

浸透破壊を対象とした進行性メカニズムの評価に関する研究

Study on evaluation method of progressive seepage failure

杉井俊夫¹, 梅基哲矢², 山田公夫³, 名倉 晋⁴

- 1 中部大学工学部 nanto@isc.chubu.ac.jp
- 2 中部大学大学院工学研究科
- 3 中部大学
- 4 中日本航空株式会社

概 要

本研究は、古くて新しい浸透破壊について進行性の破壊というキーワードから検討を行っている。これまで、クイックサンドやパイピングといった浸透破壊は動水勾配（局所動水勾配）という考え方で考えられてきた。しかし、実地盤においての浸透破壊は進行性の破壊が考えられ、動水勾配のアプローチでは進行性メカニズムを説明する上で困難である。そこで本研究では、実流速として取り扱うことで粒子レベルの移動する限界流速の利用を試みている。とくに、地盤工学における限界流速と水工学における限界掃流力の違いの言及、実務で重要となる混合粒径の場合の安全性の照査を行う上で、調和平均径 D_w の利用と Kenney のフィルター材の安定指標を用いた不安定粒度分布の考え方の利用の妥当性について実験結果から示すとともに、浸透破壊を限界流速で評価することの有効性を示している。

キーワード：浸透破壊，限界流速，粒度分布，進行性破壊

1. はじめに

平成 24 年 7 月 14 日矢部川中下流部では、ほぼ全川にわたり計画高水量を超える出水となり、矢部川本川堤防において浸透による漏水や、陥没が生じる等、計 18 カ所で堤防被災が生じた。特に、直轄管理区域の右岸 7.3k 付近において堤防が基礎地盤のパイピングを原因とした破堤を生じ、社会的にも強い関心を集めた。東海地方では、昭和 51 年 9 月の長良川の破堤が、越水無き破堤として多くの方々が記憶されている。

浸透破壊とは、間隙水圧の上昇による有効応力の喪失による土の破壊をします。したがって広義でいうと河川水または降雨が堤体内に浸透し、堤体土のせん断抵抗力を越えたすべり破壊（せん断破壊）が含まれるが、一般にクイックサンドやパイピングと呼ばれる狭義の意味でつかわれることが多い。浸透破壊現象は、(1)Heave, (2)Piping, (3)Internal erosion に分類されるように種々の呼称がある¹⁾。狭義の浸透破壊現象について、河川堤防では、鉛直並びに水平方向の局所動水勾配や G （被覆土層の重量）/ W （被覆土層底面に作用するよう圧力）の指標によって安定性照査が行われ、浸透破壊に対して動水勾配（局所動水勾配）という考え方で考えられてきた。動水勾配は、土塊としてのつり合いを見ており、土粒子が少しずつ流出する進行性の破壊メカニズムを説明することは困難である。動水勾配と

いう考え方に対して限界流速がダムの分野から用いられてきた。Justin²⁾ は様々な粒径の粒子が動く場合の限界流速を理論式として提案した。しかし、この式は、理想的な単一粒子の運動則を表すもので、土粒子周りの小さな渦、平均粒径などから外れた微粒子の不安定性などが無視されたものであり、多くの研究者らの実験値より大きく、乖離がみられた。さらに、水理学では限界掃流力からなる限界摩擦速度という考え方があるが、Justin 式のように過大評価となり、実験データと大きくかけ離れ、限界流速の考え方に疑問を持つ河川研究者、技術者も多い。

本研究は、こうした問題に対し、地盤工学における限界流速と水工学における限界掃流力の違い、また浸透破壊のような進行性破壊の現象を評価する上で限界流速の有効性を示すとともに、粒子レベルの移動を評価する技術について示すものである。

2. 限界流速と限界摩擦速度

2.1 限界流速

1)限界流速からの粒子移動に対するアプローチ

限界流速の考えは、1923 年に Justin によって提唱された²⁾。多くの研究者がこの式の実験的な検証を試みたが、Justin 式は乱流域における単一粒子の移動を想定した式であるため、実地盤や実験で得られる値と大きく異なり、

