

高空隙透水層の非定常流抵抗特性について

浦 島 三 朗*・中 村 友 邦**・近 藤 俣 郎***

Comparison of oscillatory and stationary flow through porous media

Saburo URASHIMA, Tomokuni NAKAMURA and Hideo KONDO

要 旨

振動流場における繊維状の透水材を使用した透水層の抵抗と時間的慣性項の効果を調べるために実験を行った。透水層の定常流に適用する流れ則は、合理的に取り入れられているが、非定常流の効果は一般的に無視されている。本研究は、空隙率の大きな透水層における加速度のおよぼす効果について調べようとしたものである。

振動流実験は、振動流実験装置によって1.46secから3.94secまで周期を変化させて行った。本実験では、定常流および非定常流のフォルヒハイマー則が測定値と比較的良好一致し、定常流から決定される抵抗係数は、非定常流から決定される係数より一般的に小さいことが明らかになった。

Abstract

Experiments were conducted in an oscillatory water tunnel to investigate what effects temporal inertia has on the resistance of a porous media. The flow law governing stationary porous media flow is reasonably well accepted and understood but the effects of unsteady flow have commonly been neglected. The present research was designed to assess the magnitude of the acceleration effects on porous media. There exists a considerable space in porous media against its thickness.

Oscillatory flow tests were made in a oscillatory flume tunnel with periods varying from 1.46 to 3.94 seconds. For the experiments described in this paper, the Forchheimer unsteady-stationary now law described the oscillatory measurements well. Empirical coefficients determined from steady-stationary flow were generally less than unsteady flow coefficients.

1. ま え が き

波動水槽の消波工には、消波効果が大きく占有面積が小さい直立消波構造物が望ましい。このような構造物に複数の透水層および遊水室を設けることによって、広い周波数領域の波に対して消波効果があることが確かめられている¹⁾。実験室で使用する透水層の材料には、加工などの面から空隙の大きな繊維網状の材料を用いることが多い。またこのような透水材は、消波材として消波特性が優れているのみだけでなく、材質が均一で、抵抗係数等の基本特性が把握し易く、理論的な取扱に適した素材でもある。

しかし、このような透水層の消波効果について

理論解析を行う場合、透水層の抵抗係数を知る必要がある。碎石や球体等の透水層に対する抵抗特性については、定常および非定常流について多くの研究結果が報告されている^{2), 3), 4)}。しかし、空隙率の大きな繊維網状の透水層についての研究は少なく、香取ら⁵⁾によって定常流における実験結果の報告があるが、このような材料の非定常流場における抵抗特性の研究は少ない。定常流の実験による抵抗係数を使用し、波動場における透水層の消波効果を計算すると、乱流および慣性項の影響が明らかにならず、非定常流場の抵抗係数が必要とされている¹⁾。そこで本研究では、非定常流場における空隙の大きな透水層の抵抗特性を実験的に調べようとしたものである。

2. 実験方法

本研究に用いた透水材は、合成樹脂を直径2

* 助教授 環境都市工学科

** 五洋建設株式会社

*** 教授 室蘭工業大学工学部

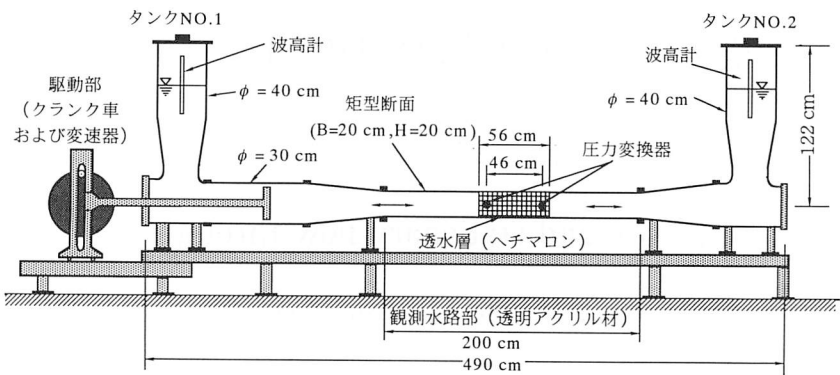


図1 振動流実験装置概要図

mm程度の繊維にしカールさせ束ねたヘチマロンを用いた。その空隙率は $\lambda = 0.9$ である。実験装置は、図1に示す振動流実験装置を使用して行った。この装置は駆動部、タンク部および水平部から構成されている。水平部中央の観測部は、長さ200cm、幅20cm、高さ20cmの矩形断面で透明アクリル材で製作されている。この観測部水路中央に透水層を設置し、その両側の圧力を圧力変換器で測定した。タンク部に取り付けた波高計の時間-水位記録から基準時間 $t = 0$ を決定し、次式から水粒子の移動距離 x 、流量流速 u および流量加速度 (du/dt) を間接的に求めた。

