

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

PRESSURISED-FLOW WITH MASSES OF AIR AT MANHLOES IN URBAN SEWER PIPE SYSTEMS

渡辺政広¹・神田 徹²・岡田将人³・神吉和夫⁴

Masahiro WATANABE, Tohru KANDA, Masato OKADA 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番)

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番)

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)

First, a storm water runoff simulation model of surcharged flow with masses of air at manholes in urban sewer pipe systems is proposed. In this model, the compressibility of the air is considered.

Second, the model is applied to runoff experiments in a hydraulic model of storm sewer pipes with manholes, and the air-pressure hydrographs simulated by the simulation model are compared to the observed ones.

As a result, it is demonstrated that the simulation model proposed here can simulate very well the temporal variations in air-pressure at manholes.

Key Words : Compressibility, mass of air, surcharged flow, urban sewer pipe system, storm water runoff

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。高知市の下水道流域では, 平成10年9月24, 25日の秋雨前線豪雨により, 雨水排水管渠システムおよび汚水管渠システムの合計11カ所でマンホール蓋が飛散した。それらの内の2カ所で, マンホール内への転落事故が発生し, 2名の人命が失われることとなった。

こうしたマンホール蓋飛散の原因の主なものとして, ①(水圧によるもの) 地表面付近に達していたマンホール内の水面が何らかの原因で急上昇し, これによる水圧上昇がマンホール蓋を持ち上げた, および ②(空気圧によるもの) マンホール内に残留していた空気が, 何らかの原因で急上昇した水面によって圧縮され, 増大した空気圧がマンホールの蓋を飛散させた, が考えられている。

マンホール蓋に作用する水圧上昇による飛散現象の解明は, 既に得られている知見により十分に可能であると考えられる。しかし, 空気圧の増大によるマンホール蓋

飛散現象の解明については, これに先立ち, 図-1に示すような, 豪雨時の空気塊が封入される圧力流れの物理解析法を明らかにしておく必要がある。

本研究は, 空気塊を封入する下水道管渠システムの圧力流れの物理解析モデルを開発しようとする研究の一環で, ここでは, マンホール内に空気塊を封入する下水道管渠システムの圧力流れ(図-1の(B)タイプの圧力流れ)の物理解析モデルを提案すると共に, 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, その有用性

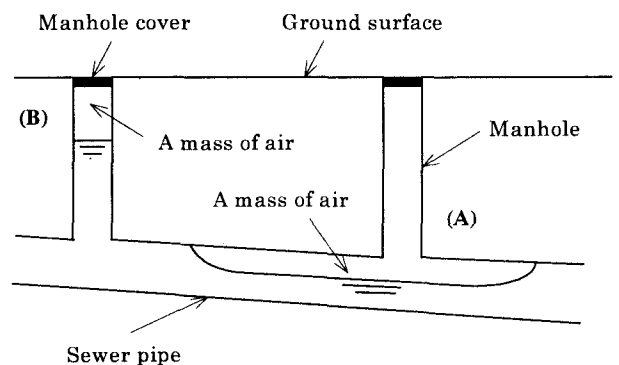


図-1 マンホール部に空気塊を封入する圧力流れ

について検討した結果を述べる。

2. 水理解析モデル¹⁾

マンホール内に空気塊を封入する下水道管渠システムの圧力流れは、下水道管渠における取付管を考慮した圧力流れの基礎式と、マンホール地点における空気の圧縮性と流入出を考慮した空気と流出水の質量保存則により記述される。

(1) 下水道管渠における流れの基礎式²⁾

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、管壁は剛であるとする、次式のように表される。

運動方程式：

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

連続の式：

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

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_l 、 N 、 θ ：取付管の断面積、接続本数（ L 間）、取付角度（水平面とのなす角）、 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流れの基礎式（質量保存則）³⁾

