

B-13

## 水理模型実験による雨水管路の空気混入現象の解明

国土交通省国土技術政策総合研究所

○森 博昭

同上

松原 誠

同上

森田 弘昭

(財) 下水道新技術推進機構

鈴木 茂

同上

稲毛 順二

同上

小池 裕之

## 1. はじめに

近年、集中豪雨によりマンホール蓋が浮上・飛散する現象が顕在化し、安全上の問題が指摘されている<sup>1)</sup>。降雨時に圧力流状態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重要である。この検討においては水理模型による検証が有効であるが、現在、水と空気の混合状態を適切に表現できるモデルや相似則は確立していない。管路の空気混入を伴う水理挙動の相似則を把握できれば、簡易な水理模型実験から実施設の挙動を推測することができ、設計段階から空気噴出に対して適切に対処することが可能となる。本研究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、伏越し形状の貯留管を対象とし、水理模型実験結果から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。

## 2. 空気混入現象の基本的な考え方

流入人孔における水理現象を模式化すると、図-1 のとおりとなる。落水時に水中に持ち込まれる空気は、人孔内での循環・浮上を経て流入人孔より排出される空気と、本管に引き込まれ下流側人孔より排出される空気に区分される。なお本実験では、下流人孔における空気排出量を混入空気量として計測している。混入空気量の収支は式①にて表現できる。

$$q = q_a - q_b \text{-----} \textcircled{1}$$

ここに、 $q$ ：下流人孔で計測される混入空気量( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$q_a$ ：落水時の混入空気量( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$q_b$ ：落水時に持ち込まれた空気が気泡となり、人孔内で浮上する空気量( $\text{m}^3/\text{s}$ )

水脈の水面突入に伴う空気混入現象については未解明な部分が多い。D. A. Ervine らの研究<sup>2)</sup>によると、垂直落下人孔における実験結果から、落水時の混入空気量  $q_a$  は水脈の衝突速度  $V_b$  との相関が高く、 $q_a = 0.00045(V_b - 0.8)^3$  で表現できると提案している。また人孔内で浮上・循環する空気量  $q_b$  は衝突後の人孔内流速  $V_0$  との相関が高いとしている。水脈の衝突により発生した気泡は浮力により上昇するため、 $q_b$  は浮力に対抗して気泡を運搬し得る最低速度  $V_r$  の影響を受ける。すなわち、 $V_0 > V_r$  であれば気泡は運搬されるが、 $V_0 < V_r$  であれば気泡は浮上する。なお  $V_r$  は気泡の上昇速度  $V_{br}$  と本質的には同一とされる(静水中では  $V_{br} = 0.25 \text{ m/s}$ )。

また本実験のような伏越し形状の場合は、本管接続位置も重要な因子となる。 $V_0 > V_r$  であれば本管接続位置に関係なく空気は本管へ運搬されるが、 $V_0 < V_r$  であっても落水時のエネルギーに応じて気泡は水中に潜り込むため、本管接続位置が気泡の潜り込み深さより浅い位置であれば、空気は本管へ運搬される。

以上より、空気混入現象を適切に表現できる因子として、水脈の衝突速度、人孔内流速、本管接続位置(落

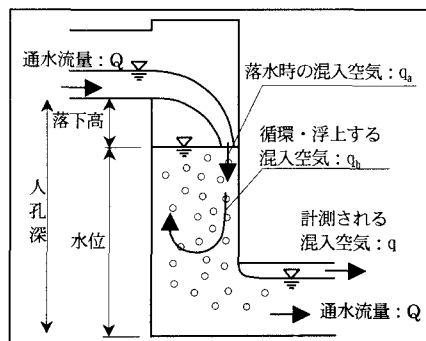


図-1 流入人孔の水理現象イメージ

下高と水位との関係)を挙げることが出来る。しかしながら、人孔内の水・空気は浮上・循環を伴う極めて複雑な挙動となり、流速を直接計測することは困難であることから、水脈の衝突速度・人孔内流速を比較的制御・計測が容易な通水流量・落下高と置き換え、空気混入現象の分析を行うこととする。

### 3. 実験方法

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、通水流量・落下高・人孔深と混入空気量の相関を把握するために流入人孔(突入流式)の深さを1m~2mの範囲で変更可能な模型を製作し、また空気混入現象の相似則を検討するために同一形状で縮尺の異なる3模型(M1~M3)を製作した(図-2、表-1)。さらに流入形式の差異が及ぼす影響を把握するため、M1~M3については突入流式および減勢工を設置した階段式の流入人孔を製作した。なお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、通水流量については表-1のとおりフルード相似則に基づき設定した<sup>3)</sup>。

