なお、各ケースにおける流入ハイドログラフを**図-7**、流量係数と相対水深の関係図を**図-8**に示す。

実験結果より、流入ハイドログラフに大差がないものの、流量係数の変化においては明確な差が見られる。これはマンホールの設置状況によるものと考えられる。いずれのケースも、流入渠相対水深の増加に伴い流量係数

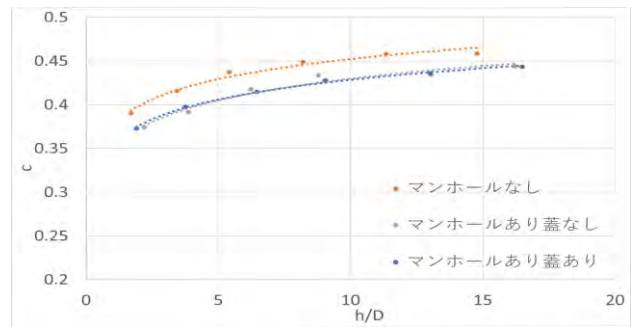


図-6：定常流実験結果

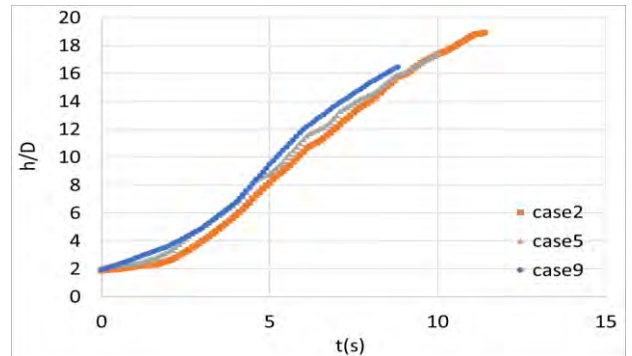


図-7：代表ケースにおける流入ハイドログラフ

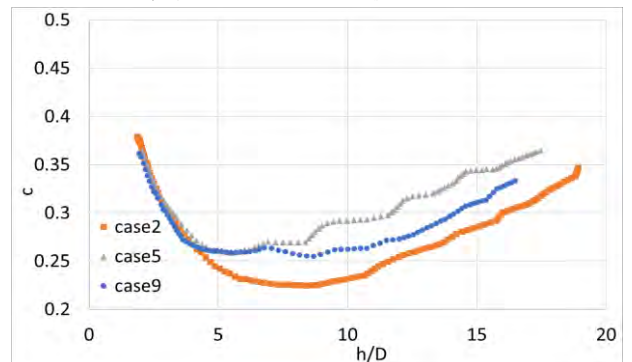


図-8：非定常流実験結果

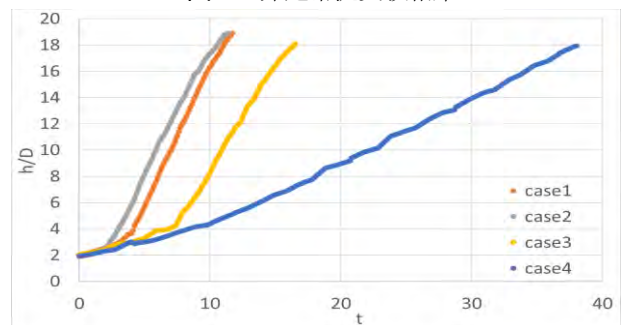


図-9：流入ハイドログラフ (マンホールなし)

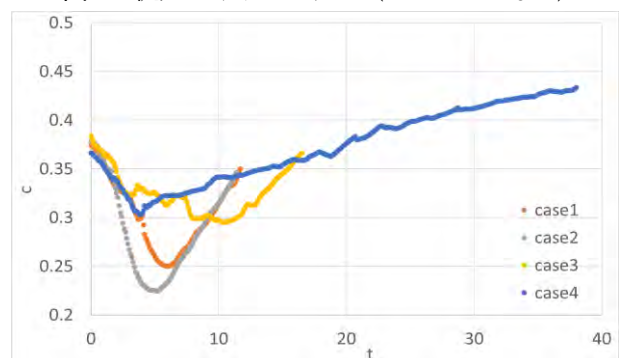


図-10：非定常流実験結果 (マンホールなし)

が急激に低下し、その後は緩やかに増加しつつ、定常流時の流量係数に近づいていく傾向が見られる。一方、マンホールのないケースでは、流量係数の低下が最も大きいことが分かる。また、マンホールあり蓋なしの場合は、流量係数の低下量は最も少なく、流量係数の変化においては周期的な上下変動が見られる。この変動はマンホール内の自由水面の変動に関係していると考えられる。これらの特性については、式(9)の形状損失と摩擦損失等だけでは説明できないため、非定常流時における管きよ内の圧力分布と変化を考慮する必要性が示唆された。

