

粒度分布形状と内水圧変動に着目した管渠周辺の陥没挙動

Subsidence Behavior around sewage pipe focusing on curvature of grain size and internal water pressure

新井拓弥¹, 前田健一², 佐藤弘瑛¹, 田坂晃一³

- 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

都市部では多くのインフラが更新期を迎え、陥没発生件数が増加傾向にある。そこで、本研究では都市部における陥没現象の主な原因である管渠周辺の地盤の陥没現象のメカニズムの解明に向けてモデル実験と画像解析を行った。その結果、粒度分布形状によって空洞の規模が異なることが分かった。模擬管渠周りでは粗粒化領域が形成されることで、地盤内の透水係数が上昇し、水の流出量が増加することが分かった。管渠に内水圧が载荷されると、水の流出の瞬間に土粒子が流出し、流出量が増加する傾向にある。画像解析の結果、管渠の直上で移動量が多いことが分かった。これは粗粒化領域の形成により、2号粒子の骨格が崩れることにより、下方に移動したためと考えられる。

キーワード：内部浸食，管渠，粒度分布形状，内水圧

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。そこで、図1のような陥没発生の危険性を踏まえた対処の優先度の決定や対処技術の選定など、維持管理の効率向上が強く望まれている。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⁾。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管渠周辺の陥没現象に焦点を当て、検討を行った。模擬管渠を設置した土槽内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。

2. 土粒子流出による模擬管渠周辺の土槽実験

2.1 実験概要

表1 実験名と各実験条件

実験名	外力条件	試料	相対密度
外水位一定実験	外水位一定	豊浦砂	80%
		珪砂 7号:2号=6:4	
		珪砂 7号:2号=4:6	
内水圧実験	外水位一定 +内水圧	珪砂 7号:2号=6:4	-
		珪砂 7号:2号=4:6	

表1に今回行った実験名と各実験条件を示す。今回、地下水位が一定である場合を想定した外水位一定実験と内水圧が载荷された場合を想定した内水圧実験を行った。外水位一定実験の外力条件は、一定の水位を作用させた外水位一定に対し、内水圧実験は外水位一定に加えて土槽の模擬管渠から内水圧を载荷させた。試料は豊浦砂と珪砂7号2号を混合したものをを用いた。また、内水圧による空洞進展を把握するために、内水圧実験は外水位一定実験を行った後に連続して行った。そのため、外水位一定実験では、相対密度80%で作成しているが、内水圧実験での相対密度は土粒子の流出により、80%よりも低いと考えられる。

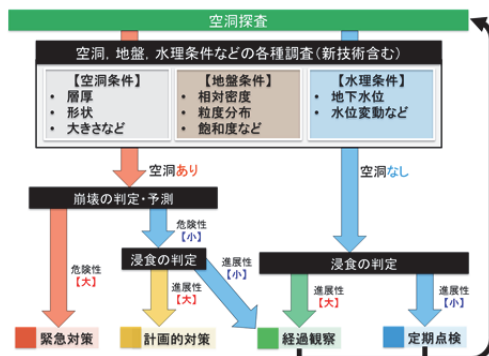


図1 予防保全型の空洞対策フロー図

2.1.1 外水位一定実験

図 2 に外水位一定実験の土槽概略図を示す。供試体は、塩ビ製土槽内の幅 500mm×高さ 770mm×奥行 250mm に作成する。模擬管渠は、空洞の主要な発生原因である下水道の取付管を想定し、 $\phi 140\text{mm} \times 380\text{mm}$ 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、模擬管渠への流出は、 $\phi 5\text{mm}$ の孔から可能となっている。土粒子の流出を発生させる外力は、降雨による雨水の管渠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より流入させ、土槽裏面の孔から水をオーバーフローさせることでタンク内の水位を一定に保っている。今回の実験では、模擬管渠の中心より 370mm の水頭が作用するよう調整した。図 3 に本実験の粒度分布を示す。本実験では、粒度分布形状の異なる試料として、豊浦砂と階段粒度を用いた。階段粒度の試料は、珪砂 7号と 2号を重量比 6:4 (以下 S6:4 と称す) と 4:6 (S4:6) で混合したものを用いた。模擬管渠の切欠 $\phi 5\text{mm}$ に対しては、いずれの試料も全ての土粒子が流出可能である。また、各供試体は相対密度 80% に調整している。水面の変化を調べるために、S6:4, S4:6 の実験の際に、土槽の底面に 4 個の間隙水圧計 P306A (SSK 社製) を図 2 に示す位置に設置した。また、地盤の変状の様子を捉えるため、地盤内に着色した色砂を管上から 100mm 間隔で敷いた。色砂の粒度分布は各実験ケースの粒度分布と同じものを用いた。