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(定常状態)し、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することとした。

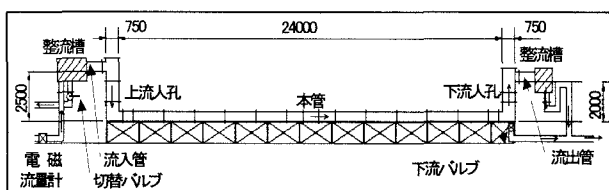


図-2 管路模型形状 (M1)

表-1 模型概要および流量ケース

| モデル       |     | 縮尺   | 管径<br>(mm) | 管路<br>延長<br>(m) | 人孔深<br>(m) | 人孔径<br>(mm) | 通水流量 (ℓ/s) |        |        |        |        |      |
|-----------|-----|------|------------|-----------------|------------|-------------|------------|--------|--------|--------|--------|------|
|           |     |      |            |                 |            |             | Q1         | Q2     | Q3     | Q4     | Q5     | Q6   |
| 人孔深変更実験   |     | —    | 320        | 3.5             | 1~2        | 500         | 50.0       | 40.0   | 30.0   | 25.0   | 15.0   | 10.0 |
| 相似則<br>検討 | 実施設 | 1/1  | 5000       | 240             | 25.00      | 7500        | 47,400     | 39,500 | 31,600 | 23,700 | 15,800 | —    |
|           | M1  | 1/10 | 500        | 24              | 2.50       | 750         | 150.0      | 125.0  | 100.0  | 75.0   | 50.0   | —    |
|           | M2  | 1/20 | 250        | 12              | 1.25       | 375         | 26.5       | 22.1   | 17.7   | 13.3   | 8.8    | —    |
|           | M3  | 1/40 | 125        | 6               | 0.625      | 187.5       | 4.7        | 3.9    | 3.1    | 2.3    | 1.6    | —    |

### 4. 混入空気実験結果(人孔深変更実験・突入流式)

計測された混入率(通水流量に対する混入空気量、 $=q/Q$ )と落下高の関係を、通水流量別に整理した結果を図-3に示す。ばらつきは大きい、通水流量が多いほど、また落下高が大きいほど混入率は高くなる傾向が確認できる。ばらつきの要因として、同一落下高であっても人孔深(水位)の差異が混入率に影響を及ぼしていることが考えられる。

混入率と水位の関係を、人孔深別に整理した結果を図-4に示す。水位が高いほど混入率は減少し、また同一水位の場合は人孔深が深いほど(落下高が大きいほど)混入率は高くなることを確認できる。すなわち、本管接続位置(落下高と水位との関係)は混入率の重要な因子であると言える。

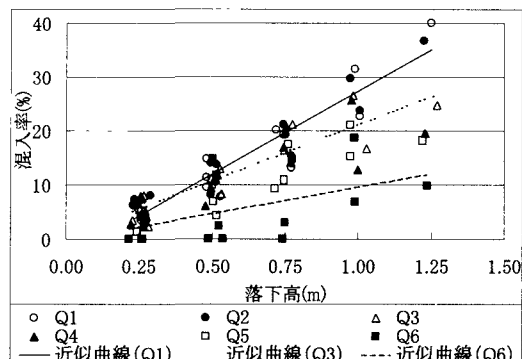


図-3 落下高-混入率(通水流量別)

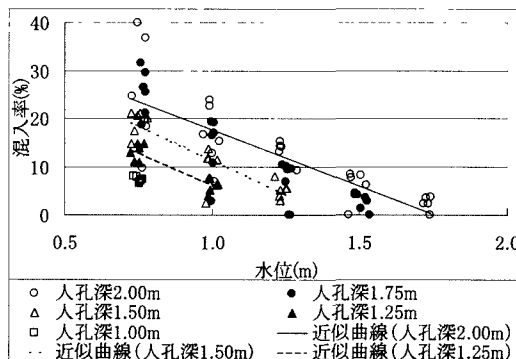


図-4 水位-混入率(人孔深別)

以上の結果より、混入率を適切に表現できるパラメータとして、水没度(水位/人孔深)が考えられる。混入率と水没度の関係を通水流量別に整理した結果を図-5に示す。混入率と水没度は概ね比例関係(直線上)にあり、本実験模型では混入率は通水流量よりも水没度に大きな影響を受けていると考えられる。ただし、通水流量が極めて少ない場合(Q6)は適用範囲外となり、また水没度が小さくなると人孔内の水・空気の挙動が極めて複雑となるため、計測値(混入率)にはバラツキが生じると考えられる。

