粒度分布形状に起因する内部浸食メカニズム に着目した細粒分のダイナミクスに及ぼす 間隙構造の影響

前田 健一¹・近藤 明彦²

¹正会員 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail:maeda.kenichi@nitech.ac.jp

²学生会員 名古屋工業大学大学院博士後期課程 工学研究科社会工学専攻 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)
E-mail:cir18503@stn.nitech.ac.jp

内部浸食問題において、粒子が移動できる間隙構造の条件と移動可能な状態にある粒子条件を定量化する必要がある。Kennyらの研究に始まる内部浸食の安定度と粒度分布形状との関係を踏まえ、粒度分布形状と間隙構造との関係を解明することで、メカニズムに基づく評価法と対策の提案ができると考えられる。そこで、本論文では、粒子流出を伴う一次元透水実験と三次元個別要素法解析による検討を試みた。実験では、内部浸食に対して不安定とされる粒度分布形状ほど流出量が増加し、透水係数の低下から目詰り発生が確認された。解析では、実験で流出量の多かった粒度分布形状ほど大きな間隙径と、その繋がり距離が長い間隙構造を有することが明らかになった。また、平均配位数など粒子骨格構造の安定性が高いほど内部浸食に対して安定であることが分かった。

Key Words : internal erosion, clogging, grading shape, pore structure

1. はじめに

近年、世界各地で地盤の陥没災害が発生しており、その発生箇所も水位変動がある護岸の背後地盤だけでなく、都市の劣化したライフライン周辺など多岐にわたる。発生箇所の現地調査からは、周辺地盤内においてゆるみ領域の形成と粒度分布が狭まること（細粒分の流出）が確認されている¹⁾。また、このような粒子流出現象は、地盤工学分野では内部浸食、海岸工学分野では吸出し、石油資源開発分野では出砂というように様々な分野で共通した問題である。しかし、陥没災害に有効な対策はもとより、細粒分の流出に起因する空洞の発生・進展メカニズムなど未解明な部分も数多く残されている²⁻⁴⁾。

一連の問題の起点となる内部浸食現象に関する既往の研究として、Kennyらの間隙くびれ径⁵⁻⁷⁾に着目した粒子流出に対する安定性の検討がある。これは、粒度分布中のある粒径 D が流出に対して安定であるには、その粒度の混合量 F に対して、粒径 D から4倍粒径 $4D$ までの粒子はフィルターとして働くことを示し、その混合量 H が $H/F > 13$ を満たす必要があるという成果である。

これを踏まえ、内部浸食現象をより統一的に理解するためには、流出粒径とその流出量という要素境界における現象だけでなく、内部での粒子一つの移動というミクロな視点からの挙動の理解が必要と考える。よって、本研究では、ミクロな視点として細粒分のダイナミクス（内部浸食・目詰り）の観点から、メカニズムの解明を目的としている。そのために、粒子が移動できる間隙構造の条件と粒子間の接触構造から移動可能な状態にある粒子の条件の検討が必要と考えた。

本論文では、Kennyらの安定性をもとに一次元浸透を模した模型実験を行い、粒度分布形状に起因した流出量を測定した。また、実験結果を参考にして、三次元個別要素法解析を行い、実験と同じ粒度分布形状の供試体における間隙構造⁸⁻¹¹⁾の特徴を調べた。着目点としては、粒状体中を粒子が通過する際の間隙径とその繋がり長さ、粒子間接触構造の安定性などである。この間隙構造の特徴と透水性や粒子の流出量の関係を定量的に検討することで、内部浸食における細粒分のダイナミクスについて考察した。

2. 透水力による内部浸食と粒子の移動特性に関する模型実験

(1) 実験方法と外力条件

模型実験は図-1 (a) に示す定水位一次元鉛直下向き浸透を模し、供試体下部からの流出量を計測した。流出粒子については、供試体底面に設置した多孔質フィルター盤によって0.300mm以下の粒子が通過できる。粒子は形状の影響を除き、粒度による幾何学的な考察を行うため球形ガラスビーズ（密度 $\rho_s=2.50\text{g/cm}^3$ ）を用いた。供試体の作成では、分級が発生しないよう良く混合した試料を1cm毎に突固めながら行い均質性を確保している。

