

内部浸食および目詰りに及ぼす間隙構造の影響 Effects of the pore structure caused by the grading for internal erosion and clogging

近藤明彦¹, 山田高弘², 前田健一³

1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・22518503@stn.nitech.ac.jp

2 名古屋工業大学大学院・工学研究科

3 名古屋工業大学・都市社会工学科

概 要

近年, 我が国のみならず世界中で内部浸食に起因する地盤の陥没災害が数多く報告されている。本研究は, 細粒分の流出(ミクロな変化)と陥没孔の発生(マクロな変化)を結ぶ局所的な変形・破壊メカニズムに着目し, 一次元透水試験を模した模型実験と個別要素法を用いた数値解析により検討を行った。本論文では, 細粒分流出に影響を与える間隙構造に着目し, 粒度分布, 動水勾配が流出量に与える影響を検討した。模型実験では, 内部浸食量は水位変動によって増加し, 突発的な大量の流出が確認された。しかし, ある粒子が間隙を通過するという幾何学的検討だけでは説明が出来ない。そこで, 粒子が目詰りした時にアーチ構造が発生していると考え, アルミ棒積層体と数値実験によりその強度, 粒子数などを検討することで目詰り構造の安定性についての定性的評価を図った。数値解析においては, 粒度分布の変化によって流出量が増減することを, 粒子が移動できる間隙とその間隙の連続性をもとに粒子の移動しやすさを検討した。

キーワード: 内部浸食, 目詰り, 間隙構造, アーチ構造, 水位変動

1. はじめに

近年, 我が国では地盤の陥没災害が地域を選ばず発生しており, 甚大な被害が発生している。陥没災害の多くは, 浸透力などの作用により粒子が流出し, 微小な空洞の発生・進展することが原因とされる¹⁾²⁾。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³⁾。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・進行メカニズムなど未解明な部分が数多く残されている。

その一因として, 地盤材料とは構成要素である粒子の寸法, 形状, 表面粗度, 強度, 粒度などの一次的性質に加え, 応力・ひずみ条件, 密度, 排水条件などの粒子を取り巻く環境を示す二次的性質の影響を受け, 応答が大きく変化する材料であることに端を発する。この地盤材料としての難しさによって, 従来の地盤力学では実験中に一次的性質は変化しないという仮定のもと, より支配的な二次的性質の与える影響に着目して, 変形・破壊メカニズムの解明がなされてきた。

内部侵食現象についても, 粒径の大きな粒子が大きな力を受け持つことから, 力のあまりかかっていない細粒分の流出による影響は少ないと見なされてきた。そのため, 流出を引き起こす動水勾配を求めること・流出量の限界値を

求め管理することに重点が置かれ, 透水に付随する問題という括りで考えられてきた。確かに, 粒子流出はある空間における物理的損失とみなすことで間隙比が増加し, 透水量や地盤の排水能力を変化させる。

しかし, 本研究で対象とする地盤の陥没災害は, 外力等の二次的性質が変化しない条件下で, 粒子が間隙をぬって流出する・目詰りするといった一次的性質の変化がダイナミックな現象に結びついている。このため, 内部浸食によって地盤材料自体の変化が起こった結果, もたらされる変形・破壊メカニズムは殆ど解明されておらず, 対策の検討が十分に行えていないのが現状である。

そこで, 本研究は, 浸透力の作用する地盤内において発生する細粒分のダイナミクス(内部浸食・目詰り)と陥没孔といった地盤の変形・破壊挙動を結びつけるメカニズムに着目する。そして, そのメカニズムを実験・解析(数値シミュレーション)的に解明することで対策法の提案を目的としている。本稿では, 特に細粒分の流出に影響を与える間隙構造を焦点に据え, 粒度分布, 動水勾配, 水位変動が流出量に与える影響を検討する。また, 陥没孔発生に至るプロセスとして, 局所的な流出とそれに伴う変形の進展が考えられることから, その不均一性にも着目している。検討方法としては, 一次元透水を模した模型実験と簡易化した流体力の影響を考慮した三次元個別要素法⁴⁾⁵⁾を用いて検討を行った。

2. 浸透力の作用による内部浸食・目詰りの挙動

2.1 模型実験概要

模型実験は定水位一次元鉛直下向き浸透を模し、供試体下部より流出量を計測した。また、供試体内には局所的な変化を観察するために間隙水圧計 18 個を半面に等間隔で設置している (図 1)。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。試料には粒度分布による幾何学的な影響を顕著にするため、球形ガラスビーズ ($\rho_s=2.50 \text{ g/cm}^3$) を用い、突き固めにより相対密度 80%の密な状態にしている。実験条件として、図 2 中に示す動水勾配 i の変化によって供試体に透水力を作用させた。動水勾配は 2つのパートで構成される。前半は $i=0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 2.0, 3.0, 5.0, 7.5, 10.0$ の順に段階的に単調増加させ、後半はその後一旦 $i=0.3$ に減少させ、再び $i=10.0$ に戻すサイクリックな载荷を行う。また、各動水勾配を変化させる時間間隔は 20 分とした。

