

コンクリートの粗度係数推定に関する研究

成果報告書

平成 24 年

高知大学 教育研究部 自然科学系 農学分野

齋 幸治

目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	実験概要	4
2.1	水理実験の概要	4
2.2	粗度係数の推定方法	6
2.2.1	不等流の基礎方程式により数値的に求める方法	6
2.2.2	マンニングの平均流速公式から逆算する方法	7
2.3	水路部材の概要	8
2.4	水理条件	8
第 3 章	結果と考察	10
3.1	粗度係数の推定結果	10
3.2	粗度係数の推定方法に関する検討	14
第 4 章	おわりに	16
	引用文献	17
	付表 実験結果一覧	

調査研究報告書

第 1 章 はじめに

水路の備えるべき基礎的かつ重要な項目の一つとして、計画した水量の輸送を可能とする水理学的な機能が挙げられる。水路の通水を阻害する要因としては、土砂の堆積や水草の繁茂に伴う通水断面積の低下、水路躯体の損傷による漏水、壁面摩耗による流水抵抗の増加等が挙げられる。一方で、これらの阻害要因が通水施設としての水路の機能に対して、どの程度影響するのかについて、現在までに十分な検討がなされているとは言い難い。とくに、新規の水路壁面材料等の開発において、このような水理学的機能に関する詳細な検査が十分になされている事例は極めて少ない現状である。今後、ストックマネジメントの具体化、実現化には、既設水路の通水性能を詳細に把握した上で、適切な補修・対策を講じていく必要がある。

通水阻害要因のうち、水路壁面の摩耗に伴う流水抵抗の増加に対しては、一般に改築や表面被覆による補修等の対策がなされる。これらの効果について検討する際には、新規壁面の材料特性値としての流水抵抗を予め検討しておく必要がある。水理学の分野において、流水抵抗を表す指標として、シェジーの係数やマンングの粗度係数（以下、粗度係数）等、多くのパラメータが存在する。この中で、とくに粗度係数は農業用水路の設計のみならず、河川管理の分野に至るまで広く用いられるパラメータである。これまで、水路の通水性能の評価指標としても、慣例的に粗度係数を用いる場合が多く、設計段階では各材料によって定められた設計基準値を用いる場合が一般的である。しかしながら、既設の水路あるいは上述したように新たに開発された表面被覆材料の粗度係数に関しては、これまでに定量的に評価・検討された事例は少なく、性能の規定化までには至っていない。また、壁面の摩耗劣化

による水理性能の低下の問題に関しても，それぞれの現場において試行錯誤的に対応がなされているのが現状である．

実水路において，その通水性能を評価するにあたっては，様々な環境因子の影響を考慮しなければならない．例えば，風波や水路の蛇行，形状変化に伴うエネルギー損失，水草の繁茂による通水断面積の変化等である．竹村ら（2001）は現場における水面勾配の高精度な測定手法を導入し，粗度係数の推定を試みているが，上記の環境因子の影響を完全に排除することは実務上困難である．また，加藤ら（2008）は，壁面の凹凸パラメータとマンニング-ストリクラーの式を関連付け，粗度係数の簡易的な推定手法を提案した．しかしながら，これらの手法の現場への応用例は極めて少なく，現状では明確な現場粗度係数の推定手法の確立には至っていない．したがって，水路の粗度係数を推定する際には，現場における不確定要素を極力排除した水理実験による場合が多い．例えば，板垣（1999）は玉石張りブロックを，岡澤ら（2008）は水路の補修材として使用される軟質FRP板を実験水路に設置し通水実験を行うことで各材料の粗度係数の推定を試みている．さらに，安瀬地ら（2007）は，水路内の植生群が粗度係数に与える影響について上記と同様の通水実験により検討した．

通水実験を通じた粗度係数推定においても，以下の点が課題として挙げられる．粗度係数は一般に流速，径深などといった水理条件により変化すること（農林水産省農村振興局，2001）である．上述のように通水実験による粗度係数推定試験は多くなされているものの，実験における適切な水理条件に関して，言及している事例は極めて少ない．これを受けて報告者らは，可変勾配型開水路実験装置を用いた水理実験を実施し，流況・各種水理条件が粗度係数の推定値に与える影響について定量的に検討した（Otagaki *et al.*, 2011）．その結果，壁面の摩擦抵抗を適正に表現する粗度係数を推定するための水理条件としては，流量，流速，径深その他の水理パラメータによらず，高フルード数の水理条件の下で実験を行う

ことが適切であると推測された。

本報告では，可変勾配型開水路実験装置を用いた水理実験により，材料の粗度係数推定手法について各種水理パラメータと関連付けて言及した。また，径深，表面粗さなどの異なる数種類の壁面条件下で粗度係数の推定を行うことで，粗度係数の推定における主要な留意点の抽出を試みた。以上を踏まえた上で，ポーラスコンクリート，円管（特圧管；バイコソ台付コンクリート管）の適切な粗度係数の推定値を算出した。