### (3) 流入渠の水位変化特性による影響

非定常流れの特性が管きよ流下能力に及ぼす影響を調べるため、マンホール設置状況ごとに、流入渠相対水深の変化特性(流入ハイドログラフ)および流量係数の時間的変化を図-9～図-14にまとめて示す。

本研究では、異なる雨の降り方に伴う流入渠水位の変化特性の違いに着目し、水位変化のシナリオは、緩やかな変化から急激な変化までを設定した。流入ハイドログラフの詳細は図-9、図-11と図-13に示す。図-10、図-12と図-14の実験結果から、マンホールの設置状況に関係なく、相対水深の変化率の増加に伴い、流量係数の低下スピードが速くなり、低下量が大きくなる傾向が見られる。一方、流量係数は時間とともに変化し、やがて定常流時の流量係数に近づいていく傾向も確認できる。また、急激な水位変化の場合は、流量係数は定常流時の流量係数に近づいていくスピードも速いのが分かる。この結果より、集中豪雨に伴う流入渠水位の急増時には、下水道管きよの流下能力は一時的に急激に低下することが予想される。

## 4. 結論

本研究では、集中豪雨時における流入渠から下水道管きよへの流入流量の非定常性とマンホールの設置状況などが下水道流下能力に与える影響に着目し、基礎水理実験を行った。

定常流時においては、流入渠水深の増加に伴い、下水道流下能力が増加することが分かった。一方、非定常流時においては、流下能力は流入渠水深の増加につれ、一時的な急低下が見られ、最大時で約40%程度の流下能力の低下がみられた。また、流入渠水位の変化率が大きければ大きいほど下水道管きよの流下能力の一時低下は大きくなった。

定常流時では、マンホールの設置によって、下水道管きよ流下能力が小さくなることが確認された。一方、マンホール蓋の有無は流下能力に与える影響は明確ではな

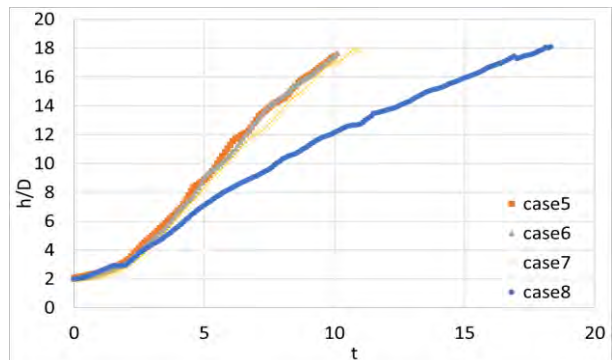


図-11：流入ハイドログラフ (マンホールあり蓋なし)

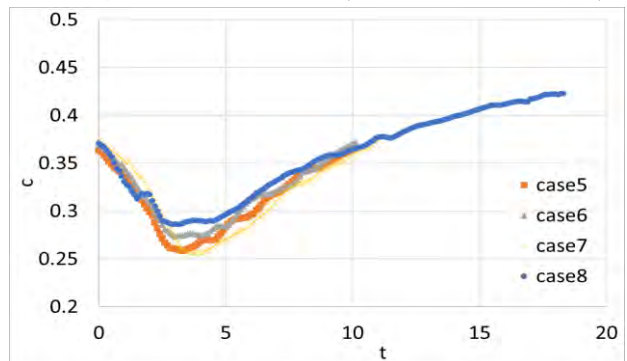


図-12：非定常流実験結果 (マンホールあり蓋なし)

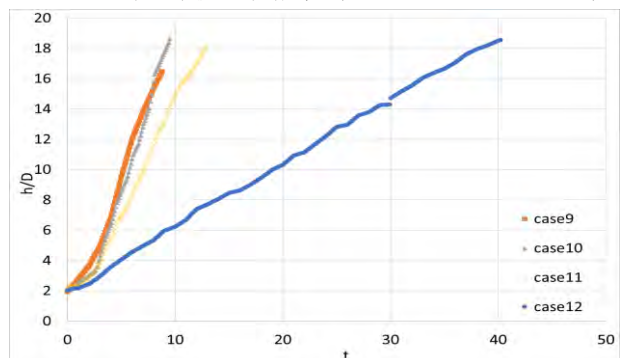


図-13：流入ハイドログラフ (マンホールあり蓋あり)

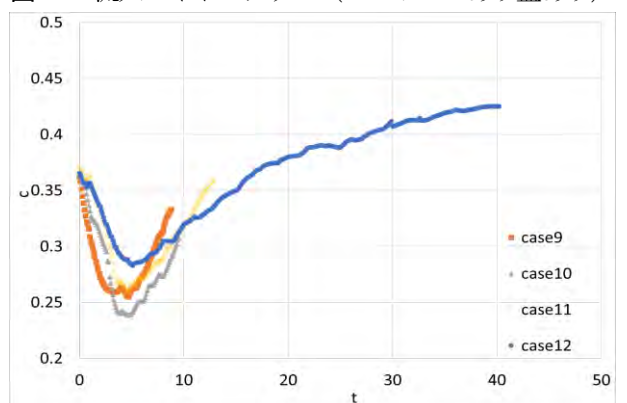


図-14：非定常流実験結果 (マンホールあり蓋あり)

