

## 陥没発生時における緩み領域の範囲予測 (Prediction of the extent of the loosening area before ground depression)

吉田千華<sup>1</sup>，前田健一<sup>2</sup>，小橋朋弥<sup>3</sup>，榊原淳一<sup>4</sup>

- 1 名古屋工業大学大学院・工学専攻環境都市プログラム・E mail address c.yoshida.620@stn.nitech.ac.jp
- 2 名古屋工業大学教授 高度防災工学センター
- 3 名古屋工業大学大学院・工学専攻社会工学系プログラム
- 4 JFE シビル株式会社

### 概 要

全国各地で地下埋設管の劣化を起因とする陥没災害が発生している。今後地下インフラの劣化により陥没災害の件数は増加することが考えられ、予防保全は急務である。既往研究では Terzaghi の緩み土圧理論を用いて陥没災害の発生要因である地盤の緩み領域を推定したが、緩み幅において実測値と予測値に乖離が見られた。本稿では JFE シビル株式会社の所有する音響トモグラフィ地盤探査手法を用いて、地下水位以深の空洞・緩みの可視化を試みた。また、粉体工学のファネルフローによる従流動部の幅の推定方法を参考に緩み領域推定の実験的検討を行った。音響トモグラフィ地盤探査手法を用いた結果、速度低下や減衰率の増加から空洞発生や緩み領域の有無が確認できた。また粉体工学の流動境界線の式を用いた結果、緩み領域の実測値と予測値に 2~3 倍の差がみられるが平行な直線関係にあることが判明した。

キーワード：陥没，緩み，音響トモグラフィ，浸透流

### 1. はじめに

全国で年間約 10,000 件の陥没災害が発生しており、原因の大半は地下埋設管の劣化に起因する欠損から管内への土砂の流出である。陥没災害は地表面からの予測が困難な一方で、ひとたび発生すれば被害が大きいため、予防保全への転換が求められている。現在は陥没災害を未然に防ぐために、地中レーダーを用いて路面下空洞探査が行われているが、地下水位以深の空洞判定や緩み領域を捉えることができない。そこで、JFE シビル株式会社の所有する音響トモグラフィ地盤探査手法を用いて、地下水位以下の空洞・緩みの可視化を試みる。

また、土砂の流出に伴う緩み領域の進展メカニズムの推定は重要な課題となっている。密に作られた地盤が土粒子の流出に伴い緩くなった領域を緩み領域とする。現地調査や蓄積された実験データでは Kenny の指標を用いて内部侵食発生可能性がないとされる場合においても、空洞や緩み領域の発生が確認されている。従って、緩み過程において内部侵食が発生するものと、発生しないものの 2 つに区別して考える必要がある。既往研究では、内部侵食が発生する場合の緩み領域について Terzaghi の緩み土圧理論を用いて推定が行われているが、内部侵食が発生しない場合においては緩み領域の推定が行われていない。本研究では、内部侵食が発生しない場合におい

て、粉体工学の貯槽排出挙動の観点から緩み領域の推定を行った。

さらに、蓄積された実験データより効率的かつ定量的な予防保全方法を提案する。陥没の進展は(1)欠損閉塞、(2)土砂の流出挙動、(3)内部侵食に大別され、構造力学、砂防工学等の知見を活かし複合的にとらえる必要がある。これらを基に陥没危険度評価を行い、危険度を分岐する指標の提案を行う。

本稿の流れを以下に示す。第 2 章では、JFE シビル株式会社の所有する音響トモグラフィ地盤探査手法を用いた地下水位以深の地盤可視化実験を行い、解析を行うことで土粒子の流出に伴う地盤内への影響を検討する。第 3 章では緩み領域の推定を検討する。3.1 節では、内部侵食が発生する場合の緩み領域推定を検討する。3.2 節では、内部侵食が発生しない場合の緩み領域の形成について粉体工学の観点から実験的検討を行う。第 4 章では、空洞形成過程における危険度評価フローを示す。4.1 節では構造力学を用いて欠損が閉塞するための閾値を示す。4.2 節では砂防工学の視点から土粒子の流出濃度について考察する。4.3 節では地盤工学の視点から内部侵食発生可能性についての指標を示す。4.4 節では 4.1~4.3 節の知見からまとめた危険度評価フローを示す。第 5 章では第 2~4 章で得られた知見からまとめを行う。

