

# 軟質 FRP ライニング工法による 開水路の粗度係数

岡澤 宏\*・竹内 康\*・増野途斗\*\*・牧 恒雄\*

(平成 20 年 2 月 28 日受付/平成 20 年 7 月 17 日受理)

要約：老朽化水路の補修に用いる軟質 FRP ライニング板を実験用開水路に設置し、粗度係数の測定を行った。その結果、補修水路の粗度係数は 0.0094 であり、新設コンクリート水路に勝る通水機能を有することが明らかになった。また、粗度係数は、流速、径深との関係よりも、動水勾配との相関が最も大きかったことから、勾配の変化に対して粗度係数も変化することが示された。一方、流量の指標であるレイノルズ数と粗度係数の関係を検討したところ、レイノルズ数の増加に伴って粗度係数の変動が大きくなる傾向を示した。以上のことから、粗度係数は、流況や現場の地形要素に影響を受けて変化することから、補修板による水路補修を考える場合、これらの指標をふまえて適切な粗度係数を適用する必要がある。

キーワード：開水路, 補修板, 粗度係数, 動水勾配, レイノルズ数

## 1. はじめに

農業用排水路は、施工後、数十年を経過すると使用材料のひび割れや表面部分の摩耗・劣化により粗度が増加し、通水性が低下する。最近、このように老朽化した水路の補修方法には、既存の水路壁面に樹脂製、またはコンクリート製のパネルを貼付するパネル取り付け工法や、樹脂性塗料を塗布する塗装工法などの補修工法が用いられている<sup>1)</sup>。このような補修工法は従来の水利施設を再利用できるため、経済的に安価であり、工事の簡素化が可能となるが、中小規模の農業用水路に関する施工実績は少ない<sup>2,3)</sup>。また、補修された水路の通水性が改善することは、場合によっては許容最大流速を上回る通水性を生じさせることも考えられ、従来の用水計画に支障が生じる危険性も指摘されている<sup>3)</sup>。そのため、農業用水路において、補修後に想定される通水性を正確に把握する必要がある。

本報告では、施工期間が短く、改修も比較的簡便にできる FRP (Fiber Reinforced Plastics: 繊維強化プラスチック) を補修板に用いたライニング工法について、開水路実験により通水性能を検討した。なお、通水性の指標には、式(1)に示す Manning 式の粗度係数 ( $n$ ) を用いた。

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

但し、 $n$  は粗度係数 (–),  $V_m$  は平均流速 (m/s),  $R$  は径深 (m),  $I$  は動水勾配 (–) である。式(1)に示すように、粗度係数は、材質が同じ補修板であっても流速、径深や動水勾配によって変化する。また、流量や河床勾配によって

も粗度係数が増加することが本報告で使用する同型の水路による実験結果から明らかになっている<sup>4,5)</sup>。このことから、改修が必要となる水路の水路床勾配や流量は現場によって異なり粗度係数も変化することから、改修後の流量や流速を把握するには、これらの要因を考慮した粗度係数を設定する必要がある。そこで、本報告では現場の状況によって変化する水理学的な諸要因、なかでも勾配の指標として動水勾配、流速と径深の関数であるレイノルズ数を流量の指標に用いて、軟質 FRP ライニング水路の粗度係数との関係を検討した。

## 2. 実験方法

### (1) 軟質 FRP 板の諸元

開水路実験は、軟質 FRP ライニング工法が施された補修板 (エアタイト J-1 工法, 大泰化工株式会社製) を実験用の開水路に設置して行った。補修板は、ガラス繊維マットに樹脂を含浸させ、約 2 mm 厚の防水・防食層をつくるもので、樹脂だけでは厚さや強度が維持できないことから FRP で補強している。特徴としては、FRP 特有の軽量で高い強度を長期間に渡って保持できること、改修コストが低く押さえられること、施工後の硬化が早く、作業が迅速に進められることなどが挙げられる。