表 1 浸透破壊における限界流速

提唱者	限界流速式
Justin (1923)	$v_c = \sqrt{\frac{2}{3}g(Gs-1)d}$ ここに、 v_c :限界流速、 g :重力加速度、 Gs 土粒子の比重、 d :土粒子径
Koslova	$v_k = 2.6d^2 \left(1 + 1000 \frac{d^2}{D^2}\right)$ ここに、 v_k :流速、 D :平均粒径
大野ら (1984)	均等径の場合 $v_p = 2.25d^{1.94}$ 混合径の場合: 粒度分布 20 から 30% 粒径に対する限界流速 v_{pc} :限界流速
流動化 開始速度	$v_l = \frac{\phi_c}{180\eta} \frac{n^3}{1-n} g(Gs-1)D_v^2$ ここに、 v_l :流動化開始速度、 ϕ_c : Carman の形 状係数 (球の場合 1)、 D_v : 等体積相当 粒子径(cm)、 n : 間隙率、 η : 動粘性係 数(cm/s)、

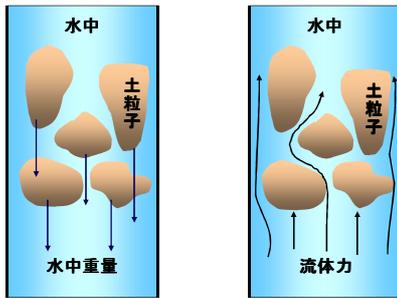


図 1 干涉沈降速度(左)と多粒子限界流速(右)

過大評価になる。また、Koslova の実験式は混合粒径試料の限界流速として Justin 式に比べ過大評価の割合が少ないが、危険側の値を示し合理的とはいえず、さらに着目する粒径 d や平均粒径をどのように扱うかについても曖昧な点がある³⁾。大野らは実験式を導いており、混合径の場合には、20 から 30% 粒径を用いている⁴⁾。これらの限界流速式いずれも独立した単一粒子の移動開始速度を考慮しており、周りに存在する粒子の影響を考慮していなかった。実地盤では粒子は粒子群を形成しており、粒子間を流れる水の流れは周辺粒子の存在により抵抗を受け、独立した単一粒子の周りの水の流れと異なることは明らかである。一方、粉体工学の分野では、固定層から流動層へ遷移する際の限界となる流速を流動化開始速度と定義している。これは、粒子層の水中重量と層内における流体の圧力損失とのつり合いから導かれており、Terzaghi 式と同義である。

著者らは、沈降速度式で用いられる干涉沈降速度の考え方を援用し、多粒子限界流速を提案してきた^{2),5)}。干涉沈降速度は粒子群を形成していることから単一粒子の沈降流速に粒子間の干渉を考慮した補正 (Richardson⁶⁾ の補

正值)を用いることにより計算される。また、単一粒子の沈降流速は抵抗係数 C_D を用いて計算できるが、繰り返し計算などの煩雑さから、半理論式であるが適用範囲も広く精度も高い Rubey の砂粒の沈降速度⁷⁾より求める。Rubey の式は、層流域から乱流域まで一つの式で計算できる利点もある。Rubey の式を変形して示した (式(1))。

$$v_c = \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w g (\rho_s - \rho_w)}{54\mu^2} + 1} - 1 \right\} \quad (1)$$

ここに、 ρ_s :土粒子密度 [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]

図 1 に示すように、Richardson の多粒子干涉沈降速度による土粒子と水の相対速度を浸透破壊発生時の限界流速(多粒子限界流速)とすることで周辺粒子の干渉を考慮した²⁾。

$$v_n = n^{1/m} \cdot v_c \quad (2)$$

しかし、Richardson の干涉沈降速度の補正係数(1/m)を式(3)に示す⁶⁾。なお、1/m は Reynolds 数によって決まる補正係数である。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Re} < 0.2 & \text{のとき } 1/m = 4.65 + 19.5 \cdot d/D \\ 0.2 < \text{Re} < 1.0 & \text{のとき} \\ & 1/m = (4.46 + 17.6 \cdot d/D) \text{Re}^{-0.03} \\ 1.0 < \text{Re} < 500 & \text{のとき } 1/m = 4.45 \text{Re}^{-0.1} \\ 500 < \text{Re} < 7000 & \text{のとき } 1/m = 2.39 \end{array} \right\} \quad (3)$$