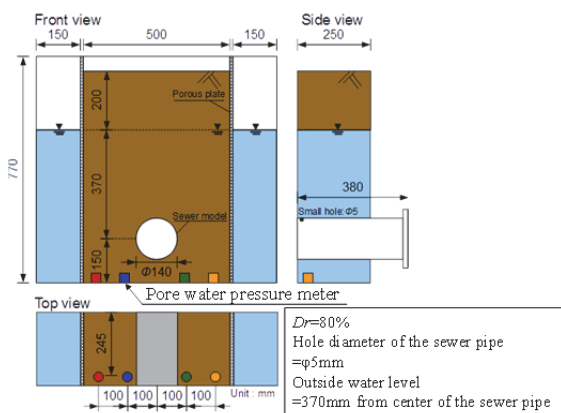


図 2 外水位一定実験の土槽概略図

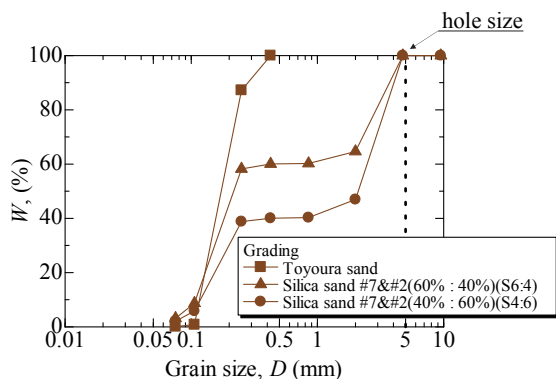


図 3 実験に用いた試料の粒度分布

2.1.2 内水圧実験

近年、集中豪雨が増加傾向にあり、2014 年には 1 時間降水量 50mm 以上の雨が 237 回発生している⁴⁾。つまり、管渠へ大量の水が流れ込む機会が増えている。そのため、管渠内が満水になり、破損部から内水圧が载荷された際を想定した内水圧実験を行った。図 4 に内水圧実験の土槽概略図を示す。実験に用いた試料は S6:4, S4:6 で、空洞がある状態を想定し、その空洞がどのように進展するかを把握するため、外水位一定実験を行った後に続けて実験を行った。実験手順として模擬管渠の裏蓋を閉じ、土槽外部の水槽から模擬管渠へ注水し、管渠中心から 710mm 相当の水頭を作用させる。その後、管渠内が満水になったと同時に 5 分間土槽内に内水圧を作用させる。5 分後に裏蓋を外し、内水圧を除荷する。除荷した時間を 0 分とし、所定の間隔で水と土の流出量を測定した。以上の手順を 1 サイクルとし、合計 5 サイクル行った。

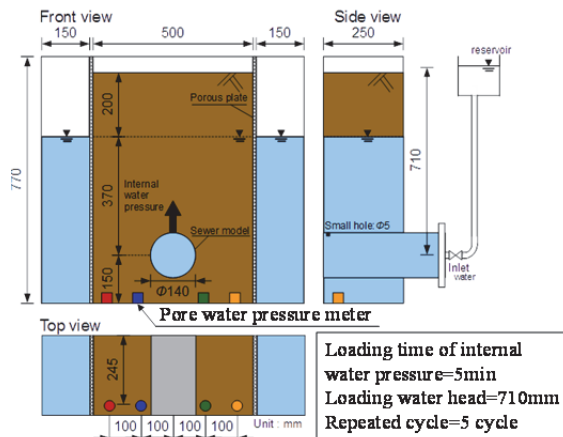


図 4 内水圧実験の土槽概略図

2.2 調査項目

表 2 各実験の調査項目

実験名	試料	流出量計測	貫入強度実験	画像解析	ふるい分け試験
外水位一定実験	豊浦砂	○	-	-	-
	珪砂 7号:2号 =6:4	○	-	-	-
	珪砂 7号:2号 =4:6	○	-	○	-
内水圧実験	珪砂 7号:2号 =6:4	○	○	-	○
	珪砂 7号:2号 =4:6	○	-	-	○

表 2 に各実験の調査項目を示す。次項に各調査項目の概要を示す。

2.2.1 貫入強度試験

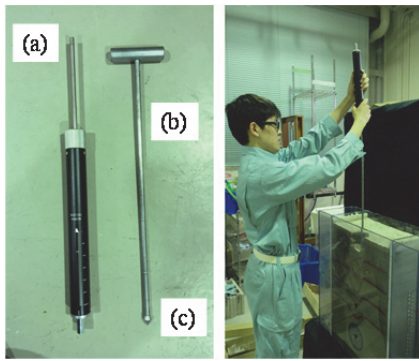


図 5 土検棒貫入の様子

((a)テンションゲージ (b)ロッド (c)コーン)

S6:4 の実験終了後に地盤内のゆるみを把握するため、貫入強度実験を行った。使用した機器として、独立行政法人土木研究所材料地盤研究グループ地質チームが発案した土層強度検査棒（以下、土検棒と称す）を使用した。土検棒は先端コーン付きの細いロッドを押し込むことにより、土層強度や土層深を簡易に測定できる機器である。貫入強度実験の手順として、基準点から所定の深で先端にコーンを付けたロッドを刺す。刺した後にロッドをテンションゲージで押し、ロッドが 1cm 下がった時点でテンションゲージを押すのをやめ、押した荷重を読み取り、その値から貫入強度を算出した。これを中央部と右端で行った。貫入強度 q (kN/m²) は次式で算出する。

$$q = \frac{Q}{1000 \times A} \quad (1)$$

ここに、

$$Q = W + mg \quad (2)$$

Q は先端コーンの貫入力 (N)、 A は先端コーンの底面積 1.76×10^{-4} (m²)、 W は荷重計の読み値 (N)、 m は先端コーンとロッドの合計質量 (kg)、 g は標準重力加速度 (m/s²) である。また、土検棒の荷重計の読み値と、ロームやシラス地域でのスウェーデン式サウンディングによる換算 N 値には、ばらつきはあるが以下のような関係があると実験結果として得られている⁵⁾。

$$N = \frac{W}{33.17} \quad (3)$$

しかし、この式を用いて N 値を算出すると、危険側となる可能性があることや、データ数が少ないことから、同研究所では安全側に見積もり、以下の式を採用している。

$$N = \frac{W}{60} \quad (4)$$

(4) 式を用いて簡易的に換算 N 値を算出することで、地盤内のゆるみを定量的に評価した。

2.2.2 PTV 画像解析

土粒子の流出により、模擬管渠周りで 2 号粒子の下方への移動が想定されるため、S4:6 の実験動画に対して

PTV 画像解析を行った。PTV 法は単一粒子を追跡する画像解析法で、実験開始前から開始後の粒子の移動量と座標データを取得し、移動前の粒子の座標に移動量の度合いを色付けした。

