水位変動履歴を考慮した埋設管周りのゆるみ形成における内部浸食の影響 Influence of Internal erosion account for loose area around sewage pipe focusing on hydraulic loading history

近藤明彦¹,前田健一²,新井拓弥¹,佐藤弘瑛³

- 1 名古屋工業大学大学院・工学研究科・社会工学専攻
- 2 名古屋工業大学大学院教授・工学研究科・社会工学専攻・E-mail:maeda.kenichi@nitech.ac.jp
- 3 名古屋工業大学・工学部・都市社会工学科

概 要

都市部における陥没災害の主因となっている埋設管周りの空洞発生と進展メカニズムについて,模擬管路 を設置した土槽実験と一次元透水を模擬した流出実験によって検討を行った。小型土槽を用いて模擬管路 周辺の空洞形成プロセスを検討したところ,用いた単一粒度,二粒径混合粒度の両試料で空洞が発生した が,単一粒度でのみ陥没に至った。二粒径混合粒度では,空洞下部に細粒分流出によるゆるみ(粗粒化) 領域とこの領域に起因する透水力の低下も発生していた。本稿ではこのゆるみ領域に着目し,透水実験に おいて既往の粒度分布形状による流出挙動を踏まえ,透水力の履歴が流出挙動に与える影響を検討した。 結果として,急速載荷の影響は1日程度で解消するが,段階的な載荷と除荷による流出量増加の影響は1 週間継続した。また,粒状体内の粒子移動量を測定することで,運動特性として各粒径の移動量頻度分布 から粗粒化の不均一性を示した。

キーワード:内部浸食,透水力,水位変動履歴,粗粒化

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、特に 都市部ではインフラストラクチャーの劣化に伴う大更新 時代を迎え、その発生件数は増加傾向にある。陥没発生箇 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),2)}。陥没発生の傾向としては、埋設管路だけでなく 水位変動を受ける護岸でも発生数が多く、また、豪雨によ る発生数の増加も報告されている。加えて,この透水力に よって粒状体中の細粒分が流出する現象は,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 部分が数多く残されている。

以上を踏まえ、本研究では都市部における陥没現象の主 な原因である埋設管周辺の陥没現象に焦点を当て、既往の 内部浸食に関する報告を踏まえて検討を行った。具体的に は、模擬管路を設置した土槽内³⁾に、降雨浸透や地下水の 流入を想定して透水力を作用させ、土砂の流出から空洞の 発生、進展の後に陥没に至るプロセスを検討する。特に、 空洞の発生による地盤の不均一化によって水面が変化し、 地盤への透水力の変化が考えられる点に着目している。 また, 土槽実験でみられた内部浸食と空洞発生メカニズ ムの解明に向けては, 現象として透水力やその方向の時間 的な変化といった複合的な発生が考えられる。そのため, 基本的な粒状体に一次元浸透を模して流体力を作用させ る検討を行った。着目点としては, 既往の報告における粒 度分布, 透水力による流出挙動評価に加え, 透水力の作用 履歴が流出現象に与える影響と細粒分の運動特性を考慮 した粗粒化現象を定量的に検討した。



図 1 管路周辺の陥没モデル実験概略図

2. 模擬管路への粒子流出による空洞再現土槽実験

2.1 土槽実験概要

図 1 に模擬管路を用いた陥没モデル実験機の概略図を 示す。試料は,塩ビ製土槽内の幅 500mm×高さ 770mm×奥 行 250mmの領域に充填する。模擬管路は,空洞の主要な 発生原因である下水道の取付管を想定し,¢140mm×380mm の円管を地表面から土被り 500mmの位置に設置している。 また,模擬管路への流出は,先端から 5mmの位置にある ¢5mmの孔から流出が可能となっている。加えて,土槽中 には模擬管路の切欠上方 100mm と 200mmの位置に計 10 個の間隙水圧計 P306A (SSK 社製)を水平方向 100mm 間 隔で設置し,水面変化を計測している。

粒子流出を発生させる外力は、降雨による雨水の管路への流入や地下水の流入を想定して、土槽両端のポーラスコ ーンで仕切られたタンクにより、装置外部の給水槽と同一 な水頭が作用するよう調節している。今回の実験では、模 擬管路の切欠より 300mm の水頭が作用するよう調整した。