内部浸食を引き起こす外力条件として、図-1 (b) に示す動水勾配 i の変化による透水力を作用させる。動水勾配は供試体高さ L に対する給水槽との水位差 H で管理し、本実験では $i=0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0$ の順に20分間隔で段階的に作用させた。

図-2には、実験試料の粒度分布を示す。粒度分布の最大粒径 $D_{\max}$ 、最小粒径 $D_{\min}$ は固定し、粒径の違いによる影響を除いている。粒度分布形状は大きく以下の4つに大別している。Kennyらの判定において流出しにくいとされる各粒径を均等に含有する直線分布 (st)、流出に対して不安定とされる分布 (sp)、stよりも中間粒径の多い安定とされる分布 (cv)、フラクタル (fractal) 分布（フラクタル次元 $FD=1.40$ ）である。なお、本実験においては、供試体は突き固めによって相対密度 $Dr=80\%$ の密な状態とした。

図-1 模型実験概要：(a)細粒分流出実験模型概略図，(b)外力作用としての動水勾配の経時変化

また、表-1には各粒度分布の間隙特性として10%, 50% 粒径 (D_{10} , D_{50})、最大・最小間隙比 ($e_{\max}$, $e_{\min}$)、粒子間骨格構造の変形の自由度を表す間隙比幅 ($e_{\max}-e_{\min}$)、供試体作成時の初期間隙比 e_0 を示している。

図-2 内部浸食に対する安定性を考慮した実験試料の粒度分布形状

表-1 試料の粒度分布と間隙特性

試料記号	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	$e_{\max}$	$e_{\min}$	$e_{\max}-e_{\min}$	e_0
st	0.103	0.360	0.467	0.329	0.138	0.367
cv1	0.101	0.300	0.531	0.359	0.172	0.386
cv2	0.100	0.280	0.503	0.379	0.124	0.403
cv3	0.099	0.250	0.584	0.431	0.153	0.459
cv4	0.085	0.140	0.482	0.375	0.107	0.399
cv5	0.090	0.260	0.475	0.342	0.133	0.370
sp1	0.109	0.755	0.516	0.315	0.201	0.389
sp2	0.115	0.850	0.530	0.353	0.177	0.365
sp3	0.111	0.920	0.530	0.423	0.107	0.437
sp4	0.120	0.600	0.552	0.365	0.187	0.371
sp5	0.130	0.600	0.554	0.374	0.180	0.403
sp6	0.250	0.750	0.605	0.424	0.181	0.463
Fractal	0.425	1.160	0.613	0.508	0.105	0.529

(2) 透水力の作用による粒子流出実験結果

図-3 透水力の単調載荷実験における累積流出量の経時変化

図-3に様々な粒度分布形状における透水力の単調載荷実験における累積粒子流出量の経時変化を示す。ここで、本稿における流出量は、全て粒度分布中の $D_f=0.300\text{mm}$ 以下の流出可能な粒子の含有量（流出可能量）に対する流

出量の割合と定義している。時間の経過と動水勾配の上昇によって、累積流出量は顕著な増加を示している。粒度分布形状ごとにみると、直線粒度 st と上に凸な形状の $cv1$ を下限として、下に凸な形状が st に対して10から100倍の流出量が見られる。上に凸な形状においては、流出可能量の最も高い $cv4$ の流出量が顕著に高く、 st に対して最大5倍の流出が発生している。この傾向はKennyらの提案指標による検討結果とも一致する。

また、個々の流出量においても、上に凸、下に凸のどちらの粒度分布形状を有する試料においても、その形状が直線分布形状に近くなる程、粒子流出量が少なくなっている。特に、下に凸な形状では、 $sp1$ から $sp3$ へと元々の試料に含まれる流出可能な粒子含有量（流出可能量）が低下するほど流出量が多くなる。さらに、単一粒径と同様に直前の動水勾配までの流出量に対して3倍程度の粒子流出がみられている。これも $sp1$ から $sp3$ の順に、より小さい透水力で発生しており、粒子流出が漸続的に増加し続ける分布と考えられる。