ここに、 D :管径で、これに対して d が小さいとき、 d/D は無視することができる。

2) Terzaghi の限界動水勾配から求める限界流速式

鉛直一次元浸透破壊実験での Terzaghi の限界動水勾配 (式(4)) は、均等粒径試料の豊浦砂やガラスビーズで広く確認されている。しかし、その誘導は土塊として力のつり合いで考えられてきた。ここで、透水係数を精度よく表現できる実験式の Kozeny 式を用いて限界流速式を導くことを試みた。式(4)の Terzaghi の限界動水勾配と式(5)の Kozeny 式⁸⁾をダルシーの法則を用い流速を求め、また間隙率で除して実流速にすると、限界流速式 (7) が得られる。

$$I_{cr} = \frac{Gs-1}{1+e} = (Gs-1)(1-n) \quad (4)$$

ここに、 Gs :土粒子の比重、 e :間隙比、 n 間隙率を示す。

$$k = \frac{\rho_w}{\mu} C_k \frac{e^3}{1+e} D_s^2 \quad (5)$$

ここに、 ρ_w :水の密度、 μ :粘性係数 (cm²/s)、 C_k :形状係数 (きわめて角張った砂で 1.0、角のある石英質砂で 2.3、丸まった揃っている川砂 3.6)⁹⁾、 D_s :代表粒径を示す。

$$v = ki = \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} C_k \frac{e^3}{(1+e)^2} D_s^2 \quad (6)$$

間隙率 ($n=e/(1+e)$) で除することで、Terzaghi の限界動水勾配から求める限界流速を導くことができる。

$$v_T = v/n = \frac{\rho_s - \rho_w}{\mu} C_k \frac{e^2}{1+e} D_s^2 \quad (7)$$

ここで、代表径 D_s をいくつにとるかであるが、粒径に対する限界流速を計算するというので、均一粒径として計算することとした。

2.2 限界限界掃流力 (限界摩擦速度)

水理学には、河床の砂礫を箒のように掃く、押し流そうとする力「掃流力」や対応する「摩擦速度」という考え方があり。河床砂が移動している場合の流れは、掃流と浮流に大別され、前者は砂粒が河床を転動、滑動などしながら移動するもので掃流力の直接の作用で、後者は乱れの拡散作用によって断面全体を浮流しながら輸送されるものと考えられている。式(7)は、摩擦速度 u_* 、掃流力を示す¹⁰⁾。

$$u_* = \sqrt{\tau_0 / \rho} \quad (8)$$

$$\tau_0 = \rho_w g R I \quad (9)$$

ここに、 R : 径深 (断面積/潤辺、普通の河川では水深 h)、 I : エネルギー勾配 (水路勾配) である。本研究では最もよく使われている岩垣の式¹¹⁾ (式(10)) を使用した。

岩垣の限界摩擦速度 u_{*c}

$$\left. \begin{aligned} d \geq 0.303\text{cm} & : u_{*c}^2 = 80.9d \\ 0.118 \leq d \leq 0.303\text{cm} & : u_{*c}^2 = 134.6d^{31/32} \\ 0.0565 \leq d \leq 0.118\text{cm} & : u_{*c}^2 = 55.0d \\ 0.0065 \leq d \leq 0.0565\text{cm} & : u_{*c}^2 = 8.41d^{11/32} \\ d \leq 0.0065\text{cm} & : u_{*c}^2 = 226d \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 d : 砂の粒径 である。

