

マンホール蓋飛散の水理解析モデルと 水理模型実験

A SIMULATION MODEL AND RUNOFF EXPERIMENTS OF SURCHARGED
FLOW WITH MASSES OF AIR AT MANHOLES IN SEWER PIPE SYSTEMS

渡辺政広¹・神田 徹²・田中祐大³・神吉和夫⁴

Masahiro WATANABE, Tohru KANDA, Yoshihiro TANAKA and Kazuo KANKI

¹ 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町 3)

² 正会員 工博 神戸大学教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³ 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科 博士前期課程 (〒790-8577 松山市文京町 3)

⁴ 正会員 工修 神戸大学助手 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

In urban storm sewer pipe systems, manhole covers have been often blown away by a high pressure of compressed air in manholes, which is caused by a flow transition from open-channel to pressurized flow due to flow regulations (e.g., a gate closure at a pumping station in the downstream end of the pipe systems) during a heavy rain. In order to examine the efficiency of counter-measures to mitigate the occurrence of such a blowing phenomenon, a runoff simulation model of surcharged flow with masses of air in sewer pipe systems must be developed.

First, a runoff simulation model of pressurized flow with masses of air at manholes is proposed, and the applicability of the model is investigated by applying the model to runoff experiments using a hydraulic model of sewer pipes. Second, the mechanism of blowing of a manhole cover is investigated through runoff experiments in the hydraulic model.

Key Words: Compressibility of air, pressurized flow with masses of air at manholes,
blowing of manhole cover, runoff experiments, storm sewer pipe systems

1. はじめに

近年, 各地の下水道流域で, 豪雨時, マンホール蓋の飛散事故が多発するようになってきている。マンホール蓋飛散の発生原因の一つは, 豪雨時, 下水道管渠網での遷移流(開水路流れ→圧力流れ, 図-1(a))の発生により, マンホール内あるいは下水道管渠内に空気塊が封入され, 遷移流れの拡大と伝播に伴って空気塊が圧縮されることにより, マンホール蓋に作用する空気圧が相当程度まで高まってゆくためと考えられる。また, マンホール蓋の飛散後, 溢水した氾濫水がマンホール地点の路面上に湛水すると, マンホール蓋の飛散が通行する車両や人からは確認できないため, マンホール内への転落事故を招くこともあるなど, マンホール蓋飛散は早期に防止対策が見出されなければならない問題である。

本論文では, はじめに, 既に提示しているマンホール部に空気塊を封入する圧力流れ(図-1(b)および(c))の水理解析モデルについての概要を述べる。次いで,

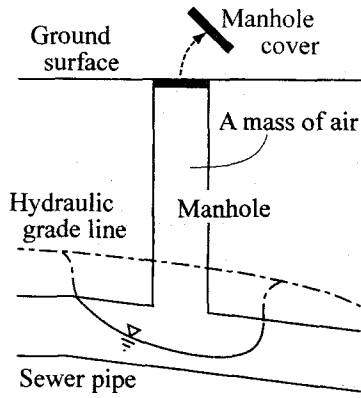
下水道管渠模型を用いた流出実験(図-1(b))に本モデルを適用し, その適用性を検討すると共に, 本モデルの重要なモデル・パラメータの一つであるマンホール蓋空気孔の縮流係数の適値について検討した結果を示す。次に, マンホール蓋が飛散するメカニズムについて, 平受けタイプのマンホール蓋を対象に, 流出実験(図-1(b))を行って検討した結果を示す。

2. マンホール部に空気塊を封入する下水道管渠網の圧力流れの水理解析モデル^{1), 2)}

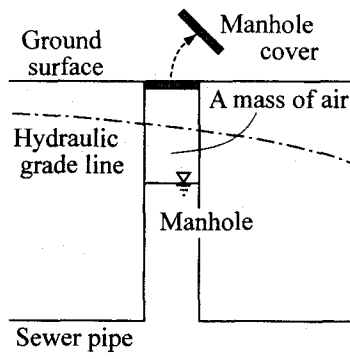
本モデルの詳細は既に述べてきているので, ここでは, 基礎式のみを書き表すこととする。

