

東海豪雨で発生したマンホール蓋飛散を伴う 下水道管渠システムの浸水はんらん解析

渡辺 政広¹・圓尾 太輔²

¹ 愛媛大学工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町 3 番)

² 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程環境建設工学専攻 (〒790-8577 松山市文京町 3 番)

1. はじめに

平成 12 年 9 月の名古屋市水害, 平成 11 年 6 月の福岡市水害, 平成 10 年 9 月の高知市水害では, 浸水はんらん時, 下水道管渠システムの各所でマンホール蓋が飛散し, 人命が失われる事故も発生している。近年, こうしたマンホール蓋飛散は, 幸い, 人命が失われるまでには至っていないが, 強雨時あるいは豪雨時には, 各地の下水道管渠システムで日常的に発生しており, この発生メカニズムを明らかにして, 早急に飛散防止対策を確立する必要がある。

本文では, はじめに, マンホール部に空気塊を封入する圧力流れの水理解析モデルについて, その概要を述べると共に本モデルを下水道管渠模型を用いた流出実験に適用してその適用性を検討する。次に, こう配受け型マンホール蓋を対象に, マンホール内あるいはマンホールを含んでその近傍の下水道管渠内に封入された空気塊が流れによって圧縮されて引き起こされるマンホール蓋浮上(飛散)現象を記述する基礎式を提案する。

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)}

(1) 下水道管渠における流れの基礎式

下水道管渠(上・下流マンホール間の下水道管渠部分)における圧力流れは, 取付管における流出水の貯留を考慮し, 水を非圧縮性, 管壁は剛とすると, 次式のように表される。

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

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c'^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0;$$

$$c' = \sqrt{g \frac{L}{N} (\sin \theta) \frac{A_p}{A_t}} \quad (2)$$

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_t, 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

流出水の出口・入口損失(エネルギー損失)が下水道管渠の摩擦損失の中に含めて取り扱えるものとする, マンホール地点における流出水と空気の質量保存則は, 次のように書き表される。ここに, 水は非圧縮性, 空気は圧縮性で, マンホール蓋(飛散しないように固定されている)の空気孔とマンホール壁の吸排気管を通じて流入出するものとする(図-1)。

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

空気の質量保存則:

$$\rho F_M \frac{dh_M}{dt} - F_M (h_G - h_M) \frac{dp}{dt} = m;$$

(排気時)

$$m = C_m F_A \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} \rho_0 \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} \quad (4)$$

(吸気時)

$$m = -C_m F_A \sqrt{\frac{2}{\gamma-1}} \rho_0 \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}}} \sqrt{1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (5)$$

$$\text{空気の圧縮性: } \frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_0}{\rho_0^\gamma} \quad (6)$$

$$\text{全水頭: } H_M = \frac{(p-p_0)}{\rho_w g} + h_M + z_M \quad (7)$$

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 : 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, C_m : 縮流係数, F_M : 水面積, H_M : 全水頭, h_M : 水深, 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。

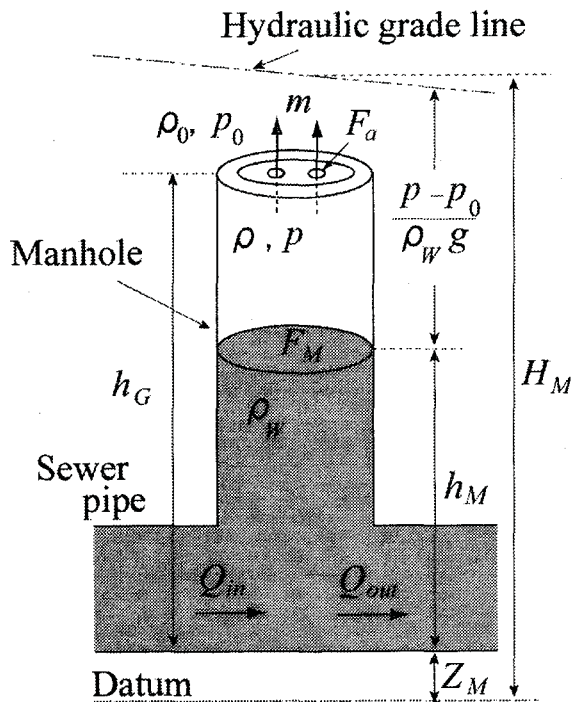


図-1 マンホール地点における質量保存則

3. 水理解析モデルの適用性の検討 (流出実験)

(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, 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) 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(空気が流入出する断面積の総和)を種々に変え(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)の時間的变化を測定した(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。

(3) 水理解析モデルの適用性

先の水理解析モデルを上述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)～(7)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。

検討の一例を, 図-3 に示す。これらより, 空気の流入出が全くない場合(Run No. A)から, 吸排気管が 3 つ設置されている場合(Run No. C3)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かなり高いものであることが分かる。

