限界流速 間隙くびれ径 粒子レベル

中部大学工学部 正会員〇杉井俊夫 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」の実験的関係から安定、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、局所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、



間隙くびれ

間隙くびれ径

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.

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): Dc'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」: Dc*と定義するとともに、 浸透長さが Dc*の値の 200 倍を超えると、Dc*は最小粒径の約 0.25 倍に等しくなるこ とを得た.この Dc*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)のよう粒径を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%までを検討すればよい. 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 機による締固めを行い, 粗密について厳密には定義して





図 2

SUGII, T., NAGASE, K. and SUEMATSU, C., Chubu Univ., KOTAKE, R. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

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 しように、 嵩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」によっ

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も 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 Vr を求めた(図8).

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

Se:有効飽和度, θ :体積含水率, θ s:飽和体積含水率, θ ここに. $r: 最小容水量, \alpha, n^*: van Genuchten パラメータ である.$

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

ここに、hp:負の間隙水圧、ρw: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で示してように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





0.5

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	乾燥密度	相対密度
		Ue	$\gamma_d (Mg/m^3)$	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9 豊浦砂の 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 Uc=1~12 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



図10 サバ土の Kenney の間隙くびれ径と提案法



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.

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も評価することができる.

$$V_{c_m} = n^{1/m} \frac{6\mu}{\rho_w d} \left\{ \sqrt{\frac{\rho_w (\rho_s - \rho_w)g d^3}{54\mu^2} + 1} - 1 \right\}$$
(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],

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

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×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ことがわかる.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)⁵⁾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, 0.5g/cm³ 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

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





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ついては適用 できないものと考えられてきた.一方,岩垣の式^の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ρd=1.11g/cm³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 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ことがわかる.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.



大野に

多粒子限界流速式($\rho_d=1.50g/cm^3$) 多粒子限界流速式($\rho_d=1.11g/cm^3$) 岩垣の式(限界摩擦速度) Terzaghi&Kozeny式($\rho_d=1.50g/cm^3$

久楽ら(19 (水平流)

10

1



図15 久楽らの実験⁸⁾







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: 透水一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パイピングについて,第 20 回土質工学研究発 表会, pp.1483~1484, 1985.