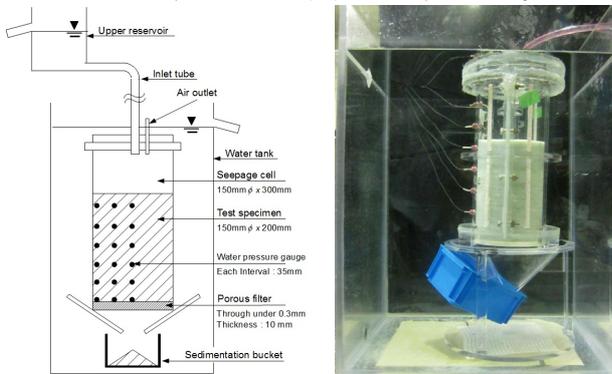


図 1 細粒分流出実験模型概略図と実験機写真

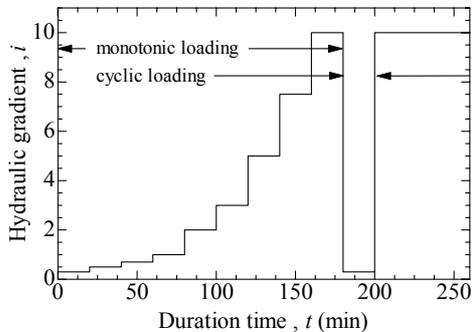


図 2 透水実験における動水勾配の変化

2.2 粒度分布の形状

表 1 実験試料諸元

粒径加積曲線	D_{max} (mm)	D_{min} (mm)	$R_p=D_{max}/D_{min}$	試料記号
広範な直線	2.000	0.075	26.7	st
上に凸	2.000	0.075	26.7	cv1
上に凸	2.000	0.075	26.7	cv2
上に凸	2.000	0.075	26.7	cv3
階段状	2.000	0.075	26.7	sp1
階段状	2.000	0.075	26.7	sp2
階段状	2.000	0.075	26.7	sp3
均等分布	0.250	0.177	1.4	un1
均等分布	0.177	0.150	1.2	un2
均等分布	0.150	0.106	1.4	un3
二粒径混合	1.180	0.106	11.1	bm1
二粒径混合	0.850	0.106	8.0	bm2
二粒径混合	0.600	0.106	5.7	bm3
二粒径混合	0.425	0.106	4.0	bm4
二粒径混合	0.425	0.106	4.0	bm5
二粒径混合	0.425	0.106	4.0	bm6

表 2 実験試料の間隙特性

試料記号	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	e_{max}	e_{min}	$e_{max}-e_{min}$	e_0
st	0.104	0.387	0.497	0.329	0.167	0.363
cv1	0.104	0.292	0.531	0.359	0.172	0.385
cv2	0.104	0.277	0.503	0.379	0.124	0.400
cv3	0.104	0.243	0.584	0.431	0.153	0.456
sp1	0.108	0.919	0.516	0.315	0.201	0.336
sp2	0.134	0.830	0.530	0.353	0.177	0.365
sp3	0.110	0.757	0.539	0.423	0.117	0.436
un1	0.110	0.194	0.670	0.539	0.131	0.579
un2	0.153	0.163	0.697	0.549	0.149	0.580
un3	0.180	0.126	0.729	0.552	0.178	0.581
bm1	0.114	0.354	0.476	0.307	0.169	0.341
bm2	0.114	0.300	0.533	0.343	0.190	0.377
bm3	0.114	0.252	0.574	0.384	0.190	0.423
bm4	0.114	0.106	0.583	0.406	0.177	0.471
bm5	0.114	0.425	0.550	0.390	0.160	0.426
bm6	0.114	0.425	0.556	0.410	0.146	0.444

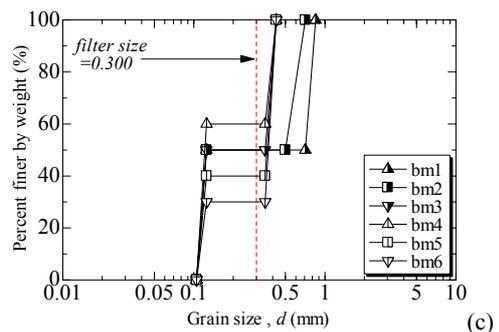
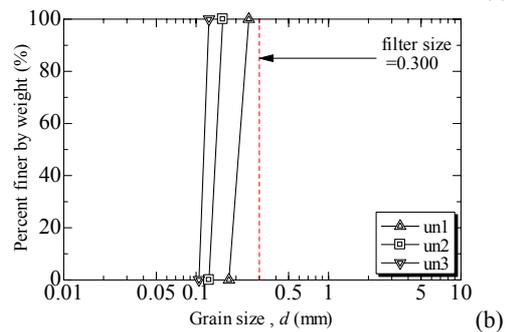
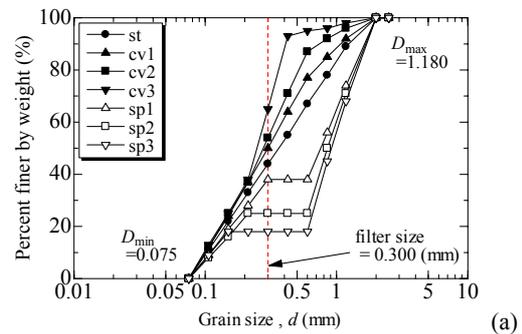


図 3 実験で用いた粒度分布

表 1 に模型実験で用いた粒度分布の特徴、最大粒径、最小粒径、粒度と試料記号を示す。表 2 はそれぞれの粒度分布における 10%、50%粒径 (D_{10} , D_{50}), 最大・最小間隙比 (e_{max} , e_{min}), 粒子骨格構造の変形の自由度を表す間隙比幅 ($e_{max}-e_{min}$), 初期間隙比 e_0 , を示している。また、図 3 には、それぞれの粒径加積曲線を示している。実験結果の考察としては、以上の分布において均等分布と二粒径混合分布は st, cv, sp の粒度分布の極端な例として考察に用いる。

