

◆ 報 文 ◆

水理模型実験による雨水管路の 空気混入・噴出現象に関する検討

森 博昭* 那須 基** 森田弘昭*** 松原 誠****

1. はじめに

近年、都市化の進展に伴い雨水流出量が増大しており、その対応として各地で大規模雨水幹線や貯留管の建設が行われている。一方、近年の集中豪雨によりピーク流出量の多い雨水が短時間で雨水管路や貯留管に流入し、マンホール蓋が浮上・飛散する現象が顕在化しており、安全上の問題が指摘されている¹⁾。降雨時に圧力流管路となる雨水管路や貯留管においては、管内空気の挙動を明らかにし、空気噴出現象を考慮した設計手法を検討することが必要である。

これまで水の挙動については、慣性力と重力の影響を考慮したフルード相似則が広く利用され、定量的に解析されている。しかし、管路の空気混入を伴う水理挙動については検討事例が少なく、相似則も解明されていない。その理由は、水理模型実験での空気圧は実物と同様に大気圧であり、実物の大気圧/空気圧の関係は縮小模型では歪むため、空気の混入現象が相似しないことにある(図-1)。空気の連行・浮上等の挙動は、液体の表面張力と粘性に支配されるため、レイノルズ数とウェーバー数の相似則を満たす必要があるが、水理模型実験においては原形模型を用いない限り、フルード相似則とこれら2つの相似則を同時に満たすことは不可能である²⁾。

本報文では、空気噴出を考慮した雨水管路の設計手法の確立に向けた基礎研究として、同一形状の縮尺の異なる3タイプの模型実験結果から圧力流管路の空気を含む水理挙動を分析し、相似則について検討を行った。

なお、本研究は(財)下水道新技術推進機構、川崎市、横浜市、名古屋市、大阪市、福岡市との共同研究である。

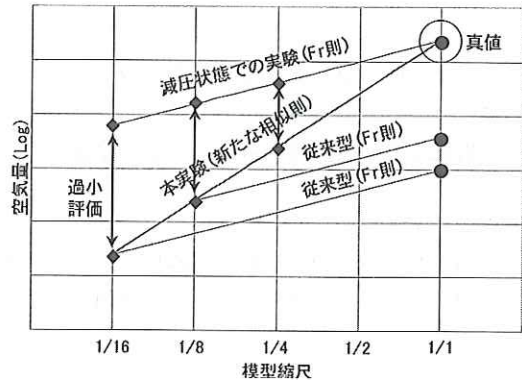


図-1 縮尺効果のイメージ

注) ◆印：実験結果 ●印：得られる解。
従来のFr則では空気量を過小評価。3模型の実験結果より相似則を導き真値を算出。

2. 実験方法

2.1 模型概要

水理実験模型は単純伏越し管路形状(管路勾配はレベル)とし、空気を含む水理挙動に対する相似則を把握するため、同一形状で縮尺の異なる3模型を国土技術政策総合研究所の実験棟内に製作した(図-2、表-1、写真-1)。流入入孔は突入流式および減勢工を設置した階段式(写真-2)を製作し、流入形式の差異が水理挙動に及ぼす影響を把握することとした。なお管路模型は流況等を把握するためにアクリル製とした。

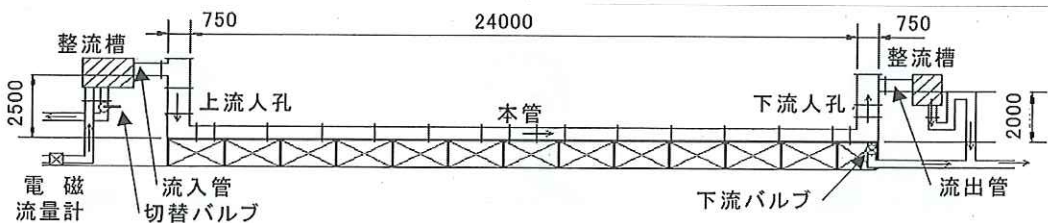


図-2 管路模型の形状 (M1) (単位: mm)