## 5. 相似則の検討

同一形状で縮尺の異なる3模型(M1～M3)を用いた混入空気実験結果を図-6に示す。図-6によると、各モデルとも水没度の増加(落下高の減少)に伴い、混入率は減少する傾向が確認できる。各モデルの混入率( $\alpha$ )の近似式は、水没度( $\beta$ )の一次回帰式で表現できる(式②③④)。

$$M1: \alpha = -58.79\beta + 52.55 \quad (R^2=0.90) \text{-----} \textcircled{2}$$

$$M2: \alpha = -54.63\beta + 47.56 \quad (R^2=0.97) \text{-----} \textcircled{3}$$

$$M3: \alpha = -18.27\beta + 15.20 \quad (R^2=0.96) \text{-----} \textcircled{4}$$

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、各モデルの幾何学的な縮尺比と混入率の比との関係は式⑤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。

$$(\alpha_p/\alpha_m) = (L_p/L_m)^N \text{-----} \textcircled{5}$$

ここに、 $\alpha$  : 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②③④)より得られる、 $\beta=0.2$ 、 $0.5$ 、 $0.8$  の場合の  $\alpha$  を用いて算出した。近似式は式⑥で表現でき、 $\alpha$  の推定式は式⑦となる(図-7)。

$$\log_2(\alpha_p/\alpha_m) = 1.33 \times \log_2(L_p/L_m) \quad (R^2=0.68) \text{---} \textcircled{6}$$

$$(\alpha_p/\alpha_m) = (L_p/L_m)^{1.33} \text{-----} \textcircled{7}$$

## 6. 階段式流入人孔における混入空気

階段式流入人孔についても同一形状で縮尺の異なる3模型(M1～M3)を用いた混入空気実験を実施した(図-8)。水没度が小さい(水位が低い)場合は突入流式の1/2程度混入するものの、水没度が0.4以上であれば混入率は5%以下と極めて小さくなる。このメカニズムと相似則の解明については今後の課題である。

### 【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、1999年3月
- 2) D.A.Ervine, A.A.Ahmed、2次元の垂直落下立て坑に対する縮尺の関係、水理模型に関する国際会議論文集、1982年9月、北海道開発局
- 3) 山海堂：水理模型実験、p.36、1990年11月

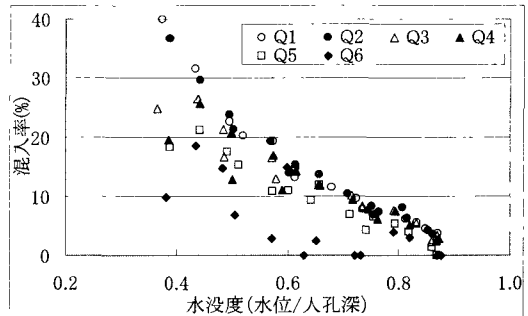


図-5 水位/人孔深—混入率(通水流量別)

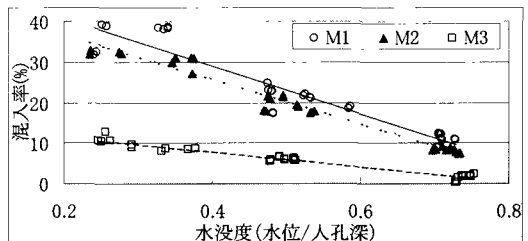


図-6 3モデルの実験結果(突入流式)

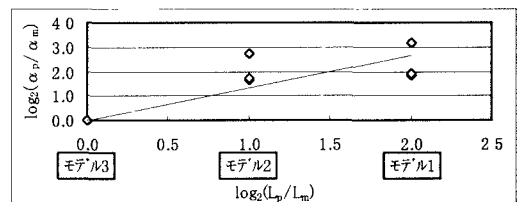


図-7 混入率の推定式検討(突入流式)

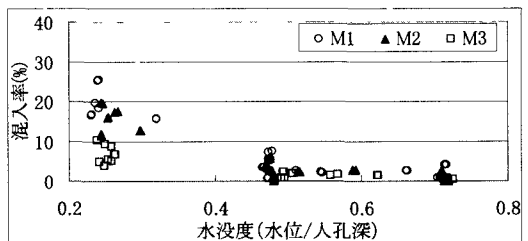


図-8 3モデルの実験結果(階段式)