2.3 粒度分布形状に起因する内部浸食挙動

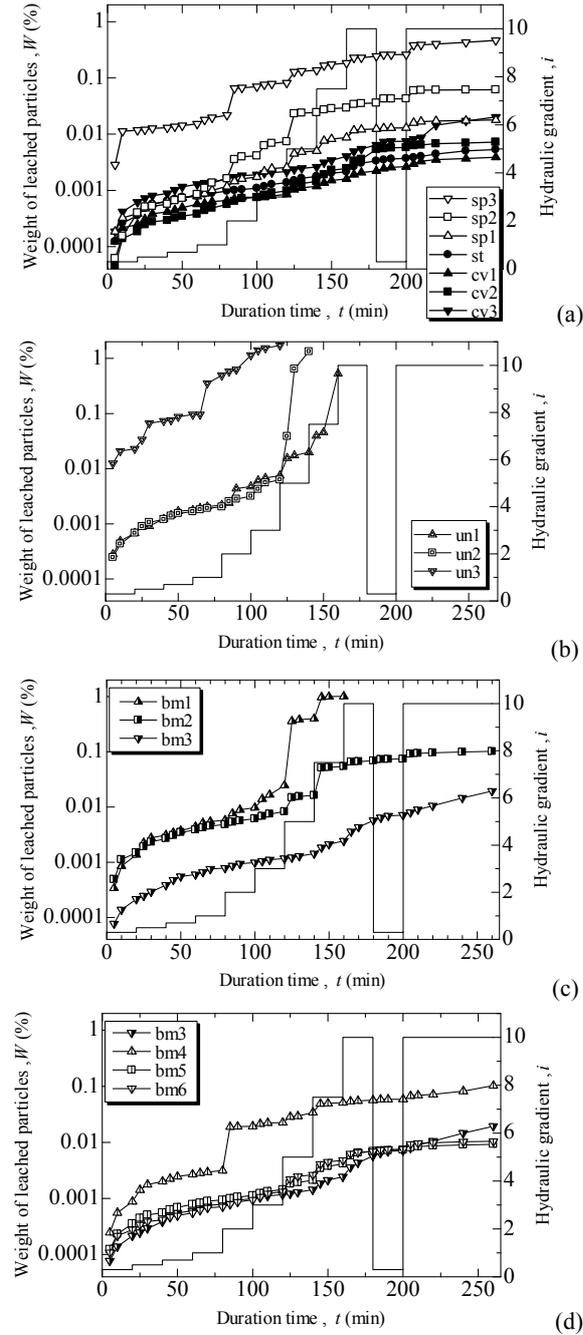


図4 動水勾配増加に伴う細粒分流出量の経時変化
 (a):広範な粒度分布 cv,st,sp, (b): 均等分布 un
 (c):二粒径混合 bm1-3, (d): 二粒径混合 bm4-6

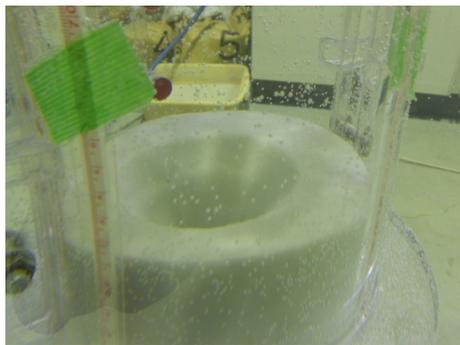


図5 陥没孔の発生 (粒度記号 un1: 動水勾配 $i=3.0$)

図4に各粒度分布における流出量の経時変化を示す。図4(a)の広範な粒度を含む分布における流出挙動において、st,cv1の分布が全粒度分布中で流出量が最も低く、次いで中間粒径が増加していく場合(cv2,3)、減少する場合(sp1,2,3)の順に流出量が多い。これは、流出可能粒径に対する4倍粒径(中間粒径)の存在割合の増減によって、間隙くびれ径とその間隙に対する細粒分の含有率が変化したために、流出量が増加したと考えられる^{(6)~(8)}。また、sp2,3の流出挙動に着目すると、 $i=2.0, 5.0$ の時点で、これまでの流出量の2倍程度の流出をしている。このような大量の流出は(b)均等分布(c)(d)の二粒径混合分布でも確認できる。特に、un1では、 $i=1.0$ から流出が指数的に増加し、 $i=3.0$ において供試体中央部における陥没孔が発生した。(図5)

ここで、sp, unとbmにおける大量の流出に着目する。un1では動水勾配 $i=1.0$ から大量の流出が確認できるが、同じ細粒分を用いて粗粒分を含む分布では、図4(c)から粗粒径が大きくなるほど、図4(d)から粗粒分の混合率が低いほど流出量が減少している。つまり、4倍粒径の混合率に伴って粗粒分が流出に抵抗出来るようになるために、本来細粒分自身が流出する動水勾配以上でも流出しにくくなっていると考えられる。しかし、 $i=5.0$ などで大量の流出が見られるため、流出が発生する動水勾配は高めるが、一旦流出が始まると脆性的であることは変化していない。

また、均等な動水勾配という仮定の下では、陥没が中央部で発生したことを説明出来ない。そのため、面的に配置した間隙水圧計により局所的な動水勾配分布を検討する。

2.4 局所的動水勾配の空間分布

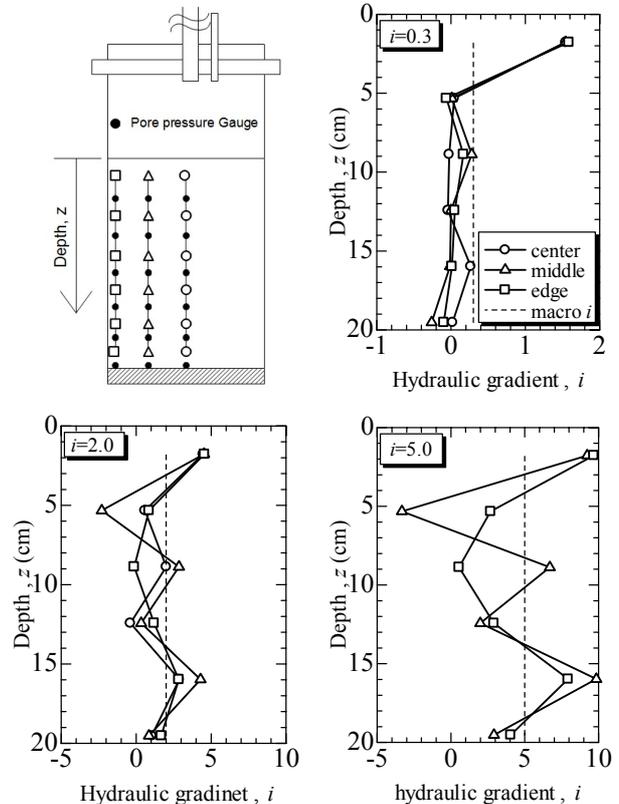
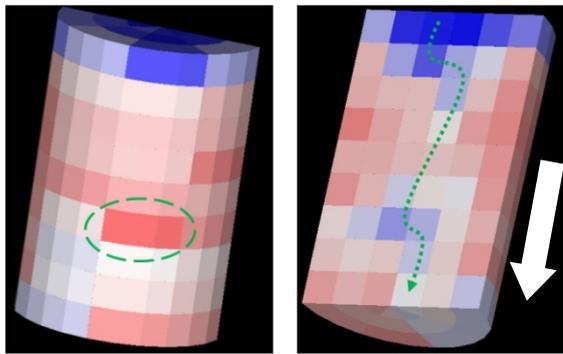


図6 二粒径混合分布 (bm3) における局所的な動水勾配の空間分布(左上:図示される位置, 右上から動水勾配 $i=0.3, 2.0, 5.0$)