第 2 章 実験概要

2.1 水理実験の概要

本報告では，高知大学農学部物部キャンパスに設置されている **Fig. 1** に示すような全長 20m の可変勾配型開水路実験装置を用いた水理実験に基づき，断面平均流速・水路床勾配・流量といった水理条件を変動させて，数パターンの流況における粗度係数の推定を行った．ここで，断面平均流速は，流量および実験水路の下流端に設置された手動堰を操作することで調節した．

水面形追跡においては，まず，水深測定区間における任意の側点の水深をデジタルポイントゲージ（株式会社 KENEK 製，PH-340）で測定した．そして，超音波センサ（株式会社 KEYENCE 製，UD-500）を用いて，既知の水深からの水位差を流れ方向に 1m 間隔で測定することで水路内の水面形を追跡した．超音波センサによる水位差の測定は，1 測点につきサンプリング間隔 0.1 秒で，30 秒間の水位変動のデータ収集を行った．これにより得られた 300 個のデータの時間平均値を，その測点における水位差とした．測定区間は **Fig. 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



Fig. 1 実験水路の外観

セキの影響を考慮して、水路中央の 10m とし、各測点における水深は、水路横断方向の 3 測点における値の平均値とした。なお、各機器の分解能はポイントゲージが 0.01mm，超音波センサが 0.1mm である。

既往の研究では、水理実験にて粗度係数を推定する際、水面形追跡にポイントゲージのみを使用する例が多く見られる（板垣，1999；岡澤ら，2008）。しかしながら、高流速場の流れにおいては、1 測点における水位の変動が数 mm に及ぶ状況がしばしば見られる。一例として、コンクリートベンチフリュームを設置したフルード数 0.71 の流れ場における任意の一測点での水位の経時変動を Fig. 3 に示す。同図より、0.1 秒スケールで水位は大きく変動していることが分かる。したがって、ポイントゲージを用いた手法では、読み取り誤差の

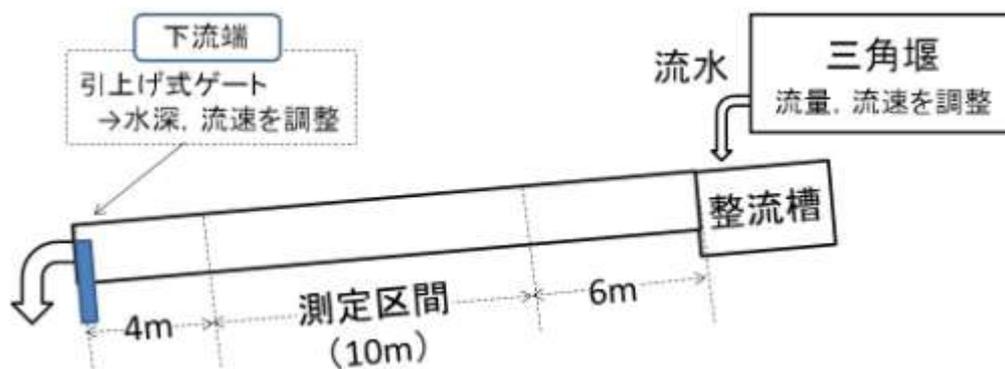


Fig. 2 実験水路と水深測定区間の概要

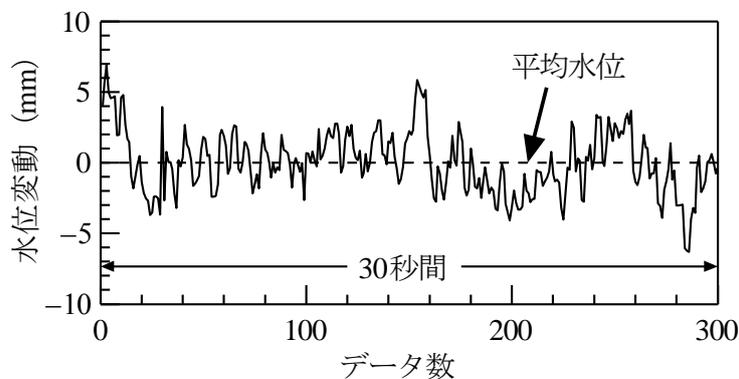


Fig. 3 高流速場における水位変動の一例

発生が大いに考えられる。そこで，本実験では読み取り誤差を極力排除し，平均水深を測定できる手法として，超音波センサを採用した。

2.2 粗度係数の推定方法

2.2.1 不等流の基礎方程式より数値的に求める方法

有限長である開水路装置を用いた通水実験において，完全な等流状態を設定することは極めて困難である。そこで，本手法では，水路内の不等流流れにおいて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推定する。ここでは，前節の水面形追跡の結果を基に，粗度係数の推定を行った。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次式の漸変流の基礎方程式を採用する。

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

ここに， x ；流下方向， h ；水深（m）， Q ；流量（ m^3/s ）， α ；流量係数（=1）， g ；重力加速度（ m/s^2 ）， b ；水路幅（m）， I_b ；水路床勾配， n ；粗度係数（ $\text{s}/\text{m}^{1/3}$ ）である。本研究では， $\Delta x=1.0\text{m}$ とし，粗度係数を変化させてルンゲ-クッタ-ギル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，評価関数については試行錯誤的に検討した上で，実測値 h_0 と計算値 h_c との誤差が小さく最も安定した解が得られた次式の χ^2 乗値を採用した。

