

浸透破壊における内部浸食の発生メカニズムと評価法

限界流速 間隙くびれ径 粒子レベル

中部大学工学部 正会員○杉井俊夫
中部大学学生 長瀬弘己 末松知奈
国土交通省中部地方整備局 小竹亮太

1. まえがき

地盤の内部浸食の発生機構には、土塊(連続体)として扱う動水勾配だけでは難しく、粒子レベルの考え方が必要となる。Kenney ら¹⁾は粒状性フィルターの内部安定性として「粒度分布」と「間隙くびれ径」の実験的關係から安定、不安定を判断する指標を提案してきたが、実務では不安定と評価されるケースが多かった。著者らはこれまでに、間隙率を考慮した限界流速である多粒子限界流速²⁾を提案してきたが、水平流れの適用まで至っていなかった。本稿は、Kenney らの指標を土の排水過程の水分特性曲線から間隙径分布を計測することで修正可能であること、多粒子限界流速が水平流れにも適用できることから両者を用いることで浸食発生の評価が可能であることについて言及する。

2. 内部浸食の発生に関する粒子レベルから考える誘因と素因

(1) 粒子レベルからみた素因

土粒子が移動することを考えると移動スペースが必要となる。すなわち移動する粒子径よりも間隙の径が大きくなければならない。いくら大きな流速を受けても間隙径よりも大きな粒子は移動しない。試料によっては、あるところまで粒子が移動して小さな間隙径に捕獲され、試料内部での粒度分布の再配分が生じ、局部的に動水勾配が大きくなり最終的に土塊として移動することになる。単一粒径の場合には、Terzaghi の限界動水勾配に一致するのは、土粒子が移動する間隙が小さいため、土塊として動くことと、すべての粒子が同一流速で浮上することからも説明できる。これらのことから、土粒子の径がそれらで作る間隙径よりも小さい条件が素因となる。

(2) 粒子レベルからみた誘因

内部浸食は粒子の移動が継続的に拡大していく進行性破壊であり、そのトリガーである粒子移動速度に着目できる。鉛直方向流れの一粒の土粒子の浮上する速度は、等速運動で沈降する球状を仮定した場合 Stokes の式や Allen の式のように力のつり合いから算定できる。しかし、複数の粒子群の中で浮上する速度は、粒子周りの干渉流れの影響を受けるために、単粒子の場合よりも小さな流速で力がつり合って浮上を開始する。一方、水平に移動する場合、土中にあっても地表面にあっても粒状材料である土は、よほどに緩い間隙の場合以外は、隣の粒子を乗り越える必要がある(図1)。そのためには、粒子は上向きに上昇する必要がある。このように、粒子レベルのからみた誘因には間隙中を流れる実流速が誘因となる。

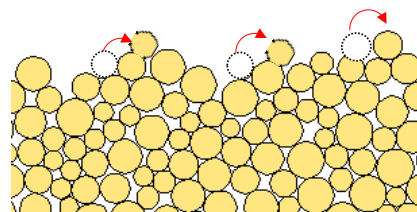


図1 土粒子の水平移動開始時

3. 粒子レベルからみた素因の評価

(1) Kenney のフィルターの内部安定指標

Kenney らは、8種類の孔を開けた板を用いての浸透及び振動試験より、粒状材料が形成する間隙の「くびれ径」を求め、ある粒径が形成する最小のくびれ径から内部安定指標を提案した。図2に示すように粒子群によって形成されるくびれ径を「間隙くびれ径」(Constriction size of filter) : D_c' とし、それら試料を通過してくる中で最大粒子の径を支配間隙くびれ径「Controlling Constriction Size」: D_c^* と定義するとともに、浸透長さが D_c^* の値の200倍を超えると、 D_c^* は最小粒径の約0.25倍に等しくなることを得た。この D_c^* を用いることにより、図3(a)に示すような粒度のフィルター材が内部侵食を起こさないためには、対象となる粒径 D の4倍粒径($4D$)の粒子質量含有率 (H) が、粒径 D の質量通過百分率 (F) 以上存在する必要があることを示した。すなわち、「 $H/F \geq 1$ 」のときには安定、「 $H/F < 1$ 」のときは不安定、と内部安定性を判断する指標を提案した。すべての粒子が安定であるには図3(b)のような粒度を4分の1とした粒度分布で比較することで容易になる。なお、 $H+F \leq 1$ であるため、 F は最大50%までを検査すればよい。図4に示すように $H \geq F$ の試料Aは安定、 $H < F$ の試料Bは不安定な試料と判断される。なお、Kenney らは、振動機による締め固めを行い、粗密について厳密には定義して