ここでは、供試体内部における浸透力の均一性を検討する。図 6 に二粒径混合分布 (bm3) において動水勾配が 0.3, 2.0, 5.0 時の局所的動水勾配の空間分布を示す。図中には、供試体全体としての動水勾配も併せて記載している。尚、 $i=5.0$ 時において中心部に設置した間隙水圧計の値が計測不能となってしまったため省いている。グラフに共通する傾向として、最上面付近の動水勾配が高く、動水勾配の低い層を挟むように上から 3 層目、5 層目の値が比較的高くなっている。水平方向に見ると、壁面付近の動水勾配は他より比較的低く、全体の動水勾配に沿うように推移している。動水勾配が負の位置も存在しているが、同じ層内で正の部分と混在していることから複雑な流れの存在が考えられる。また、動水勾配が低い部分ほど透水しにくいことから、壁面付近よりも中心部で材料は不安定と考えられる。また、その為に 2 層目、4 層目といった内部で目詰りしやすい層が発生することが示唆される。

2.5 局所的な粒度分布の変化

本項では、上記の不均一な流れの中にさらされ続けることで、供試体内の粒度分布に与える局所的な違いについて検討する。供試体には、直径 7.4cm、高さ 11.5mm の円筒供試体を用い、試料には粒径 600 μm 、106 μm のガラスビーズを質量比 7 : 3 で一様に混合したものをを用いる。実験条件としては動水勾配 $i=5.0$ で一定に保ち、38 時間透水した後の細粒分含有率を測定した。測定メッシュは、供試体の最上部 5mm・最下部 10mm を除き、各層を層厚 1.0cm、45deg.毎に半径を 3 等分するよう分割した。(分割総数 216 個 : 24 個/層 \times 9 層)



(a)壁面での目詰まり (b)供試体内部での粒子流出

図 7 透水試験後の細粒分含有率の局所的变化

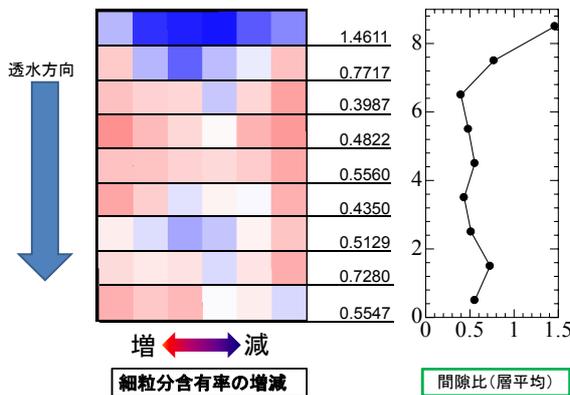


図 8 供試体内の細粒分の増減分布と間隙比分布の不均質性

図 7 は供試体作成時の細粒分含有率(30%)が供試体内で一様と仮定して、細粒分含有率の増減を色の濃淡で示している。(増加：赤色、低下：青色) 図より実験終了後の供試体内部では細粒分含有率も不均一になっており、局所的な目詰まりや内部浸食が確認出来る。また、流出している部分は特に最上面の中心から比較的内部に集中している。併せて、図 8 には各測定メッシュの含有質量をもとに層別の平均間隙比を示している。この図からも流出によって緩くなりがちな層と目詰りによる層が交互に存在していると考えられる。また、実験条件が異なるため単純に比較を行うことは出来ないが、図 8 と図 6 を比較すると層平均の間隙比の高いところで局所的動水勾配も高いという定性的に対応した関係性を見ることが出来る。

3. 個別要素法による間隙構造の検討

3.1 粒子の運動方程式

本解析における個別要素法の運動方程式には、式(1)に示す Tchen によって提案された乱流中の単一球の運動方程式を用いた⁹⁾¹⁰⁾。この運動方程式は、周囲の流速と粒子との速度差に抗力係数等に乗じることで、流体との相互作用を体積力により再現するものである。また、本章で実施した解析は、計算コスト削減のために各項の評価を行い、全体としての挙動に与える影響が少ない項を省き簡略化した。

$$\begin{aligned} \sigma A_3 d^3 \frac{du_p}{dt} = & \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d^2 |u - u_p| (u - u_p) + \sigma A_3 d^3 \frac{du_w}{dt} \\ & + C_M A_3 d^3 \left(\frac{du}{dt} - \frac{du_p}{dt} \right) + 6 \rho A_2 d^2 \sqrt{\frac{\nu}{\pi}} \int_{t_0}^{\tau} \frac{\left(\frac{du}{d\tau} - \frac{du_p}{d\tau} \right)}{\sqrt{T - \tau}} d\tau \\ & + A_3 d^3 (\sigma - \rho) g + F_{LM} + F_{LS} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 u_p : 粒子の速度、 u_w : 流体の速度、 $A_3 d^3$: 粒子の体積、 $A_2 d^2$: 粒子の投影面積、 C_D : 抗力係数、 C_M : 付加質量係数、 σ/ρ : 土粒子の比重、 τ : 掃流力である。

次に、各項と係数について評価を行う。まず、抗力係数については、Reynolds 数に依存することから $Re < 1.0$ の低レイノルズ数領域における Stokes の理論解 $C_D = 24/Re$ と高レイノルズ数領域 ($Re > 1000$) における一定値 $C_D = 0.4$ から、簡便な以下の式がよく用いられる。

$$C_D = 0.4 + \frac{24}{Re}, \quad Re = \frac{|u - u_p| d}{\nu} \quad (2)$$

しかし、 $1.0 < Re < 1000$ の領域における実験値との差が大きいことから、本解析では $Re < 1000$ の領域において高い近似度を示す式(3)を用いる。尚、 $Re > 1000$ の領域では同様に $C_D = 0.4$ としている¹¹⁾。

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.687}) \quad (3)$$

右辺第六項と第七項の揚力項については、これまでの検討によって低レイノルズ数領域において主に影響があることが分かっている。本解析で対象とする粒子サイズにおけるレイノルズ数は主に 1.0 以上のため、これらの項は省略する。右辺第四項 (Basset 項) についても、これまでの

研究により他の項と比べてオーダーが小さいために近似的に省略出来るという報告があることから、省略する¹²⁾。

よって、最終的に相互作用力を算定する式は次式とする。

$$\rho \left(\frac{\sigma}{\rho} + C_M \right) A_3 d^3 \frac{du_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho A_2 d^2 |u - u_p| (u - u_p) + \rho (1 + C_M) A_3 d^3 \frac{du}{dt} + \rho \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) A_3 d^3 g \quad (4)$$