2.2.3 ふるい分け試験

地盤内の粒度分布変化を把握するために、S6:4、S4:6 の内水圧実験終了後に、各領域の試料を採取しふるい分け試験を行った。

3. 実験結果・考察

3.1 外水位一定実験

3.1.1 管渠周辺の地盤変形挙動

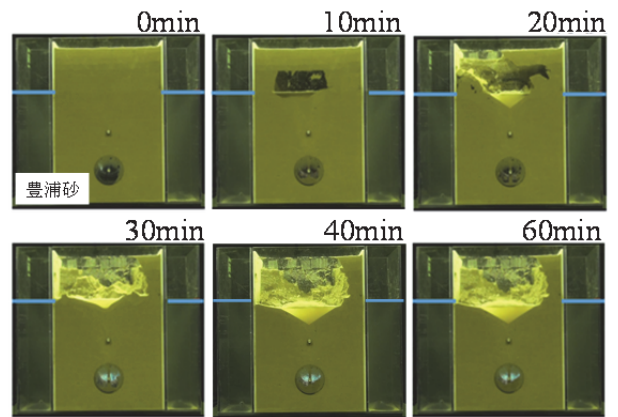


図 6 外水位一定実験における空洞進展の様子(豊浦砂)

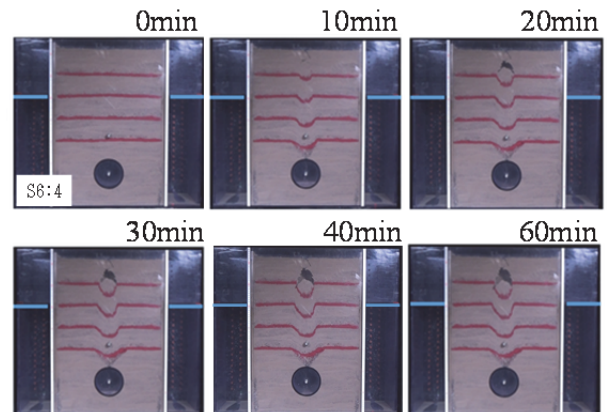


図 7 外水位一定実験における空洞進展の様子(S6:4)

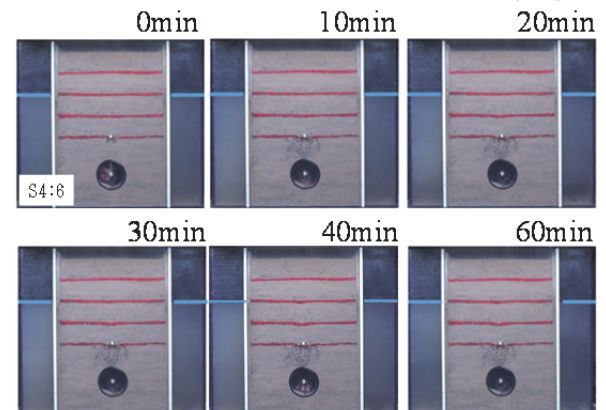


図 8 外水位一定実験における空洞進展の様子(S4:6)