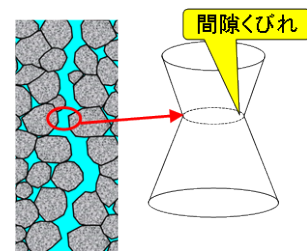


図2 間隙くびれ径

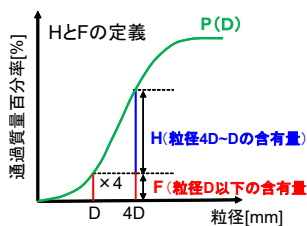


図3(a) HとFの定義

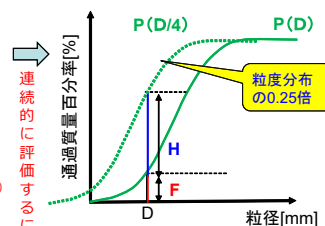


図3(b) 粒度分布とHF

おらず、相対密度も示されていない。砂のような均等係数が小さい土試料の場合には最大乾燥密度に近い値になると考えられるが、均等係数が大きい土試料では最大乾燥密度になっているとは判断しにくいことが考えられ、本研究では次に示すように、高密度を考慮した間隙くびれ径を求めることを検討した。

(2) 水分特性曲線からの間隙径分布

神谷³⁾は、水分特性曲線から得られる間隙径分布を「水分法」として呼び、「水銀圧入法」や「空気圧入法」によ

て得られる間隙径分布と異なること、また「水分法」による間隙径分布は、粒度分布と形状が類似しており、砂の場合には粒度分布の粒径の0.2-0.3倍であることを示した。著者らは、この結果が最大の間隙くびれ径の4分の1(=0.25)に非常に近い値であることと粒度分布と形状が類似していることから、Kenneyらのくびれ径分布が排水過程の「水分法」⁴⁾による間隙径分布に相当するものと仮説をたてた。排水過程の水分特性曲線は、図5のように排水過程の水分特性曲線の負の圧力水頭(サクション)は間隙水を含んでいる毛管の中で最も細い毛管径(くびれ)によって決定されることからKenneyらの間隙くびれ径に相当すると推察できる。そこで本研究では2連式の加圧型保水性試験装置を用いて、均等係数の違い、乾燥密度の違いによる間隙径分布を計測した。図6に示すような試験装置を用い、供試体は100mL定容量モールドに締固め飽和状態とした。用いた試料の諸元を表1に示す。

(3) 水分特性曲線から間隙径分布の算出

間隙径分布を求めるために、水分特性曲線(排水過程)(図7)から式(1)のvan Genuchtenモデルを同定する。式(2)のように毛管径(間隙径)と毛管上昇高の関係から、式(1)に代入することで累積間隙体積率 V_r を求めた(図8)。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(1 + |\alpha h_p|^{n^*} \right)^{-(1-n^*)/n^*} \quad (1)$$

ここに、 Se : 有効飽和度、 θ : 体積含水率、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 最小含水量、 α 、 n^* : van Genuchtenパラメータである。

$$h_p = \frac{4\sigma}{\rho_w g d_m} \quad (2) \quad V_r = \left[1 + \left(\alpha \frac{4\sigma}{\rho_w g d_m} \cdot 10 \right)^{n^*} \right]^{-1 + \frac{1}{n^*}} \quad (3)$$

ここに、 h_p : 負の間隙水圧、 ρ_w : 水の密度(g/cm³)、 g : 重力加速度(cm/s²)、 σ : 水の表面張力(水温15℃時73.46dyne/cm)