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-2および3）。

流出水の連続の式：

$$F_M \frac{dh_M}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \tag{3}$$

空気の質量保存則：

$$\rho F_M \frac{dh_M}{dt} - F_M (h_G - h_M) \frac{d\rho}{dt} = m \tag{4}$$

ここに、

空気の流出（排気）時

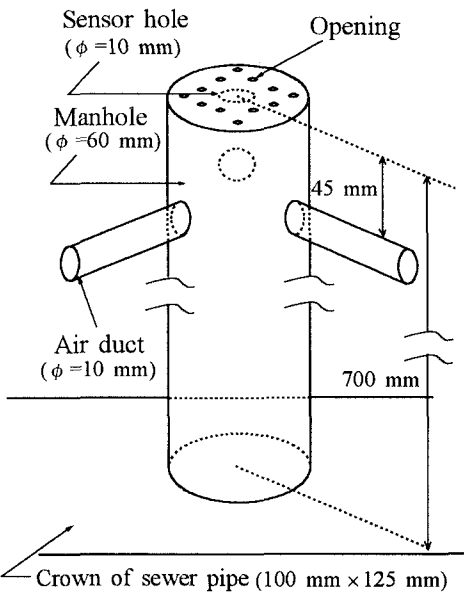


図-2 マンホール蓋の空気孔と側壁の吸排気管

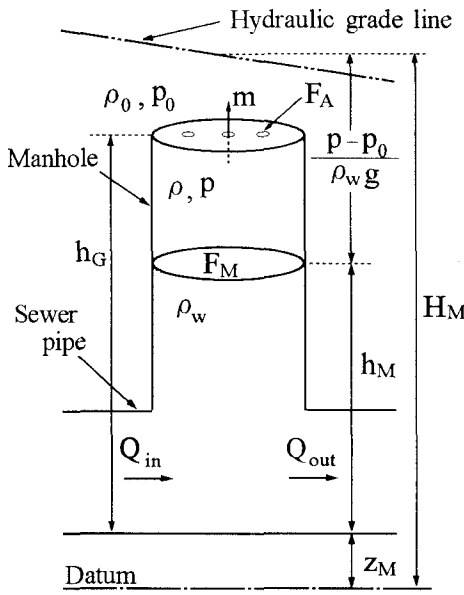


図-3 マンホール地点における質量保存則

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

空気の流入（吸気）時

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

空気圧と空気密度の関係式：

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \frac{p_0}{\rho_0^\gamma} \tag{5}$$

全水頭の式：

$$H_M = \frac{(p - p_0)}{\rho_w g} + h_M + z_M \quad (6)$$

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 ：マンホール内空気圧、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。

3. 流出実験

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。

(1) 下水道管渠模型

a) 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-4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つの部分からなる。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、 $F_A=28.3 \text{ cm}^2$ 、 $h_G=70 \text{ cm}$ ）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、圧力水頭を測定するための圧力センサーが取り付けられている。

b) 摩擦損失特性

実流域における下水道管渠の壁面は水理学的に粗面であり、下水道管渠における流れは粗面乱流となっている。したがって、摩擦損失の評価には、式(1)で見られるよう

に、一般に、Manning型の式が用いられている。しかしながら、下水道管渠模型における流れは滑面乱流に近い流れであると考えられ、したがって、流出実験に先立ち、開水路流れと圧力流れの場合について、摩擦損失係数 f とレイノルズ数 $Re' = VR/\nu$ （ V ：断面平均流速、 R ：径深、 ν ：動粘性係数）の関係を調べた。

圧力流れに対する実験結果を、図-5に示す。この図は、下水道管渠模型における流れの摩擦損失の評価にManning型の式を用いることは不適当であることを示している。ここでは、下水道管渠模型の流れが開水路流れと圧力流れのいずれにおいても滑面乱流に近いことより、次のブラシウス型の式を用いて摩擦損失を評価することとした。

