

Ⅲ-A251 岩盤亀裂における層流から乱流への遷移に関する実験的研究

神戸大学工学部	正会員 市成 準一
神戸大学都市安全研究センター	正会員 川谷 健
神戸大学工学部	正会員 斎藤 雅彦

1. はじめに

ルジオン試験では、注入水量が大きい場合、注入孔近傍で流れが乱流となる可能性が指摘されている。しかし、岩盤亀裂を平行平板モデルで近似し、実測のルジオン値などから透水係数などを算定するとき、通常、流れは層流と仮定される。注入孔近傍の乱流を考慮して解析するには、乱流域を特定する必要がある、そのため層流から乱流へ遷移するときの限界レイノルズ数を知ることが必要となる。

本研究では、平行平板間の微小間隙の壁面が滑面および粗面である場合について、間隙内の流れが層流から乱流へ遷移する限界レイノルズ数を実験によって求め、壁面の粗・滑が遷移に及ぼす影響を検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験装置を図-1に示す。平板間の間隙幅は2mmで、水路長は約190cm、水路幅は3cmである。壁面が、滑面の場合(Case 1)と粗面の場合を設定した。粗面は、壁面に粗度として直径1mm(間隙幅の1/2)のガラスビーズを千鳥状に配置した(図-2)。粗度配置が疎な場合をCase 2、密な場合をCase 3とする。

動水勾配は、ほぼ水路中央の1m区間に設けた4測点の水頭から算定した。流量は、上流タンクの高さで調節し、定常となったとき下流端で測定した。流量測定を5回行い、それから断面平均流速を算定した。

3. 基礎的考察

層流から乱流への遷移の尺度は、レイノルズ数である。レイノルズ数(Re)は一般に $Re = 4RV/\nu$ と定義される(ここに、R=径深、V=代表流速=平均流速、 ν =動粘性係数)。間隙幅(b)が水路幅と比べて十分小さいとき、 $R = b/2$ であり、 $Re = 2bV/\nu$ となる。

平行平板間の平均流速(V)は、層流の場合、 $V = (b^2 g / 12 \nu) I$ (ここに、I=動水勾配、g=重力加速度)で与えられ、動水勾配に比例する。一方、十分発達した乱流の場合、平均流速は動水勾配の1/2乗に比例する。それゆえ、VとIの関係を調べれば、流れが層流であるか否かを判断できる。

壁面でのせん断力(τ_0)の大きさは摩擦速度(u_*)で表され、摩擦速度は摩擦損失係数(f)を導入して平均流速と関係づけられる。また流路断面が一定のとき、 $\tau_0 = \rho g R I$ である。したがって

$$u_* = (\tau_0 / \rho)^{1/2} = (g R I)^{1/2} \quad \text{および} \quad u_* = (f/8)^{1/2} V \quad (\text{ここに、}\rho = \text{水の密度})$$

である。平行平板間の流れでは、層流の場合、摩擦損失係数とレイノルズ数の間に $f = 96/Re$ の関係がある。乱流の場合、平均流速と摩擦速度の比(すなわち摩擦損失係数)は、滑面と粗面のそれぞれについて

$$(\text{滑面}) : \quad V/u_* = (f/8)^{1/2} = 5.75 \log(2b u_* / \nu) + 3.0$$

$$(\text{粗面}) : \quad V/u_* = (f/8)^{1/2} = 5.75 \log(2b/k) + 6.0 \quad (\text{ここに、}k = \text{粗度の高さ})$$

で与えられる。

4. 実験結果とその考察

層流・乱流の判定をするため平均流速(V)と動水勾配(I)の関係を示したものが、図-3である。滑面と粗面いずれの場合も、或る流速を境に $\log V$ と $\log I$ の間の比例定数が変わる。表-1に比例定数を示す。どの場合も、小さい流速では、流速は動水勾配にほぼ比例しており、流れは層流であると判断できる。大きい流速では、滑面の場合(Case 1)、流速は動水勾配のおよそ1/2乗に比例しており、完全に乱流であると考えられるが、粗面の場合(Cases 2 & 3)、流速は動水勾配の約0.65乗に比例しており、完全な乱流に達して

