

CS モルタル工法(水路補修改修工法研究会)

粗度係数測定結果報告書

平成 28 年 7 月

高知大学 教育研究部 自然科学系

農学部門 流域水工学研究室

准教授 佐藤 周之



目 次

1. 実験の目的	1
2. 実施場所	1
3. 試験体の概要	1
4. 実験の手順	
4.1 通水試験の方法	2
4.2 水理条件の設定	3
4.3 粗度係数の算出方法	3
5. 実験の結果	
5.1 実験条件および得られた粗度係数の整理	5
5.2 試験結果に基づく本試験体の粗度係数の推定	7
6. 結論	7
7. 参考（試験条件の妥当性について）	8
8. 付録（各種材料の粗度係数の設計標準値）	9
写真	10

1. 実験の目的

本実験では、CS モルタル工法（水路補修改修工法研究会）を施工した実験水路において通水試験を行い、Manning の粗度係数を算出することを目的とした。

2. 実施場所

高知大学農林海洋科学部 水理学実験棟

可変勾配型開水路実験装置（写真 1）



写真 1 可変勾配型開水路実験装置

3. 試験体の概要

本実験水路の断面寸法は、水路幅 920mm、水路高さ 670mm であり、延長は 20m である。本水路内に CS モルタル工法を両側壁および底板部に施工し、通水試験を実施した。CS モルタル工法施工後の実験水路の断面寸法は、水路幅 850mm、水路高さ 300mm である。施工後の実験水路内面を写真 2 に示す。



写真 2 CS モルタル工法施工後の実験水路内面

4. 実験の手順

本実験の手順を以下のフローチャートで示す．各項目の詳細については，以下に述べる．

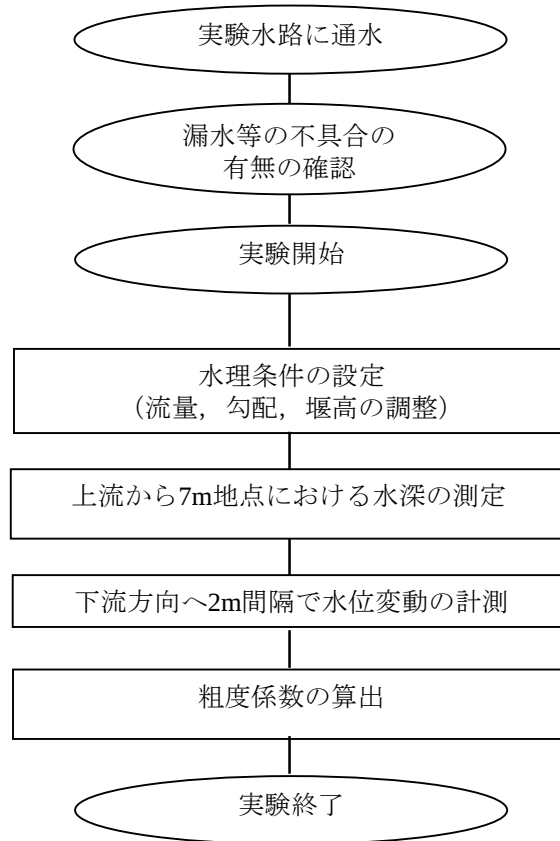


図1 実験手順のフローチャート

4.1 通水試験の方法

本実験では，通水状態の水路において水面形の追跡を行うことにより，粗度係数の推定を試みた．水面形追跡においては，まず，水深測定区間における最上流地点（上流から7m地点）の水深をポイントゲージ（株式会社 KENEK, PH-340）で測定した．続いて，高精度超音波式変位センサ（株式会社 KEYENCE, UD-500）を用いて，既知の水深からの水位変動を2m間隔で測定することで，水路内の水面形を追跡した．水位変動の計測地点は計5測点である．

