

限界流速からみた浸透破壊の発生と進行

Critical Velocity for Progressive Seepage Failure and Change in Permeability

杉 井 俊 夫 (すぎい としお)

中部大学教授 工学部都市建設工学科

山 田 公 夫 (やまだ きみお)

中部大学教授 工学部都市建設工学科

名 倉 晋 (なぐら すすむ)

河合石灰工業㈱

1. はじめに

パイピング等の浸透破壊に対する安定性を判断する方法には「限界動水勾配」と「限界流速」による2とおりの考え方がある。前者は、Terzaghi (テルツァーギ) 式による地盤内の平均的な動水勾配から判断されるもので、透水層の透水性状が明らかで水位調節などによる圧力制御が可能な場合に適する。しかし、透水層の透水性が不均一な場合や洪水時の堤防漏水発生時では後者の基準が有意となる場合がある。後者は土粒子が移動しない限界の流速により判断され、土構造物中での流速の局所集中に伴う目詰まりによる2次的フィルター層が生じる場合や浸透距離が明確でなく動水勾配として扱えない場合に有効な判定基準である。そこで本報告では室内実験や他の研究者らの実験結果を通して汎用性のある「限界流速」を提案するとともに、粒径の均等な試料および異なる試料の限界流速式の適用性の検討を行い、フィルターの見詰まり評価の適用の可能性について言及している。

2. 限界流速式と適用性

2.1 従来の限界流速式¹⁾

限界流速式として、これまでに表1のようなものが提案されている。限界流速の考えは、1923年に Justin (ジャスティン) によって提唱された。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乱流域での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、過大評価になる。また、Koslova (コスロバ) 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あいまいな点がある。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。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えており、周りに存在する粒子の影響を考慮していない。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

表1 浸透破壊における限界流速

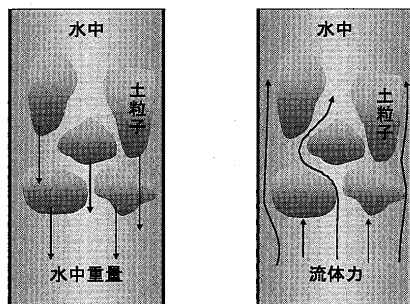
提唱者	限界流速式
Justin (1923)	$v_c = \sqrt{\frac{2}{3}} g(Gs-1)d$ ここに、 v_c :限界流速, g :重力加速度, Gs 土粒子の比重, d :土粒子径
Koslova	$v_k = 2.6d^2 \left(1 + 1000 \frac{d^2}{D^2}\right)$ ここに、 v_k :流速, D :平均粒径
大野ら (1984)	均等径の場合 $v_p = 2.25d^{1.94}$ 混合径の場合: 粒度分布 20 から 30% 粒径に対する限界流速 v_{pc} :限界流速
流動化開始速度	$v_l = \frac{\phi_c}{180\nu}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

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釣り合いから導かれており、Terzaghi式と同義である。しかし、Carman (カルマン) の形状係数や等体積相当粒子径などの値が必要であることや、層流状態のみに適用可能である問題がある。

2.2 多粒子限界流速¹⁾

流動化開始速度以外の限界流速式は、移動する土粒子周りの干渉を考えず、土粒子レベルの掃流力として考えられていた。しかし、実際の土中水は間隙中を浸透するため、土粒子周辺の干渉の影響を考える必要がある。そこで、著者らは沈降速度式で用いられる干渉沈降速度の考え方を援用した。干渉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 (Richardson (リチャードソン) 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半理論式であるが適用範囲も広く精度も高い式 (1) の Rubey (ルベイ) の砂粒の沈降速度より求められる。

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



図—1 干渉沈降速度(左)と多粒子限界流速(右)