表-1 模型概要

模 型	スケール	管径 (mm)	管路延 長(m)	人孔深 (m)	人孔径 (mm)
実施設	1/1	5000	240	25.00	7500
M1	1/10	500	24	2.50	750
M2	1/20	250	12	1.25	375
M3	1/40	125	6	0.625	187.5

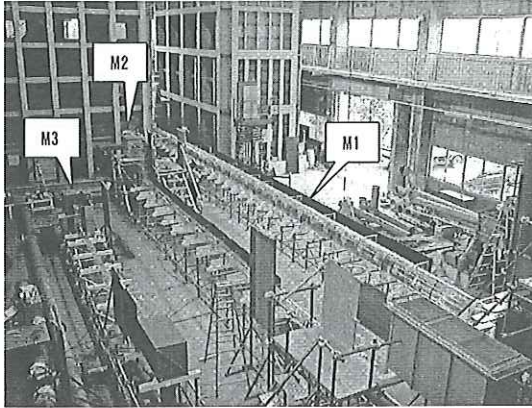


写真-1 水理実験模型全景

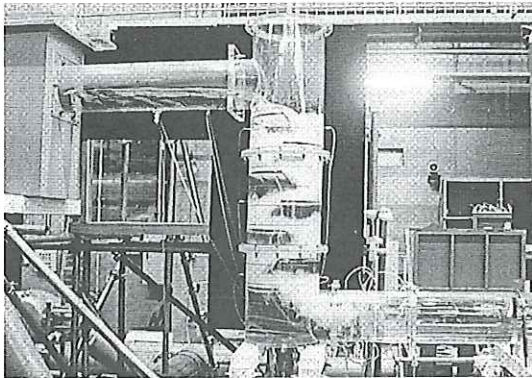


写真-2 階段式人孔模型 (M2)

表-2 実験ケース

実験ケース	実験目的
水位変動把握	本水理実験にて水の挙動がフルード相似にて再現可能か検証。
混入空気	定常状態の混入空気量、混入率（混入空気量／通水流量）を定量化し、縮尺効果を把握。
空気排気	非定常状態の空気排気現象を把握、および最大風量を定量化し縮尺効果を把握。

2.2 実験ケース

本実験では縮尺の異なる3模型を用いて、流入形式・通水流量の差異が及ぼす水理特性・空気混入現象・排気現象への影響を把握する。本実験にて取り扱う実験ケースを表-2に示す。また計測項目と計測機器について表-3に示す。

2.3 流量ケースと諸物理量の縮率

無次元数であるフルード数 $Fr = V/(gl)^{1/2}$ (ここに、 V :流速、 g :重力加速度、 l :水深)は、重力のもとで行われる非圧縮性の完全流体の運動を特徴づける重要なパラメータである。フルード数は流体に働く慣性力と重力との大きさの比を代表しており、流れの現象に重力の作用が卓越する場合にフルードの相似則が適用される。実物と模型において V^2/gl の値が同一であれば、流体力学的相似は成立したことになる。

本実験では、流体として水・空気を共に用いるが、水に関しては重力が支配的となるため、流量についてはフルード相似則に基づき設定した²⁾。流量ケースを表-4に、フルード相似による諸物理量の縮率を表-5に示す。

表-4 流量ケース (単位: l/s)

模 型	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
実施設	47,400	39,500	31,600	23,700	15,800
M1	150.0	125.0	100.0	75.0	50.0
M2	26.5	22.1	17.7	13.3	8.8
M3	4.7	3.9	3.1	2.3	1.6