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

ここで， N ；データ数， h_0 ；測定水深（m）， h_c ；計算水深（m），添え字 i （ $=1\sim 10$ ）；水深の流下方向における測定地点番号である。

2.2.2 マニングの平均流速公式から逆算する方法

粗度係数を推定するにあたり，もっとも簡便な方法は，等流状態において以下のマニングの平均流速公式から逆算する方法である。

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2} \quad (3)$$

ここに， v ；断面平均流速（m/s）， R ；径深（m）， I ；エネルギー勾配である。ただし，実験において完全な定常等流を得るのはほぼ不可能である。しかしながら，いずれの流況においても便宜的に流れを等流と見なし，エネルギー勾配を求めることによって，マニングの平均流速公式より，簡易的に粗度係数を算定することができる。この手法は，その簡易さから実務上多く適用されている（岡澤ら，2008；中矢ら，2008）。本報告においても，実用性ならびに精度の検証のために，同手法による推定も併せて行った。ここで，径深は水深の測定区間における平均径深を用いた。また，エネルギー勾配 I の算定には次式を用いた。

$$I = I_w + F_r^2 (I_0 - I_w) \quad (4)$$

$$F_r = \frac{v_{ave}}{\sqrt{gh_{ave}}} \quad (5)$$

ここに， I_w ；水面勾配， I_0 ；水路床勾配， F_r ；フルード数， v_{ave} ；水路内平均流速（m/s）， h_{ave} ；水路内平均水深（m）である。水面勾配を算出する際には，水路の水深測定区間における最上流点と最下流点の2点のみの水深データを用いた。

2.3 水路部材の概要

本報告では，径深，表面粗さ等の異なる部材について通水を行うことで，それぞれの粗度係数の推定を行った．粗度係数の推定を行った部材は以下の通りである．

- (1) コンクリートベンチフリューム既製品（以下，BF）
- (2) ポーラスコンクリート（以下，PC）
- (3) 特圧管；バイコン台付コンクリート管（以下，バイコン台付管）

PCは，使用粗骨材6号砕石（砕石サイズ5～13mm），空隙率18.0%とした．各部材を水路に設置した状態の水路幅は，BFで0.60mである．バイコン台付管については，内径0.3mのものを実験に供した．これら3種類の部材に加えて，実験水路自体（ポリウレタン塗装，一部アクリル）の粗度係数も推定した．実験水路の水路幅は0.90mである．

2.4 水理条件

水路における流れの安定性に関して，流量を同じとした時の限界流速の2/3程度以下の流速であれば，安定した水面が期待できるとされている（農林水産省農村振興局，2001）．したがって，用水路の設計にあたっては，流量を同じとした時の限界流速の2/3程度以下に計画されるのが一般的である．本実験では，水理実験時の流況について，流れの安定性を考慮して，一般的な農業用開水路の流れの状態に近いフルード数0.1～0.7程度となるように設定した．本研究に係る水理実

Table 1 各材料における水理条件の概要

部材	流量 (m^3/s)	水路床勾配	平均水深 (m)	断面平均流速 (m/s)	径深 (m)	フルード数	レイノルズ数
実験水路	0.004～ 0.022	0～1/191	0.033～ 0.223	0.080～ 0.361	0.031～ 0.150	0.05～ 0.45	3516～ 19091
BF	0.004～ 0.022	0～1/191	0.042～ 0.247	0.111～ 0.566	0.038～ 0.135	0.07～ 0.75	5800～ 42249
PC	0.016	0～1/191	0.057～ 0.226	0.097～ 0.395	0.049～ 0.141	0.07～ 0.54	11690～ 16274
バイコン台付管	0.004～ 0.018	0～1/191	-	0.118～ 0.726	0.311～ 0.461	0.129～ 0.823	6776～ 42630

験における各部材の水理条件を **Table 1** まとめる．なお，**PC** については，単一の流量条件 ($0.016\text{m}^3/\text{s}$) の下で，水路床勾配，水深，流量を変化させている．

第 3 章 結果と考察

3.1 粗度係数の推定結果

各部材において推定した粗度係数と，各種水理パラメータとの関係を検討した．推定粗度係数と断面平均流速との関係を **Fig. 4** に，推定粗度係数を径深との関係を **Fig. 5** に示す．また，両図中には各部材における現行の設計基準値の範囲を破線で示してある．設計基準値の範囲は，計画設計基準「水路工」（農林水産省農村振興局，2001）に記載されている設計基準値を参考にして，ベンチフリュームで $0.012 \sim 0.016$ とした．実験水路ならびにポーラスコンクリートは，同「水路工」に設計基準値が記載されていないが，実験水路については平滑な鋼表面（塗装）と見なし， $n=0.012 \sim 0.017$ を基準値の範囲とした．