ここに、 ρ_s : 土粒子密度 [g/cm³], ρ_w : 液体の密度 [g/cm³], μ : 液体の粘性係数 [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 の多粒子干渉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。著者の杉井らは Richardson らの補正係数を用いて式(2)のような多粒子限界流速を提案した²⁾。

$$v_{cm} = n^{(1/m)} \cdot v_c \dots\dots\dots (2)$$

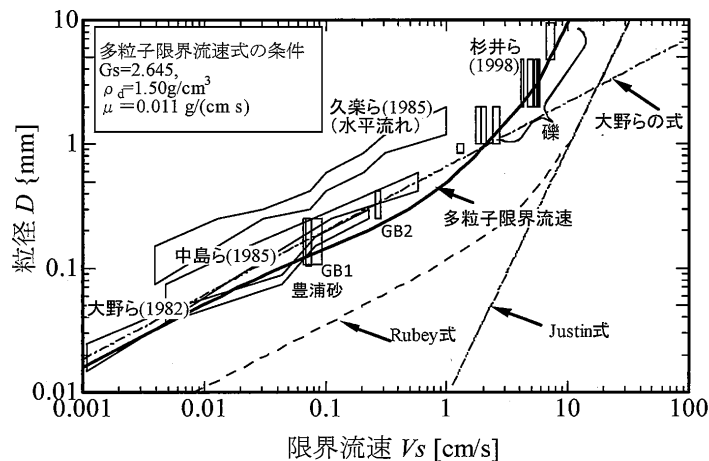
しかし、Richardson の干渉沈降速度の補正係数は容器に対する相対速度であるので、液体に対する相対速度で修正した補正係数 ($1/m'$) を式(2)の補正係数 ($1/m$) に替えて、多粒子限界流速を求め直した¹⁾。なお、 $1/m'$ は Reynolds 数によって決まる補正係数(式(3))である。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Re} < 0.2 & \text{のとき } 1/m' = 3.65 + 19.5 \cdot d/D \\ 0.2 < \text{Re} < 1.0 \text{ のとき} & \\ 1/m' = (4.46 + 17.6 \cdot d/D) \text{Re}^{-0.03} - 1 & \\ 1.0 < \text{Re} < 500 & \text{のとき } 1/m' = 4.45 \text{Re}^{-0.1} - 1 \\ 500 < \text{Re} < 7000 & \text{のとき } 1/m' = 1.39 \end{array} \right\} \dots\dots (3)$$

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。

図—2 に均一粒径試料についての浸透破壊実験への適用結果を示す。実線の矩形は乾燥密度 1.50 g/cm³ の標準砂、ガラスビーズ、礫の浸透破壊実験値であり、多粒子限界流速とよく一致していることがわかる。また、Rubey 式と Justin 式は、粒径 1 mm 以上の場合に両線が重なり、Justin 式は単粒子の終局速度となることが明白である。さらに乱流域での適用性を見るために、礫の実験結果を示した。礫の場合では乾燥密度が粒径によりやや異なるが、おおむね多粒子限界流速で説明できることが分かる。

図—2 には他の研究者らによって行われた実験結果についても同様に実線で囲んで表した¹⁾。中島、大野らの結果は多粒子限界流速式とよく一致している。しかし、久楽らの結果は水平方向浸透流が卓越している実験であるため、破壊時の実験値である限界流速が小さくなっている。すなわち、鉛直方向の 3 分の 1 の限界流速よりも小さな流速で破壊が生じている。多粒子限界流速は鉛直方向の釣合いから導かれているため、水平流れが卓越



図—2 限界流速式と実験値の比較

する場合についての更なる検討が期待される。

3. 粒径が異なる試料の限界流速

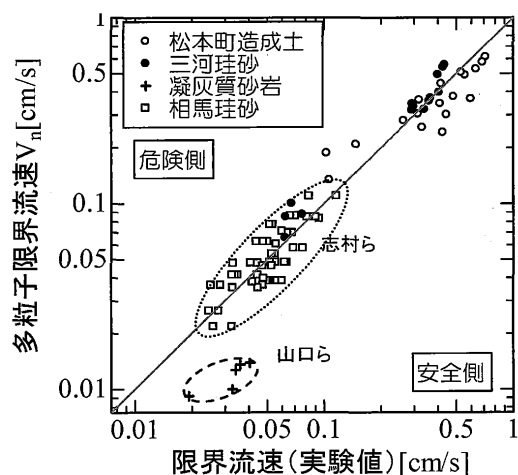
多粒子限界流速式で算出されるのは、ある粒径に対する限界流速であるため、異なる粒径の混合試料の場合は、どの粒径を用いて算出するかを検討しなければならない。多粒子限界流速式は水中重量と流体による圧力および粘性抵抗とが釣合うことから導かれているため、その大きさには、原理的に比表面積の影響が大きく寄与すると考えられる。しかし、比表面積についての測定は今回行っていないため、体面積平均径 D_w を用いて粒度分布の代表径とすることとした。体面積平均径 D_w は透水性や間隙径を表現する代表径として用いられる場合が多く、式(4)によって計算される。