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

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

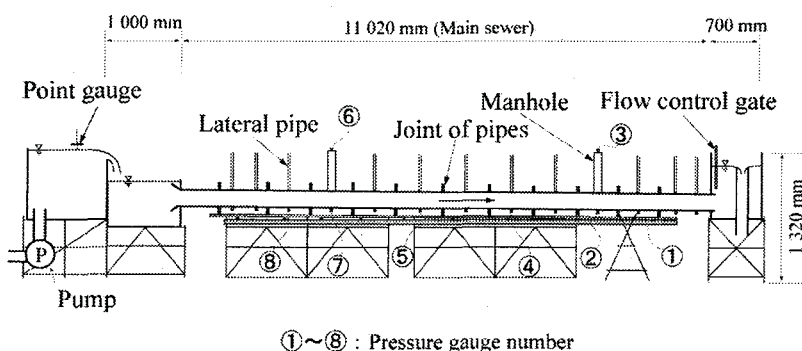


図-2 下水道管渠システムの水力模型

4. マンホール蓋浮上の基礎式

(1) マンホール蓋が浮上していない場合

マンホール蓋が浮上していない場合のマンホール内あるいはマンホールを含んでその近傍の下水道管渠内に封入されている空気塊が流出すると共に圧縮される過程は、先述した式(4)~(6)で表される。

封入されている空気塊の圧力 p が計算されると、次式により、マンホール蓋が浮上するか否かが判定される (図-1 および 4)。

$$(p - p_0)(F_C - F_a) < R_f \Rightarrow \text{浮上しない} \quad (8)$$

$$(p - p_0)(F_C - F_a) \geq R_f \Rightarrow \text{浮上する} \quad (9)$$

ここに、 F_C : マンホール蓋の底面積、 F_a : マンホール蓋の空気孔断面積の総和、 R_f : マンホール蓋の食い込み力、である。

(2) マンホール蓋が浮上している場合

マンホール蓋が浮上しているとき、封入されている空気塊は蓋と受け枠の隙間からも流出するようになり、空気塊が流出すると共に圧縮 (膨張) される過程は、次のように表される。

$$\rho F_M \frac{dh_M}{dt} - F_M (h_G - h_M) \frac{dp}{dt} = m \quad ;$$

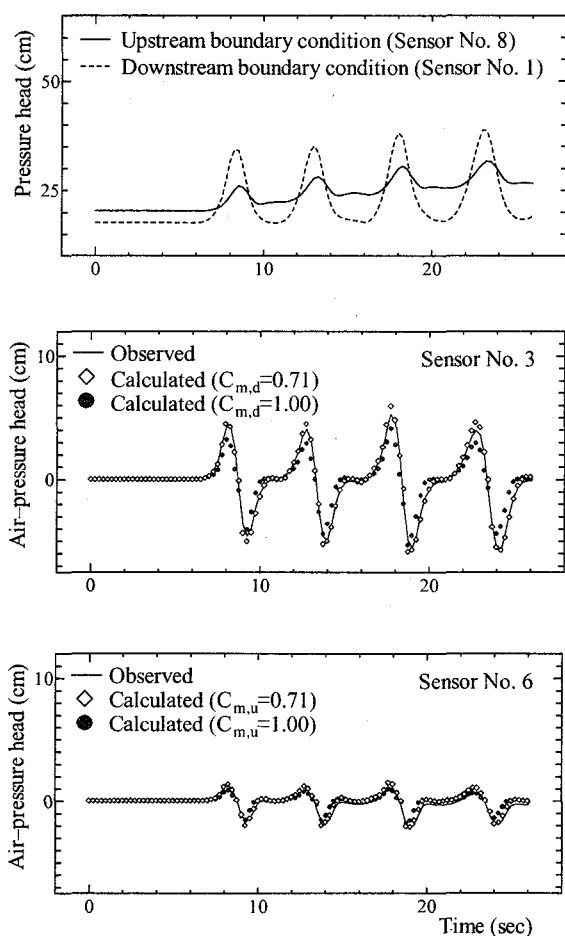


図-3 流出シミュレーション結果

$$m = C_m \left(F_A + F_a' \right) \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \rho_0} \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1} \quad (10)$$

$$F_a' = \pi y \sin \alpha (D_0 + y \tan \alpha) \quad (11)$$

ここに、 F_a' ：蓋と受け枠の隙間の通気断面積（図-4）、 y ：蓋の浮上高さ、 T ：蓋あるいは受け枠の厚さ、 D_0 ：蓋底面の直径、 α ：受け枠のこう配、である。