Fig. 4 より，同一の流量条件下においては，断面平均流速の増加に伴い，粗度係数が減少する傾向が確認できた．とくに，実験水路，BF，PC における流量 $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$ の流況では，見かけ上一定の相関関係を持っているように見受けられる．ただし，一定流量条件下において流速を変化させる場合，本実験では水路床勾配ならびに下流端のゲート高を変化させることで流速を変化させている．そのため，流速の変化に従属して径深等の水理量も変化するため，単回帰的に粗度係数と流速の関係性を検討することはできない．一方で，流量の異なる条件においては，例えば実験水路における流速 0.13 m/s や BF における流速 0.15 m/s 付近の実験条件などをみても分かるように，同程度の流速場であっても異なる粗度係数の値が推定された．

Fig. 5 より，同一の流量条件下では，径深の増加に伴い推定粗度係数も増加する傾向が見られた．しかしながら，流速の場合と同様に，流量が異なる条件下において，例えば径深 $R=0.03 \sim 0.06 \text{ m}$ の領域では，同一の径深を持つ流れ場において異なる粗度係数の値が推定された．以上より，粗度係数と

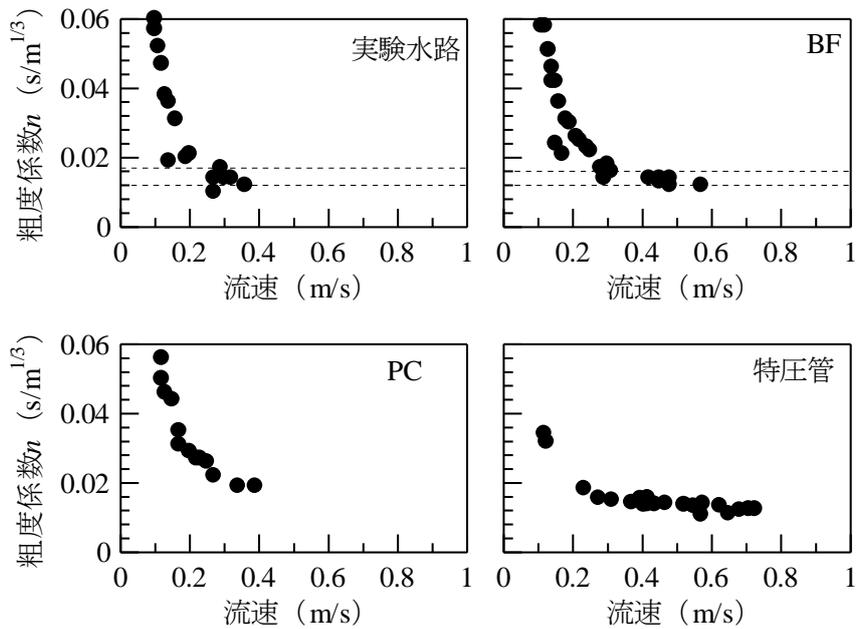


Fig. 4 推定粗度係数と流速との関係

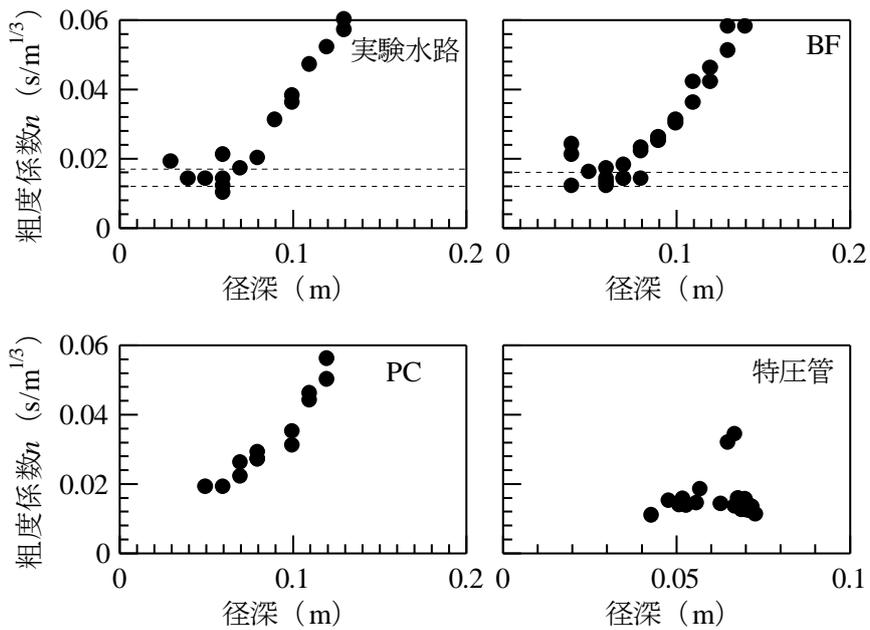


Fig. 5 推定粗度係数と径深との関係

流速・径深との間には直接的な関係性は見いだせず，流速あるいは径深のみを基準として粗度係数の推定の際の水理条件を設定をすることは困難であることが確認された。

流れの力学的な相似性も考慮に入れた検討を行うため，無次元水理パラメータであるレイノルズ数 Re およびフルード

数 F_r と粗度係数との関係について検討した。レイノルズ数は、次式で定義した。

$$Re = \frac{Rv_{ave}}{\nu} \quad (6)$$

