

3-2-3 新たな材料による下水道管の粗度係数を計測

東京都下水道サービス株式会社 技術部 技術開発課 佐藤 誠、林 悦朗
 日本ヒューム株式会社 技術研究所 畑 実
 日本工営株式会社 貝塚和彦

1. はじめに

下水道管は、「陶管」「ヒューム管」「塩化ビニール管」と時代の要請に基づき変遷する中で、それぞれの下水道管が持つ優れた品質や性能は、その時代ごとに高く評価されてきた。反面、昨今では更なる高耐久性や地球環境保全などへの対応など新たな課題も確認されている。

本研究では、品質・性能や各々の製品の長所の融合や短所の改善を図り、産業副産物や粒度調整灰（以下「SA」という。）の有効活用と脱セメントによるCO₂の削減を図りつつ、高耐久性を有し、環境保全に有効な新しい材料によるヒューム管の研究を行った¹⁾。

具体的には、セメントを使用せず、フライアッシュと高炉スラグ微粉末を中心とした産業副産物主体の結合材（Industrial By-Product Materials 以降 IBPM）を開発し、この IBPM をセメント代替として用いたコンクリートでヒューム管を製造して、水理実験装置を設けて当該管路の粗度係数を計測した。

2. 計測方法

(1) 新たな材料（IBPM）

IBPM には 6 種類の材料を使用し、表—1 に示す比率で混合している。その内訳は、フライアッシュ（FA）、高炉スラグ微粉末（BFS）、シリカフェーム（SF）、スーパーアッシュ（SA）の 4 種類の産業副産物に、膨張材（EX）と水酸化カルシウムとして消石灰（CH）で構成される。各材料は、FA のポゾラン反応、BFS の潜在水硬性、SF の高強度化と緻密性、SA のマイクロファイラー効果、EX の収縮低減効果、CH のアルカリ刺激効果を有しており、その特性を組み合わせた結合材が IBPM である。この IBPM をセメントの代替として用いたコンクリートを表—2 に示す配合で練り混ぜ、遠心成形によって IBPM コンクリート製のヒューム管を製造した。

なお、IBPM コンクリート製管の耐荷性は、下水道協会規格（JSWASA-1）のひび割れ荷重と破壊荷重の規格値を十分に満足している。

項目	FA	BFS	SF	EX	SA	CH	合計
単体量(kg/m ³)	207	207	30	30	26	20	520
配合比率(%)	39.8	39.8	5.8	5.8	5.0	3.8	100

表—1 IBPM の使用材料と混合比率

Gmax (mm)	SLF (mm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単体量(kg/m ³)				
					W	IBPM	S	G	Sp
20	650 ± 50	2.0 ± 1.5	34	41	177	520	655	960	5.20

表—2 IBPM コンクリートの配合

(2) 水理実験

下水道管の流下性能を評価する指標として、ヒューム管の設計に用いられているのが粗度係数 n である。ヒューム管の粗度係数（設計値）は $n=0.013$ とされており、塩化ビニール管の $n=0.010$ と比較すると流下性能が低く評価されている。そこで、IBPM コンクリート製ヒューム管と各種下水道管の流下性能を評価するために、図—1 に示す水理実験装置を設け、直線管渠において粗度係数を測定した。

管渠（検査管）の上流側には最大 $0.2\text{m}^3/\text{s}$ 程度の給水が可能な給水管を接続し、流量測定用の電磁流量計と流量調節用のバルブを設置した。また、下流端には排水管を接続して管渠内を満管にするための水位調整用バルブを設けた。このように、検査管の上流側に長さ 4m の給水管、下流側に長さ 4m の排水管を設けることで、管内を流れる水の状態を均一なものとした。また、Manning の粗度係数は流れの状況によって変化することから、本研究では水が満管状態で流下する条件で測定を行った。

すべての管渠には、孔径 1mm のピエゾメータを 1m 間隔で 8 箇所設置して水頭による圧力分布を測定した。管径は 250mm とし、長さ $2,000\text{mm}$ の管を 4 本接続して計測区間を $8,000\text{mm}$ とした。水理実験の対象とした下水道管は 5 種類であり、品質規格を表—3 に示した。その内訳は、①ヒューム管、②粒度調整灰を混入したヒューム管（SA 混入）、③IBPM コンクリート製ヒューム管、④塩化ビニール管の VU 管（薄肉管）、⑤塩化ビニール管の VP 管（厚肉管）である。



図—1 水理実験装置の概要

No	下水道管の種類	製品規格	部材厚さ (mm)	ひび割れ荷重 (kN/m)	破壊荷重 (kN/m)	質量 (g/m)	耐荷力 (MPa)	耐熱温度 (°C)
1	OPC製ヒューム管(SA無混入)	JSWAS A-1	28.0	16.7	25.6	—	—	—
2	OPC製ヒューム管(SA混入)※					—	—	—
3	IBPM製ヒューム管					—	—	—
4	塩化ビニール管(VU)	JIS	7.8	—	—	9758	0.6	60
5	塩化ビニール管(VP)	K 6741	12.7	—	—	15481	1.0	

※No.2 OPC製ヒューム管（SA混入）は、セメント量の5%に相当する量のSAを砂と置換。

表—3 粗度係数の測定に用いた下水道管の品質規

(3) 粗度係数の計算

水理実験ではヒューム管の一般的な流速とされている $0.6\text{m/s} \sim 3.0\text{m/s}$ の範囲で水を流し、ピエゾメータの計測値から得られる動水勾配から摩擦損失水頭を測定し、摩擦損失水頭の測定結果に基づいて式 (1) (Darcy-Weisbach 式) を用いて摩擦損失係数 f を計算した。