実験試料には、図2に示す単一粒度と二粒径混合粒度を 用いた。単一粒度の試料には最大粒形 D_{max} =0.425mm, 平 均粒径 D₅₀=0.17mm の豊浦砂を用い、二粒径混合分布の試 料は、硅砂2号と7号を重量比6:4 で混合したものを用い た。最大粒径は D_{max} =4.9mm, 平均粒径 D₅₀=0.25mm とな っている。模擬管路の切欠 ø5mm に対しては、いずれの試 料も全ての粒子が流出可能である。また、両試料は相対密 度 80%に調整している。



図 2 管路周辺の陥没モデル実験に用いた単一粒形と二粒径混合試 料の粒度分布

2.2 粒度形状による模擬管路周辺の空洞発生とその進展の比較

図3 に管路周辺の陥没モデル実験における粒子と水の 累積流出量の経時変化を,図4 に模擬管路周辺の空洞進 展の様子を示す。以降では,2つの図を併せて比較する。

単一粒度では実験開始 10min で,地下水面からその上方 100mmの位置に空洞が発生し,経過時間 20min で供試体 表面まで空洞が進展し陥没が発生した。その後も流出は継 続し,陥没孔周辺の崩壊を経て,経過時間 60minの時点で 地下水面以上の粒子は全て流出した。その流出量は時間経 過と両対数軸上で直線関係がみられることから,常に一定 の速度で流出が発生していたと考えられる。

二粒径混合粒度では、実験開始 20min まで時間経過に対 して比例した流出がみられ、地下水面の高さに空洞が発生 して進展した。しかし、その後は単位時間あたりの流出量 は減少し、実験終了時まで空洞規模に進展は見られなかっ た。流出量を比較すると、単一粒度と比較して、水の流出 量が土粒子より多く、土粒子の流出量は1オーダー程度低 くなっており、管路切欠周辺で試料中の粗粒分が目詰りを 発生させたと考えられる。これは、空洞下部には粗粒分の みで構成されるゆるみ領域の形成からも確認できる。また、 この粗粒化した領域は、模擬管路直上から徐々に進展し、 空洞両端を結ぶ線上に卓越して発達している。



図 3 管路周辺の陥没モデル実験における粒子と水の累積流出量の 経時変化



図 4 単一粒度と二粒径混合粒度における模擬管路周辺の空洞進展(上段:単一粒度,下段:二粒径混合粒度)

ここで、本稿では粒度の違いによる空洞の進展機構に関 する問題を、空洞の進展と粗粒化に分けて検討する。ここ では特に、空洞進展には粒子の継続的な流出が必要と考え、 粗粒化領域に着目して検討を行う。

粗粒化領域を検討するにあたって、粒子の流出を発生さ せる透水力の観点から検討する。図 4 において、単一粒 径で見られる空洞内部の水面は、二粒径混合粒度では見ら れておらず、地下水面の変化、つまり作用する水頭の変化 が考えられる。これを踏まえ、図 5 に実験中の間隙水圧 の経時変化を示す。両試料も実験開始直後に間隙水圧が低 下し、その後、単一粒径では中央部で増加、側方で若干の 低下を示す。中央部の間隙水圧の増加は、流出による水圧 計の下方への移動が原因と考えられる。二粒径混合粒度は、 全体的に間隙水圧の低下が発生し、特に中央付近で最大 3000Pa の低下がみられる.これは、図 4 の空洞進展の様 子から、細粒分の流出による粗粒化によって間隙水圧計が 空気中に露出したためと考えらえる。

以上のことから,管路周辺の目詰りと粗粒化領域の存在 によって地下水面は低下することで,土粒子への透水力が 低下するため流出量が減少したと考えられる。次章では, これを基に粒子の目詰りと粗粒化に着目して検討を行う。 特に,地下水面低下による流出挙動への影響の評価につい ては,透水力による履歴を考慮して検討を行う。



図 5 管路周辺の陥没モデル実験における間隙水圧の減少:(a)単一 粒径,(b)二粒径混合分布

水位変動履歴を考慮した粒度分布形状に起因する粒状体の流出挙動

3.1 実験概要



図 7 動水勾配の作用履歴:(a)透水力単調載荷実験,(b)長期一定透 水力載荷実験

実験は定水位一次元鉛直下向き浸透を模し,供試体下部 より流出量を計測する。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 (*p*_s=2.50g/cm3) を 用い,突き固めにより相対密度 80%の密な状態にした。図 6 に,実験装置概略図と使用した粒度分布を示す。これら の粒度分布は Kenny らの間隙くびれ径^{4),5),6)}をもとに、流 出しにくいとされる直線分布 (st)、流出に対し不安定とさ れる分布 (sp)、st よりも細粒分が多い安定とされる分布 (cv)、フラクタル分布 (fractal: FD=1.40) となっている。