図4 透水力の単調載荷実験による透水係数の経時変化

図-4に全ての試料における透水力の単調載荷実験における透水係数の変化を示す。図-3と同様に動水勾配の増加に伴って、いずれの粒度分布形状の試料においても透水係数が低下している。低下割合に着目すると、流出可能量が高い $cv5$ 、 $cv6$ で90%と最も低下し、流出可能量の低い分布で50%程度に低下している。また、20分後の動水勾配保持期間の間でも、透水係数に減少傾向がみられた。

この透水係数の変化に関して、実験中に供試体高さは変化せず供試体からの粒子流出も発生していることから、供試体内の空隙が増大による透水係数の上昇が考えられる。しかし、実際には透水係数が低下しているため、供試体内では流出だけでなく、粒子の目詰り現象の発生によって透水係数の低下が発生したと考えられる。

3. 空隙構造に及ぼす粒度分布形状の影響

(1) 透水モデルを用いた空隙構造の算出

内部浸食現象について考えるにあたって、空隙中を物質が通過する現象として捉える。そこでまず、図-5で動水勾配10.0の載荷終了時の累積流出量と実験開始直後（内部浸食がほとんど進んでいない状態）の透水係数との関係を検討する。ここで、実験終了後の累積流出量と透水係数 k_0 をプロットした理由として、本実験では粒子流出による供試体自体の変化が発生し、この変化は透水係数にも影響を与えていると考えられる。そのため、流出による影響のほとんど無い状態における供試体の透水係数と同一供試体における本実験条件下の最終的な流出量で比較した。図より、一部の実験ケースについては両指標間に相関がみられることから、空隙構造に関わるマクロな量として透水係数を用いた考察も行うものとする。しかし、一部の実験ケースに関しては粒子の累積流出量と透水係数との間には相関がみられない。これは、透水現象では空隙径が小さい場合でも流体は通過できるが、粒子は目詰りを発生させるためと考えられる。

図5 累積流出量と透水係数の関係

以上より、本稿では内部浸食現象を透水現象と関連させながら検討を行う。ここで、透水と空隙構造との関係を記述する方法として透水係数算定式に着目する。従来から指摘されているように、透水係数は空隙比だけでなく、代表的空隙径の大きさによって影響を受ける。これを踏まえて、一般的な透水係数の表現方法として、Kozenny¹²⁾やTaylor¹³⁾は土粒子を球と仮定し、試料中の流れをHagen-Poiseuilleの流れに従うとして透水係数を表現している。ここでは、次式に示すTaylorの透水係数算定式をもとに考察を進める。

$$k = \frac{\gamma_w}{\eta} C_T D_s^2 \frac{e^3}{1+e} \quad (1)$$

ここで、 η ：粘性係数、 D_s ：代表粒径、 C_T ：形状係数である。式のそれぞれの構成部分について考えると、透水係数の推定式は、温度や水質による粘性部分、代表粒径による空隙の平均径に対応する部分と空隙比で表され骨

格構造の疎密度合いとなる部分（間隙比関数と呼ぶことにする）の掛け合わせで組み立てられている。この算定式では、代表粒径を間隙の平均径とし、それを管径とする管の流れ（Hagen-Poiseuille流れ）と考え、その流れの管の断面積が検討する断面積に占める割合が間隙比関数に従うとされていると考えられる。上式の簡略化された形式は以下のようになる。

$$k \propto \frac{1}{\eta} \cdot D_s^2 \cdot f(e) \quad (2)$$

ここで、 $f(e)$ は内部構造に関する間隙比関数である。この考え方を基本に、本章では、間隙径と間隙の繋がりについて検討を行う。特に、間隙構造の指標としての間隙比関数に着目しながら、粒子の移動と透水現象との相違点としての粒子の目詰り現象を考慮する。つまり、どれくらいの間隙径がどの程度連続性しているかを算出し、Hagen-Poiseuille流れによる流れと粒子の移動のし易さを調べる。具体的には、代表粒径部分として間隙径の中央値、間隙比関数の部分として間隙の繋がり度合として考察を進めた。