$$\frac{1}{D_w} \sum (P_i/D_i) \dots\dots\dots (4)$$

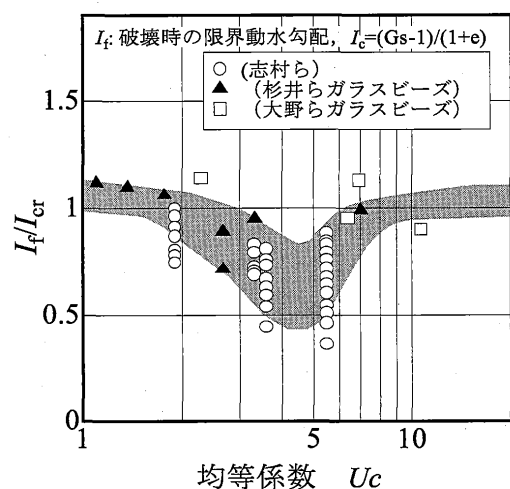
ここに、 P_i : 粒径範囲 i に含まれる質量含有率 [%], D_i : 粒径範囲 i における平均径 [mm], である。

図—3 には、粒度分布の広い土(混合径試料)の鉛直一次元浸透破壊実験の結果および著者らが文献から D_w で算出した結果とともに示した。志村ら³⁾の結果はよく実験結果と一致した値が得られた。しかし、山口ら⁴⁾の実験値は、多粒子限界流速より大きめに出ている。これは、山口らは破壊の認定を透水係数の変化、比例限界より算出しており、著者らの破壊の認定としてはその前段階の表面膨張開始時をとっているためである。

図—4 には、志村らの実験データもあわせて均等係数に対する破壊時動水勾配と限界動水勾配との比を示した。図より均等係数が大きくなるにつれらつきが大きくなり、限界動水勾配よりも小さい値で破壊する可能性を示している。このことから、均等係数が大きくなると動水勾配による危険判定よりも限界流速による粒径による浸透破壊発生の判断が有効であることが示唆される。この理由として、浸透破壊発生時において粒子移動が局所的に発生し、目詰まりによる局所動水勾配の発生の可能性が考えられる。そこで次に、浸透破壊までの内部の間隙変化を調べることにした。