動水勾配の変化については,図7に示す動水勾配の変 化を与えた透水力単調載荷実験と長期一定透水力載荷実 験の2種類を基本として実施した。透水力単調載荷実験は, 動水勾配 i=0.3,0.5,0.7,1.0,2.0,3.0,5.0,7.5,10.0 について,20 分間隔で単調増加させた。長期一定透水力載荷実験では, 所定の動水勾配の履歴を与えたのち,動水勾配 i=5.0 で 10080min(一週間)の流出挙動を検討する。動水勾配履歴 の詳細については各項にて逐次説明する。



3.2 粒度分布形状に起因した透水力の単調載荷による

図 10 粒度形状に基づく内部浸食に対する安定性判定図

図8に様々な粒度分布形状における透水力単調載荷実 験の累積粒子流出量の経時変化を示す。ここで,流出量は, 粒度分布中のDf=0.300mm以下の流出可能量に対する割合 と定義している。累積粒子流出量はいずれの粒度でも動水 勾配の増加に伴って両対数軸上でべき関数的に粒子流出 量の増加がみられる。粒度形状については、st, cv1 の分布 が最も低く、次いで中間粒径が増加していく場合(cv2,cv3)、 減少する場合(sp1, sp2, sp3)の順に流出量が増加している。 また、sp2, sp3の流出挙動に着目すると、動水勾配が2.0, 5.0 の時点で、これまでの流出量の2倍程度流出をしている。

図 9 に様々な粒度分布形状における透水力単調載荷実 験の透水係数の経時変化を示す。動水勾配の増加に伴って, いずれの粒度でも透水係数は低下している。低下割合では, 細粒分含有率が高い cv5, cv6 で 90%と最も低下し, 細粒分 含有率の低い分布で 50%程度に低下している。また, 20 分の動水勾配保持期間の間でも、減少傾向が見られる。

図 10 に既報⁷⁾の粒度形状に起因する間隙構造としての 間隙径と連続性から、内部浸食に対する安定性判定図を示 す。各粒径が均等に含まれる粒度は内部浸食しにくく安定 で、粗粒分の多い粒径は内部浸食によって流出し続け不安 定である。細粒分が多い分布では内部浸食は発生しないが、 流出境界の間隙径では大量の流出に至る。



図 11 透水力単調除荷実験における流出挙動:(a)累積流出量経時変 化,(b)透水係数の経時変化,(c)動水勾配ごとの流出量

図 11 に、前項において粒度分布とその流出挙動が特徴 的であった st, cv4, sp2 の 3 つの粒度分布における透水力 単調除荷実験の流出挙動を示す。図中には、透水力単調載 荷時の結果も併記している。図 11(a)に示す単調除荷の累 積流出量では、最大動水勾配において総流出量の80%前後 が流出し、最終的な流出量は st, sp2 の粒度分布では同程 度, cv4 では 50%に減少している。

次に図 11(b)に示す透水係数の経時変化については,除 荷の進行に伴い、いずれの粒度でも上昇するが、単調載荷 実験時の動水勾配と比較すると, st, cv4 は全ての動水勾 配で高いが, sp2 は逆にいずれも低くなっている。

図 11(c)には, 透水係数と同様に各動水勾配あたりの流 出量でまとめなおしている。図より、動水勾配が1.0以下 の範囲に着目すると、単調除荷では初期に 50 倍以上の透 水力が加えられていても単調載荷時とほぼ同量の流出量 が発生している。これは、流出量は動水勾配の変化直後に 最も発生することを踏まえると、動水勾配の変化自体が一 定割合の流出を発生させると考えられる。



図 12 長期一定透水力載荷実験前に与える動水勾配履歴

本項では, 流出量の最も多い粒度分布形状 sp2 について, 動水勾配履歴が長期的流出挙動に与える影響を検討する。 図 12 に長期一定透水力載荷実験の直前に与える 5 種の履 歴を示す。単純載荷(●):履歴なし,単調載荷(■),急速 載荷(▲):*i*=0.3 で 120min 間の透水後に *i*=5.0 に上昇,単調 除荷(□):*i*=9.7,9.5,9.3,9.0,8.0,7.0 の順に 20 分間隔で単調減 少,急速除荷(△):*i*=10.0 で 120min 間の透水後に *i*=5.0 に 減少とした。ここでは,単調載荷を基本として検討する。