通水性に影響を及ぼす補修板表面の粗度高 ( $k$ ) を表 1 に示す。なお、粗度高の測定には分解能 0.01 mm のデジタルポイントゲージ (PH-355, KENEK) を使用した。測定方法は、縦 0.10 m, 横 0.10 m の補修板に 0.02 m 間隔で格子状に測定点を設け、1 点につき 3 回粗度高の測定を行った。そして、最小値を粗度高 0 mm として表 1 に示す諸元を得た。なお、粗度高の測定は室温 24°C の条件下で行った。測定の結果、

\* 東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科

\*\* 元東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科

表 1 補修板表面の粗度高 (mm)

平均値	0.16
標準偏差	0.07
最大値	0.31
最小値	0.00

粗度高の平均値は 0.16 mm, 標準偏差が 0.07 mm であり, この値は, なめらかで新しいコンクリートの粗度高に相当<sup>6)</sup> することが明らかになった。

(2) 実験用開水路の概要

実験用開水路の概要を図 1 に示す。水路の全長は 12 m である。この区間に側壁と水路床に長さ ( $L_b$ ) 0.90 m の補修板を連続して設置した。なお, 水路流入地点 ( $P_0$ ) の手前には, 流水の乱れを緩和するための減勢板が取り付けられており, これにより流れがある程度安定した状態で水路へ通水することが出来る。また, 補修板は図 2 に示すように, 底面の補修板と角材によって側壁の補修板にたわみが生じないように設置した。底面の補修板については, 強力な両面テープにより水路床と補修板を接着し, たわみの発生を防いだ。水路断面は矩形であり, 水路幅 ( $B$ ) は 0.285 m, 水路高 ( $H$ ) は 0.350 m であった。なお, 実際の施工では, 補修板の膨張・収縮を考慮して補修板と補修板の間に数 mm の目地を設けるが, 本実験では目地を設けていない。目地の有無と粗度係数との関係は, 今後の検討課題とする。

試験区間内 ( $P_1 \sim P_4$ ) に 4 台のポイントゲージを設置し, 各地点で水深を測定した。ポイントゲージの設置箇所は, 水路の始点である  $P_0$  から  $P_1$  までが 2.070 m であり,  $P_1$  から各ポイントゲージまでの距離が各々 1.840 m ( $P_2$ ), 3.625 m ( $P_3$ ), 7.269 m ( $P_4$ ) である。

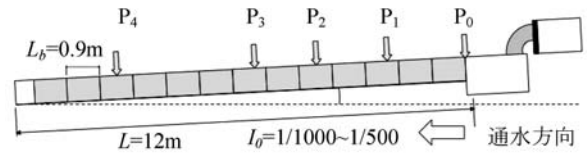
開水路実験は, 流量 ( $Q$ ) を  $6.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.4 \text{ m}^3/\text{min}$ ),  $10.00 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.6 \text{ m}^3/\text{min}$ ),  $13.33 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $0.8 \text{ m}^3/\text{min}$ ),  $16.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  ( $1.0 \text{ m}^3/\text{min}$ ) の 4 段階, 水路床勾配 ( $I_0$ ) を 1/1000, 1/833, 1/625, 1/500 の 4 段階に変化させ, 全 16 通りのデータを得た。

レイノルズ数 ( $Re$ ) の算出式を式 (2) に, 水路実験の設定条件と対応するレイノルズ数 ( $Re$ ) を表 2 に示す。

$$Re = \frac{4RV_m}{\nu} \tag{2}$$

但し,  $\nu$  は動粘性係数であり, 実験は水温 21°C の一定条件で行った。なお,  $Re$  は 68,000 ~ 158,000 の乱流状態であった。