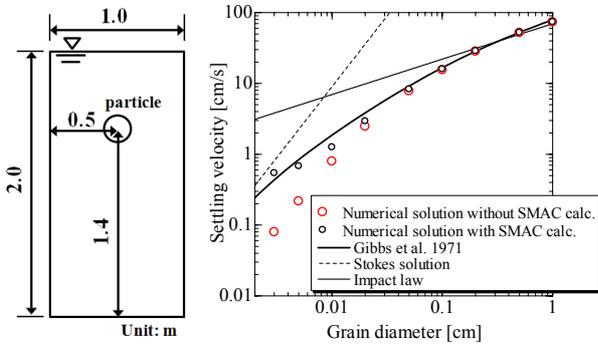


図9 最終沈降速度によるDEM粒子に関する運動方程式の検証¹³⁾

表3 三次元個別要素法の解析パラメータ

Parameter	Unit	Value
Time increment	s	1.0×10 ⁻⁵
Height of specimen	m	2.00
Bottom plane size	m	1.00×1.00
Grain size diameter	mm	10.0, 5.0, 2.0, 1.0, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.03
Particle density ρ _s	kg/m ³	2650
Water density ρ _w	kg/m ³	1000
Normal spring coefficient	N/m ³	1.0×10 ⁷
Tangential spring coefficient	N/m ³	2.5×10 ⁶
Normal damping	--	critical
friction angle φ _i (deg.)	--	tan φ _i =0.25
Viscosity coefficient	m ² /s	1.0×10 ⁻³
SMAC cell size (cubic shape) *	m	0.10
Boundary condition*	-	Non-slip

*SMAC法での解析のみを使用したパラメータ

図9には、先述した粒子の運動方程式を用いて水槽内を沈降する粒子の終端速度を対象に検証¹³⁾した結果を示す。検証には、解析解としてのストークス解、インパクト則、Gibbs et al.による模型実験結果を用いた。また、図中には、併せてSimplified Maker and Cell法 (SMAC法)による流体計算をカップリングさせて実施した結果も示している。解析パラメータは表3に示す。

結果を比較すると、SMAC法とカップリングさせた結果は、いずれの粒径でも実験結果に対して非常に良い対応を示している。SMAC法をカップリングさせず周囲の流速が一定として式(4)の運動方程式だけを用いた場合は、粒径が小さくなるにつれ誤差が大きくなっている。しかし、単一粒子の移動として0.1mm以上の範囲では、十分な精度が得られている。これは、粒径の増加に伴う重力の増加によって、抗力が運動方程式中の支配的な項に集中したためと考えられる。

以上より、本解析では粒径が0.1mm以上の砂粒子を対象とすることから、計算コストを低減するためにSMAC法とのカップリングを行わず、一定流速中の挙動として検討を行なっていく。

3.2 粒径比に起因する粒子の移動量

本項では、浸透力の作用する粒状体内における目詰まり現象を粒径比 $R_D = D_{max} / D_{min}$ に着目して検討する。使用するパラメータは表3に示すものとし、表2と異なるもののみ示した。供試体は、まず流速のない状態で母材となる大きな粒径を沈降させ作成する。十分に粒子移動が収束した後、その上に小さい粒径の粒子を体積力が作用している条件下で沈降させ、母材内において細粒分が移動した軌跡を観察した。流下方向の体積力としては、前述の模型実験における動水勾配0.5の流速を用いた。

表4 三次元個別要素法の解析パラメータ

Parameter	Unit	Value
Basal plane size of specimen	mm	64×64
D_{max}	mm	8.0
D_{min}	mm	①0.26, ②0.20, ③0.16
Grain size ratio, $R_D = D_{max} / D_{min}$	--	①3.0, ②4.0, ③5.0
Number of particle, D_{max}	--	512
Number of particle, D_{min}	--	1000

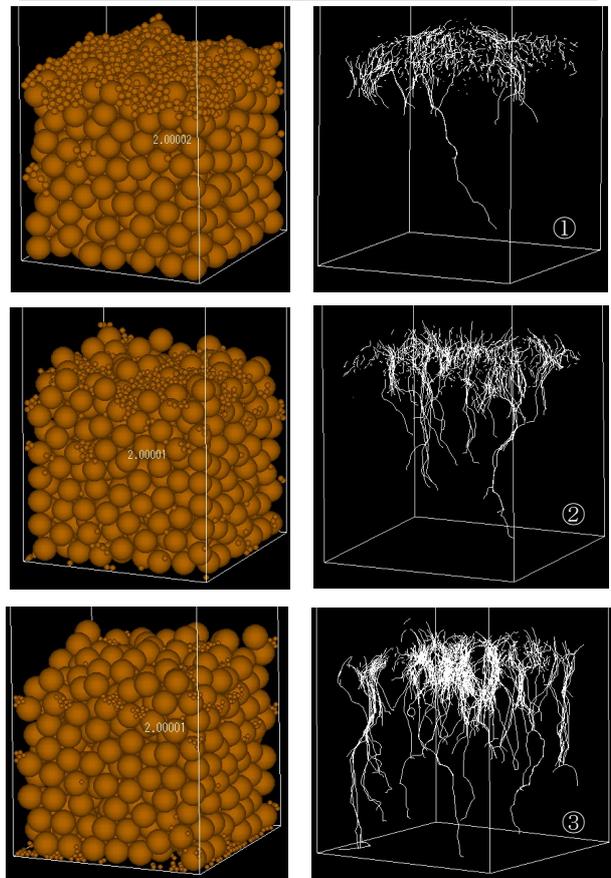


図10 浸透力による粒径比の異なる粒状体内の粒子移動と目詰り (上から粒径比 $R_D=3.0, 4.0, 5.0$, 左図: 移動終了時の供試体の様子, 右図: 浸透力による粒子移動の軌跡)

図 10 に動水勾配 0.5 の状態に相当する条件下において、左図に粒子移動収束後における供試体の状態を、右図に壁面付近を除いた細粒分の全移動軌跡を示す。壁面付近の移動は、間隙が内部より大きく条件が異なるために除いた。移動軌跡に着目すると、粒径比 R_D が大きくなるにつれ母材となる粒子間の間隙を通して移動する粒子が増加している。特に $R_D=5$ の場合は、他の場合に比べてとりわけ多くの粒子が移動している。これは、Kenny らの内部浸食が発生する粒径比は、対象とする粒径 D の 4 倍粒径 $4D$ に依存するという結果を裏付けるものと言える⁶⁾⁷⁾⁸⁾。壁面を移動する粒子が多いことは、粒状体内部に比べ間隙が大きくなるためと考えられる。また、粒子の移動距離に着目すると、供試体の下部まで移動している粒子は $R_D=5$ において僅かに見られるだけであり、目詰まり現象が確認できる。