## 2. 音響トモグラフィ地盤探査手法を用いた地下水位以下の地盤の可視化

### 2.1 音響トモグラフィ地盤探査手法の概要

本手法は榊原・山本<sup>2)</sup>によって開発された高周波数の弾性波を用いた高精度な地盤調査手法である。音響トモグラフィ地盤探査手法は孔間トモグラフィ技術に分類され、孔間における地盤断面の構造や特性を可視化することができる。計測孔の一方に発振器を設置し、発振波として周波数を制御した疑似ランダム波を用いていることに特徴がある。疑似ランダム波とはパルス圧縮と呼ばれる信号増幅方法の一種である。送信波として連続波を用いることで時間軸上にエネルギーを分散させ、送信信号全体としてエネルギーを大きくすることができる。疑似ランダム波の例を図1に示す。発振波(a)と実際の受信は(b)の相関関数計算後の波形(c)からピーク値となる波の到達時間および到達波の受信エネルギーを取得する。これにより、従来の弾性波探査と異なり、速度分布および減衰率分布の2つの観点から地盤断面の可視化を可能とする。従来の弾性波探査では速度分布図のみの表現であったため、地盤の密度やガス等の判別が困難であったが、減衰率を扱うことで判別が容易となった。

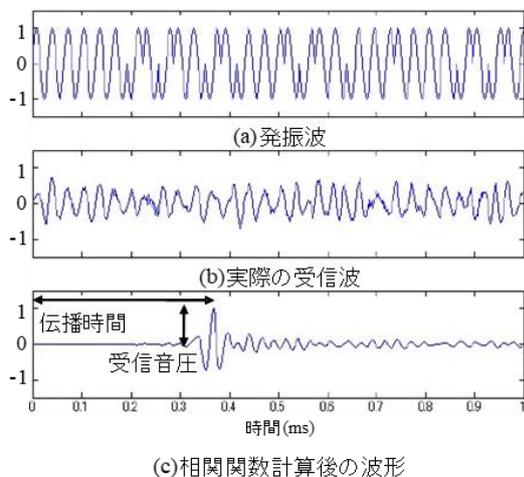


図1 疑似ランダム波の例

### 2.2 実験概要

図2に模型実験土槽の概略図を示す。土槽内部にセンサを挿入する塩ビ管を設置した。センサは埋設管中央部から5cm間隔に12個設置した(図3)。実験には珪砂7号を使用し、相対密度を80%となるように作成した。また、外水位条件を300mmとする。外水位は実地盤における地下水位を想定している。間隙水にはスギヤマゲン株式会社の大容量・高気密性のキミツ缶(図4)を用いて作成した脱気水を使用する。

土槽の作成方法を以下に示す。①模型実験土槽に脱気水を溜め、飽和状態の試料を水中落下させる。②10cm毎に気泡が確認できなくなるまで攪拌を行う。③パイプレ

ータを用いて、土槽外部から振動を与え締め固めを行う。④土槽作成後、外水位条件に設定する。外水位は実地盤の地下水位を想定しており、地下水位以深を飽和、地下水位以浅を不飽和として実験を行う。

音響トモグラフィの計測は実験開始から1分毎に行う。通常の音響トモグラフィ測定は発振センサがひとつのみであり計測時間がかかるため、本実験では同時多重発振方法を用いる。

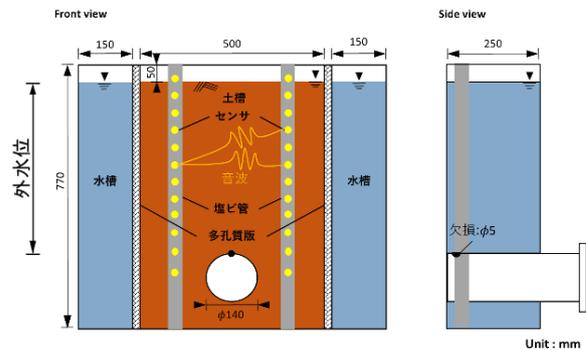


図2 模型実験土槽の概略図

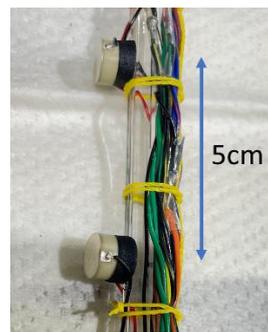


図3 使用するセンサ



図4 キミツ缶

### 2.3 実験結果及び考察

図5に実験開始0, 1, 3, 5, 10分後の模型土槽の様子、音響トモグラフィを用いた計測より得られた速度分布図と減衰率分布図を示す。音響トモグラフィは地下水位深を対象としているため、外水位300mm以深の波形データのみ解析する。速度分布図は速度が大きいほど赤色で小さいほど青色で示される。また、減衰率分布図は減衰率が大きいほど赤色で、小さいほど青色で示される。