表-3 計測項目及び使用機器

計測項目	計測機器	設置位置	備 考
通水流量	電磁流量計	整流槽上流	φ 300
水位	圧力計	本管: 5箇所、流入出管: 各1箇所、 上下流人孔下部: 各1箇所 計9箇所	圧力計は全圧(水圧+空気圧)となって計測される。
空気圧	圧力計(微圧計)	上下流人孔上部: 各1箇所	負圧も計測可能
空気量	微差圧計(ピトー管式) 熱線式風速計	上下流人孔上部: 各1箇所(微差圧計) 下流人孔上部(熱線式風速計)	原則として微差圧計を使用し、風速が3m/s以下となる場合は熱線式風速計を使用。

表-5 フルード相似による諸物理量の縮率

物理量	縮率
時間 T [T]	$T_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{0.5} \cdot T_p$
面積 A [L ²]	$A_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2.0} \cdot A_p$
圧力 P [$\frac{M}{L \cdot T^2}$]	$P_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right) \cdot P_p$
流速 V [$\frac{L}{T}$]	$V_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{0.5} \cdot V_p$
流量 Q [$\frac{L^3}{T}$]	$Q_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{2.5} \cdot Q_p$
粗度係数 n	$n_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/6} \cdot n_p$

注) L:代表寸法、添字 m:模型、p:実物を表す。

3. 実験結果

3.1 水位変動把握実験

(1) 実験内容

水の挙動については、従前の研究によりフルード相似則が適用可能であると考えられている。ここでは、本水理実験にて水の挙動がフルード相似則にて再現可能であるか検証を行った。

実験は、下流バルブを閉じ、空状態の水理模型に一定流量を通水し、人孔が満水になる（吹き上がる）までの水位変動を計測した。実験条件を表-6に示す。

表-6 水位変動実験条件

項目	実験条件	項目	実験条件
人孔形式	突入流式	模 型	M1,M2,M3
上流人孔	上部全面開放	通水流量	Q1,Q3,Q5
下流人孔	上部全面開放	ケース数	3×3=9

(2) 水位変動計測結果

フルード相似則により縮尺補正を行った3モデルでの計測の結果、概ね水位変動は合致しており、本水理実験における『水だけを対象とした場合の3モデルでの相似性』、および『模型形状の相似性』について検証できた。計測結果の一例として、通水流量 Q1 での結果を図-3～図-5に示す。

(3) 段波計測結果

段波とは、空状態の管路に通水した際、下流側から上流に向けて伝播する水位上昇の波である（図-6、写真-3）。フルード相似則により縮尺補正を行った段波高および段波速度の計測結果を表-7、表-8に示す。モデル間の誤差は概ね 10% 以内となっており、フルード相似則を満たしていると判断