(2) 個別要素法を用いた間隙構造の算出

粒度分布形状によって流出量が受ける影響と目詰り現象について、模型実験で実施した粒度分布（図-2）と同様の粒度分布形状を三次元個別要素法^{14)~17)}を用いて検討を行った。検討対象は、本実験で行った模型実験における円筒供試体の高さ10cm地点を対象として、流体力の作用^{10)~12)}を考慮した三次元個別要素法によって供試体を再現する。ただし、供試体の相対密度80%と応力状態を同時に再現出来なかったため、対象領域の応力状態のみを再現している。応力状態の再現については、表-1に示す各粒度分布形状の最大、最小密度から相対密度80%の間隙比を算出し、単位体積重量と供試体中の高さから応力を算出した。この応力は、供試体の応力状態を制御する6枚の壁要素の目標応力として与える。供試体の作成手順については、囲まれた領域内にランダムに粒子を発生させ、重力の作用条件下で壁要素を前述の応力状態となるよう比例制御で移動させ、目標応力との差が各壁要素で1%以内となった時点で作成完了とした。なお、本章では幾何学的な検討が主になるため、粒径を最小粒径で正規化して粒径の影響を除いて見やすくしている。

次に、間隙空間の間隙径とその連続性の定義について述べる。間隙径はその間隙内に配置出来る最大内接球とする。これは、間隙内を粒子移動の検討において必要な情報は、間隙の詳細な形ではなく、通過出来る間隙径の把握が重要なためである。また、間隙の連続性は最小粒径が間隙内を透水方向に移動可能な道りと定義する。

図-6 間隙径の抽出方法

図-6に間隙径の抽出方法を示す。なお、本文中の数字は図中の番号と一致する。(1) 供試体中の検討範囲に最小粒径の1/60間隔で格子点を配置する。(1')には、簡単のために代表とする1層を抽出している。(2) 設置した格子点のうち間隙に位置している点を抽出する。(3)それぞれの格子点から粒子に対する最大内接径を得る。(4)

そのうちの最大の内接球を少しずつ移動させて、その近傍で最大内接径が得られる地点に移動させる。(5) 2番目の内接球から順に、移動させて粒子と既に最大半径が得られた内接球を含めたうちで最大内接径を抽出する。(6) 間隙が非常に小さな間隙径を含めた球の集合で表現される。(7) そのうちで最小粒径の1/10以下の間隙は削除して(8)に示す最終的な間隙の集合 D_n^{void} を得る。

次に、図-7, 8に規則配置, ランダム配置の粒子間における間隙径の連続性抽出方法とその可視化例を示す。

(a) 図-6の手順に沿って得られた間隙径について、(b)接触する間隙径中心を結ぶことで間隙同士の連続性を得る。この時、繋がった先の間隙径 D_{n+1}^{void} が対象の間隙径 D_n^{void} に対して $D_{n+1}^{\text{void}} < D_n^{\text{void}}$ ならば間隙が狭窄し、 $D_{n+1}^{\text{void}} < D_{\min}$ で

図-7 規則配置した間隙の連続性判定とその可視化

図-8 ランダム配置した間隙の連続性判定とその可視化

は連続性が途絶えたと判定する。(c)この判定後に残った間隙径の繋がり距離を連続性 X_n^{void} とする。もし、ある間隙径 D_n^{void} が他の間隙と連続性を持たなかった場合は、その間隙径 D_n^{void} が連続性としてカウントされる。図-7, 8には、上記の方法に従って間隙空間特性を求めた手順と結果の具体例を示す。粒子配置、間隙径、連続性の可視化図を示されており、図(d)は実際粒子、図(e)は間隙径を求めるために用いられた間隙空間を表す粒子である。規則配置では空隙の中心に最大間隙が位置し、周辺に小さい間隙の配置が確認できる。例示したランダム配置では、図(e)の左上方に比較的大きな間隙を表す粒子がみられるが、全体的に間隙を表す小さい粒子が薄い曲面上に分布している。連続性に関しては、間隙径の中からランダムに選定し、その中心間を結ぶ直線を可視化結果(図(f))として示している。単一粒径試料の規則配置の場合では、どの間隙も中央部の最大間隙を辿りながら最下部の間隙まで直線的に連続性が維持されている。一方、広い粒度分布を持つ試料でランダム配置の場合では、連続性は短いもの、左右への蛇行が確認できる。