実験開始1分後には、速度分布の変化は見られなかったが、減衰率分布において、欠損直上にあたる部分で減衰率の増加がみられた。土粒子の流出に伴い、欠損近傍の地盤が緩んでいるためだと考えられる。実験開始から1分後と3分後では局所的な速度低下や減衰率の増加は確認できないが、全体的に速度低下や減衰率の増加がみられることで、土粒子の流出および浸透流の発生が地盤内全体に影響を与えていると考えられる。実験開始から5分後には大幅な速度低下がみられた。欠損から200mm上部の位置においてアーチ状に縁取られるように減衰率の低下が確認できる。緩み範囲が欠損位置から上部に進展し、緩み領域の上端がアーチ状に形成されていると考え

られる。実験開始から 10 分後に空洞の発生が確認できた。欠損から 200mm から 300mm の位置に減衰率の低下がみられ、空洞の位置と一致している。しかし局所的な大幅な速度低下や減衰率の増大が見られなかった。確認できた空洞内が地下水で満たされているためだと考えられる。

減衰率の低下範囲が欠損近傍と緩み領域境界の 2 点に局所の変化がみられる。欠損近傍は土粒子が連続的に流出しており、その他の範囲においても同様に土粒子は流出するが、上部からの土粒子が流入し続けるため、減衰率低下の反映される範囲に差が生じていると考えられる。

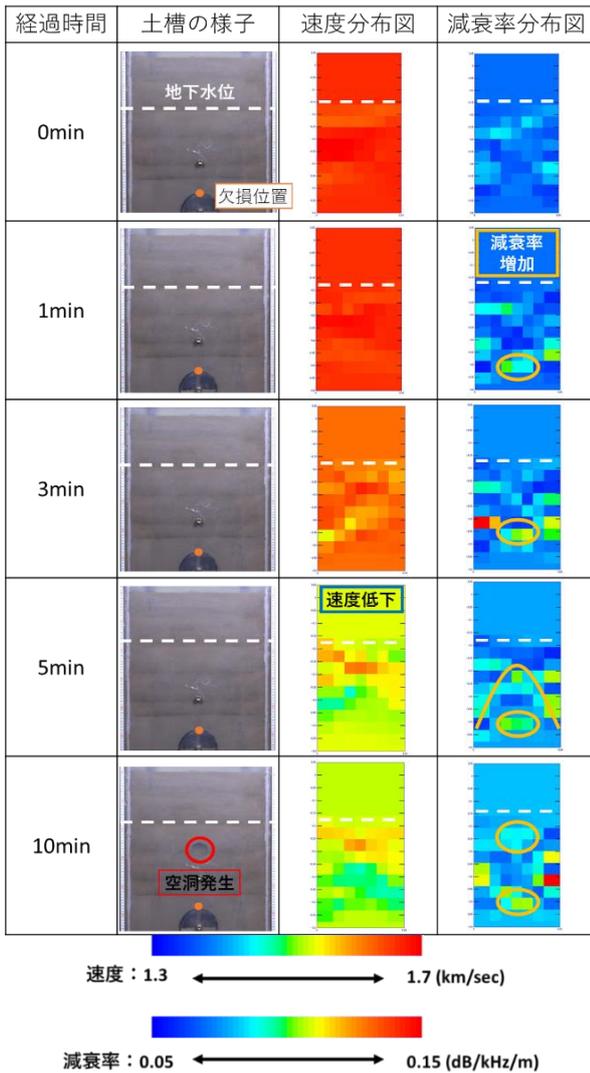


図 5 実験結果および解析結果

### 3. 空洞および緩み領域の範囲予測

#### 3.1 実験概要

図 6 に実験の概略図、表 1 に実験条件、図 7 に試料の粒度分布を示す。土槽下部に下水道管の模擬管渠を設置し、欠損を設置した。土槽作成時には欠損にゴム栓をし、ゴム栓を外すことにより欠損が生じた管渠周辺地盤を再現する。外水位、試料、欠損等の条件を変化させ実験を行った。S6:4 と S5:5 の混合珪砂を内部侵食が発生するケースとし、珪砂 7 号を内部侵食が発生しないケースとして