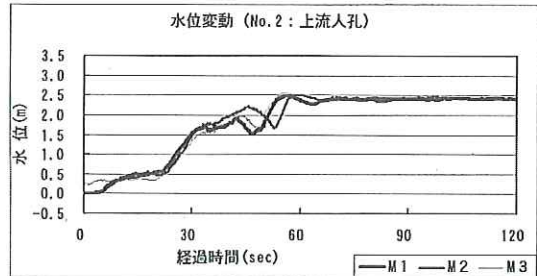


図-3 水位変動計測結果（上流人孔部）

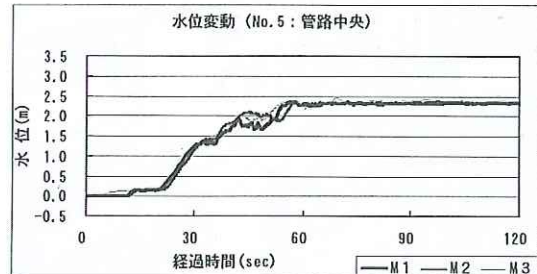


図-4 水位変動計測結果（管路中央部）

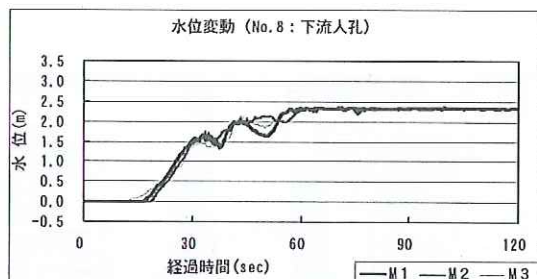


図-5 水位変動計測結果（下流人孔部）

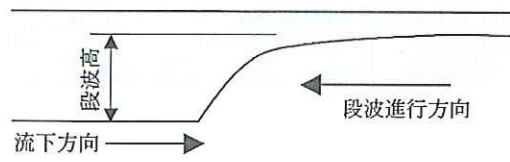


図-6 段波のイメージ

できる。また、段波高および段波速度は流量の増加に伴い大きくなる傾向がある。

3.2 混入空気実験

(1) 実験内容

混入空気実験は、定常状態における空気混入現象の把握を目的としており、通水流量・流入落差高・人孔水位等のパラメータが混入空気量に及ぼす影響、および3モデルでの混入空気量の縮尺効果について検討するものである。実験では、一定流量を通水し、下流側人孔下部に設置したバルブの開度調整により上流側人孔水位を一定に保持し、

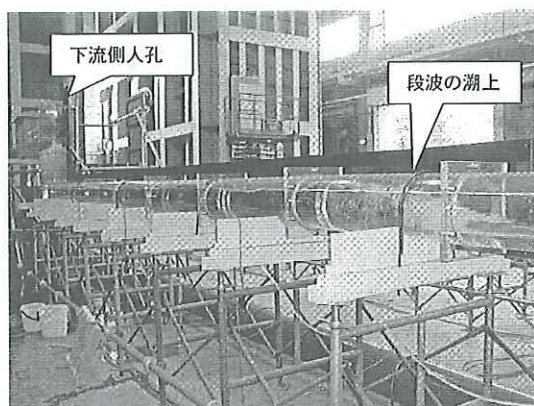


写真-3 段波の潮上 (M2-Q1)

表-7 段波高の計測結果

模 型	項 目	Q1	Q3	Q5
M1	計測値	25.0	24.0	17.5
	換算値	12.9	13.1	7.7
M2	比率	1.03	1.09	0.88
	換算値	25.8	26.2	15.4
M3	比率	0.98	0.97	0.82
	換算値	6.1	5.8	3.6
	比率	24.4	23.2	14.4
	換算値	0.98	0.97	0.82

注) 比率は M1 に対する比率。段波高の単位は cm

表-8 段波速度の計測結果

模 型	項 目	Q1	Q3	Q5
M1	計測値	0.82	0.65	0.54
	換算値	0.56	0.52	0.42
M2	比率	0.96	1.14	1.09
	換算値	0.79	0.74	0.59
M3	比率	0.39	0.36	0.27
	換算値	0.78	0.72	0.54
	比率	0.95	1.11	1.00
	換算値	0.95	1.11	1.00

注) 比率は M1 に対する比率。段波速度の単位は m/s

表-9 混入空気実験条件

人孔形式	突入流式、階段式
模 型	M1,M2,M3
通水流量	Q1,Q2,Q3,Q4,Q5
上流人孔水位	h1,h2,h3

下流側人孔上部の微差圧計(ピトー管)或いは熱線式風速計にて計測される風量を混入空気量として整理した。実験条件を表-9に、上流人孔設定水位を表-10に、実験状況写真を写真-4に示す。

(2) 突入流式人孔における混入空気実験結果

計測された混入空気量について、混入率 α (混入空気量/通水流量)と水没度 h/H (H :人孔深、

表-10 上流人孔設定水位

	M1	M2	M3
h1	0.60m	0.30m	0.15m
h2	1.20m	0.60m	0.30m
h3	1.80m	0.90m	0.45m
H(人孔深)	2.50m	1.25m	0.625m