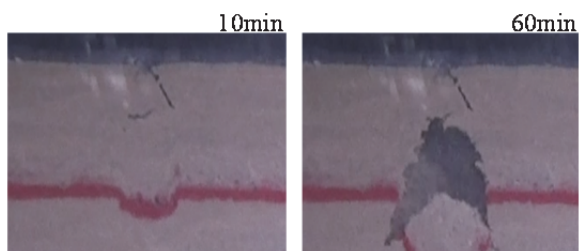


図 9 S6:4 における地表面付近の空洞の様子

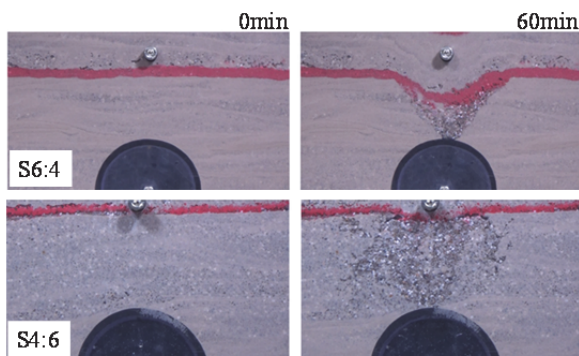


図 10 模擬管渠周辺の粗粒化の進展の様子

図 6, 7, 8 に外水位一定実験における空洞進展の様子を、図 9 に S6:4 における地表面付近の陥没の様子を、図 10 に模擬管渠周辺の粗粒化の進展の様子を示す。図 6 より、豊浦砂では 10 分後に水面付近で大きな空洞が発生し、20 分後には地表面の左半分が陥没した。60 分後の時点で地下水面以上の粒子は全て流出した。図 7, 9 より、S6:4 では 10 分後には地表面まで亀裂が進展し、20 分後には、水面から 150mm 付近で空洞が発生した。その後、空洞の規模は時間と共に大きくなったが地表面が陥没することはなかった。これは、不飽和土による架橋領域が形成されることで、地盤の耐力が発揮されたためと考えられる。また、色砂の変状の様子より、地表面に近い領域は、高さ方向への変状が大きく幅方向の変状は小さいが、模擬管路に近い領域は、高さ方向の変状が小さく幅方向の変状は大きいことが分かった。図 8 より、S4:6 では終始地表面に変化は見られなかった。図 10 より、S6:4, S4:6 では、模擬管渠周りに細かい土粒子が抜けた粗粒化領域が形成された。また、このように土粒子の流出によって、ゆるみや強度低下が発生することが既往の研究で報告されている⁶⁾。つまり、この模擬管渠周りにおいても、同様にゆるみや強度低下が発生していると考えられる。このことから、粒度分布によって空洞の規模や地盤内の変状に違いがあることが分かった。

3.1.2 土粒子と水の流出量

図 11 に土粒子と水の累積流出量の経時変化を、図 12 に土粒子濃度の経時変化を示す。図 11 より、豊浦砂では水の流出量及び土粒子の流出量は時間のべき関数となっているが、S6:4, S4:6 では時間と共に流出量が減少している。また、豊浦砂では、土粒子の流出量の方が水

の流出量よりも多いが、S6:4, S4:6 では土の流出量よりも水の流出量の方が多くなっている。図 12 より、豊浦砂の粒子濃度は約 60%付近で一定であるが、S6:4, S4:6 は、時間と共に粒子濃度が減少しており、最終的にはほぼゼロになった。また、図 11 は両対数グラフより、両試料とも単位時間あたりの水の流出量は増加している。つまり、地盤内の透水係数が増加しており、水の流出量は増加しているが、土粒子の流出量は減少していることが分かった。これは、まず土粒子の流出により、粗粒化領域が形成されることで、局所的に透水係数が増加する。その結果、供試体全体の透水係数が増加することで水の流出量が増加したと考えられる。一方、土粒子の流出による細かい土粒子の移動が発生し、2号粒子間で目詰まりが発生する。その結果、局所的に透水係数が下がり、時間とともに土粒子の流出が減少したと考えられる。この目詰まりと粗粒化領域による影響で、土粒子濃度が継続して減少していったと言える。また、粒子が抜けることで、透水係数が減少するという挙動は、次元透水実験でも確認されている⁷⁾。

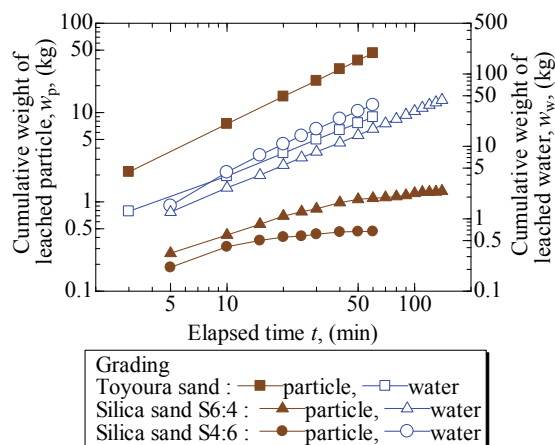


図 11 土粒子と水の流出量の経時変化

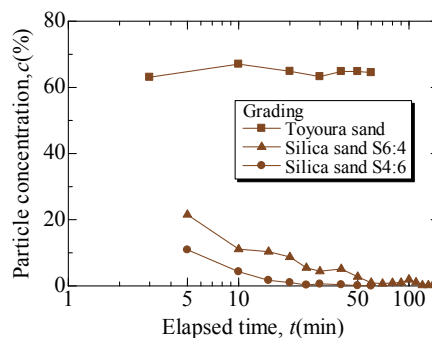


図 12 土粒子濃度の経時変化

3.1.3 間隙水圧による地盤内の水面変化

図 13, 14 に間隙水圧による水面の経時変化を示す。両試料とも初期状態と比べて、時間と共に約 5cm ほど水面が低下している。また、土槽中央部にかけて水面が低下している傾向にある。これは前項で示した土槽中央粗粒化領域の形成により、局所的に透水係数が増加したため、水面が低下したと考えられる。

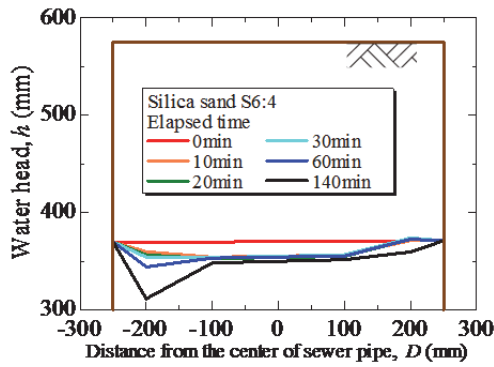


図 13 間隙水圧による地盤内の水面の経時変化(S6:4)