実験する。S6:4 は珪砂 7 号と珪砂 2 号を重量比 6:4 で混合した試料である。外水位は実地盤の地下水位を想定している。

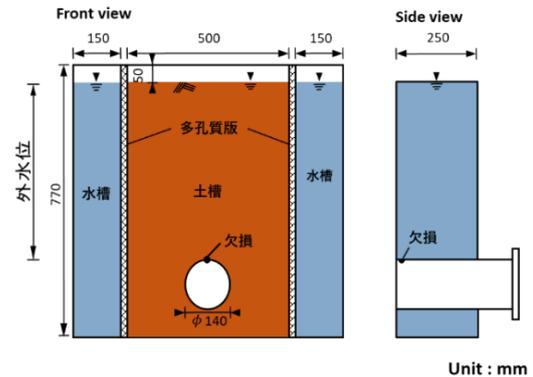


図 6 模型実験土槽の概略図

表 1 実験条件

	内部侵食発生○	内部侵食発生×
外水位 (mm)	100,200,300,400,500	100,300,500
試料	S6:4,S5:5	珪砂7号
欠損径 $d_s$ (mm)	円(5), スリット(7.5,10,20)	円(5)

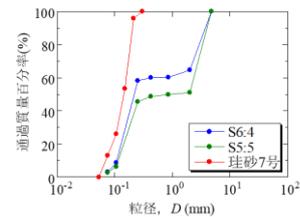


図 7 実験に用いた試料

#### 3.2 内部侵食発生時の緩み領域推定

図 8 に内部侵食発生時の様子示す。内部侵食とは、浸透流の影響により地盤の間隙中を一部の粒形の小さい粒子が通り抜け、粗粒化が見られる。



図 8 内部侵食発生時の欠損近傍の様子

##### 3.2.1 緩み体積推定

管路からの累積流出土量により、緩み体積  $V$  を求める。緩み体積は密詰めであった地盤が内部侵食により緩みめになったと捉えて間隙比の変化より、式(1)により求める。

$$V = \frac{M}{\left(\frac{1}{1+e} - \frac{1}{1+e_{\max}}\right)} \quad (1)$$

ここで、乾燥土の累積流出土量  $M$ 、間隙比  $e$ 、最大間隙

比 $e_{max}$ である。図9に式(1)により求めた値と実測値の関係を示す。予測値と実測値がおおよそ近い値をとることが判明した。よって、式(1)が緩み体積を求めるために適していると考えられる。

### 3.2.2 Terzaghi の緩み土圧理論を用いた緩み領域推定

図10に実験時の様子を示す。緩み幅推定についてはTerzaghiの緩み土圧理論<sup>3)</sup>を適用する。これはトンネル工学において、トンネル掘削に伴う緩み土圧とその範囲を算出できるものである。図11に概念図を示す。緩み幅 $B_0$ は式(2)より算出する。

$$B_0 = R_0 \cot\left(\frac{\pi/4 + \phi/2}{2}\right) \quad (2)$$

ここで、 $R_0$ はトンネル内径、 $\phi$ は土砂の内部摩擦角である。欠損形状により緩みの元が異なるため、欠損形状が円形の場合は欠損半径、スリットの場合は管渠半径をトンネル内径 $R_0$ に代入した。図12に式(2)により緩み幅の予測値と実測値の関係を示す。実測値と予測値に乖離がみられた。この理論を適用するにあたり、実測値の緩み幅を整理すると、外水位が上昇すると緩み幅が増加し、水位が上昇・加工を繰り返す場合においても緩み幅がさらに増加することが判明した。

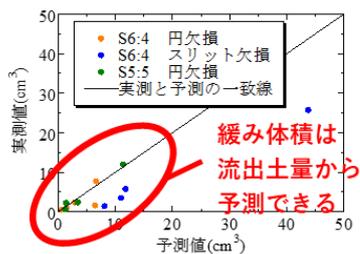


図9 緩み体積の予測値と実測値の関係



図10 実験時の様子

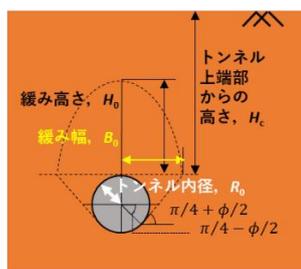


図11 Terzaghiの緩み土圧理論における概略図

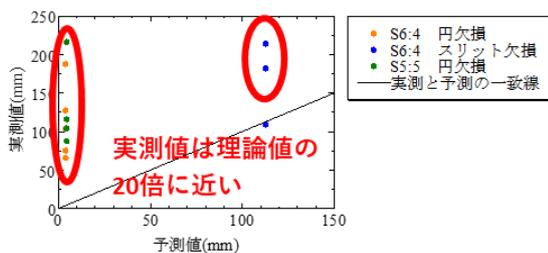


図12 緩み幅の実測値と予測値の関係

### 3.3 内部侵食発生しない場合の緩み領域推定

実験時の様子を図13, 14に示す。内部侵食が発生しない場合においても、土粒子の流出に伴い緩み領域が発生していることが確認できる。土粒子の流出挙動に着目すると、欠損に対し鉛直方向に土粒子の動きがみられ、緩み領域は鉛直方向に伝播した。この土粒子の流出挙動が粉体工学のファネルフローに類似している。