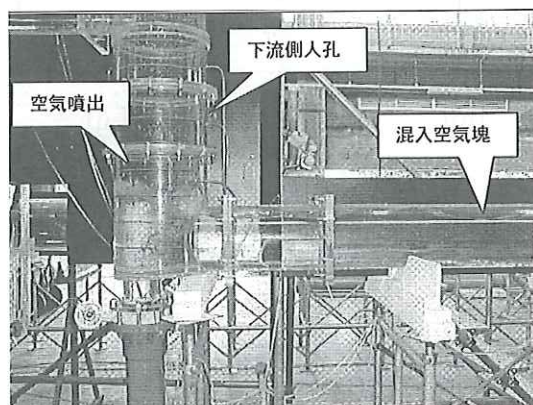


写真-4 混入空気実験状況 (M2-Q1-h1)

h :人孔内水位)の関係で整理した結果を図-7に示す。図-7によると、各模型とも人孔内水位の増加(落差高の減少)に伴い、混入率 α は減少する傾向が確認できる。 α には多少のばらつきがあるが、各模型の近似式は h/H の一次回帰式で表現できる(式①, ②, ③)。

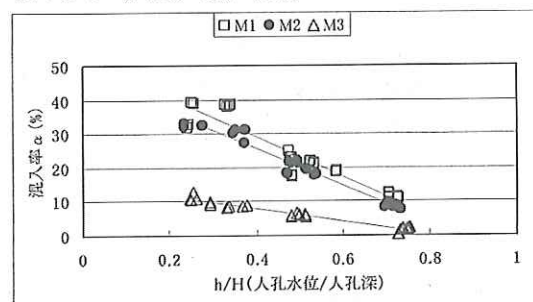


図-7 混入空気実験結果 (突入流式)

$$M1: \alpha = -58.79(h/H) + 52.55 (R^2 = 0.90) \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$M2: \alpha = -54.63(h/H) + 47.56 (R^2 = 0.97) \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$M3: \alpha = -18.27(h/H) + 15.20 (R^2 = 0.96) \cdots \cdots \textcircled{3}$$

また模型縮尺が大きくなるにつれて混入率は増加していることから、混入率には縮尺効果が存在すると言える。そこで、各模型の幾何学的な縮尺比と混入率の比との関係は④式のようにフルード則と同じ形で表現できると仮定し、相似則の検討を行った。

$$(\alpha_p / \alpha_m) = (L_p / L_m)^N \cdots \cdots \textcircled{4}$$

ここに、 α :混入率、 L :代表寸法、添字 p :実

物、m：模型、N：定数。

なお、定数Nは実験より得られた近似式（式①，②，③）より得られる、 $h/H = 0.2, 0.5, 0.8$ の場合の α を用いて算出した。近似式は⑤式で表現でき、 α の推定式は⑥式となる（図-8）。

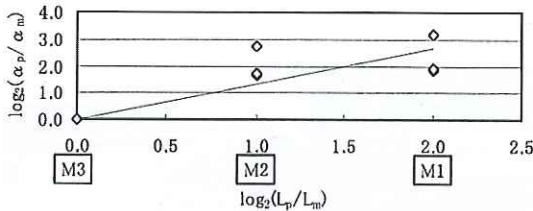


図-8 混入率の推定式検討（突入流式）

$$\log_2(\alpha_p / \alpha_m) = 1.33 \times \log_2(L_p / L_m) \quad (R^2 = 0.68) \quad \text{⑤}$$

$$(\alpha_p / \alpha_m) = (L_p / L_m)^{1.33} \quad \text{⑥}$$

(3) 階段式人孔における混入空気実験結果

突入流式と同様、階段式についても混入空気量を混入率 α （混入空気量／通水流量）と水没度 h/H （ H ：人孔深、 h ：人孔内水位）の関係で整理した（図-9）。突入流式と同様、各模型とも人孔内水位の増加（落差高の減少）に伴い、混入率 α は減少し、また模型縮尺が大きくなるにつれて混入率は増加する傾向が確認できる。ただし、 h/H が0.2程度での混入率は5～25%程度（突入流式の約1/2）であるが、 h/H が0.4以上では大半のケースで混入率は5%程度となる。これは、混入率は落差高よりも階段段差の影響が大きいいため、人孔内水位が高いと気泡が管路内に流入し難いものと考えられる。