2.3 限界流速と限界掃流力の違い

これまでに示した流速式と粒径の関係を図 2 示す。また、これまでに室内実験で得られた浸透破壊実験の結果^{5),12),13)}を合わせて示す。

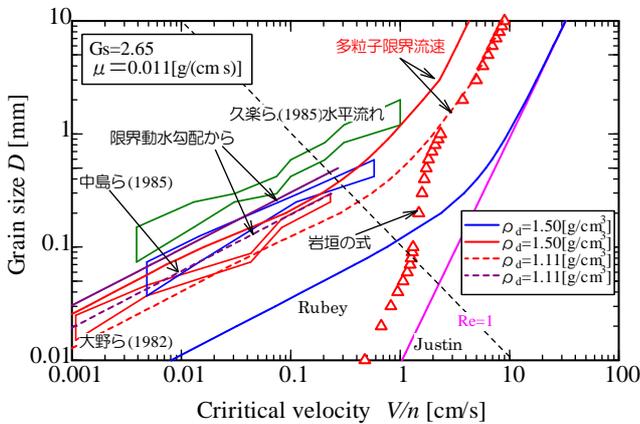


図 2 各種限界流速および実験値と限界摩擦速度

多粒子限界流速は、微妙に湾曲しているようになっているが、Reynolds 数による係数 $1/m'$ の関係による。Terzaghi 式から導いた限界流速式は多くの研究者らの実験値と同じ傾きであり、両式は良く説明できていると考えられる。

Justin 式は、これまでも言われているように過大評価を示すが、Rubey の砂の単粒子の沈降式と乱流域において一致することがわかり、地盤土中の粒子移動では適用できないことがわかる。一方、多粒子限界流速と Terzaghi 式から導いた限界流速式は、間隙比が大きい (乾燥密度が小さい) ほど、右寄りにシフトして限界流速が大きくなる傾向がわかり、単粒子のように間隙比を大きくしていくと (約 20 倍)、Rubey の式と層流域内で一致する。

岩垣の限界摩擦速度および久楽らの実験結果は水平方向が卓越する流れを対象としており、それ以外は鉛直方向の一次元流れである。限界摩擦速度と実験結果をみると卓越する流れの方向によっても異なるが、大きく乖離しており、現象が異なることが推察される。しかし、土中の限界流速を表現できる多粒子限界流速式と岩垣の限界摩擦速度式が $\rho_d=1.11\text{g/cm}^3$ の乱流域で一致することは、大変興味深い。岩垣の論文によると、30 秒間に何個の砂粒が移動するなど計測している。また、0.1mm 以下の実験値がないので信頼性についてかけることを述べている。久楽らの実験結果は水平方向が卓越する流れを対象としており、粒径が大きいものにおいては、岩垣の式と同じ値になることが考えられる。水平流が卓越する現象は、まさに堤防下部のような水みちの拡大に影響することが考えられ、重要な検討課題である。

3. 混合粒径の浸透破壊

混合砂礫の限界掃流力で問題になる点を、岩垣は 2 点挙げている¹¹⁾。(i)いかなる粒径のものが動き始める時を持って限界とするのか。(ii)実験して得られた限界掃流力は平均粒径に対応する一様粒径 (均等粒径) の場合の限界掃流力より大きいのか、小さいのか、である。限界流速においても確かに、同じ課題がある。