(3) 個別要素法解析から求めた間隙径分布に及ぼす粒度分布形状の影響

図-9に最小粒径の10%以上の間隙径を対象として、様々な粒度分布形状における間隙径 D^{void} の個数に対する頻度分布を示す。図中の間隙径は最小粒径 $D_{\min}$ で正規化しているため、供試体内を移動可能な間隙を示す範囲として1.0以上に着目する。間隙径の頻度分布は粒度分布形状sp, st, cvの順に間隙径の最頻値が大きくなっている。また、その標準偏差についても同様の傾向が確認出来る。これらの傾向は実験結果における流出量の傾向と定性的に一致する。

図-10に図-9で得られた間隙径と検討対象の粒度分布を示す。図より、粒度分布中の各粒径に対する通過可能粒径の存在割合を読み取ることが出来る。間隙径の加積曲線の形状に着目すると、粒径加積曲線に比べて比較的对数正規分布に近く、例えば平均間隙径の差は小さいと考えられる。

(4) 個別要素法解析から求めた間隙の連続性に及ぼす粒度分布形状の影響

図-11に様々な粒度分布形状における間隙の連続性 X^{void} を示す。横軸の間隙の連続性は最小粒径 $D_{\min}$ で正規化しているため、1.0以上の移動可能な連続距離に着目する。分布の形状としては、連続性が0.5付近を境に分布の二

峰性が確認できる。

図-9 様々な粒度分布形状における正規化間隙径の頻度分布

図-10 様々な粒度分布形状の正規化間隙径と粒子の加積曲線

図-11 様々な粒度分布形状の正規化した間隙の連続性の頻度分布

図-12 様々な粒度分布形状における間隙径に対する連続性

なお、このような二峰性が確認出来る理由を、着目した間隙が近くの間隙と連続性をもつ場合と、そうでない場合に分けて説明する。特に連続性をもたない場合は、前述のように検討対象となった間隙が移動可能距離とし

てカウントされるため、正規化された移動可能距離の頻度は図-9に示す間隙径の頻度が高い0.5以下の頻度が高くなっている。連続性をもつ場合は、連続している間隙径の合計が対象となるために比較的連続距離の大きい部分で頻度が高くなる。よって、二峰性がみられたと考えられる。間隙の連続性についても粒度分布形状sp, st, cvの順に間隙径の最頻値とその標準偏差が大きくなっている。特に、移動可能な最大距離に着目すると、cv4で4.0, stで6.0, sp3で20.0と粒度分布形状によって大きな違いが見られる。

図-12に粒度分布形状st, cv4, sp2における間隙径ごとの連続性を中央値を踏まえて示す。図より、連続性の大きい間隙径は最小粒径が移動可能となる1.0付近と0.2前後付近で高くなっている。ただし、図-11に示すような明確な傾向はみられず、連続性は検討対象となった個々の周辺の間隙構造に強く依存するためと考えられる。

(5) 間隙径分布と間隙の連続性との関係

図-13にそれぞれの粒度分布形状における D_{50} と間隙径の頻度分布における中央値 D_{50}^{void} 、間隙の連続性の中央値 X_{50}^{void} の関係を示す。いずれも両対数軸上で D_{50} に対して高い相関がみられ、非常に類似した傾向を示している。

また、粒度分布形状に着目すると、いずれも直線粒度stを中心に流出可能量の高い上に凸なcvシリーズと下に凸なspシリーズに分かれている。

図-13 平均粒径に対する間隙構造指標の関係：

(a)間隙径中央値, (b)間隙連続性中央値

図-14 様々な粒度分布形状における間隙径と連続性の中央値関係

図-13において平均粒径に対する間隙径と連続性の傾向に類似性がみられた。これを踏まえ、図-14に間隙径の頻度分布の中央値 D_{50}^{void} と間隙の連続性の中央値 X_{50}^{void} における関係を両対数軸でプロットした。図より、両変数間に相関がみられ、特に間隙径が0.27前後である粒度分布形状stを中心として、間隙径に対する連続性が増加している。なお、この図では間隙径の中央値は全て1.0を下回っており、粒子移動は出来ないサイズではあるが、間隙径の頻度分布を代表する値として用いた。その上で、間隙径の中央値が移動可能な距離と相関がみられるのは、粒子の配位数と同様に間隙径が大きくなると周辺の間隙との接触数が増え、相対的に連続性も大きくなるためと考えられる。