3.3 移動可能な間隙の連続性

本項ではこれまでに実験で用いた粒度分布：st(粒子数:5254), sp(3102), cv(9117), bm3(2509), bm4(3388), bm5(4046), bm6(4721)を用いて、内部浸食時における粒子移動量の検討を行った。主に幾何学的な検討であるため、最大粒径 $D_{max}=0.08m$ 、最小粒径 $D_{min}=0.01m$ と比較的大きな粒径を用いた。ここでは、最小粒径の移動を対象とするため、図 11,12 の横軸の値は $D_{min}=0.01m$ で正規化している。

図 11 に最小粒径の 10%以上の間隙径を対象として、これらの粒度分布における間隙くびれ径の頻度分布を示す。また、間隙くびれ径は、壁面付近の間隙が大きい部分を除き、供試体内の任意の点から他の粒子に接触せず存在できる最大径とした。図中の間隙くびれ径は最小粒径で正規化しているため、供試体内を動くことの出来る範囲は 1.0 以上となる。対応する粒度分布は同図中の右上に挿入した。

図 11(a)より細粒分の 4 倍粒径混合量が多い分布ほど間隙くびれ径の頻度は小さいものに集中している。ただし、移動可能な間隙くびれ径の頻度が高い sp の分布でも移動できる間隙は全体の 5%程度であることから、大量の粒子が移動することは難しいと考えられる。次に図 11(b)の細粒分混合率を変化させた場合、概形は sp の分布に近く、 $D_{min}=0.01m$ の粒子が動くことの出来る間隙くびれ径は全体の 2~4%とさらに小さくなっている。

図 12 には間隙くびれ径の連続性を検討した結果を示す。連続性とは、任意の高さにおける間隙くびれ径のうち、最小粒径が間隙をぬって移動出来る最も長い道りを指す。図 12(a)の広範な粒度を持つ分布においては、sp の分布が最も長い移動可能な距離を有している。しかし、それでも最小粒径の 8 倍程度(最大粒径粒子 1 つ分)であるから、大きい粒子一つ分程度しか移動可能な間隙は連続して存在していないといえる。図 12(b)の二粒径混合分布においても、細粒分の混合量が低いほど移動可能な距離が長くなる傾向が見られる。最も長い移動距離でも最小粒径の 4 倍であり、広範な粒度を持つ分布の半分程度である。また、図 4 の累積流出量の多寡と比較すると、分布別の間隙くびれ径とその連続性の傾向は定性的に一致している。

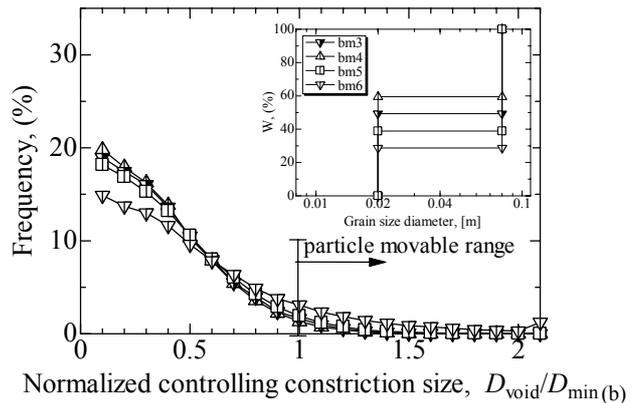
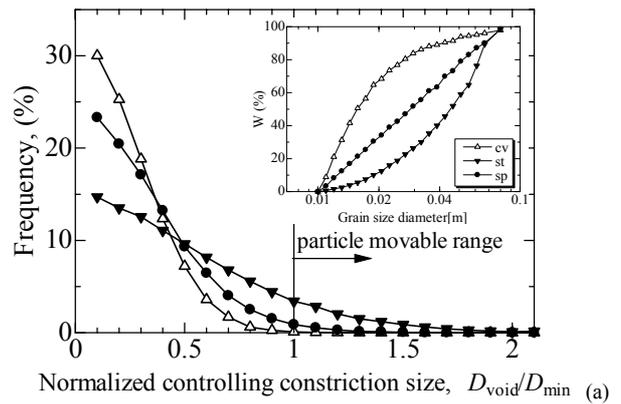


図 11 供試体内に存在する間隙くびれ径の頻度分布
(a):広範な粒度分布 cv,st,sp, (b):二粒径混合分布 bm

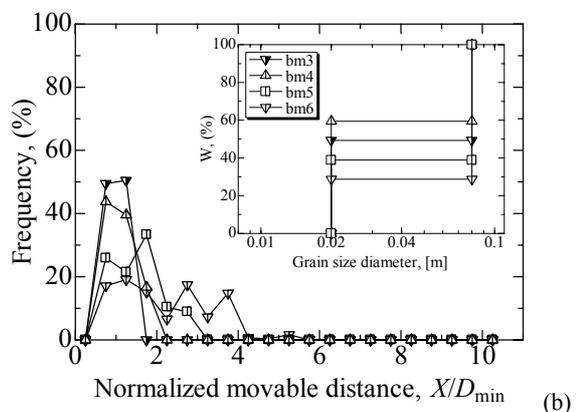
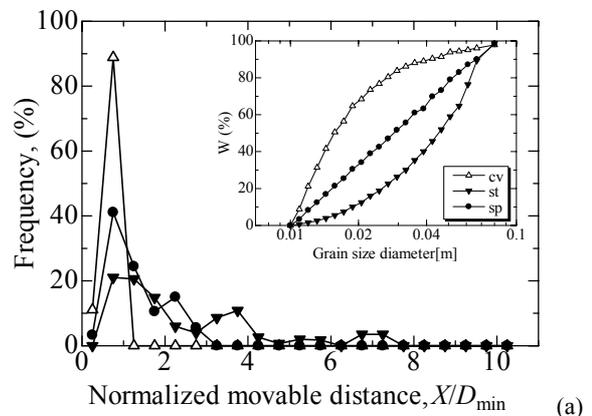