(4) 間隙くびれ径分布の測定結果

表1で示すように3つの土試料について水分特性曲線から得られた間隙くびれ径分布を図9~図11に示す。それぞれには同時に粒度分布およびKenneyらの間隙くびれ径である粒度分布の0.25倍にしたものを示している。この結果から、豊浦砂は、乾燥密度が大きくなるほどKenneyらの値に近づいていくことがわかり、Kenneyらは最も密な状態に対応していることが推察できる。一方、サバ土、堤防土ではKenneyらの間隙くびれ

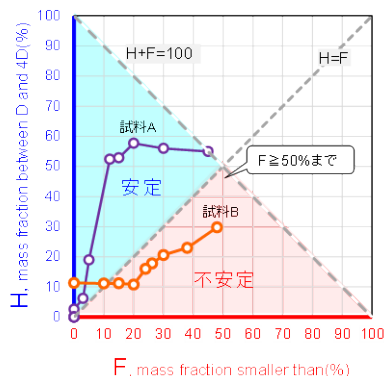


図4 KenneyらのH-F shape Curve

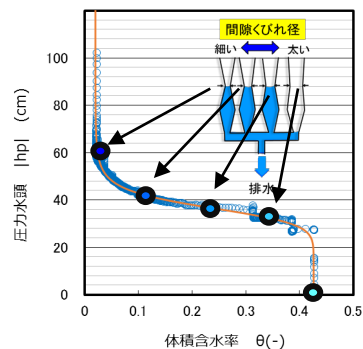


図5 間隙くびれ径と水分特性曲線

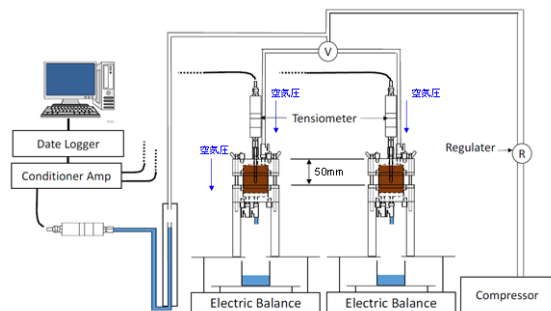


図6 保水性試験概略図

表1 試験試料

ケース	試料	均等係数 Uc	乾燥密度 γ_d (Mg/m ³)	相対密度 Dr (%)
Case T1	豊浦砂	2.3	1.517	57.5
Case T2			1.546	66.8
Case T3			1.620	90.4
Case S1	サバ土	10	1.495	-
Case S2			1.569	-
Case S3			1.827	-
Case L1	堤防土 (粒度調整後)	608以上	1.414	-
Case L2			1.501	-
Case L3			1.721	-
Case L4			1.733	-

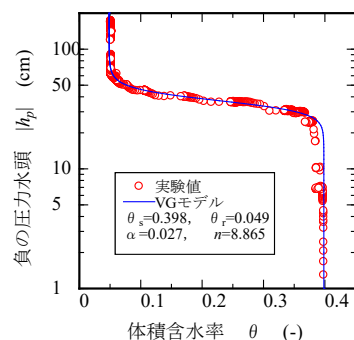


図7 豊浦砂の水分特性曲線(排水過程)