ここに、 ν ；動粘性係数 (m^2/s) であり、実験時の水温を測定することにより求めた。粗度係数とレイノルズ数との関係を **Fig. 6** に示す。レイノルズ数と粗度係数との関係についても、上述の流速・径深の場合と同様に、直接的な関係性が見られなかった。つぎに、粗度係数とフルード数との関係を **Fig. 7** に示す。推定された粗度係数は水路の壁面状態や流速、径深、レイノルズ数といった水理条件の変動に関わらず、フルード数と極めて高い負の相関関係を持つことが窺われた。累乗近似した場合、相関係数は実験水路で 0.98、BF で 0.98、PC で 0.97 であり、全ての材料において相関性が非常に高く、有意水準 5% で有意な関係性が確認された。また、フルード数が 0.35 以上の領域においては、粗度係数は一定値に収束する傾向を示した。とくに、収束した粗度係数は、各部材における

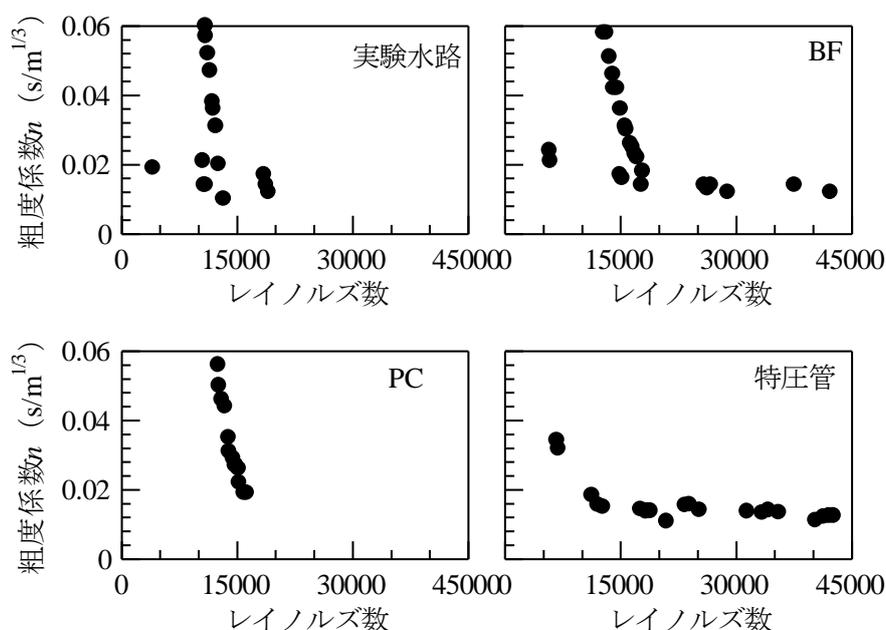


Fig. 6 推定粗度係数とレイノルズ数との関係

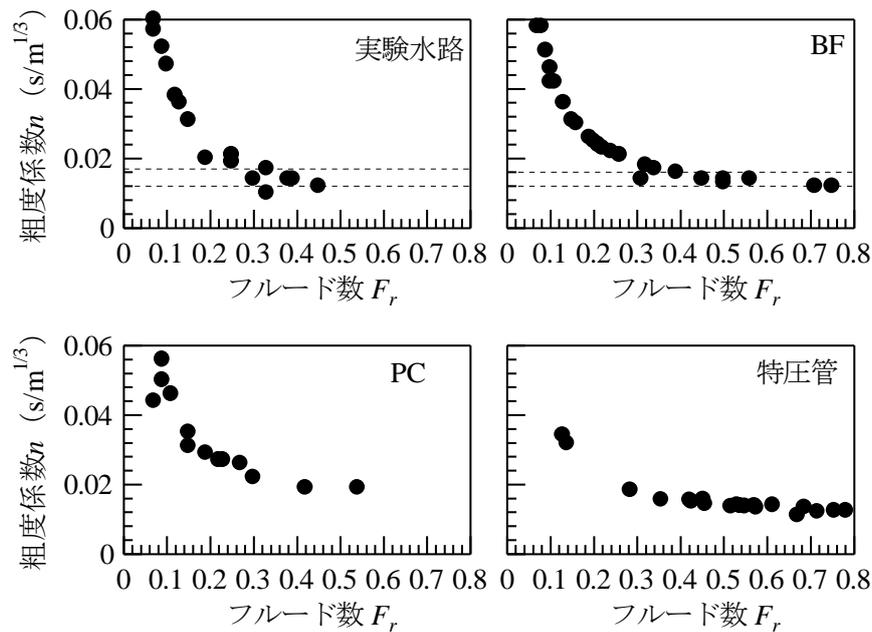


Fig. 7 推定粗度係数とフルード数との関係

現行の設計基準値の範囲内に収まる傾向を示した．フルード数とは，流速と長波の伝播速度との比である．したがって， $F_r > 1$ の流れ場では，下流で発生した水面変動は上流には伝達しない．すなわち，フルード数が高くなるほど，下流の影響を受けにくくなる．したがって，水路下流における形状変化の影響を受けにくい高フルード数の実験条件では，壁面の摩擦に起因する漸変流が水面形の主たる支配要因となる．一方で，低フルード数の実験条件においては，水路下流端の形状変化による背水・低下背水の影響が水面形測定区間にまで及んだと考えられる．式(1)は，壁面の粗度に起因する摩擦による水面勾配を表すものであり，水路の形状変化に伴う水面形の変動は考慮されない．そのため，高フルード数の条件下において推定された粗度係数は，壁面による流水抵抗の影響を良好に反映した値であると考えられる．以上より，粗度係数を推定する際に最も考慮すべき水理パラメータはフルード数であり，その値を 0.35 以上に設定することが適切と考えられた．