図 13 に、図 12 の動水勾配履歴が与えられた供試体の流 出挙動を、累積流出量、単位時間当たりの流出量(流出速 度)と透水係数の経時変化について示す。なお、図中の時 間軸は図 11 における t=120min 以降の履歴中を含まず,一 定透水力下での流出量のみを示している。

図 13(a)より,一定動水勾配下でも流出は継続して発生 し,単調除荷を除くケースで 1440min(1日)経過後から 流出量が減少している。最終的な流出量は単調載荷の流出 量に対して,単調除荷は 4.7 倍と最も流出し,次いで単調 載荷 1/3 倍,急速載荷 1/4 倍,単純載荷 1/5 倍であった。

次に図 13(b)に示す単位時間あたりの流出量について, 時間軸を対数でとり,載荷初期の挙動に着目して検討する。 図中の経過時間 10 分までの値に着目すると,大きく 2 つ のグループに分けられる。単純載荷と急速載荷の初期流出 速度が高いグループと,単調載荷,単調除荷,急速除荷の 低いグループである。これらは時間経過に伴って,初期流 出速度が高いグループはべき関数的に流出速度が低下す るのに対し,単調載荷,単調除荷については流出速度が低 下しにくい状態を保持している。また,急速除荷の流出速 度は下限値をとり,1200min 経過後に初期流出速度が高い グループも同様の流出速度となる。

図 13(c)に示す透水係数の経時変化も、単位時間あたり の流出挙動と同様のグループがみられる。初期の流出速度 が高い単純載荷と急速載荷のグループは初期透水係数も 高いが、時間経過に伴って低下し、急速除荷と同様の透水 係数に収束する。単調載荷、単調除荷は初期の透水係数は 低く、時間経過に伴って一定割合で低下し続ける。

図 13(d)に実験終了時の流出量と動水勾配履歴の増分と の関係を示す。図中には、赤プロットで履歴を与えている 間の流出量を含めた累積流出量を示す。図より、履歴作用 中の流出量を踏まえた累積流出量は,単純載荷,急速載荷, 急速除荷でほぼ同量が流出している。

以上より,急速な載荷による流出挙動は,その載荷直後 に最も影響が現れるが,時間経過に伴い1日程度で解消す る。段階的に透水力が作用した場合は,流出が発生しやす い状態が保持される。流出が継続しつつも透水係数が下が り続けることを踏まえると,目詰りにより透水係数が全体 的に低下する中で,供試体内部で不均一に粗粒化が進行し ていると考えられる。



図13 透水力履歴に起因する長期一定透水力載荷実験の流出挙動 (a)累積流出量経時変化,(b)単位時間あたりの流出量,(c)透水 係数経時変化,(d)履歴を考慮した動水勾配増分と流出量関係





図 15 粒度形状に起因する長期間一定動水勾配下における累積流出 量の経時変化

本章では、供試体内の粒子運動特性とこれに起因する粗 粒化を検討する。検討対象とする実験条件としては、長期 一定透水力載荷実験において、保持動水勾配と粒度分布を それぞれ変化させたケースを対象としている。

図 14 に保持動水勾配を i= 0.5, 1.0, 5.0 と変化させた粒度 形状 sp2 の累積流出量の経時変化を示す.長期計測開始か ら 1440min 経過後(1日後)までは、単位時間当たりの流 出量が最も多く、その後保持動水勾配が低いほど緩やかに 流出が継続される.図 15 に粒度分布 sp2, st, cv4 の累積粒 子流出量を示す。累積粒子流出量の傾向は、いずれの粒度 でも時間経過に伴い低下し、単調載荷試験と同様に sp2, cv4, st の順に流出量が多い。

図 16 に実験前後の供試体側面写真を示す。図より壁面 付近の粒子の移動によって着色層が薄く滲んでいる様子 が確認出来る。粒子の移動量は、この供試体を深さ方向に 1mm 間隔でサンプリングし、着色粒子数を数え上げるこ とで移動量を検討した。また、図 17 に供試体の実験前後 における粒度分布の変化を示す。0.300mm 以下の流出可能 粒子の含有率に着目すると、実験後に供試体下部では含有 率が低下し、上部と中部では増加していた。よって、供試 体内でも不均一に目詰りが発生しているといえる。