(1) 下水道管渠における流れの基礎式³⁾

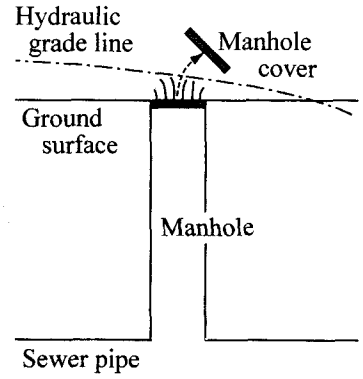
$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{n^2 |V| V}{R^{4/3}} = 0 \quad (1)$$



(a) 下水道管渠およびマンホール内に
空気塊が封入された圧力流れ



(b) マンホール内に空気塊が封入
された圧力流れ



(c) マンホール内の空気塊が完全に
排除されている圧力流れ

図-1 下水道管渠網における空気塊を封入する圧力流れ

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c'^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 ; c' = \sqrt{g \frac{L}{N} (\sin \theta) \frac{A_p}{A_i}} \quad (2)$$

ここに、 V ：断面平均流速、 H ：水位（基準面から測った圧力水頭）、 R ：径深、 c' ：圧力波伝播速度、 L 、 n 、 A_p ：下水道管渠の長さ、Manningの粗度係数、断面積、 A_i 、 N 、 θ ：取付管の断面積、接続本数（ L 間）、取付角度（水平となす角）、 g ：重力加速度、 t ：時間、 x ：距離である。

(2) マンホール地点における質量保存則⁴⁾

1) 空気が封入されている場合

$$\text{流出水の連続式：} F_M (dh_M / dt) = Q_{in} - Q_{out} \quad (3)$$

空気の質量保存則：

$$\rho F_M (dh_M / dt) - F_M (h_G - h_M) (d\rho / dt) = m \quad (4)$$

$$(\text{排気})m = C_m \cdot F_A \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1}} \rho_0 \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1}$$

$$(\text{吸気})m = -C_m \cdot F_A \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1}} \rho_0 \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$$

$$\text{空気の圧縮性：} p / \rho^\gamma = p_0 / \rho_0^\gamma \quad (5)$$

$$\text{全水頭：} H_M = (p - p_0) / (\rho_w g) + h_M + z_M \quad (6)$$

2) 空気が完全に排除されている場合

$$\text{流出水の連続式：} q = Q_{in} - Q_{out} \quad (7)$$

$$q = C_q \cdot F_A \sqrt{2g(h_M - h_G)}$$

$$\text{全水頭：} H_M = h_M + z_M \quad (8)$$

ここに、 ρ 、 ρ_0 、 ρ_w ：マンホール内空気密度、大気密度、水の密度、 p 、 p_0 ：マンホール内気圧、大気圧、 F_A ：空気が流入出する空気孔および吸排気管の断面積の総和、 γ ：空気の比熱比（ $=1.4$ ）、 m 、 q ：空気孔および吸排気管を通じて流入出する空気の質量flux、水の流量 flux、 C_m 、 C_q ：空気、水の流れに関する縮流係数、 F_M ：マンホール断面積、 H_M ：全水頭、 h_M ：水深あるいは圧力水頭、 h_G ：マンホール深、 z_M ：底高、 Q_{in} 、 Q_{out} ：流入流量、流出流量である。また、下添字 M はマンホール地点の諸量であることを示す。

3. 縮流係数

はじめに、上述した水理解析モデルを下水道管渠模型による流出実験に適用し、水理解析モデルによる計算結果を流出実験結果と対比して、本解析モデルの適用性を検討した。

次に、本水理解析モデルにおける主要なモデル・パラメータの一つであるマンホール蓋空気孔の縮流係数 C_m （(4)式）の適値について、水理解析モデルによる計算結果を流出実験結果と対比して検討した。