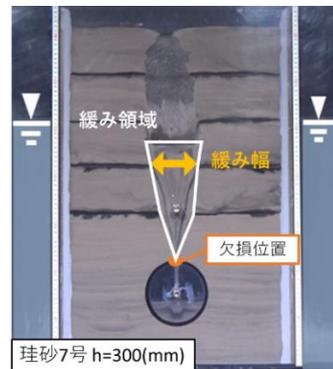


図13 実験時の様子

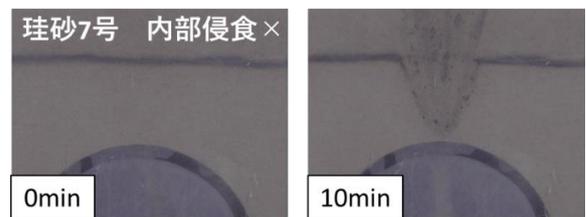


図14 欠損近傍の様子

### 3.3.1 粉体工学用いた緩み領域推定

ファネルフローとは粉粒体貯槽における排出時の粉粒体の流出挙動のひとつであり、主流動部と流出しにくい従流動部、静止部が存在する(図15)。本稿において、緩み領域はファネルフローにおける主流動部と従流動部として考える。三輪ら<sup>4)</sup>の流動境界線の式(3)を適用する。

$$B/D_0 = 1.55\sqrt{H/D_0} \quad (3)$$

従流動部の幅を緩み幅と仮定し、緩み幅 $B$ について式(3)に示すように、欠損径 $D_0$ 、層高 $H$ を代入した。実測値は流動境界線の式と同様に層高と従流動部の幅は直線関係にあるといえる(図16)。その値は流動境界線の式よりも大きく、その差は2~3倍であったが、平行な直線となっている。

図17に実験開始1分後と10分後の欠損付近のPIV解析結果を示す。すべてのケースにおいて欠損直上に鉛直下向きに土粒子の動きがみられた。同時刻における土粒子の流速を比較すると、外水位が高くなるほど流速が大きい。また、経時変化を比較すると10分後の方が流速は大きい。粉体工学において流出速度は層厚に無関係で一定とされている。しかし、外水位条件や経時変化による土粒子の流出に速度差が生じた。

粉体工学の重力流動には浸透流が考慮されていない。したがって、緩み領域における緩み幅の増大は外水位増

加に伴う浸透流の流速増加による影響だと考えられる。

また、式(3)について $\alpha=1.55$ とし、この $\alpha$ が外水位による変数だと仮定すると、外水位条件が 100mm, 300mm, 500mm で $\alpha=2.96, 3.44, 4.31$ と導かれた。これらの値を使うことで緩み幅を推測できると考える。今後、緩み高さを推定し、緩み領域の推定を行う必要がある。