各々の設定条件で各区間の上流端, 下流端の水深 ( $H_w, H_d$ ) を 3 回ずつ計測し, 平均流速 ( $V_m$ ), 粗度係数 ( $n$ ), 径深 ( $R$ ), レイノルズ数 ( $Re$ ), フルード数 ( $Fr$ ) を算出した。また, 上流端水深と下流端水深の差 ( $\Delta H$ ) は 0.005 m (平均値), 0.003 m (標準偏差), 水路床勾配 ( $I_0$ ) は 0.0014 (平均値), 0.0004 (標準偏差), 動水勾配 ( $I$ ) は 0.0019 (平均値), 0.0004 (標準偏差) であり,  $\Delta H$  も,  $I_0$  と  $I$  の差も非常に小さいことから, 通水実験は等流に近い状態であり, 等流と見なしても差し支えないと判断できる。しかし, 厳密に粗度係数を



測定区間

$P_0 \sim P_1$ 区間:	2.070m
$P_1 \sim P_2$ 区間:	1.840m
$P_1 \sim P_3$ 区間:	3.625m
$P_2 \sim P_3$ 区間:	1.785m
$P_2 \sim P_4$ 区間:	5.429m
$P_3 \sim P_4$ 区間:	3.644m

図 1 実験用開水路の概要

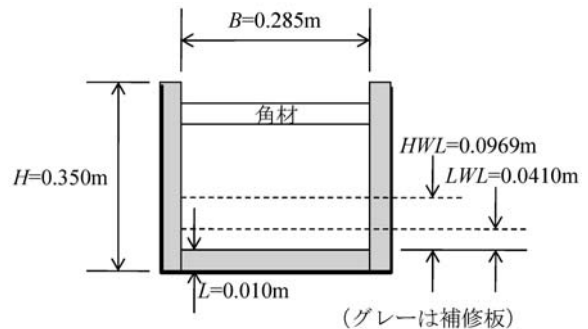


図 2 実験用水路の断面図と水深

表 2 実験条件 (流量, 水路床勾配) とレイノルズ数

流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	水路床勾配			
	1/1000	1/833	1/625	1/500
$6.67 \times 10^{-3}$	72,000	73,000	72,000	75,000
$10.00 \times 10^{-3}$	102,000	99,000	99,000	99,000
$13.33 \times 10^{-3}$	124,000	126,000	128,000	127,000
$16.67 \times 10^{-3}$	148,000	151,000	154,000	151,000

算出するため,  $I$  は不等流を想定した式 (3) により算出した<sup>7)</sup>。

$$I = I_w + Fr^2(I_0 - I_w) \tag{3}$$

但し,  $I_w$  は水面勾配であり, 実験中の  $Fr$  は 0.62 ~ 0.95 で常流であった。

3. 結果と考察

(1) 補修水路の粗度高, 層流底層厚とレイノルズ数の関係  
図 3 に, 補修板の壁面に作用する層流底層厚 ( $\delta$ ) と粗度高 ( $k$ ) の概念図を示す。

壁面から離れているところの流れが乱流の場合, 壁面付近では水の粘性が作用し, 非常に薄い層流底層が形成される。この層の厚さが層流底層厚 ( $\delta$ ) である。一般的に平均流速, レイノルズ数が増加すると層流底層厚は減少する。そして, 壁面表層の凹凸 (粗度高) が層流底層厚よりも小さければ, 水粒子の運動に壁面表層の凹凸が直接作用し, 凹凸面は水粒子の乱れを助長するため, 摩擦抵抗が増す。