(1) 下水道管渠模型の概要

流出実験に使用した下水道管渠模型は、図-2に示すように、流入流量を調節するための上流部の水槽、ボックス・カルバート（縦×横=10 cm×12.5 cm）型の下水道管渠部、および流出流量あるいは下流端水位を調節するための下流部の水槽の3つからなる。下水道管渠部は透明アクリル製で、全長11 m、11カ所に取付管（内径1 cm、直立）が、2カ所にマンホール（内径6 cm、 $F_M = 28.3 \text{ cm}^2$ 、 $h_G = 70 \text{ cm}$ ）が設置されている。また、①～⑧地点の管渠底部あるいはマンホール蓋部には、

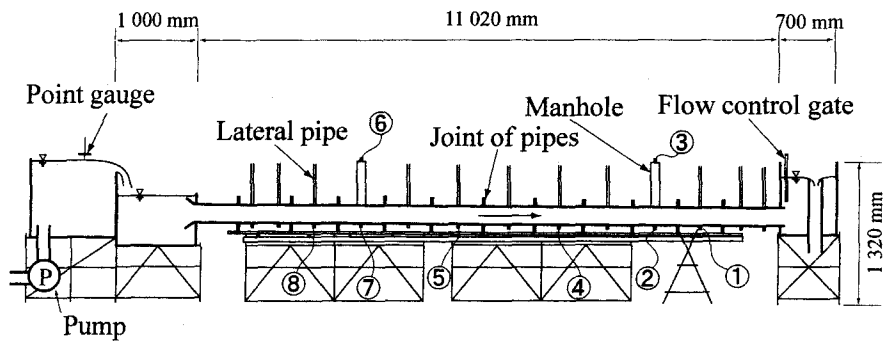


図-2 下水道管渠システムの水力模型 (○：圧力センサー番号)

圧力水頭あるいは全水頭を測定するための圧力センサーが取り付けられている。

なお、本管渠模型における流れの摩擦損失の評価には、Manning 型の式 (1式) に変えて、ブラシウス型の式を用いることが適切であることを、流出実験により確かめている²⁾。

(2) 流出実験

上、下流マンホールにおける蓋の空気孔および壁の吸排気管の設置個数 (空気が流入する断面の総和) を種々に変え (図-3、表-1)、下水道管渠下流端に設置したゲート操作により、周期 (T) が約 5 秒および約 10 秒の sine 型の洪水流出 (圧力流れ) を発生させ、③、⑥地点で空気圧、①、②、④、⑤、⑦、⑧地点で圧力水頭 (全水頭) の時間的変化を測定した (図-2)。

ここに、下水道管渠の勾配は 2.7 %、初期定常流量 (圧力流れ) は 7.7 l/sec である。

また、本下水道模型の実物に対する時間比は、模型縮尺が 1/20 程度の場合、1/6 程度であり、本流出実験における周期 5 秒および 10 秒は実物の周期のそれぞれ 30 秒および 60 秒に相当する⁵⁾。

(3) 水理解析モデルの適用性

先の水理解析モデルを上記した流出実験に適用した。具体的には、上下流端センサー (⑧および①地点) で

測定された圧力変動を上下流端境界条件として与え、先述した (1)～(8) 式を 特性曲線法により数値解析し、②～⑦地点における圧力変動のハイドログラフを求め、これらを測定結果と対比して本水理解析モデルの適合性を調べた (図-4)。

これらより、空気の流入出が全くない場合 (Run No.