図 12 最小粒径粒子が移動可能な道のりの頻度分布
(a):広範な粒度分布 cv,st,sp, (b):二粒径混合分布 bm

3.4 流出境界周辺における流出挙動

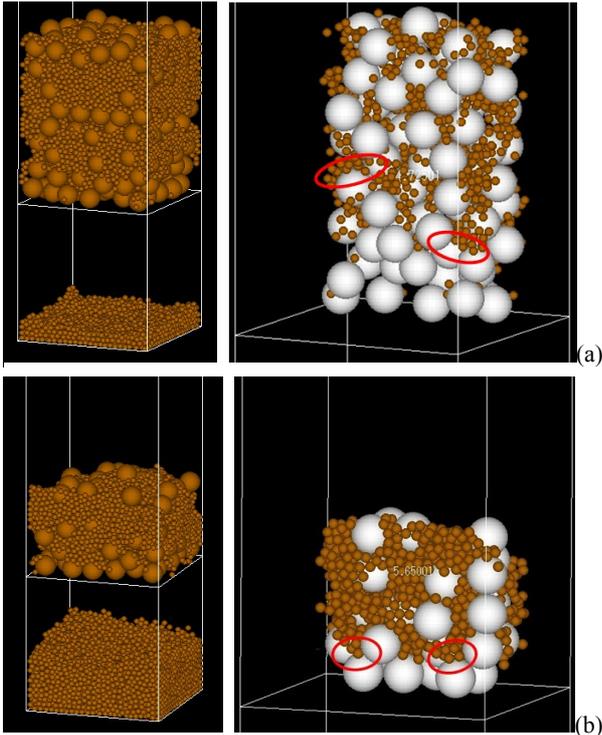


図 13 流出境界による細粒分混合率の違いに起因する流出量の差異と内部における目詰り構造(a) : bm6, (b) : bm4

図 13 に、前項で用いた bm6 と bm4 の供試体下部の境界を細粒分のみが通過できるよう変化させ、流出量（左図）と粒子移動が落ち着いた時点における内部の様子（右図）を示している。まず、左図の流出量について、両供試体共に初期高さは一定にしているが、細粒分混合率の高い bm4 の分布では特に多く流出している。また、細粒分流出可能境界周辺では粗粒分が主となって構成される層 ((a)粗粒分 2 つ程度, (b)1 つ程度) が確認できる。

この点に加え、 R_D による粒子の移動量の違い、細粒分が移動可能な間隙径とその連続性は低いという 2 点から、細粒分の流出量は、流出境界付近の粒度分布に強く影響されると考えられる。つまり、内部で移動可能な間隙があまり存在しないにも関わらず 4 倍粒径を境界として大きく流出量が増加するのは、境界付近で粗粒子が主に構成するフィルター層の間隙くびれ径が 4D 付近になるためと考えられる。また、細粒分の混合率が 50%を越えると流出量が大きく増加するのは、このフィルター層が形成するために必要な個数が境界周辺に集まるまでに、流出しなければならぬ量が多くなるためだと考えられる。

また、右図中には赤線部分においては、数個の細粒分が粗粒分で構成される間隙に詰まっている。つまり、目詰りは間隙くびれ径を細粒分が通り抜けるという幾何学的な問題だけでなく、数個の粒子構造によって詰まることを検討する必要があると考えられる。また、このように詰まっている部分が抜けることで、その上部の粒子を含む大量の流出が発生していると考えられる。

4. 目詰り構造としてのアーチ構造の安定性

4.1 アーチ構造の安定な構造条件

前項における数個の細粒分によって構成される目詰り構造をアーチ構造と考え、その安定性を検討する。そこで、まず任意の外力条件に対して最も安定な構造をとる条件について単純化して考える。それぞれの条件は、粒子間の接点が連続的に並び、重力加速度 g のみが作用する二次元応力場 ($\sigma_{yy}=\sigma_1, \sigma_{xx}=\sigma_2$) について接触面の接線方向のせん断力が作用せず、軸方向圧縮力のみが作用するとする。構造部材の微小部分 ds の釣り合い式は以下ようになる。

$$\begin{cases} \frac{d}{ds} \left(f_n \frac{dx}{ds} \right) - \sigma_2 \frac{dy}{ds} = 0 \\ \frac{d}{ds} \left(f_n \frac{dy}{ds} \right) + \sigma_1 \frac{dx}{ds} + \rho g s = 0 \end{cases} \quad (5)$$

解は次に示す円錐曲線となる。

1) 重力場のみの場合 ($g \neq 0, \sigma_1, \sigma_2 = 0$)

$$y = a \cosh(x - b/a) - c \quad : \text{懸垂線} \quad (6)$$

2) 一次元重力場 ($g = 0, \sigma_1 \neq 0, \sigma_2 = 0$)

$$y = (ax + b)^2 \text{ または } y = c \quad : \text{放物線, 直線} \quad (7)$$

3) 二次元応力場 ($g = 0, \sigma_1 \neq 0, \sigma_2 \neq 0$)

$$x^2/b^2 + y^2/(\sigma_1/\sigma_2)^2 b^2 = 1 \quad : \text{楕円, 円} \quad (8)$$

ここで、 a, b, c はいずれも幾何学条件から決まる定数であり、特に二次元応力場において安定な構造の条件式は楕円形状となる。外力条件に対して最も安定な構造は、いずれもその構造の長軸方向 α_e が空間内の最大主応力方向 α_s と一致する場合であり、形状は次式を満たす。

$$a/b = \sqrt{\sigma_1/\sigma_2}, \quad \alpha_e = \alpha_s \quad (9)$$

4.2 アーチ構造を構成する安定な大きさ・粒子数

前項において、解析的に外力状態に対して最も安定な構造の形状が示された。逆に、応力状態と形状が不一致である場合、力の作用方向の変化に対して非常に脆性的な構造であることが考えられる。そこで、応力の作用方向、つまり主応力方向を回転させアーチ構造の安定性を検討する。

実験装置概略図を図 14 に示す。装置は直径 1.0cm のアルミ棒で作成したアーチ構造とアルミ棒積層体（厚さ 150mm, 単位体積重量：20.4kg/m³, アルミ棒間の摩擦角：16deg., 内部摩擦角：27deg., 緩詰め）によって供試体を作成する。傾斜時にアルミ棒積層体の内部摩擦角で大きな変形が発生してしまうが、アーチ構造破壊までの傾斜を測りたいため、図の赤のラインにあたる部分にアルミ素材の剛なシートをかぶせて、上載材料の内部摩擦角を上回る 35.0deg. まで角度を変化させられるようにしている。