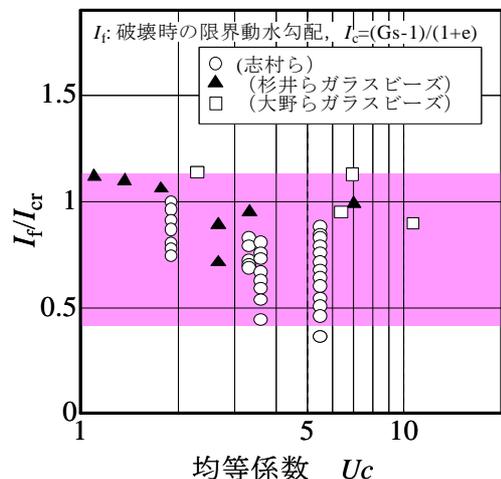


図 3 均等係数と限界動水勾配のバラつき¹⁴⁾

図 3 には、鉛直一次元浸透破壊実験のデータを破壊時の動水勾配を理論値の比で、均等係数別に整理した図である。これによれば、均等係数が 5 付近を中心小さな値で破壊が発生している可能性がわかる。このことは、移動可能な粒子が供試体内ですでに移動し始め、目詰まりにより局部的に動水勾配が高くなって破壊に至ったのではないかと考察された。また、均等係数が大きくなると粒子移動が少ないまたは、目詰まりしにくく平均動水勾配に近くなることも考えられる。岩垣が述べたように、流速の場合にはどの粒子に視点を与えるかができる、一方、土の大きさの粒径を考えれば、適切なかが永久のテーマになる。そこで、本研究は、Kenney のフィルターの安定理論¹⁵⁾を用いることとした。前項 2. では、浮上、移動し始める流速（または有効応力が喪失する流速）を求める式を提案してきた。ここでは、限界流速に達した粒子が、移動できる間隙空間を有するかについて検討した。

3.1 浸透水圧を受ける上で不安定な地盤

1) 移動可能な土粒子と拘束土粒子

外力として限界流速を受けた土粒子は、すべて移動するとは限らない。周辺粒子が形成する間隙スペースがなければ拘束されたままとなる。したがって、移動可能な土粒子を区別するためには間隙径情報が必要となる。透水係数を用いて平均間隙径などを得ることができるが、平均値ではなく、間隙径の分布が必要となる。著者らは間隙径分布の計測を行ってきたが、実務に使用するには多くの課題がある。そこで、Kenney のフィルター安定指標を用いることとした。

2) Kenney のフィルター安定指標の導入¹⁵⁾

フィルターシステムを幾何学的な観点から、Kenney らは粒径の 4 分の 1 の粒子径が流動する可能性をあることを求めている。Kenney らは図 4 に示すような球が密に接した場合による間隙内に生じる球状の空間の直径を Constriction size (間隙のくびれの径のサイズ) D_c として求めている。以上の考え方を踏まえて Kenney らは、ある層内において、注目する粒子径 D の粒子の安定性、不安定性の評価を行うとき、図 5 に示すように、粒度分布において粒子径 D 以下の粒子の含有率の合計 F と粒子径 $D \sim 4D$ の粒子の含有率 H との比較を行う。図 6 に示すように、 $H/F = 1$ を境として $H/F \geq 1$ においては安定、 $H/F < 1$ においては不安定となる可能性を有すると判断し、 $H/F < 1$ の領域の粒子は流出する可能性があるとしている。

また、図 7 に示すように、限界流速に達した粒子で移動可能な粒子が存在する場合、供試体の最小くびれ径より小さいものは、供試体から流出、最小くびれ径より大きな粒子は、供試体内に留まり局所的な目詰まり層を形成することが推察される。