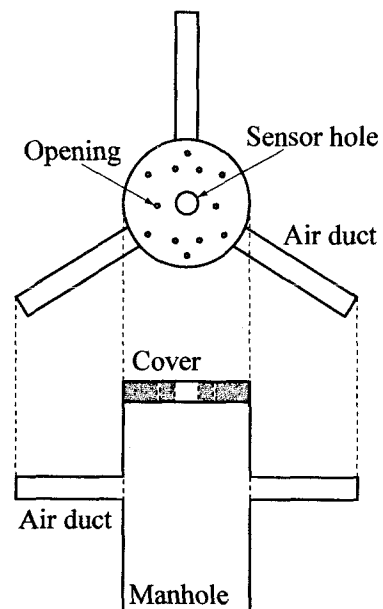


図-3 マンホールにおける空気孔と吸排気管 (流出実験)

表-1 マンホール蓋空気孔およびマンホール壁吸排気管の断面積 (流出実験)

Run No.	Openings made in cover		Ducts attached to wall		Amount of cross-sectional area (mm ²)
	Number of openings	Total cross-sectional area (mm ²)	Number of ducts	Total cross-sectional area (mm ²)	
A	0	0.0	0	0.0	0.0
B1	6	18.6	0	0.0	18.6
B2	12	27.5	0	0.0	27.5
B3	24	45.1	0	0.0	45.1
C1	12	27.5	1	78.5	106.0
C2	12	27.5	2	157.0	184.5
C3	12	27.5	3	235.6	263.1

表-2 縮流係数の適値

Run No.	Period T (sec)	Upstream manhole	Downstream manhole	Relative error (%)
B1	5	0.70	0.72	1.91
	10	0.70	0.70	1.31
B2	5	0.71	0.72	1.34
	10	0.67	0.71	2.02

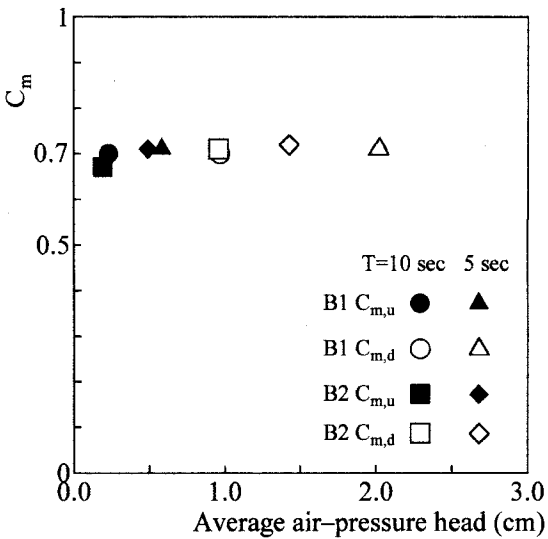
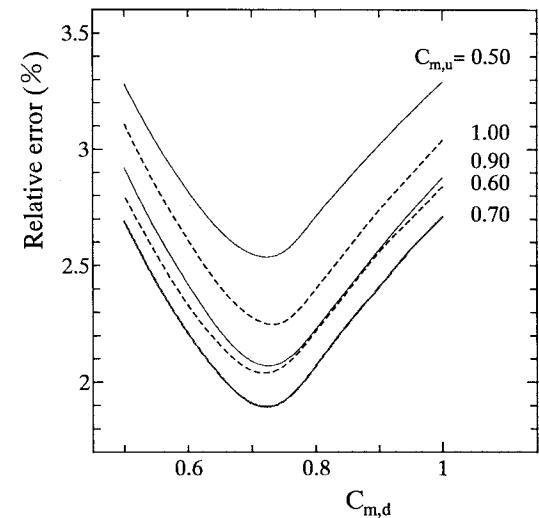