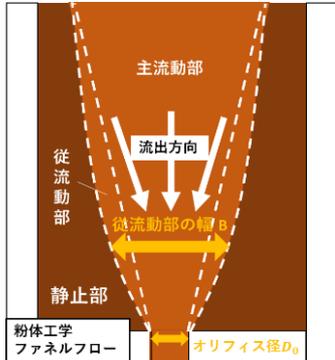


図 15 粉体工学のファネルフローの概略図

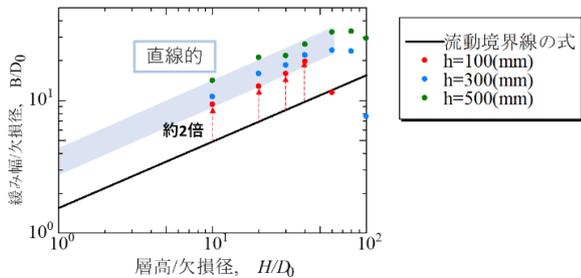


図 16 層高と緩み幅の関係

#### 4. 空洞形成過程における危険度評価フローの提案

##### 4.1 欠損部における閉塞の有無

実験から得られた空洞形状は4つに大別され(図 18), 空洞形状指標が大きいほど大規模な空洞が発生しており、陥没に対する危険度が高い。大規模な空洞とそれ以外の空洞形状を分けるのは欠損部での閉塞の有無であると考えられる。欠損閉塞の有無を判別する指標として、欠損径と 95%粒形の比 $d_s/D_{95}$ を導入する。スリット砂防ダム設計指針の考え方<sup>67)8)9)</sup>を応用し、大粒子(試料の95%粒形)により欠損が閉塞する際の粒子数を求めている。図 19 に空洞形状指標と $d_s/D_{95}$ の関係を示す。 $d_s/D_{95} \leq 1.5$ の場合、大規模空洞が発生せず欠損は閉塞している。これは構造的観点からも土粒子間をヒンジとして考えると、粒子数が2個以下の時に安定であることに当てはまる(図 20)。以上から、 $d_s/D_{95} \leq 1.5$ を欠損閉塞条件として妥当な指標であるといえる。

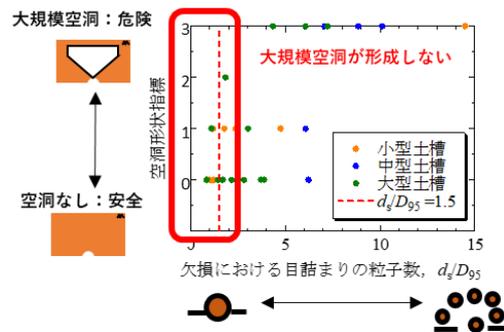


図 19 空洞形状指標と $d_s/D_{95}$ の関係

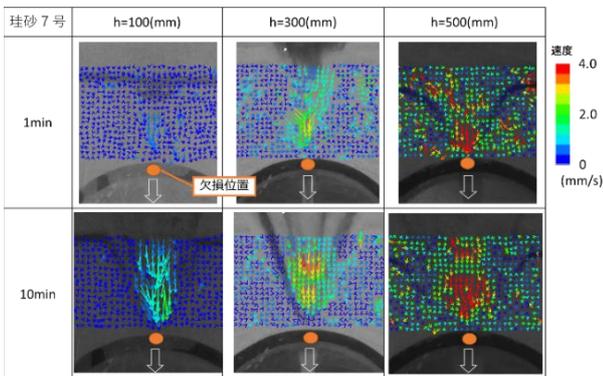


図 17 PIV 解析における欠損近傍の土粒子の流速

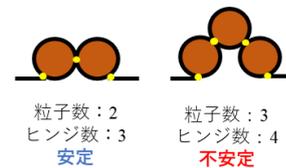


図 20 目詰まり構造の安定性

##### 4.2 管路への土砂の流出挙動

図 21 に実験で得られた土粒子濃度(土粒子の流出量を水と土粒子の流出量で除したものを示す。土粒子濃度は欠損解放直後に最大値(最大土粒子濃度とする)をとり、時間経過とともに収束する。最大土粒子濃度が高いほど、大規模空洞が発生する。空洞形成の規模を判別する指標として、砂防工学における土石流・掃流状集合流動を導入

形状指標	0 : 空洞なし	1 : 三日月形空洞	2 : 縦型空洞	3 : 扇形空洞
実験結果				
特徴	空洞なし	欠損部が閉塞、一部の粒子が流出	欠損部閉塞なし、空洞進展が途中停止	継続的な排土
	安全	←	→	危険

図 18 実験結果より得られた空洞形状

する(図 22)。大規模空洞においては土石流を，三日月形空洞においては掃流状集合流動の挙動を適用する。高橋<sup>10)</sup>によれば土石流，掃流状集合流動発生時の最大土粒子濃度， $C_*$ ， $C_l(\%)$ は式(4)，(5)から求められる。

$$C_* = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (4)$$

$$C_l \approx 0.4C_* \quad (5)$$

ここで， $\sigma$ ， $\rho$ は土と水のそれぞれの密度， $\theta$ は勾配の傾斜角， $\phi$ は土砂の内部摩擦角である。これらより求めた最大土粒子濃度と実験値を比較したものを図 13 に示す。三日月形空洞発生時には実測値が最大土粒子濃度 $C_l(\%)$ を下回り，大規模空洞発生時には実測値が $C_l(\%)$ を上回っている。よって，試料固有の最大土粒子濃度が掃流状集合流動時の最大土粒子濃度 $C_l(\%)$ を上回っている場合は大規模空洞が発生するといえる。

### 4.3 内部侵食発生可能性

最大土粒子濃度を下回り，三日月型空洞形成時に内部侵食がみられた(図 8)。

内部侵食に対する地盤の安定性の評価には Kenny の指標<sup>11)</sup>を適用する。Kenny らは，粒径 $D$ の移動を阻む粒子(粒径 $D$ の 4 倍粒径 $4D$ )の含有率( $H$ )と粒径 $D$ の含有率( $F$ )の比 $H/F < 1$ のとき内部侵食が発生すると述べている。なお，内部侵食が発生する小粒子の含有率は 30%であるため，この範囲について検討する。