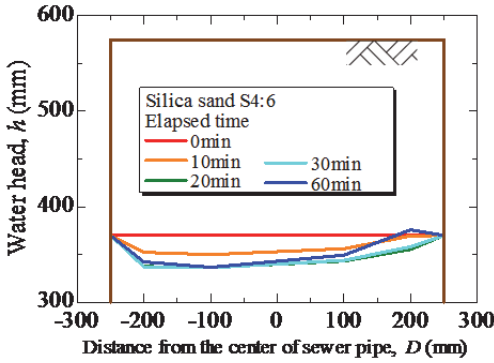


図 14 間隙水圧による地盤内の水面の経時変化(S4:6)

3.1.3 S4:6における硅砂2号の移動量

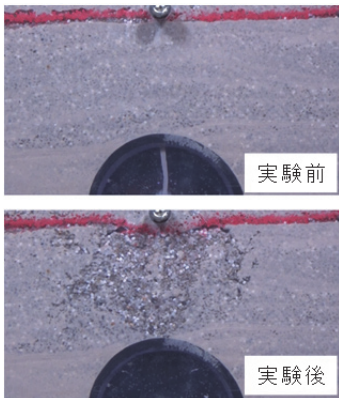


図 15 S4:6における模擬管渠周辺の粗粒化様子

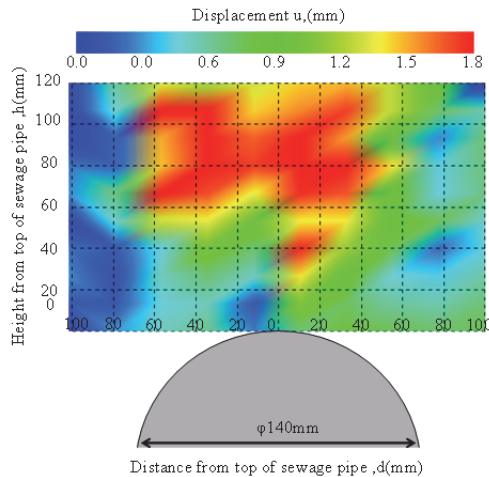


図 16 PTV 画像解析による硅砂2号の変位分布

図 15 に S4:6 における模擬管渠周辺の粗粒化様子を、図 16 に画像解析による粗粒化領域の進展の度合いを示す。図 15 に示すように、実験前から実験後までの動画を一定間隔でキャプチャーし、移動量を算出したものが図 16 である。図 15 より 2 号粒子が、模擬管渠の管上 60~120mm の領域で多く移動しており、その中でも模擬管渠の孔の直上の動きが活発であることが分かった。

そこで、2 号粒子だけで骨格を形成していると仮定し、骨格間隙比での評価を試みる⁸⁾。骨格間隙比 e_s は次式で求められる。

$$e_s = \frac{V_w + V_{s7}}{V_{s2}} \quad (1)$$

(1) 式の右辺を変形させると、

$$e_s = \frac{e + f'_{c7}}{1 - f'_{c7}} \quad (2)$$

f'_{c7} は土粒子全体における 7 号粒子の含有率である。相対密度 80% での間隙比 $e=0.496$ より、(2) 式を用いて骨格間隙比を算出すると、 $e_s=(0.496+0.4)/(1-0.4)=1.49$ である。つまり、実験開始前の骨格間隙比が 1.49 であり、2 号粒子だけでは骨格として形成していないと考えられる。つまり、模擬管渠周りの 7 号粒子の流出に伴い 2 号粒子が崩れるように下方に移動したと考えられる。

3.2 内水圧実験

3.2.1 管渠周辺の地盤変形挙動

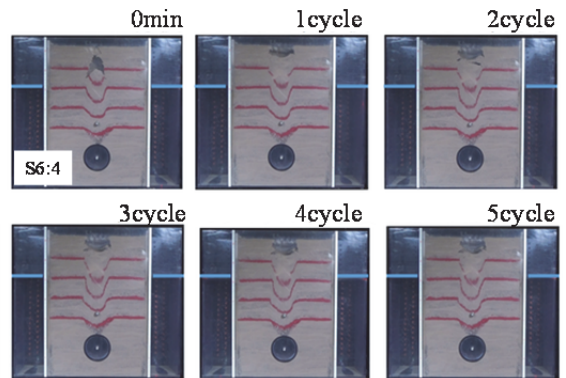


図 17 内水圧実験における各サイクル終了後の空洞進展の様子(S6:4)

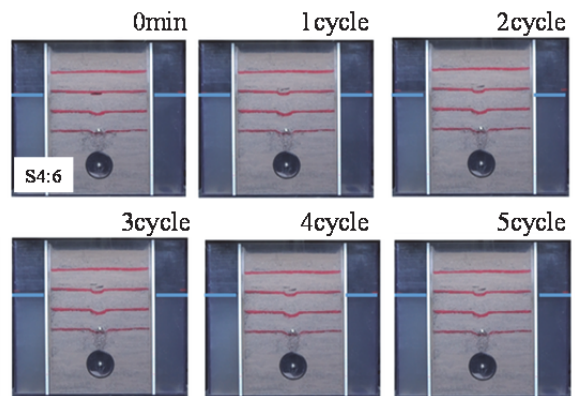


図 18 内水圧実験における各サイクル終了後の空洞進展の様子(S4:6)