図-5 縮流係数の適値と空気圧（空気流速）の関係

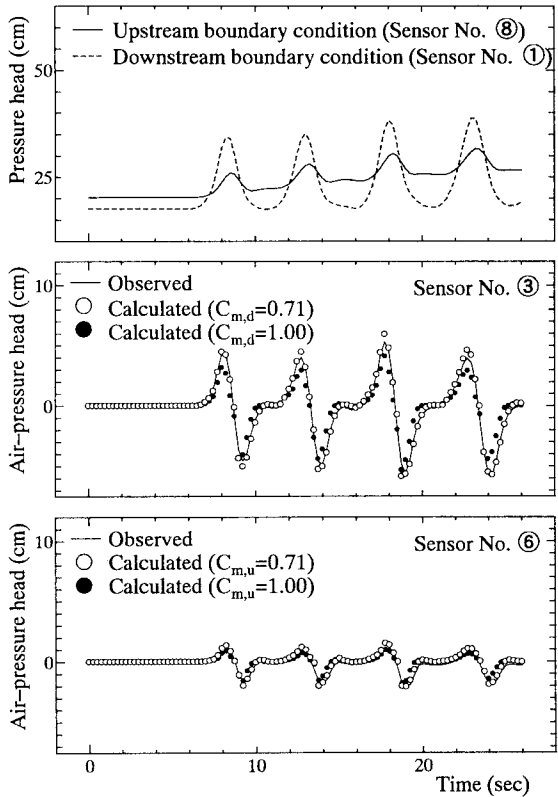


図-4 縮流係数の検討と流出シミュレーション結果 (Run No. B1, T=5 sec)

A, 表-1) から, 吸排気管が3つ設置されている場合 (Run No. C3, 表-1) までのいずれの流出においても, 本解

析モデルによる空気圧と全水圧の計算結果は実測結果を精度高く再現しており, 本モデルの信頼度がかなり高いものであることが分かった。

(4) 縮流係数の適値

先述したマンホール地点における流れの基礎式 (4式) において, 縮流係数 C_m は, 通常, 1 である⁶⁾ として取り扱われてきている。

しかしながら, C_m は 1 よりもある程度小さい値をとることは明らかであり, ここでは, ②～⑦地点における圧力水頭のシミュレーション結果と測定結果が最も良い一致を示すような縮流係数の値を検索した。

検討結果の一例を, 表-2, 図-4 および図-5 に示す。図-4 において, 相対誤差 (Relative error) は, ②～⑦地点における相対誤差の平均値であり, 各地点における相対誤差 E は, 次式により算定されている。

$$E = \frac{1}{N_H} \sum_i \frac{|H_{o,i} - H_{c,i}|}{H_{o,max} - H_{o,min}} \quad (9)$$

ここに, N_H : データ数, $H_{o,i}$: 圧力水頭の実測値, $H_{c,i}$: 圧力水頭の計算値, $H_{o,max}$: 実測された圧力水頭の最大値, $H_{o,min}$: 実測された圧力水頭の最小値である。

また, ここでは, 縮流係数の適値は, 上流マンホールと下流マンホールとで異なるであろうとして取り扱

っている ($C_{m,u}$: 上流マンホールでの縮流係数, $C_{m,d}$: 下流マンホールでの縮流係数)。

図-5 は、マンホール蓋空気孔を通じて流入出する空気の流速に対応するマンホール内空気圧 (洪水流出期間の平均値) と縮流係数の適値との関係を示したものである。

これらより、縮流係数の値 (適値) としては、空気の流速に関わらず、0.7 程度を採用すべきであることが分かる。

なお、この縮流係数の適値の検討は、上述した本解析モデルの適用性の検討に先立って行われており、適用性の検討を行う際には、 $C_m = C_{m,u} = C_{m,d} = 0.70$ とする取り扱いが行われたことを付け加えておく。

4. マンホール蓋飛散の流出実験

(1) マンホール蓋

流出実験に用いた下水道管渠模型 (図-2) のマンホール部の上部構造を、図-6 に示す。検討の対象としたマンホール蓋は、マンホール側壁の頂部に単に置かれているだけの、いわゆる平受けタイプと呼ばれるものである。