$$x = R \sin \sigma t \tag{1}$$

$$u = R \sigma^2 \cos \sigma t \tag{2}$$

$$\frac{du}{dt} = -R \sigma^2 \sin \sigma t \tag{3}$$

ここで、 R は水粒子の移動半径、 $\sigma = 2\pi/T$ は角周波数、 T は周期を示す。なお水位および圧力のサンプリング周波数は20Hzで行った。

実験条件は周期 $T = 1.46 \sim 3.94$ secで6種類、流量流速の振幅を19.9~114.0cm/secで3種類変化させて行った。また、定常流の実験は、管水路に透水材を詰め、透水層内で間隔 $\Delta l = 14$ cm間の水頭差 Δh を測定して行った。

3. 実験結果および考察

3. 1 定常流実験

1次元定常流では、次式のようなDupui-Forchheimer則と呼ばれる次式の関係が成り立つ。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = (\alpha + \beta u)u \tag{4}$$

ここで、 ρ は水の密度、 p は圧力、 u は流量流速、

α 、 β は層流的および乱流的抵抗係数である。上式を動水勾配 I の形で表現すると次式となる。

$$I = -\frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx} = \frac{\Delta h}{\Delta l} = \frac{u}{g} (\alpha + \beta u) \tag{5}$$

ここで、 Δh は損失水頭、 Δl は透水層の長さ、 g は重力加速度である。したがって、1次元定常流実験で流量流速と動水勾配を測定することにより、 α 、 β を決定することができる。

定常流の実験結果を図2に示す。式(5)より実験値は次式の直線で近似することができる。

$$\frac{I}{u} = \frac{1}{g} (\alpha + \beta u) = A_s + B_s u \tag{6}$$

図中の直線は、実験結果より回帰直線を求めたものである。この直線の切片 A_s と傾き B_s を求め、これらに重力加速度を乗じると $\alpha = 5.52$ (1/sec)、 $\beta = 0.53$ (1/cm)となる。図中には崎山⁶⁾による実験結果もあわせてのせているが、実験条件等により係数の値が異なり特に層流的抵抗に関する値が異なる。またヘチマロンと球および碎石の定常流実験値²⁾を表1に示す。ここで、表中のR75は径75mmの球で構成された斜方六面体の供試体、R42は径42mmの球で構成された斜方六面体

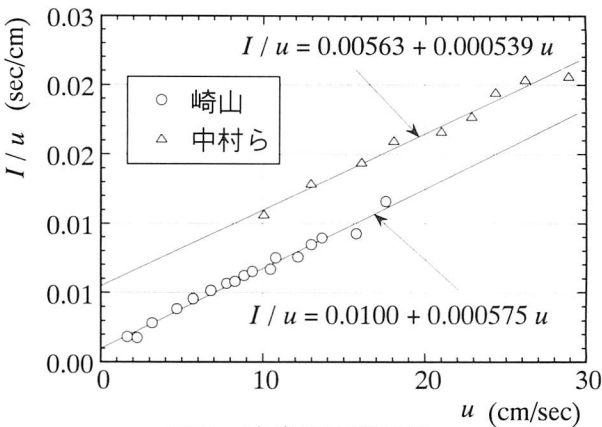


図2 定常流実験結果

表1 定常流実験による抵抗係数

実験者	中村	崎山	Kevin				
供試体	ヘチマロン		R75	R42	C75	C45	S
A_s (sec/cm)	0.00563	0.0100	0.0041	0.0043	0.0016	0.0008	0.0006
B_s (sec/cm) ²	0.000539	0.000575	0.00192	0.00396	0.000343	0.000877	0.000494

の供試体、C75は径75mmの球で構成された立方体の供試体、C42は径42mmの球で構成された立方体、SはD₅₀ = 100mmの砕石を示している。空隙率の大きな透水層は、斜方六面体や砕石などの係数と同じような値を示す。