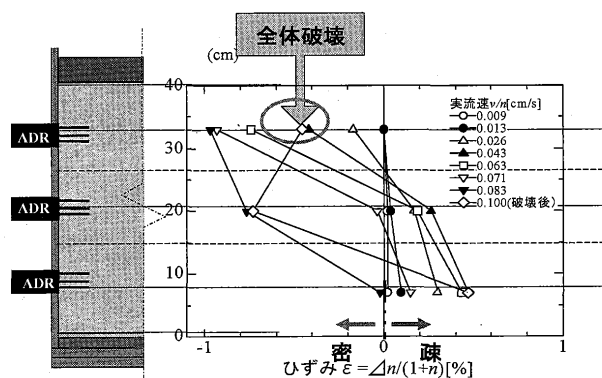
図—3 混合径の限界流速



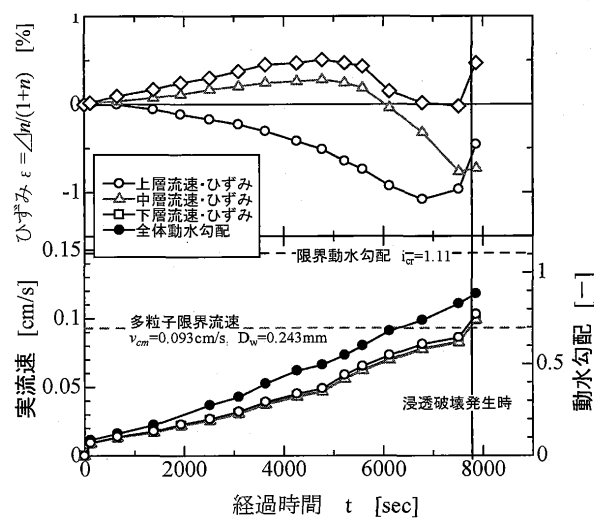
図—4 均等係数と限界動水勾配のばらつき

4. 浸透破壊中の間隙率の変化

間隙変化の測定には、体積含水率を計測する土壌水分計 (ADR: Amplitude Domain Reflectometry) を用いることとした。飽和土の体積含水率は間隙率に等しいことから、局所的な間隙率の変化を計測可能と考えた。また、表面変位をレーザー変位計で計測し、破壊を表面膨張の発生時点とした。混合径試料には、 $G_s=2.645$, $D=0.038 \sim 2.0$ mm, 均等係数 $U_c=4.0$, $D_{50}=0.265$ mm, $D_w=0.243$ mm, 初期間隙率0.383のものを使用した。得られた間隙率より算出した体積ひずみを図—5, 6に示し鉛直一次元方向のひずみとして考えている。図—5は全体の見掛けの流速を平均間隙率で除した値を実流速として示している。実流速が上昇するとともに、下層から疎に、上層部で密になる傾向がわかる。最終的には、上層部での最も密な状態が破壊とともに疎に急増しており、上層部の密度がトリガーとなっている。細かい粒子が流速の増加とともに移動して粒度の再分配による目詰まりが生じているものと考えられる。図—6は、各層のひずみ、実流速、全体の動水勾配の時刻歴を示す。これより、全体の動水勾配が限界動水勾配に達していなくても、破壊が生じていること、 D_w を使用した多粒子限界流速では



図—5 土中の間隙率の変化の計測



図—6 混合径試料の限界流速と限界動水勾配

破壊時の実流速を予測できていることがわかる。全体の動水勾配では、粒度の再分配による目詰まりによる局所的な動水勾配を評価することができないためと考えられる。なお、計測した破壊時の上層部、中層部および下層部の動水勾配はそれぞれ、1.296, 0.962, 0.246であった。以上の実験結果から、粒度分布によって粒度の再分配による目詰まりが生じる場合には、全体の動水勾配よりも小さな動水勾配で破壊が発生することがあり、限界流速が破壊の判断に有効であること、特に図—4のように均等係数に依存することにも関係することが推察できる。

5. フィルターの見詰まり評価への利用⁵⁾

前節までに、粒度分布によって限界流速に達した土粒子に移動できる間隙があれば、粒度の再分配が生じ目詰まりが生じることを確かめてきた。著者らは、この考え方をフィルター材の見詰まり評価に適用する検討を行った。なお、ここではすべての粒子が限界流速に達し移動可能である場合を想定している。今回、原土がフィルターに流入し透水性の変化を評価する方法に、図—7に示す Kenny (ケニー) ら⁶⁾のフィルター自身の安定性を評価する H/F 指標を用いた。間隙が形成するくびれ径と移動粒子の存在を評価する方法である。この考え方を、フィルター層と原土材との境界の薄い混合層でできる混