超音波センサによる水位変動の測定は，1測点につきサンプリング間隔0.1秒で，30秒間のデータ収集を行った．これにより得られた300個のデータの平均値を，その測点における水深とした．測定区間は図2に示すように，上流における流入の影響と水路最下流端における堰の影響を考慮して，水路中央の8mとした．各機器の分解能はポイントゲージが0.01m，超音波センサが0.1mmである．

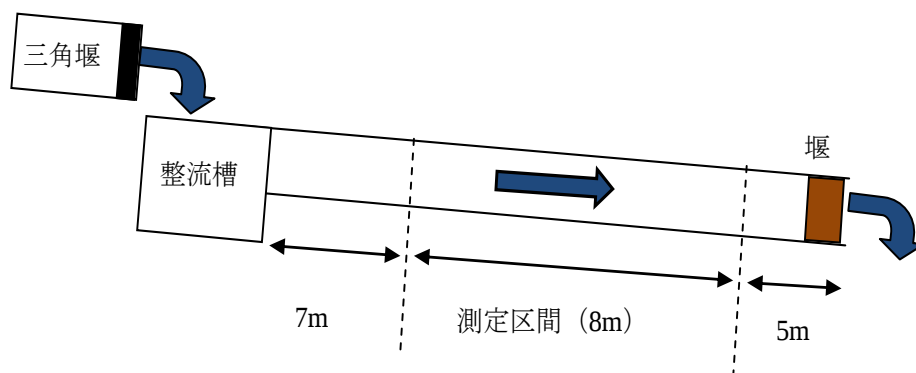


図 2 測定区間の模式図

4.2 水 理 条 件 の 設 定

本実験では、流量、勾配、水路下流端の堰高を調整することにより、様々な水理条件下における通水実験を行った。本実験施設は二種類のポンプを有しており、両者を合わせた最大流量は約 60L/s である。それぞれのポンプにおける流量は、備え付けのフロート式流量計および実験水路上流部に位置する三角堰からの越流水深を測定することにより算出する。

実験水路の勾配については、水路底部に設置されている電動ジャッキにより調整可能であり、 $0^{\circ} \sim 1.4^{\circ}$ の範囲で設定することができる。水路下流端の堰は手動引き上げ式のものである。

4.3 粗 度 係 数 の 算 出 方 法

本実験では、数値計算法により、粗度係数を算出した。本手法は、壁面の流水抵抗により生じる水面形の変化、すなわち漸変流の水面勾配から粗度係数を算出するものである。まず、開水路の流れにおいて、流下方向に関して水路の断面形状が変化しない、一様断面水路における式(1)の不等流の基礎方程式を考える。

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_b - \frac{n^2 Q^2}{\{bh/(b+2h)\}^{4/3} b^2 h^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2}{gb^2 h^3}} \quad (1)$$

ここで、 x は流下方向、 h は水深(m)、 Q は流量(m^3/s)、 α は流量係数(=1)、 g は重力加速度(m/s^2)、 b は水路幅(m)、 I_b は水路床勾配、 n は粗度係数($\text{s}/\text{m}^{1/3}$)である。本研究では、 $\Delta x=2.0\text{m}$ として、粗度係数を変化させて、Runge-Kutta-Gill 法により数値積分し、水深についての実測値 h_0 と計算値 h_c による評価関数の最も小さい粗度係数の値を、その流れにおける粗度係数とした。なお、評価関数としては、式(2)の χ 二乗誤差 E を採用した。

$$E = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{(h_{0,i} - h_{c,i})^2}{h_{0,i}} \quad (2)$$

ここで、 N はデータ数、 h_0 は測定水深(m)、 h_c は計算水深(m)、添え字の i ($i=7, 9, 11, 13, 15$) は水深の流下方向における測定地点番号である。

