浸透流れ場における粒子有効力の提案

中部大学工学部 正会員〇杉井 俊夫 中部大学大学院 学生員 朱 ハツユ

1. はじめに

堤体基礎におけるパイピング・浸透破壊に関する研究は、「古くて新しい研究」と言われてきた。これには 土塊としてのつり合い、すなわち有効応力が消散する Terzaghi の限界動水勾配で説明されてきたが、土の非 均質性や細粒分移動など内部浸食が発生する場合については正しく評価ができていないことから永く研究さ れてきた点にある。土中内部の浸食現象、地表面侵食現象は、時間とともに空間的な境界条件が変わる(進 行性の)ために、連続体として取り扱うことが難しかった。著者の杉井が提案してきた多粒子限界流速は粒 径が異なる個々の粒子を対象としていることから粒状体を取り扱うには都合がよい。多粒子限界流速は粒子 群のなかで個々の粒径に対応する流速(実流速)に達すると粒子の水中単位体積重量がゼロとなる状態を示 しており、浸透破壊現象の発生条件として扱ってきた。しかし、この考え方を利用することで水中単位体積 重量を減少させていく過程を表現することができる。本報告は、これまで考えられてきた有効応力の考え方 にかわって新たな粒子単位の「粒子有効力」として考えていくことを提案するものである。

2. 多粒子限界流速の概要

粒子群が水中を沈降するときには、周辺粒子の干渉を生 じることで単一粒子の沈降速度よりも速度が遅くなる。杉 井らは、粒子を固定し、相対的な間隙中の平均実流速に干 渉沈降速度の考え方を援用し、多粒子限界流速を提案した。 多粒子限界流速式は干渉沈降速度のRichardsonの補正係数 (式(1))と同じ値を使用している。間隙率が大きくなるほど、 つりあう多粒子限界流速は速く、最終的には単一粒子の沈 降速度と等しくなる。なお、単一粒子の沈降速度には層流 から乱流域まで1つの式でできるRubey 式を用いている。

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

Re<0.2 のとき $1/m'=4.65+19.5 \cdot d/D$ 0.2 < Re < 1.0 のとき $1/m'=(4.46+17.6 \cdot d/D) \text{Re}^{-0.03}$ 1.0 < Re < 500 のとき $1/m'=4.45 \text{Re}^{-0.1}$ 500 < Re < 7000 のとき 1/m'=2.39 (2) ここに、d: 粒子径[cm], D: 円筒管直径[cm],Re: 粒子 Reynolds 数 $\left(\frac{\text{Re} = \frac{V_c d\rho_w}{\mu}}{\mu}\right)$ である。





図2はこれまで行ってきた多粒子限界流速式の適用結果である。なお、久楽らのデータは水平流れが卓越す る実験である。多粒子限界流速は鉛直方向のつり合いであり、水平流れには適用できないようであるが、著 者らは、数値解析実験で久楽らの実験結果を再現し、速度の鉛直成分の最大値を実流速に換算した結果、一 致することを確認している。これは、粒子が浮上することが必要条件であるものと考えられた。

3. 個別要素法への適用方法

多粒子限界流速に達した粒子は、慣性力の重量がゼロとなることを考慮することで2次元の個別要素法 (DEM)でシミュレーションすることができる。今回は、4種類の粒径について構成される土試料を想定した。 解析粒子の条件を表 1、粒径を表 2 に示す。2 次元の DEM では、浸透流 を直接発生させることはできないた め、次のようなアルゴリズムで計算 することとした。各々の粒子径に対 する多粒子限界流速に達するとそれ

表1 粒子の物理諸量		
土粒子の密度ρ。	2.65	
(g/cm^3)		
水中密度 ρ's (g/cm ³)	1.65	
間隙率 n	0.377	
粘性係数 μ	0.011	
粒子数(個)	1000	

土木学会中部支部研究発表会 (2018.3)

a_i勾配

多粒子限界流速 流速

表2 粒径と多粒子限界流速

粒径	多粒子限界流速	係数
(mm)	(cm/s)	a_i
0.065	0.00355	276343.1
0.565	0.32054	3057.4
1.18	0.72274	1356.0
3.03	1.73152	566.0

粒径1<粒径2<粒径3<粒径4

水中重量(粒子有効力)の減少

図3 粒子の有効重量の減少の考え方

-980

重

力

速

度

980

m/s

加 0

ぞれ水中単位体積重量がゼロとなるように、重力加速度を減少さ せていく(図3)。ここで、次の3つの条件を仮定している。一つ には、個々の粒子の重力加速度が一定の割合で減少していく(減 少率)。二つには、多粒子限界流速に達した後は、鉛直上向きに重 力加速度が同様に増加していく。三つ目には、粒子が移動しても 間隙率は変わらない、という仮定である。

4. 鉛直浸透流場のシミュレーション結果

図3に従って、4つの粒子で構成される試料について4つの流 速が負荷した場合の解析結果を図4(1)~4(4)示す。流速を0.1、

0.5、1.0、1.5cm/sとした場合の結果である。また、図5(1) ~5(4)には、粒子有効力が減少していく場合の 粒子間応力の分布を示す。 図4より流速が上昇するにつれ、細かい粒子から流出する現象がわかり、土中 の細かい粒子が上部へ移動している(図4(4))。同時に、小さい粒子が上部の粒子を押し上げるような形が 生じていることもわかる。粒子間の応力の分布を示した図5では、流速が0.1から0.5 cm/sへの増加ととも に応力が粒子間力が減少しているが、1.0 cm/s になると粒子間力は小さくなるところと大きくなる部分が現 れる。これは上昇粒子が上部の粒子を押し上げようとするために増加するものと推察された。



5. おわりに

多粒子限界流速を用いた「粒子有効力」についてシミュレーションを行った結果、粒子間力の減少及び上 昇する粒子による増加も部分的に生じることを確認することができた。今後は、「粒子有効力」を使った解析 の適用を行っていく。本解析は、筑波大学の松島によるプログラム(DEMseg)の一部改良して使用した。 【参考文献】1)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. 2)松島亘志:実際に個別要素法プログラムを動かしてみよう,個別要素法セミナーテキスト, 2010.