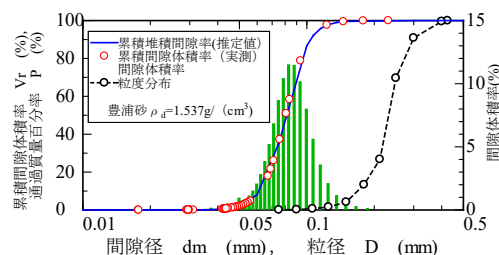


図8 間隙径分布と粒度分布

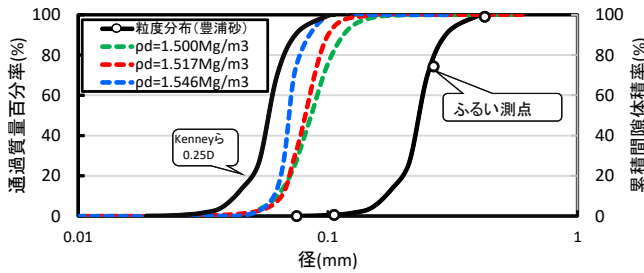


図9 豊浦砂の Kenney の間隙くびれ径と提案法

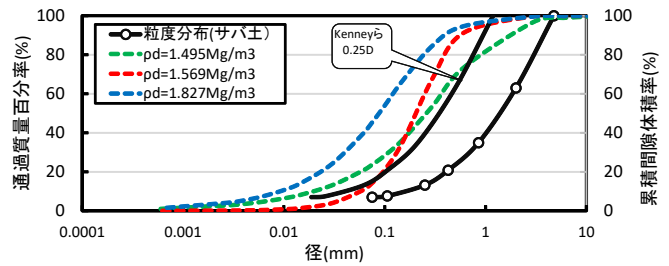


図10 サバ土の Kenney の間隙くびれ径と提案法

径よりも小さな間隙くびれ径分布が現れている (図10, 11). これより, サバ土や堤防土に Kenney らの 0.25D の値を用いて H/F を求めると小さな値となり, 不安定に評価されることになる. これは, Kenney が $U_c=1\sim 12$ の試料で振動法により締固めを行い実験で求めていることから, 均等係数が小さな試料においては最大乾燥密度近くになるが, 均等係数が大きな粒径範囲が広い土では, 間隙径を大きく評価してしまうことから不安定と評価されることが生じると考えられる. 以上より, 提案する排水過程の水分特性曲線からの間隙くびれ径分布から H/F 指標を使用することが適切であると考えられる.

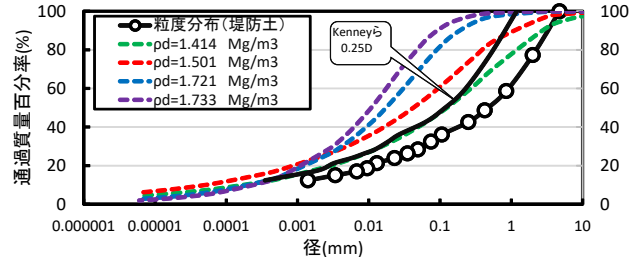


図11 堤防土の Kenney の間隙くびれ径と提案法

4. 粒子レベルからみた誘因の評価

(1) 多粒子限界流速の概要

著者らは鉛直方向の沈降速度式である多粒子限界流速式 (式(4)) を提案した. 多粒子限界流速式は Richardson の補正係数によって周辺粒子の影響を考慮した限界流速である. その補正係数には, 間隙率 (乾燥密度) の関数となっており, 間隙率が大きくなるほど限界流速が速く, 間隙率が小さいほど限界流速が遅くなることを評価することができる.

$$V_{cm} = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w(\rho_s - \rho_w)gd^3}{54\mu^2} + 1} - 1 \right\} \quad (4)$$

ただし, n : 間隙率, 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],

$$k_K = \frac{\gamma_w}{\eta} C_k \frac{e^3}{1+e} D_s \times \frac{1}{10^4} \quad (6)$$

ここに, γ_w : 水の単位体積重量, η : 水の粘性係数 (Pa·s),
 C_k : 形状係数 (Kozeny の半理論式 $8.2=0.0084 \times g$ 使用),
 D_s : 粒径(cm), e : 間隙比

多粒子限界流速式は, 式(4)で分かるように, 間隙率 n が大きくなると流速が大きくなるのがわかる. 検証のために粒子 Reynolds 数 <1 において多粒子限界流速と Terzaghi の限界動水勾配 $i_{cr}=(Gs-1)(1-n)$ と式(6)に示す透水係数を表す Kozeny の式(k_K)⁹⁾を用いて算出された浸透破壊時の実流速 ($V=k_K \times i_{cr}/n$) との比較を行った. 乾燥密度 $\rho_d=2.0, 1.5, 1.0, 0.5\text{g/cm}^3$ について算出した結果を図12に示す. これより, ダルシー則が成り立つ層流域では多粒子限界流速のように乾燥密度が大きくなるほど流速は大きくなり両者の速度は一致することが確認できる.