5. 実験の結果

5.1 実験条件および得られた粗度係数の整理

本実験で設定したすべての水理条件ならびに算出した粗度係数を以下にまとめる（表中の下線は流量ごとに区別している）．水理条件を設定するには，これまでに本実験水路で行ってきた同種の実験条件および実験結果を参考にした．具体的には，比較的フルード数の大きい領域において，ばらつきの小さく，かつ妥当と考えられる粗度係数を得ることができると確認されている．よって，本実験においても，フルード数が大きくなるような水理条件を集中的に設定した（目安： $0.5 \leq Fr$ ）．

Run No.	流量 Q (m^3/s)	勾配 I_b ($^\circ$)	堰高 (cm)	水深 h (mm)	通水断面積 A (m^2)	流速 v (m/s)	潤辺 S (m)	径深 R (m)	フルード数 $Fr (-)$	レイノルズ数 $Re (-)$	粗度係数
1	0.021	0.01	0	71.94	0.06	0.35	0.99	0.06	0.41	23404	<u>0.01230</u>
2	0.021	0.05	0	68.04	0.06	0.37	0.99	0.06	0.45	24245	<u>0.01210</u>
3	0.021	0.10	0	55.54	0.05	0.45	0.96	0.05	0.61	27552	<u>0.01090</u>
4	0.021	0.15	0	53.76	0.05	0.47	0.96	0.05	0.65	28227	<u>0.01140</u>
5	0.021	0.20	0	46.12	0.04	0.55	0.94	0.04	0.82	30941	<u>0.01210</u>
6	0.021	0.25	0	33.13	0.03	0.76	0.92	0.03	1.33	37458	<u>0.00920</u>
7	0.021	0.30	0	33.00	0.03	0.76	0.92	0.03	1.33	37496	<u>0.00900</u>
8	0.033	0.01	0	88.83	0.08	0.44	1.03	0.07	0.47	31589	<u>0.01120</u>
9	0.033	0.05	0	84.53	0.07	0.46	1.02	0.07	0.50	32647	<u>0.01120</u>
10	0.033	0.10	0	77.88	0.07	0.50	1.01	0.07	0.57	34529	<u>0.00840</u>
11	0.033	0.15	0	81.08	0.07	0.48	1.01	0.07	0.54	33714	<u>0.00800</u>
12	0.033	0.20	0	51.26	0.04	0.77	0.95	0.05	1.09	45171	=

Run No.	流量 Q (m^3/s)	勾配 ($^\circ$)	堰高 (cm)	水深 h (mm)	通水断面積 A (m^2)	流速 v (m/s)	潤辺 S (m)	径深 R (m)	フルード数 $Fr (-)$	レイノルズ数 $Re (-)$	粗度係数
13	0.033	0.25	0	46.78	0.04	0.83	0.94	0.04	1.22	47421	<u>0.00990</u>
14	0.033	0.30	0	42.61	0.04	0.91	0.94	0.04	1.40	50101	<u>0.00930</u>
15	0.041	0.01	0	99.74	0.08	0.49	1.05	0.08	0.49	36602	<u>0.01140</u>
16	0.041	0.05	0	89.00	0.08	0.54	1.03	0.07	0.58	39545	<u>0.00910</u>
17	0.041	0.10	0	90.43	0.08	0.54	1.03	0.07	0.57	39171	<u>0.01110</u>
18	0.041	0.15	0	67.01	0.06	0.73	0.98	0.06	0.92	47924	<u>0.00820</u>
19	0.041	0.20	0	56.41	0.05	0.86	0.96	0.05	1.16	53150	<u>0.01070</u>
20	0.041	0.25	0	52.02	0.04	0.93	0.95	0.05	1.31	55816	<u>0.00870</u>
21	0.041	0.30	0	51.52	0.04	0.94	0.95	0.05	1.33	56110	<u>0.00860</u>
22	0.058	0.01	0	123.16	0.10	0.55	1.10	0.10	0.50	44286	<u>0.00910</u>
23	0.058	0.05	0	114.42	0.10	0.59	1.08	0.09	0.56	46683	<u>0.01070</u>
24	0.058	0.10	0	107.63	0.09	0.63	1.07	0.09	0.62	48810	<u>0.01280</u>
25	0.058	0.15	0	82.59	0.07	0.83	1.02	0.07	0.94	58725	=
26	0.058	0.20	0	72.37	0.06	0.94	0.99	0.06	1.12	63684	=
27	0.058	0.25	0	69.22	0.06	0.98	0.99	0.06	1.19	65509	<u>0.01000</u>
28	0.058	0.30	0	62.49	0.05	1.09	0.97	0.05	1.39	69935	<u>0.00940</u>