$$\text{圧力流れ： } f = 0.381 / Re'^{0.306} \quad (7)$$

$$\text{開水路流れ： } f = 0.248 / Re'^{0.254} \quad (8)$$

(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

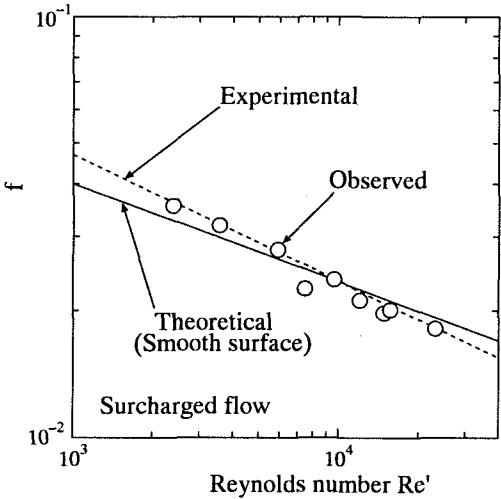


図-5 下水道模型管渠の摩擦損失特性

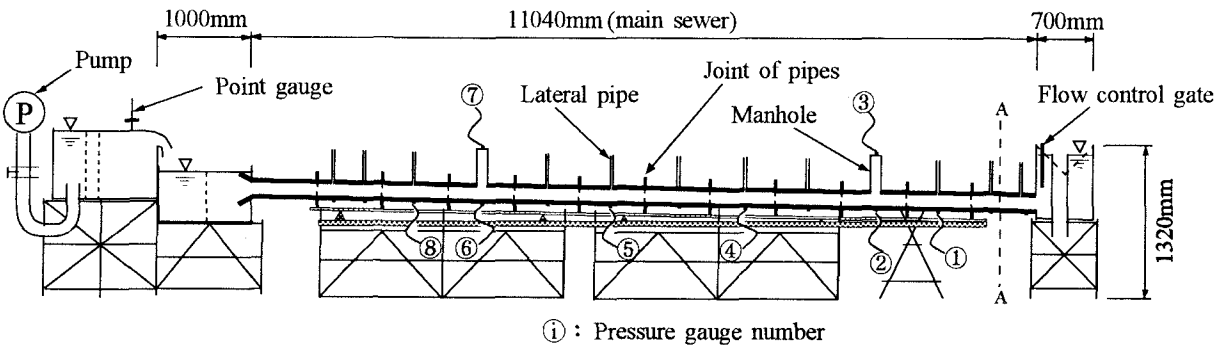


図-4 下水道管渠システムの水力模型

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）がおおよそ10秒と5秒のsine型の洪水流出（圧力流れ）を発生させ，③，⑦地点で空気圧，①，②，④，⑤，⑥，⑧地点で圧力水頭（全水頭）の時間的変動を測定した（図-4）．ここに，下水道管渠勾配は2.4 ‰，初期定常流量（圧力流れ）は7.6 ℓ/secである．

表-1 各流出実験における空気孔および吸排気管の設置状況（図-2）

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

a) 流出実験結果

実験結果の一例として，Run No. B2（表-1）において①～⑧地点で測定された圧力水頭あるいは空気圧水頭の時間的変動を図-6(a)に，Run No. A～C3において③地点で測定された空気圧の時間的変動を図-6(b)に示す．

b) 吸排気断面積と空気圧変動の関係

全ての流出実験を対象として，下流マンホールにおいて洪水期間中に観測された空気圧の最大値と空気が流入する断面積の総和との関係を調べた．検討結果を，図-7に示す．

これより，マンホール蓋の空気孔の設置個数を標準値（Run No. B2）の2倍程度にすれば，マンホール内空気

圧の上昇をかなりの程度まで抑え得るであろうことが分かる．
また，さらに吸排気管を設置すれば，マンホール蓋に掛かる空気圧上昇をほぼ完全に抑制し得るであろうことも良く分かる．

(3) 解析モデルの適用性

上述した流出実験に先述した水理解析モデルを適用した．具体的には，上下流端センサー（⑧および①地点，図-4）で測定された圧力変動を上下流端境界条件として与え，先述した式(1)～(8)を特性曲線法により数値解析し，②～⑦地点における圧力水頭のハイドログラフを求め，これらを測定結果と対比して，本水理解析法の適合性を調べた．

検討の一例を，図-6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なり高いものであることが分かる．

(4) 縮流係数の適値の検討

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

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地点における圧力変動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．検討結果を，図-8に示す．ここに，相対誤差（Relative error）は，②～⑦の6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．