3. 2 非定常流実験

非定常流の振動流実験の動水勾配、流量流速および流量加速度の実験データの1例を図3に示す。図中の1から4の数値は流量流速の最小、最大および0の時刻で4区分に分割した数字である。また振動流実験における流量流速に対する動水勾配*I*の1例を図4に示している。図中の曲線は、式(5)に示す定常流としての流れを表わしたもので、振動流実験結果は定常流の曲線から一定のパターンでずれているのが認められる。振動流実験結果は、履歴現象ループを描いており、明らかに動水勾配は速度のみの関数ではなく、加速度も関係していることがわかる。定常流と振動流実験値との差は、加速度が最も大きくなる付近で最も大きくなり、加速度が0となる最大付近では定常流の値と振動流実験値とはほぼ一致する。

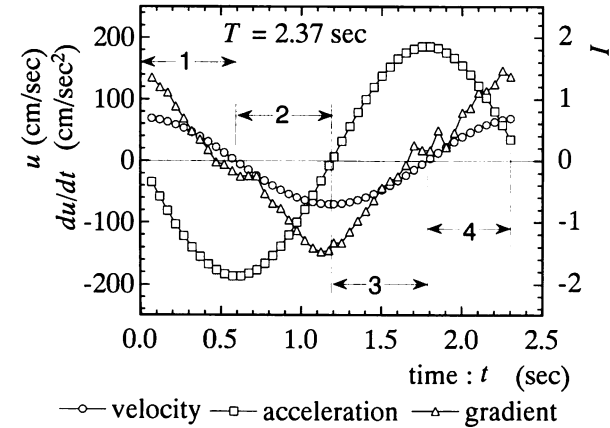


図3 振動流実験結果

図5は流量流速に対する*I/u*を同様にプロットしたもので、図4と同様に定常流と考えたときの値を直線で示している。定常流の直線は明らかに振動流実験データの降いた腕に一致していることがわかる。

図4、図5より振動流実験結果は定常流実験と明らかに異なり、式(5)に加速度項を入れると、1次元の非定常流では、次のような微分方程式が得られる

$$\frac{\tau}{\lambda} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} - (\alpha + \beta u)u \quad (7)$$

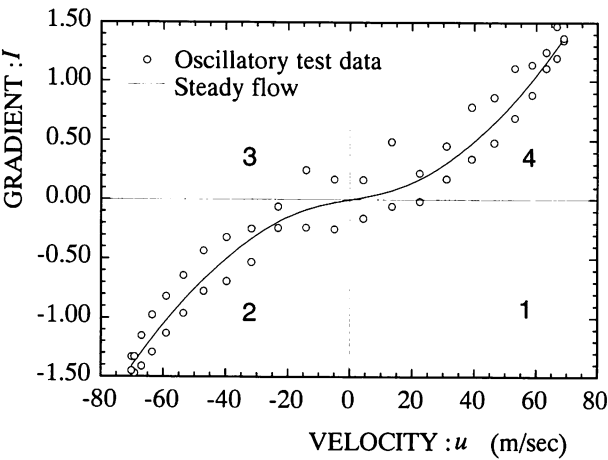


図4 流速に対する動水の水勾配

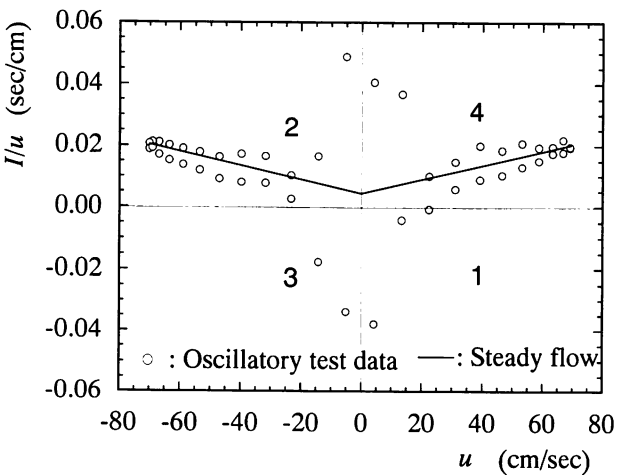


図5 流速に関する*I/u*

ここで、 λ は透水層の空隙率、 τ は慣性的抵抗係数を表す。上式を変形し、動水勾配*I*の形で表現すると次のように表現できる。

$$I = -\frac{1}{\rho g} \frac{dp}{dx} = \frac{\alpha}{g} u + \frac{\beta}{g} u^2 + \frac{\tau}{\lambda g} \frac{du}{dt}$$