○ No.12, 25, 26 は、水深計測時の誤差などが影響し、粗度係数が算出できなかったものである。データ数は十分と判断し、再計測はしていない。

○ レイノルズ数は、次式による。

$$Re = Rv / u \quad u : \text{動粘性係数}(\text{m}^2/\text{s})$$

5.2 試験結果に基づく本試験体の粗度係数の推定

本実験におけるすべての水理条件下で算出した粗度係数の平均値と標準偏差は以下のようになる。また、得られた粗度係数とフルード数との関係を図3に示す。

推定した粗度係数の平均値：0.0102，標準偏差：0.0014

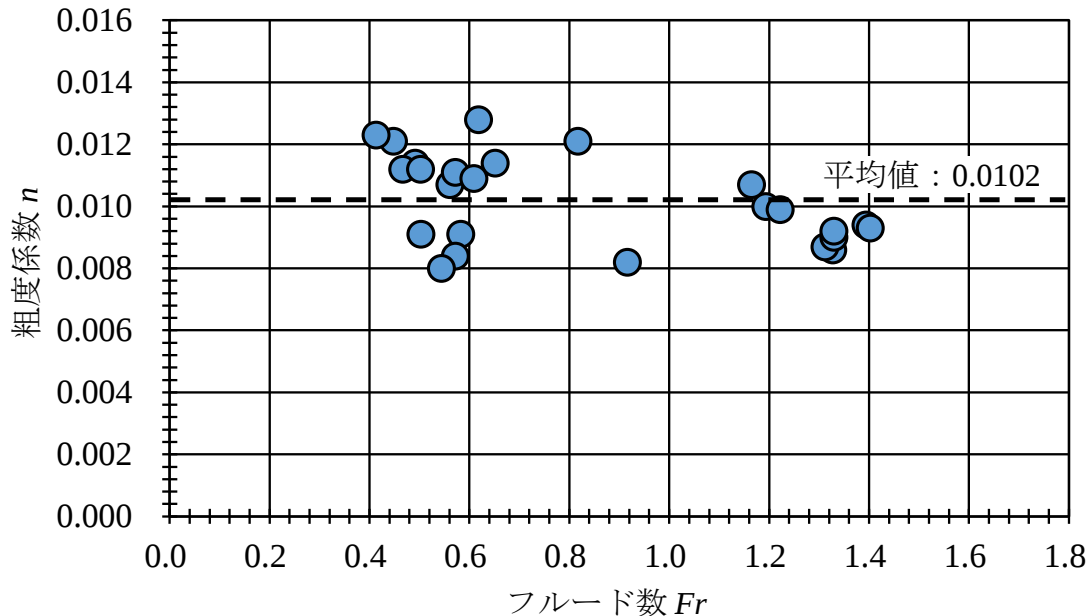


図3 粗度係数とフルード数との関係

本実験水路でこれまでに行ってきた同種の実験結果では、粗度係数はフルード数と相関関係を有し、フルード数の増加に伴い粗度係数が一定値に漸近する傾向を確認している。本実験では、フルード数が0.5以上となることを目安として水理条件を設定したところ、これまでの実績値（高知大学における実績値）に鑑みて、ばらつきの小さく、補修用モルタルの粗度係数として妥当な数値を推定できたといえる。