図 17 長期一定透水力載荷実験前後の粒度分布の変化(sp2, *i=*5.0, 1week)

4.2 粒子運動特性としての移動量の頻度分布



図 18 供試体下部における粒子移動量の頻度分布 (sp2, i=5.0, 1 week)

図18に長期一定透水力載荷実験において粒度形状sp2, 保持動水勾配i=5.0における粒径別の粒子移動量の頻度分 布を示す。粒子移動量については、供試体作成時の着色層 下端を移動量0の基準としている。また図中には、供試体 内の位置毎の傾向を観察するために、(a)180-199mm, (b)90-109mm, (c)0-19mmの3つの高さを抽出している。(c) の供試体高さ0-19mmにおいては、サンプル取得時の不手 際により調査区間に対して最大移動距離の12.2mmまでの 調査となっている。

まず全体に共通する傾向として、粒子移動の頻度は移動 距離に対して対数正規分布に従うよう減少している。粒径 毎の粒子移動量に着目すると、粒子移動は0.212mm以下の 粒子に集中しており、0.600mm以上の粒子には移動がほと んどみられない。これらの粒径の多くは約90%以上が供試 体作成時の設置位置に残留しており、最長でも1.5mm程度 の移動量であった。細粒分の移動距離に関しては、約50% が作成時の設置位置に残留しており、最長で12.5mm程度 がある程度の割合で移動している。供試体内の位置毎にみ ると、供試体の下方ほど多くの粒子がより長い距離を移動 している。特に図18(c)の0.075-0.106mm、0.106-150mmの粒 子は、80%以上の粒子が設置位置より下方に移動している。 また、0.600-0.850mmの粒径については約15%の粒子が下 部へ移動しており、他の高さより5%前後の移動頻度の上 昇が確認出来る。



図19に長期一定透水力載荷実験における保持動水勾配 i=1.0と5.0の違いによる平均粒子移動量を比較する。粒径 別に平均移動量を見ると,透水力の減少によって粒子移動 量は50%程度低下している。また,保持動水勾配i=5.0では, 移動量と粒径の間に指数関数的な関係がみられたが,i=1.0 では0.600mm以上の粒子移動量はより低下している.供試 体の位置別に比較すると,0-19mmの移動量が最も低くな っている。 図20に長期一定透水力載荷実験における粒度形状st, cv4 による平均粒子移動量と粒径の関係を検討する。粒径に対 する粒子移動量の関係をみると,若干の増減はあるがsp2 と同様に指数関数的な減少を示している。ただし,その移 動量はcv4の供試体高さ90-109mm,粒径0.075-106mmを除 いて1.0を下回っている。つまり,間隙中を通過しながら 移動する内部浸食現象は発生していないといえる.ここで, 図15の粒度形状別の累積流出量では,sp2の流出量に対し てcv4は40.2%,stlt6.2%であった。内部での粒子移動量に 約10倍以上の差があることを踏まえると,流出量に対し定 性的な傾向は一致するが,cv4の流出量が顕著に多いとい える。この理由として,計測した流出量は,供試体下部の 境界からの観測値であり,st,cv4の粒度形状では流出境界 からの流出が支配的であったと考えられる。



4.3 粒度の収支を基にした内部浸食



内部浸食現象を考える上では、粒子の移動量やその割合 だけでなく、結果的にその粒子移動の収支によって発生す る粗粒化や目詰りの進行度合いを検討することが重要と 考えられる.そこで、図18に示す粒子移動量の頻度分布と 各層の粒度分布を基に、各層あたりの粒径別の流出入割合 とその収支を算出し図21に示す.内部浸食現象について考 えるため、本項では粒度形状sp2についてのみ考察する. 図には、供試体内の位置毎の傾向を観察するために、 (a)199mm、(b)109mm、(c)19mmの3つの高さを抽出してい る.(c)の供試体高さ19mmにおける流出入挙動に着目する と、粒径0.075-0.106mmの粒子は初期混合量の90%が流下 方向へ移動すると共に、上流側より60%の流入がみられた. よって、その収支として30%の粒子が流出し、粒度の粗粒 化が進行していた.粒径0.600-0.850mmの粒子は15%程度 の流出がみられたが、収支は3%の流出であった.