マンホール蓋の上部には、図-6 に示すように、錘が置かれており、本マンホール蓋の単位面積当りの重量は、実物のマンホール蓋のそれとほぼ同一である。

(2) マンホール蓋飛散の流出実験

下流のゲート操作を行い、周期が約 10 秒の sine 型の圧力流れを発生させ、下流側マンホール部 (図-2 の②および③地点) の蓋の飛散を伴う洪水流の流出実験を行った。

下流側マンホール地点 (③地点) におけるマンホール内空気の圧力変動の測定結果の一例を、図-7 に示す。

なお、ビデオ撮影により、マンホール内水面変動およびマンホール蓋飛散の状況についても、観測・測定を行った。

(3) マンホール蓋飛散のメカニズム

上の流出実験結果をもとに、マンホール蓋飛散のメカニズムについて検討した。蓋飛散メカニズムの概要は、図-8 を用いて、以下のようにまとめることができる (図-7 参照)。

①→②: ゲート閉操作による流れの抑制に伴って水面が上昇し、マンホール内の空気が圧縮される。

③: 空気圧で蓋が少し押し上げられ、マンホール内の空気が排除され始めると共に、水面は急激に上昇し始める。

④: 空気圧の低下に伴って蓋が再び閉まるが、水面

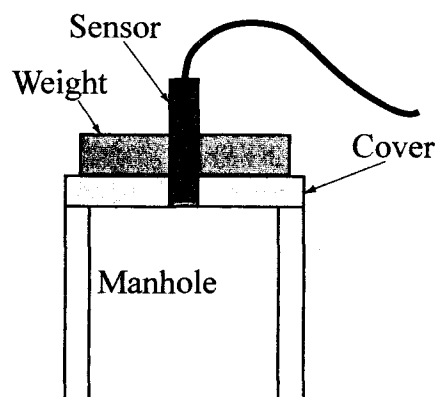


図-6 平受けタイプのマンホール蓋 (流出実験)

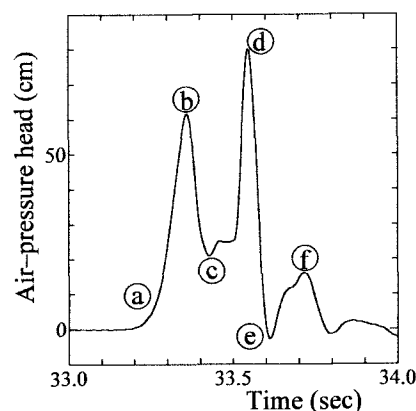


図-7 マンホール蓋に作用する圧力ハイドログラフ

は上昇を続けている。

③→④, ④: 水面の上昇に伴って空気圧が増大し、再び空気が排除され、やがて水面がマンホール蓋にまで達し、蓋に大きい水圧が作用して、蓋が持ち上がり飛散しようとする。

⑤→⑥→⑦, ⑦: マンホール蓋が飛散し始めるため、蓋に作用する水圧は急激に低下する。この直後、マンホール内から大量の水が急激に噴出し、蓋に激突して、蓋は完全に飛散する。

5. 結 論

本研究では、はじめに、既に提示しているマンホール内に空気塊を封入する下水道管渠システムにおける圧力流れの水理解析モデルの適用性について、本解析モデルを下水道管渠模型による流出実験に適用して検討すると共に、本モデルの重要なモデル・パラメータの一つである縮流係数 C_m の適値について実験的に検討した。