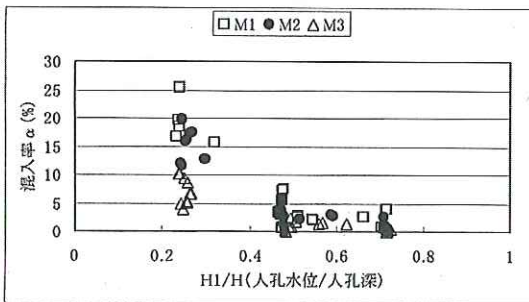


図-9 混入空気実験結果（階段式）

3.3 空気排気実験

(1) 実験内容

空気排気実験は、非定常状態における空気排気現象の把握を目的としている。特にマンホール蓋の浮上・飛散対策においては、最大風量が焦点のひとつとなるため、最大風量の定量化について検討するとともに、3模型での縮尺効果について検

討を行うこととした。実験では、下流バルブを閉じ、空状態の水力模型に一定流量を通水し、人孔が満水になる（吹き上がる）までの上下流人孔上部からの空気排気量を、人孔上部に設置した微差圧計（ピトー管）にて計測した。なお、負の風量は微差圧計（ピトー管）で計測できないため、人孔上部に設置した圧力計データから⑦式により換算^{1,3)}し、補完した。

$$u = c_1 \left[\frac{2k}{k-1} \left\{ \left(\frac{P_0}{P_1} \right)^{1-\frac{1}{k}} - 1 \right\} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{⑦}$$

ここに、 c_1 ：大気音速（m/s）、 k ：比熱比（＝1.4）、 P_1 ：大気圧（＝98000Pa）、 P_0 ：人孔内空気圧。

実験条件を表-11に、実験状況写真を写真-5に示す。

表-11 空気排気実験条件

人孔形式	突入流式
模 型	M1, M2, M3
通水流量	Q1, Q3, Q5

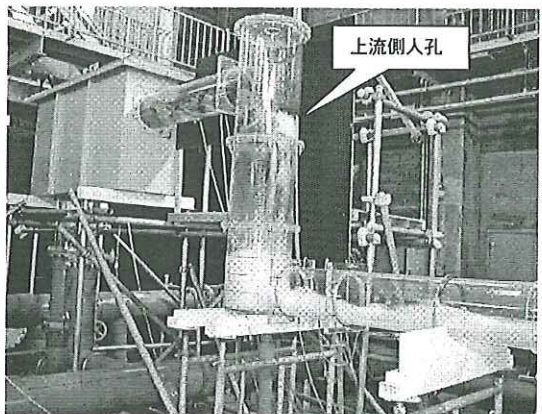


写真-5 空気排気実験状況（M2-Q1）

(2) 空気排気実験結果

実験結果の一例として、M1-Q1での風量の経時変化を図-10に示す。また最大風量の検討に際し、一般化のため最大風量を通水流量で除した排気率 β を用いて検討を行うこととした。各実験ケースにおける上下流人孔の β を図-11に示す。図-11によると、流量が少ないケース（Q3, Q5）では上流側の β は下流側に比べ小さいが、流量が多いケース（Q1）では上下流人孔の β は同程度であるため、下流側人孔と同程度の対策が上流側人孔にも必要であると言える。