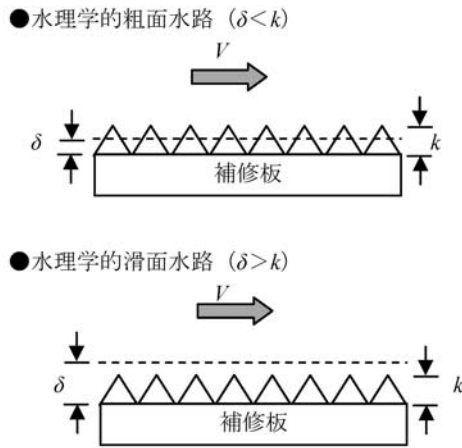


図 3 水理学的粗面水路と滑面水路の概念図

このときの水路の状態を水理学的粗面水路という<sup>8)</sup>。

一方、平均流速、レイノルズ数が小さいと層流底層が厚くなり、壁面表面の凹凸が層流底層によって覆われる。この時、水粒子の運動には、表面の凹凸は作用しないことから、流れに対して壁面の粗度は影響を及ぼさない。この時の水路状態を水理学的滑面水路という<sup>8)</sup>。すなわち、壁面上部の流れが乱流の場合、粗度高と層流底層厚の大小関係によって流れに対する粗度の影響が異なる。また、Manning 式は、乱流で水理学的粗面水路での適用を基本としている。なお、層流底層厚は(4)式と(5)式から算出した<sup>4,9)</sup>。

$$U_{r} = \sqrt{gRI} \tag{4}$$

$$\delta = \frac{5\nu}{U_{r}} \tag{5}$$

但し、 $\delta$  は層流底層厚 (mm)、 $\nu$  は動粘性係数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )、 $U_{r}$  は摩擦速度 (m/s)、 $R$  は径深 (m)、 $I$  は動水勾配 (-)、 $g$  は重力加速度 ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) である。ここでは、補修板表面の粗度高と流れによって変化する層流底層厚との関係から、水理学的粗面水路か水理学的滑面水路かの判断を行い、粗度係数の算定式である Manning の平均流速公式の適用性を検討する。

前述のように、層流底層厚はレイノルズ数 ( $Re$ ) に影響を受ける。そこで、図 4 にレイノルズ数と層流底層厚との関係を示す。また、図中には補修板表面の平均粗度高 ( $k = 0.16 \text{ mm}$ ) と標準偏差 ( $0.07 \text{ mm}$ ) を加筆した。

水路床勾配が  $1/1000$  の実験条件下では、レイノルズ数が増加すると、層流底層厚は減少する傾向がみられた。また、層流底層厚はおおむね粗度高 (標準偏差) の範囲内にあり、標準偏差の上限である  $\delta = 0.23 \text{ mm}$  を超えたのは  $Re = 72 \times 10^3$  ( $Q = 6.67 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ) の設定条件のなかの 3 点のみであった。この 3 点を除く全データは標準偏差の上限値よりも小さいことから、水理学的粗面水路の性質を有すると推察される。なかでも、水路床勾配が  $1/1000$  以外の条件では、層流底層厚が粗度高 (標準偏差) の範囲よりも小さいことから、水理学的粗面水路であると考えられる。これらのことから、今回の実験条件では、おおむね水理学

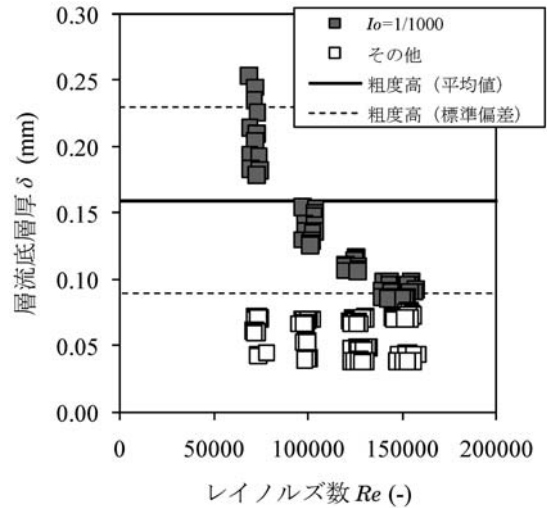


図 4 レイノルズ数と層流底層厚の関係

表 3 補修板の粗度係数 ( $n$ )

	$n$	$I$	$Fr$	$Re$
平均値	0.0094	0.0019	0.74	118,000
標準偏差	0.0008	0.0004	0.06	28,000
標準誤差	0.0001	0.00003	0.004	2,117
最大値	0.0120	0.0035	0.95	158,000
最小値	0.0082	0.0013	0.62	68,000