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

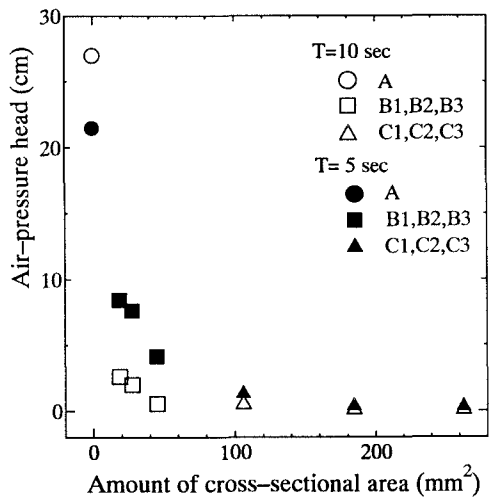
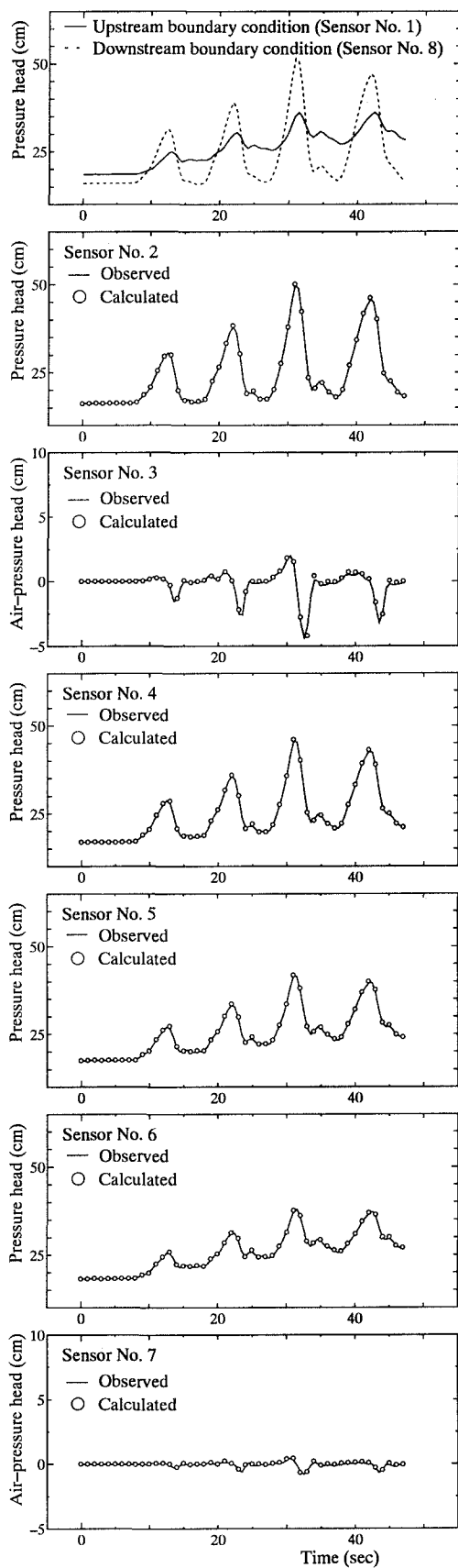
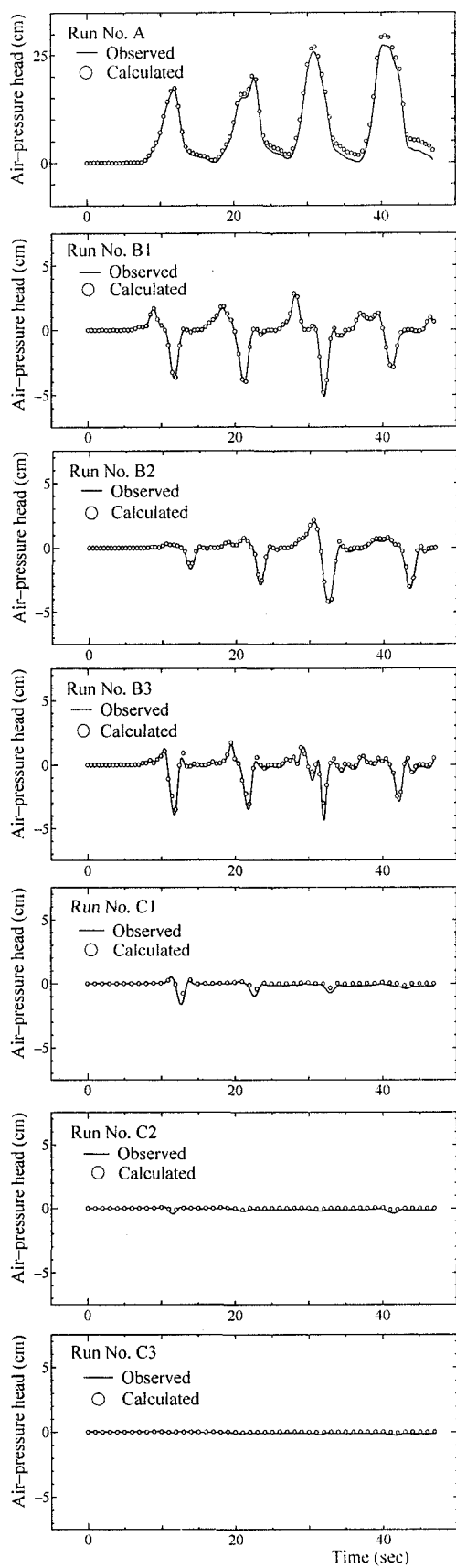