$$= A_u u + B_u u^2 + C_u \frac{du}{dt} \quad (8)$$

加速度係数 C_u は、非定常流に対する時間的な慣性力を表わし、Kevinら⁶⁾の方式にならって全てのポイント j における加速度係数 $(C_u)_j$ は、流量流速 u_j に対する I/u のグラフ上のデータポイントから次式より直接求められる。

$$(C_u)_j = \frac{\left| \left(\frac{I}{u} \right)_2 - \left(\frac{I}{u} \right)_1 \right| \cdot u_j}{\left[\left(\frac{du}{dt} \right)_2 - \left(\frac{du}{dt} \right)_1 \right]} \quad (9)$$

ここで、下付き添字 1 と 2 は、各々の曲線の Lower Arm と Apper Arm 上の点である。全ての点において I/u の値から $((C_u)_j/u_j)(du/dt)$ を引くと $A_u + B_u u$ で表わされる直線となる。層流係数と乱流係数はそれらの各ポイントの値から回帰直線切片 A_u と傾き B_u から求めることができる。このようにして求めた 1 例を図 6 に示す。

層流係数 α_u を周期 T で整理したものを図 7 に示す。実験値はばらつきが多少大きいですが、周期が大きくなると層流係数 A_u は小さくなる傾向を示す。流量流速の振幅による変化は特に認められなかった。係数 a に換算すると $a = 0.684 \sim 8.70$ (1/sec) の範囲となる。

乱流係数 B_u を周期 T で整理したものを図 8 に示す。実験値にばらつきが多少大きいですが、周期が大きくなると乱流係数 B_u は大きくなる傾向を示

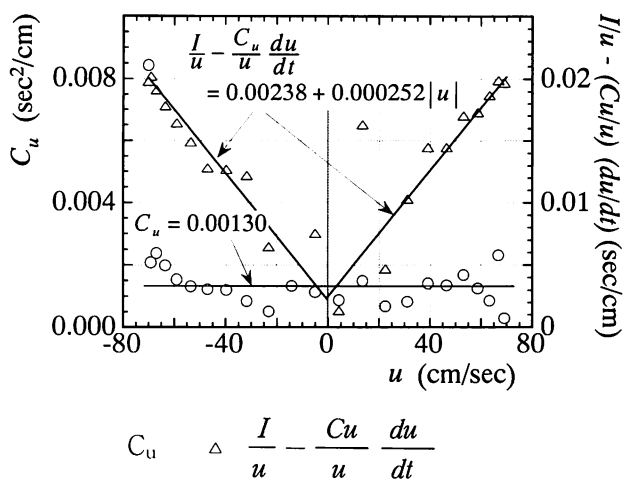


図 6 振動流実験における抵抗係数

す。流量流速の振幅による変化は特に認められなかった。係数 β に換算すると $\beta = 0.186 \sim 0.296$ (1/cm) の範囲となり、定常流の値に比べ非常に小さい。

慣性係数 C_u を周期 T で整理したものを図 9 に示す。実験値は、周期が大きくなると慣性係数 C_u は大きくなる傾向を示す。また慣性係数 C_u は、流量流速の振幅によってばらついてはいるが、そ