的粗面水路の性質を有しており、Manning 公式の適用は妥当であると判断した。

また、水路床勾配が  $1/1000$  とそれ以外とで、レイノルズ数と層流底層厚との関係に違いが現れた要因として、式(4)、(5)からも判るように、径深と動水勾配との相互作用が起因しているためと考えられる。

(2) 補修板の粗度係数

本実験で得られた全データを対象に補修板の粗度係数を算出した (表 3)。粗度係数の平均値は  $0.0094$  (標準偏差:  $0.0001$ ) であった。一般的に新設コンクリート水路の粗度係数は  $0.015$  であることから<sup>10)</sup>、補修板は新設コンクリートに勝る通水性を有すると判断した。

(3) 粗度係数と流速、径深、動水勾配の関係

軟質 FRP ライニング水路について、説明変数である平均流速 ( $V_m$ )、径深 ( $R$ )、動水勾配 ( $I$ ) と目的変数である粗度係数 ( $n$ ) との関係を図 5、6、7 に示す。なお、式(1)に示したように、粗度係数に影響を及ぼす平均流速、径深、動水勾配はそれぞれ重みが異なることから、ここでは、得られたデータをそれぞれの平均値で除して無次元化した値を用いることで、粗度係数と各目的変数との関係を検討する。

粗度係数と平均流速、粗度係数と径深との関係から得られる相関は、 $R^2 = 0.01$  以下と低かった。一方、粗度係数と動水勾配との相関は  $R^2 = 0.51$  であったことから、粗度係数に最も影響を及ぼす要因は動水勾配であり、動水勾配の増加に伴って粗度係数も増加する傾向が示された。