次に、排気率 β についても縮尺効果が生じるため、ここでは下流側人孔における β の推定式を検

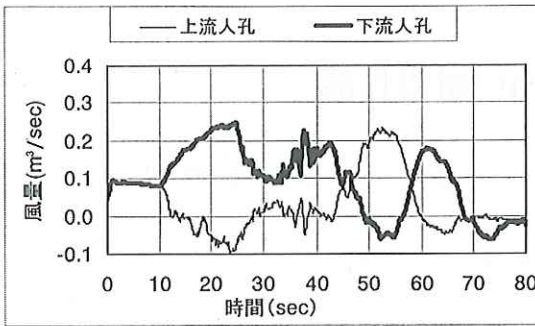


図-10 風量の経時変化 (M1-Q1)

討した (図-12)。なお検討方法は混入率 α と同様である。近似式は⑧式で表現でき、 β の推定式は⑨式となる。

$$\log_2(\beta_p/\beta_m) = 0.08 \times \log_2(L_p/L_m) \quad (R^2=0.25) \quad \text{.....⑧}$$

$$(\beta_p/\beta_m) = (L_p/L_m)^{0.08} \quad \text{.....⑨}$$

混入率 α の推定式における定数 N は、突入式で 1.33 であったが、 β の推定式では $N = 0.08$ で

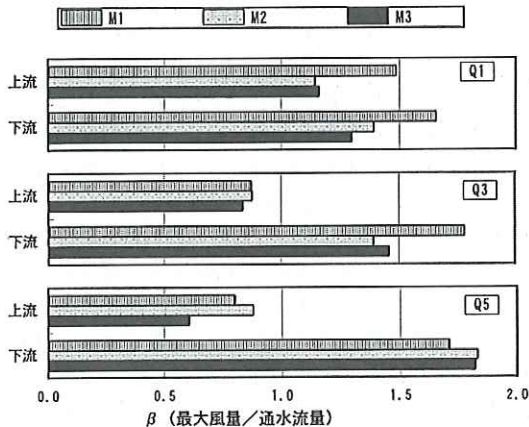


図-11 上下流人孔における排気率 β の比較

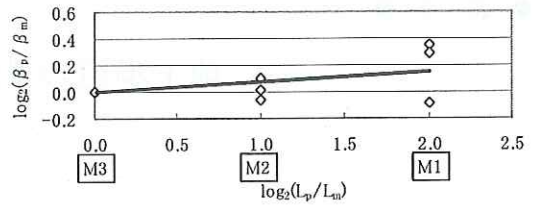


図-12 排気率の推定式検討結果

あり、 β の縮尺効果は α に比べて小さいと言える。

4. まとめ

- ① 混入空気実験より、混入率 α (混入空気量/通水流量) は、 h/H (人孔内水位/人孔深) の一次回帰式にて表現できる。
- ② 混入率には縮尺効果が生じることを明らかにし、突入流式人孔での混入率 α の推定式を導いた。
- ③ 階段式人孔での混入率 α は、人孔内水位が低い場合は突入流式の 1/2 程度生じるが、人孔内水位が上昇するといずれのケースでも 5% 程度となる。
- ④ 空気排気実験より、流量によっては上下流人孔における排気率 β (最大風量/通水流量) が同程度の場合があるため、下流人孔と同規模な対策が上流人孔にも必要である。
- ⑤ 排気率 β においても縮尺効果が生じることを明らかにし、下流人孔での排気率 β の推定式を導いた。

参考文献

- 1) (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), p.1, p.49, 1999 年 3 月
- 2) 山海堂：水理模型実験, p.13, p.36, 1990 年 11 月
- 3) 実教出版：基礎力学演習流体力学, p.119-123, 1997 年

森 博昭*



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水道研究室交流研究員
Hiroaki MORI

那須 基**



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水道研究室主任研究官
Motoi NASU

森田弘昭***



国土交通省国土技術政策
総合研究所下水道研究部
下水道研究室長, 工博
Dr. Hiroaki MORITA

松原 誠****



国土交通省都市・地域整備局
下水道部下水道企画課
課長補佐 (前 国土交通省
国土技術政策総合研究所
下水道研究部下水道研究室
主任研究官)
Makoto MATSUBARA