(2) 水平流れにおける多粒子限界流速式の適用

多粒子限界流速は, 鉛直流れにおけるつり合いから算出されているために, 水平流れが卓越する場合には適用できないものと考えられてきた. 一方, 岩垣の式⁶⁾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

$$\begin{aligned} Re < 0.2 \quad & \text{のとき} \quad 1/m' = 4.65 + 19.5 \cdot d/D \\ 0.2 < Re < 1.0 \quad & \text{のとき} \quad 1/m' = (4.46 + 17.6 \cdot d/D) Re^{-0.03} \\ 1.0 < Re < 500 \quad & \text{のとき} \quad 1/m' = 4.45 Re^{-0.1} \\ 500 < Re < 7000 \quad & \text{のとき} \quad 1/m' = 2.39 \end{aligned} \quad (5)$$

ここに, d : 粒子径[cm], D : 円筒管直径[cm],

Re : 粒子 Reynolds 数 ($Re = \frac{V_c d \rho_w}{\mu}$) である.

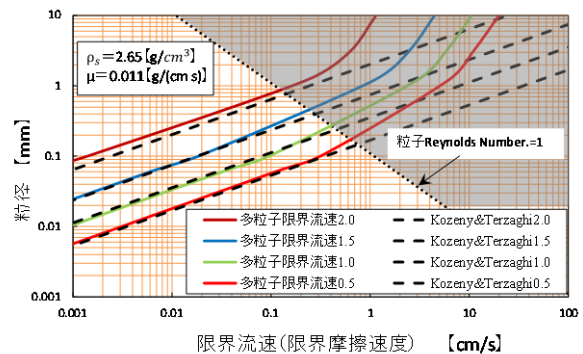


図12 乾燥密度の違いと多粒子限界流速と Kezeny&Terzaghi の限界動水勾配による流速の比較

れを対象としており、それ以外に図 13 に示した実験値は鉛直方向の一次元流れである。岩垣の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、実験値と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、多粒子限界流速式と岩垣の限界摩擦速度式が $\rho_s=1.11\text{g/cm}^3$ の乱流域で一致していることがわかる。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、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・吉岡ら^{7),8)}の実験は水平流れが卓越する場合を対象としており、図 13 からは多粒子限界流速式と離れていることがわかる。そこで、論文の実験データから

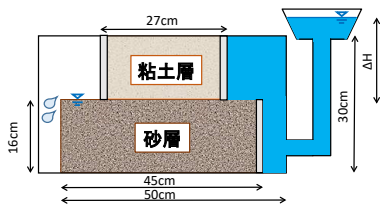


図 14 吉岡らの実験⁷⁾

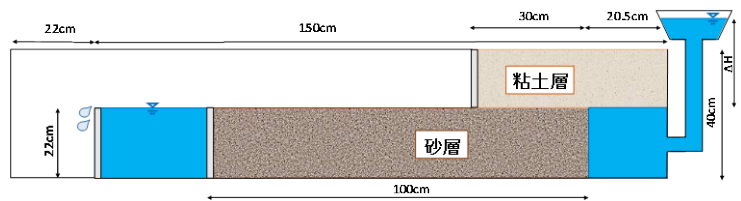


図 15 久楽らの実験⁸⁾

(図 14 及び 15) について飽和浸透流解析により破壊時の流速の鉛直成分の最大値を求め、多粒子限界流速と比較を行った結果が、図 16, 17 である。黒の実線が実験値の間隙率の最も大きいもの、破線が間隙率の小さいもの多粒子限界流速を示している。どちらの図も実験値の排水流量から得られた流速(緑実線)では、平均流速を表しているため、小さめに出ているが、解析で算出した流速の鉛直成分(青破線)は大きく、間隙率で除して実流速に算出した(赤実線)は黒の実線、破線に掛かってくる事がわかる。また、いずれも各粒径範囲の小さい径(縦線の下方)の多粒子限界流速で破壊していることが分かり、徐々に拡大進行していくと考えられ、現象を説明することが可能である。なお、図 17 の久楽らの実験値で Reynolds 数 > 1 を超える領域では、ダルシー則から乖離するため、層流から乖離した実験データとダルシー則を使った数値解析において差が現れたのではないかと考える。

これらの結果から水平流れが卓越する場合においても鉛直成分の流速が多粒子限界流速に達したときから粒子移動が生じ破壊につながるものと考察でき、水平流れが卓越する場合にも先の図 1 に示した仮定が成り立つものと考えられる。