また、管内の平均流速を用いて式 (2) よりレイノルズ数を算出した。摩擦損失係数とレイノルズ数の関係を Moody 図にまとめると、計測データは粗面と滑面の遷移領域に

該当し、摩擦損失係数はレイノルズ数により変化する。

式(3) (Manning 式) は粗面域での適合性が優れているとされているが、粗度係数としての範囲を確認するため Manning 式を用いることとし、式(1) から得られる式(4) から粗度係数を算出した。

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

ここに、 h_f : 摩擦損失水頭 (m), L : 管路長 (m), D : 管径 (m), v : 平均流速 (m/s),
 f : 摩擦損失係数, g : 重力加速度 (m/s²)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2.0 \cdot \log_{10} \left(\frac{k}{D} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2)$$

ここに、 Re : レイノルズ数 ($=v \cdot D / \nu$), ν 動粘性係数 (1.007 m²/s),
 k : 絶対粗度 (m), k/D : 相対粗度

$$v = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3} \cdot I^{1/2} = \frac{1}{n} \cdot \left(\frac{D}{4} \right)^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (3)$$

ここに、 n : 粗度係数, R : 径深 (A/L), I : 水路勾配

$$f = \frac{8gn^2}{(D/4)^{1/3}} \quad (4)$$

3. 結果

実験で得られた測定値に基づき計算した、下水道管内の流速が 0.6m/s~3.0m/s におけるレイノルズ数と粗度係数の相関を図-2 に示す。この結果からも明らかなように、IBPM コンクリート製ヒューム管の回帰直線は、塩化ビニール管の回帰直線に近い。この結果から、レイノルズ数が概ね $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ の範囲における IBPM コンクリート製ヒューム管の粗度係数は、塩化ビニール管の粗度係数である $n=0.009$ とほぼ同等であると考えられる。

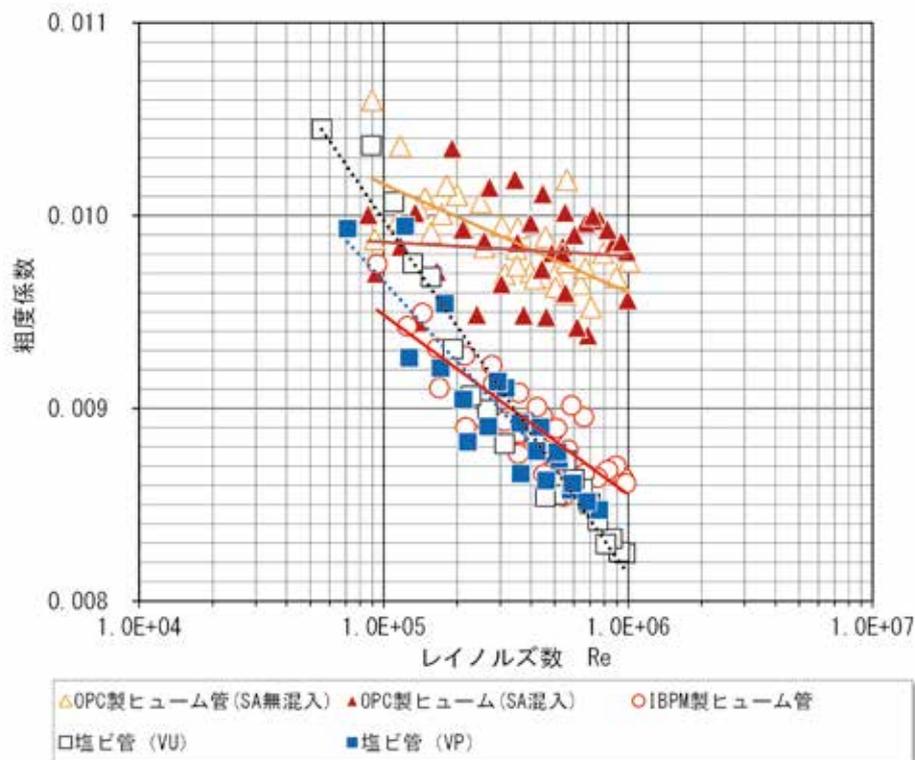


図-2 各種下水道管のレイノルズ数と粗度係数の関係

4. 考察

IBPM コンクリート製ヒューム管に使用されている FA は、非晶質の二酸化けい素を主成分とする球状の微粒子である。これに加えて IBPM コンクリートには、粒径が $1\mu\text{m}$ 以下で球状の超微粒子 ($200,000\text{ cm}^2/\text{g}$ 程度の比表面積) である SF も使用している。このため、遠心成形によってこれらの密度の軽い微粒子が管の内面に集積され、IBPM コンクリート製ヒューム管の内面にはガラス質で滑らかな表面テクスチャーが形成されたものと推察する²⁾。これらのことによって、IBPM コンクリート製ヒューム管の粗度係数がヒューム管と比較して小さくなり、流下性能の向上に繋がったもの考えられる。

5. 結論

IBPM コンクリート製ヒューム管は、セメントコンクリート製のヒューム管よりも優れた流下性能を有しており、水理実験では塩化ビニール管の粗度係数 ($n=0.009$) とほぼ同等な値が得られた。

参考文献

- 1) 畑実、杉本克美、林悦朗、宮沢伸吾：高耐久性硬化体の諸性状と下水道管への適用に向けた基礎的研究、Cement Science and Concrete Technology. Vol. 74. pp420-427. 2021. 3
- 2) 米澤敏男、柳橋邦生、池尾陽作、朝倉悦朗：高強度コンクリート中でのシリカフェュームの分散状態の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 1, pp. 69-74. 1993. 6