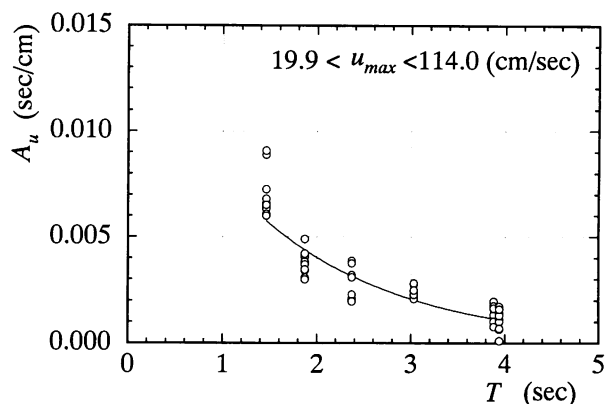


図 7 非定常流の層流抵抗

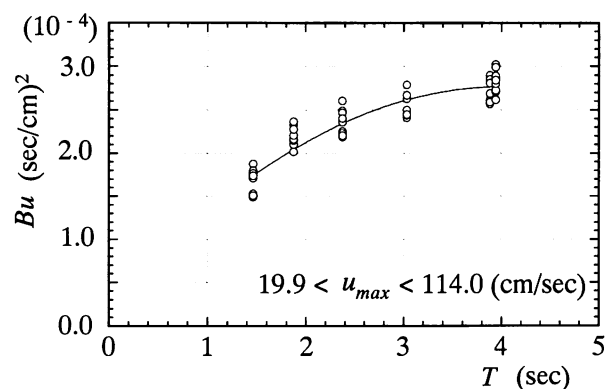


図 8 非定常流の乱流抵抗

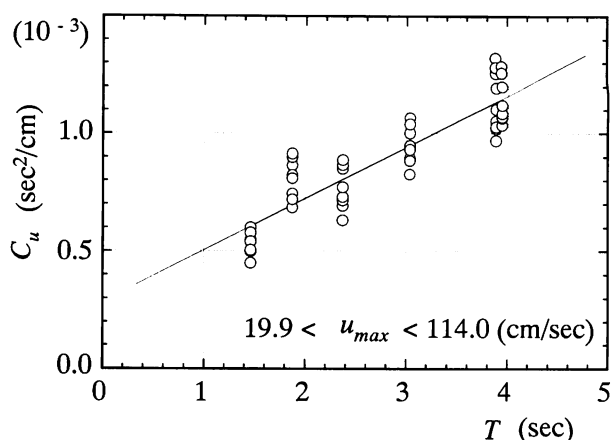


図 9 非定常流の慣性抵抗

の特性については特に認められなかった。係数 τ と C_u の関係は式(8)より $\tau = \lambda g C_u$ となる。 τ は透水性の粒状体や壁における流れについて、それがない場合に対する見掛け上の力や質量の比を示すものであり、 τ と付加質量係数 κ との関係式は次式のようになる。

$$\tau = 1 + \kappa (1 - \lambda) \quad (10)$$

空隙内の流体の一部もしくは全てが付加質量になることが考えられるから、 κ は次式の範囲にあると考えることができる。

$$0 \leq \kappa \leq \frac{\lambda}{1 - \lambda} \quad (11)$$

したがって、 τ は次の範囲にあると考えられる⁷⁾。

$$1 \leq \tau \leq 1 + \lambda \quad (12)$$

係数 C_u を係数 τ に換算すると $\tau = 0.40 \sim 1.16$ の範囲となり、 $\tau < 1$ の値を表われるが、これは透水管自体の振動による影響が考えられる。

4. ま と め

空隙の大きな透水管においても定常流および非定常流においてもForchheimer則が成り立っていることが実験より確認された。球体や碎石の実験値と比較すると層流的抵抗係数はほぼ同程度の値となるが、乱流的抵抗係数は碎石や斜方六面体的な詰め方をした球とは同程度の値をとるが、立方体的な詰め方をした球と比較すると非常に小さな値をとる。慣性的抵抗については非常に小さく $\tau = 1$ より少し大きな程度で、付加質量的效果は非常に小さいと考えられる。

今後、これらの非定常流の実験結果を考慮して、透水層の抵抗係数を決定し消波効果を計算し、波動実験と比較することにより抵抗係数の妥当性を検討したい。

参 考 文 献

- 1) 中村友邦、樋口哲哉、近藤俣郎、梅沢一之：複数透水層をもつ直立不透過消波工の反射率、土木学会北海道支部論文報告集、第51号(B), pp.282-285, 1995.
- 2) Kevin R. Hall, Greg M. Smith, David J. Turcke : Comparison of oscillatory and stationary flow through porous media, Coastal Engineering 24, pp.217-232, 1995.
- 3) 出口一郎、榎木 亨、白谷宏司：透水層上の波浪変形に対する非線形非定常ダルシー則の適用性について、海岸工学講演会論文集、第35回、pp.487-591, 1988.
- 4) 田淵幹修、滝川 清：透過性構造物の流体抵抗について、海岸工学講演会論文集、第25回、pp.402-406, 1978.
- 5) 香取完和、針具聰一、服部昌太郎：繊維網状体の水理特性と消波効果、土木学会年次学術講演会講演概要集、第44回第Ⅱ部、pp.688-689, 1989.
- 6) 崎山正常：ヘチマロンマットの透水試験、新光ナイロン株式会社、pp.1-6.
- 7) 近藤俣郎、竹田英章：消波構造物、森北、1983.

(平成9年11月28日受理)