次に、平受けタイプのマンホール蓋を対象に、下水道管渠模型による流出実験を行って、マンホール蓋飛

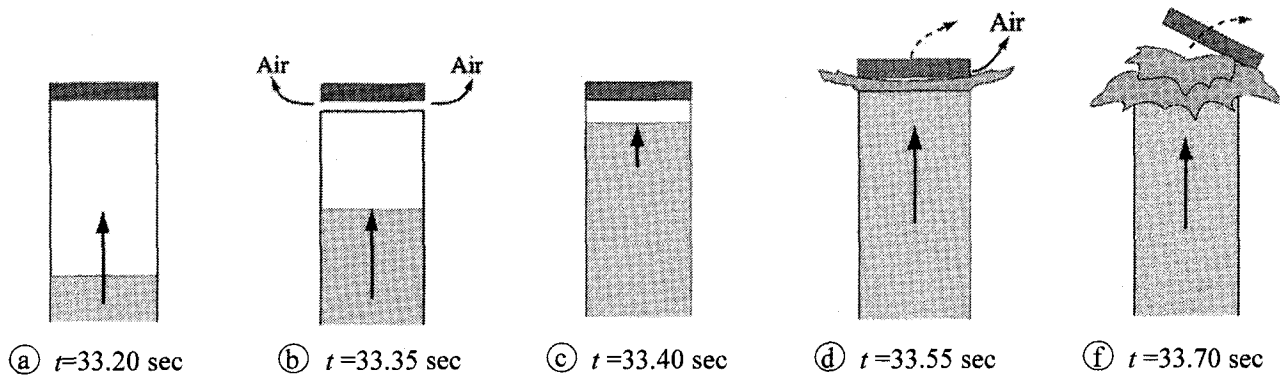


図-8 マンホール蓋（平受けタイプ）飛散のメカニズム（流出実験）

散のメカニズムについて検討を行った。

本研究により得られた知見を要約して以下に示す。

1) 提案した水理解析モデルを下水道管渠模型による流出実験に適用した結果、本解析モデルはかなり高い適合性を持っていることが確かめられた。

2) 水理解析モデルを流出実験に適用して検討し、これまで1を取ると考えられてきた縮流係数 C_m が、実際には、空気流速とは無関係に、0.7程度の値を取るであろうことが明らかとなった。

3) 平受けタイプのマンホール蓋を対象に、下水道管渠模型を用いて流出実験を行い、圧力変動の測定結果、ビデオ撮影による水面変動などを解析して、マンホール蓋飛散のメカニズムを検討したところ、次の興味ある知見が得られた。

①マンホール蓋は、圧縮されて高圧となった空気により、直接的に、飛散させられるのではない。

②すなわち、高圧となった空気により、マンホール蓋は持ち上げられるが、それはほんの僅かの浮き上がりである。

③このとき、その高圧となった空気が排除されるため、空気圧は急激に低下し、これにより、マンホール蓋は、一旦、元の位置にもどる。

④この空気が排除されるとき、マンホール内の水面は加速度的に上昇してゆき、僅かに残されていた空気を排除しつつ、やがて、水面はマンホール蓋に激突し、マンホール蓋を飛散させる。

今後は、ここに得られたマンホール蓋飛散のメカニズムをモデルに組み入れ、本水理解析モデルの精度を一層高めて行く必要がある。

なお、本研究の一部は、平成12年度文部省科学研究費補助金（基盤研究（B）(1)、研究代表者・渡辺政広）により行われたことを付記する。

参考文献

- 1) 渡辺政広・岡田将人・小林康司：下水道マンホール蓋飛散の水理解析モデル，愛媛大学工学部紀要，第16巻，pp. 233-240，2000.
- 2) 渡辺政広・神田 徹・岡田将人・神吉和夫：マンホール部に空気塊を封入する下水道管渠網の圧力流れ，水工学論文集，第44巻，pp. 551-556，2000.
- 3) 渡辺政広：都市下水道管渠システムの雨水流出モデル，雨水技術資料，Vol. 13，pp. 37-42，1998.
- 4) 松尾一泰：圧縮性流体力学，pp. 48-69，理工学社，1994.
- 5) Watanabe, M., T. Etoh, and T. Kanda: Stormwater runoff simulation with surcharge in urban sewer pipe systems, Proc. the Fourth Japan-Chinese (Taipei) Joint Seminar on Natural Hazard Mitigation, pp. 151-160, 1997.
- 6) (社)日本下水道協会：下水道マンホール安全対策の手引き（案），pp. 44-54，(社)日本下水道協会，1999.

(2000. 10. 2 受付)