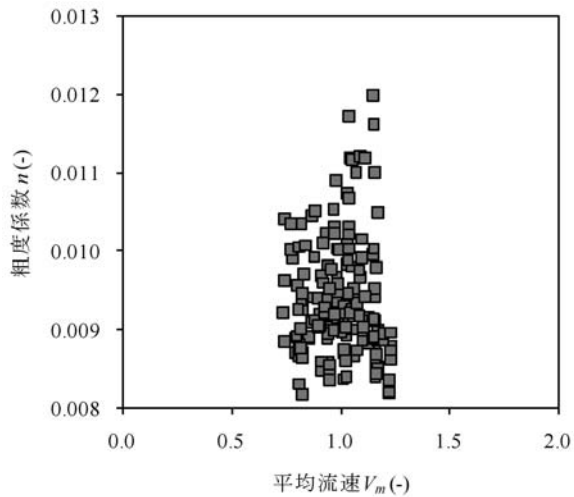


図 5 粗度係数と平均流速との関係

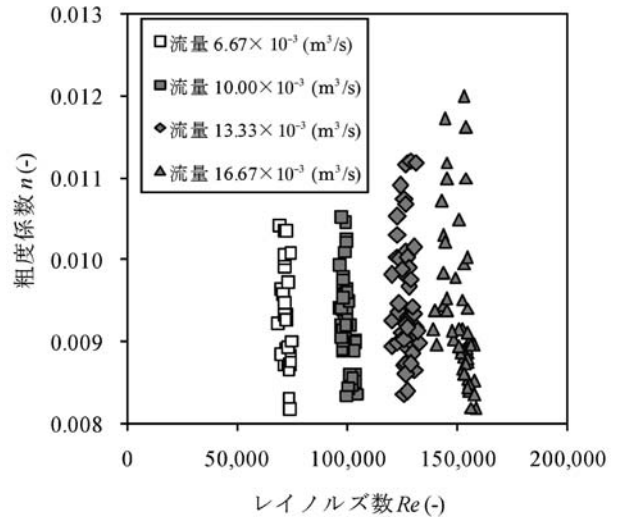


図 8 粗度係数とレイノルズ数との関係

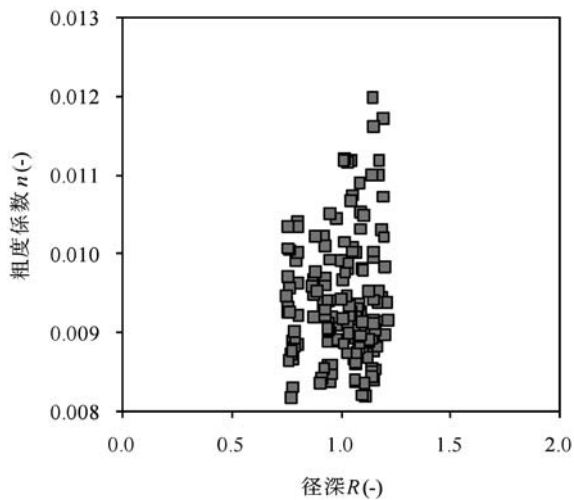


図 6 粗度係数と径深との関係

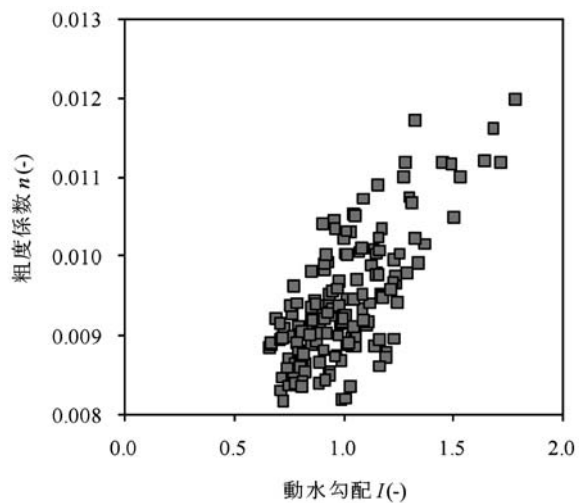


図 7 粗度係数と動水勾配との関係

(4) 粗度係数とレイノルズ数の関係

粗度係数は、流量に応じて変化すると考えられることから、次に流量と粗度係数の関係を検討する。なお、流量の代わりに無次元の単位を持つレイノルズ数を指標に用いた。式(2)から判るように、平均流速と径深が増加する、すなわち、流量が増加するとレイノルズ数も増加することから、レイノルズ数を流量の指標とした。そして、今回の実験では流量が  $0.007 \sim 0.017 \text{ m}^3/\text{s}$  と小流量であり、実際の設計流量には適さない。そのため、無次元量であるレイノルズ数を流量の指標に用いることで、実際の現場に適合する粗度係数が表現できると判断した。

図 8 に粗度係数 ( $n$ ) とレイノルズ数 ( $Re$ ) の関係を流量別に示す。レイノルズ数は各流量に対してほぼ一定の値を示した。各流量に対応するレイノルズ数の平均値は表 2 に示すとおりである。粗度係数とレイノルズ数の関係に着目すると、レイノルズ数が 72,000 (流量:  $0.007 \text{ m}^3/\text{s}$ )、100,000 (流量:  $0.010 \text{ m}^3/\text{s}$ ) の時、粗度係数は各々  $0.0082 \sim 0.0104$ 、 $0.0084 \sim 0.0105$  の範囲にある。しかし、レイノルズ数が 124,000 (流量:  $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$ ) になると、粗度係数は  $0.0084 \sim 0.0112$ 、レイノルズ数が 151,000 (流量:  $0.017 \text{ m}^3/\text{s}$ ) になると、粗度係数は  $0.0082 \sim 0.0120$  となり、レイノルズ数の増加に伴って、粗度係数の変動幅が大きくなった。これは、流量が増加するに従って水面に波が生じることから、波による測定誤差の影響も関係していると考えられる。

4. おわりに

老朽化した開水路の補修を目的とする軟質 FRP ライニング板を設置した実験用開水路において、補修板の通水性を表す粗度係数の測定を行った。得られた知見は以下の通りである。