図 24 に実験試料に Kenny の指標を適用したものを示す。30%粒径までの範囲で $H/F$ (赤線)が安定境界である $H/F=1$ (青線)を下回っている場合，内部侵食が発生するといえる。S6:4，礫では内部侵食が発生し，洗い山砂では内部侵食が発生しない。

### 4.4 危険度評価フロー

以上の知見よりまとめた陥没災害における空洞形成過程の危険度評価フローを図 25 に示す。欠損発生後，欠損径と試料の 95%粒形の比から欠損閉塞条件を判定する。続いて，最大土粒子濃度から空洞の規模を判定する。大規模空洞発生時には粉体工学の流動境界線の式から緩み幅を算出できると考えられる。欠損が閉塞したあるいは，最大土粒子濃度が理論値を下回る場合は Kenny の指標を用いて内部侵食発生可能性を検討する。内部侵食が発生すると三日月型空洞が形成され，Terzaghi の緩み土圧理論から緩み領域を算出できると考えられるが，正確な緩みの元を捉えることが必要である。内部侵食が発生しないと判断されると空洞無しとなる。空洞形成過程のフローを用いることで，空洞の規模や緩み領域を推測することができ，陥没災害の予防保全をすることができると考えられる。

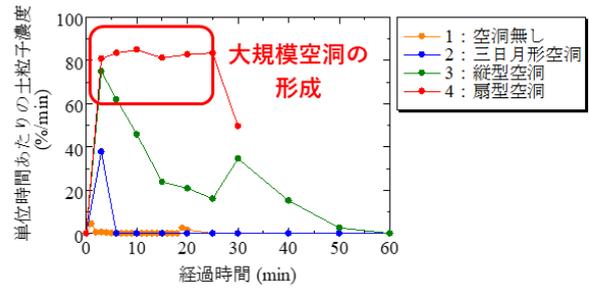


図 21 空洞形状別の土粒子濃度の実測値

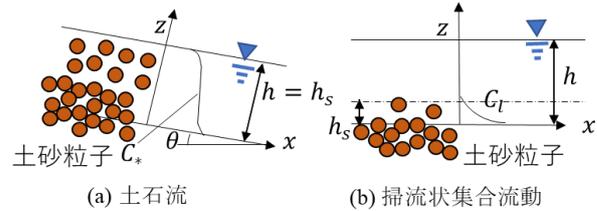


図 22 土砂の流出挙動のモデル化

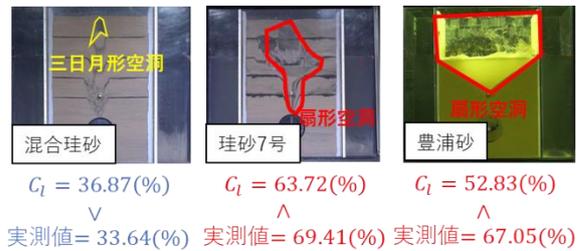


図 23 最大土粒子濃度による空洞規模の評価

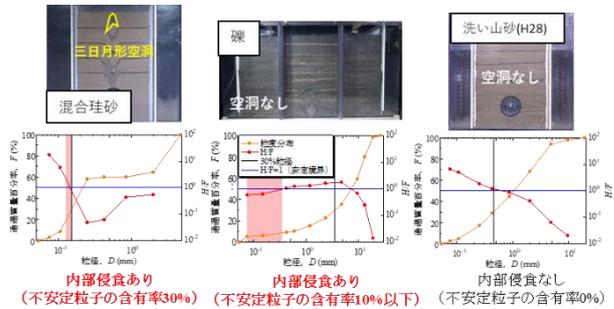


図 24 実験試料における内部侵食発生安定性の評価

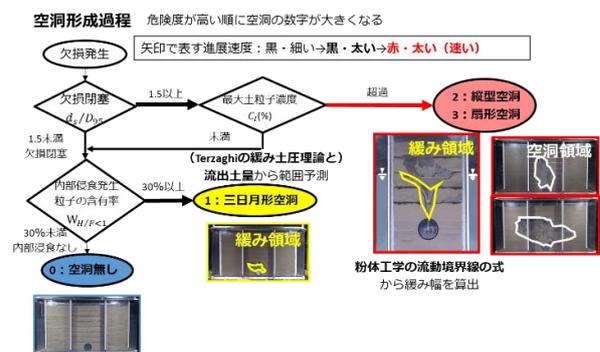


図 25 陥没災害に対する危険度評価フロー

## 5. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) 欠損近傍の土粒子流出部分では減衰率が増加し地盤が緩んでいることが確認できた。空洞発生が確認できた地盤範囲では初期値に比べ、速度低下や減衰率増加が確認できた。音響トモグラフィ地盤探査手法を用いることで、地下水位以深の空洞発生や地盤の緩みの有無を発見できると考える。
- (2) 土粒子の流出に伴う緩み領域の形成は、内部侵食が発生する場合とそうでない場合の2つに区別できる。内部侵食発生時は、Terzaghiの土圧理論を用いて緩み幅の推定を行ったが、実測値と予測値に乖離がみられた。したがって、緩みの元を正確につかみ、その値をトンネル内径に代入することが必要であると判明した。内部侵食発生しない場合において、土粒子の流出挙動は粉体工学のファネルフローに類似している。緩み幅の推定は粉体工学の流動境界線の式を用いると実測値と予測値には2~3倍の差がみられ、外水位条件や経時変化に伴う土粒子の動きに速度差が発生した。以上のことから、外水位変化に伴う浸透流の速度増加が緩み幅の増大を促進していると考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 小橋朋弥, 前田健一, 林英璃奈: 内水圧が作用する埋設管渠周辺地盤の内部侵食が陥没発生リスクに及ぼす影響, 第35回中部工学シンポジウム, pp.39-44, 2023.08.07
- 2) 榊原淳一, 山本督夫: 高周波数の弾性波を用いた高精度地盤調査手法の開発, 土木学会論文集, Vol.65, No.1, pp.97-106, 2009
- 3) シールド工法入門, シールド工法入門編集委員会, 社団法人地盤工学会, 1992, 261pp
- 4) 三輪茂雄: 貯槽における粉粒体の挙動, 化学工学, 1973, 37巻8号, p763-769
- 5) 三輪茂雄, 神田正記: ホッパー内の粉粒体の流動について, 粉体工学研究会誌, 1973, 10巻6号, p324-329
- 6) 土石流・流木対策設計技術指針解説
- 7) 池谷浩, 上原信司; スリット砂防ダムの土砂調節効果に関する実験的研究, 砂防学会誌第32巻3号, pp.37-44
- 8) 堀内成郎, 田畑茂清, 小野慎吾, 伊藤隆郭, 水山高久; 格子型砂防堰堤の格子上方から流出する土砂の制御に関する実験的研究, 砂防学会誌第64巻1号, pp.11-16
- 9) 片出亮, 香月智, 嶋丈示; 巨礫粒径分布の砂防堰堤閉塞確率に及ぼす影響, 構造工学論文集 A pp.209-220