実験手順としては、アーチの形状をサポートするアルミ製のアーチ型を設置し、アルミ棒積層体を緩詰め状態で堆積させ、その後アーチ型をジャッキでゆっくりと下げることによってアーチ構造を形成させる。その後、形成アーチに対して傾斜を与え、破壊する角度を計測する。

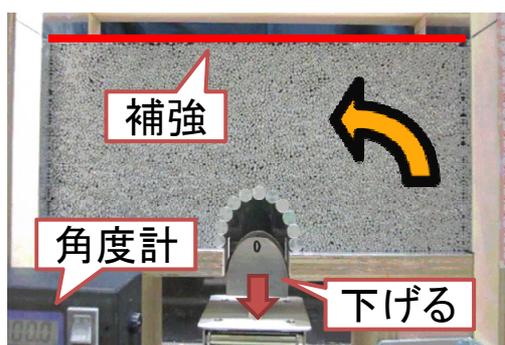
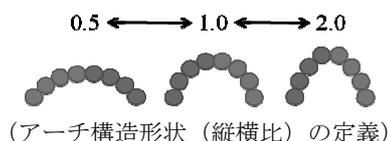


図 14 アーチ強度実験装置概要

表 5 アーチ構造傾斜実験結果

縦横比 個数	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
7	29.3°	f	A	F	K	P
8	23.4°	34.7°	B	G	34.4°	26.2°
9	11.7°	h	C	33.0°	34.0°	29.4°
10	18.0°	i	D	33.4°	28.2°	32.6°
11	9.2°	j	E	32.3°	31.1°	24.0°



各ケースにおける計測結果を表 5 に示す。表中には、アーチ構造が破壊した傾斜角を示している。ただし、35deg. 傾斜させても破壊しなかった場合は記載していない。また、簡易ではあるが、破壊傾斜角ごとに色分けをしている。(0~15deg.: 赤, 15~20deg.: 橙, 20~25deg.: 黄, 25~30deg.: 緑, 30~35deg.: 青)

この表より、形状が円形に近いほど、また、形成個数が少ないほど傾斜に対する安定性が高い構造と考えられる。アーチ構造はその形状の特性から高い強度をもつが、応力方向の回転に伴い発生するせん断力が集中する箇所において、そこに粒子の接点があった場合、接点に働くせん断力が粒子間の摩擦力を超えると破壊に至る。アーチ構造の形成個数 N は少ない方が強度は高い傾向があることも粒子の接点が少ないためといえる。実験では最大 11 個のアルミ棒でアーチ構造を作ったが、アーチ構造は粒子数が多くと形状のバランスが良ければある程度のゆらぎに対して安定であるといえる。

5. 結論

本論文では、細粒分の流出に影響を与える間隙構造に着目し、粒度分布、動水勾配、水位変動が流出量に与える影響を検討した。一次元浸透を模した透水実験では、広範な粒度を含む分布と二粒径混合分布を用いて透水力の増加に伴う流出挙動を検討した。流出可能粒径に対する 4 倍粒

径の混合量によって流出量が大きく増加すること、細粒分の混合量によって大量の粒子流出が確認された。また、供試体内に面状に設置した間隙隙水圧計による局所的動水勾配の結果においては、非常に不均一であり部分的に全体としての動水勾配を上回る箇所が見られた。

三次元個別要素法における数値解析では、簡易化した流体力を考慮して模型実験で実施した粒度分布の間隙構造を検討した。粒子粒径比が 4.0 を境に内部で粒子移動量の増加が見られ、4 倍粒径混合量の増加に伴って移動可能な間隙径の頻度分布と道のりといった内部構造的にも内部浸食に対する安定性が示された。また、細粒分が流出可能な境界を用いた数値実験では、細粒分混合率の増加による流出量の増加に加え、内部においていくつかの粒子が大きな間隙に詰まっている様子が確認された。

最後に、この数個の粒子で構成される目詰り構造をアーチ構造と考え、アーチ形状と構成粒子数が安定性に与える影響を検討した。外力条件の主応力比に対して形状が近く、構成粒子数が少ないほど外力のゆらぎに対して安定であることが示された。

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 によるものであり、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*, 3 (1), pp.3-14, 2008.
- 2) Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E.: Modelling mechanical consequences of erosion, *Geotechnique*, 60(6), pp.447-457, 2010.
- 3) 前田健一, 近藤明彦: 内部構造の安定性に着目した細粒分のダイナミクスに関する検討とモデル化の試み, *第3回メタンハイドレート総合シンポジウム講演集*, pp.10-17, 2011.
- 4) Cundall, P. A., & O. D. L. Strack.: A discrete model for granular assemblies, *Geotechnique*, 29(1), pp.47-65, 1979.
- 5) Maeda, K. and Hirabayashi, H.: Influence of Grain Properties on Macro Mechanical Behaviors of Granular Media by DEM, *Journal of Applied Mechanics JSCE*, 9: pp.623-630, 2006
- 6) T.C.Kenny and D.Lau.: Internal stability of granular finers, *Canadian Geotech. J.*, pp.215-225, 1985.
- 7) 杉井俊夫, 山田公夫, Indraratna, B.: 粒状性フィルター材の透水性挙動の評価, *中部大学工学部紀要*, 第44巻, 2008
- 8) 杉井俊夫, 山田公夫, Indraratna, B.: 粒状性フィルター材の透水性挙動予測に関する試み, *第20回地盤工学シンポジウム論文集 (地盤工学会中部支部)*, pp.1-6, 2008
- 9) Tchen, C.: Mean value and correlation problems connected with the motion of small particles suspended in a turbulent fluid, *D. Sc. dissertation*, Technische Hogeschool, Delft, Holland., 1947.
- 10) 後藤仁志: 数値流砂水理学, 森北出版, 2004.
- 11) Schiller L. and Naumann A.Z.: Über die grundlegenden berechnungen bei der schwerkraftaufbereitung, *Ver. Deut. Ing.*, Vol.77, 318-321, 1933
- 12) 林泰造, 大橋正和: 液体中を沈降する粒子の乱流特性について, *第24回水利講演会論文集*, pp.7-12
- 13) Gibbs, R. J., Matthews, M. D., and Link, D. A.: The relationship between sphere size and settling velocity. *Journal of Sedimentary Petrology*, Vol.41 (1), 7-18. 1971.