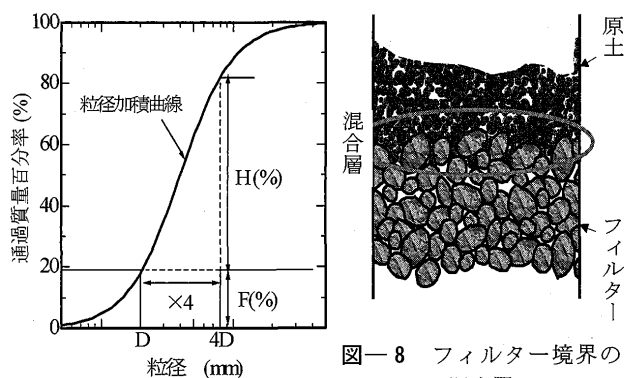


図-7 H/F 指標

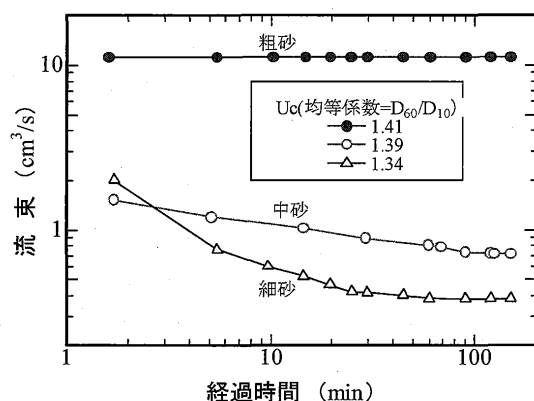


図-9 フィルター試験における流束の低下

合粒度分布を考え Kenny らの H/F 指標を導入して目詰まりを評価する。 H/F が 1 以上 ($H/F \geq 1$) のとき境界の混合層は安定しており、粒子の移動が生じない。逆に $H/F < 1$ のとき、境界の混合層では細かい粒子が間隙を通して移動するため不安定となるといった判定指標である。また、Kenny らによれば最大の間隙くびれ径を D_c^* (Controlling Constriction Size) と定義し、浸透長さ L が D_c^* の 200 倍を越えると D_c^* は最小粒径の 0.25 倍に等しくなることを得ており、これにより境界の混合層からフィルター流入した原土の粒子がフィルター D_c^* より大きければフィルターに捕捉され、小さければ流出するものと考え、実験結果をもとに検証してみた。

図-9 は Indraratna ら⁷⁾ のラテライトを原土として 3 種類の粒状フィルター材を用いた実験のフィルターの流速の変化を示している。粗砂の透水性は変化なく、細砂はすぐに透水性が低下し安定している。一方、中砂は時間が経過しても低下し続けていることがわかる。これに、フィルター境界の混合粒径の粒度分布を考え、 H/F で評価したのが、図-10 である。細砂のフィルターは $H/F > 1$ 以上で混合層に原土が捕捉される。一方、中砂は、 $H/F < 1$ の部分があるため、混合層から流失するが、 $D_c^* = 0.055 \text{ mm}$ 以上の原土はフィルター層で捕捉され、目詰まりが進行していくことが推察される。また、粗砂

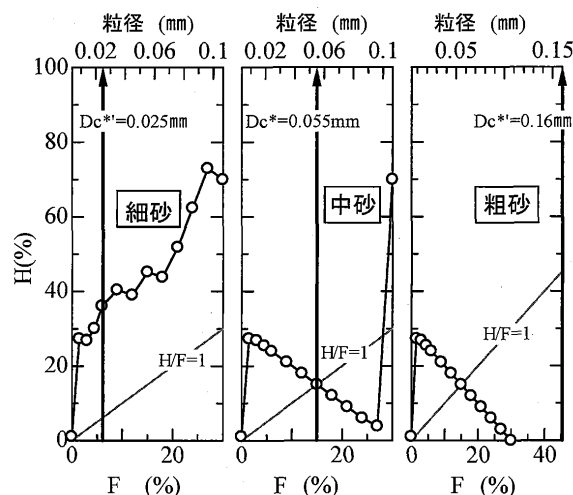


図-10 H/F 指標による目詰まり判定

においては、 $H/F < 1$ があるが、 $D_c^* = 0.16 \text{ mm}$ よりもいずれも小さいため、フィルターを通過して流出し透水性は変化しないことが推察でき、実験結果の透水性挙動を説明できた。

6. おわりに

多粒子限界流速式の提案と間隙に進入することで粒度再配分の発生による目詰まりの現象を確認し、粒度分布の違いによって限界流速の有効性を示した。また、粒度の再配分の考え方を、フィルター材と原土の境界の混合層の安定からフィルター材の目詰まりについても検討し透水性挙動を説明することができた。今後のデータの蓄積と実務での検証を望む。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 志村孝吉：粗粒土における限界動水勾配について，電力中央研究所報告，No. 71001, 1971.
- 4) 山口嘉一・山本重樹：凝灰質砂岩のパイピング抵抗性評価，土木学会第55回年次学術講演概要集，Ⅲ-A236, 2000.
- 5) 杉井俊夫・山田公夫・Indraratna, B.：粒状性フィルターの透水挙動の評価，中部大学工学部紀要，pp. 1~9, 2008.
- 6) Kenny, T. C. et. al: Controlling Constriction size of granular filter, *Can. Geotech. J.* 22, pp. 32~43, 1985.
- 7) Indraratna, B., Vafai F. and Dilema E.: An experimental study of the filtration of lateritic clay slurry by sand filters, *Proc. Inst. of Civ. Engrs., Geotech. Engrg.*, London, 119 (2), 75-83, 1996.

(原稿受理 2009.5.26)