図-7 最大空気圧水頭と総吸排気断面積との関係



(a) Run No. B2, $T=10$ sec



(b) Sensor No. 3 (③地点), $T=10$ sec

図-6 実測結果と流出シミュレーション結果の比較

ここに、 N_H ：データ数、 $H_{o,i}$ および $H_{c,i}$ ：実測および計算された圧力水頭値（データ）、 $H_{o,max}$ および $H_{o,min}$ ：実測された圧力水頭の最大値および最小値、である。

これより、予測した通り、縮流係数の値（適値）として、0.70～0.75程度を採用すべきことが分かる。

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、 $C_m = 0.72$ とする取り扱いが行われたことを付け加えておく。

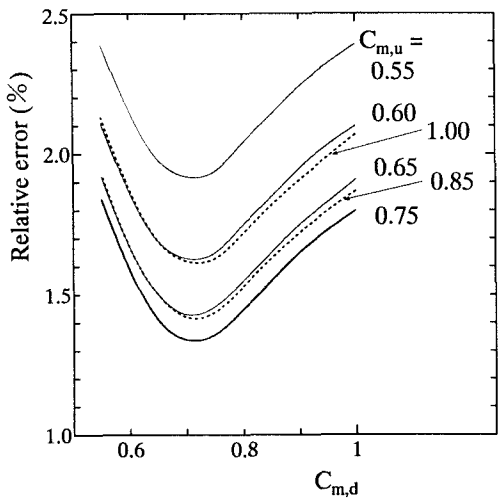


図-8 縮流係数 C_m の適値の検討 ($C_{m,u}$ ：上流マンホールの縮流係数、 $C_{m,d}$ ：下流マンホールの縮流係数)

4. 結 論

本研究では、マンホール内に空気塊を封入する下水道管渠システムの圧力流れの水理解析モデルを提案すると

共に、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その適合性を検討した。

- 本研究により得られた知見を要約して以下に示す。
- (1) 流出実験により、マンホール内の空気圧の上昇は、蓋の空気孔を標準の2倍程度設置すれば（開ければ）、かなりの程度、軽減できるであろうことが分かった。
 - (2) また、吸排気管を設置すれば、マンホール内の空気圧上昇は、ほぼ完全に抑えられるであろうことも明らかとなった。
 - (3) 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もっていることが確かめられた。
 - (4) 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 をとると考えられてきた縮流係数 C_m が、実際には、0.70～0.75 程度の値をとるであろうことを明らかにした。

なお、本研究の一部は、平成11年度文部省科学研究費補助金（基盤研究(B)(I)、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，森本一隆，周防床基：下水道管渠システムにおける空気塊を封入する圧力流れに関する検討，土木学会四国支部平成11年度技術研究発表会概要集，pp. 100～101，1999.
- 2) 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. 31，pp. 37～42，1998.
- 3) 松尾一泰：圧縮性流体力学，理工学社，pp. 48～69，1994.
- 4) (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），1999.

(1999. 9. 30受付)