この結果に関して、前章の模型実験結果と傾向を比較する。模型実験では、流出量がstとcv1の粒度分布形状に対して、下に凸な粒度分布形状spシリーズでは顕著に増加していた。これは、図-14におけるspシリーズの間隙径と連続性の中央値がstよりも大きく急増する傾向と一致する。また、Filter粒径の0.25倍の粒径が流出可能粒径とされる理由についても、Filter粒径の0.27倍を境界に連続性が大きく上昇するために、流出可能になるのではないかと考えられる。

加えて、粒度分布形状cvシリーズのうち、特にcv4に着目すると、間隙径と連続性は最も低い流出量はsp2と同程度の流出がみられる。以上を総合すると、流出量は内部での粒子の移動によって発生するのではなく、供試体下部境界のフィルターからの流出量が多くを占めていたためと考えられる。

(6) 間隙の連続性とその直線性の関係

粒子の流出しやすさを考える上で、間隙径や間隙の連続性だけでなく、間隙の連続性の直線性について確認してみた。ここでは、直線性の定義をここでは簡単のために、連続した間隙の道のりに対する、その連続した間隙の両端を結ぶ線分の割合とした。全ての間隙が一直線に繋がっている場合、直線性が100%となる。図-15にそれぞれの粒度分布形状における連続性と直線性の関係を示

している。図より、全体的に85%前後の比較的高い直線性を示していることがわかる。図-9と併せて考えると、供試体中に存在する間隙は、その多くが連続性が低く、比較的小さくため、平均値に直線性が高くなりやすいと考えられる。

図-15 様々な粒度分布形状における間隙の直線性と連続性関係

図-16 様々な粒度分布形状における粒子と間隙径の配位数の関係

(7) 粒子の平均配位数と間隙空間の平均配位数の関係

粒子が移動する間隙構造について、粒子同士の接触状態と間隙空間の疎密度合い（隣接度合い）としての平均配位数に着目した。まず、一般的な粒子接触構造としての配位数は1粒子あたりの平均接触粒子数で表現され、その値が大きいほど粒子骨格構造の安定性や粒子の拘束度合いが高いことを意味する。ここでは供試体内での平均値である平均配位数 $N_{c,ave}$ を算出している。さらに、隣接する間隙空間の疎密度合いを表す指標を定義した。図-7(e), 8(e)に例示したように、本論文では、それぞれの間隙空間を球粒子の集合体として表現している。この間隙空間を表す粒子のうち、簡便のために最小粒径の10%以上の間隙径を対象として、最大内接の粒子と接触する粒子の数を間隙空間配位数 $N_{c,ave}^{void}$ とした。これらの平均値である平均間隙空間配位数 $N_{c,ave}^{void}$ が高いほど、細かな粒子が間隙を通過し移動する可能性が高いと考えた。図-16より、平均配位数と平均間隙空間配位数とは負の相関がある。つまり、粒子骨格構造が安定し粒子が他の粒子に拘束されるほど、間隙空間の配置は疎になると

いえる。ただし、今後は、間隙空間の疎密度を表す指標やその幾何学的・力学的意味について詳細な検討が必要と考えられる。

4. 内部浸食特性に及ぼす間隙構造の影響

(1) 流出量に及ぼす間隙径および間隙の連続性の影響

実験で得られた粒度分布形状の異なる試料の流出量と間隙構造特性である間隙径やその連続性との関係について調べる。

図-17 様々な粒度分布形状における流出量と粒度、間隙径、連続性の中央値関係：(a) D_{50} , (b)間隙径 D_{50}^{void} , (c)連続性 X_{50}^{void}

図-17に累積流出量と各粒度分布形状における平均粒径、平均間隙径と連続距離の中央値との関係を示す。それぞれの相関については、平均粒径と連続距離の中央値に対して相関がみられる程度、平均間隙径に対しては低い相関を示している。