- 10) 高橋保; 土石流発生のメカニズム (2), 砂防学会誌, 1992年45巻3号, pp.1-21
- 11) Kenny, T.C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G.I., Omanege, G.N., and Ume, C.A.: Controlling construction sizes of granular filters, Can.Geotech J.22,1985

---

---

## Prediction of the extent of the loosening area before ground depression

Chika YOSHIDA<sup>1</sup>, Kenichi MAEDA<sup>2</sup>, Tomoya KOBASHI<sup>3</sup>, Junichi SAKAKIBARA<sup>4</sup>

- 1 Nagoya Institute of Technology, Graduate School, Department of Civil Engineering Program
- 2 Nagoya Institute of Technology, Professor, Advanced Disaster Prevention Engineering Center
- 3 Nagoya Institute of Technology, Graduate School, Department of Social Engineering Program
- 4 JFE Civil Engineering & Construction Corp.

### Abstract

Ground depression caused by the degradation of buried pipes occur in each place in Japan. It is thought that the number of ground depression increases by the degradation of the underground structures in future, and the preventive maintenance is needed. Previous studies have used Terzaghi's formula to estimate the area of loosening area, but there was a discrepancy between the measured and predicted values in terms of the loosening area. This paper attempts to visualize cavities and loosening area blow the groundwater using the acoustics tomography owned by the JFE Civil Engineering & Construction Corp. In addition, this paper attempt to estimate the loosening area with reference to funnel flow in powder technology. The result of acoustics tomography confirmed the existence of cavities and loosening area based on the decrease in velocity and the increase in attenuation rate. The result of using the flow boundary equation of the powder technology showed that the measured and predicted loosening area have a parallel linear relationship, although there is a difference of 2 to 3 times.

Key words: ground depression, loose, acoustics tomography, infiltration flow