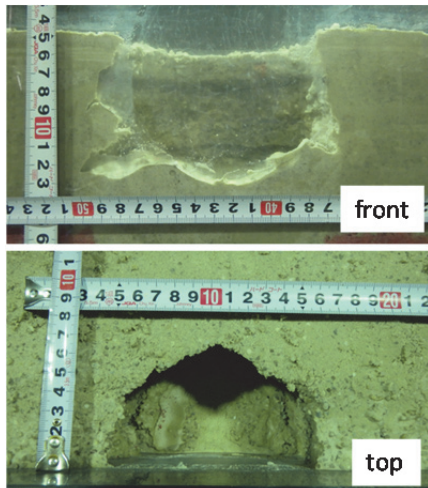


図 19 S6:4における内水圧実験終了後の陥没の規模

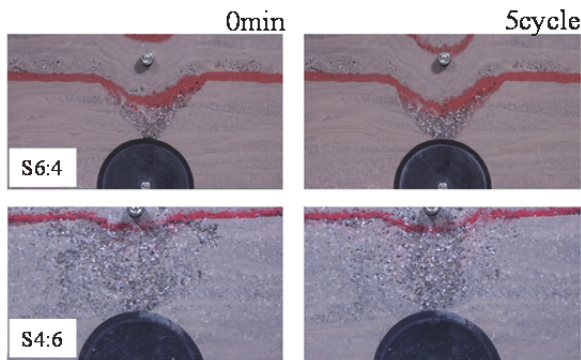


図 20 模擬管渠周辺の粗粒化の進展の様子

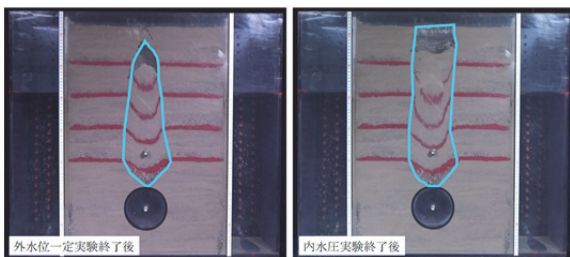


図 21 S6:4における各実験後の色砂の移動が顕著であった領域

図 17, 18 に内水圧実験における各サイクル終了後の空洞進展の様子を、図 19 に S6:4 における内水圧実験終了後の陥没の規模を示す。図 17 より、S6:4 では 1 サイクル終了後に空洞の位置が上部へ移動し、地表面まで達し陥没に至った。その後、空洞の規模が進展することはほとんどなかった。また色砂の変状を見ると、高さ方向の変状は地表面に近い領域ほど大きかったが、幅方向の変状は管渠周りから地表面まで、どの領域も等しかった。サイクルを重ねるごとに地表面に近い領域ほど大きく移動していることが分かった。図 18 より、S4:6 は地表面付近にあった空洞が、3cm ほど上方に移動したが、その後大きな変状は見られず、地表面が陥没することがなかった。図 19 より、内水圧実験終了後に陥没規模を測

定したところ、幅 12cm、奥行 7cm、深さ 8cm の陥没孔が見られた。また、陥没孔の底面には細かい土粒子が溜まっていることが確認された。これは内水圧载荷により上方に移動した細かい土粒子が、除荷された際に陥没孔底面の間隙から抜けなかったためと考えられる。

図 20 に模擬管渠周辺の粗粒化の進展の様子を、図 21 に S6:4 における各実験後の色砂の移動が顕著であった領域を示す。図 20 より、両試料とも粗粒化領域の進展は見られず、色砂が下方に移動するだけであった。図 21 より、外水位一定実験の土粒子の移動範囲は、模擬管渠に近いほど広く、地表面に近づくにつれて狭くなるが、内水圧実験は模擬管渠から地表面まで同じ幅で変状し、なおかつ、外水位一定試験の移動範囲より広がることが分かった。つまり、内水圧が载荷されると土粒子の移動範囲が広がり、空洞の進展が顕著であるため、内水圧による地盤の損傷は大きいと考えられる。

3.2.2 土粒子と水の流出量

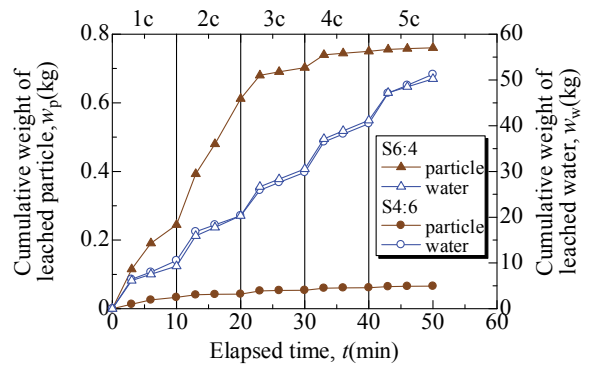


図 22 土粒子と水の累積流出量の経時変化(S6:4)

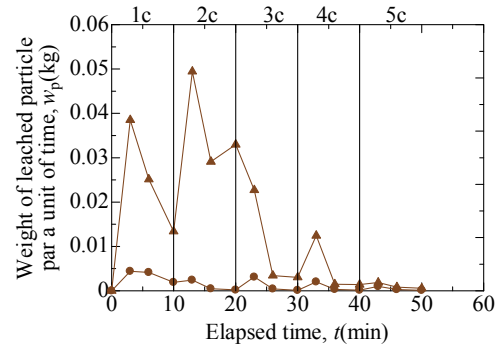


図 23 単位時間当たりの土粒子流出量の経時変化(S4:6)