- (1) 本実験で用いた軟質 FRP ライニング補修板の粗度係数 ( $n$ ) は、 $0.0094$  (標準偏差:  $0.0008$ ) であり、補修板は新設コンクリートに勝る通水性を有すると判断した。但し、本実験で得られた粗度係数は室内実験によるものであり、実際の現場における粗度係数の適用については留意す

る必要がある。

(2) 粗度係数と平均流速、径深、動水勾配との関係を検討したところ、粗度係数と動水勾配との関係が最も強かった。このことから、地形要因である動水勾配が粗度係数に最も影響を及ぼすと考えられる。

(3) 流量の指標にレイノルズ数を用いて、粗度係数との関係を検討した。レイノルズ数が大きくなるにつれて粗度係数の変動が大きくなる傾向がみられた。流量が大きくなるに従って水面に波が生じることから、波による測定誤差が関係していると考えられる。

謝辞：本研究は、株式会社大泰化工の関係各位、東京農業大学地域環境科学部生産環境工学科学生諸氏の協力を得て実施したものである。ここに附して謝辞を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 長束 勇, 石神暁郎, 石村英明, 渡嘉敷勝, 森 充広 2004. : コンクリート構造物の補修技術の現状と農業水利分野に適用する際の留意点, 農工研技報, 202, pp. 183-196.
- 2) 渡部昭彦 2005. : 開水路の補修・補強に係る新工法の評価, 農士誌, 73 (11), 64-65.
- 3) 下平暢樹 2007. : コンクリート水路補修工法 PR 施工, 農士誌, 75 (5), 38-39.
- 4) 増野途斗 1972. : 滑面開水路における粗度係数  $n$  と Reynolds 数の関係に関する実験的考察, 東農大農学集報, 17 (3), 255-263.
- 5) 増野途斗 1999. : 緩勾配開水路における Manning 公式の適用に関する研究, 東農大農学集報, 44 (2), 60-64.
- 6) 土木学会編, 1999. 水理公式集, 平成 11 年版, p. 374.
- 7) 土木学会編, 1971. 水理公式集, 昭和 46 年改訂版, p. 160.
- 8) 大津岩夫, 安田陽一編 2007. : 水理学, 理工図書, pp. 42-45.
- 9) 土木学会編, 1967. 水理実験指導書, 土木学会, p. 26, p. 29.
- 10) 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」, p. 57.

# Coefficient of Roughness at an Open Channel Repaired with Flexible Fiber-Reinforced Plastic Lining

By

Hiromu OKAZAWA\*, Yasushi TAKEUCHI\*, Michito MASHINO\*\* and Tsuneo MAKI\*

(Received February 28, 2008/Accepted July 17, 2008)

**Summary :** A flexible fiber-reinforced plastic lining that is used for repairing deteriorated water channel was installed in an experimental water channel to examine the effect of such repair on flow in the channel. Manning's roughness coefficient, which is an indicator of the smoothness of flow, was used in the examination. The measured roughness coefficient of the repaired channel was 0.0094, which is lower than in a newly constructed concrete channel. This shows that the water flow after such a repair is smoother than in a newly constructed concrete channel. The influence of flow velocity, channel depth and hydraulic gradient on the roughness coefficient was examined. Changes in the roughness coefficient were found to correlate most closely with changes in the hydraulic gradient, i.e., channel gradient has the greatest influence on the smoothness of the water flow. The relationship between roughness coefficient and Reynolds number (an index of discharge) was examined. The greater is the Reynolds number, the greater is the dispersion in roughness coefficient for different discharges. This shows that the roughness coefficient is influenced by topography and flow regime at repair sites. When determining the roughness coefficient for a repair site, it is necessary to consider the topography and flow regime.

**Key words :** Open channel, Repair, Coefficient of roughness, Hydraulic gradient, Reynolds number

---

\* Department of Bioproduction and Environment Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture

\*\* Former Department of Bioproduction and Environment Engineering, Faculty of Regional Environment Science, Tokyo University of Agriculture