かった。非定常流時では、マンホールがない場合の流下能力が最も低く、マンホールがあり蓋がない場合の流下能力が最も高かった。

本研究の結果から、エネルギー損失だけでなく、管き

よ内圧力分布と変化の重要性が示唆され、管きよ内圧力分布の時間的変化が流下能力に与える影響について考察予定である。また、今回の知見を既存の下水道にどう生かすのか計画することが考えられる。

**謝辞**：本研究の一部は京都大学防災研究所一般共同研究「内外水一体型雨水管理技術の開発による集中豪雨災害の軽減に関する研究」（2019G-05）の助成を受けたものです。研究にあたり、株式会社上田メカニクス研究所上田幸伸氏、熊本大学工学部植原捺月氏、濱砂翔氏、京都大学防災研究所宇治川オープンラボラトリー関係各位にご協力を頂きました。この場を借りて深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 川池健司, 中川一, 今井洋兵, 山田裕三: 都市域の内外水氾濫解析における下水道システムのモデル化, 京都大学防災研究所年報, No.51B, 591-601, 2008
- 2) 関根正人: 力学原理に忠実に創られた精緻な都市浸水予測手法と東京で発生する都市浸水現象, ながれ, 37, 11-18, 2018
- 3) 張浩: 豪雨災害の軽減に向けた排水能力評価技術の高度化, In: 下水道持続への挑戦～課題解決先進県「高知」からの発信～(藤原拓監修), 日本水道新聞社, 109-118, ISBN 978-4-930941-75-6, 2021
- 4) 相良亮輔, 錦織俊之, 井上和也, 戸田圭一: 枝線下水道を考慮した市街地氾濫解析, 水工学論文集, 48, 589-594, 2004
- 5) 武田誠, 野々部竜也, 川越陸, 松尾直規: 春日井市の内水氾濫解析と浸水メカニズムの理解のための解析モデルの適用, 土木学会論文集 B1 (水工学), 73(4), I-1399-I-1404, 2017
- 6) 谷岡康, 福岡捷二: 都市中小河川・下水道の連携した治水計画-台地部既成市街地を対象として-, 土木学会論文集, 733/II-63, 21-35, 2003
- 7) 荒尾慎司, 三原徹治, 楠田哲也: マンホール損失を考慮した雨水管路網設計の最適化に関する一研究, 土木学会論文集, 614/II-46, 109-120, 1999
- 8) Arao, S., Hiratsuka, S. and Kusuda, T.: Formula on energy losses at three-way circular drop manhole under surcharge flow, *Journal of JSCE*, 4 (1), 19-37. 2016.
- 9) Zhang, H., Okada, S., Fujiwara, T., Sassa, K. and Kawaike, K.: Field investigation of stormwater flows in an urban sewer system and a receiving stream, *Journal of JSCE*, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 76(2), 901-906, 2020
- 10) Zhang, H., Kawaike, K., Okada, S. and Fujiwara, T.: Experimental study on hydraulic properties of manholes in a surcharged sewer pipe system, *Journal of JSCE*, Ser. A2 (Applied Mechanics), 76(2), 451-460, 2021
- 11) Zhang, H., Kawaike, K., Kyouzawa, T., Sato, Y. and Xia J.Q.: Effect of manhole cover on flow characteristics in a sewer pipe due to pump shutoff, 第24回応用力学シンポジウム概要集, S04-A05, 2021

## EXPERIMENTAL STUDY ON DRAINAGE CAPACITY OF A SEWER PIPE DURING TORRENTIAL RAINSTORM

Riku YOSHIDA, Hao ZHANG and Kenji KAWAIKE

A sewer system as a component of an urban drainage system is important underground infrastructure for the prevention and mitigation of frequently occurred urban floods. The sewer system collects rainwater with facilities such as sewer canals, and drains water out of the city through underground sewer pipe networks and pumping stations. The assessment of the discharge from a sewer canal to a sewer pipe is crucial for the flow analyses in both sewer canals and sewer pipes, and for the capacity estimation of the urban drainage system. Laboratory experiments are conducted to investigate the rainwater flowing from a sewer canal to a sewer pipe. In particular, the drainage capacity of the sewer pipe is investigated under both steady and unsteady flow conditions. And the effects of the installation conditions of a manhole, i.e. no manhole, a manhole with a cover and a manhole without any cover, on the drainage capacity of the sewer pipe are also clarified.