(2) 透水性、流出量に及ぼす間隙構造指標の影響

図-18に間隙径の中央値と連続性の中央値の掛け合わせた指標に対する透水係数の関係を示す。すべての粒度分布形状が直線状に並び、良い相関を示している。次に、

図-19に同様の指標と流出量との関係を示す。図中において内部浸食の発生しないcv4の粒度分布は省いている。図より、透水係数より相関は低い、全体として指標と相関を示している。

以上のことから、内部浸食現象も地盤中の間隙を物質が移動する現象として、透水現象とある程度同様なフレームの中で捉えていくことが可能と考えられる。また、透水現象に対しても、粒度分布形状という観点から間隙構造を介して捉えなおすことも同様に可能と考えられる。

図-18 様々な粒度分布形状における透水係数と間隙構造の関係

図-19 様々な粒度分布形状における累積流出量と間隙構造の関係

(3) 流出量に及ぼす平均配位数の影響

粒子骨格構造が安定性し、粒子が周りの粒子から拘束されている程度を表す指標¹⁸⁾としての平均配位数 N_{cave} および間隙空間の疎密度を示す平均間隙空間配位数 $N_{\text{cave}}^{\text{void}}$ が内部浸食による粒子流出量に及ぼす影響について調べた結果を、図-20に示す。図-20(a)の流出量に対する間隙の疎密度合いは正の相関、図-20(b)の粒子間の配位数に対しては負の相関関係を示している。これは、図-16で示した平均配位数に対して平均間隙空間配位数が強い負の相関を示すことを踏まえると、間隙空間が密接し、粒子骨格構造が粗であるほど流出量が多いということと一致する。

図-20 様々な粒度分布形状における累積流出量と粒子、間隙径の配位数の関係：(a),(b)

5. 結言

内部浸食メカニズム解明に向け、一次元浸透を模した透水実験と個別要素法を用いた間隙構造の検討によって得られた結果は以下のようなものである。

- 一次元浸透を模した透水実験において、様々な粒度分布形状を有するガラスビーズの粒状試料を用いて、動水勾配に対する内部浸食による粒子の流出量と透水係数を観察した。最大粒径から最小粒径までの粒子が均等に含まれている直線状の粒度分布形状のものが流出量が最も少なかった。上に凸な粒度分布形状のものの流出量は直線分布の流出量に対して最大約30倍、もっとも内部浸食を受けやすい下に凸な分布では最大約100倍の流出量が観察された。
- 個別要素法を用いて算出した間隙構造特性である間隙径分布と大きな間隙の連続性が、内部浸食が進行するには重要な特性であることがわかった。間隙径とその連続性の積で表される指標が大きいほど、供試体の透水係数も大きい傾向にあるとともに、粒子の流出量も多いことが分かった。
- 粒子骨格構造の安定度や粒子の拘束度を表す平均配位数が大きい場合、内部浸食を受けにくいことがわかった。平均配位数が大きく、大きな間隙径の連続性が低い試料は直線的な粒度分布形状のものであることが示された。また、下に凸の粒度分布形状の試料は、平均配

位数が小さく、大きな間隙の連続性が高いために流出量が多いことが明らかになった。以上のことから、平均配位数、間隙径、間隙の連続性が、粒状体の内部浸食の可能性を評価するのに重要で指標であるとともに、それらに強く影響する粒度分布形状が重要な土の特性であることが改めて示された。