3.2 鉛直一次元浸透破壊実験の整理

これまで実施してきた鉛直一次元浸透破壊実験の結果を用いて混合粒径試料の場合の浸透破壊の発生について

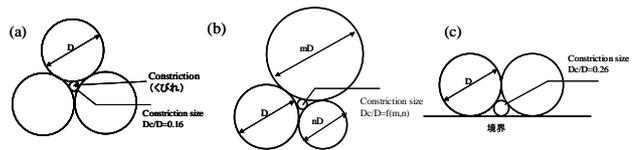


図 4 球の密な集合による間隙のくびれ

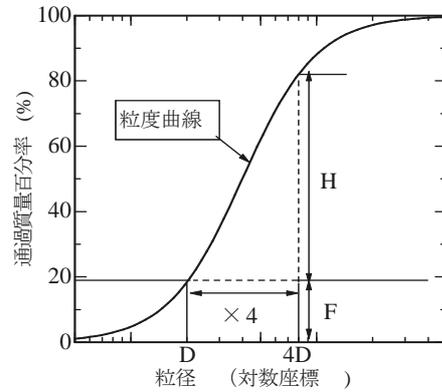


図 5 F と H の考え方

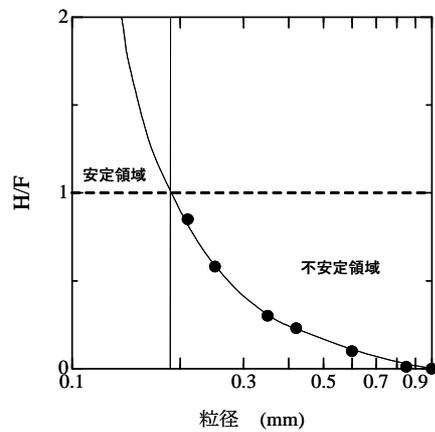


図 6 H/F による安定・不安定領域の決定

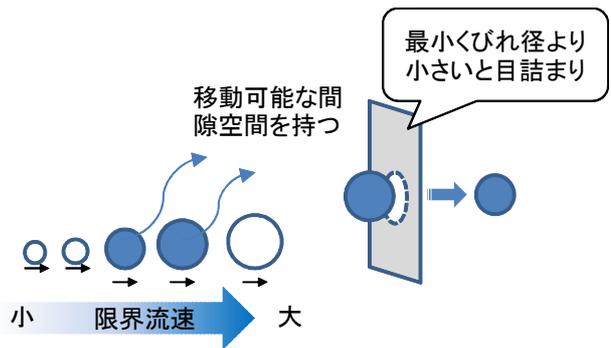


図 7 限界流速に達した粒子の移動のイメージ

整理することとした。

1) 鉛直一次元浸透破壊実験の概要⁵⁾

使用した実験装置を図 8 に示す。内径 8 cm、長さ 32.5 cm の透明アクリル管を用い、試料の上下の水頭差を圧力計で計測、動水勾配を求め、流量計から透水係数を算出した。また、浸透破壊の発生時を著者らのこれまでの研究から表面膨張開始時（試料長さの変化開始時）としており、レーザー変位計を使って試料の膨張時を計測した。混合試料の場合は、試料セット時に分級しやすいため、内径 2.5 cm、