以上のことから、本試験体であるCSモルタル工法の粗度係数は、0.0102が妥当であると結論づけた。

6. 結論

本試験で算出したCSモルタル工法の粗度係数は以下である。

平均値：0.0102

最大値：0.0128

最小値：0.0080

標準偏差：0.0014

7. 参考（試験条件の妥当性について）

既往の文献を参考に、本試験条件の妥当性について検証する。材料の粗度係数の推定を目的とした文献のうち、粗度係数測定時の水理条件を明示しているものとして、例えば以下がある。

- (1) 摩耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手法（2008）：中矢ら，農業農村工学会論文集，76(6)，pp.23-28
- (2) 農業用水路補修材の粗度係数測定法と補修効果の予測（2007）：中矢ら，農業農村工学会全国大会講演要旨集，pp.166-167
- (3) 軟質 FRP ライニング工法による開水路の粗度係数（2008）：岡澤ら，東京農大農学集報，53(3)，pp.194-199
- (4) ポリマーセメントモルタルによるコンクリート水路の断面修復工法の通水性（2006）：渡嘉敷ら，農業農村工学会全国大会講演要旨集，pp.580-581

上記文献のうち，(2) および (3) では，本試験結果と同様に，水理条件の変化に応じて粗度係数の推定値も変化する傾向が確認できる。とくに，(3) では，文献中にフルード数と粗度係数との関係性が明示されており，フルード数を目安として適切な水理条件を設定する必要のあることを述べている。

一方，(1) と (4) の文献では，水理条件に関わらず粗度係数の推定値が一定になると報告している。ここで，本試験条件と (1) の論文に記載されている実験水路の規模および水理条件を比較すると，以下のようである。

文献 (1)

水路幅：54 cm，水路長：50 m，最大流量：約 219 L/s

本試験

水路幅：89 cm，水路長：20 m，最大流量：約 60 L/s

文献 (1) では，水路長が 50 m あり，整流区間を上流 20 m，下流 9 m 確保できている。そのため，本実験水路よりも，上流側の流入および水路下流端の堰上げの影響を低減できているといえる。また，設定可能な流量が大きいため，堰上げの影響が小さい状態で水深の大きい（流速の小さい）条件，つまりフルード数の小さい条件を設定することが可能であった。このことから，比較的低フルード数の領域においても，粗度係数の推定値が一定になったと考えられた。なお，文献 (4) については，実験水路の規模が本試験条件と大きく異なるため，ここでは比較を行っていない。

以上のことから，実験水路の規模に依存して，フルード数を初めとする各種水理条件と粗度係数の推定値との関係性は変化すると考えられ，本実験水路では，高フルード数領域において得られる粗度係数を妥当な推定値とすることが適切であるといえる。

上記については，以下の文献に整理されている。

水理模型実験による開水路の粗度係数推定方法に関する提案 (2015)：長谷川雄基，齋幸治，佐藤周之，農業農村工学会誌，83(2)，pp.35-38

8. 付 録（各 種 材 料 の 粗 度 係 数 の 設 計 標 準 値）

土地改良事業計画設計基準 設計「水路工」 基準書 技術書（2001，農林水産省農村振興局）より引用

水路の材料と状態	粗度係数		
	最小値	標準値	最大値
コンクリート（現場打ちフルーム，暗渠等）	0.012	0.015	0.016
コンクリート（吹付け）	0.016	0.019	0.023
コンクリート（既製フリーム類）	0.012	0.014	0.016
コンクリート（鉄筋コンクリート管）	0.011	0.013	0.014
コンクリートブロック積	0.014	0.016	0.017
セメント（モルタル）	0.011	0.013	0.015
石綿セメント管	0.011	0.013	0.014
鋼（ロックバー及び溶接）	0.010	0.012	0.014
鋼（リベット）	0.013	0.016	0.017
平滑な鋼表面（塗装なし）	0.011	0.012	0.014
平滑な鋼表面及び管（塗装）	0.012	0.013	0.017
波形表面（鋼板）	0.021	0.025	0.030
鋳鉄（塗装なし）	0.011	0.014	0.016
鋳鉄板及び管（塗装）	0.010	0.013	0.014
塩化ビニル管		0.012	
強化プラスチック複合管		0.012	
陶管	0.011	0.014	0.017
アースライニング		0.025	
アスファルト（滑面）		0.014	
アスファルト（粗面）		0.017	
石工（粗石練積）	0.017	0.025	0.030
石工（粗石空積）	0.023	0.032	0.035
全断面無ライニングの岩トンネル	0.030	0.035	0.040
底面だけコンクリート打設した無ライニングの岩トンネル	0.020	0.025	0.030
草生被覆（芝張）	0.030	0.040	0.050