以上を踏まえた上で、本実験に供したポーラスコンクリート(使用粗骨材6号碎石(碎石サイズ5~13mm),空隙率18.0%)およびバイコン台付管(内径0.3m)の粗度係数について推定すると、ポーラスコンクリートで0.019,バイコン台付管で0.013であった(フルード数0.35以上の領域における平均値).

実験水路のような有限長の水路において粗度係数を推定する際、上記の様な下流端の影響を完全に排除することは困難である。また、水理実験で使用する水路の規模は多様であることから、下流端の形状変化の影響が及ぶ区間も、水路の規模により異なると考えられる。すなわち、**Fig. 1, Table 1**に示したような本実験水路程度の規模においては、 $F_r > 0.35$ の流れ場で粗度係数は一定値に収束したが、他の水路において同様の値を基準にできるとは限らない。粗度係数を推定するにあたっては、水路の規模も含めた適切な水理条件の設定を行う必要がある。なお、フルード数が0.6以上に及ぶ領域では水面変動が極端に激しくなることから、測定誤差の影響が大きくなることが懸念された。

3.2 粗度係数の推定方法に関する検討

一例として、BFにおける水理実験の結果を対象とし、上記の二通りの方法にて推定した粗度係数を比較した。数値計算にて推定した粗度係数を n 、 Manning式から逆算した粗度係数を n' とした。両方法にて推定した粗度係数を、フルード数と関連付けて **Fig. 8** に示す。同図より、両算出方法において、粗度係数の変動は同様の傾向を示した。両方法の結果を累乗近似して相関係数を比較すると、 n では0.98、 n' では0.95となり、どちらも非常に高い値となった。すなわち、Manning式からの逆算法は、用いる水深の測定データが水路の最上流と最下流の2点でよいため、簡便性に優れており、実水路において作業効率を優先する際には、有用であると考えられる。

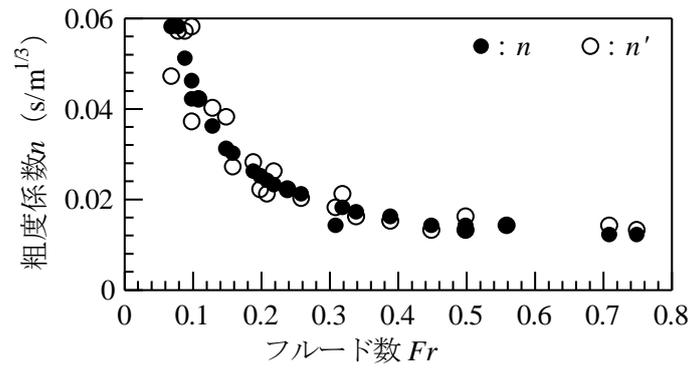


Fig. 8 n と n' との比較

一方で、近似曲線に対する標準偏差を算出したところ、 n では $0.0023s/m^{1/3}$ 、 n' では $0.0048s/m^{1/3}$ となった。したがって、 n と比較すると n' はばらつきも大きくなり、誤差が生じる可能性も考えられるため、使用にあたっては注意が必要である。

第 4 章 おわりに

本報告では，可変勾配型開水路実験装置を用いた水理実験により，粗度係数の推定の際の留意点について検討するとともに，ポーラスコンクリートおよびバイコン台付管の粗度係数の推定を行った．その結果，粗度係数は水路の形状や断面平均流速，径深，レイノルズ数の変動に関わらず，フルード数と非常に高い負の相関性を持つことが確認できた．とくに，フルード数が 0.35 以上の領域において，粗度係数は一定値に収束する傾向を示した．すなわち，水理実験にて粗度係数を推定する際に最も考慮すべき水理パラメータはフルード数であると考えられ，その値を本実験水路においては 0.35 以上に設定する必要がある．このような水理条件においてポーラスコンクリートおよびバイコン台付管の粗度係数を推定した結果，ポーラスコンクリートが 0.019，バイコン台付管が 0.013 であった．

また，計画設計基準「水路工」において，粗度係数は流速・径深等の流況により変化すると記載されている．しかしながら，通水実験において留意すべき粗度係数推定値への影響は水路末端の落水部あるいはそこに設置されているセキ・ゲートといった形状変化が主である可能性が示唆された．