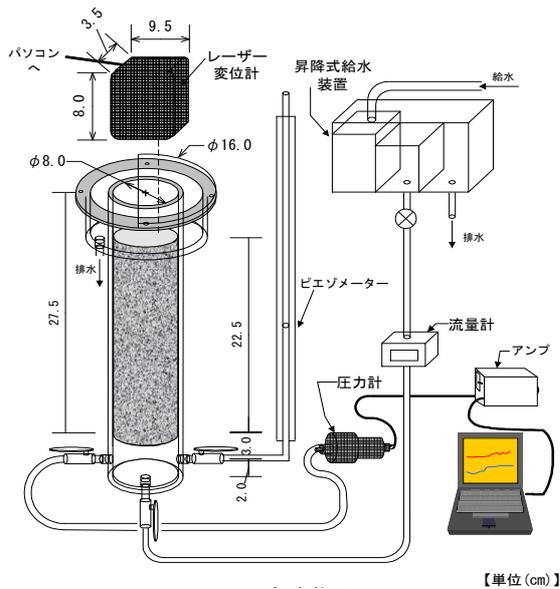


図8 鉛直一次元浸透破壊実験⁵⁾

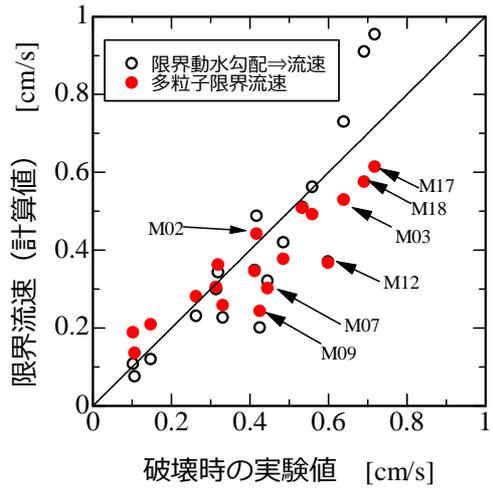


図10 破壊時の流速と限界流速の比較

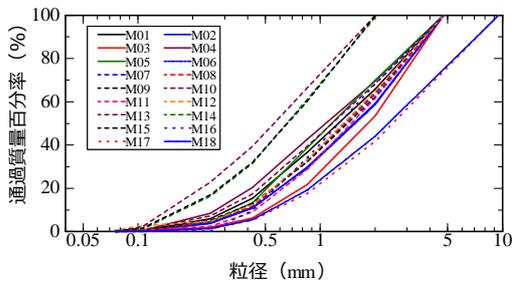


図9 混合粒径試料の粒度分布

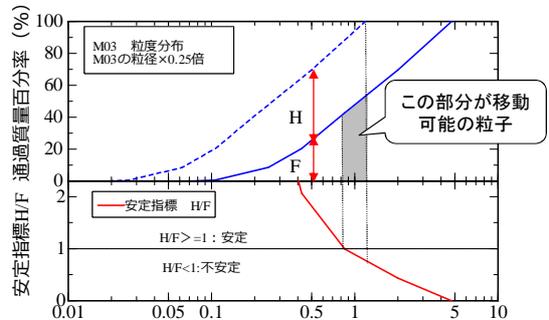


図11 粒度分布に不安定領域を持つケース (M03)

長さ 40 cm の筒に試料を予め入れて水中内で締め固めるようにした。また、用いた粒度分布を図9に示す。

2)浸透破壊発生時の限界流速

破壊時の流速を間隙率で除した実流速と先の Terzaghi の限界動水勾配と Kozeny 式から算出した限界流速、多粒子限界流速の値を計算した。なお、計算に用いたのは D_w (質量頻度基準の調平均径) 式 (11) を用いた¹⁶⁾。

$$D_w = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (P_i/D_i)} \quad (11)$$

ここに、 P_i : ある粒径範囲 i に含まれる質量含有率 [%]

D_i : 質量含有率 P_i における中間径 D_i [mm], 全質量含有率を 10 分割 ($n=10$) している。

図10に、結果を示す。

これより、概ね実験値と2つの限界流速が一致していることがわかる。なお、限界動水勾配から求めた流速では、破壊時の流速が大きい(粒径が大きくなるほど)大きな値となるため、危険側の指標となることがいえる。その他、多粒子限界流速を含め、一致あるいは安全側といえよう。なお、安全側(計算値より大きな値)で破壊した例(M03, M07, M09, M12, M17, M18)について Kenney の安定指標について調べてみたところ、いずれも H/F の指標が1を切る

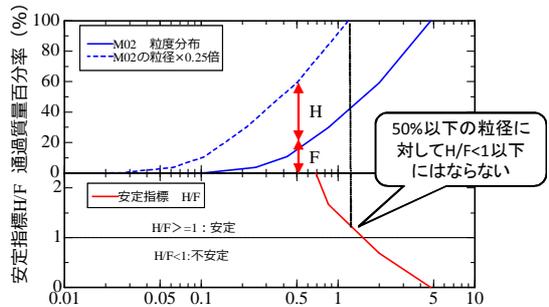


図12 粒度分布に不安定領域を持たないケース (M02)

粒径が存在することがわかった。図11に不安定と評価されたケースのM03と図12に安定粒度とされたM02の分析結果を示す。M03の D_w は1.21mmであり、0.8~1.2mmの付近の粒径が限界流速に達して内部の粒度分布が再構成されたものと考えられる。一方、M02は粒子移動が生じず、 $D_w=0.96$ mmの限界流速に達した際に破壊したものと推察される。以上のことから、混合粒径の場合には、調平均径 D_w の限界流速を用いるが、不安定な粒度分布の場合には、評価結果と異なることが予測されるといえる。しかし、推定される限界流速より大きくなるか、小さくなるかについては、内部の土粒子移動を含めた破壊の進行性を、

層に分けて考えるといったさらなる検討が必要と考える。

4. おわりに

浸透破壊について進行性メカニズムという観点から評価する上で、限界流速の有効性について著者らが行ってきた実験結果をもとに再整理し検討を行ってきた。ここに、得られた知見をまとめる。