謝辞：この研究で用いた装置の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B) 23360203および特別研究員奨励費(25・7199)の助成を受けたものであり、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Wood, D. M. and Maeda, K. : Changing grading of soil: effect on critical states, *Acta Geotechnica*, Vol.3, pp.3-14, 2008.
- 2) Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E. : Modelling mechanical consequences of erosion, *Geotechnique*, Vol.60, No.6, pp.447-457, 2010.
- 3) 桑野玲子, 佐藤 真理, 瀬良 良子: 地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 5, No. 2, pp.219-229, 2010.
- 4) Sterpi, D. : Effects of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow, *International Journal of Geomechanics*, Vol.3, No.1, pp.111-122, 2003.
- 5) Kenny, T. C. and Lau, D. : Internal stability of granular filters, *Canadian Geotech. J.*, Vol.22, pp.215-225, 1985.
- 6) Kenny, T.C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G.I., Omani, G.N., and Ume, C.A. : Controlling construction sizes of granular filters, *Can.Geotech J.*, Vol.22, 1985.
- 7) 伊藤克彦, 大北康治, 松澤宏: 砕石ドレーンにおける目詰まり防止に関する研究, *土木学会論文集*, No. 439/III-17, pp.53-62, 1991.
- 8) 宇野尚雄, 神谷浩二, 田中宏路: 「空気圧入法」と「水分法」による砂の間隙径分布, *土木学会論文集*, No.603, pp.35-44, 1998
- 9) 岡二三生, 肥後陽介: X線 CT による地盤材料の構造の可視化 2. μ X 線 CT による土要素レベルの構造の可視化に関する研究, *材料*, Vol.62, No.11, pp.717-723, 2013
- 10) 森也寸志, 志賀摂子, 岩間憲治, 渡邊紹裕, 丸山利輔: 土地利用による土壌間隙構造の差異-軟 X 線による観察を中心として-, *土壌の物理性*, Vol.66, pp.19-27, 1992
- 11) Bryant, S. L., King, P.R and Mellor, D.W: Network model evaluation of permeability and spatial correlation in a real random sphere packing, *Transport in porous media*, Vol. 11, pp.53-70, 1993.
- 12) Kozeny, J.: Ueber Grundwasserbewegung, *Wasserkr. u. Wasserwirts*, Vol. 22, pp.67-146, 1927..
- 13) Taylor, D. W.: *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, pp.239-246, 310-315, 318-323, 330-338, 1948.
- 14) Cundall, P. A., and O .D .L .Strack : A discrete model for granular assemblies, *Geotechnique*, Vol.29, No.1, pp.47-65, 1979.
- 15) Tchen, C. : Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbu-

- lent fluid, D. Sc. dissertation, Technische Hogeschool, Delft, Holland., 1947.
- 16) Amsden, A.A. and Harlow, F.H. : A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations, *J. Comp. Phys.*, Vol.6, pp.322-325, 1970.
- 17) Harlow, F.H. and Welch, J.E. : Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *Phys. Fluids.*, Vol.10, pp.324-340, 1965.
- 18) Maeda, K. and Sakai, H. : Stress-chain based micromechanics of sand with grain shape effect, *Granular Matter*, Vol.12, No.5, 499-505, 2010

(2014. 6. 20 受付)

EFFECTS OF GRADING SHAPE ON INTERNAL EROSION FOCUSING PORE STRUCTURES AND FINER DYNAMICS

Kenichi MAEDA and Akihiko KONDO

When water flows through broadly graded soil, the small particles within the soil may erode, thereby leading to a narrowing of the grading. An important goal in geo-engineering is to gain a better understanding of the mechanical consequences of this type of event, with attention directed particularly toward the potential for ground deformation or failure due to erosion.

In this study, we focused on the mechanism of internal erosion and, from the viewpoint of instability, defined such erosion as the increase in particle movement and in the extent of macroscopic erosion. On this basis, when a given particle erodes, the pore structures of the rest of the particles should enable exit from a movable void, and their interparticle contact structures should enable egress by seepage force. Pore structure primarily pertains to void size and void continuity. Contact structure is estimated by average coordination number and fabric tensor. To illustrate internal erosion accompanied by changes in grading, we conducted experimental and computational analyses. Through a seepage test with particle erosion, we obtained the grading shaped-induced quantitative difference and trend in the weight of leached particles. With regard to permeability, all the grading values indicate a decreasing trend. Because specimen height was kept constant during the experiment, permeability could have increased given the rise in voids due to particle erosion. On the basis of the decreasing trend, however, the increased permeability can be regarded as a case of particle clogging. The pore structure analysis indicates that at the logarithmic scale, the index shows qualitatively good agreement with the extent of erosion from various grading conditions. As for the contact structure, the average coordination number of the particles and the particle voids also exhibit good agreement with erosion behavior.