本研究において，フルード数が 0.35 以上の領域では水路内を通水する水深が極端に低くなった．これは，実験水路の様な有限長の水路においては，流速ひいてはフルード数を調節するためには水路最下端のセキを操作することに頼らざるをえないためである．しかしながら，このような流況では，潤辺における底面が占める割合が極めて大きくなる．すなわち，通水に抵抗を及ぼす影響の割合は底面によるものがほとんどであり，側壁による影響は小さい状況であると考えられる．現場水路における側壁と底面の違い，例えば用いられる材料の違いや経年変化の差異等を考慮すると，底面と側壁が粗度係数に及ぼす影響についてそれぞれ検討していく必要がある

る。また、今後は更に表面粗さが異なる壁面のデータを蓄積し、表面粗さと粗度係数、通水性能の関係を定量的に評価する必要がある。

引用文献

土木学会水理委員会水理公式集改訂小委員会編（1999）：水理公式集，丸善。

Horace W. King and Ernest F. Brater (1963) : *Handbook of Hydraulics*, 5th ed., McGraw-Hill Book Co. Inc., p.7-18.

伊納昭彦（2009）：農業水利施設のスツクマネジメントの実務的な課題と対応，*水土の知*，**77**(4)，257-260.

加藤 敬，本間新哉，北村浩二，今泉眞之（2008）：開水路における壁面の凹凸から水路の粗度係数を求める試み，*農村工学研究所技報*，**207**，183-193.

農林水産省農村振興局（2001）：土地改良事業計画設計基準設計「水路工」 基準書 技術書，農業土木学会，152-207.

Otagaki Koichiro, (2011) : , 印刷中.

竹村武士，丹治 肇，蘭 嘉宜（2001）：開水路の現場粗度係数の推定方法の検討，*農業土木学会誌*，**69**(5)，25-28.

竹沢良治，毛利正志（2009）：コンクリート水路の劣化予測手法の実用化，*水土の知*，**77**(4)，265-268.

樽屋啓之，三春浩一（2009）：用水路系における水理・水利用機能診断のチェックポイント，*水土の知*，**77**(4)，261-264.

付表

付表 1. 実験水路の粗度係数推定結果および水理実験条件

付表 2. コンクリートベンチフリュームの粗度係数推定結果および水理実験条件

付表 3. ポーラスコンクリートの粗度係数推定結果および水理実験条件

付表 4. バイコン台付コンクリート管の粗度係数推定結果および水理実験条件

付表 1. 実験水路の粗度係数推定結果および水理実験条件

No.	流速(m/s)	流水断面積(m ²)	潤辺(m)	径深(m)	Fr(-)	Re(-)	粗度係数*
1	0.1432	0.0308	0.9869	0.0311	0.2500	4119	0.0187
2	0.2019	0.0597	1.0498	0.0569	0.2530	10589	0.0209
3	0.3040	0.0528	1.0348	0.0510	0.3040	10742	0.0143
4	0.2672	0.0451	1.0180	0.0442	0.3852	10920	0.0144
5	0.1408	0.1169	1.1742	0.0996	0.1261	11963	0.0359
6	0.0989	0.1664	1.2818	0.1298	0.0742	10958	0.0574
7	0.0804	0.2048	1.3653	0.1500	0.0544	10288	0.0764
8	0.1595	0.1033	1.1446	0.0902	0.1522	12278	0.0307
9	0.1087	0.1515	1.2494	0.1213	0.0855	11247	0.0522
10	0.0860	0.1915	1.3364	0.1433	0.0602	10511	0.0729
11	0.1859	0.0895	1.1145	0.0801	0.1921	12629	0.0204
12	0.1197	0.1381	1.2201	0.1131	0.0989	11522	0.0468
13	0.0905	0.1823	1.3163	0.1384	0.0650	10673	0.0676
14	0.2656	0.0657	1.0628	0.0614	0.3342	13291	0.0095
15	0.1344	0.1239	1.1894	0.1040	0.1180	11830	0.0379
16	0.0983	0.1684	1.2862	0.1308	0.0738	10927	0.0597
17	0.2911	0.0747	1.0823	0.0690	0.3263	18531	0.0166
18	0.3218	0.0676	1.0669	0.0633	0.3791	18800	0.0136
19	0.3615	0.0601	1.0507	0.0572	0.4514	19091	0.0120