- 1)限界流速と水工学での限界摩擦速度は、流向が違う点もあるが、掃流を中心とした力のつり合いを考えており、土中のような層流域での浮流に対応した速度と異なることを示した。
- 2)岩垣の限界摩擦速度は、限界流速の乱流域において、乾燥密度が $\rho_d=1.1\text{g/cm}^3$ 程度でほぼ一致することがわかり、乱流域においては流向の影響が小さくなることが考えられた。
- 3)Terzaghi の限界動水勾配と Kozeny の透水係数式を用いて限界流速を算出した結果は、他の研究者らの実験を含めて説明できることがわかり、間隙比が大きくなるほど限界流速が大きくなることを示した。
- 4)多粒子限界流速式は、Terzaghi の限界動水勾配と Kozeny の透水係数式を用いた限界流速よりも、乱流域についても適用できる範囲が広いことを示した。
- 5)水平流れが卓越するような場合の限界流速については、今回検討できなかったが、鉛直流れが卓越する場合より、破壊時の限界流速は小さくなる点については、2)で述べたように限界摩擦速度の考えが参考になると考えられる。
- 6)実地盤のような混合粒径の場合の限界流速の算定では、調和平均径 (D_w) の利用することで、概ね評価できることが分かった。しかし、Kenney の不安定粒度について調べることで、推定値と異なることが明らかとなった。今回の実験では、推定値より大きな流速で破壊しているデータしかないので、さらなる粒度分布による層別の検討が必要と考えられた。

謝 辞

本研究は、科学研究費基盤 C(代表 山田公夫)、中部大学特別研究費 A の補助を受けました。また、実験においては、

本研究室の学生のご協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉井俊夫・佐藤健・宇野尚雄・山田謹吾：浸透破壊の発生プロセスと土の非均質性，土と基礎，Vol.37, No.6, pp.17-22, 1989.
- 2) Justin,J.D : The Design of Earth Dams, Trans of ASCE.Vol.87,pp.49~54,1923.
- 3) 土質工学会：土質工学会土質工学ハンドブック改訂編集委員会編,土質工学会,pp.1222~1223,1982.
- 4) 大野睦雄・山崎弥・トラデック・フィオン：砂のパイピング特性に関する実験的研究(続),間組研究年報,pp.33~40,1984.
- 5) 杉井俊夫・山田公夫・中島賢：多粒子限界流速を用いた地盤の浸透破壊メカニズムに関する研究，地盤の浸透破壊のメカニズムと評価手法に関するシンポジウム論文集, pp.123-128, 2002.
- 6) Richardson, J. F., et al. : Sedimentation and Fluidisation, Trans. Instn. Chem. Engrs., Vol.32, pp.35~53, 1954.; Vol.38, pp.33~42, 1960.; Vol.39, pp.348~356, 1961.
- 7) Rubey, W. W. : Settling Velocities of Gravel, Sand, and Silt Particles. , American journal of science, Vol.25, pp.325~338, 1933.
- 8) 久保田敬一・河野伊一郎・宇野尚雄：透水設計へのアプローチ，鹿島出版会，p.75~79, 1976.
- 9) 8)と同じ，p.76
- 10) 荒木正夫・椿東一郎：水理学演習(下),pp.185-194, 1962.
- 11) 岩垣雄一：限界掃流力に関する基礎的研究(I) 限界掃流力の流体力学的研究，土木学会論文集，第41号，pp.1-21, 1956.
- 12) 久楽勝行・吉岡淳・佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤の π 化 π について，第20回土質工学研究発表会，pp.1483~1484, 1985.
- 13) 中島秀雄・松原幹夫・飯島豊：X線写真を利用した π 化 π 現象の観察(第一報)，第20回土質工学研究発表会，pp.1479~1482, 1985.
- 14) 杉井俊夫・山田公夫・名倉晋：限界流速からみた浸透破壊の発生と進行，地盤工学会誌，Vol.57, No.9, pp.26-29, 2009.
- 15) Kenney, T.C.et.al : Controlling Constriction size of granular filter, Can. Geotech.J.22, pp.32-43, 1985.
- 16) 藤田重文・東畑平一郎：化学工学II，(株)東京化学同人，pp.7~15, pp.27~31, 1972.