岩盤亀裂、ルジオン試験、層流、乱流、限界レイノルズ数

〒657 神戸市灘区六甲台町1-1, Tel. 078-803-1232 Fax. 078-803-1234

いないと思われる。直線の勾配変化点から求めた限界レイノルズ数を表-2に示す。一般に、管路流の限界レイノルズ数は2300程度で、Case 1の値はこれに近い。粗面では、それよりかなり小さいレイノルズ数で乱流へ遷移している。この実験のように間隙幅と比べて粗度高さが非常に大きい場合、小さいレイノルズ数で乱流への遷移が始まる。その反面、間隙幅が小さいために、壁面や粗度表面での摩擦によって乱流の発達が抑制され、大きい流速でも完全な乱流状態に達しにくいと考えられる。図-4は、摩擦速度の実験値を滑面乱流の対数則によって算定した計算値と比較したものである。Case 1では「実験値<計算値」であり、Case 2と3では逆である。これより、粗度があることで壁面摩擦が大きくなっていることが判る。

図-5に、摩擦損失係数とレイノルズ数の関係を示す。この図からも、粗面の場合、限界レイノルズ数が小さく、粗度が密な方が、さらに小さいことが判る。また摩擦損失係数は、十分に発達した粗面乱流ではレイノルズ数の関数でないが、この実験結果ではレイノルズ数が大きくなるにしたがって減少している。それゆえ実験の範囲では、流れは層流から乱流への遷移領域にあると考えられる。

5. おわりに

本研究では、岩盤亀裂面のように粗度が極めて大きい場合、流れは小さいレイノルズ数で層流から乱流に遷移するが、一方、間隙幅が小さいため、壁面や粗度が乱流の十分な発達を抑制することが明らかになった。

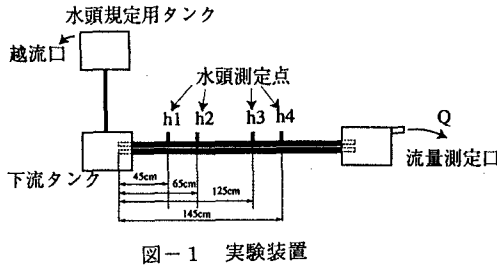


図-1 実験装置

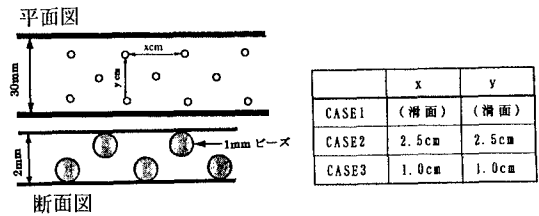


図-2 粗度の配置

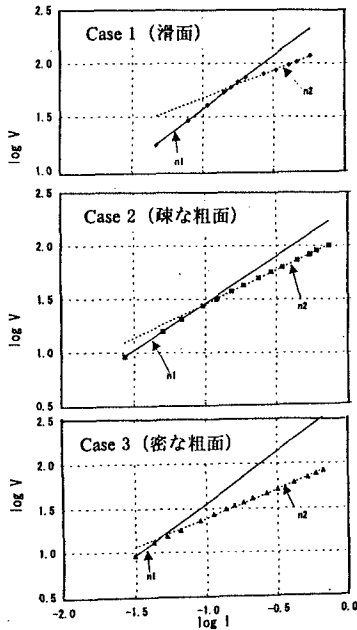


図-3 平均流速と動水勾配の関係

表-1 比例定数
(図-3の直線の傾き)

	比例定数 (傾き)	
	n1	n2
Case 1	0.99	0.51
Case 2	0.88	0.64
Case 3	0.17	0.65

表-2 限界レイノルズ数

	限界 Re 数	流速 (cm/s)
Case 1	2444	61.1
Case 2	1091	27.3
Case 3	608	15.2

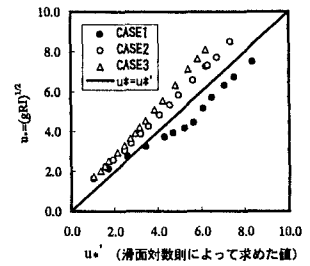


図-4 摩擦速度の実験値と計算値の比較

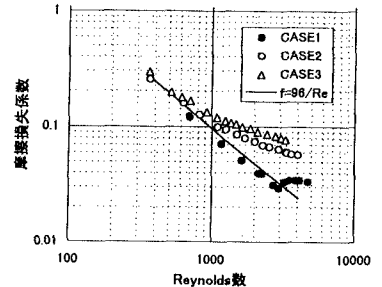


図-5 摩擦損失係数とレイノルズ数の関係