5. おわりに

内部浸食破壊の素因と誘因についての評価法を提案した。実際には、間隙率によって異なってくる間隙くびれ径の分布と粒度分布を比較し、移動する可能性の粒子径に着目する。その粒径に対する多粒子限界流速を計算することで粒子が移動流出することを評価できる。その後、粒度分布、間隙くびれ径分布の再配分が生じ、間隙内の流速(実流速)が変化し安定することになる。今後、浸食拡大現象の表現についての検討および DEM による多粒子限界流速を用いた粒子の浸食のシミュレーションについて検討していく予定である。

【参考文献】 1)Kenneyら: Internal Stability of Granular Filters: Reply. Canadian Geotechnical Journal, 23, 1986, pp.420-423 2) 杉井ら: 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)神谷: 砂質土の間隙径分布の評価とその利用, 岐阜大学学位論文, 1999, 107p. 4)Haverkampら: Predicting the water-retention curve from a particle-size distribution 1. Sandy soils without organic matter, Soil Science, 142, 1986, pp.325-339. 5) 久保田ら: 透水設計へのアプローチ, 鹿島出版会, p.75~79, 1976. 6)岩垣: 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 41 号, pp.1-21, 1956. 7) 吉岡ら: 水平方向の浸透流によるパイピング現象について, 土木学会年次学術講演概要集, 1984. 8)久楽ら: 水平方向浸透流下における砂地盤の「変化」について, 第 20 回土質工学研究発表会, pp.1483~1484, 1985.

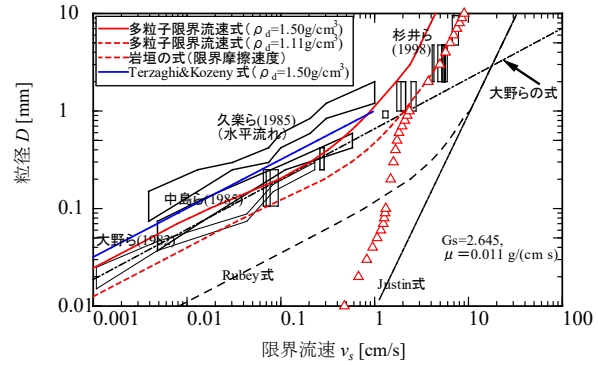


図 13 多粒子限界流速と他の実験式

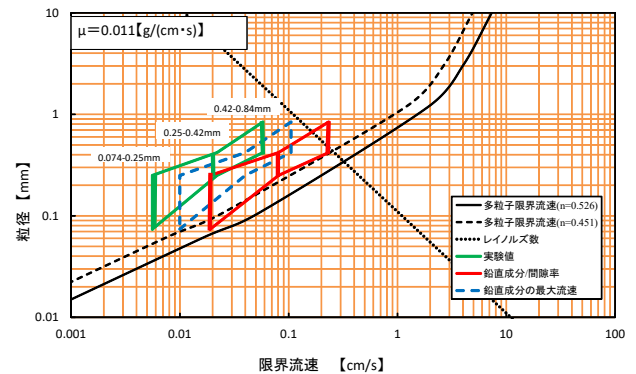


図 16 吉岡らの実験⁷⁾と多粒子限界流速

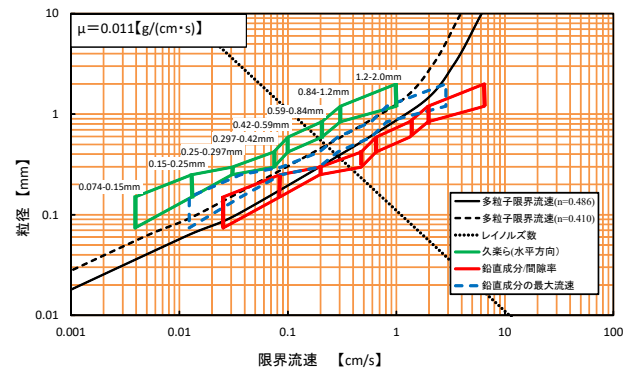


図 17 久楽らの実験⁸⁾と多粒子限界流速