*不等流の基礎方程式より求めた粗度係数値

付表 2. コンクリートベンチフリュームの粗度係数推定結果および水理実験条件

No.	流速(m/s)	流水断面積(m ²)	潤辺(m)	径深(m)	Fr(-)	Re(-)	粗度係数*
1	0.1458	0.0302	0.7007	0.0431	0.2074	5800	0.0238
2	0.1703	0.0259	0.6862	0.0377	0.2619	5923	0.0209
3	0.2807	0.0429	0.7431	0.0578	0.3351	14959	0.0173
4	0.3103	0.0388	0.7294	0.0532	0.3894	15239	0.0157
5	0.4801	0.0000	0.6001	0.0418	0.7496	28939	0.0117
6	0.2224	0.0741	0.8469	0.0875	0.2021	16587	0.0252
7	0.1886	0.0873	0.8910	0.0980	0.1579	15766	0.0296
8	0.1396	0.1179	0.9931	0.1187	0.1006	14145	0.0422
9	0.1113	0.1479	1.0930	0.1353	0.0716	12852	0.0576
10	0.2525	0.0653	0.8175	0.0798	0.2446	17183	0.0224
11	0.2101	0.0784	0.8614	0.0910	0.1856	16309	0.0258
12	0.1513	0.1089	0.9629	0.1131	0.1134	14589	0.0423
13	0.1181	0.1394	1.0646	0.1309	0.0783	13195	0.0575
14	0.2995	0.0554	0.7847	0.0705	0.3168	17908	0.0184
15	0.2368	0.0699	0.8330	0.0838	0.2225	16871	0.0232
16	0.1644	0.1004	0.9347	0.1074	0.1286	15033	0.0356
17	0.1266	0.1303	1.0343	0.1259	0.0868	13585	0.0512
18	0.2931	0.0577	0.7922	0.0725	0.3089	17757	0.0137
19	0.1844	0.0900	0.9000	0.0998	0.1532	15622	0.0306
20	0.1373	0.1204	1.0014	0.1201	0.0983	14038	0.0464
21	0.4492	0.0000	0.6001	0.0807	0.5050	37587	0.0143
22	0.4152	0.0524	0.7745	0.0676	0.4488	25895	0.0136
23	0.4831	0.0450	0.7500	0.0600	0.5632	26742	0.0140
24	0.4457	0.0488	0.7626	0.0640	0.4990	26301	0.0126
25	0.5656	0.0000	0.6001	0.0641	0.7135	42249	0.0120

*不等流の基礎方程式より求めた粗度係数値

付表 3. ポーラスコンクリートの粗度係数推定結果および水理実験条件

No.	流速(m/s)	流水断面積(m ²)	潤辺(m)	径深(m)	Fr(-)	Re(-)	粗度係数*
1	0.2177	0.0757	0.9518	0.0795	0.2190	14759	0.0270
2	0.1723	0.0956	1.0048	0.0951	0.1542	13980	0.0313
3	0.1225	0.1344	1.1084	0.1213	0.0924	12673	0.0498
4	0.0972	0.1694	1.2016	0.1409	0.0653	11690	0.0679
5	0.2530	0.0651	0.9236	0.0705	0.2742	15209	0.0256
6	0.2009	0.0820	0.9687	0.0847	0.1941	14501	0.0293
7	0.1346	0.1223	1.0762	0.1137	0.1065	13053	0.0456
8	0.1032	0.1596	1.1755	0.1357	0.0715	11950	0.0680
9	0.3362	0.0494	0.8818	0.0560	0.4214	15934	0.0188
10	0.2273	0.0729	0.9445	0.0771	0.2341	14877	0.0267
11	0.1503	0.1099	1.0430	0.1053	0.0739	13471	0.0443
12	0.1120	0.1472	1.1426	0.1288	0.0809	12297	0.0633
13	0.3948	0.0425	0.8635	0.0492	0.5384	16274	0.0188
14	0.2670	0.0633	0.9187	0.0686	0.3003	15303	0.0216
15	0.1710	0.0974	1.0097	0.0962	0.1530	13923	0.0346
16	0.1197	0.1383	1.1188	0.1235	0.0894	12563	0.0561

*不等流の基礎方程式より求めた粗度係数値

付表4. バイコン台付コンクリート管の粗度係数推定結果および水理実験条件

No.	流速(m/s)	流水断面積(m ²)	潤辺(m)	径深(m)	Fr(-)	Re(-)	粗度係数*
1	0.5210	0.0320	0.4470	0.0710	0.5490	31460	0.0144
2	0.4160	0.0290	0.4290	0.0680	0.4530	23979	0.0157
3	0.4670	0.0260	0.4070	0.0630	0.5310	25274	0.0131
4	0.3950	0.0310	0.4390	0.0700	0.4220	23409	0.0149
5	0.2740	0.0180	0.3500	0.0520	0.3560	12111	0.0147
6	0.3130	0.0160	0.3340	0.0480	0.4260	12743	0.0132
7	0.2330	0.0210	0.3740	0.0570	0.2850	11328	0.0156
8	0.5480	0.0330	0.4530	0.0720	0.5750	33424	0.0135
9	0.5750	0.0310	0.4420	0.0700	0.6130	34209	0.0144
10	0.6240	0.0280	0.4250	0.0670	0.6860	35564	0.0130
11	0.5700	0.0130	0.3110	0.0430	0.8230	21023	0.0104
12	0.4360	0.0180	0.3460	0.0510	0.5710	18897	0.0131
13	0.4050	0.0190	0.3560	0.0530	0.5170	18338	0.0139
14	0.3700	0.0210	0.3710	0.0560	0.4570	17650	0.0143
15	0.4160	0.0190	0.3540	0.0530	0.5380	18492	0.0143
17	0.6490	0.0340	0.4610	0.0730	0.6700	40342	0.0100
18	0.6810	0.0320	0.4490	0.0710	0.7160	41362	0.0119
19	0.7260	0.0300	0.4350	0.0690	0.7820	42630	0.0121
20	0.7080	0.0310	0.4410	0.0700	0.7550	42119	0.0125

*不等流の基礎方程式より求めた粗度係数値