中部大学大学院 学生会員 〇寺西剣悟 中部大学工学部 正会員 杉井俊夫 余川弘至 浅野憲雄

1. はじめに

堤防の詳細点検では、今なお、多くの箇所で基準に 満たされていない。その原因の一つに、パイピングの 評価基準がある。鉛直、水平方向の局所動水勾配がい ずれも0.5以内であることが求められる。多粒子限界流 速は土粒子の鉛直つり合いから導かれた式である。土 粒子の移動においては、粒子が浮上する現象を伴う必 要があると考え、多粒子限界流速に着目し、水平流れ が卓越する場にも適用可能か検証した結果を報告する ものである。

2. 多粒子限界流速の概要

単一粒子の沈降速度よりも、粒子群が沈降する速度 (干渉沈降速度)が遅くなることが化学工学では知られ ている。単粒子の沈降速度に、間隙率(空隙率)の関数に よって補正される多粒子限界流速は、粒子に対する相 対速度を考え、多粒子干渉沈降速度を援用したもので ある。なお、単一粒子の沈降速度式には、層流域から 乱流域まで幅広く使用できる、式(1)に示す Rubey 式を 用いていている。

Rubey
$$\overrightarrow{\mathbb{R}}$$
 $V_n = \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w g d^3 (\rho_s - \rho_w)}{54\mu^2} + 1} - 1 \right\}$ (1)

ここに、 ρ_s :土粒子の密度(g/cm³)、 ρ_w :液体の密度 (g/cm³)、 μ :水の粘性係数(g/(cm·s))、d:粒子径(cm)、g: 重力加速度(cm/s²)である。

式(2)には、Rubey 式に、Richardson の補正係数(式 3) と間隙率を組み合わせた空隙率関数を掛けることによ って導いた多粒子限界流速式¹⁾を示す。

多粒子限界流速式

$$V_{n} = \frac{6\mu}{\rho_{w}d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_{w}gd^{3}(\rho_{s} - \rho_{w})}{54\mu^{2}} + 1} - 1 \right\} \times n^{\frac{1}{m}}$$
(2)

Richardson の補正係数 1/m

 $R_{e} < 0.2 \quad 1/m = 4.65+19.5 \cdot d/D$ $0.2 < R_{e} < 1.0 \quad 1/m = (4.46+17.6 \cdot d/D)R_{e}^{-0.02}$ $1.0 < R_{e} < 500 \quad 1/m = 4.45R_{e}^{-0.1}$ $500 < R_{e} \qquad 1/m = 2.39$ ここに, D: 管径(mm), d: 粒子径(mm), n: 間隙率(-), $R_{e}: 粒子 \text{ Reynolds } 数(R_{e} = V_{e}d/\mu) \text{ obd}_{o}.$ (3)

キーワード	多粒子限界液	充速,	浸透破壞,	模型実	験
連絡先	$\mp 487 - 8501$	愛知	1県春日井市	ī松本町	120

3. 水平流れによる限界流速

本研究では、水平流れが卓越している場での多粒子 限界流速の適用性について検討を行うために、パイピ ング現象を対象にした吉岡ら²⁾の実験結果を基に、飽和 不飽和浸透流解析を行った。図1は吉岡らが行った実験 装置である。これはアクリル製の二次元土槽および変 動可能な給水装置からなり、土槽内部に砂層を作成し、 粘土層を砂層上部に作成して、浸透水が砂層内を水平 に流れるようにした実験である。砂層に用いられた砂 は、3種類にふるい分けした川砂である。そして、砂層 内部の流速の動きを可視化するために、2D-FLOW を使 用した。



図1 吉岡らの実験装置

吉岡らの実験データを基にした図2に示す解析結果 は、砂層の流速図を示しており、砂層から噴砂発生箇 所の、最大流速ベクトルの鉛直成分を最大流速とし、 間隙部分を流れる真の流速を求めるために、間隙率で 割ることにより、鉛直成分における限界実流速を算出 した。



図2 解析結果(流速図)

図3に、解析結果より得られた限界実流速と多粒子 限界流速を示す。なお、黒実線は最も乾燥密度が大き い場合と黒破線は最も乾燥密度が小さい場合の多粒子

00 中部大学工学部都市建設工学科 TEL 0568-51-9562

限界流速である。青破線は吉岡らが流量から逆算した 実験値であり、青実線は本研究で求めた噴砂発生箇所 の鉛直方向の限界実流速である。各試料の粒径範囲は 図3の右上に示してある。粒径が細かい粒子の鉛直流 速は多粒子限界流速と一致する結果を得た。噴砂発生 箇所では粒径の細かい粒子が流出していることがわか る。また、層流域(粒子レイノルズ数 Re<1、左下の領 域)において一致していることがわかる。これらの結果 から、水平流れが卓越する場合においても多粒子限界 流速は適用できると推察される。



図3 多粒子限界流速と限界実流速(吉岡ら) 4. 多粒子限界流速検証実験

実際に吉岡らの実験を模擬した実験を行った。図4 に実験装置を示す。砂層の上に浮力を考慮して錘を入 れた発泡スチロールを不透水層とし、砂層には豊浦砂 を用いている。



図4 実験装置

本研究では、不透水層の位置を移動させることで、 流出幅を変えた実験を**表1**のようなケースで実施した。

	流出幅	乾燥密度	問隙率(-)	透水係数
	(cm)	(g/cm^3)		(cm/s)
caseA	20	1.657	0.375	6.53×10 ⁻³
caseB	15	1.413	0.467	1.73×10 ⁻²
caseC	10	1.451	0.453	1.50×10^{-2}
caseD	5	1.502	0.433	1.23×10 ⁻²

表1 実験ケース

検証は、次のように実施した。噴砂発生前の安定状態での流量と水位差から逆解析的に透水係数及び Kozeny 式によって間隙率を決定、噴砂発生時の水位と 流量を確認し、局所的な流速ベクトルから鉛直方向の 最大流速を求めた。

各 case の多粒子限界流速と、例として caseA の噴砂 発生時の鉛直方向の限界実流速、豊浦砂の粒度分布を 図 5 に示す。なお、水色実線は豊浦砂の粒度分布を表 わしている。豊浦砂の粒径範囲の細かい粒子で一致し ており、吉岡らの実験同様に細かい粒子から噴き上げ、 周辺に拡大進行していくことが推察される。噴き上げ 時の粒径は約 0.175mm であり、これは豊浦砂の粒度分 布から D₃₀(通過質量 30%径)に相当する。またこれは他 3 つの case でも同様のことがいえる。水平流れが卓越 している場でも、粒子が水平に直接には移動せず、隣 の粒子を乗り越える必要があると考えられる。そのた め粒子は一度上向きに上昇する必要があり、鉛直流れ である多粒子限界流速は、水平流れが卓越している場



図5 多粒子限界流速と限界実流速と粒度分布(caseA)

5. おわりに

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1)吉岡らのパイピング現象による実験データを解析に よって求めることにより、水平流れでも多粒子限界 流速が適用可能と推測される。
- (2)水平流れが卓越している場でも、多粒子限界流速は 適用可能であるといえる。一方、実現象において局 所的な鉛直流速の取り扱いについてさらなる検討が 必要であると考えられる。

【参考文献】

1) 杉井・佐藤・宇野・山田:浸透破壊の発生プロセスと土の非 均質性,土と基礎,第 37 巻,第 6 号, pp.17-22, 1988. 2) 吉岡、久楽、 佐藤:水平方向の浸透流によるパイピングについて,第 39 回 年次学術講演会講演概要集, pp.707-708, 1984.