粒径毎に流出入の収支をみると、粒径0.212mm以下の粒 子ではいずれの高さでも10-20%程度の流出がみられ、粒径 0.600mm以上の粒子では最大10%の流出入となっている. 供試体高さ毎では、流出入割合が供試体の下方向ほど大き くなっているが、収支の傾向に大幅な違いは見られない.



力載荷実験, 粒度形状 sp2, 保持動水勾配 i=5.0)

図22は図21における粒子混合量の収支を供試体高さ毎 に算出した結果を示す.また,間隙水圧計より算出した供 試体の局所的動水勾配も示す.図より,供試体の高さ方向 に対して 0.600mm 以上の粒子では最大 20%程度の収支の 差が発生している.これに対して,0.212mm 以下の粒子で は供試体の 130mm 以上の上方と,40mm 以下の下方で最 大 65%の流出が発生している.また,マクロな動水勾配に 対して局所的動水勾配の高低を対比すると,定性的な一致 がみられる.これは,粗粒化が進行した領域において透水 係数が上昇するため,Darcy 則に基づいて局所的な動水勾 配が低下したと考えられる.

5. 結言

本稿では、都市部における陥没災害の主因となっている 埋設管周りの空洞発生と進展メカニズムについて、模擬管 路を設置した土槽実験と一次元透水を模擬した流出実験 によって検討を行った。以降に得られた知見をまとめる。 試料に単一粒度、二粒径混合粒度を用いた結果、両試料で空洞が発生したが、単一粒度でのみ陥没に至った。二粒径混合試料では、埋設管路周辺に粗粒化した領域がみられ、地下水面の低下が確認された。つまり、管路の切欠における粗粒分の目詰りと透水力の低下が同時に発生したため流出量が減少し、陥没に至らなかったと考えられる。
 水位変動に対する流出挙動として、一次元透水実験によって検討を行った。動水勾配の単調載荷と単調除荷で比較すると、単調載荷時の半分から同量の流出が発生していた。流出は動水勾配の変化直後に集中していたため、透水力の変化自体が一定の流出を発生させると考えられる。

3) 2 時間の動水勾配変動履歴がその後の一定透水力下で の流出挙動に与える影響を透水実験により検討した。単位 時間あたりの流出量で比較すると,急速な載荷または除荷 による流出挙動は,その変動直後に最も影響が現れるが, 流出量への影響は時間経過に伴い1日程度で解消してい た。段階的に透水力が作用した場合は,単位時間あたりの 流出量が保持され,履歴のない試料より1週間で3-5倍の 流出が発生していた。また,流出が継続しつつも透水係数 が低下し続けるため,目詰りにより透水係数が全体的な低 下と,供試体内部での不均一な粗粒化が示唆される。

4) 粗粒化について、着色粒子を供試体内に挿入し、粒子移動量と供試体内の位置ごとの流出入割合とその収支から検討した。粒子の移動は、0.600mm以上の粗粒分には見られず、0.212mm以下の細粒分の移動が殆どで、移動距離が長くなるほど、指数関数的に移動頻度が減少していた。流出入割合とその収支については、内部浸食が発生しやすい粒度の細粒分で、初期混合量の90%が流下方向へ移動すると共に、上流側より60%の流入がみられた.っまり、収支として30%の粒子が流出し、粗粒化が進行していた.また、供試体高さごと粒度の収支から、粗粒化は不均一に進行し、局所的な動水勾配と定性的な一致を示した。

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

- Wood, D. M. and Maeda, K.: Changing grading of soil: effect on critical states, *Acta Geotechnica*, 3 (1), pp.3-14, 2008.
- Wood, D. M., Maeda, K. and Nukudani, E.: Modelling mechanical consequences of erosion, *Geotechnique*, 60(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.
- Kenny, T. C. and Lau, D. : Internal stability of granular filters, Canadian Geotech. J., Vol.22, pp.215-225, 1985.
- 5) 杉井俊夫,山田公夫,名倉晋:限界流速からみた浸透破壊の発生 と進行,地盤工学会誌,57-9, pp.26-29, 2009.
- Uno, T., Kamiya, K. and Tanaka. K. : The distribution of sand void diameter by air intrusion method and moisture characteristic curve method, *J. of JSCE(III)*, No.469, pp.25-34, 1993.
- 7) 近藤明彦,前田健一,山田高弘;土の粒度形状と間隙構造に着目 した出砂に対する安定性,第5回メタンハイドレード総合シンポ ジウム論文集,pp.28-35,2013.