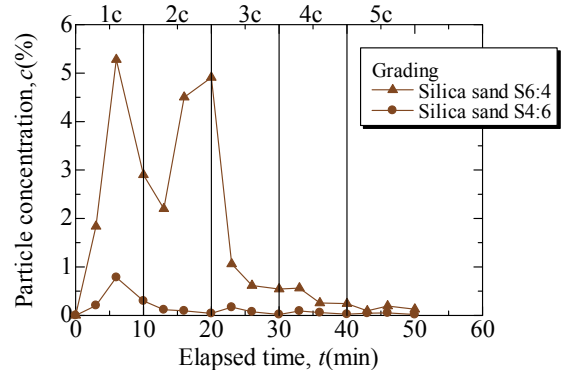


図 24 土粒子濃度の経時変化

図 22 に土粒子と水の累積流出量の経時変化を、図 23 に単位時間当たりの土粒子流出量の経時変化を、図 24 に土粒子濃度の経時変化を示す。図 22 より、S6:4 は S4:6 の約 10 倍の土粒子流出量があり、水流出量はほとんど差は見られなかった。つまり、粒度分布形状によって、同じ透水量でも土粒子の流出量が違うことが分かった。図 23 より、両試料とも全てのサイクルにおいて土粒子の流出量は初期が最大になっており、その後は減少傾向にある。図 24 より、S6:4 は濃度が大きく変動し、時間と共に濃度がゼロに近づいていくのに対し、S4:6 は初期状態から土粒子がほぼ流出せず、終始濃度はゼロ付近の値であった。

3.2.3 間隙水圧と流出量の関係

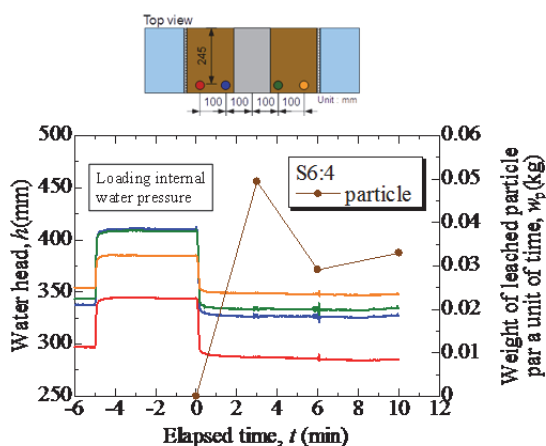


図 25 2 サイクル目における水面と流出量の単位時間当たりの流出量の経時変化(S6:4)

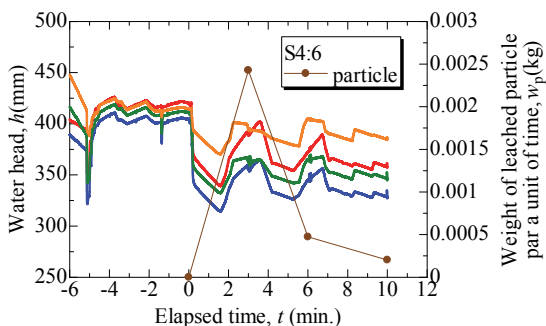


図 26 2 サイクル目における水面と流出量の単位時間当たりの流出量の経時変化(S4:6)

図 25, 26 に 2 サイクル目における水面と流出量の単位時間当たりの流出量の経時変化を示す。図 25, 26 より、S4:6 は S6:4 と比べて波形が安定していない。これは S4:6 の実験段階では土槽の裏面に水位を一定にさせる孔が開いておらず、人力で一定にさせており、水面のばらつきが出てしまったためと考えられる。また、両試料とも内水圧を载荷させた瞬間に急激に水圧が上がり、除荷した瞬間に急激に下がっている。そして定常状

態にはなるが、内水圧を载荷させる前よりも水位が約 20mm ほど下がることが分かった。この水位低下は他サイクルでも同様に見られた。また、両試料とも 3 分での流出量が一番多く、時間と共に流出量が減少する傾向にある。これは模擬管渠方向への水の流れが、内水圧により模擬管渠直上を中心に一時的に逆向きに流れることによって、2 号粒子間で発生していた目詰まりが解消され、内水圧の除荷と同時に模擬管渠方向への流れに変わったため、流出が急激に増加したと考えられる。