また、マンホール蓋が浮上する過程は、次のように表される。

$$(p - p_0)(F_C - F_a) - Mg = M \frac{dv}{dt} \quad (12)$$

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (13)$$

ここに、 M ：マンホール蓋の質量、 v ：蓋の浮上速度、 g ：重力加速度、である。

浮上高さ y が算定されると、次式により、蓋が浮上し続けているか、浮上しないで元に戻っているかが調べられる。

$$y > 0 \Rightarrow \text{浮上している} \quad (14)$$

$$y \leq 0 \Rightarrow \text{元に戻っている} \quad (15)$$

なお、マンホール蓋とマンホール受け枠との隙間の通気断面積とマンホール蓋の浮上高さとの関係は、たとえば、マンホール蓋底面の直径が 0.60 m、受け

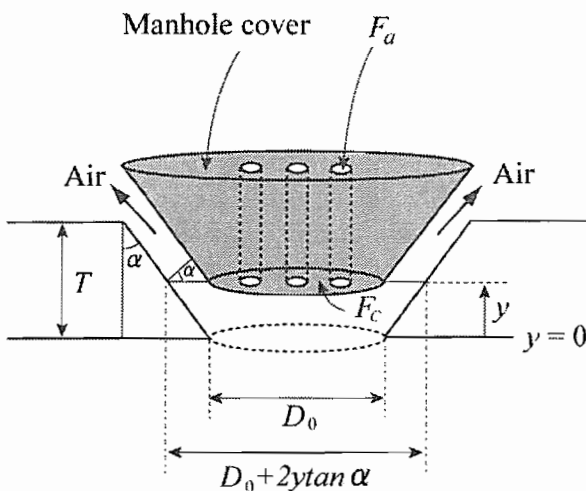


図-4 マンホール蓋の浮

枠の厚さが 5 cm、受け枠のこう配が 8° のとき、図-5 のようになる。ここに、マンホール蓋の浮上高さが受け枠の厚さを上回るときの通気断面（断面積）は図-6 のようになると想定している。

これより、蓋が受け枠の厚さ程度まで浮上すると通気断面積は空気孔総断面積（マンホール蓋底面積の 1.5% 前後）の 3 倍程度にもなること、および浮上高さが受け枠の厚さを上回ると通気断面積は急激に増大することが分かる。

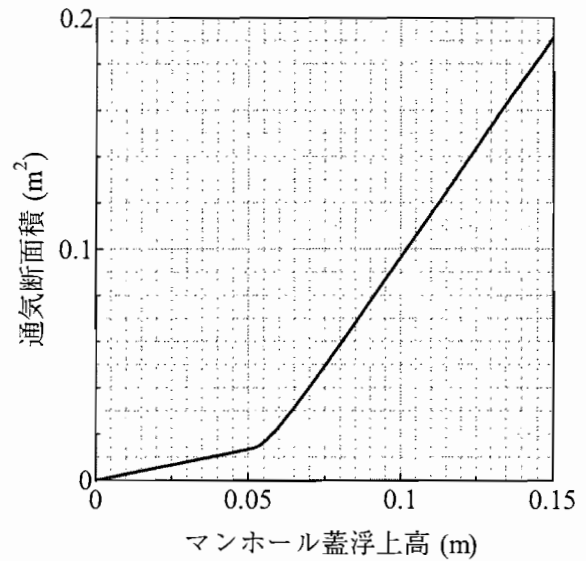


図-5 マンホール蓋浮上高さと通気断面積の関係

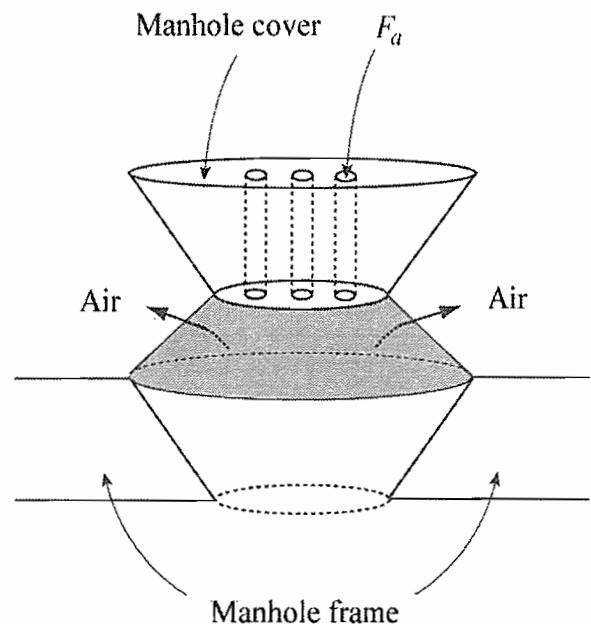


図-6 マンホール蓋浮上と通気断面積

参考文献

- 1) 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，2000年。
- 2) 渡辺政広・神田 徹・田中祐大・神吉和夫：マンホール蓋飛散の水理解析モデルと水理模型実験，水工学論文集，第45巻，2001年。

(2002. 12. 9 受付)