注）石綿セメントは，現況通水能力を検証する目安として記載している。

写真

実験水路制作状況（CSモルタル左官状況）



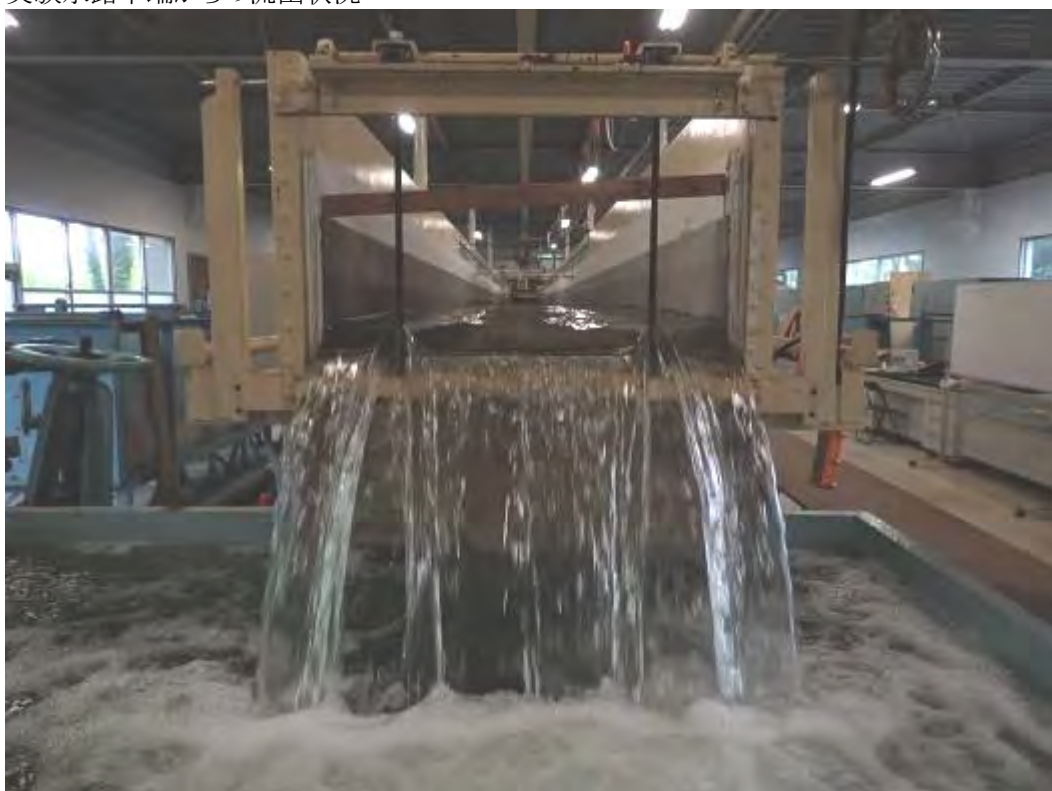
CSモルタル工法施工完了



実験水路上部の三角堰からの流入状況



実験水路下端からの流出状況



実験時の流況



ポイントゲージによる水深の測定状況



高精度超音波式変位センサによる水位変動の計測状況



水位変動のモニタリング状況