3.2.4 S6:4 における貫入強度実験

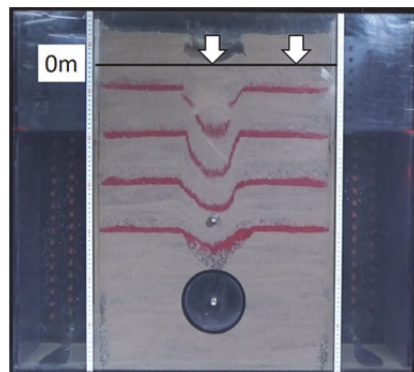


図 27 土検棒貫入位置

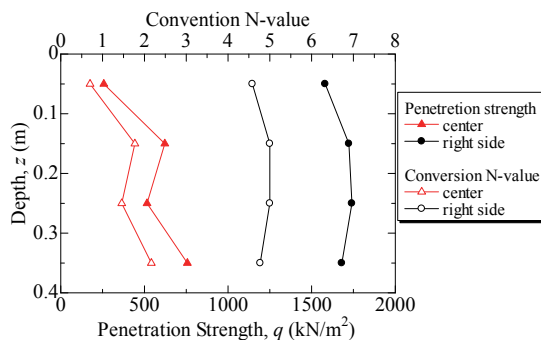


図 28 貫入強度、換算 N 値と深度の関係

図 27 に土検棒の貫入位置を、図 28 に貫入強度、換算 N 値と深度の関係を示す。図 27 に示す通り、地表面から深さ約 80mm の地点を 0m とし、貫入強度を算出した。図 28 より、中央部は右端部と比べて大きく強度が下がっており、深度 0.05m では中央部は右端部の約 6 分の 1 の強度であった。また換算 N 値としては約 1 であり、非常にゆるい状態である。つまり、内水圧が载荷されると模擬管渠周りだけではなく地盤全体がゆるむことが分かった。また、S6:4 の場合だと地表面からレーダー探査をすると、地表面から 80mm までしか空洞が存在せず、比較的小さい規模であると想定してしまうが、実際には空洞の下部はとてもゆるんでおり、空洞の危険度を過少評価してしまう可能性がある。そのため、ゆるんだ領域を事前に特定し、予防保全していくことが大事であると言える。

3.2.5 地盤内部の粒度分布の変化

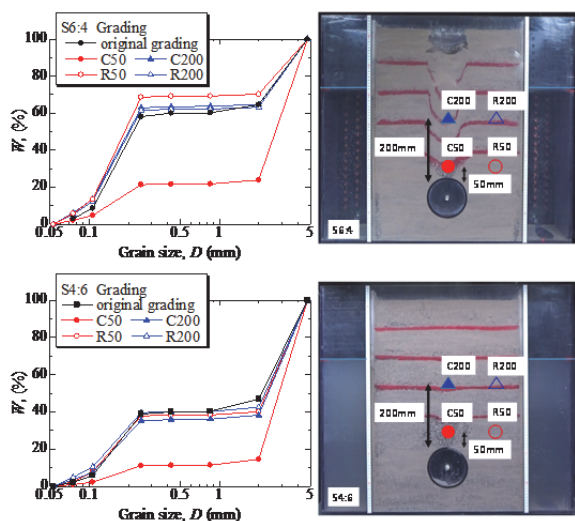


図 29 ふり分け試験結果(上) S6:4 (下) S4:6

図 29 にふるい分け試験結果を示す。図 29 より、両試料とも C50 の位置において大きく粒度の変化し、下に凸型の分布形状になった。また、S6:4 の C200 の位置の粒度分布は元の粒度分布と大きな差は見られなかった。これは、内水圧の載荷と除荷により、細かい土粒子の移動はあるが、移動収支がほぼ同じなため、元粒度との差が見られなかったと考えられる。また、S6:4 における 0.250mm 以下の粒径の割合は S4:6 と比べて 10%ほど多かった。つまり、粒度分布形状によって粗粒化の程度が異なることが分かった。

4. 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管渠周りの空洞発生と進展メカニズムについて、土槽実験によって検討を行った。また、その後地盤内の変状の特性を把握するために、画像解析や貫入強度実験などを実施し、変状の様子の定量的な評価を試みた。以降に得られた知見をまとめる。

- 1) 外水位一定実験より、粒度分布形状によって空洞発生、進展の挙動が異なることが分かった。また、階段粒度の珪砂では、時間と共に土粒子の流出量が減少し、水の流出量は増加した。これは、2号粒子間の目詰まりと、粗粒化領域の形成による地盤全体の透水係数の増加によるものだと考えられる。
- 2) PTV 画像解析より、粗粒化領域では、模擬管渠の直上の 60~120mm の点で移動量が多くなっていることが分かった。これは、2号粒子だけでは骨格を形成できず7号粒子の流出に伴い2号粒子も移動したと考えられる。
- 3) 内水位実験より、一定の外水位に加えて、内水圧が載荷されると土粒子の移動範囲が広がり、より地盤がゆるんでしまうため、内水圧による地盤の損傷は大きいと考えられる。

4) 貫入強度実験より、土槽中央部と右端では貫入強度が約 6 倍違う点が見られ、土槽中央部の換算 N 値は約 1~2 となり、とてもゆるんだ状態になっていることが分かった。つまり、小さい空洞が発生していても、その空洞の下部はとてもゆるんでおり、空洞の危険性を過小評価してしまう可能性が高いと言える。

5) ふり分け試験より、模擬管渠の直上では元粒度から大きく変化し、細かい粒子の流出が顕著であった。また、模擬管渠の直上以外の土槽中央部では粒度分布と元粒度に大きな差は見られなかった。これは、細かい土粒子の移動が頻繁にあるが、移動の収支が同じなため、大きな差は見られなかったためと考えられる。

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*, 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) 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) 国土交通省気象庁
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/heavyraintrend.html>
- 5) 温谷恵美, 前田健一, D. M. WOOD, 近藤明彦: 細粒分流出に起因する粒度変化を伴う粒状体の変形・破壊解析, 第44回地盤工学研究発表会, pp.1763-1764, 2009
- 6) 独立行政法人土木研究所: 土層強度検査棒による斜面の土層調査マニュアル(案), 2010.7.
- 7) 山田高弘, 前田健一, 近藤明彦: 粒状体の内部浸食の安定性に及ぼす粒度形状の影響と代表粒径を用いた評価の試み, 第48回地盤工学研究発表会, pp.1967-1968, 2013.
- 8) 兵動太一, 赤木寛一: 等価骨格間隙比に基づく薬液固結砂の力学特性評価の試み, *地盤工学ジャーナル*, Vol.8, No.1, 109-118